

**EFFECTIVIDAD DEL USO DE MICROORGANISMOS EN PLANTAS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS**

**AUTORES**

Lizbeth Angélica Moreno Corzo

Nelson Andrey Gallego Buitrago

**TRABAJO DE GRADO**

**MAESTRÍA EN PROYECTOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

**DIRECTOR**

Julien Gwendal Chenet

**UNIVERSIDAD EAN**

**BOGOTÁ, 2021**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a todas las personas dedicadas a la investigación y búsqueda del conocimiento, en especial a quienes a pesar de todos los obstáculos y limitaciones, siguen adelante con el desarrollo de sus proyectos investigativos.

## AGRADECIMIENTOS

Especial agradecimiento al grupo de profesionales quienes nos acompañaron a lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación, sin ellos no habría sido posible realizar este proyecto:

Dr. Cristian M. Barriga Garavito y Dr. Javier González Guarín - Médicos veterinarios, Andrea Merchán Buitrago - Bióloga, Ing. Luis Fernando Sierra Valencia - Ingeniero químico, Juan Pablo Hernández Sánchez - Biólogo investigador y docente,

Al cuerpo docente de la Universidad EAN de la Maestría en Proyectos de Desarrollo Sostenible y en especial a nuestro director de trabajo Julien Gwendal Chenet, su dirección fue fundamental para lograr plasmar en este documento todo el trabajo investigativo.

A nuestras familias, de quienes recibimos su apoyo incondicional, aceptando momentos de ausencia, sacrificados en pro de nuestro trabajo.

## RESUMEN

Ante el crecimiento poblacional, las aguas residuales se están considerando como una fuente alternativa que puede adecuarse para disminuir la presión sobre los ecosistemas (menos vertimiento y contaminación al igual que menos necesidad de agua para potabilizar). Esto genera un cambio de paradigma en la gestión de aguas residuales, pasando de realizar solo su tratamiento y eliminación a considerar la *reutilización, reciclado y recuperación de recursos*. El tratamiento de aguas residuales se realiza, por lo general, a través de plantas de tratamiento.

Uno de los problemas que actualmente se presenta en las plantas de tratamiento en Colombia, es cumplir con los valores límites máximos permitidos para el vertimiento de aguas, de acuerdo a la normatividad. Para las empresas que manejan plantas de tratamiento, se presenta una oportunidad de implementar como parte de su estrategia ambiental, la gestión sostenible del agua, a través de la incorporación de un sistema biotecnológico e innovador en el tratamiento de agua, por medio del uso de microorganismos inmovilizados, lo que da lugar a realizar una investigación exploratoria con una metodología de enfoque cuantitativo-deductivo mediante datos de mediciones para verificar los resultados, en cumplimiento al objetivo principal de comprobar la efectividad en la implementación de inmovilizados como tratamiento biológico en la etapa primaria de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de fragancias y sabores artificiales ubicada en Bogotá, con el fin de disminuir la DQO (demanda química de oxígeno) y cumplir con los estándares requeridos de vertimiento de aguas de acuerdo con la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

A raíz de los resultados obtenidos, se demuestra la efectividad de los inmovilizados en un rango del 95% de remoción y se propone ampliar la investigación con inmovilizados hacía ámbitos del reúso y recirculación del agua, aplicación para la disminución de lodos, depuración de aguas en tanques abiertos y como inoculante de suelo. Se muestra además un acercamiento a los costos del tratamiento en aguas residuales con inmovilizados.

Palabras clave: Aguas residuales, gestión del agua, microorganismos, inmovilizados, vertimiento de aguas

## ABSTRACT

In view of the population growth, wastewater is being considered as an alternative source that can be adapted to reduce the pressure on ecosystems (less discharge and pollution as well as less need for water to purify). This generates a paradigm shift in wastewater management, moving from carrying out only its treatment and disposal to considering the *reuse, recycling, and recovery of resources*. Wastewater treatment is usually done through treatment plants.

One of the problems that currently occurs in treatment plants in Colombia, is to fulfill with the maximum limit values allowed for the discharge of water, according to the regulations. For companies that manage treatment plants, the opportunity arises to implement as part of their environmental strategy, sustainable water management, through the incorporation of a biotechnological and innovative water treatment system, through the use of immobilized microorganisms, which leads to exploratory research with a methodology of quantitative-deductive approach through measurement data to verify the results, in compliance with the main objective of verifying the effectiveness in the implementation of immobilized as biological treatment in the primary stage of a wastewater treatment plant (WTP) of artificial fragrances and flavors located in Bogotá, in order to reduce COD (chemical oxygen demand) and comply with the required standards of water discharge in accordance with Resolución 0631 of 2015 of the Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Based on the results obtained, the effectiveness of immobilized in a range of 95% removal is demonstrated and it is proposed to expand the research with immobilized to areas of reuse and recirculation of water, application for the reduction of sludge, water purification in open tanks and as a soil inoculant. It also shows an approach to the costs of treatment in wastewater with immobilized.

Keywords: Wastewater, water management, microorganisms, immobilized, water dumping

**TABLA DE CONTENIDO**

1.	INTRODUCCIÓN .....	10
2.	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	13
2.1.	Toxicidad de aguas residuales sin tratar.....	13
2.2.	Normatividad sobre vertimiento de aguas residuales.....	13
2.3.	Tratamiento de aguas residuales .....	14
2.4.	Tecnologías de tratamiento de aguas residuales con microorganismos.....	15
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	17
4.	FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	19
5.	OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN .....	21
5.1.	Objetivo general .....	21
5.2.	Objetivos específicos.....	21
6.	JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
7.	MARCO TEÓRICO DE LA PROPUESTA .....	24
7.1.	Calidad y gestión del agua.....	24
7.2.	Aguas residuales.....	24
7.3.	Tratamiento de aguas residuales.....	25
7.3.1.	<i>Gestión de aguas residuales</i> .....	25
7.3.2.	<i>La industria</i> .....	27
7.4.	DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno).....	27
7.5.	pH .....	29
7.6.	Biorremediación, inmovilizados y coinmovilizados .....	29
8.	HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	31
9.	DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN .....	31
10.	DESARROLLO DEL TRABAJO.....	34

10.1.	Selección in situ.....	34
10.2.	Elaboración de inmovilizados .....	35
10.2.1.	<i>Caracterización de la PTAR</i> .....	36
10.2.2.	<i>Inmovilizados</i> .....	38
10.3.	Entrega de inmovilizados .....	39
10.4.	Instalación de los inmovilizados.....	39
10.5.	Pruebas in situ – Aplicación de metodología .....	40
10.6.	Exposición de resultados .....	45
10.6.1.	<i>Prueba 1</i> .....	45
10.6.2.	<i>Prueba 2</i> .....	46
10.7.	Análisis de los resultados .....	50
10.8.	Propuesta de investigación .....	52
10.8.1.	<i>Reúso y recirculación del agua</i> .....	53
10.8.2.	<i>Lodos</i> .....	53
10.8.3.	<i>Inoculante de Suelo</i> .....	54
10.8.4.	<i>Depuración de aguas en tanques abiertos</i> .....	55
11.	ACERCAMIENTO A LOS COSTOS DEL TRATAMIENTO.....	55
12.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	58
12.1.	Limitantes del tratamiento con inmovilizados.....	59
13.	CONCLUSIONES .....	60
13.1.	Recomendaciones .....	61
13.2.	Comentarios adicionales.....	61
	REFERENCIAS.....	63
	ANEXOS.....	71
	ANEXO 1 – USO DE MICROORGANISMOS EN LA PTAR DE UN CENTRO COMERCIAL.....	71

