

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES DE LAVADO DE AUTOS**



**UNIVERSIDAD
DE LA COSTA**
1970
VIGILADA MINEDUCACIÓN

DIEGO JOSÉ PLATA SOLANO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA – ATLÁNTICO

2020

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUAS
RESIDUALES DE LAVADO DE AUTOS**

DIEGO JOSÉ PLATA SOLANO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Civil

Director

FAUSTO CANALES

Codirector

RUBEN CANTERO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

BARRANQUILLA – ATLÁNTICO

2020

DEDICATORIA

Dedicamos nuestro trabajo en especial a nuestros familiares y amigos, los cuales siempre nos brindaron su apoyo incondicional y siempre estuvieron con nosotros en los momentos, alentándonos en los momentos más necesarios.

A todos aquellos profesores, auxiliares de laboratorio y estudiantes que hicieron parte de forma directa e indirecta con el proyecto, que sin ellos el camino hubiera sido mucho más difícil, y que siempre brindaron una mano ayuda cuando se era necesitada.

Resumen

En la presente investigación se propone diseñar y evaluar un sistema de recuperación de aguas residuales producto del lavado de vehículos basado en tecnologías coagulación-floculación, filtros de carbón activado y ozonificadores a escala de banco o laboratorio, con una fase inicial in situ la cual pasa por una trampa de grasa como fase inicial. La meta de este trabajo es analizar el agua resultante del tratamiento por medio de ensayos y pruebas para la obtención de ciertos parámetros o características, tanto químicas como físicas, del agua y lograr contraponerlos, no solo con resultados de otras investigaciones similares, sino también con las normas colombianas de que rigen el vertimiento y reúso de aguas residuales, e incluso, agua potable, con tal de comprobar el potencial de uso del agua resultante del tratamiento.

Palabras clave: Agua residual, recuperación, reúso, coagulación-floculación, carbón activado, ozonificadores, normas colombianas

Abstract

In this research, it is proposed to design and evaluate a system for the recovery of wastewater product of vehicle washing based on coagulation-flocculation technologies, activated carbon filters and ozonators on a bench or laboratory scale, with an initial phase in situ which passes by a grease trap as an initial phase. The goal of this work is to analyze the water resulting from the treatment through trials and tests to obtain certain parameters or characteristics, both chemical and physical, of the water and to be able to contrast them, not only with the results of other similar investigations, but also with Colombian standards that govern the discharge and reuse of wastewater, and even drinking water, in order to verify the potential use of the water resulting from the treatment.

Keywords: Waste water, recovery, reuse, coagulation-flocculation, activated carbon, ozonators, Colombian standards

Contenido

Lista de tablas y figuras	8
1. Introducción	11
2. Justificación	14
3. Objetivos	16
3.1 Objetivo General	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Marco teórico	17
4.1 Aguas residuales.....	17
4.2 Recuperación del agua o agua reciclada	18
4.2.1. Tratamiento de agua en aguas residuales provenientes de lavado de vehículos.....	21
4.2.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas.	26
4.2.3. Parámetros a evaluar	29
4.3. Normativa Colombiana sobre el tratamiento y la reutilización del agua.	35
5. Metodología	39
5.1. Descripción del sistema.....	41
5.1.1. Toma de muestra local	41
5.2. Fase de coagulación - Flocculación	43
5.2.1. Procedimiento del ensayo de jarras.....	44
5.3. Ensayos y parámetros a evaluar	50
5.3.1. pH.....	50
5.3.2. Color	52
5.3.3. Turbidez	54

5.3.4.	Demanda Química de <i>Oxígeno</i> (DQO).....	56
5.3.5.	Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).....	61
5.3.6.	Oxígeno disuelto	64
5.3.7.	Conductividad, Salinidad y Total Sólidos Disueltos (<i>TSD</i>).....	65
5.3.8.	Alcalinidad.....	67
5.3.9.	Aceites y grasas.....	71
5.3.10.	Conteo bacteriano por método de Número Más Probable (NMP).....	76
5.4.	Diseño y ejecución del tratamiento de aguas residuales del lavado.....	84
6.	Caso de estudio	89
7.	Resultados y discusión.....	91
	Conclusiones.....	113
	Referencias.....	117
	Anexos	121

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1 Artículos sobre recuperación de aguas residuales provenientes de lavado de autos.	23
Tabla 2 Sugerida por la norma para registrar los resultados.....	49
Tabla 3 Volúmenes de reactivos y de muestra necesarias para cada tipo de tubo, siendo los valores remarcados los que utilizaremos para este ensayo. (American Health Public Association et al., 2017, Sección 5220C)	57
Tabla 4 Cantidad de volumen necesario dependiendo de la concentración de DBO esperada. (VELP Scientifica, 2013).....	62
Tabla 5 Preparación del caldo de Lauril Triptosa. (American Health Public Association et al., 2017, Sección 9221B).....	77
Tabla 6 Índice de NMP y confianza límite del 95% para varias combinaciones de tubos positivas. (American Health Public Association et al., 2017, Sección 9221C)	82
Tabla 7 Resultados de muestreos previos al tratamiento.	91
Tabla 8 Resultados del ensayo de jarras.	93
Tabla 9 Resultados del análisis de las muestras de agua residuales en las distintas etapas de tratamiento.	95
Tabla 10 Simplificada.....	96
Tabla 11 Resultados del agua ya tratada teniendo en cuenta el tiempo de operación del ozono.	102
Tabla 12 Resultados de conteo de coliformes por el método de número más probable.....	103
Tabla 13 Variaciones de los resultados de conteo de coliformes conforme al tiempo de operación del ozono.....	104
Tabla 14 Comparación de aguas residuales con la de otros autores.	106
Tabla 15 Comparativa de resultados del agua residual tratada con la norma de vertimiento.....	107
Tabla 16 Comparativa con la norma de vertimiento y el resultado de otros autores.....	108
Tabla 17 Comparativa de resultados del agua residual tratada con la norma reuso colombiana.	110
Tabla 18 Comparativa con la norma de agua potable colombiana.	111

Figuras

Figura 1 Esquema de la metodología a usar en el sistema de recuperación de aguas provenientes de lavado de autos	40
Figura 2 Agua residual antes del proceso de coagulación-floculación.....	43
Figura 3 Arreglo del ensayo de jarras llenas de muestra de agua residual	44
Figura 4 Solución al 1% de cloruro férrico, nuestro agente coagulante	45
Figura 5 Preparación de las jeringas llenas de la solución al 1% cloruro férrico	46
Figura 6 Ensayo de jarras en plena inicio de ejecución	46
Figura 7 Etapa de mezclado lento.....	47
Figura 8 Etapa de reposo, donde se espera que los coloides formados durante el mezclado se sedimenten	48
Figura 9 Etapa de recolección de muestra	48
Figura 10 Medidor de pH EcoSense 100A	52
Figura 11 Chercker Hanna para la medición del color del agua.....	54
Figura 12 Checker del color de agua en plena lectura.....	54
Figura 13 Turbidímetro portátil tomando lecturas de turbidez.....	56
Figura 14 Cubetas de vidrio para muestras de agua	56
Figura 15 Termo reactor usado para calentar los tubos con los reactivos y las muestras.....	60
Figura 16 Tubos llenos de reactivos y muestra.....	61
Figura 17 Botellas de vidrio color ámbar junto a sensores DBO EVOuente.....	63
Figura 18 Montaje completo de las botellas para el ensayo de DBO5	63
Figura 19 Medidor de Oxígeno disuelto EcoSense DO 200A	65
Figura 20 Medidor de conductividad y salinidad Ecosense EC 300A.....	67
Figura 21 Ácido clorhídrico con una concentración de 0.02N	69
Figura 22 Indicador de pH bromocresol verde	70
Figura 23. Bureta de vidrio briscolado, volumen de 50 mL	70
Figura 24 Muestras con bromocresol verde antes (Izquierda) y después (Derecha) del cambio de pH debido al ácido clorhídrico.....	71
Figura 25 Muestra acidificada a menos de 2.8 pH.....	74
Figura 26 Bomba de vacío.	75

Figura 27 Filtro de papel, diámetro 11 cm.....	75
Figura 28 Aparato de extracción, soxlet, con un frasco de extracción de 125 mL.....	76
Figura 29 Tubo lleno de Caldo Lauril Sulfato (Caldo Lauril Triptosa-LTB) con tubos detrás llenos de Caldo Bilis Verde Brillante 2%.....	79
Figura 30 Muestras para ensayo de conteo de coliformes en frascos con previa esterilización..	81
Figura 31 Caldo Bilis Verde Brillante 2%.....	81
Figura 32 Caldo Lauril Triptosa-LTB.....	82
Figura 33 Plano del lavadero de autos, el cual es nuestro caso de estudio.....	84
Figura 34 Esquema de la primera parte del sistema de tratamiento.....	85
Figura 35 Trampa de grasa en funcionamiento.....	85
Figura 36 Esquema de la segunda parte del sistema de tratamiento, ya en el laboratorio.....	86
Figura 37. Muestra durante y al finalizar el proceso de coagulación-floculación.....	87
Figura 38 Fase final del sistema de tratamiento de agua residual.....	88
Figura 39 Ubicación de la ciudad de Barranquilla en Colombia.....	89
Figura 40 Ubicación de la ciudad de Barranquilla en el departamento del Atlántico.....	89
Figura 41 Sector donde se encuentra nuestro caso de estudio en la ciudad de Barranquilla.....	90
Figura 42 Alrededores de la ubicación de nuestro caso de estudio.....	90
Figura 43 Absorbancia (ABS) vs dosis de coagulante (mg/L).....	94
Figura 44 pH vs dosis de coagulante (mg/L).....	94
Figura 45 Color (PCU) vs dosis de coagulante (mg/L).....	94
Figura 46 Alcalinidad (mg CaCO ₃) vs dosis de coagulante (mg/L).....	95
Figura 47 Comportamiento de los parámetros en las 3 etapas del tratamiento.....	97
Figura 48 De izquierda a derecha: Agua luego de la trampa de grasa, luego del proceso de coagulación-floculación y tratamiento completado.....	101
Figura 49 Agua residual tratada.....	103
Figura 50 Concentración de coliformes (NMP/100 ml).....	105

1. Introducción

A medida que los astrónomos se han enfocado en la búsqueda y el estudio de nuevos planetas, ellos esperan descubrir evidencia de la presencia de agua en estos cuerpos celestes distantes, dado que el agua es sin lugar a duda la sustancia de mayor importancia para la existencia de la vida y su sustento en la Tierra como la conocemos. Todos los organismos que nos son familiares están en su mayoría compuestos en agua y viven en ambientes compuestos de la misma. El agua es el medio biológico de la tierra y, posiblemente, sea también el de otros planetas. (Campbell & Reece, 2005)

A pesar de su vital importancia, el agua se ha puesto prácticamente en un segundo plano en comparación con otras problemáticas como algunos contaminantes del ambiente, o amenazas ambientales de mayor cobertura como lo es el calentamiento global. Por lo cual problemas como la escasez de fuentes de agua dulce, el aumento de fuentes hídricas contaminadas y el desperdicio y mal uso de aguas potables, especialmente debido a procesos productivos, son situaciones que generan gran preocupación.

El lavado de vehículos es una de las industrias que generan un mayor impacto ambiental en cuanto a uso de agua nos referimos, ya que el uso desmedido de agua potable y la descarga de aguas residuales, resultado de ejercer la actividad económica anteriormente mencionada, se dan sin realizar tratamiento alguno sobre las mismas (Carrasquero *et al.*, 2015). Este tipo de actividad se encuentra en aumento debido al aumento consecuente de vehículos, además que la inversión que necesitan este tipo de empresas es pequeña, sobre todo si se cuenta con aguas subterráneas disponibles.

La ciudad de Barranquilla cuenta con una cantidad significativa de este tipo de negocios y aún se encuentra en aumento, gran parte debido al constante crecimiento en la cantidad de vehículos cada año en la ciudad y a la gran disponibilidad de aguas subterráneas en Barranquilla. Pero en ellos ocurren distintas circunstancias que generan una problemática ambiental grave: la alta informalidad en este tipo de establecimientos, donde muchos de ellos ni siquiera cuentan con un local, sino que su operación se da en pleno espacio público, lo cual termina usualmente con descargas de agua sin tratamiento alguno y muchas de estas estas descargas no se realizan en alcantarillado de la ciudad, sino en las vías de la ciudad, y al poco control sobre estas empresas ofrecido por entidades públicas como la alcaldía de Barranquilla, generando también un alto consumo de agua, promediado en 120 m³ mensuales, afirma así la triple A. (Cantillo Lastre, 2016)

A pesar que distintas autoridades ambientales, e incluso la policía nacional con el nuevo código de policía han tratado de contrarrestar el desperdicio de agua, muchas de estas empresas eligen seguir con el mismo comportamiento, ya que para ellos no resulta lucrativo cumplir estas regulaciones. Gran evidencia de esto se encuentra en el artículo web de (Patiño, 2017), donde se informa que al menos 63 de estos lavaderos fueron multados en el mes de octubre del año 2017 debido a la violación de los artículos 92 y 100 del código policía, los cuales prohíben el vertimiento de afluentes residuales a la vía pública.

En respuesta a los desafíos emergentes debido a la escasez de agua, muchas regiones del mundo están explorando el uso de fuentes de agua alternativas. La reutilización del agua, tanto para usos con aguas potables o no potables, es una de esas alternativas. Se considera cada vez más como una solución potencialmente importante para hacer frente a la constante presión sobre el uso de

los recursos hídricos mundiales y como parte de un enfoque más integrado e interesante para gestionar el ciclo hidrológico y apoyar la economía circular. (Smith *et al.*, 2018)

2. Justificación

El agua es el recurso natural más importante para la vida en la Tierra. A pesar de su vital importancia, el agua se ha puesto prácticamente en un segundo plano en comparación con otras problemáticas tales como el calentamiento global (Pinto *et al.*, 2017). Aun así, asuntos como la escasez de fuentes de agua dulce, el aumento de fuentes hídricas contaminadas y el desperdicio y mal uso de aguas potables, especialmente debido a procesos productivos, son situaciones que generan gran preocupación.

Una de estas industrias que en los últimos años ha tenido un gran crecimiento debido al constante aumento de vehículos y que podría ser una de las más beneficiadas al implementar prácticas de manejo y reúso de agua es la del lavado de vehículos, esto es debido a su gran impacto ambiental, tanto por el uso excesivo de aguas potables como las descargas de efluentes, muchas de estas sin algún tipo de tratamiento. (Carrasquero *et al.*, 2015)

En países en vías de desarrollo, como Colombia, esta problemática es mucho más severa, debido a que políticas de manejo de aguas residuales y reutilización de aguas residuales son muy recientes y aún tienen falencias importantes. En el libro Derecho de aguas, el capítulo “*El reúso de aguas residuales en Colombia*” más concretamente, de la autora (Álvarez Pinzón, 2017a) nos indica como a pesar de que el país en las últimas tres décadas el país ha expedido políticas y normas enfocadas al estímulo de la reutilización de las aguas, pero como tal, el estado no determinó legalmente los requisitos y condiciones para hacerlo de manera adecuada y segura, así hasta que la resolución 1207 del 2014 fue expedida. A pesar de que al fin el gobierno estableció de forma legal las pautas para llevar a cabo estas prácticas, la autora del libro nos menciona una

cantidad de limitaciones, “entre ellos el hecho que no especifica el tipo de aguas que pueden ser sometidas a procesos de tratamiento para su reutilización, autoriza el reúso solo para ciertas actividades industriales y de riego, limitando así las áreas en las cual usar el agua ya recuperada, además se prohíbe el cobro de suministro de aguas provenientes de reúso, impidiendo al generador de estas aguas al menos una recuperación de esta inversión y desmotivándolos a ejercer dicha práctica, además todos los permisos y transacciones deben hacerse con las autoridades ambientales, que, al menos en Colombia, tienen tiempos de respuesta muy largos, entre otras más limitaciones de la norma” (Álvarez Pinzón, 2017a) Esto hace que el reúso de agua por parte de empresas pequeñas (Los lavaderos de autos pertenecen en su mayoría a esta categoría) sea prácticamente imposible, y empresas más grandes que podrían ser capaces de realizar la inversión, simplemente no lo harían debido al poco beneficio que les representa.

También es buen tener en cuenta el hecho que, entre la diversa cantidad de artículos científicos con la temática de tratamiento de aguas de lavado de autos, se encontró que las tecnologías más estudiadas son las membranas -ultra y nanofiltración - integrado con tratamientos previos. Estas tecnologías terminan siendo altamente eficientes, los costos asociados (implementación, operación y mantenimiento) son muy altos, especialmente en países en vías de desarrollo, como Colombia, donde estas membranas no son fabricadas, complicando la implementación de estas en caso de implementarlo a un sistema de tratamiento a escala completa en un lavadero de autos (Zaneti *et al.*, 2012). Por lo cual, investigaciones que usen tecnologías relativamente baratas (Coagulación-floculación, carbón activado y ozonificación) en el proceso de tratamiento de aguas de lavado provenientes de automóviles, los resultados obtenidos de estas pueden darnos un indicio si este tipo de tecnologías de menor costo pueden ser lo suficientemente efectivos para generar un agua tratada con características satisfactorias.

Teniendo en cuenta lo anterior, nos preguntamos ¿es posible diseñar un sistema de recuperación de aguas residuales resultante del lavado de automóviles basado en carbón activado y ozonificadores con el propósito de su aprovechamiento y evaluar su potencial de uso en otras actividades?

3. Objetivos

Teniendo en cuenta la pregunta ¿es posible diseñar un sistema de recuperación de aguas residuales resultante del lavado de automóviles basado en carbón activado y ozonificadores con el propósito de reusó y evaluar su potencial de uso en otras actividades? nos propusimos los siguientes objetivos:

3.1 Objetivo General

- Evaluar el potencial de recuperación de un sistema de recuperación de agua de lavado basado en proceso de coagulación-floculación, carbón activado y ozonificadores.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar la eficiencia en la remoción de contaminantes producidos en un proceso de lavado de un sistema que incluya una trampa de grasa, un ozonificador y un filtro de carbón activado
- Identificar los posibles beneficios, limitaciones y aplicabilidad del sistema propuesto.

4. Marco teórico

4.1 Aguas residuales

“Reciben el nombre de aguas residuales aquellas cantidades de agua que han sido aprovechadas en distintas actividades humanas (domésticas, agropecuarias, industriales, etc.) y como resultado su calidad se ve deteriorada. Esto representa un peligro y es un impedimento para su posterior uso en otras actividades (reúso), a menos que estas sean sometidas a previos procesos de tratamientos”. (Álvarez Pinzón, 2017a)

También, en la resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo, la cual cubre los vertimientos de aguas residuales, podemos encontrar una diferenciación de las mismas dependiendo de la actividad de las cuales son resultantes:

- **Aguas Residuales Domesticas, (ARD):** Son las procedentes de los hogares, así como de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:
 - Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
 - Descarga de los sistemas de aseo personal (Duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y de lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

- **Aguas Residuales no Domesticas, (ARnD):** Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, (ARD). (Minambiente, 2015, p. 2)

A partir de esto, podemos diferenciar la proveniencia de las aguas residuales y permite facilitar su posible proceso de tratamiento, para así un futuro reúso de las mismas.

4.2 Recuperación del agua o agua reciclada

En muchos lugares en donde la disponibilidad de un suministro de agua potable se ha vuelto inadecuado para suplir la necesidad, es muy claro que la recolección de aguas residuales provenientes de comunidades y municipios deben ser vistas como un recurso de gran importancia para un posible reusó, y no como un desperdicio.(Tchobanoglous *et al.*, 2002)

A partir de esto, un gran ejemplo de esto se encontró en la parte este del caribe, donde se investigó y concluyó que aguas residuales tratadas podrían suplir la necesidad de al menos un 38% de las islas dependientes del turismo. Incluso, en la estación internacional espacial, un sistema de reciclado de agua fue usado para permitir la reutilización aproximadamente de un 85% del agua residual doméstica, la cual fue luego usada para hidratación y en preparación de comidas. (Huang *et al.*, 2015)

El agua es uno de los recursos más importantes, no solo para la humanidad, sino para la vida misma. A pesar de su vital importancia, el agua se ha puesto prácticamente en un segundo plano en comparación con otras problemáticas como algunos contaminantes del ambiente, o amenazas ambientales de mayor cobertura como lo es el calentamiento global (Pinto *et al.*, 2017).

El lavado de vehículos es una de las industrias que generan un mayor impacto ambiental en cuanto a uso de agua nos referimos, ya que el uso desmedido de agua potable y la descarga de aguas residuales, resultado de ejercer respectiva actividad económica, se dan sin realizar tratamiento alguno sobre las mismas (Carrasquero *et al.*, 2015). Este tipo de actividad se encuentra en aumento debido al aumento consecuente de vehículos, además que la inversión que necesitan este tipo de empresas es pequeña, sobre todo si se cuenta con aguas subterráneas disponibles.

A pesar que distintas autoridades ambientales, e incluso la policía nacional con el nuevo código de policía han tratado de contrarrestar el desperdicio de agua, muchas de estas empresas eligen seguir con el mismo comportamiento, ya que para ellos no resulta lucrativo cumplir estas regulaciones.