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Descripción de los tipos de tratamiento	15
Gráfica 2. Porcentaje de remoción diaria de los inmovilizados	47
Gráfica 3. Prueba 1 del tratamiento en la PTAR con los inmovilizados	51
Gráfica 4. Prueba 2 del tratamiento en la PTAR con los inmovilizados	52

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Diagrama básico de la PTAR objeto de estudio	37
Imagen 2. Vista general de la PTAR objeto de estudio	37
Imagen 3. Inmovilizados	38
Imagen 4. Empaque inmovilizados	39
Imagen 5. Transporte de inmovilizados	39
Imagen 6. Preparación de inmovilizados	40
Imagen 7. Disposición dentro del tanque	40
Imagen 8. Evidencia de algunas lecturas de DQO en fotómetro durante la prueba 2	43
Imagen 9. Tanque de estabilización de pH - señalado en el círculo rojo	44
Imagen 10. Tanque de coagulación y floculación - señalado en el círculo rojo	44
Imagen 11. Ubicación de los inmovilizados suspendidos para depositar directamente en el tanque de coagulación y floculación (Reubicación durante la Prueba 2)	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de materia soluble y suspendida para una concentración media de aguas residuales (en mg/L)	27
Tabla 2. Degradabilidad de aguas residuales de concentración media (en mg/L)	28
Tabla 3. Promedios límites de parámetros generales de vertimiento	28
Tabla 4. Cronograma de actividades	34
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos PTAR seleccionada	35
Tabla 6. Seguimiento diario DQO y pH – Prueba 1	41
Tabla 7. Seguimiento diario DQO – Prueba 2	42
Tabla 8. Lecturas DQO y porcentaje de efecto causado por los inmovilizados sobre la DQO	47
Tabla 9. Porcentaje de acción de remoción de los inmovilizados – Prueba 2	49
Tabla 10. Costo unitario (COP/m <sup>3</sup> ) del agua tratada al mes (Valores fijados en COP – Pesos colombianos)	57

## 1. INTRODUCCIÓN

“El agua dulce es el recurso más importante para la humanidad, ya que abarca todas las actividades sociales, económicas y ambientales” (UNESCO, 2018), por lo cual prevalece la importancia en la seguridad del agua. Una de las formas de lograr esta seguridad, es la administración adecuada de los recursos hídricos de manera integrada, equitativa y sostenible. “Más del 80% de las aguas residuales provocadas a partir de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin tratamiento alguno, provocando su contaminación” (ONU, 2015). En 2015, se adoptaron un “conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años” (ONU, 2015). La meta específica 6.3 del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6: *Agua limpia y saneamiento*, se refiere al logro en el mejoramiento de la calidad de agua para reducir la contaminación, "eliminando su vertimiento y aminorando la emisión de productos químicos, así como la reducción de por lo menos el 50% de aguas residuales sin tratar, propendiendo por el reciclado y reutilización sin que implique ningún riesgo”. Por otro lado, la meta específica 6.6 menciona el “restablecimiento de los ecosistemas relacionados con el agua” y en su numeral 6.a destaca la importancia de implementar “actividades y programas relativos al agua y el saneamiento”, entre ellos, el “tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización”. (ONU, 2015).

“El tratamiento del agua tiene que ver con los procesos utilizados para purificar, desinfectar y proteger el agua contra la recontaminación”. En cuanto a infraestructura, “suele consistir en plantas de tratamiento centralizadas o sistemas localizados”. (UN-WATER, 2018).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales han probado ser eficientes para eliminar patógenos, contaminantes orgánicos y nutrientes, lo que se ha podido lograr mediante la combinación de una variedad de procesos físicos, químicos, térmicos y biológicos. “Con el desarrollo de las tecnologías durante los últimos 30 años se han ido enlazando procesos y aspectos basados en la microbiología para crear sistemas complejos en el tratamiento de aguas residuales”. (Amy & al, 2017).

Dada la importancia de reducir las cargas contaminantes del agua para aminorar y en lo posible, eliminar su afectación al medio ambiente, se ha considerado la inmovilización de microorganismos como “una tecnología alternativa de aplicación ambiental que se ha usado, entre otros, en agricultura y biodegradación de contaminantes en aguas subterráneas” (Cassidy, Lee, & Trevors, 1996) y en aguas residuales de origen industrial (Nair, Jayachandran, & Shashidhar, 2007). “Una nueva forma de tratamiento de aguas residuales utilizando microalgas es la de inmovilizarlas de manera conjunta con bacterias *-coinmovilizados-*” (Hernández C., 2011).

“La materia orgánica es el principal contaminante en las aguas residuales. Tradicionalmente, la materia orgánica ha sido medida como DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) o DQO (Demanda Química de Oxígeno) [...] La determinación de la DQO es necesaria para los balances de masa en el tratamiento de aguas residuales” (Amy & al, 2017). Es allí donde residen los esfuerzos de quienes tienen una PTAR, para llegar primeramente a alcanzar los niveles de DQO a los límites exigidos por la normativa.

En Colombia, desde el laboratorio de biología de la universidad El Bosque en Bogotá (INBIBO), se desarrollaron *coinmovilizados* con contenido de bacterias y microalgas para su evaluación en la captación de nutrientes, tanto en agua residual industrial como en materia orgánica en descomposición, exponiendo su eficiencia en sustancias con altas cargas de materia orgánica y compuestos inorgánicos, que no recibieron un tratamiento previo, demostrando su viabilidad con el contenido orgánico de las aguas residuales. (Merchán B., 2018).

Conociendo los resultados de laboratorio de los *inmovilizados* en aguas residuales, el desarrollo de esta investigación se enfoca en comprobar si el uso de esta iniciativa biotecnológica funciona *in situ*, para la depuración de aguas residuales en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), investigación que se plasma en el presente documento a través de 13 títulos y está dirigida a las personas y entidades públicas o privadas que manejan el tratamiento de aguas residuales y saneamiento ambiental.

En primera instancia se presentan los antecedentes en cuanto a aguas residuales y su tratamiento, normatividad y tecnologías de tratamiento. Se plantea el problema de investigación frente al vertimiento de aguas y normativa colombiana vigente al respecto y se formula la pregunta

de investigación de cara a una nueva biotecnología a partir de la inmovilización de microorganismos. Dentro de la justificación de la investigación se enfatiza el cumplimiento al Objetivo de Desarrollo Sostenible – ODS 6, agua limpia y saneamiento, específicamente en la meta 6.3 sobre el mejoramiento de la calidad del agua.

En el marco teórico se trata sobre la calidad y gestión del agua, la definición de aguas residuales de acuerdo a resolución normativa colombiana, se ahonda en el tema del tratamiento y gestión de aguas residuales y se definen los términos DBO (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno) pH, además de los conceptos de biorremediación, inmovilizados y coinmovilizados. Se encuentra seguidamente la hipótesis que plantea: si los inmovilizados funcionaron satisfactoriamente en muestras de aguas residuales in vitro, este sistema debería tener el mismo efecto al incorporarlos in situ en una planta de tratamiento de aguas residuales.

La metodología de esta investigación tiene un enfoque cuantitativo-deductivo mediante datos de mediciones para verificar si los resultados corroboran la hipótesis planteada en cuanto a la efectividad del uso de inmovilizados como parte de una de las fases de depuración de aguas residuales de una PTAR. El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en una serie de etapas: selección in situ, elaboración e instalación de los inmovilizados, pruebas in situ y resultados.

A raíz de los resultados obtenidos se presenta una propuesta de investigación y se muestra un acercamiento a los costos del tratamiento en aguas residuales con inmovilizados; finalmente se expone la discusión de resultados y conclusiones a la investigación.

Debido a que los investigadores y autores de este documento no pertenecen a las áreas de biología o química, ni manejo de aguas, para el desarrollo de esta investigación se cuenta con la asesoría de los biólogos desarrolladores de los inmovilizados y del ingeniero químico operador de la PTAR donde se llevará a cabo la implementación de la biotecnología.

## **2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Toxicidad de aguas residuales sin tratar**

Las aguas residuales sin tratamiento o con una depuración inadecuada, contribuyen a un proceso de contaminación denominado eutrofización, “que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes (generalmente fósforo y nitrógeno) y afecta sustancialmente a los usos del agua” (ONU-DAES, 2014).

El vertimiento de aguas residuales sin tratar o tratadas inadecuadamente, tendrá consecuencias en tres grupos principales: para la salud humana por la reducción de la calidad del agua; para el medio ambiente por los efectos negativos debido a la degradación de las masas de agua y de los ecosistemas; y posibles efectos en las actividades económicas. El sector industrial por lo general representa altas emisiones químicas a la atmósfera, agua y suelo. “La toxicidad, movilidad y carga de los contaminantes industriales pueden tener consecuencias más graves en los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente que los grandes volúmenes de aguas residuales en sí” (UN-WATER, 2017)

### **2.2. Normatividad sobre vertimiento de aguas residuales**

Mediante la iniciativa de ONU-Agua para el Monitoreo Integrado del ODS 6, sobre la meta 6.3. Calidad del agua y aguas residuales, se enfatiza en el mejoramiento de la calidad del agua reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar, impulsando a los países en el tratamiento de las aguas residuales con el fin que los efluentes cumplan cabalmente con las normas nacionales, para lo cual se hace necesario que existan “tecnologías de tratamiento de las aguas residuales domésticas *in situ* y externas que funcionen y se mantengan adecuadamente. Así mismo, la producción de aguas residuales industriales debe ser monitoreada y regulada mediante permisos de vertimiento, tanto en el alcantarillado como en el medio ambiente” (UN-WATER, 2018)

En Colombia, la entidad que “regula las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y dicta regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional” es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que mediante la Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 “establece los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los

sistemas de alcantarillado público” (MADS, 2015), siendo la DQO el parámetro de medición de mayor atención para la empresas e industria dentro del grupo de “Parámetros generales” que establece la norma<sup>1</sup>, por los altos rendimientos necesarios en su reducción para alcanzar los niveles permitidos por la normativa.

### 2.3. Tratamiento de aguas residuales

Ante el crecimiento poblacional, las aguas residuales se están considerando como una fuente alternativa que puede adecuarse para disminuir la presión sobre los ecosistemas (menos vertimiento y contaminación al igual que menos necesidad de agua para potabilizar). Esto genera un cambio de paradigma en la gestión de aguas residuales, pasando de realizar solo su tratamiento y eliminación a considerar la *reutilización, reciclado y recuperación de recursos*. En este sentido, “las aguas residuales ya no se consideran un problema que necesita solución, sino que son parte de la solución ante las dificultades que hoy enfrentan las comunidades”. (UN-WATER, 2017)

La Organización Mundial de la Salud describe los procesos de tratamiento de aguas residuales como *tecnologías con alta velocidad de flujo* que en su mayoría usan estructuras diseñadas con tiempos de retención cortos y *tecnologías con velocidad de flujo baja*, en donde se aplican procesos biológicos. Las tecnologías se enumeran como tecnologías de tratamiento primario (sedimentación de sólidos), secundario (biodegradación de sustancias orgánicas) o terciario, también llamado como “tratamiento avanzado de aguas residuales” (por ejemplo, remoción de nutrientes, ultrafiltración o desinfección para eliminación de patógenos). En cuanto a la disposición y/o uso final de aguas residuales, se refiere a “las diferentes tecnologías y métodos mediante los cuales los productos del tratamiento son finalmente descargados al medio ambiente, ya sea como productos de uso final o como materiales de riesgo reducido” (OMS, 2019).

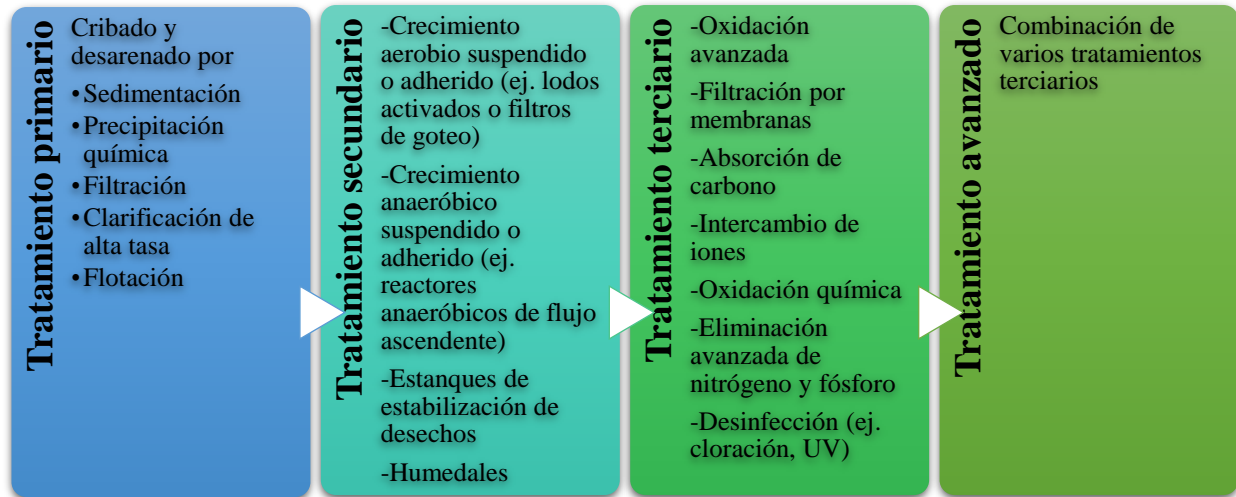
En la Gráfica 1 se reflejan los tipos de tratamiento para aguas residuales que se presenta en el documento de “Monitoreo integrado del ODS 6 de la iniciativa ONU-Agua”, el cual describe las acciones realizadas en cada una de las etapas del tratamiento (primario, secundario, terciario y avanzado), con la diferencia respecto a las guías emitidas por la OMS donde describen el