Las aguas residuales son materiales provenientes de distintas fuentes: de uso doméstico (lavabos, bañeras, lavadoras, etc.), industriales, pluviales, entre otros, los cuales por motivos de salud pública y por consideraciones de recreación económica y estética, no pueden ser vertidas a fuente hídricas sin ningún proceso de tratamiento alguno previo. Los principales contaminantes que se pueden hallar en este tipo de aguas son: residuos que demandan oxígeno, agentes infecciosos, productos químicos, petróleo o materiales derivados de él, sedimentos de partículas de suelo, sustancias radioactivas, entre otras más. (Panizza & Cerisola, 2009a)

En respuesta a los desafíos emergentes debido a la escasez de agua, muchas regiones del mundo están explorando el uso de fuentes de agua alternativas. La reutilización del agua, tanto para usos con aguas potables o no potables, es una de esas alternativas. Se considera cada vez más como una solución potencialmente importante para hacer frente a la constante presión sobre el uso de los recursos hídricos mundiales y como parte de un enfoque más integrado e interesante para gestionar el ciclo hidrológico y apoyar la economía circular. Algunas tecnologías disponibles para usos domésticos interesantes para la recuperación de aguas residuales son la ozonificación y los filtros de carbón activado. (Smith *et al.*, 2018)

El ozono (O_3) es conocido como un poderoso agente oxidante, el cual se utiliza en distintas actividades, desde las domésticas hasta las industriales, donde encontramos incluida la desinfección, la desodorización, la remoción de color, comidas procesadas, sistemas de lavanderías, blanqueamiento de pastas de papel, tratamientos de aguas de piscinas, entre otras. (Jodpimai *et al.*, 2015)

El carbón activado es considerado un polímero orgánico complejo, que posee una estructura con alta porosidad, con una gran superficie específica y gran capacidad de absorción. Este se puede producir a partir de distintos tipos de materiales que contienen carbón como lo es la madera, la cáscara de nuez, carbón mineral, coque, bagazo de caña de azúcar, lignina, aserrín, residuos del petróleo. Su producción se realiza en dos fases: carbonización y activación. En la primera, el material se carboniza a una temperatura menor a la de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se realiza en ausencia de aire. En este proceso, la estructura polimérica, ya sea de la celulosa, la lignina o la hemicelulosa se transforman en gases formados por aceites esenciales y alquitrán, y en una estructura “panelar” de ciclohexano agrupada en formas de hoja al azar, con grupos funcionales de superficie tipo

ácidos carboxílicos, quinónicos, etc., los cuales pueden ser modificados durante el proceso de activación. En la segunda, el carbón resultante se expone a un gas oxidante a altas temperaturas, el cual oxida de forma selectiva los hidrocarburos residuales sólidos, proceso que recibe el nombre de activación. Este gas puede ser anhídrido carbónico, vapor de agua o aire. (Yuvi Mendoza, 2008)

4.2.1. Tratamiento de agua en aguas residuales provenientes de lavado de vehículos.

Como se ha expresado con anterioridad, la industria del lavado de vehículos es una de las cuales se pasan más por alto a la hora de observar industrias contaminadoras de agua potable, y es posiblemente una de las que se encuentre en mayor crecimiento actualmente.

Así mismo, poco a poco, el aumento de regulaciones sobre el vertimiento y el reúso de aguas residuales provenientes de esta actividad se encuentra en crecimiento, al menos en países desarrollados. Aun así, países en vías de desarrollo, como Colombia, a pesar de la ya existencia de algunas normas y leyes sobre el reúso, en cuanto a esta actividad en específico, no están reguladas. (Álvarez Pinzón, 2017a) Así como las regulaciones han incrementado con el tiempo, lo mismo ha pasado con la cantidad de estudios sobre sistemas de tratamiento de aguas residuales de lavado de autos.

Acá una lista de artículos de distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales, todos con aguas provenientes de lavaderos de autos, que combinan distintas tecnologías, escalas y, por supuesto, resultados.

Tabla 1

Artículos sobre recuperación de aguas residuales provenientes de lavado de autos.

Trabajo o artículo	Autores	Tecnologías usadas	Lugar	Escala banco o tamaño real	Conclusiones
<p>Recuperación de agua de lavado de autos en Kuwait</p>	<p>(Al-Odwani <i>et al.</i>, 2007)</p>	<p>Separación de agua/aceite, filtros.</p>	<p>Kuwait</p>	<p>Escala banco</p>	<p>Un estudio mostró que el 75% del agua utilizada en las estaciones de lavado de autos se podía usar cuando la calidad del agua se actualizó a un nivel aceptable para realizar lavados antes del enjuague final. mostró que la adición de aproximadamente el 25% de agua dulce era necesaria para los ciclos de retro lavado y para Enjuague final del coche. El agua era de un nivel aceptable ya que los niveles de contaminantes habían disminuido sustancialmente. El color gris El agua cambió a agua casi clara con poca espuma. La reutilización no potable del agua debe ser una La práctica aceptada y debe crecer.</p>
<p>Evaluación de tratamiento fisicoquímico en efluentes de lavado de vehículo</p>	<p>(Carrasquero <i>et al.</i>, 2015)</p>	<p>Coagulación/filtros.</p>	<p>Maracaibo, Venezuela</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>La caracterización fisicoquímica del agua residual reflejó que la misma se encuentra en cumplimiento con los límites establecidos dentro de la norma vigente venezolana para descarga a redes cloacales a excepción del parámetro sólidos suspendidos totales. De acuerdo a la eficiencia global del tratamiento fisicoquímico de floculación-sedimentación-filtración, el tratamiento que produjo mejores resultados fue cuando se utilizó Cloruro Férrico obteniéndose una remoción de color verdadero de 97,5%, de turbidez filtrada de 98,58 % y de DQO de 97,5%. El tratamiento que produjo un anuente adecuado para la reutilización fue cuando se utilizó el Cloruro Férrico.</p>

<p>Aplicabilidad de métodos electroquímicos para el reúso de aguas residuales de lavado de autos. Parte 1: Oxidante anódico con diamantes y ánodos de dióxido de plomo.</p>	<p>(Panizza & Cerisola, 2009a)</p>	<p>Oxidación anódica con ánodos de diamante y dióxido de plomo.</p>	<p>Genoa, Italia</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>El resultado experimental indica que aguas de descargas de procesos de lavado de autos reales pueden ser tratados en una celda electroquímica con un PbO₂ o BDD ánodo y un cátodo de acero inoxidable bajo todas las condiciones probadas envolviendo una velocidad de flujo del líquido entre 100 y 300 dm³ /h, aplicando corrientes desde 1 a 3A entre temperaturas de 25 a 40°C. A pesar que se demostró una gran remoción por medio de este método, al hacerlo en las condiciones más ideales, el consumo de energía fue muy alto para que sea aplicado de forma práctica.</p>
<p>Trabajo o artículo</p>	<p>Autores</p>	<p>Tecnologías usadas</p>	<p>Lugar</p>	<p>Escala banco o tamaño real</p>	<p>Conclusiones</p>
<p>Aplicabilidad de métodos electroquímicos para el reúso de aguas residuales de lavado de autos. Parte 2: Proceso integrado de electrocoagulación y oxidación anódica</p>	<p>(Panizza & Cerisola, 2009b).</p>	<p>Electrocoagulación y oxidación anódica</p>	<p>Genoa, Italy</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>A partir de la combinación de electrocoagulación y oxidación anódica, se obtuvo lo siguiente: En condiciones óptimas, (tiempo de electrolisis 6 minutos, pH 6.4 y corriente aplicada de 2 mA/cm²) la remoción de DQO fue de un 75%. La remoción de DQO fue bastante alta y el consumo de energía lo suficientemente bajo para poder ser aplicada a larga escala</p>
<p>Tratamiento de agua residual de lavado de autos por medio de membranas de micro y ultrafiltración: efectos de la geometría, tamaño de poros, diferencia de presión y velocidad de flujo en transporte de propiedades</p>	<p>(Pinto <i>et al.</i>, 2017)</p>	<p>Membranas de micro y ultrafiltración</p>	<p>Belo Horizonte, Brasil</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>El mayor contaminante eran los sólidos totales suspendidos. Membranas de micro y ultrafiltración planas que con solo con membranas de microfiltración era suficientes para dar valores adecuados de aguas tratadas para reúso. Los resultados revelaron una velocidad de recuperación de un 80%, con una remoción de hasta un 98.6% de turbidez del agua en comparación con el agua afluente, indica su potencial para ser un sistema comercial.</p>
<p>Procesos avanzados de oxidación electroquímicas (EAOPs) como técnicas de tratamiento alternativo para recuperación de aguas de lavado.</p>	<p>(Ganiyu <i>et al.</i>, 2018)</p>	<p>Electro oxidación (EO), Electo oxidación con generación con peróxido de hidrógeno (EO-H₂O₂) y proceso electro-fenton (EF).</p>	<p>Natal, Brasil.</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>La completa degradación de los surfactantes aniónicos y una remoción excelente de materia orgánica fueron observados. Mayor remoción de DQO y remoción de surfactantes, además de presentar mejor eficiencia y más bajo consumo energético, el proceso EF en comparación con los otros 2.</p>

<p>Oxidación química de aguas residuales de lavado de autos como un esfuerzo para disminuir la contaminación del agua</p>	<p>(Bhatti <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p>Aeración separación agua/aceite, adicción de alumbre y residuos de peróxido de hidrógeno.</p>	<p>Abbottabad, Pakistan.</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>El tratamiento redujo hasta un 96% el contenido de aceite del agua residual. Otros parámetros como DQO, turbidez y TSD fueron reducidos en un 93%, 94% y 74% respectivamente. Es de bajo costo y requiere menos espacio sin ningún tipo de control de pH.</p>
<p>Aplicación de floculación-flotación seguido por ozonificación en tratamiento de aguas residuales de lavado de vehículos/desinfección y recuperación de agua.</p>	<p>(Taylor <i>et al.</i>, 2014).</p>	<p>floculación-flotación, filtración de arena y Ozonificación.</p>	<p>Porto Alegre, Brasil.</p>	<p>Escala Real</p>	<p>Los resultados del tratamiento sugieren que este tiene un gran potencial en la recuperación de aguas residuales de lavada de autos, tanto en el aspecto estético, microbiológico, y de problemas relacionados a la parte química. El agua recuperada presenta las siguientes características: clara, inolora, desinfectada en valores aceptables, y sin presencia de espuma. A pesar de los distintos factores, se concluyó que este sistema tiene potencial de ser aplicado de forma comercial con un tiempo de recuperación relativamente corto.</p>

Trabajo o artículo	Autores	Tecnologías usadas	Lugar	Escala banco o tamaño real	Conclusiones
<p>Reúso de aguas residuales de lavado de autos con membranas de ultrafiltración de acetato de celulosa ayudado por tratamientos de coagulación-floculación y carbón activado</p>	<p>(Hamada & Miyazaki, 2004)</p>	<p>Carbón activado, coagulación-floculación y ultrafiltración con membranas de acetato de celulosa.</p>	<p>Japón</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>De este sistema se concluyó: una combinación de distintos agentes floculantes mostró una mayor remoción de DQO y turbidez del agua residual en comparación con agentes convencionales e individualmente de coagulación-floculación.</p>
<p>Recuperación de agua de lavado de autos, aplicación a escala real, y nuevas funciones próximamente.</p>	<p>(Zaneti <i>et al.</i>, 2011)</p>	<p>Filtración de arena, trampa de grasa, coagulación-floculación y cloración.</p>	<p>Brasilia, Brasil.</p>	<p>Escala Real</p>	<p>El contenido de materia fecal y presencia de coliformes fue alto, indicando la necesidad de desinfección del agua residual. Las concentraciones de surfactantes aniónicos fueron más altas que las permitidas por las leyes locales. Se presento una recuperación hasta del 70% de agua clara e inodora.</p>
<p>Proceso de electrocoagulación para tratamiento químico y de demanda biológica de oxígeno de aguas gris de lavado de autos megaciudad Ahvaz, Irán.</p>	<p>(Mohammadi <i>et al.</i>, 2017)</p>	<p>Electrocoagulación.</p>	<p>Ahvaz, Irán.</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>Se dieron reducciones de DBO de hasta un 80% y un 90% de DQO en comparación con el agua residual.</p>

<p>Aplicación de un biorreactor de membrana mejorado (eMBR) para el reúso de aguas residuales de lavado de autos.</p>	<p>(Moazzem <i>et al.</i>, 2020)</p>	<p>Biorreactor de membrana mejorado (eMBR).</p>	<p>Melbourne, Australia.</p>	<p>Escala Banco</p>	<p>Se llegó a registrar una remoción de más del 99% de DQO y un 63% de TN (Nitrógeno total) del agua residual. Investigaciones futuras podrían verificar si el sistema es capaz de volverse comercial o no.</p>
--	--------------------------------------	---	------------------------------	---------------------	---

Fuente: elaboración propia

4.2.2. Tecnologías para el tratamiento de aguas.

Como pudimos observar, hay una variedad de estudios con distintas tecnologías usadas para el tratamiento de aguas residuales provenientes de lavaderos de autos, por lo cual, ahora expondremos cuales son las más usadas y de qué se tratan cada una:

- **Membranas de Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF):**

Esta tecnología es comúnmente usada a la hora de tratar agua residual, incluyendo ambas membranas, UF Y NF. Con la ayuda de la membrana UF, los orgánicos biodegradables, coloides y algunos virus pueden llegar a ser removidos. Tanto la membrana UF como la NF tienen diferentes desempeños a la hora de tratar aguas residuales. Las emulsiones de aceite son el principal contaminante observado en aguas residuales de lavado de vehículos. Un estudio reportó como la membrana NF removió hasta un 98% más de contaminantes orgánicos de carbono totales que las membranas UF. Las membranas UF son inefectivas a la hora de remover Total de sólidos Disueltos y conductividad, debido a que estas poseen deterioración en el flujo y una baja tasa de recuperación de flujo. (Nadzirah *et al.*, 2015)

- **Separador de aceite:**

Este fue diseñado para asegurar la remoción de todos los aceites ligeros que escaparon de la desnatadora de aceite en el tanque de asentamiento. Basado en el

desempeño de los separadores de aceites por medio de gravedad observados en la industria de lavado de autos, distintos autores concluyen que el sistema no permite producir un afluyente que cumpla con los límites de descargas establecidos en los sistemas de desagüe. Aun así, la remoción de aceites y grasas (A&G), total de sólidos suspendidos (TSS), sólidos volátiles suspendidos (VSS), total de sólidos disueltos (TSD) y demanda química de oxígeno (DQO) exhibieron mejores resultados por el uso de separadores de aceites por gravedad. (Nadzirah *et al.*, 2015)

- **Oxidación química:**

Este incluye procesos de aireación para separación de aceites del agua, tratamiento de alumbre para la remoción de contaminantes con ayuda de peróxido de hidrógeno. La aeración es responsable de separar el aceite y el agua atrapando el aceite en burbujas de aire que llevan consigo el oxígeno. La reducción la demanda química de oxígeno después de pasar por este proceso alcanzó hasta un 93%. El incremento de la dosis de alumbre como tal no es suficiente para generar afluentes que cumplan los requerimientos de vertimiento. La ayuda del peróxido de hidrógeno crea cargas positivas y especies polinucleares, resultando en componentes cargados que reaccionan con coloides atraídos con iones negativos presentes en el agua residual. La gravedad ayuda con la remoción de sólidos suspendidos y la demanda química de oxígeno. Además, el alumbre actúa como coagulante mientras que el peróxido de hidrógeno reduce la concentración de la demanda química de oxígeno del agua resultante del lavado de autos. (Nadzirah *et al.*, 2015)

- **Columna de floculación flotación (FCF), filtro de arena (SF) y cloración final (CF):**

La floculación permite la remoción de materia orgánica y color del agua residual. Sin embargo, el tratamiento debería ser estudiado con otros procesos, dependiendo de la selección adecuada de floculante y diseño apropiado del sistema para la mejora de las operaciones. El filtro de arena ayuda con la remoción de microorganismos patógenos del agua residual y el proceso de cloración inhibe el crecimiento del E. coli. La cloración final ayuda a remover patógenos y otros microorganismos que pudieron haber pasado el proceso de filtración de arena. (Nadzirah *et al.*, 2015)

- **Ozono y carbón activado:**

El ozono es conocido por tener la habilidad de oxidar moléculas orgánicas complejas en formas más simples e incrementar la biodegradabilidad de las aguas residuales, resultando en niveles de toxicidad bajos de sustancias orgánicas. El ozono reacciona con sustancias en el agua por medio de dos mecanismos distintos, nombrados reacción directa e indirecta. La reacción directa es una reacción selectiva de ozono con sustancias, mientras que la reacción indirecta del ozono envuelve el uso de iones radicales como el radical de hidroxilo.

La adsorción de sustancias orgánicas usando carbón activado es un método efectivo debido a que el carbón activado posee un tamaño grande de poros y superficie interna ancha. Adsorción de sustancias orgánicas dentro del carbón activado consiste en tres mecanismos, nombrados como transferencia de masa a

líquido dentro de partículas de carbón, transferencia de masa o difusión en poros, y reacción de superficie. (Karamah *et al.*, 2018)

4.2.3. Parámetros a evaluar

A la hora de realizar análisis físicos, químicos y biológicos, siempre se fijan unas características o parámetros a valorar con tal de comprobar la calidad del agua a estudiar. Los siguientes parámetros son comúnmente evaluados en estudios de calidad de agua, tales como el que se analiza en la presente tesis:

- **pH**

La medición del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentemente usadas en el análisis químico del agua. Prácticamente cada fase, ya sea en el suministro de agua como en su tratamiento (coagulación, desinfección, precipitación, etc.) son dependientes del pH. El pH es usado para medir alcalinidad, dióxido de carbono, además de muchos otros balances ácido-base. A cierta debida temperatura la intensidad, ya sea de las propiedades ácidas o básicas de la solución, son indicadas por el pH o actividad del ion de hidrógeno. Alcalinidad y acidez son capacidades ácido y básico neutralizantes, respectivamente, del agua y son usualmente expresadas en miligramos de CaCO_3 por litro. Capacidad de amortiguación es la cantidad de ácido o base fuerte, usualmente expresada en moles por litro, necesaria para cambiar el valor del pH de un litro de solución en una unidad. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Color**

La propiedad que conocemos como color, tanto en la superficie de los océanos como en las profundidades de los mismos, son resultados principalmente de la presencia de material orgánico natural, particularmente material húmico orgánico. Materia húmica consiste ácidos húmicos y fúlvicos; ambos causantes del color marrón-amarillento. Los ácidos húmicos dan un color más intenso, y la presencia de hierro intensifica el color a través de la formación de humatos ferrosos solubles.

El término “color” es usado con el significado de color verdadero, lo que es, el color del agua a el cual todo tipo de turbidez se le ha sido removida. Partículas grandes coloidales suspendidas en el agua pueden interferir con la trayectoria de los rayos de luz. En este caso solo se hará hallazgo del color aparente. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

- **Turbidez**

La turbidez en el agua es causada por material coloidal suspendido tal como la arcilla, limo, material orgánico e inorgánico finamente dividido, como el plancton, entre otros organismos microscópicos. Turbidez es una expresión de la propiedad óptica que causa que la luz sea dispersada y adsorbida, en vez de transmitida sin ningún cambio de dirección o nivel de flujo a través de la muestra. La correlación entre la turbidez y el peso o la concentración de un número de partículas de materia suspendida es muy difícil, esto es debido a que tanto el tamaño, la forma y el índice de refracción de las partículas afectan las propiedades de dispersión de la luz de la suspensión. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Demanda química de oxígeno (DQO)**

La demanda química de oxígeno (DQO) es definida como la cantidad especificada de oxidante que reacciona con la muestra bajo condiciones totalmente controladas. La cantidad de oxidante consumida es expresada en términos de su equivalencia de oxígeno. Debido a sus propiedades únicas, el ion de dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) es el oxidante especificado para el método a utilizar en este ensayo, él es reducido a ion de cromo (Cr^{+3}) en esta prueba. Tanto los compuestos orgánicos como inorgánicos son sujetos a la oxidación, pero en la mayoría de los casos el componente orgánico es el predominante, además de ser el de mayor interés. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Demanda biológica de Oxígeno (DBO)**

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es una prueba usada para determinar el requerimiento relativo de oxígeno de aguas residuales, afluentes y aguas contaminadas; su aplicación más usada es en la medición de cargas de residuos para plantas de tratamiento y en la evaluación de la eficiencia de las plantas removedores de DBO. La prueba de DBO mide las moléculas de oxígeno usadas durante un periodo especificado de incubación para:

- Degradar bioquímicamente material orgánico (demanda carbonosa)
- Oxidación de material inorgánico (sulfuros y hierros ferrosos)
- Medición de la cantidad de oxígeno usada para oxidar reducidas formas de nitrógeno (demanda de nitrógeno) a menos que un inhibidor sea añadido para prevenir dicha reducción. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Oxígeno disuelto (OD)**

Los niveles de oxígeno disuelto (OD) en aguas de origen natural y aguas residuales dependen de las actividades físicas, químicas y bioquímicas llevadas a cabo en el cuerpo de agua. Este análisis es clave en aguas contaminadas y en procesos de control de tratamientos de aguas residuales. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

El oxígeno disuelto es introducido al agua, ya sea por el aire, o como un subproducto de las plantas. Del aire, el oxígeno lentamente se difunde a través de la superficie del agua desde la atmosfera circundante, o se combina de forma rápida a través de un proceso de aireación, ya sea de forma natural o por intervención humana. La aceleración del viento (que crea olas), rápidos, cascadas, descargas de agua subterráneas u otras formas de flujos de agua. El oxígeno disuelto también proviene como resultado de la fotosíntesis proveniente del fitoplancton, algas y otras plantas marinas. (Fondriest Environmental Inc, 2013)

- **Conductividad, Salinidad y Total de Sólidos Disueltos (TSD)**

La conductividad, k , es la medición de la habilidad de una solución acuosa de trasladar una corriente eléctrica. Esta habilidad depende en la presencia de iones, en su concentración total, movilidad y valencia; y en la temperatura de la medición. Soluciones de la mayoría de componentes inorgánicos son relativamente mejores conductores, por el contrario, moléculas de componentes orgánicos que no se disocian en soluciones acuosas conducen de forma muy poco eficiente, si es que conducen para empezar.

La salinidad es una propiedad sin unidades de gran importancia para el análisis aguas naturales e industriales. Era originalmente concebido como una unidad de medición de

masa de sal disuelta en cierta masa de solución. La determinación experimental del contenido de sal a través del secado y pesado presenta ciertas dificultades debido a las pérdidas de componentes. La única forma de confianza para determinar la verdadera o absoluta cantidad de sal del agua natural es realizar un análisis químico. Sin embargo, este método usualmente consume mucho tiempo y no puede ser llevado a cabo en campo con la precisión necesaria para un trabajo exacto. Por lo cual, para determinar la salinidad, normalmente se usan métodos indirectos que involucran la medición de las propiedades físicas del agua como conductividad, densidad, velocidad del sonido e índice refractivo.