---

<sup>1</sup> La Resolución 631 muestra unos niveles exigidos de DQO con valores promedios de un 35% superior sobre la DBO, 71% sobre los sólidos suspendidos totales – SST, 46% sobre los cloruros y 33% sobre los sulfatos, siendo éstos los parámetros más representativos. Los demás parámetros están en porcentajes de medición inferiores a un 4% en relación a la DQO. (MADS, 2015)

tratamiento terciario como también llamado avanzado. En la gráfica de la ONU hacen una separación del tratamiento avanzado, al que se considera como la combinación de varios tratamientos terciarios.

**Gráfica 1.** Descripción de los tipos de tratamiento



**Fuente.** Elaboración propia a partir de (UN-WATER, 2018)

Aunque los tratamientos terciarios son una opción de tratamiento final de aguas residuales para la eliminación de la carga orgánica, factores como resultados de eficiencia real en la eliminación de nitrógeno, fósforo y potasio, altos costos de implementación o alteraciones en el agua resultante tras la aplicación, disminuyen el impacto positivo que dichos tratamientos podrían generar hacia el cumplimiento de los objetivos de reutilización del agua residual; por ello es necesario el desarrollo de nuevos tratamientos, cuyo impacto negativo ambiental sea el mínimo, con menores costos de inversión, menor complejidad de uso, mayor efectividad en la captación de nutrientes y que no generen alteraciones en la composición del recurso hídrico. (Merchán B., 2018).

#### **2.4. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales con microorganismos**

El uso de sistemas de inmovilizados de microorganismos como tratamiento de agua residual doméstica es conocido, sin embargo, sobre el efecto de estos tratamientos en agua residual industrial se tiene menos información. Un aporte para su solución es el uso de compuestos captados por los inmovilizados en aguas residuales para la recuperación del suelo, ámbito del que se

encuentran precedentes, mientras que su empleo directo en materia orgánica con el mismo objetivo no ha sido analizado antes. Los sistemas de microorganismos inmovilizados son eficientes en la captación de nutrientes tanto en aguas residuales como en materia orgánica en descomposición y de acuerdo a pruebas en laboratorio, en su disposición como tratamiento terciario de aguas residuales. (Merchán B., 2018)

Lo anterior se corrobora en el trabajo de Merchán (2018), con pruebas de laboratorio realizadas durante un periodo de 26 días con una muestra de agua residual, que fue obtenida de la planta de tratamiento de aguas residuales del Grupo Proenfar, Planta Tocancipá, Cundinamarca, Colombia. cuya actividad es la elaboración de empaques plásticos para la industria farmacéutica y cosmética, la cual se trató con microorganismos inmovilizados. Teniendo en cuenta los parámetros fisicoquímicos y valores permisibles que se dictan en el Artículo 8 de la Resolución 0631 de 2015, se obtuvieron resultados positivos con el uso de coinmovilizados (algas y bacterias), en cuanto a mejora de pH y la disminución de concentraciones de Amonio, Nitrógeno, Fósforo y Potasio, concluyendo que “los sistemas de inmovilizados son eficientes en sustancias con altas cargas de materia orgánica, compuestos inorgánicos y microflora nativa, que no hayan recibido un tratamiento previo”.

En el proceso de búsqueda de referentes en Colombia respecto al uso de este tipo de sistema, si bien se conoce que ya existen tratamientos biológicos, es muy reducido el número de empresas que los ofrecen. Existe también un cierto grado de desconocimiento por parte de los sectores económicos que directamente requieren implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales. A nivel mundial, ya existen tratamientos con el uso de bacterias y algas para tratamientos de aguas residuales, pero son de uso líquido o cápsulas, en los dos casos se diluyen en el agua a tratar y quedan suspendidas, por lo que no se pueden recuperar<sup>2</sup>. Se tiene una percepción que los tratamientos con microorganismos, a pesar de contar con varios años de investigación, no son favorablemente aceptados, en parte por falta de conocimiento de este tipo de tratamientos, desestimando su efectividad y ventajas. Prueba de ello es la afirmación que en principio hizo el ingeniero químico operador de la planta de tratamiento sobre la que se trabajó,

---

<sup>2</sup> Estudio de marketing realizado por los investigadores y confirmación con Bashan Foundation

quien en varias ocasiones había realizado pruebas con bacterias traídas del exterior, sin obtener los resultados esperados.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Cuando el agua regresa al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento, puede causar toxicidad al medio ambiente y puede afectar la biodiversidad, dependiendo del uso que se le dio. Según ONU-Agua, “en las naciones de bajos ingresos sólo se trata un 8% de las aguas residuales domésticas e industriales, un porcentaje muy pequeño comparado con el de los países desarrollados, donde un 70% de esas aguas son sometidas a tratamiento”. (ONU, 2017).

Para el 2019, en Colombia se obtuvo un porcentaje de aguas residuales tratadas de 48,56%, lo cual representó un incremento de 5,71% respecto a la medición del año anterior, lo que indica una reducción de la contaminación de las aguas residuales vertidas al aumentar la cantidad de aguas residuales depuradas. (SSPD, 2020).

De acuerdo al monitoreo de agua potable, saneamiento e higiene por países realizado por la OMS, el “volumen de flujos de aguas residuales que se liberan de conformidad con las regulaciones y permisos de descarga”, en Colombia fue de un 23%. (OMS, 2018)

Mediante la norma de vertimientos en Colombia, dispuesta en la Resolución 0631 de 2015, se realiza el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas por 73 actividades productivas distribuidas en ocho sectores productores de aguas residuales (servicios públicos, alcantarillado, agricultura, ganadería, minería, hidrocarburos, manufactura y servicios varios). “Esta Resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios y que en el desarrollo de las mismas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público” (MADS, 2015). Las autoridades ambientales son las encargadas del seguimiento y control al cumplimiento de esta norma a través de los permisos de vertimientos correspondientes.