El total de sólidos disueltos (TSD) es el término usado para describir las sales inorgánicas y pequeñas cantidades de material orgánico presentes en soluciones de agua. Los principales componentes que caen en esta categoría son usualmente cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio, y aniones de carbonatos, hidrogenocarbonatos, cloruro, sulfatos y nitratos. El método de determinación de TSD en suministros de agua de uso más común es la medida de la conductividad específica con una sonda de conductividad que encuentre la presencia de iones en el agua. Medidas de conductividad son convertidas en valores de TSD por medio de un factor que varía dependiendo del tipo de agua que es objeto de análisis. (World Health Organization, 2016)

- **Alcalinidad**

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua de neutralizar ácidos.

Componentes alcalinos como bicarbonatos (bicarbonato de sodio, por ejemplo), carbonatos, e hidróxidos remueven iones de H^+ y disminuyen la acidez del agua (es

decir, el aumento del pH). Ellos usualmente provocan esto al combinarse con iones de H^+ para formar nuevos componentes. Sin esta capacidad acido-neutralizante, cualquier ácido que sea añadido a una corriente de agua provocaría un cambio inmediato en su pH.

(United State Enviromental Protection Agency, 2012)

La alcalinidad es relevante en muchos usos y tratamientos de aguas naturales y residuales. Esto se debe a que la alcalinidad de muchos cuerpos de agua es principalmente una función de contenidos carbonados, bicarbonatos e hidróxidos, estos son tomados como una indicación de la concentración de estos constituyentes. La medición de valores puede también incluir contribuciones de boratos, silicatos, fosfatos, entre otras bases si las mismas se encuentran presentes. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Aceites y grasas**

En la determinación de aceites y grasa, una cantidad absoluta de una sustancia específica no es medida, en cambio, grupos de sustancias con características físicas similares son determinadas cuantitativamente en la base de su solubilidad en común en un solvente extractor orgánico. “Aceites y grasas” es definido como cualquier material recuperado como una sustancia soluble de una muestra acidificada (como compuestos sulfúricos, algunos tintes orgánicos y clorofila) y no ser volatizado durante la prueba. (American Public Health Association. *et al.*, 2017)

- **Conteo bacteriano de coliformes por número más probable (NMP)**

Las bacterias coliformes han sido largamente usadas como un indicador de la calidad del agua basado en la premisa que, debido a que estos organismos están presentes en los intestinos de animales de sangre caliente, su presencia en el agua indicaría una contaminación reciente de material fecal ha ocurrido. Históricamente, este grupo de organismos ha sido definido por su habilidad de fermentar lactosa, en lugar de a través de los principios de la bacteriología sistemática, por lo cual el grupo consiste de bacterias de varios géneros pertenecientes a la familia Enterobacteriaceae.

Los métodos usados para la detección de las mismas usan medios de caldos basados en lactosa para detectar los productos finales metabólicos de la fermentación de la lactosa.

(American Public Health Association. *et al.*, 2017)

4.3. Normativa Colombiana sobre el tratamiento y la reutilización del agua.

En cuanto a las normativas que rigen las aguas residuales, (Álvarez Pinzón, 2017a) nos da un buen resumen de la situación actual de Colombia respecto a estas.

“La regulación de esta actividad ha sido muy pobre y con poca coherencia. Hasta antes del año 2014, solo se contaban con disposiciones que imponían, de manera general, distintas jurisdicciones a las autoridades, así como también obligaciones a los particulares, con el objetivo de implementar acciones tendientes a promover e implementar el reúso de las aguas residuales.”

(p. 189)

Aquí una lista de normativas antes del año 2014:

Decreto 1541 de 1978:

- Estableció obligaciones de los concesionarios de aguas para uso industrial reciclar las aguas residuales que generen, siempre que esto sea, tanto de forma técnica y económicamente factibles.

Decreto 1594 de 1984:

- Estableció las normas de calidad de agua para la destinación del recurso hídrico y para el vertimiento de aguas residuales a cuerpos de agua y al alcantarillado.

Ley 99 de 1993:

- Asignó funciones a los municipios y distritos para ejecutar programas de reciclaje de residuos líquidos.

Ley 373 de 1997:

- Se impuso a los usuarios la obligación de hacer reuso de las aguas servidas, tanto en actividades primarias y secundarias. Sin embargo, quedó condicionada ya que solo podría ser aplicada solamente en casos que tanto el proceso técnico como económico lo amerite y aconseje.

Decreto 3930 de 2010:

- Definió el reuso como la utilización de los efluentes líquidos previo al cumplimiento de unos ciertos criterios de calidad.

Finalmente, en el año 2014, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fue expedida la resolución 1207 del 13 de agosto de 2014, en donde se adoptaron disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas con tal de darles reúso. (Álvarez Pinzón, 2017a)

Esto marcó un precedente, ya que como hemos observado, antes de esta resolución, las normas y leyes antes promulgadas no habían sido tan específicas y completas como esta, además de ser la primera norma hecha específicamente para el reúso de aguas residuales.

También cabe recalcar que el mismo Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió la resolución 631 del 2015, pero esta cubre los parámetros a cumplir para realizar el vertimiento de aguas residuales provenientes de usos comerciales e/o industriales a el alcantarillado o cuerpos de agua.

Sin embargo, la misma autora (Álvarez Pinzón, 2017a) nos deja claro que, a pesar de que gracias a la resolución 1207 de 2014 finalmente establece un mecanismo legal donde es posible darles reúso a las aguas residuales de forma legal y segura, todavía hay mucho que trabajar para que esta actividad sea viable, ya que las altas exigencias de propuestas por la norma hace casi inviable esta propuesta en la mayoría de los casos, debido que muchas veces termina siendo menos costoso tanto abastecerse directamente de la fuente de agua cruda, o tramitar una concesión de aguas o de vertimiento, que tramitar una concesión para el reúso de aguas residuales.

En el año 2017, se realizó una conferencia en la ciudad de Medellín, en donde se discutieron distintos aspectos de esta norma, sus problemas y limitaciones que sufre en la actualidad, entre los cuales se encuentran:

- No se determina el tipo de aguas residuales que pueden ser reutilizadas.
- Falta de desarrollo respecto al reúso de aguas residuales municipales o domésticas.
- No es permitido el reúso en otras actividades agrícolas o industriales que podrían aprovecharlas.
- Se prohíbe el cobrar por suministrar aguas de reúso, lo que castiga económicamente de forma relevante al generador de las mismas.
- La generación de nuevos permisos o la modificación de los existentes impone requisitos técnicos muy complejos.
- Lo se consagra un estímulo para el reúso: se exime al generador del permiso de vertimientos y de la TVR, cuando hacen entrega total de las aguas de reúso.
- No es viable para usuarios particulares, ni pequeñas comunidades o empresas.
- No se es establecido el procedimiento para la concesión de reúso.
- No se permite el reúso de las aguas:
 - Para el riego de productos alimenticios de consumo directo.
 - Como fertilizante o acondicionador de suelos.
 - En riego de zonas verdes, parques, campos deportivos y jardines de zonas residenciales.
 - La perforación exploratoria minera o petrolera, de refrigeración de máquinas como taladros, entre otras.
 - Para descarga de aparatos sanitarios en zonas residenciales, comerciales o de servicio.
 - Y finalmente, en el lavado de vehículos, de áreas de trabajo. (Álvarez Pinzón, 2017b)

Este último punto es, tal vez, el más a destacar, ya que afecta directamente a esta investigación, dado que la ley nos limita en cuanto a los usos que le podemos dar a las aguas residuales tratadas, sobre todo que no podrán ser reusadas en el lavado de vehículos, actividad económica donde provienen nuestras aguas residuales a tratar.

Esto nos dicta que antes de que la actividad de reúso de aguas residuales pueda llevarse a cabo, es necesario un cambio en las normativas para que sea mucho más viables, especialmente para usuarios particulares, empresas pequeñas y comunidades locales.

5. Metodología

El presente proyecto tiene como meta el diseñar y comprobar la eficiencia de un sistema de recuperación de agua basado en sistemas domésticos de tratamiento y depuración de agua, específicamente filtros de carbón activado y ozonificadores, además de un proceso de coagulación-floculación. Con tal de lograrlo, el siguiente esquema de planificación expresa la metodología a usar:

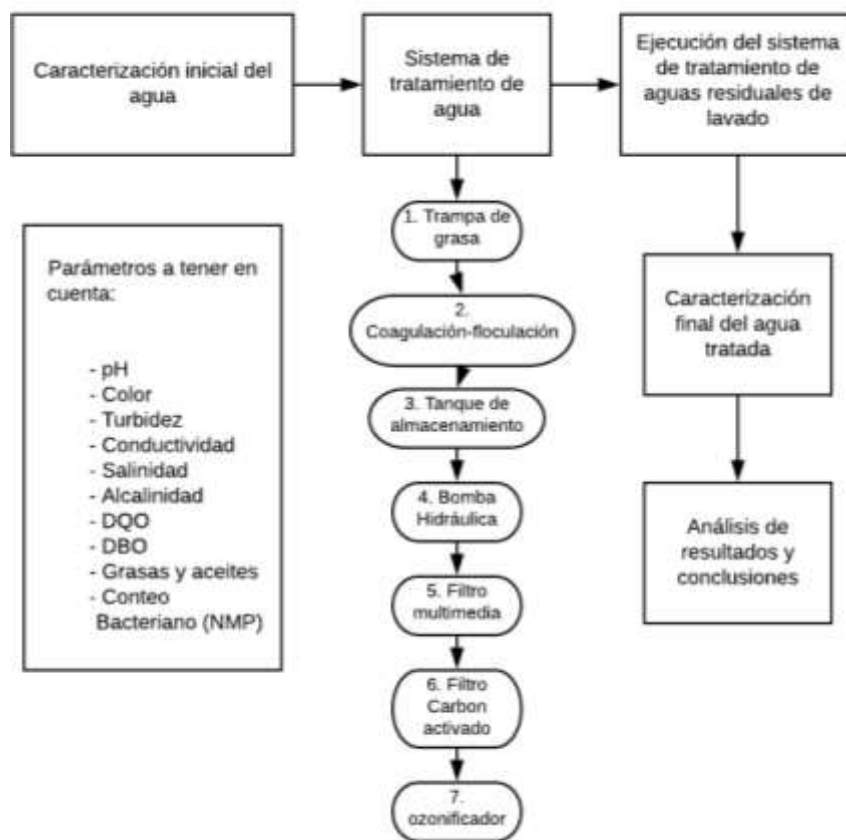


Figura 1. Esquema de la metodología a usar en el sistema de recuperación de aguas provenientes de lavado de autos.

Fuente: elaboración propia

La recolección de datos se realizará mediante observación y muestreo, tanto de la fuente de aguas residuales, como de distintas etapas del sistema, muestras a las cuales se le realizarán el análisis de distintos parámetros. Estos serán fueron ya expuestos en el marco teórico y más adelante se explicarán con detalle las herramientas y ensayos necesarios para evaluar los mismos.

La toma de muestras se realiza de tal forma:

Se toman muestras dos veces por semana, durante un periodo de 13 semanas. Los días seleccionados fueron lunes, miércoles, jueves y viernes, siendo los días más recurrentes los lunes y viernes, todo esto debido a restricciones de horario presentadas en el laboratorio.

Las muestras son recolectadas en frascos de vidrios ámbar, los cuales según el Standart Methods for Examination of Water and Wastewater (American Health Public Association *et al.*, 2017), botellas de este material son las más recomendadas para la recolección de muestras teniendo en cuenta el tipo de pruebas las cuales serán sometidas.

5.1. Descripción del sistema

5.1.1. Toma de muestra local

La toma de muestras se realiza de tal forma: Se toman muestras dos veces por semana, durante un periodo de 13 semanas. Los días seleccionados fueron lunes, miércoles, jueves y viernes, siendo los días más recurrentes los lunes y viernes, todo esto debido a restricciones de horario presentadas en el laboratorio.

Las muestras son recolectadas en frascos de vidrios ámbar, los cuales según el Standart Methods for Examination of Water and Wastewater (American Health Public Association *et al.*, 2017), botellas de este material son las más recomendadas para la recolección de muestras teniendo en cuenta el tipo de pruebas las cuales serán sometidas.

Estas muestras son recolectadas en tres partes del proceso siendo:

- Después del paso del agua residual de lavado por la trampa de grasa.
- Después del proceso de coagulación.
- Al final del sistema de recuperación de agua de lavado.

Se tomarán tres muestras en cada una de las etapas ya antes descritas. Los que nos dejará con un total de 117 muestras en todo el periodo de prueba. Al mismo tiempo, a la hora del análisis en el laboratorio, se toman tres lecturas en cada uno de los parámetros a evaluar, excepto en el caso de DBO, donde debido a circunstancias como el tiempo total del análisis, que toma cinco días entre el armado y la toma de lecturas, la disponibilidad del laboratorio y la necesidad de otras personas a realizar la misma prueba, hacían que la posibilidad de tomar tres lecturas por muestras casi imposible, por lo cual se tomó la decisión de solo realizar una lectura por muestra.

Hay dos parámetros en específico donde será necesario una toma de muestras distintas, los cuales son aceites y grasas y conteo bacteriano

En el caso de aceites y grasas el laboratorio no cuenta por el momento con todos los materiales necesarios para este análisis, además que es una prueba con que requiere varios días de ejecución y constante atención que podrían interferir con los demás análisis, por lo cual la cantidad de muestreos y lecturas obtenibles va a ser muy baja.

En el caso de conteo bacteriano es una prueba con una preparación sumamente cuidadosos, las lecturas toman dos días en efectuarse y debido a restricciones de horario de los laboratorios tanto del hidráulica como el de investigaciones de tecnologías ambientales de la Universidad de la Costa, se realizará el muestreo de la siguiente forma: se efectuaran un total de cinco muestras, los cual a diferencia de las dos primeras fases tendrán una muestra cada una, mientras la última fase tendrá tres muestras, cada una será tomada en un tiempo distinto de operación del ozonificador, (comenzando la operación, a los 10 minutos y a los 20 minutos) lo que buscará más tarde en el análisis de datos determinar si el tiempo de operación del

ozonificador durante el tratamiento mejora o no la calidad final del agua recuperada. Este último paso también se realizará con el resto de lecturas de los anteriores parámetros, a excepción del DBO, del cual ya fue explicado las razones por el mismo.

5.2. Fase de coagulación - Floculación

El proceso de coagulación-floculación fue elegido como necesario debido a la cantidad de material suspendido en el agua residual, el cual es perceptible a simple vista, tanto en el sitio de recolección, como posteriormente en las muestras tomadas. También cabe recalcar que la variabilidad de la cantidad de material presente en el agua es bastante grande, siendo otra razón por la cual se aplica este proceso.



Figura 2 Agua residual antes del proceso de coagulación-floculación. *Fuente:* elaboración propia

Teniendo esto en cuenta, lo primero que se llevó a cabo fue la determinación de la dosis óptima de floculador que será aplicada durante esta parte del tratamiento. Esto es necesario ya que una dosis muy baja podría dejar cantidades de material significantes, pero una dosis muy alta podría dejar material del coagulante sin reaccionar flotando en el agua resultante, justificando así el resultado opuesto que se quiere cuando se aplica el mismo, dando así la importancia de encontrar la dosis optima de este.

El procedimiento necesario para hallar la dosis optima es el siguiente:

5.2.1. Procedimiento del ensayo de jarras

Este procedimiento es regido bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 3903, *“PROCEDIMIENTO PARA EL MÉTODO DE JARRAS EN LA COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN DEL AGUA”*

- A. Se miden volúmenes iguales a los 1000 ml (1L) de muestra en cada una de las jarras o vasos de precipitado de Griffin de 1500 ml (1.5L). Se pueden igual cantidad de porciones de muestra como posiciones que tenga en el agitador múltiple. Los vasos de precipitado se ubican de tal forma que las paletas queden descentradas, pero separadas lo suficiente de la pared del vaso de precipitado en al menos 6,4 mm (1/4 de pulgada). Siempre se registra la temperatura de la muestra al comienzo del ensayo.



Figura 3 Arreglo del ensayo de jarras llenas de muestra de agua residual. Fuente: elaboración propia

B. Se cargan los productos químicos de ensayo en los soportes de los reactivos. Para cada serie de adiciones de productos químicos se utiliza un soporte. Se llena cada tubo del soporte con agua hasta un volumen final de 10 ml antes de usar. Puede haber una situación en que se requiera un volumen mayor de reactivo. En caso de que esta situación predomine, se llenan todos los tubos con agua hasta un volumen igual al mayor volumen de reactivo en el soporte de dicho reactivo. Cuando se agreguen mezclas líquidas, puede ser necesario agitar el soporte para producir un movimiento en torbellino inmediatamente antes de transferir.



Figura 4 Solución al 1% de cloruro férrico, nuestro agente coagulante. *Fuente:* elaboración propia



Figura 5 Preparación de las jeringas llenas de la solución al 1% cloruro férrico. Fuente: elaboración propia

- C. Se comienza con el agitador múltiple operando a la velocidad de "mezcla instantánea" de aproximadamente 120 rpm. Se agrega la solución o las suspensiones de ensayo a niveles de dosis y secuencia predeterminadas. Se mezcla instantáneamente durante aproximadamente 1 min después de las adiciones de productos químicos. Se registra el tiempo de mezcla instantánea y la velocidad (rpm).



Figura 6 Ensayo de jarras en plena inicio de ejecución. Fuente: elaboración propia

- D. Se reduce la velocidad según sea necesario hasta el mínimo requerido para mantener en suspensión uniforme las partículas de flóculos a lo largo del período de mezcla

instantánea. Se mezcla en forma lenta durante 20 min. Se registra el tiempo transcurrido para la primera formación visible de flóculos. Cada 5 min (durante el período de mezcla lenta), se registra el tamaño relativo de los flóculos y la velocidad del mezclador (rpm). Si se usan ayudas coagulantes, la velocidad del mezclado es crítica porque la agitación excesiva tiende a romper la primera formación de flóculos y se puede redispersar la ayuda.

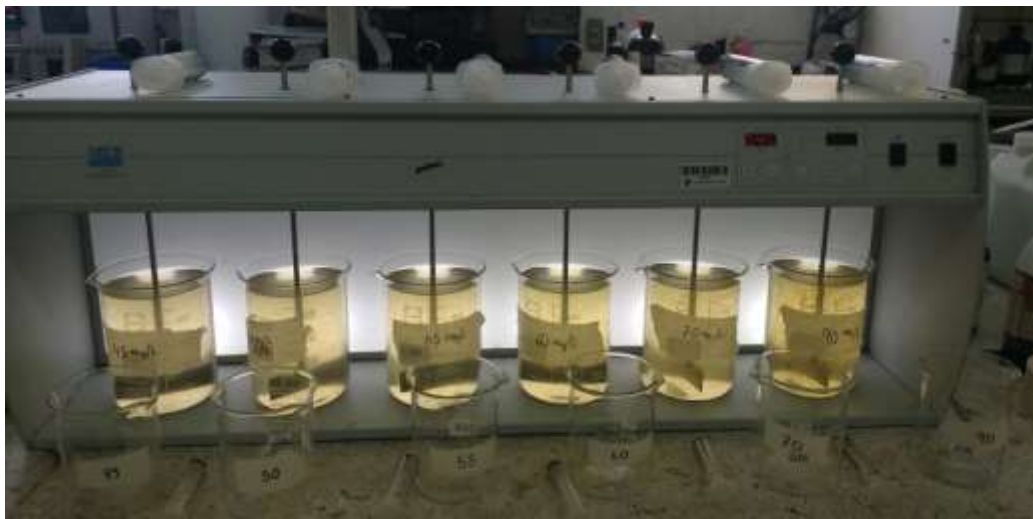


Figura 7 Etapa de mezclado lento. Fuente: elaboración propia

- E. Después del período de mezcla lenta, se retiran las paletas y se observa la sedimentación de las partículas de flóculos. Se registra el tiempo requerido para que el volumen de las partículas se sedimente. En la mayoría de los casos este tiempo será el requerido para que las partículas se sedimenten en el fondo del vaso de precipitación; sin embargo, en algunos casos puede haber interferencia de corrientes de convección. Si es así, el tiempo de sedimentación registrado debe ser aquel al cual las partículas no sedimentadas o residuales parezcan estar moviéndose en forma igual hacia arriba y hacia abajo.



Figura 8 Etapa de reposo, donde se espera que los coloides formados durante el mezclado se sedimenten. Fuente: elaboración propia

- F. Después de 15 min de sedimentación, se registra la aparición de flóculos en el fondo del vaso de precipitación. Se registra la temperatura de la muestra. Mediante una pipeta o un sifón, se saca de la jarra un volumen adecuado de muestra del caldo que sobrenada, en un punto situado a la mitad de la profundidad de la muestra, para efectuar los análisis requeridos de color, turbidez, pH y otros, determinados de acuerdo con las normas ASTM D 1889 y ASTM D 1293. Se incluye una forma sugerida para registrar los resultados.



Figura 9 Etapa de recolección de muestra. Fuente: elaboración propia

Tabla 2

Sugerida por la norma para registrar los resultados.

Muestra _____	pH _____	Turbidez _____	Fecha _____			
Ubicación _____	Color _____	Temperatura _____	Tamaño de la muestra _____ ml			
Productos químicos. mg/l ⁽⁻⁾	Número de jarras					
	1	2	3	4	5	6
Velocidad de la mezcla instantánea, rpm						
Tiempo de mezcla instantánea, min						
Velocidad de mezcla lenta, rpm						
Tiempo de mezcla lenta, min.						
Temperatura, °F						
Glóbulos en primer tiempo, min.						
Tamaño de los flóculos						
Rapidez de sedimentación						
Turbidez						
Color						
pH						

Fuente: *elaboración propia*

G. Se repiten los pasos desde el A al F hasta que se hayan evaluado todas las variables pertinentes.

H. Los tiempos dados en las letras C, D y F son datos que dependerán de las condiciones del ensayo por lo que éstos están solo sugeridos.

I. Para la determinación de la eficiencia de los ayudantes de coagulación se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Se realiza una prueba de Jarras en la cual en primer lugar se trabajará con una dosis óptima de coagulante obtenida, seleccionando un ayudante de coagulación, al cual se le ensayarán diferentes dosis comprendidas entre 0,1 y 1 mg/l en cinco de los seis vasos. El vaso al cual no se le adiciona polielectrolito sirve de referencia para comparar con los demás.

- Seguidamente, se repite el ensayo con dosis de coagulantes menores a las empleadas como dosis óptimas y se le adiciona polielectrolito en cantidades variables o en cantidad igual a la que dio el mejor resultado, pero variando la dosis de coagulante. (Icontec, 2001, p 5,6 y 7)

5.3. Ensayos y parámetros a evaluar

Parámetros a evaluar:

5.3.1. pH

5.3.1.1. *Unidades de medición*

El pH está definido por Sorenson como $-\log[H^+]$; esto es la “intensidad” del del factor de acidez. Agua pura es ligeramente ionizada y en un punto de equilibrio iónico el producto es:

$$\begin{aligned} [H^+][OH^-] &= K_w \\ &= 1.01 \times 10^{-14} \text{ a } 25^\circ \text{ C} \end{aligned}$$

Y

$$\begin{aligned} [H^+] &= [OH^-] \\ &= 1.005 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

Donde

$[H^+]$ = Actividad de iones de hidrógeno, moles/L.

$[OH^-]$ = Actividad de iones de hidroxilo, moles/L.

K_w = Iones producto del agua.

Debido a las interacciones iónicas en todo menos en soluciones muy diluidas, es necesario usar el término “actividad” de un ion y no su concentración molar. El uso del término pH asume que la actividad del ion hidrógeno, a_{H^+} , está siendo considerado. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

5.3.1.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumento:

Se usará el medidor de pH EcoSense pH 100A que cuenta con una sonda para la medición del pH y temperatura.

Procedimiento:

- Después de climatizar las muestras, limpiar con cuidado la punta de la sonda, ya sea con agua destilada o desionizada, para remover algún residuo de muestras anteriores.

- Colocar la sonda dentro de la muestra, a este punto el medidor debe empezar a mostrar lecturas en la pantalla, esperar por un par de minutos hasta que las lecturas se estabilicen y solo sea una.
- Anotar la lectura final que muestra el medidor, limpiar la punta de la sonda nuevamente y repetir el mismo procedimiento con el resto de las muestras.



Figura 10. Medidor de pH EcoSense 100A. Fuente: elaboración propia

5.3.2. Color

5.3.2.1. Unidades de medición

El color es determinado por una comparación visual de muestras con otras soluciones de colores cuyas concentraciones ya son conocidas.

El método de medida platino-cobalto es el método de medición estándar para el color, siendo la unidad de color el producido por 1mg de platino /L en forma de ión cloroplatino.

5.3.2.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumento:

Para este ensayo se da uso de un colorímetro de color de agua de referencia HANNA HI 727, cuyas especificaciones siguen el standart methods for the examination water and wastewater, el método colorimétrico platino-cobalto.

Este cuenta con 2 cubetas de vidrio de 10 mL de volumen cada uno, uno para el blanco, y el otro para la muestra.

Procedimiento:

- Después de climatizar la muestra, recolectar en una de las cubetas de vidrio 10 mL de muestra, y en la otra, 10 mL de agua, ya sea destilada o desionizada, como nuestro blanco de comparación, ambas deben ser lavadas con agua destilada o desionizada con anterioridad.
- Encender el checker, tomar lectura primero del blanco y luego de la muestra y anotar la lectura final del checker.
- Lavar cada una de las cubetas y repetir el mismo procedimiento con cada una de las muestras.



Figura 11 Chercker Hanna para la medición del color del agua. Fuente: elaboración propia



Figura 12 Checker del color de agua en plena lectura. Fuente: elaboración propia

5.3.3. Turbidez

5.3.3.1. Unidades de medición

Una referencia de suspensión estándar, la cual tiene unas propiedades dispersoras de luz reproducibles es especificada para la calibración del nefelómetro.

Su precisión, sensibilidad y aplicabilidad sobre el gran rango de turbidez hacen que el método nefelométrico como el preferido entre los métodos visuales. El reporte de los resultados del método nefelométrico como unidades nefelométricas de turbidez (UNT) o por sus siglas en inglés (NTU). (American Health Public Association *et al.*, 2017)

5.3.3.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumento:

Para esta prueba se dará uso del del turbidímetro portátil de referencia 2100Q de la marca HACH, el cual cumple con la USEPA Method 180.1 design criterio, el cual es el método certificado por la Agencia de Protección Ambiental de los US, o por sus siglas en inglés USEPA. Este viene con al menos 6 cubetas de vidrios con tapa, estándares primarios de calibración en viales sellados (20, 100, 800, NTU), manual de uso, aceite de silicona y paño lubricante.

Procedimiento:

- Encender el turbidímetro y verificar si este se encuentra calibrado, si no, realizar el proceso de calibración con los estándares primarios de calibración.
- Recolectar las muestras en las cubetas de vidrios hasta la marca indicada en los mismos. Se debe realizar una limpieza previa con agua destilada o desionizada para evitar algún residuo que pueda interferir con la lectura.
- Realizar las lecturas de cada una de las muestras y anotar cada una de las lecturas.



Figura 13 Turbidímetro portátil tomando lecturas de turbidez. Fuente: Google imágenes



Figura 14 Cubetas de vidrio para muestras de agua. Fuente: Google imágenes

5.3.4. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

5.3.4.1. Unidades de medición

Los resultados obtenidos en este ensayo se expresan en miligramos de oxígeno por litro ($\text{mg O}_2/\text{L}$)

5.3.4.2. *Instrumento y procedimiento*

Instrumentos:

- Espectrómetro

Reactivos:

- Solución de digestión, alto rango: añadir cerca de 500 mL de agua destilada, 10.216 g de $K_2Cr_2O_7$, de grado estándar primario, previamente secado a $150^\circ C$ por 2h, 167 mL H_2SO_4 , y 33.3 g $HgSO_4$. Disolver a temperatura ambiente, y diluir en 100 mL
- Solución de digestión, bajo rango: preparar como en el caso anterior, pero usar solamente 1.022 g de potasio de dicromato.
- Reactivo de ácido sulfúrico.
- Ácido sulfúrico.
- Hidrógenoftalato de potasio estándar. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Procedimiento:

- *Tratamiento de las muestras:* mida el volumen adecuado de la muestra y reactivos dentro de un tubo o ampolla como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3

Volúmenes de reactivos y de muestra necesarias para cada tipo de tubo, siendo los valores remarcados los que utilizaremos para este ensayo.

Recipiente de digestión	Muestra	Solución de digestión	Reactivo de ácido sulfúrico	Volumen total final
	mL	mL	mL	mL
Tubos de cultivo				
16 x 10 mm	2.50	1.50	3.5	7.5
20 x 150 mm	5.00	3.00	7.0	15.0
25 x 150 mm	10.00	6.00	14.0	30.0
Ampolla estándar 10 mL	2.50	1.50	3.5	7.5

(American Health Public Association et al., 2017, Sección 5220C)

Preparar, digerir y dejar enfriar las muestras, el blanco, y una o más estándares. Es crítico que el volumen de cada uno de los componentes debe ser conocido y que el volumen total debe tener la misma reacción en cada uno de los recipientes.

- *Medición de la solución de dicromato:* dejar enfriar las muestras a temperatura ambiente de forma lenta para evitar algún tipo de precipitación. Una vez las muestras se han climatizado, ventilarlas, si es necesario, para aliviar cualquier presión generada durante la digestión. mezclar el contenido de los recipientes de reacción para combinar condensación de agua y desalojar material insoluble. Dejar que la materia suspendida se asiente y asegurar que el camino óptico se encuentre despejado. Medir la absorción de cada muestra blanco y estándar a cierta longitud de onda (420 nm o 600 nm). A 600 nm, usar un blanco sin digerir como solución de referencia. Analizar un blanco digerido como solución de referencia una vez se ha establecido cual blanco tiene el menor DQO.

A 420 nm, usar el agua desionizada como la solución de referencia. Medir todas las muestras, tanto blancos como estándares en comparación con esta solución. La medida de absorción de un blanco sin digerir contiene dicromato, con agua desionizada como muestra de reemplazo, dará la absorción de dicromato inicial. Se debe mencionar que si alguna muestra digerida, posterior a la medición del blanco o estándar que tenga un valor DQO dará una absorbancia menor debido a la disminución en iones de dicromato. Analizar un blanco digerido con agua desionizada muestra de reemplazo para asegurar la calidad del reactivo y determinar la contribución de los reactivos a la disminución en la absorbancia durante la digestión. La diferencia entre absorbancias de una cierta muestra digerida y el blanco digerido es la medida de DQO de la muestra. Cuando los estándares se ejecutan, se deberán trazar diferencias de la absorbancia del blanco digerido y la absorbancia del estándar digerido en contra valores de DQO para cada estándar.

- *Preparación de la curva de calibración:* prepara al menos 5 estándares de la solución de hidrógenofalato de potasio con DQO equivalentes para cubrir cada rango de concentración. Rellenar el volumen con agua desionizada, usar los mismos volúmenes de reactivos, tubos, y procedimiento de digestión en las muestras. Preparar la curva de calibración para cada uno de los tubos nuevos o cuando los estándares preparados en la solución de digestión: alto rango, difieran por $\geq 5\%$ de la curva de calibración. Las curvas deben ser lineales. Si embargo, algún fenómeno no lineal puede ocurrir, dependiendo en el

instrumento usado y la exactitud necesitada. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Cálculos:

Si las muestras, estándares, y blancos son ejecutados bajo las mismas condiciones de volumen y longitud de camino óptico, el cálculo de DQO se realiza de la siguiente manera:

$$DQO \text{ como } mg \frac{O_2}{L} = \frac{mg \text{ } O_2 \text{ en volumen final } \times 1000}{mL \text{ de muestra}}$$

Debido que el equipo usado para realizar las lecturas da los resultados en mg O₂/L, el uso de esta fórmula no es necesario. (American Health Public Association *et al.*, 2017)



Figura 15 Termo reactor usado para calentar los tubos con los reactivos y las muestras. *Fuente:* elaboración propia



Figura 16 Tubos llenos de reactivos y muestra. Fuente: elaboración propia

5.3.5. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

5.3.5.1. Unidades de medición

Los resultados de DBO son expresados en unidades de concentración, mg de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/L).

5.3.5.2. Instrumento y procedimiento

Instrumento:

En este ensayo se usa el sistema de determinación de DBO de la marca VELP

Científica, los cuales cuentan:

- Botellas de vidrio color ámbar oscuras, de capacidad máxima de 50 mL
- Un sensor DBO EVO, el cual mide el valor del DBO y da sus resultados en mg O₂/L.

- Una incubadora.

El principio de la medición consiste en determinar la concentración de oxígeno, tanto al principio como al fin el periodo de medición, el cual típicamente resulta ser de 5 días (DBO₅)

Procedimiento:

- Añadir la barra de agitación a la botella; llenarla con suficiente volumen de la muestra, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 4

Cantidad de volumen necesario dependiendo de la concentración de DBO esperada. (VELP Scientifica, 2013)

Escala	Volumen de muestra
0 ÷ 1000 mg O ₂ /L	100 mL
0 ÷ 600 mg O ₂ /L	150 mL
0 ÷ 250 mg O ₂ /L	250 mL
0 ÷ 90 mg O ₂ /L	400 mL

(VELP scientifica – BOD analysis)

Mayores valores pueden ser medidos mediante la dilución de la muestra.

Posicionar el absorbedor de CO₂, lleno con un reactivo específico, en este caso será el hidróxido de potasio el reactivo elegido.

- Incubar la muestra a una temperatura de 20 °C por la cantidad de días deseados, los cuales en este caso serán 5 (DBO₅). Conectar los cables principales en el enchufe dedicado dentro del incubador y en un aproximado de 30 a 40 minutos la muestra alcanzara la temperatura de operación.

- Ajustar el sensor DBO EVO en la botella.
- El sensor mide la disminución de la presión interna y muestra directamente en el display el valor de DBO, en mg O₂/L sin necesidad de realizar algún cálculo adicional. (VELP Scientifica, 2013)



Figura 17 Botellas de vidrio color ámbar junto a sensores DBO EVO. Fuente: elaboración propia

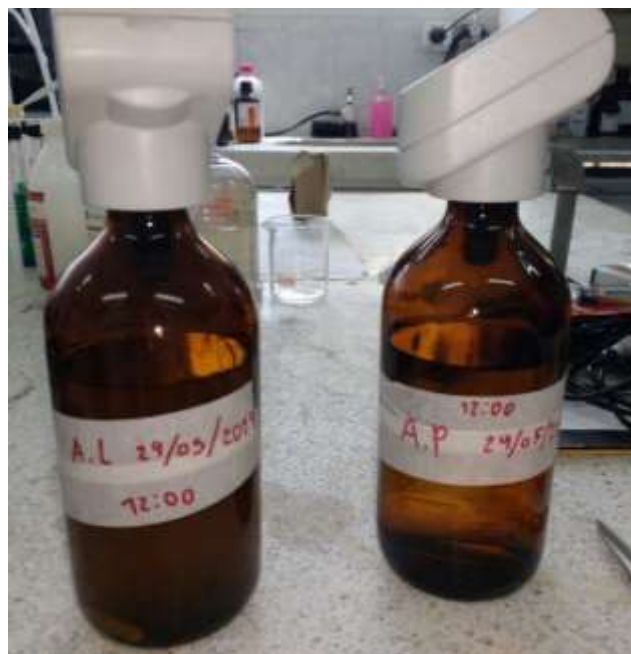


Figura 18 Montaje completo de las botellas para el ensayo de DBO5. Fuente: elaboración propia

5.3.6. Oxígeno disuelto

5.3.6.1. Unidades de medición

Como unidades de medición, tenemos las dos más frecuentemente usadas:

Partes por millón (ppm), y porcentaje de saturación de aire (%). Este segundo se define como el porcentaje de oxígeno disuelto en 1 litro de agua en comparación a la cantidad máxima del mismo que puede contener un litro de agua.

5.3.6.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumento:

Para este ensayo utilizaremos el EcoSense DO 200A para medir la concentración de oxígeno disuelto (OD) en % de saturación de aire y en partes por millón (ppm).

Procedimiento:

- Después de climatizar las muestras, limpiar con cuidado la punta de la sonda, ya sea con agua destilada o desionizada, para remover algún residuo de muestras anteriores.
- Colocar la sonda dentro de la muestra, a este punto el medidor debe empezar a mostrar lecturas en la pantalla, esperar por un par de minutos hasta que las lecturas se estabilicen y solo sea una.
- Anotar la lectura final que muestra el medidor, limpiar la punta de la sonda nuevamente y repetir el mismo procedimiento con el resto de las muestras.



Figura 19 Medidor de Oxígeno disuelto EcoSense DO 200A. Fuente: elaboración propia

5.3.7. Conductividad, Salinidad y Total Sólidos Disueltos (TSD)

5.3.7.1. Unidades de medición

En el caso de la conductividad, las medidas dadas en el sistema internacional de medidas (SI), el recíproco de ohm es siemens (S) y la conductividad es reportada como milisiemens por metro (mS/m).

En el caso de salinidad, teniendo en cuenta que esta no tiene unidades como tal, simplemente se presenta en unidades de concentración, en este caso, partes por trillón (ppt)

En el caso de TSD, este se mide en términos de concentración mg por L (mg/L).

5.3.7.2. *Instrumentos y procedimientos*

Instrumento:

El instrumento a usar para este ensayo es el Ecosense 300A, el cual posee una sonda que mide tanto la temperatura como la conductividad, total de sólidos disueltos (*TSD*) y la salinidad del agua. Cabe recalcar que, en cuanto a la conductividad, este instrumento realiza una corrección por temperatura, dándonos la conductividad, sin importar que temperatura tenga el agua en el momento, de su conductividad a 25°C.

Procedimiento:

- Después de climatizar las muestras, limpiar con cuidado la punta de la sonda, ya sea con agua destilada o desionizada, para remover algún residuo de muestras anteriores.
- Colocar la sonda dentro de la muestra, a este punto el medidor debe empezar a mostrar lecturas en la pantalla, esperar por un par de minutos hasta que las lecturas se estabilicen y solo sea una.
- Anotar la lectura final que muestra el medidor, limpiar la punta de la sonda nuevamente y repetir el mismo procedimiento con el resto de las muestras.



Figura 20 Medidor de conductividad y salinidad Ecosense EC 300A. Fuente: elaboración propia

5.3.8. Alcalinidad

5.3.8.1. Unidades de medición

Las unidades de medición usadas para alcalinidad son mg de carbonato de calcio por litro (CaCO_3/L).

5.3.8.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumentos:

- Agitador magnético.
- Pipetas, volumétrico.
- Matraz de Erlenmeyer, volumétrico, 1000-, 200-, 100-mL.
- Bureta, vidrio bricolado, 50-, 25-, 10-mL.
- Botella de polifeina, 1-L.
- Gotero, volumétrico, 5-mL.

Reactivos:

- Agua libre de dióxido de carbono. (destilada o desionizada)
- Ácido sulfúrico estándar o ácido hidrociorhídrico, 0.1*N*.
- Ácido sulfúrico estándar o ácido hidrociorhídrico 0.02*N*.
- Indicador verde de bromocresol, indicador de 4.5 de pH. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Procedimiento:

- Trasladar 100 ml de la muestra a un matraz de Erlenmeyer de 200 mL.
- Agregar 20 mg de indicador verde de bromocresol (aproximadamente 5 gotas del gotero) a la muestra.
- Agregar a la bureta de 50 mL, ácido hidrociorhídrico al 0.02*N* hasta la marca de 50 mL.
- Ubicar el matraz de Erlenmeyer debajo de la bureta, y lentamente abrir la válvula de la bureta, iniciando un goteo del ácido hidrociorhídrico en la muestra con el indicador. Se aconseja que la cadencia de goteo sea baja debido a que el cambio de color en la muestra puede ser muy rápido. Se permite dejar gotear el ácido hidrociorhídrico lentamente y agitar el Erlenmeyer con baja intensidad hasta que haya un cambio del color azul a amarillo completamente.
- Anotar la cantidad de ácido hidrociorhídrico usada para que se diera el cambio de color en la muestra. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Cálculos:

- Se usa la siguiente fórmula para obtener resultados en las unidades estándares:

$$\text{Alcalinidad en mg de } \text{CaCO}_3/\text{L} = \frac{A \times N \times 50000}{\text{mL de muestra}}$$

Donde:

A = mL de ácido estándar usado

N = normalidad del ácido usado. (American Health Public Association *et al.*, 2017)



Figura 21 Ácido clorhídrico con una concentración de 0.02N. Fuente: elaboración propia



Figura 22 Indicador de pH bromocresol verde. Fuente: elaboración propia



Figura 23. Bureta de vidrio bricolado, volumen de 50 mL. Fuente: elaboración propia

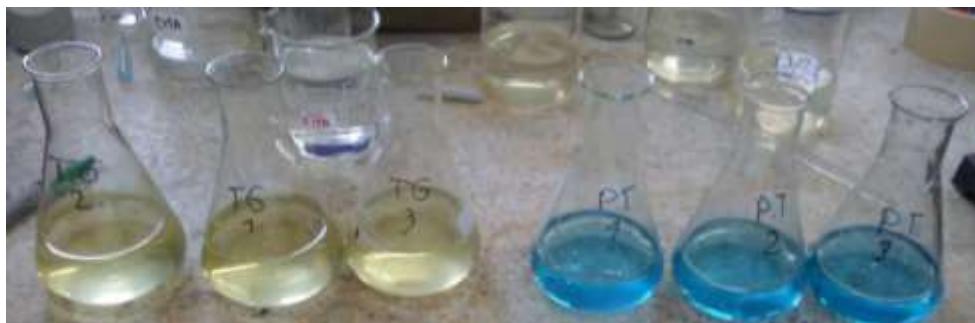


Figura 24 Muestras con bromocresol verde antes (Izquierda) y después (Derecha) del cambio de pH debido al ácido clorhídrico. Fuente: elaboración propia

5.3.9. Aceites y grasas

5.3.9.1. Unidades de medición

Debido a que se determina la cantidad de unas sustancias (aceites y grasas) se utilizan unidades de concentración, las cuales en este caso son mg/L.

5.3.9.2. Instrumentos y procedimiento

Instrumentos:

- Aparato de extracción, soxlet, con un frasco de extracción de 125 mL.
- Dedal de extracción, papel, disolvente.
- Manta eléctrica calefactora.
- Bomba de vacío u otra fuente de vacío.
- Aparato de filtración de vacío.
- Embudo Buchner, 12 cm.
- Filtro de papel, diámetro 11 cm.
- Discos de tela de muselina, diámetro 11 cm, disolvente.

- Perlas de vidrio o lana de vidrio, disolvente.
- Baño de maría, capaz de mantener 85°C.
- Adaptador de destilación con punta de goteo.
- Baño de hielo.
- Recipiente de residuos, para disolvente usado.
- Desecadora.

Reactivos:

- Ácido hidrocloclorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H₂SO₄), 1:1.
- N-hexano
- Suspensión auxiliar de filtración de sílice de diatomeas, 10 g/L agua destilada. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Procedimiento:

- Cuando la muestra es traída al laboratorio, se puede o marcar la botella en el menisco o pesar la botella para luego determinar su volumen.
- Si la muestra no ha sido acidificada con anterioridad, acidificar con 1:1 de HCl o 1:1 de H₂SO₄ a un pH de 2 o menor.
- Preparar el filtro que consiste de un disco de tela de muselina superpuesto con un filtro de papel.
- Mojar el filtro y la muselina y presionar hacia abajo los bordes del papel.
- Usando la bomba de vacío, pasar 100 mL de suspensión de ayuda de filtro a través del filtro preparado y lavarlo con 1 litro de agua destilada.