Las aguas residuales hoy en día “pueden ser una fuente rentable y sostenible de energía, nutrientes y materia orgánica, entre otros subproductos útiles”, lo que conlleva a beneficios

adicionales además de la salud humana y el medio ambiente, en “posibles repercusiones en la seguridad alimentaria y energética, así como también en la mitigación del cambio climático”. Dentro del contexto de una economía circular, a través de la cual se constituye un “equilibrio entre el desarrollo económico, la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental”, las aguas residuales se consideran ahora un recurso abundante y valioso. (UN-WATER, 2017)

Como ventaja de los sistemas de tratamiento físico-químico de aguas residuales está la capacidad de actuar más rápido en compuestos tóxicos y sobrecargas que los sistemas de tratamiento biológico, además que los costos para la implementación de instalaciones pueden ser menores y requieren menos espacio. Sin embargo, como desventaja, se requiere de un cuidadoso control de operación y consumen gran cantidad de energía, lo que aumenta el costo en el consumo energético, además de los costos químicos por aditivos y material requerido para la depuración. (Manahan, 2007). Como cualquier tratamiento biológico, los inmovilizados necesitan de un tiempo de adaptación. Éstos necesitan equilibrarse de acuerdo con la caracterización del agua a tratar, lo que puede representar un desafío y hasta un punto negativo para su uso en aguas con concentraciones fluctuantes. A pesar de esto y como ventaja, no requieren de una infraestructura adicional y por el contrario, podrían repercutir en la disminución de costos.

Uno de los problemas que actualmente se presenta en las plantas de tratamiento es *cumplir con los valores límites máximos permitidos para el vertimiento de aguas*, señalados en la Resolución 0631 de 2015. Esta dificultad se puede deber, de una parte, por lo que la norma es más estricta que la que la precede, lo que genera una necesidad de actualización de las características de tratamiento de las PTAR para cumplir con los estándares más exigentes y, por otro lado, “a veces no se logra por la falta de un óptimo proceso de supervisión y control en el uso del material o de sustancias químicas de los aditivos directos o indirectos” que se requieren en los tratamientos físico-químicos (OMS, 2006), lo que se corrobora con los jefes del área encargada de las empresas que manejan PTAR y con los mismos operarios directos de estas plantas quienes respaldan que las dificultades encontradas en la operación se deben tanto al diseño (que puede ser obsoleta en las

PTAR construidas antes de la Resolución 631 de 2015) como en el manejo de las sustancias añadidas en el transcurso de las diferentes etapas de tratamiento.<sup>3</sup>

Adicional a los inconvenientes por el uso de productos químicos en el tratamiento de aguas residuales, la falta de supervisión en su uso y operación de las PTAR, el consumo de energía y el costo de las instalaciones, operación y mantenimiento, se podrían sumar las sanciones que pueden imponer a las empresas que no cumplan con los estándares de vertimiento de aguas residuales. Como responsables de la infracción ambiental, pueden ser notificados con alguna de las siguientes sanciones: “multas diarias hasta por 5.000 SMMLV<sup>4</sup>, cierre temporal o definitivo del establecimiento, edificación o servicio y revocatoria o caducidad de licencia ambiental, autorización, concesión, permiso o registro” (Congreso de la República, 2009). Es entonces muy importante cumplir con los parámetros de ley, respecto al tratamiento de sus aguas residuales.

#### 4. FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Bashan Foundation ha realizado estudios de interacción planta-bacteria, como un modelo que involucra a dos microorganismos unicelulares: una microalga que actúa como la planta y una bacteria como promotora de crecimiento en plantas, que además son inmovilizadas de forma conjunta en esferas de alginato, permitiendo de esta forma una interacción pero al mismo tiempo la prevención de interferencia externa de otras bacterias contaminantes (de Bashan & Bashan, 2004). Este método es utilizado en varios campos biotecnológicos, entre ellos, el de inmovilizar microalgas con el fin de eliminar de aguas residuales compuestos inorgánicos y metales pesados (Tam & Wong, 2000). Esta combinación de los dos microorganismos es altamente eficiente en la eliminación de nutrientes de varios tipos de agua residual, dejando el agua más limpia y produciendo una biomasa utilizable (de Bashan & Bashan, 2004).

Para mejorar el efecto de sinergia entre estos microorganismos, se han estudiado factores ambientales que influyen en el crecimiento de la microalga y mecanismos celulares que controlan

---

<sup>3</sup> Esta afirmación se presenta de acuerdo con el estudio realizado por los investigadores, con una base de datos de empresas del sector de tratamiento de aguas residuales y por experiencia propia con empresas que manejan una PTAR

<sup>4</sup> En Colombia SMMLV se refiere a salarios mínimos mensuales legales vigentes

este sistema, entre los que se incluyen, pH, concentraciones de carbono y nitrógeno, intensidad luminosa y temperatura (de Bashan & Bashan, 2008).

En el caso de esta investigación, el enfoque del uso de microorganismos inmovilizados es hacia su aplicación en aguas residuales no domésticas (ARnD), que “son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios” y todas las que no cumplan con los niveles de contaminación para ser consideradas como ARnD, de acuerdo a lo que dicta la Resolución 0631 de 2015. Esta resolución fija el máximo permisible en vertimientos puntuales de aguas residuales al alcantarillado público, multiplicando por un factor de 1,50 los valores máximos permitidos para vertimiento a cuerpo de agua (Artículo 16) (MADS, 2015).

El uso de aditivos e insumos químicos que se utilizan usualmente durante el proceso de tratamiento de agua convencional en las PTAR, pueden llegar a impactar la calidad de agua final y por consiguiente, repercutir también en las lecturas finales de parámetros para el vertimiento de aguas. La DQO es uno de los parámetros con mayor necesidad de remoción, por lo que es el más significativo y a partir del cual se basan los operarios de las PTAR para poder controlar los demás parámetros señalados en la normativa colombiana.

Frente a la normativa colombiana en cuanto al vertimiento de aguas residuales y la preocupación de las empresas por alcanzar los niveles exigidos, se ha encontrado una posible solución con el uso de microorganismos inmovilizados como tratamiento biológico en el tratamiento de aguas residuales, que cuenta además con la ventaja de recuperación para un uso posterior. Ante los resultados de eficiencia de esta biotecnología en pruebas de laboratorio, surge la pregunta de investigación: ¿sería posible la aplicación de inmovilizados (bacterias y/o algas) en una planta de tratamiento de aguas residuales no domésticas y demostrar su efectividad sobre la DQO de acuerdo con la regulación colombiana?

## **5. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **5.1. Objetivo general**

Comprobar la efectividad en la implementación de inmobilizados como tratamiento biológico en la etapa primaria de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR), con el fin de disminuir la DQO y cumplir con los estándares requeridos de vertimiento de aguas de acuerdo con la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

### **5.2. Objetivos específicos**

1. Identificar la necesidad de reducción de la DQO deseada del sistema de tratamiento a intervenir
2. Fijar la concentración mínima de inmobilizados y su aplicación en un sistema de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo a la necesidad de remoción de DQO del agua a tratar
3. Aplicar los inmobilizados en la fase primaria del tratamiento de aguas residuales para verificar su efectividad de remoción de la DQO in situ
4. Definir los costos aproximados de implementación del tratamiento para establecer el costo – beneficio de su aplicación como tratamiento biológico de la PTAR objeto de estudio

## **6. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Los actuales modelos de gestión empresariales mantienen un compromiso con el crecimiento rentable y sostenible, y con la generación de valor para todos sus grupos de interés, por lo que los temas ambientales se consideran como un ámbito relevante de sostenibilidad y la gestión ambiental se convierte en una oportunidad con las acciones de cuantificación y gestión en la eficiencia del uso de la energía, el agua y el aprovechamiento de materiales (OCDE, 2019).

Los ODS – Objetivos de Desarrollo Sostenible, “representan un lenguaje común para todos los actores en la sociedad para contribuir al desarrollo sostenible y constituyen un marco global para que las empresas se alineen y contribuyan a la sociedad” (PNUD, 2018). Dentro de la gestión de sostenibilidad empresarial, es aplicable la adhesión a los ODS adoptados por la ONU en la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, entre ellos el Objetivo 6 – Agua limpia y

saneamiento, enfatizando sobre la calidad del agua, la cual debe ser libre de impurezas y accesible para todo el mundo. (ONU, 2015).

La meta 6.3 del ODS 6, propone mejorar la calidad del agua, animando a los países en aumentar el tratamiento de las aguas residuales y en que sus efluentes cumplan con las normas nacionales. A su vez, las aguas residuales industriales deben ser monitoreadas y reguladas a través de permisos de vertimiento. (UN-WATER, 2018). En Colombia, la entidad encargada de la regulación de vertimiento de aguas residuales es el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, mediante lo dispuesto en la Resolución 0631 de 2015, “por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público” (MADS, 2015).

“La gestión sostenible de las aguas residuales requiere de métodos innovadores que involucren a los sectores público y privado a escala local, nacional y transfronteriza” (UNW-DPAC, 2015). Para las empresas que manejan plantas de tratamiento, se presenta la oportunidad de implementar como parte de su estrategia ambiental, la gestión sostenible del agua, a través de la implementación de un sistema biotecnológico e innovador de tratamiento de agua, por medio del uso de microorganismos inmovilizados, dentro de un proceso de biorremediación<sup>5</sup>.

Este tipo de biotecnología se aplicó directamente en una muestra de agua residual industrial con pruebas realizadas en el laboratorio de biología de la Universidad El Bosque (INBIBO), consistente en el uso de microalgas y bacterias inmovilizadas en cápsulas de alginato. Una vez tratada el agua residual, se comprobó la eficacia del tratamiento por los resultados obtenidos en laboratorio, dado que los niveles iniciales de contaminantes encontrados descendieron su concentración, teniendo como base los limitantes fisicoquímicos de vertimientos de acuerdo a normativa en Colombia (Merchán B., 2018). Se propuso entonces el uso de esta biotecnología en la aplicación in situ de una PTAR de una empresa productora de saborizantes y fragancias artificiales, para comprobar su efectividad, teniendo en cuenta los parámetros y valores máximos permisibles de acuerdo con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en cuanto a niveles de DQO, siendo éste el mayor parámetro de contaminación y “el de

---

<sup>5</sup> Biorremediación: Proceso que utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar un medioambiente alterado por contaminantes a su condición natural. (Diccionario de neologismos del español actual, s/f)

mayor interés” por ser un “indicador rápido de los contaminantes orgánicos presentes en el agua” La determinación de la DQO es necesaria para los balances de masa en el tratamiento de aguas residuales” (López del P. & Martín C., 2017) siendo el parámetro base de medición sobre el que los operarios de PTAR determinan el balance de los demás parámetros de acuerdo a la normativa . El Estudio Nacional del Agua de 2018 reportó que “el sector industrial es el mayor aportante de carga orgánica que se vierte a las corrientes hídricas, estimado en el 62% en DQO” (MADS, 2019).

Este tipo de tratamiento se considera biotecnológico, debido a que permite modificar selectivamente la actividad de organismos vivos hacia una utilidad aplicable en diversos sectores (Duque, 2010), en una “interacción que ocurre entre plantas y bacterias, dos microorganismos bien estudiados, atrapados en una matriz de gel (inmovilización), escogidos debido a sus características únicas” (de Bashan & Bashan, 2004). “La inmovilización brinda a las células una protección contra el efecto tóxico de las sustancias presentes en el medio y a la depredación por parte de otras poblaciones” (Mishra, Jyot, Kuhad, & y Lal, 2001). “Esta asociación artificial tiene la capacidad de aumentar la eliminación de nutrientes de las aguas residuales” (de Bashan & Bashan, 2004), llegando posiblemente a suplir parte del costo del tratamiento tradicional de las aguas residuales (lo que se revisará con los costos que actualmente tienen con la PTAR objeto del tratamiento) y a su vez, a optimizar la eficiencia de consumo de agua por parte de las empresas o fábricas que cuentan con una PTAR.

Para poder llevar a cabo esta investigación, se contó con la colaboración y asesoramiento de un investigador miembro de Bashan Foundation, quien ha estudiado esta biotecnología por dos décadas, la bióloga desarrolladora de los inmovilizados y un ingeniero químico quien diseña y maneja plantas de tratamiento de aguas residuales.

## 7. MARCO TEÓRICO DE LA PROPUESTA

### 7.1. Calidad y gestión del agua

La *calidad del agua* es “el resultado de comparar las características físicas, químicas y microbiológicas encontradas en el agua, con el contenido de las normas que regulan la materia” (SSPD, 2017)

El objetivo de calidad del agua según la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia, “consiste en mejorar la calidad y minimizar la contaminación de los cuerpos de agua a través del ordenamiento y reglamentación de usos del recurso y el monitoreo, seguimiento y evaluación de la calidad del mismo”. (MADS, 2010).

*Gestionar el agua* “significa adoptar enfoques integrados para la gestión de los recursos hídricos a nivel local, nacional y regional” (Banco Mundial, 2019). En Colombia, la gestión del agua se dispone bajo la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Para la presente investigación, aplicaría su objetivo 3 en cuanto a calidad “mejorar la calidad y minimizar la contaminación del recurso hídrico” y dentro de su estrategia 3.2 “reducción de la contaminación del recurso hídrico” que incluye el tratamiento de aguas residuales, “para reducir además de la contaminación por materia orgánica y sólidos en suspensión, patógenos, nutrientes y sustancias de interés sanitario”. (MAVDT, 2010).