- Aplicar vacío hasta que el agua cese de pasar a través del filtro.
- Usando pinzas, transferir el filtro entero a un vidrio de reloj. Añadir material a los bordes del disco de tela de muselina.
- Limpiar los lados y el fondo del recipiente colector y el embudo de Buchner con piezas del filtro de papel mojado en disolvente, tomando el cuidado de remover todas las películas causadas por la grasa y coleccionar todo el material sólido.
- Rodar todos los filtros que contienen material de las muestras y ajustarlos dentro de un dedal de extracción.
- Añadir cualquier pieza de material restante en el vidrio de reloj. Limpiar el vidrio de reloj con el filtro de papel mojado en disolvente y ubicarlo en el dedal de extracción.
- Secar el dedal lleno en un horno de aire seco a una temperatura de 103°C por 30 minutos. Llenar el dedal con tela de vidrio o pequeñas perlas de vidrio.
- Pesar el frasco de extracción y añadir 100 mL de disolvente (n-hexano).
- Extraer los aceites y grasas en el aparato soxhlet, a un ritmo de 20 ciclos/hora por 4 horas, medido desde el primer ciclo completado.
- Para conocer el volumen de la muestra inicial, se puede o llenar la botella hasta la marca con agua y luego poner agua dentro de una probeta de 1 L de volumen o pesar el contenedor y la tapa y calcular el volumen de la muestra por la diferencia inicial del peso (asumiendo que la densidad de la muestra es 1.00) (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Cálculos:

El cálculo de las grasas y aceites es el siguiente:

$$\text{mg de aceites y grasas /L} = \frac{W_r}{V_s}$$

Donde:

W_r = Total peso del frasco extractor y residuo, menos el peso de tara del frasco, en mg

V_s = el volumen inicial de la muestra, en L. (American Health Public Association *et al.*, 2017)



Figura 25 Muestra acidificada a menos de 2.8 pH. Fuente: elaboración propia



Figura 26 Bomba de vacío. Fuente: elaboración propia



Figura 27 Filtro de papel, diámetro 11 cm. Fuente: elaboración propia



Figura 28 Aparato de extracción, soxlet, con un frasco de extracción de 125 mL. Fuente: Google imágenes

5.3.10. Conteo bacteriano por método de Número Más Probable (NMP)

5.3.10.1. Unidades de medición

Las técnicas de fermentación pueden ser usadas para detectar coliformes en aguas potables o cuantificar la cantidad de coliformes en aguas potables y no potables.

Cuando múltiples tubos son usados, la densidad de los coliformes es estimada por medio de tablas de Número Más Probable (NMP). Este número, el cual es generado usando formulas específicas de probabilidad, es de la densidad promedio de coliformes en la muestra.

La unidad con la que se suelen dar los resultados son NMP/100mL de muestra.

5.3.10.2. Instrumentos y procedimiento

Muestreo:

El muestreo se realiza en botellas las cuales fueron sometidas a una esterilización previa. A la hora del muestreo, se mantienen las botellas cerradas durante todo momento y solo se abren al momento exacto del muestreo y se cierran inmediatamente después de recoger la muestra para evitar lo más posible cualquier tipo de contaminación externa.

Procedimiento:

Fase presuntiva

- Usar el caldo de lauril Triptosa (LTB) en el ensayo de tubos múltiples.

Tabla 5

Preparación del caldo de Lauril Triptosa.

Inóculo	Cantidad de medio en el tubo	Volumen del medio + Inóculo	Caldo de Lauril Triptosa deshidrata requerida
mL	mL	mL	g/L
1	10 o más	11 o más	35.6
10	10	20	71.2
10	20	30	53.4
20	10	30	106.8
100	50	150	106.8
100	35	135	137.1
100	20	120	213.6

(American Health Public Association et al., 2017, Sección 9221B)

- Añadir los ingredientes deshidratados al agua, combinarlos a fondo, y calentar para disolver. Antes de esterilización, dispensar suficiente medio dentro de los tubos de fermentación que contienen viales invertidos (también conocidos como tubos Durham) para cubrir los viales invertidos al menos un medio (1/2) a dos tercios (2/3) después del esterilizado. Cerrar los tubos con metal o tapas plásticas resistentes al calor.
- Prepara de acuerdo con la tabla 5, haciendo que el caldo de lauril tripasa se concentre lo suficiente al añadir porción es de 100-, 20-, o 10-mL de muestra al medio no reducirá la concentración de ingredientes debajo de los estándares del medio. Ponga el medio en la autoclave a 121°C por 12 a 15 minutos. Asegure que los viales invertidos usados se encuentren libres de burbujas.
- Arregle los tubos de fermentación en filas de 5 a 10 tubos cada una en un estante de tubos de prueba. El número de filas y los volúmenes seleccionados de muestra dependiendo de la calidad y el carácter del agua a ser examinada. Para agua potable, 10 mL deben ser testeado. Usar 5 proporciones de 20 mL, diez proporciones de 10 mL, o una proporción de 100 mL (una sola botella). Para agua no potable, usar 5 tubos por dilución (de 10, 1, 0.1 mL, etc.).
- Agitar las muestras y las diluciones de forma vigorosa por 5 s (cerca de 25 veces). Inocular cada tubo en un set de cinco con volúmenes de muestra replicados en diluciones crecientes decimales. Si las cantidades decimales de las muestras son usadas, mezcla las proporciones de la prueba en el medio con una agitación suave.

- Inocular prontamente los tubos o botellas, cualquier control cultural, y/o blancos estériles a $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$. después de 24 ± 2 h, rotar cada tubo o botella suavemente y examinarlos para comprobar crecimiento, gas, y/o reacción acídica evidente, volverlos a incubar y examinar al final de las 48 ± 3 h. copiar la presencia o ausencia de crecimiento, gas y/o producción de ácido. Presencia de alguna de las situaciones anteriores (excepto ausencia) significa una respuesta positiva, de lo contrario es una respuesta negativa. (American Health Public Association *et al.*, 2017)

Fase de confirmación:

- Cultivar medio: usar tubos de BGLG (caldo bilis verde brillante 2%).



Figura 29 Tubo lleno de Caldo Lauril Sulfato (Caldo Lauril Triptosa-LTB) con tubos detrás llenos de Caldo Bilis Verde Brillante 2%. *Fuente:* elaboración propia

- Añadir los ingredientes deshidratados al agua, combinarlos a fondo, y calentar para disolver. Antes de esterilización, dispensar suficiente medio dentro de los

tubos de fermentación que contienen viales invertidos (también conocidos como tubos Durham) para cubrir los viales invertidos al menos un medio (1/2) a dos tercios (2/3) después del esterilizado. Cerrar los tubos con metal o tapas plásticas resistentes al calor.

- Ponga el medio en la autoclave a 121°C por 12 a 15 minutos. Asegure que los viales invertidos usados se encuentren libres de burbujas.
- Prontamente presentar todos los tubos positivos de la anterior fase a la fase de confirmación.
- Agitar gentilmente o rotar los tubos positivos de la fase anterior. Con un asa de siembra esterilizada de 3.0 a 3.5 mm de diámetro, transferir una o más bucles de cultura de los tubos de fermentación que contienen caldo BGLB. Repetir igualmente para todos los tubos positivos de la anterior fase. Analistas podrían inocular el caldo BGLB al mismo tiempo para coliformes totales.
- Prontamente inocular los tubos de caldo BGLB a unos $35 \pm 0.5^\circ\text{C}$. Cualquier cantidad de gas formado en los tubos invertidos en los tubos con caldo BGLB a cualquier momento dentro de las siguientes 48 ± 3 h constituye una respuesta positiva. (American Health Public Association *et al.*, 2017)



Figura 30 Muestras para ensayo de conteo de coliformes en frascos con previa esterilización. Fuente: elaboración propia

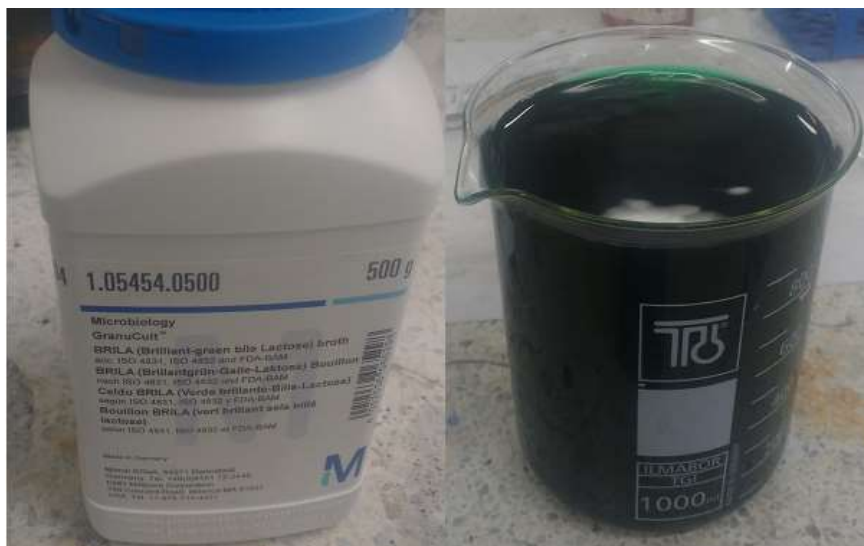


Figura 31 Caldo Bilis Verde Brillante 2%. Fuente: elaboración propia



Figura 32 Caldo Lauril Triptosa-LTB. Fuente: Google imágenes

Cálculo de NMP:

Para este caso, para el agua de las fases Post-trampa de grasa y Post-coagulación-floculación se usarán las concentraciones 10^{-2} , 10^{-3} y 10^{-4} , mientras que, en la fase final, con el agua ya tratada se usarán 10^{-1} , 10^{-2} y 10^{-3} . Teniendo esto en cuenta, dependiendo de las combinaciones de tubos positivos, en la siguiente tabla encontraremos el valor del índice de NMP/100 mL, el cual usaremos más adelante para calcular finalmente la concentración de coliformes en 100 mL de solución (el agua).

Tabla 6

Índice de NMP y confianza límite del 95% para varias combinaciones de tubos positivas.

Combination of Positives	MPN Index/100 mL	Confidence Limits		Combination of Positives	MPN Index/100 mL	Confidence Limits	
		Low	High			Low	High
0-0-0	<1.8	—	6.8	4-0-3	25	9.8	70
0-0-1	1.8	0.090	6.8	4-1-0	17	6.0	40
0-1-0	1.8	0.090	6.9	4-1-1	21	6.8	42
0-1-1	3.6	0.70	10	4-1-2	26	9.8	70
0-2-0	3.7	0.70	10	4-1-3	31	10	70
0-2-1	5.5	1.8	15	4-2-0	22	6.8	50
0-3-0	5.6	1.8	15	4-2-1	26	9.8	70
1-0-0	2.0	0.10	10	4-2-2	32	10	70
1-0-1	4.0	0.70	10	4-2-3	38	14	100
1-0-2	6.0	1.8	15	4-3-0	27	9.9	70
1-1-0	4.0	0.71	12	4-3-1	33	10	70
1-1-1	6.1	1.8	15	4-3-2	39	14	100
1-1-2	8.1	3.4	22	4-4-0	34	14	100
1-2-0	6.1	1.8	15	4-4-1	40	14	100
1-2-1	8.2	3.4	22	4-4-2	47	15	120
1-3-0	8.3	3.4	22	4-5-0	41	14	100
1-3-1	10	3.5	22	4-5-1	48	15	120
1-4-0	11	3.5	22	5-0-0	23	6.8	70
2-0-0	4.5	0.79	15	5-0-1	31	10	70
2-0-1	6.8	1.8	15	5-0-2	43	14	100
2-0-2	9.1	3.4	22	5-0-3	58	22	150
2-1-0	6.8	1.8	17	5-1-0	33	10	100
2-1-1	9.2	3.4	22	5-1-1	46	14	120
2-1-2	12	4.1	26	5-1-2	63	22	150
2-2-0	9.3	3.4	22	5-1-3	84	34	220
2-2-1	12	4.1	26	5-2-0	49	15	150
2-2-2	14	5.9	36	5-2-1	70	22	170
2-3-0	12	4.1	26	5-2-2	94	34	230
2-3-1	14	5.9	36	5-2-3	120	36	250
2-4-0	15	5.9	36	5-2-4	150	58	400
3-0-0	7.8	2.1	22	5-3-0	79	22	220
3-0-1	11	3.5	23	5-3-1	110	34	250
3-0-2	13	5.6	35	5-3-2	140	52	400
3-1-0	11	3.5	26	5-3-3	170	70	400
3-1-1	14	5.6	36	5-3-4	210	70	400
3-1-2	17	6.0	36	5-4-0	130	36	400
3-2-0	14	5.7	36	5-4-1	170	58	400
3-2-1	17	6.8	40	5-4-2	220	70	440
3-2-2	20	6.8	40	5-4-3	280	100	710
3-3-0	17	6.8	40	5-4-4	350	100	710
3-3-1	21	6.8	40	5-4-5	430	150	1100
3-3-2	24	9.8	70	5-5-0	240	70	710
3-4-0	21	6.8	40	5-5-1	350	100	1100
3-4-1	24	9.8	70	5-5-2	540	150	1700
3-5-0	25	9.8	70	5-5-3	920	220	2600
4-0-0	13	4.1	35	5-5-4	1600	400	4600
4-0-1	17	5.9	36	5-5-5	>1600	700	—
4-0-2	21	6.8	40				

(American Health Public Association et al., 2017, Sección 9221C)

Teniendo en cuenta esto, calculamos la concentración de coliformes de la siguiente manera:

$$NMP/_{100\text{ mL}} = \text{Indice NMP}/_{100\text{ mL}} * 10/V$$

Donde:

V = volumen de la proporción de la muestra con la menor dilución seleccionada.

(American Health Public Association et al., 2017)

5.4. Diseño y ejecución del tratamiento de aguas residuales del lavado

El sistema está dividido en dos partes:

La primera parte se encuentra ubicada en el sitio del caso de estudio, es decir, el lavadero de autos. La figura #2 muestra un esquema del interior del lavadero, donde cabe recalcar el sistema de desagüe de aguas residuales de lavado y la ubicación del tanque de estas aguas, el cual, además de reservar a estas, funciona como un registro tipo arenoso, dejando que los sólidos suspendidos en el agua se hundan, mientras el agua residual es devuelta al sistema de desagüe de la ciudad.

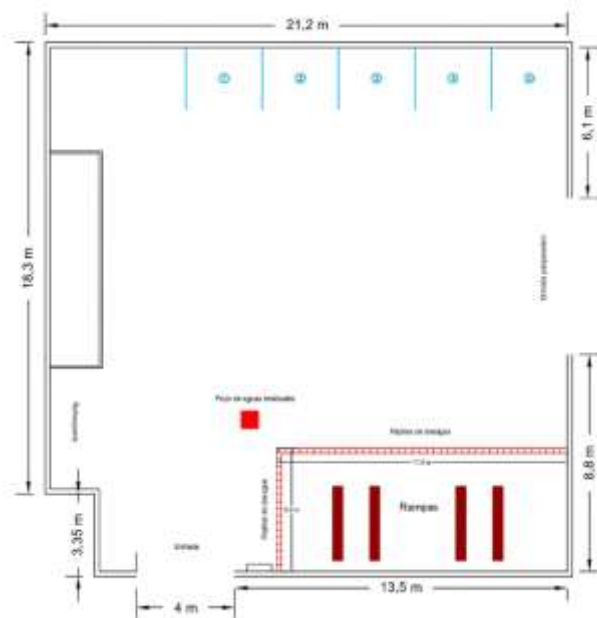


Figura 33 Plano del lavadero de autos, el cual es nuestro caso de estudio. Fuente: elaboración propia

La figura #3 nos muestra claramente el procedimiento que se llevará a cabo en esta primera fase, en donde se traslada agua residual del pozo a la trampa de grasa, el cual como su nombre implica, ayuda a la remoción de grasas y aceites en la superficie del agua.

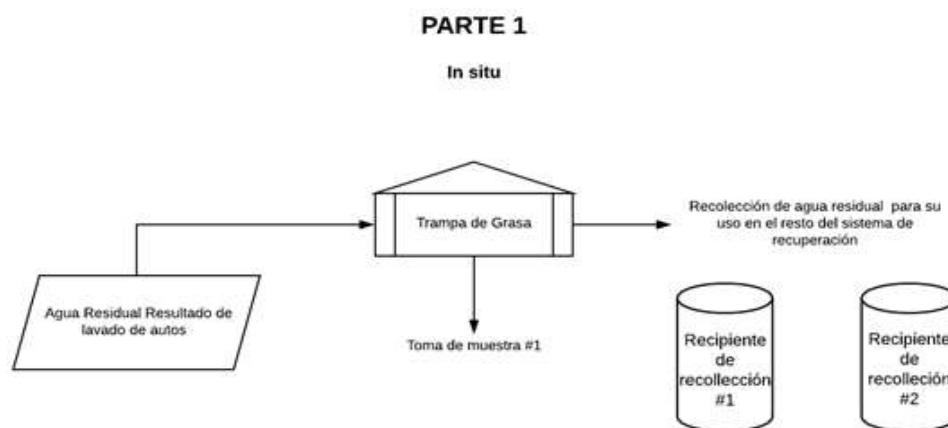


Figura 34 Esquema de la primera parte del sistema de tratamiento. Fuente: elaboración propia



Figura 35 Trampa de grasa en funcionamiento. Fuente: elaboración propia

En el laboratorio:

Esta segunda parte del sistema se encuentra en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de la Costa, donde el resto del sistema llevará a cabo el tratamiento.

Este cuenta con un primer tanque de capacidad máxima de unos veinte litros, en el cual se llevará a cabo el proceso de coagulación. El ensayo de coagulación requiere de un equipo, el cual cuenta con una serie de motores a los cuales tiene reguladas sus revoluciones, debido a la necesidad de controlar las mismas para el ensayo. Debido a dificultades de presupuesto, se hizo una adaptación con dos piedras dispersoras de aire, una bomba compresora de aire, una serie de mangueras que conducen el aire conectadas a una válvula para regular la entrada de mismo, con tal de imitar la variación de revoluciones usadas en el ensayo. En la ilustración #1 se puede ver en tanque junto a la adaptación que se llevó a cabo. También debido a la capacidad del tanque es comparación con la cantidad de agua residual recolectada (38 a 40 litros), será necesario, al menos, dos procesos completos para tratar el material en su totalidad.

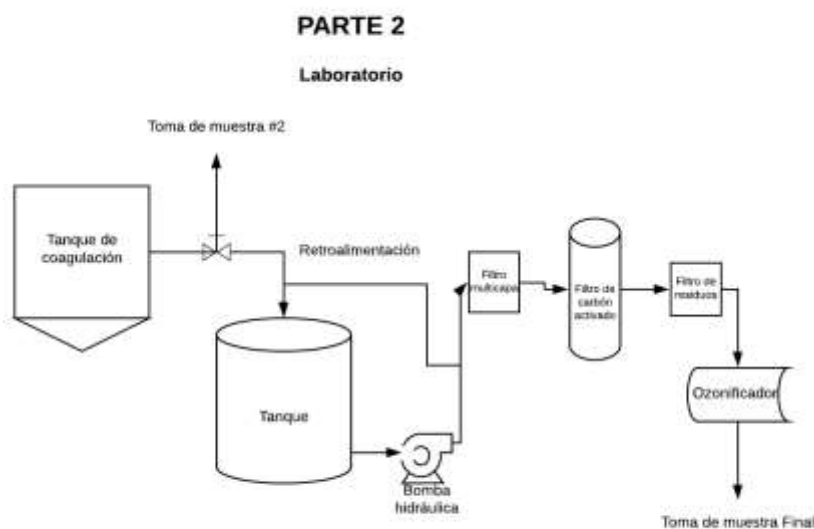


Figura 36 Esquema de la segunda parte del sistema de tratamiento, ya en el laboratorio. Fuente: elaboración propia



Figura 37. Muestra durante y al finalizar el proceso de coagulación-floculación. *Fuente:* elaboración propia

Después del proceso de coagulación, procede un segundo tanque con mayor capacidad del primero. Por cuestiones de diseño, para evitar algún problema de cavitación en la bomba hidráulica, se espera a realizar dos procesos completos de coagulación antes de poner en ejecución el resto del sistema. Debido a cuestiones de procedimiento en cuanto a proveedores afiliados a la universidad y disponibilidad en el momento, solo fue posible la compra de una bomba hidráulica con una potencia de medio (1/2) caballo de fuerza, el cual es mucho más potente del necesitado para ejecutar el resto del sistema, por lo cual se realizó el diseño una especie de retroalimentación, a partir de tubos PVC y mangueras, con el cual se podrá controlar la presión en el resto del sistema. De hecho, la retroalimentación al sistema puede ser un causante de un posible efecto positivo en los resultados, pero para confirmarlo sería necesario su evaluación a través de experimentación

Siguiente a esto, a partir del sistema de retroalimentación, hay otra salida, que, a partir de mangueras, conecta el filtro multicapa, el filtro de carbón activado, un pequeño filtro para remover residuos de carbón activado en el agua y, finalmente, el ozonificador, el cual efectuará la labor de desinfección, y por donde finalmente saldrá el agua ya tratada para un posterior uso, o en este caso, un muestreo final.



Figura 38 Fase final del sistema de tratamiento de agua residual. *Fuente:* elaboración propia

En el anexo 1. Podremos observar el presupuesto de los materiales, herramientas e insumos

6. Caso de estudio

Nuestro caso de estudio se encuentra ubicado en la ciudad de Barranquilla, capital del departamento del Atlántico, Colombia. Este es un lavadero de automóviles, ubicado más precisamente en el barrio El Rosario. La zona circundante al lavadero de automóviles es una zona en su mayoría comercial, debido a la presencia de una gran cantidad de negocios que van desde tiendas, hoteles, estaderos, talleres de motocicletas, negocios de comidas, entre otros. Al ser esta zona con alto volumen comercial, hay una presencia alta de vehículos, desde buses, busetas, carros, taxis y motocicletas.