### 7.2. Aguas residuales

La mayoría de las aguas vertidas a los cauces fluviales procedentes de diferentes procesos socioeconómicos, no han tenido un tratamiento previo, especialmente las aguas residuales domésticas e industriales. La calidad del agua se convierte en “un factor que limita la disponibilidad del recurso y restringe el rango de posibles usos”. (IDEAM, 2020)

La Resolución 0631 de 2015, provee las siguientes definiciones en cuando a aguas residuales:

***Aguas residuales domésticas – ARD:*** Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que corresponden a: 1- Descargas de los retretes y servicios sanitarios y 2-

Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (no se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

***Aguas residuales no domésticas – ARnD:*** Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios.

### 7.3. Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales se presenta como consecuencia del desarrollo de la civilización, el aumento de la densidad demográfica y la expansión industrial. Debe involucrar acciones de saneamiento para que el agua vertida no deteriore los sistemas de alcantarillado ni el medio ambiente y se realiza “con el propósito de evitar la contaminación física, química, bioquímica, biológica y radioactiva de los cursos y cuerpos de agua receptores”. (OMS, 2002).

“Los niveles extremadamente bajos de tratamiento de las aguas residuales (más del 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno) muestran la imperiosa necesidad de realizar mejoras tecnológicas y de contar con opciones seguras para la reutilización del agua y así alcanzar la Meta 6.3 del ODS 6”. (UNESCO, 2017)

“Los países deben desarrollar las capacidades necesarias para evaluar y seleccionar las tecnologías de tratamiento de aguas residuales más adecuado”, lo que “aumentará el volumen y la calidad del tratamiento”. (UN-WATER, 2018)

#### 7.3.1. *Gestión de aguas residuales*

“La gestión de las aguas residuales mediante el aumento de la recogida y el tratamiento (sistemas *in situ* o externos) puede contribuir al logro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”. (UN-WATER, 2018).

Las aguas residuales se componen, básicamente, de un 99% de agua y un 1% de sólidos disueltos, suspendidos o coloidales. El vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado tendrá consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: i) efectos nocivos para la salud humana; ii) efectos ambientales negativos; iii) repercusiones desfavorables para las actividades económicas. El fin

último de la gestión de aguas residuales es el control y la regulación de sus diversos flujos. (UNESCO, 2017)

El informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos de 2017, menciona que “el ciclo de gestión de aguas residuales puede dividirse en cuatro fases básicas interconectadas” (UNESCO, 2017):

- *Prevención o reducción de la contaminación en la fuente:* Dar priorización a métodos de control de contaminación hídrica hacia la prevención y minimización de las aguas residuales, antes de implementar sistemas de tratamientos en la etapa final, lo que incluiría la censura del uso de ciertos contaminantes para evitar o controlar su ingreso en los flujos de aguas residuales. Es menos costoso implementar medidas que eviten contaminación desde el principio, que tener que recurrir a métodos de descontaminación.
- *Recolección y tratamiento de aguas residuales.* Existe una tendencia al uso de sistemas de tratamiento de aguas residuales descentralizados, que son los de uso en establecimientos o grupos de establecimientos pequeños y se estima que tienen “un costo de instalación que representa entre un 20% y 50% el valor de las plantas de tratamiento convencionales, con costos operativos y de mantenimiento entre un 5 a 25% del valor de las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales”.
- *La utilización de aguas residuales como fuente alternativa de agua.* El uso de tratamientos adecuados para tratar el agua residual aumenta la posibilidad de recuperar costos si el punto de reutilización se encuentra cerca del punto de producción y “sirven como un suministro de agua sostenible y confiable para la industria y las municipalidades”.
- *La recuperación de subproductos útiles.* Existe un alto potencial de las aguas residuales como fuente de recursos, como energía (generación de energía eléctrica, calefacción y refrigeración) y nutrientes (recuperación de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales o lodos).

### 7.3.2. La industria

El contenido de las aguas residuales industriales puede repercutir con mayor grado en los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente, debido a la carga contaminante y toxicidad de que se componen. (UNESCO, 2017).

En Colombia, la gestión de aguas residuales en cuanto a vertimientos, se fundamenta en la Resolución 0631 de 2015 del Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Boletín Tecnológico de Tratamiento de aguas residuales emitido por la Superintendencia de Industria y Comercio, afirma que “los esfuerzos de tratamiento en aguas residuales están enfocados principalmente en la remoción de materia orgánica (principalmente carbono), mientras a nivel global los avances se centran en la remoción de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo”. (SIC, 2014).

### 7.4. DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno)

“Para materia orgánica, la DBO, fracción biodegradable, representa la demanda bioquímica de oxígeno; y la DQO, la materia oxidable, que incluye las fracciones biodegradable y no biodegradable, representa la demanda química de oxígeno” (IDEAM, 2010).

En una planta de tratamiento de aguas residuales, “en general, la distribución entre materia soluble y suspendida es importante con relación a la caracterización de las aguas residuales” (Amy & al, 2017).

**Tabla 1.** Distribución de materia soluble y suspendida para una concentración media de aguas residuales (en mg/L)

Parámetro	Soluble	Suspendido	Total
DQO	300	450	750
DBO	140	210	350
N total	50	10	60
P total	11	4	15

**Fuente.** (Amy & al, 2017), pág. 38

“Dado que la mayoría de los procesos de tratamiento de aguas residuales se basan en la biodegradación biológica, la degradabilidad de los componentes es importante” (Amy & al, 2017).

La Tabla 2 muestra valores promedios basados en mediciones de distintos países de Europa, Asia, África, Norteamérica y Suramérica.

**Tabla 2.** Degradabilidad de aguas residuales de concentración media (en mg/L)

Parámetro	Biodegradable	Inerte	Total
DQO total	570	180	750
DQO soluble	270	30	300
DQO partículas	300	150	450
DBO	350	0	350
N total	43	2	45
N Orgánico	13	2	15
P total	14.7	0.3	15

**Fuente.** (Amy & al, 2017), pág. 38

Siendo la DQO la que representa el principal tipo de contaminación por la presencia de materia orgánica e inorgánica, es “por tanto, el de mayor interés”, siendo además “indicador rápido de los contaminantes orgánicos presentes en el agua.”. (López del P. & Martín C., 2017). La Resolución 631 de 2015 en Colombia, muestra los *parámetros generales* a monitorear con los límites permisibles máximos para sus vertimientos en promedios para aguas residuales en las distintas actividades de producción industrial como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Promedios límites de parámetros generales de vertimiento

Parámetro general	Vr. Límite
DQO - Demanda química de oxígeno	513 mg/L
DBO- Demanda bioquímica de oxígeno	337 mg/L
SST - Sólidos suspendidos totales	147 mg/L
SSED - Sólidos sedimentales	3 mg/L
Grasas y aceites	19 mg/L

**Fuente.** Elaboración propia a partir de la Resolución 631 de 2015

El Estudio Nacional del Agua de 2018 reportó que “el sector industrial es el mayor aportante de carga orgánica que se vierte a las corrientes hídricas, estimado en el 62% en DQO” (MADS, 2019).

## 7.5. pH

El pH es el valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presente. Es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 significa que la sustancia es neutra. Valores de pH por debajo de 7 indica que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica. (Lenntech). El pH mide la acidez del agua en el tratamiento de aguas residuales y es uno de los parámetros generales incluidos dentro de la normativa de vertimiento de aguas residuales en Colombia.