Figura 39 Ubicación de la ciudad de Barranquilla en Colombia. Fuente: Google maps



Figura 40 Ubicación de la ciudad de Barranquilla en el departamento del Atlántico. Fuente: Google maps

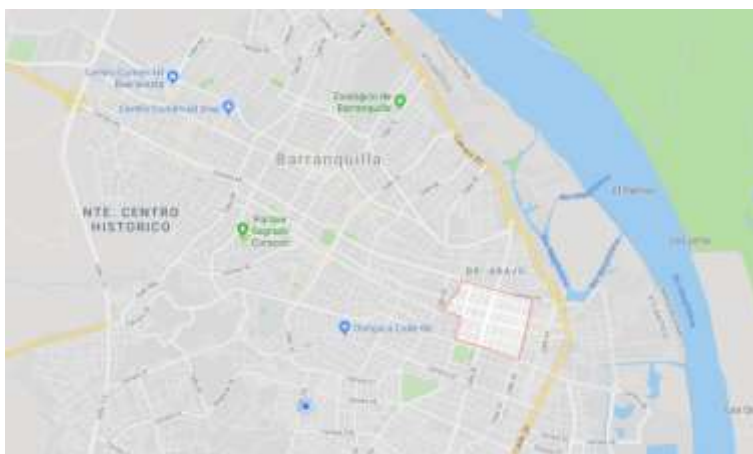


Figura 41 Sector donde se encuentra nuestro caso de estudio en la ciudad de Barranquilla. Fuente: Google maps

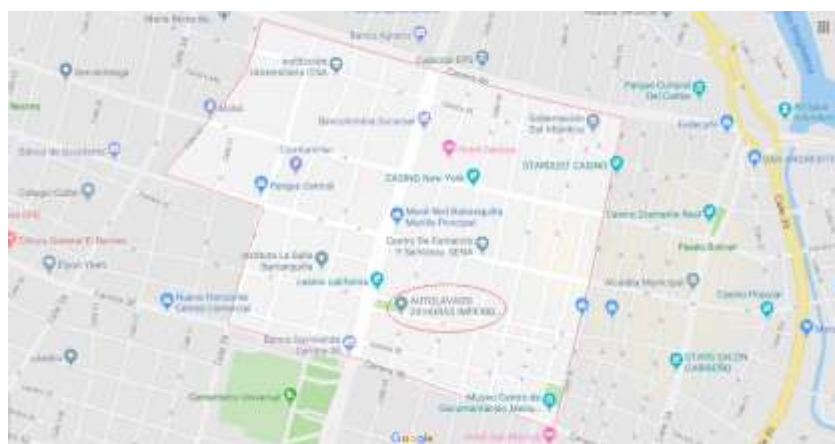


Figura 42 Alrededores de la ubicación de nuestro caso de estudio. Fuente: Google maps

7. Resultados y discusión

En la presente sección son presentados todos los resultados de los ensayos realizados durante todo el proceso de evaluación del sistema.

Acá en la siguiente tabla se encuentran los resultados de las pruebas previas que se le hicieron, tanto al agua resultante del lavado como el agua usada para el proceso de lavado, cuyo origen es proveniente de un pozo subterráneo ubicado en el área del lavadero.

Tabla 7

Resultados de muestreos previos al tratamiento.

Parámetro/Muestra	Agua Resultante de Lavado (Promedio de 3 muestras)		Agua Proveniente de pozos subterráneos (Promedio de 3 muestras)		Variación
	Promedio	Desviación estándar	Promedio	Desviación estándar	
pH	7.82	0.064	7.74	0.086	1%
OD (ppm)	3.00	0.440	4.74	0.241	-58%
OD (%)	33.89	5.148	52.64	2.819	-55%
Conductividad (mS/cm)	0.81	0.012	0.71	0.005	12%
Salinidad (ppt)	0.40	0.000	0.36	0.053	11%
TSD (g/L)	528.78	7.155	464.29	3.275	12%
DQO (mg O₂/L)	90.11	28.087	38.56	33.186	57%
Color (PCU)	378.33	149.248	5.56	6.346	99%
Turbidez (UNT)	108.48	95.483	0.87	0.611	99%

Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	326.11	1.235	305.56	3.868	6%
DBO (mg O₂/L)	43.97	5.928	17.53	1.650	60%

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar, parámetros como el pH, la conductividad, la salinidad, Total Sólidos Disueltos (*TSD*) y la alcalinidad tienen variaciones menores entre el agua de pozo y la resultante del lavado, lo que indican que estos no son afectados de gran manera debido a su uso en el proceso de lavado, en comparación con otros parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el oxígeno disuelto (OD) los cuales muestran una diferencia mucho más notable, lo que nos indica que el agua entra en contacto con una cantidad considerable de material orgánico e inorgánico durante el lavado del auto y lo carga de este material y finalmente, en los parámetros de color y turbidez es donde se dan las diferencias más notables entre ambos tipos de agua, esto indica un aumento bastante considerable en los sólidos suspendidos en el agua luego del proceso de lavado.

Podemos observar también en los resultados como en los parámetros de DQO, turbidez y color en aguas resultantes de lavado se presentan las mayores desviaciones en cuanto a los datos recopilados, esto se debe a 2 situaciones:

- El número de pruebas realizadas, que fueron solamente 3, debido a que solo se buscaba tener una idea general de las características de ambos tipos de agua.
- La gran variación que se presenta en estos parámetros del agua resultante de lavado, la cual no solo es evidente debido a los datos obtenidos, si no también debido a simple

observación a la hora de la recolección de muestras, donde se evidenciaba la gran variación que se daba cada vez que se realizaba un muestreo.

A partir de esto, se decidió, como anteriormente se aclaró en la metodología, el uso de un proceso de coagulación-floculación. Para esto se debió realizar un ensayo de dosis óptima para la determinar la concentración de coagulante más óptima para la remoción de este material solido suspendido en el agua.

Estos son los resultados:

Tabla 8

Resultados del ensayo de jarras.

Dosis (mg/L)	20	30	35	40	45	50	55	60	70	90	120
Absorbancia (ABS)	0.064	0.06	0.056	0.045	0.031	0.027	0.016	0.017	0.0145	0.01	0.03
pH	7.57	7.5	7.48	7.46	7.325	7.13	6.95	7.01	6.995	6.89	7.15
Color (PCU)	100	85	80	65	65	45	35	40	32.5	17.5	15
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	341	331.5	325.5	318.5	317.5	314.75	316.5	308.5	299.75	276.25	270

Fuente: elaboración propia

Debido a dificultades con el turbidímetro en el intervalo de tiempo en el que se realizó este ensayo, se dio uso de la absorbancia como nuestro parámetro decisivo en cuanto a la elección de la dosis óptima, junto con otros parámetros que tuvieron menor impacto, pero que, aun así, fueron tomados en cuenta para seleccionar la dosis óptima.

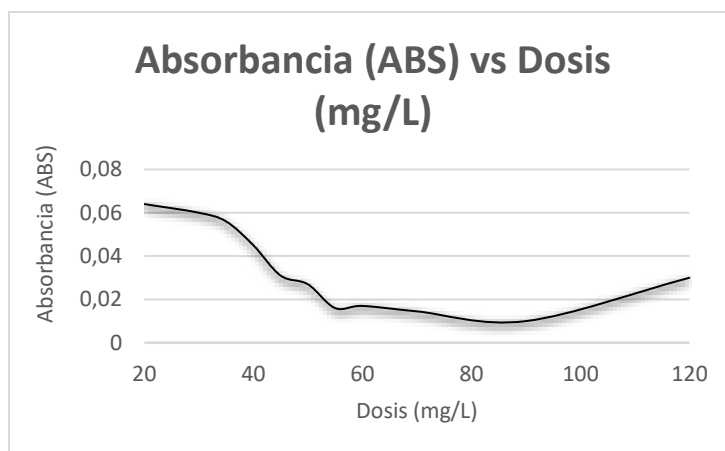


Figura 43 Absorbancia (ABS) vs dosis de coagulante (mg/L). Fuente: elaboración propia

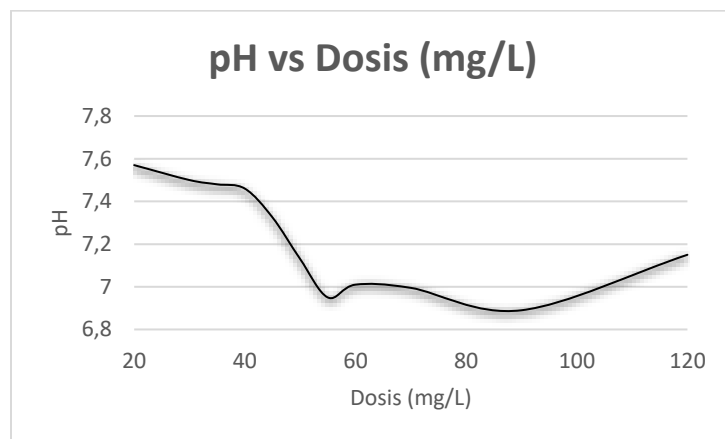


Figura 44 pH vs dosis de coagulante (mg/L). Fuente: elaboración propia

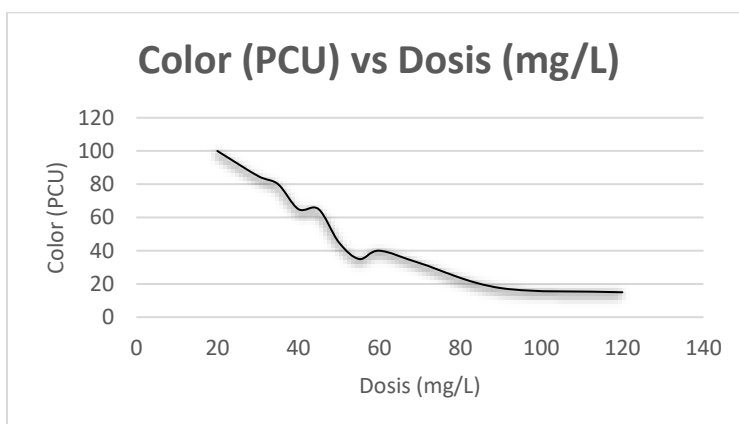


Figura 45 Color (PCU) vs dosis de coagulante (mg/L). Fuente: elaboración propia

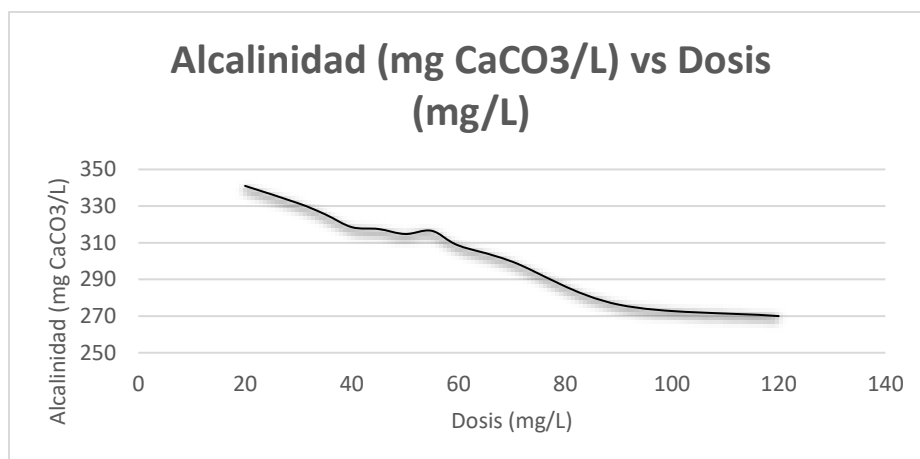


Figura 46 Alcalinidad (mg CaCO₃) vs dosis de coagulante (mg/L). Fuente: elaboración propia

Después de analizar los datos, y con ayuda de las gráficas, determinamos que la dosis óptima para nuestro coagulante era de 90 mg/L de solución de cloruro férrico al 1%. (1 mg/L). Esto se debió a que obtuvo en el parámetro de absorbancia los mejores resultados en comparación con el resto, además que se desempeñó de manera muy eficiente en el resto de parámetros a comparar.

De ahí, se dio comienzo a la ejecución y evaluación del sistema de tratamiento, cuyos resultados podemos observar en la tabla:

Tabla 9

Resultados del análisis de las muestras de agua residuales en las distintas etapas de tratamiento.

Parámetro/ Muestra	T.G. (Trampa de grasa) (Promedio de 39 muestras) ¹				P.C. (Post-Coagulación-floculación) (Promedio de 39 muestras) ¹					P.T. (Post-Tratamiento) (Promedio de 39 muestras) ¹				
	(min- máx.)	Desviación estándar	(min- máx.)	Desviación estándar	Variación	(min- máx.)	Desviación estándar	Variación	(min- máx.)	Desviación estándar	Variación			
pH	7.53	6.96	7.95	1.2	7.14	6.66	7.8	0.22	5.14%	7.22	6.87	7.47	0.12	4%
DO (ppm)	2	0.07	4.41	1.33	4.26	3.07	5.55	0.73	53.10%	3.88	2.46	5.31	0.63	49%
DO (%)	23.19	0.85	49.1	15.58	47.99	33.5	65.5	8.35	51.68%	43.72	28.1	64.3	7.4	47%
Conductividad (mS/cm)	0.82	0.7	0.97	0.15	0.89	0.74	1.03	0.08	-8.74%	0.83	0.28	0.98	0.16	-1%

Salinidad (ppt)	0.4	0.3	0.5	0.08	0.45	0.4	0.5	0.05	-12.12%	0.4	0.1	0.5	0.07	0%
TSD (g/L)	0.54	0.46	0.63	0.1	0.58	0.48	0.67	0.05	-7.83%	0.54	0.19	0.64	0.08	-1%
DQO (mg O₂/L)	129	23	350	82.75	57.24	0	128	32.15	55.63%	5.28	0	22	6.13	96%
Color (PCU)	265.63	90	500	151.03	93.21	40	205	34.43	64.91%	10.13	0	30	7.45	96%
Turbidez (NTU)	71	12.5	217	58.26	10.8	3.85	25.4	6.31	84.79%	1.68	0.84	3.05	0.35	98%
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	440.4	31.4	530	9.89	348.85	221	465	6.99	20.79%	313.56	160	402	5.78	29%
DBO (mg O₂/L)	59.38	26.3	90	19.18	33.58	14.7	63	13.13	43.46%	14.79	7.1	27.4	7	75%
Concentración de Grasas y Aceites (mg/L)	0.3	-	-	-	0.3	-	-	-	-1.44%	0.02	-	-	-	93%

Fuente: elaboración propia

¹ todos excepto DBO donde fueron 13 muestras, y concentración de aceites y grasas donde solo fue una muestra.

Esta tabla separa los datos en tres partes de gran relevancia durante el tratamiento:

- Muestreo después de pasar por la trampa de grasa.
- Muestro luego del proceso de coagulación-floculación.
- Muestro en del agua ya tratada luego de realizar todo el proceso de tratamiento.

Tabla 10

Datos de forma simplificada.

Parámetro/Muestra	Orden de magnitud	T.G. (Trampa de grasa)	P.C. (Post-Coagulación)	P.T. (Post-Tratamiento)
pH	10 ⁰	7.53	7.14	7.22
DO	ppm x 10 ⁰	2.00	4.26	3.88
DO	% x 10 ⁻¹	2.32	4.80	4.37
Conductividad	mS/cm x 10 ¹	8.20	8.90	8.30
Salinidad	ppt x 10 ¹	4.00	4.50	4.00
TDS	g/L x 10 ¹	5.40	5.80	5.40
DQO	mg O ₂ /L x 10 ⁻¹	12.90	5.72	0.53
Color	PCU x 10 ⁻²	2.66	0.93	0.10
Turbidez	NTU x 10 ⁻¹	7.10	1.08	0.17
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L x 10 ⁻²	4.40	3.49	3.14

DBO	mg O ₂ /L x 10 ⁻¹	5.94	3.36	1.48
Concentración de Grasas y Aceites	mg/L x 10 ¹	3.00	3.00	2.00

Fuente: elaboración propia

Comportamiento de los parámetros en las 3 etapas del tratamiento

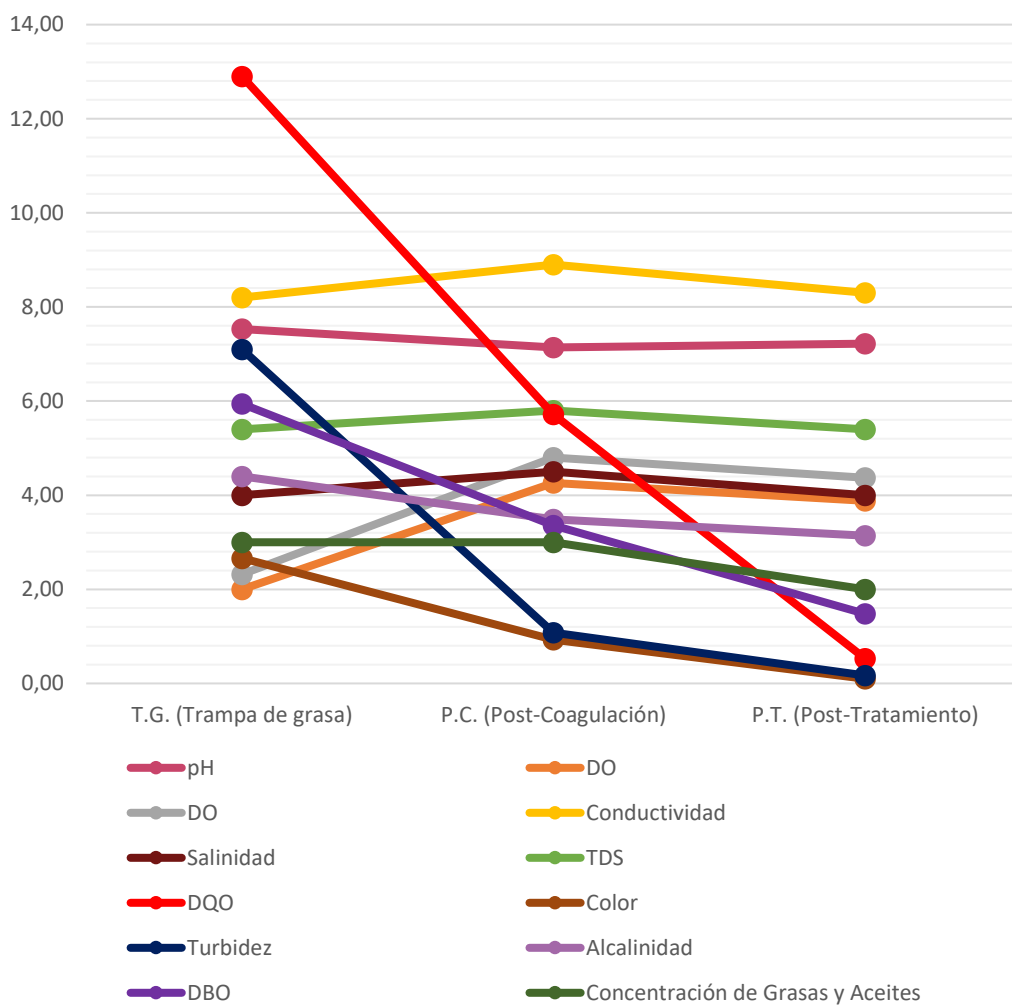


Figura 47 Comportamiento de los parámetros en las 3 etapas del tratamiento. Fuente: elaboración propia

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos durante el proceso de muestro y análisis de muestras, las tablas muestran parámetros estadísticos de los datos como la media, valores máximos y mínimos y la desviación estándar, lo que facilita su análisis. También cabe explicar que en lo que respecta a la parte de las variaciones, cuando el porcentaje es positivo, significa que cierto parámetro se redujo con respecto al otro, y cuando es negativo, este en cambio aumento.

También podemos observar una gráfica que describe el comportamiento de lo parámetros en cada una de las etapas del tratamiento y como estas se redujeron, se mantuvieron o incrementaron.

Viendo todos los resultados podemos inferir:

Antes que todo, el olor es un parámetro importante, pero que lamentablemente no se le puede otorgar un valor, ya que este es una variable subjetiva y varía de persona en persona, pero, aun así, es tomado en cuenta en todo tipo de análisis. Tanto el agua de lavado después de la trampa de grasa como en la etapa de Post-coagulación-floculación conservan un olor bastante fuerte, especialmente a gasolina, y a pesar que después del proceso de coagulación-floculación el olor se ve reducido, sigue siendo bastante predominante, a diferencia del agua resultante del tratamiento la cual ya no posee ningún olor particular, incluso se podría decir que es prácticamente inolora, los que nos da una buena señal de que el proceso de tratamiento ha tenido éxito en remover aquellas sustancias causantes de estos olores.

Se termina de confirmar variaciones de gran relevancia en los parámetros del agua de lavado de DQO, color y turbidez, y con variaciones de cierta importancia en DBO, evidenciada en la

desviación estándar de los mismos. Esto ya había sido comentado con anterioridad por medios observables, pero ahora si es efectivamente respaldado con parámetros y análisis estadísticos.

Esto nos indica la variabilidad de cargas de residuos sólidos que recibe esta agua durante el proceso de lavado, lo cual podría deberse a la gran cantidad de vehículos de todo tipo, desde motos, autos, buses, microbuses y camiones que son atendidos en este lavadero, y de los distintos residuos que estos acumulan en la carrocería y en el motor (cuando se da este tipo de servicio) y terminan en el agua residual. Determinar qué días son más y menos cargados de residuos podría llegar a ser posible con un estudio más detallado y un muestreo más extenso, pero debido a distintos factores, especialmente la disponibilidad del laboratorio y la cantidad de personal disponible para los ensayos, los datos con los que se cuentan actualmente no son suficientes para esto.

Podemos observar en los resultados las diferencias que se van presentando en los parámetros cada vez que el agua pasa por un proceso, pero hay ciertos parámetros que se mantuvieron bastante similares, estamos hablando del pH, conductividad, salinidad y *TSD*. Teniendo en cuenta que el pH inicial del agua nunca fue un problema, ya que siempre se encontraba en un nivel aceptable, y que conductividad, salinidad y *TSD* son parámetros muy relacionados entre sí y que ninguno de los métodos de tratamiento usados en este sistema era enfocado a ninguno de ellos, además que como el pH estos se encontraban en niveles aceptables y que ninguno de ellos era de gran preocupación, estos resultados eran de esperarse. Tanto las concentraciones DBO como DQO se vieron reducidas hasta un 75% y 98% respectivamente, los que nos indica la gran cantidad de material orgánico e inorgánico que fue removido del agua, además de una reducción

de material sólido suspendido en el agua, evidenciado tanto en el color aparente como en la turbidez, donde hubo una reducción de 96% y 98% respectivamente.

En cuanto a la alcalinidad podemos observar que su remoción fue en gran medida menor a los anteriores parámetros, pero fue lo suficientemente significativa para ser tomada en cuenta.

En el oxígeno disuelto ocurre una situación peculiar, este se ve incrementado en un 51% a un 53% durante el proceso de coagulación-floculación, pero el incremento en el agua ya tratada es algo menor, entre 47 y 49 por ciento, una explicación de esto es que debido a que nuestro proceso de coagulación-floculación utiliza una mecánica distinta a los normalmente usados en otros procesos de coagulación-floculación, el cual en pocas palabras consiste en inyectar aire por medio de piedras dispersoras para producir un ambiente turbulento, esto pudo ayudar de forma imprevista a un aumento en el oxígeno disuelto en el agua, lo cual el sistema de coagulación-floculación usado en el tratamiento, además de remover gran parte del material sólido suspendido, también podría oxigenar el agua; por supuesto, esto es solamente especulación, ya que en el momento no pudo ser comprobado esta hipótesis, pero datos apuntan a que esta no podría estar tan lejos de la verdad.

También cabe recalcar que aun si el aumento que se dio del oxígeno disuelto en el agua resultante del tratamiento sigue siendo considerablemente alto, y que otra parte del sistema, de forma imprevista, pudo haber colaborado en esto. Ya se comentó en la metodología que debido a que cuestiones de la bomba disponible, se tuvo que realizar una especie de sistema de retroalimentación que hace fluir el agua a una velocidad relativamente alta, lo cual podría también haber colaborado en esto, pero al igual que lo anterior, no hay evidencia suficiente para afirmarlo.

En cuanto a los aceites y grasas, debido a la poca cantidad de datos recolectados, ya que solo se pudo realizar un ensayo, no se pueden inferir algo significativo de los resultados obtenidos, pero se puede observar, al menos de los resultados obtenidos, una reducción muy significativa de este parámetro en la fase final del tratamiento. Por supuesto, como ya se mencionó, estos resultados no son de gran confianza debido a que un solo ensayo no es suficiente para demostrar una tendencia.

Algo a tener en cuenta en los resultados del agua tratada son las desviaciones estándares, donde podemos observar que los valores son relativamente bajos, especialmente cuando se comparan con las dos fases anteriores, lo que demuestra una gran homogeneidad entre los mismos, dándonos a entender que el sistema, a pesar que el agua de entrada tiene un espectro relativamente alto de variabilidad en sus características físicas, los resultados tienden a ser bastante uniformes, y, teniendo en cuenta que en ningún momento se le realizó algún tipo de mantenimiento o limpieza (a excepción del tanque de coagulación-floculación), comprueban el buen funcionamiento del sistema de tratamiento y la eficiencia del mismo.

En la figura 47 podemos observar de manera visual el cambio notable del agua en cada uno de los procesos del tratamiento.



Figura 48 De izquierda a derecha: Agua luego de la trampa de grasa, luego del proceso de coagulación-floculación y tratamiento completado. *Fuente:* elaboración propia

Tabla 11

Resultados del agua ya tratada teniendo en cuenta el tiempo de operación del ozono.

Parámetro/Muestra	Post-tratamiento - 0 min (promedio de 13 muestras)	Desviación estándar	Post-tratamiento - 10 min (promedio de 13 muestras)	Desviación estándar	Post-tratamiento - 20 min (promedio de 13 muestras)	Desviación estándar	Variación 0 min - 10 min	Variación 0 min - 20 min
pH	7.17	0.13	7.25	0.1	7.25	0.16	-1.10%	-1.20%
DO (ppm)	3.91	0.63	3.8	0.64	3.94	0.68	3.00%	-0.70%
DO (%)	44.32	7.26	43.05	7.63	44.82	8.46	2.90%	-1.10%
Conductividad (mS/cm)	0.82	0.17	0.84	0.15	0.83	0.18	-3.00%	-1.10%
Salinidad (ppt)	0.39	0.1	0.41	0.08	0.41	0.08	-3.90%	-3.90%
TSD (g/L)	0.53	0.11	0.55	0.1	0.55	0.07	-3.10%	-4.10%
DQO (mg O₂/L)	5.23	6.52	4.92	6.45	5.23	7.65	5.90%	0.00%
Color (PCU)	11.92	8.55	10	8.16	8.46	8.26	16.10%	29.00%
Turbidez (NTU)	2.01	0.64	1.63	0.35	1.4	0.34	18.70%	30.00%
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	302.77	7.82	320.15	5.98	317.77	5.79	-5.70%	-5.00%
DBO (mg O₂/L)	14.79	7.28	14.79	7.28	14.79	7.28	0.00%	0.00%

Fuente: elaboración propia

Se decidió también separar el proceso final de tratamiento en 3 partes, donde se tuvo en cuenta el tiempo de funcionamiento del ozonificador:

- Inmediatamente desde que el ozonificador empieza su funcionamiento.
- 10 minutos luego de empezar su funcionamiento.
- 20 minutos luego de empezar su funcionamiento.

Esto se debe que a estudios como el de (Taylor et al., 2014) sugieren que, dependiendo el tiempo de ejecución del ozonificador, hay una mejoría en los parámetros del agua tratada, especialmente en el aspecto desinfectante, por lo cual se buscó realizar un análisis similar con los datos obtenidos.

Primero que todo, como se explicó con anterioridad, el parámetro de DBO es el mismo en cada uno debido a que en esta etapa solo se pudo hacer un muestreo total del agua tratada, en lugar de tres, lo cual nos deja con un valor idéntico sin variación alguna. Al igual el parámetro de aceite y grasas no fue incluido en la tabla anterior por motivos idénticos al de DBO.

Como podemos observar en los parámetros de color y turbidez hay una mejoría considerable a medida que tiempo de operación del sistema aumenta, pero en el resto de parámetros los cambios son muy poco significativos, incluso se puede observar un aumento en algunos de estos.



Figura 49 Agua residual tratada. Fuente: elaboración propia

Tabla 12

Resultados de conteo de coliformes por el método de número más probable.

Prueba / NMP/100mL	T.G.	P.C.	P.T. - 0 min	P.T. - 10 min	P.T. -20 min
1	27000	22000	4400	2700	2200
2	350000	48000	17000	17000	4000
3	280000	47000	2600	1100	1100
Promedio	219000	39000	8000	6933	2433

Fuente: elaboración propia

En la tabla 11 es posible observar los resultados de la prueba microbiológica, dada en el número más probable de bacterias coliformes por cada 100 mL de solución.

Es bastante evidente la disminución de la concentración de coliformes a medida que el tiempo en que el sistema se encuentra en actividad aumenta, dándonos una mejoría del 13% a los 10 minutos de funcionamiento y un impresionante 70% de mejoría a los 20 minutos de funcionamiento, por supuesto, en comparación con la fase inicial, el agua de lavado. Por supuesto, cabe recalcar que, a diferencia del resto de pruebas, la prueba microbiología por el método del número más probable (NMP) solo fue realizado un total de 3 veces por razones ya explicadas en la metodología, por lo cual sería necesario más pruebas para lograr resultados más fiables, pero por lo menos podemos lograr demostrar una tendencia que debería ser tomada en cuenta.

Tabla 13

Variaciones de los resultados de conteo de coliformes conforme al tiempo de operación del ozono.

Prueba / NMP/100mL	P.T. - 0 min	P.T. - 10 min	P.T. -20 min	variación 0 - 10 min	variación 0 - 20 min
1	4400	2700	2200	39%	50%
2	17000	17000	4000	0%	76%
3	2600	1100	1100	58%	58%
Promedio	8000	6933.33	2433.33	13%	70%

Fuente: elaboración propia

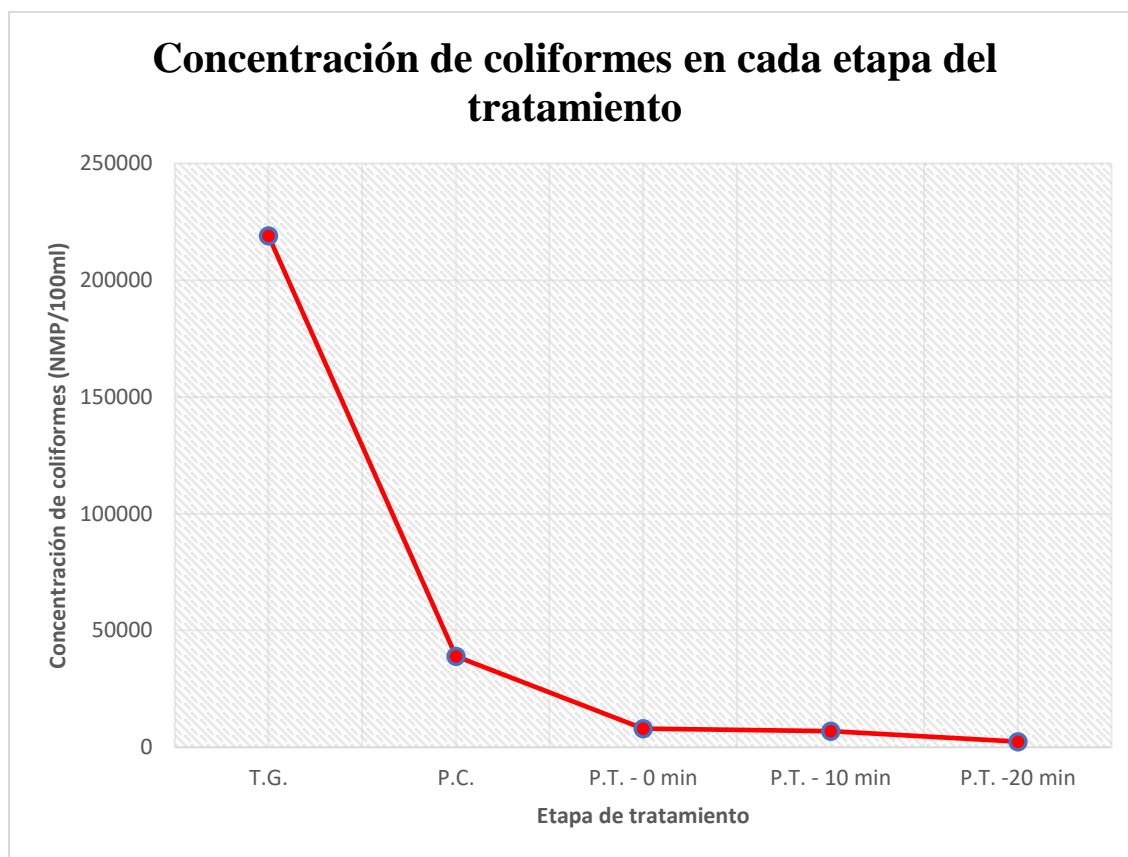


Figura 50 Concentración de coliformes (NMP/100 ml). Fuente: elaboración propia

A partir de esto, quisimos comparar todos los datos obtenidos con diversos estudios acerca de otros tipos de tratamiento de agua de aguas residuales provenientes del lavado de autos, pero también con valores permisibles presentes en las normas colombianas, desde vertimientos de aguas residuales tratadas, el reúso de las mismas, hasta de requerimientos para agua potable, con el propósito anterior mencionado de observar el potencial que tenía el agua tratada con la tecnología disponible en nuestro sistema de tratamiento.

La siguiente tabla compara el agua inicial proveniente del lavado con el agua a tratar de otros autores:

Tabla 14

Comparación de aguas residuales con la de otros autores.

Parámetro/Muestra	Agua de					
	lavado (trampa de grasa)	Bossu <i>et al.</i> (2007)	Zaneti et al (2012)	Zaneti et al (2011)	Lau <i>et al.</i> (2013)	Rubi-Juarez <i>et al.</i> (2015)
pH	7.53	7.50 – 7.60	6.60 – 8.20	6.90 – 8.30	6.50 – 8.71	7.50
DO (ppm)	2.00					
DO (%)	23.19					
Conductividad (mS/cm)	0.82	0.8 – 1.1	-	0.5 – 0.75	0,15 - 0,26	0.796
Salinidad (ppt)	0.40					
TSD (g/L)	0.54		0.31 – 0.36	0.41 – 0.59	-	-
DQO (mg O₂/L)	129.00	208 - 382	-	217.5 – 264.5	75 – 738	488
Color (PCU)	265.63					
Turbidez (UNT)	71.00	-	46 - 195	72.5 – 95.3	34 – 86	898
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	440.40					
DBO (mg O₂/L)	59.38	63 - 140	-	72 - 194	20.5 – 11.9	150.96
Número más probable (NMP/100ml)	2.19E+05					
Concentración de Grasas y Aceites (mg/L)	0.30					

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar los datos entre aguas residuales no varían de forma considerable entre ellos, por lo cual podemos deducir que las características físicas y en cierta parte químicas de todas estas aguas residuales son muy parecidas entre ellas.

A continuación, comparamos ya los resultados del agua ya tratada con el de otros autores y con los parámetros de vertimiento de aguas residuales de la norma colombiana estipulados en la resolución 631 del 2015.

Tabla 15

Comparativa de resultados del agua residual tratada con la norma de vertimiento.

Parámetro/Muestra	Resolución 631 del 2015 (Artículo 7o)		
	Agua resultante del tratamiento	Aguas residuales domésticas (ard) de las soluciones individuales de saneamiento de viviendas unifamiliares o bifamiliares	Aguas residuales domésticas (ard), y de las aguas residuales (ard – arnd) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales, con una carga menor o igual a 625,00 kg/DÍA DBO5
pH	7.22	6,00 - 9,00	6,00 - 9,00
DO (ppm)	3.88		
DO (%)	43.72		
Conductividad (mS/cm)	0.83		
Salinidad (ppt)	0.40		
TSD (g/L)	0.54	100.00	90.00
DQO (mg O2/L)	5.28	200.00	180.00
Color (PCU)	10.13		
Turbidez (NTU)	1.68		
Alcalinidad (mg CaCO3/L)	313.56		
DBO (mg O2/L)	14.79		90.00
Número más probable (NMP/100ml) ¹	5.79E+03		
Concentración de Grasas y Aceites (mg/L)	0.02	20.00	20.00

Fuente: elaboración propia

¹El número más probable utilizado en la tabla es el promedio de los datos de todas las etapas del agua tratada (0-min, 10-min, 20-min).

Tabla 16

Comparativa con la norma de vertimiento y el resultado de otros autores.

Parámetro/Muestra	Resolución 631 del 2015 (Artículo 15)			
	Agua resultante del tratamiento	Actividades industriales, comerciales o de servicio diferentes a las contempladas en los capítulos V y VI con vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.	Zaneti <i>et al.</i> (2012) (Reclaimed water)	(Taylor <i>et al.</i> , 2014) (reclaimed water)
pH	7.22	6,00 - 9,00	7,3 ± 0,5	7.3
DO (ppm)	3.88			
DO (%)	43.72			
Conductividad (mS/cm)	0.83			1.068
Salinidad (ppt)	0.40			
TSD (g/L)	0.54		0,388 ± 0,042	0.686
DQO (mg O ₂ /L)	5.28	150.00		96
Color (PCU)	10.13			
Turbidez (NTU)	1.68		9 ± 4	10
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	313.56			
DBO (mg O ₂ /L)	14.79	50.00		60.5
Número más probable (NMP/100ml)	5.79E+03		3.30E+04	3.60E+04
Concentración de Grasas y Aceites (mg/L)	0.02	10.00		

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar en las tablas, los parámetros dados por las normativas indican valores más altos de los obtenidos en por sistema de tratamiento, lo que era de esperarse debido a que

nuestro sistema de tratamiento tiene como meta la recuperación del agua residual para un futuro reúso mientras que la resolución 631 del 2015 destina sus parámetros a solamente el vertimiento de estas. También cabe aclarar que, en la norma, parámetros como DBO y DQO, necesitan reportes específicos que deben ser presentados en cada caso, y da un énfasis a estudios de concentraciones de metales pesados y otros materiales orgánicos que puedan presentar peligro para la vida, tanto humana como animal y también afecten el medio ambiente. En cuanto a los resultados de los artículos de (Zaneti *et al.*, 2012). Y (Taylor *et al.*, 2014), comprobamos que, en la gran mayoría de resultados, los nuestros tienen valores más bajos en comparación, teniendo en cuenta que en ambos casos de la literatura se tratan de estudios a escala real, a pesar que el número de datos y el valor de errores acumulados son factores a tener en cuenta, ambos estudios manejan sistemas similares al nuestro, al menos en cuanto a tecnología nos referimos, siendo el de (Zaneti *et al.*, 2012), muy parecido, excepto que no cuenta con ozonificador, si no que usan el cloro para la desinfección, y no cuenta con un filtro de carbón activado, y el de (Taylor *et al.*, 2014), que no cuenta con el filtro de carbón activado. Todo esto nos da un gran indicio de los buenos resultados obtenidos por el sistema.

En la siguiente tabla, se comparan las características del agua resultante del tratamiento con los parámetros ofrecidos por la resolución 1207 del 2014 la cual fija ciertos valores a cumplir al momento de reutilizar aguas residuales dependiendo que tipo de uso se le quiera dar.

Tabla 17

Comparativa de resultados del agua residual tratada con la norma reúso colombiana.

Parámetro/Muestra	Agua tratada resultante	Uso agrícola		Uso industrial				Cumple o no el criterio
		cultivos de pastos, no alimenticios, fibras celulósicas, bicomcombustibles y alimenticios	Áreas verdes, campos deportivos, jardines, áreas no domiciliarias	intercambio torres de calor y caldera	descarga de aparatos sanitarios	limpieza de vías y riego de vías para control material particulado	sistemas de redes contra incendio	
pH	7.22	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	6.00 - 9.00	SI
Conductividad (mS/cm)	0.83	< 1.5	< 1.5					SI
DBO (mg O₂/L)	14.79					< 30		SI
Número más probable (NMP/100ml)	5.79E+03	1.00E+05	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+04	1.00E+03	1.00E+01	SI excepto sistemas incendio

Fuente: elaboración propia

Cabe destacar que mucho de los requerimientos que exige la norma envuelven ensayos de metales pesados y materiales inorgánicos perjudiciales tanto para el ambiente como para el ser humano. Aun así, podemos ver que, en todos los casos a excepción del conteo bacteriano en el uso de redes de incendio, pero aun así los parámetros disponibles el agua tratada en nuestro sistema tiene un buen desempeño en cuanto a los requerimientos expresados en la norma de reúso.

En la siguiente tabla quisimos ir un paso más allá y comparar los resultados obtenidos de nuestra agua al completar el tratamiento con los parámetros exigidos por la resolución 2115 de 2007 que rige los requerimientos para el agua potable en Colombia.

Tabla 18

Comparativa con la norma de agua potable colombiana.

Parámetro/Muestra	Agua tratada	Agua potable en Colombia	Cumple o no el criterio
pH	7.22	6.5 - 9.0	si
Color (PCU)	10.13	15	si
Turbidez (NTU)	1.68	2	si
Alcalinidad (mg CaCO₃/L)	313.56	200	no
Conteo de coliformes (NMP/100ml)	5.79E+03	0	no
Olor	Aceptable	Aceptable	si

Fuente: elaboración propia

Hay dos factores a tener en cuenta, el primero, al igual que el resto de normas, estas exigen más ensayos sobre concentraciones de distintos materiales, desde metales, elementos tóxicos, etc. Y el segundo, en cuanto al conteo de coliformes, la norma usa la unidad UFC/100 mL de solución (Unidades Formadoras de Colonias) mientras que nuestro conteo se da por medio del método de Número Mas Probable (NMP), pero teniendo en cuenta que ambas unidades miden lo mismo, cantidad de probable de coliformes, una comparación entre ellas es posible

Como podemos ver los resultados, a excepción del conteo de coliformes, el resto de parámetros que se pudieron comparar son aceptados bajo este criterio, lo que nos muestra el buen desempeño del sistema de tratamiento a la hora de dar resultados.

En cuenta al análisis costo-beneficio, en el momento no tenemos los datos suficientes para determinar el costo por volumen de agua tratada de nuestro sistema, pero en artículos como el de (Diaz-Elsayed et al., 2019) el costo de operación, mantenimiento y entrega de distintos tipos de sistemas de tratamiento y recuperación de agua residuales con destino al reúso ronda entre los

0.40\$ dólares (1548 pesos colombianos aprox.) a 0.53\$ dólares (2052 pesos colombianos aprox.)
por m³.

Conclusiones

Después de haber finalizado todos los análisis de los resultados obtenidos, podemos sacar las siguientes conclusiones:

La calidad final del agua residual ya tratada excedió nuestras expectativas, ya que el objetivo principal era el reúso de la misma para la misma actividad de las cuales eran provenientes, el lavado de vehículos. Sin embargo, cuando fueron comparadas con distintos artículos, e incluso con exigencias de la norma colombiana, estos se desempeñaron de forma bastante aceptable en algunos casos por sobre parámetros de calidad existentes. Tanto la parte estética como el olor, el sistema se desempeñó de manera ideal, dándonos un agua clara e inolora, y en cuanto al resto de parámetros, este mismo logro remociones, en algunos aspectos, superiores al 90%, mostrándonos el buen trabajo de remoción y tratamiento que llegó a ejecutar el sistema.

Pero también hay que denotar las limitaciones y problemas de este trabajo.

Primero, muchas de las pruebas necesarias, al menos a la hora de comparar los resultados obtenidos con las normas actuales que rigen en Colombia con respecto al reúso son bastante exigentes y extensas, poniendo un gran énfasis en análisis de metales pesados y materiales inorgánicos perjudiciales, los cuales, debido a distintos factores, como la capacidad del laboratorio de realizar estos ensayos, la disponibilidad del mismo, el número de personal disponible y el tiempo necesario para llevarlas a cabo, no pudieron ser ejecutadas. Así mismo paso sucedió con ensayos como el conteo de E. Coli, Total de sólidos suspendidos (TTS), concentraciones de surfactantes, entre otros.

También este sistema tiene ciertas limitaciones, además ciertas situaciones actuales, que impiden, al menos en el momento, juzgar si será este sistema será viable a una escala real.

Primero, como se dejó claro en la metodología, debido a factores de disponibilidad y formalidades en procesos de adquisición de materiales por parte de la universidad, solo fue posible conseguir una bomba de $\frac{1}{2}$ caballo de fuerza, la cual termina de producir muchísima más presión necesaria que la necesaria para el funcionamiento del resto, lo cual es muy poco eficiente desde el punto de vista energético y económico. También el hecho que el sistema se encuentre separado dos partes, una in situ, y el resto en el laboratorio, podría introducir una gran cantidad de factores y errores adicionales, además que en cuanto al momento de ejecutar extiende bastante el tiempo total de completado de un ciclo completo, el cual algunas veces podría ser de un par de horas en total.

Y, por último, hay un problema el cual puede ser el de mayor relevancia, el marco jurídico. Las normas, al menos como están actualmente, dificultan mucho el reúso de aguas residuales en empresas privadas de pequeño aporte, las cuales conforman en su gran mayoría, por no decir casi en su totalidad, de lavaderos de vehículos, además como ha sido discutido en el marco teórico, una gran cantidad de factores que hacen prácticamente inviable desde la perspectiva económica el cual sin lugar a dudas es el factor de mayor importancia para las empresas, la implementación de cualquier sistema de recuperación de aguas residuales para uso local.

A pesar de esto, podemos comprobar que ambos objetivos específicos fueron cumplidos. Los resultados obtenidos fueron sobresalientes, e incluso excedieron nuestras expectativas, teniendo en cuenta que la idea inicial era su reutilización en la misma actividad económica de las que son provenientes, en el lavado de autos, por cual observar cómo los resultados demuestran el

potencial de uso del agua residual trata para una mayor variedad y cuya calidad es comparable con otros estudios de distintas tecnologías sin lugar a dudas exceden lo esperado inicialmente.

En cuanto a sus limitaciones, beneficios y la posibilidad de una futura aplicación en un modelo real, se ha discutido a lo largo de este documento. Las limitaciones van desde problemas con factores externos el diseño del sistema (bomba hidráulica con mayor potencia de la necesitada, tanques de almacenaje de volúmenes mayores a los usados, etc.) largamente discutido en la metodología, hasta el marco legal donde una cantidad importantes de factores en la norma de reúso de aguas residuales colombiana dificultan gran medida la aplicabilidad de un sistema real.

Múltiples beneficios como tecnologías de relativo fácil acceso y bajo costo con resultados destacados incrementan su potencial de implementación, especialmente entre negocios o empresas pequeñas, comunidades reducidas, es incluso individuos particulares.

Por último, en cuanto su aplicabilidad, en el momento no contamos con los datos suficientes para determinar si el sistema de recuperación de aguas residuales aquí propuesto llegue a ser viable y si su costo-beneficio será lo suficientemente atrayente para el mercado. Pero sin lugar a dudas el principal obstáculo, no solo para nuestro sistema de reúso de aguas residuales, también para cualquier sistema de reúso con proyección, el estado actual de la resolución 1207 de 2014, ya que debido a los incentivos económicos que ofrece, complicados procedimientos de protocolo, la imposibilidad de ganancia monetaria debido a la prohibición de la venta del agua residual tratada, la limitada cantidad de usos de las aguas residuales tratadas y las altas exigencias de calidad del agua requeridas por la norma evitan que pequeñas empresas y comunidades reducidas implementen un sistema de tratamiento de aguas residuales con objetivo de reúso de forma

segura y legal, y empresas más grandes que podrían ser capaces de llevarlas a cabo, que sean muy poco atractivas para ellas.

Se tienen expectativas acerca de futuros estudios sobre un sistema prometedor como el propuesto en este documento. Es recomendado que en estos estudios se priorice un diseño experimental con un dimensionamiento que evalúe la relación costo-beneficio del mismo, además de ejecutar una mayor cantidad de ensayos y tener en cuenta más parámetros a evaluar el agua residual tratada resultante. También se es incentivado el estudio de efluentes de distintos orígenes, con tal de comprobar el rendimiento con otros tipos de agua resultantes de otras actividades económicas. Además, como ya fue discutido en la sección final de los resultados y discusión, se trataron valores entre 0.43 a 0.53\$ dólares (de 1548 a 2052 pesos colombianos) por m³ de agua tratada en distintos sistemas de tratamientos para reúso del agua, y teniendo en cuenta que el precio de agua potable por m³ en la ciudad de Barranquilla que factura la compañía proveedora de agua potable y alcantarillo a una casa de estrato 3 ronda en los 2612 pesos colombianos (0.67\$ dólares colombianos), prometen que futuros estudios, analicen nuestro sistema alcanza costos de las mismas dimensiones, el cual resultaría en una propuesta bastante atractiva para un modelo a escala real.

Finalmente, se espera que investigaciones como esta generen un precedente, no solo influenciando otros proyectos investigativos, pero además sirvan de punto de apoyo para futuros cambios en el marco legal del reúso de aguas residuales, permitiéndonos que una implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales para su reúso, que en la actualidad es casi inviable, a un evento cotidiano en el país.

Referencias

- Al-Odwani, A., Ahmed, M., & Bou-Hamad, S. (2007). Carwash water reclamation in Kuwait. *Desalination*, 206(1–3), 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.560>
- Álvarez Pinzón, G. L. (2017a). El reúso de agua residuales en Colombia. In M. del P. García Pachón (Ed.), *Derecho de aguas* (pp. 187–232). Universidad Externado de Colombia.
- Álvarez Pinzón, G. L. (2017b). Interpretación legal de la norma de reuso R. 1207/14 MADS. *Seminario Internacional de Reúso y Desalinización de Agua*.
- American Health Public Association, American water works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standart Methods for the Examination of water and wastewater* (R. Baird & L. Bridgewater (eds.)). <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.193>
- Bhatti, Z. A., Mahmood, Q., Raja, I. A., Malik, A. H., Khan, M. S., & Wu, D. (2011). Chemical oxidation of carwash industry wastewater as an effort to decrease water pollution. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(9–11), 465–469. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.022>
- Campbell, N. A., & Reece, J. B. (2005). *Biología, Séptima Edición*. Editorial Médica Panamericana.
- Cantillo Lastre, L. (2016, January 25). Lavadero de carros, sin controles para el consumo de agua. *El Heraldo*. <https://www.elheraldo.co/local/lavadero-de-carros-sin-controles-para-el-consumo-de-agua-240001>
- Carrasquero, S., Terán, K., Mas, M., Mas, R., Colina, G., & Díaz, A. (2015). Evaluación de un tratamiento fisicoquímico en efluentes provenientes del lavado de vehículos para su reutilización. *Revista Arbitrada Venezolana Del Núcleo LUZ-Costa Oriental Del Lago*, 10(2), 122–139.
- Diaz-Elsayed, N., Rezaei, N., Guo, T., Mohebbi, S., & Zhang, Q. (2019). Wastewater-based resource recovery technologies across scale: A review. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 145, Issue December 2018, pp. 94–112). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.035>

- Fondriest Environmental Inc. (2013). *Dissolved Oxygen*. Fundamentals of Environmental Measurement. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>
- Ganiyu, S. O., Vieira dos Santos, E., Tossi de Araújo Costa, E. C., & Martínez-Huitle, C. A. (2018). Electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs) as alternative treatment techniques for carwash wastewater reclamation. *Chemosphere*, *211*, 998–1006. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.044>
- Hamada, T., & Miyazaki, Y. (2004). Reuse of carwash water with a cellulose acetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2006.01.089>
- Huang, C., Zeng, P., Yang, S., Shao, Y., & Liu, Y. (2015). Water reclamation and reuse. *Water Environment Research*, *64*(4), 18. <https://doi.org/10.1002/j.1554-7531.1992.tb00018.x>
- Icontec. (2001). Agua. Procedimiento Para El Método De Jarras En La Coagulación-Floculación Del Agua. *Norma Tecnica Colombiana*, *1*, 9.
- Jodpimai, S., Boonduang, S., & Limsuwan, P. (2015). Dielectric barrier discharge ozone generator using aluminum granules electrodes. *Journal of Electrostatics*, *74*, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.12.003>
- Karamah, E. F., Adripratiwi, I. P., & Anindita, L. (2018). Combination of ozonation and adsorption using granular activated carbon (Gac) for tofu industry wastewater treatment. *Indonesian Journal of Chemistry*, *18*(4), 600–606. <https://doi.org/10.22146/ijc.26724>
- Minambiente. (2015). Resolución 631 De 2015. *Diario Oficial No. 49.486 de 18 de Abril de 2015, RESOLUCIÓN*(Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. EL), 73.
- Moazzem, S., Ravishankar, H., Fan, L., Roddick, F., & Jegatheesan, V. (2020). Application of enhanced membrane bioreactor (eMBR) for the reuse of carwash wastewater. *Journal of Environmental Management*, *254*(October 2019), 109780.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109780>

- Mohammadi, M. J., Takdastan, A., Jorfi, S., Neisi, A., Farhadi, M., Yari, A. R., Dobaradaran, S., & Khaniabadi, Y. O. (2017). Electrocoagulation process to Chemical and Biological Oxygen Demand treatment from carwash grey water in Ahvaz megacity, Iran. *Data in Brief*, *11*, 634–639. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.03.006>
- Nadzirah, Z., Nor Haslina, H., & Rafidah, H. (2015). Removal of Important Parameter from Car Wash Wastewater - A Review. *Applied Mechanics and Materials*, *773–774*, 1153–1157. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.773-774.1153>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2009a). Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 1: Anodic oxidation with diamond and lead dioxide anodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *638*(1), 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.10.025>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2009b). Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 2: Electrocoagulation and anodic oxidation integrated process. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *638q*(2), 236–240. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2009.11.003>
- Patiño, E. (2017, October 17). *Suspendidos 63 lavaderos de carros por infringir el Código de Policía*. El Heraldo. <https://www.elheraldo.co/barranquilla/suspendidos-63-lavaderos-de-carros-por-infringir-el-codigo-de-policia-412887>
- Pinto, A. C. S., de Barros Grossi, L., de Melo, R. A. C., de Assis, T. M., Ribeiro, V. M., Amaral, M. C. S., & de Souza Figueiredo, K. C. (2017). Carwash wastewater treatment by micro and ultrafiltration membranes: Effects of geometry, pore size, pressure difference and feed flow rate in transport properties. *Journal of Water Process Engineering*, *17*(April), 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.03.012>
- Smith, H. M., Brouwer, S., Jeffrey, P., & Frijns, J. (2018). Public responses to water reuse – Understanding the evidence. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 207, pp. 43–50). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.021>

- Taylor, P., Etchepare, R., Zaneti, R., Azevedo, A., Rubio, J., Etchepare, R., & Zaneti, R. (2014). *Application of flocculation – flotation followed by ozonation in vehicle wash wastewater treatment / disinfection and water reclamation wastewater treatment / disinfection and water reclamation*. April 2015, 37–41. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.951971>
- Tchobanoglous, G., Burton L., F., & Stensel, H. D. (2002). Wastewater Engineering Treatment and Reuse. *Вестник КазНМУ, №4*, с.30.
- United State Enviromental Protection Agency. (2012). *Total Alkalinity*. EPA. <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/vms510.html>
- VELP Scientifica. (2013). BOD Analysis - BOD EVO. *VELP Scientifica*, 8120. <https://www.velp.com/public/file/biochemical-oxygen-demand-with-bod-evo-sensor-201086-210342.pdf>
- World Health Organization. (2016). Total dissolved solids in Drinking-water. *World Health Organization*, 8. <https://doi.org/10.1080/10417943609370625>
- Yuvi Mendoza, C. E. (2008). Escuela politécnica nacional. *Estudio de Factibilidad Para La Creación de Una Operadora de Ecoturismo En La Ciudad de Otavalo*, 244.
- Zaneti, R., Etchepare, R., & Rubio, J. (2011). Car wash wastewater reclamation. Full-scale application and upcoming features. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 953–959. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.002>
- Zaneti, R., Etchepare, R., & Rubio, J. (2012). More environmentally friendly vehicle washes: Water reclamation. *Journal of Cleaner Production*, 37, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.06.017>

Anexos

Objeto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Trampa de grasa de 95 litros	Und	1	\$ 217,900.00	\$ 217,900.00
Bomba hidráulica de 1/2 HP con regulador electrónico	Und	1	\$ 662,900.00	\$ 662,900.00
Filtro manual de carbón activado	Und	1	\$ 720,000.00	\$ 720,000.00
Purificador a base de ozono en acero inoxidable	Und	1	\$ 327,371.00	\$ 327,371.00
Tanque capacidad de 250 L	Und	1	\$ 407,700.00	\$ 407,700.00
Válvula PVC 1 pulgada	Und	6	\$ 8,600.00	\$ 51,600.00
Codo 90 x 1 de presión	Und	6	\$ 1,100.00	\$ 6,600.00
Buje soldado 1x1/2 presión	Und	6	\$ 1,200.00	\$ 7,200.00
Adaptador macho 1 presión	Und	8	\$ 1,100.00	\$ 8,800.00
Tubos de Presión	Und	2	\$ 23,900.00	\$ 47,800.00
Soldadura PVC	Und	1	\$ 22,900.00	\$ 22,900.00
Cloruro férrico	Lb	0.5	\$ 11,000.00	\$ 5,500.00
Accesorio eléctrico	Und	1	\$ 45,000.00	\$ 45,000.00
SUMA TOTAL				\$ 2,531,271.00

Anexo 1. Presupuesto del proyecto.

AGUA DE LAVADO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.73	7.76	7.78	7.76
DO (ppm)	3.44	3.52	3.01	3.32
DO (%)	39.2	40	34.3	37.83
Conductividad (mS)	0.823	0.822	0.824	0.82
Salinidad	0.4	0.4	0.4	0.40
TDS (mg/L)	534	534	535	534.33
DQO (mg/L)	73	88	90	83.67
Color (PCU)	500	500	500	500.00
Turbidez	225	249	222	232.00
Alcalinidad (mL)	31.9	31.8	31.4	31.70
DBO5 (mg/L)	43.3			

POZO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.59	7.65	7.69	7.64
DO (ppm)	4.87	5.07	4.32	4.75
DO (%)	54.9	57.3	49.3	53.83
Conductividad (mS)	0.714	0.708	0.708	0.71
Salinidad (ppt)	0.4	0.3	0.3	0.33
TDS (mg/L)	462.1	460	460	460.70
DQO (mg/L)	93	69	74	78.67
Color (PCU)	0	0	0	0.00
Turbidez	0.57	0.54	0.44	0.52
Alcalinidad (mL)	28	28	27.4	27.80
DBO5 (mg/L)	15.9			

AGUA DE LAVADO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.81	7.91	7.79	7.84
DO (ppm)	3.25	3.26	3.07	3.19
DO (%)	37.1	36.3	34.1	35.83
Conductividad (mS)	0.807	0.796	0.796	0.80
Salinidad	0.4	0.4	0.4	0.40
TDS (mg/L)	525	518	518	520.33
DQO (mg/L)	41	119	58	72.67
Color (PCU)	190	190	165	181.67
Turbidez	21.4	21.8	21.9	21.70
Alcalinidad (mL)	32.3	32.1	35.6	33.33
DBO5 (mg/L)	38.4			

POZO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.76	7.83	7.81	7.80
DO (ppm)	4.7	4.78	4.43	4.64
DO (%)	51.6	52.2	48.2	50.67
Conductividad (mS)	0.716	0.713	0.723	0.72
Salinidad (ppt)	0.4	0.3	0.4	0.37
TDS (mg/L)	466.1	463.6	469.9	466.53
DQO (mg/L)	15	0	24	13.00
Color (PCU)	10	5	0	5.00
Turbidez	1.31	1.4	2.15	1.62
Alcalinidad (mL)	35.6	36	35.5	35.70
DBO5 (mg/L)	17.5			

AGUA DE LAVADO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.79	7.91	7.86	7.85
DO (ppm)	2.69	2.64	2.15	2.49
DO (%)	30.7	29.4	23.9	28.00
Conductividad (mS)	0.826	0.816	0.812	0.82
Salinidad	0.4	0.4	0.4	0.40
TDS (mg/L)	537	530	528	531.67
DQO (mg/L)	118	112	112	114.00
Color (PCU)	440	470	450	453.33
Turbidez	78.8	66.2	70.2	71.73
Alcalinidad (mL)	33.1	32.8	32.5	32.80
DBO5 (mg/L)	50.2			

POZO				Promedio
Característica/ Muestra	1	2	3	
pH	7.68	7.83	7.78	7.76
DO (ppm)	4.72	4.97	4.84	4.84
DO (%)	52.4	54.7	53.2	53.43
Conductividad (mS)	0.714	0.718	0.717	0.72
Salinidad (ppt)	0.3	0.4	0.4	0.37
TDS (mg/L)	464.1	466.5	466.3	465.63
DQO (mg/L)	3	42	27	24.00
Color (PCU)	15	5	15	11.67
Turbidez	0.59	0.45	0.39	0.48
Alcalinidad (mL)	28.3	28.1	28.1	28.17
DBO5 (mg/L)	19.2			

Anexo 2. Evidencia de datos totales utilizados.

Oceania		02/08/2019			Paseado	Remoción o incremento (%)
T.G.		1	2	3		
Característica	Muestra	1	2	3		
pH		7.31	7.28	7.25	7.27	-
DO (ppm)		6.57	0.1	0.11	0.33	96.58%
DO (%)		1.8	1	1.2	1.33	96.59%
Conductividad (mS)		0.88	0.859	0.86	0.86	-1.71%
Salinidad		0.4	0.4	0.4	0.40	0.00%
TDS (mg/L)		0.559	0.558	0.559	0.57	0.18%
DQO (mg/L)		272	229	250	238.33	89.16%
Color (PCU)		500	500	500	500.00	75.67%
Turbidez		143	148	148	146.33	89.13%
Alcalinidad (mEq/L)		52.1	51.1	51.1	51.43	23.91%
DBO5 (mg/L)		78.4				44.52%

Docaya		02/08/2019			Paseado	Remoción o incremento (%)
T.G.		1	2	3		
Característica	Muestra	1	2	3		
pH		7.19	7.18	7.11	7.18	-
DO (ppm)		4.08	3.83	3.71	3.88	86.14%
DO (%)		44.6	42.2	40.6	42.47	86.86%
Conductividad (mS)		0.832	0.843	0.807	0.83	5.76%
Salinidad		0.4	0.4	0.4	0.40	0.00%
TDS (mg/L)		0.541	0.548	0.523	0.54	5.94%
DQO (mg/L)		0	0	0	0.00	100.00%
Color (PCU)		0	10	10	6.67	98.67%
Turbidez		2.03	2	1.61	1.88	99.12%
Alcalinidad (mEq/L)		34.5	34	35.1	34.53	32.86%
DBO5 (mg/L)		24.1				89.28%

Tranera		02/08/2019			Paseado	Remoción o incremento (%)
T.G.		1	2	3		
Característica	Muestra	1	2	3		
pH		7.13	7.11	7.18	7.13	-
DO (ppm)		0.44	0.61	0.49	0.58	86.74%
DO (%)		7.3	8.8	7	8.37	86.62%
Conductividad (mS)		0.888	0.894	0.896	0.89	-4.67%
Salinidad		0.4	0.4	0.4	0.40	-25.00%
TDS (mg/L)		0.577	0.581	0.582	0.58	-4.77%
DQO (mg/L)		156	128	74	119.33	-3.49%
Color (PCU)		350	400	343	365.00	66.21%
Turbidez		73.9	70.8	77.8	74.17	87.64%
Alcalinidad (mEq/L)		33	32.5	32.7	32.73	21.30%
DBO5 (mg/L)		46.2				59.14%

Tranera		02/08/2019			Paseado	Remoción o incremento (%)
T.G.		1	2	3		
Característica	Muestra	1	2	3		
pH		7.13	7.11	7.18	7.13	-
DO (ppm)		4.49	4.28	4.35	4.37	86.74%
DO (%)		48.8	46.5	47.4	47.37	86.62%
Conductividad (mS)		0.892	0.896	0.892	0.93	-4.67%
Salinidad		0.5	0.5	0.5	0.50	-25.00%
TDS (mg/L)		0.608	0.609	0.608	0.61	-4.77%
DQO (mg/L)		127	120	-	123.50	-3.49%
Color (PCU)		80	80	195	123.33	66.21%
Turbidez		73.9	8.03	12.1	9.24	87.64%
Alcalinidad (mEq/L)		40.9	41.8	41.8	41.30	21.30%
DBO5 (mg/L)		24.6				59.14%

Tranera		02/08/2019			Paseado	Remoción o incremento (%)
T.G.		1	2	3		
Característica	Muestra	1	2	3		
pH		7.13	7.11	7.14	7.13	-
DO (ppm)		1.89	1.81	1.91	1.87	30.03%
DO (%)		20.8	19.9	21	20.50	32.58%
Conductividad (mS)		0.924	0.915	0.926	0.92	-1.74%
Salinidad		0.5	0.5	0.5	0.50	0.00%
TDS (mg/L)		0.601	0.594	0.602	0.60	-1.78%
DQO (mg/L)		105	98	98	99.67	79.68%
Color (PCU)		160	180	140	160.00	23.98%
Turbidez		32.1	28.6	20.6	26.43	87.18%
Alcalinidad (mEq/L)		31.4	32	31.8	31.73	10.89%
DBO5 (mg/L)		46.3				11.81%

Anexo 5. Evidencia de datos totales utilizados.

Fecha	T.G.	P.C.	P.T.-0 min	P.T.-10 min	P.T.-20 min
05/06/2019	Combinación 4-3-3	Combinación 5-3-3	Combinación 4-4-1	Combinación 4-3-3	Combinación 4-2-2
	MPN	MPN	MPN	MPN	MPN
	27000	22000	4400	5700	2200
28/08/2019	Combinación 5-4-4	Combinación 4-5-1	Combinación 5-4-1	Combinación 5-3-1	Combinación 4-4-1
	MPN	MPN	MPN	MPN	MPN
	35000	69000	7000	7000	4000
03/03/2019	Combinación 5-4-3	Combinación 4-3-3	Combinación 4-2-1	Combinación 3-2-2	Combinación 3-1-2
	MPN	MPN	MPN	MPN	MPN
	28000	47000	3800	1000	1000

Anexo 6. Evidencia de datos totales utilizados, conteo de coliformes.

Grasa					
T.G.		P.C.		P.T.	
Balon inicial	181.0484	Balon	167.495	Balon inicial	167.5039
Balon final	181.1667	Balon final	167.615	Balon final	167.5122
Peso (g) grasa	0.1183	Peso (g) grasa	0.12	Peso (g) grasa	0.0083
Volumen inicial (L)	0.4	Volumen inicial (L)	0.4	Volumen inicial (L)	0.4
Concentracion (mg/L)	0.29575	Concentracion	0.3	Concentracion (mg/L)	0.02075

Anexo 7. Evidencia de datos totales utilizados, aceites y grasas.