En un tratamiento biológico con microorganismos para una PTAR, se requiere que las condiciones ambientales sean favorables para su crecimiento, dentro de los cuales el pH es uno de los factores importantes. (Amy & al, 2017). La PTAR objeto de estudio, maneja un pH entre 7 y 9, permitiendo una modificación hasta 11. Durante el tratamiento con los microorganismos, fue necesario modificar el pH para lograr su acción de depuración.

## 7.6. Biorremediación, inmovilizados y coinmovilizados

### 7.6.1. Biorremediación

La biorremediación surge como una rama de la biotecnología, que permite transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples o libres de elementos contaminantes, que se pueden aplicar en la limpieza de terrenos o aguas contaminadas. Requiere el uso de organismos vivos en especial bacterias, que actúan con hongos, levaduras o plantas, para la eliminación de contaminantes ambientales. (Alexander, 1973).

El bio-tratamiento con microalgas, fue una idea propuesta por Oswald & Gotaas (1957) y es particularmente atractivo debido a la capacidad fotosintética que tienen las microalgas, en convertir la energía solar en biomasa y la incorporación al metabolismo de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo causantes de la eutrofización. (Oswald & Gotaas, 1957).

En el desarrollo de biotecnologías orientadas al tratamiento terciario de aguas residuales que permitan la eliminación de nutrientes sin generar subproductos y a un menor costo, cobra importancia los cultivos de microalgas ya que reciclan eficientemente contaminantes desde medios

líquidos y gaseosos, incorporándolos a su metabolismo para generación de biomasa. (Dominique, Murali, & Nisha, 2009).

### **7.6.2. Inmovilizados**

La inmovilización “describe las diferentes formas de atrapar o encapsular células en diferentes matrices” (Cassidy, Lee, & Trevors, 1996).

“Una alternativa para la cosecha de las microalgas, es la de contar con sistemas de inmovilización en cápsulas o esferas de polímeros,” (González & Bashan, 2000). “Los trabajos de biodegradación de contaminantes por células inmovilizadas se han realizado en medios acuosos, ya que estos se aplican comúnmente en el tratamiento de efluentes” (Martínez T. & García R., 2012).

Los inmovilizados son bacterias y microalgas encapsuladas en esferas de un biopolímero con un tamaño aproximado entre de 1,0 y 1,7 mm de diámetro que para el caso de estudio que se presenta, fueron creados en laboratorio durante 5 semanas.

### **7.6.3. Coinmovilizados**

Los coinmovilizados, son dos microorganismos inmovilizados conjuntamente dentro de una esfera polimérica. (de Bashan & Bashan, 2004)

“Una manera de aumentar la biomasa microalgal es coinmovilizando la microalga con bacterias benéficas que promuevan su crecimiento” (González & Bashan, 2000). Los sistemas coinmovilizados de bacterias promotoras de crecimiento con microalgas para el tratamiento de aguas residuales, “abren un nuevo camino en la biotecnología ya que resultan ser muy eficientes en la eliminación de nutrientes, la producción de biomasa y el aumento en los pigmentos de las microalgas”, permitiendo minimizar los costos del tratamiento, ya que se eliminarían procesos complejos en la cosecha de las microalgas. (Hernández S. J. , 2004).

En los sistemas de coinmovilización, la matriz de inmovilizado debe asegurar una estrecha proximidad física entre microalga y bacteria, además de permitir la entrada de luz necesaria para que las microalgas lleven a cabo sus procesos fotosintéticos y ser suficientemente pequeña para permitir la difusión de Oxígeno y nutrientes

dentro de la esfera, al mismo tiempo, deberá ser suficientemente grande y pesada para evitar la flotación y asegurar completo sumergimiento en el medio de crecimiento. (González & Bashan, 2000).

## **8. HIPÓTESIS DE TRABAJO**

El desarrollo de esta investigación se basa en el trabajo realizado en cuanto al uso de inmovilizados (bacteria-microalga) en aguas residuales y materia orgánica en descomposición, donde para su estudio en laboratorio, se tomó una muestra de agua de la planta de tratamiento del Grupo Proenfar, Planta Tocancipá, Cundinamarca, Colombia, empresa de elaboración de empaques plásticos para la industria farmacéutica y cosmética, con resultados que sugieren que los sistemas de inmovilizados fueron eficientes con altas cargas de materia orgánica, compuestos inorgánicos y microflora nativa, demostrando la viabilidad de aplicación de este tipo de sistema en aguas residuales. (Merchán B., 2018).

Posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio con la aplicación de inmovilizados en una muestra de agua de la PTAR de un centro comercial en Bogotá, obteniendo resultados positivos y eficaces en cuanto a la disminución de carga contaminante por acción de los inmovilizados, estudio realizado solo a nivel de laboratorio. (Ver Anexo 1).

De acuerdo a los resultados del tratamiento aplicado en laboratorio, la hipótesis que se plantea es que si los inmovilizados funcionaron satisfactoriamente en muestras de aguas residuales in vitro, este sistema debería tener el mismo efecto al incorporarlos in situ en una planta de tratamiento de aguas residuales.

## **9. DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

A partir del conocimiento de una investigación realizada en cuanto al uso de inmovilizados como método descontaminante en aguas residuales, se manifiesta el interés de utilizar este tipo de biotecnología en una PTAR en Bogotá. Esto surge debido a la entrada en vigencia de la Resolución 631 de 2015, que establece la forma como las empresas deben hacer un manejo adecuado de las aguas residuales para llegar a los niveles de vertimiento permisibles de acuerdo a la normatividad en Colombia y sus consecuentes sanciones. Para ello, se obtuvo una muestra de agua residual de

la planta de tratamiento de un centro comercial, con el fin de realizar pruebas en laboratorio con estos inmovilizados (ver Anexo 1).

Lo anterior motivó a los investigadores el poner en práctica un método innovador de biotecnología desarrollada en laboratorio, a un escenario real con un beneficio sostenible tanto a nivel empresarial y común.

Surge entonces la hipótesis de comprobar si, así como esta biotecnología funciona en laboratorio, debería funcionar también al ser aplicada directamente en una PTAR, para lograr reducir la carga contaminante y a su vez, cumplir con la reglamentación de vertimientos en Colombia.

Ante la hipótesis planteada, se requiere realizar un estudio de alcance exploratorio ya que no se encuentran antecedentes de la aplicación in situ de este tipo de biotecnología. Se realizó un estudio documental en cuanto a temas relacionados con el agua, normatividad de vertimientos, el funcionamiento de plantas de aguas residuales y la relación con los ODS y la sostenibilidad, a partir de fuentes secundarias de artículos científicos e investigadores, consultas de fuentes relacionadas con entidades públicas y gubernamentales y fuentes primarias directas de biólogos e ingenieros químicos. La metodología de esta investigación tiene entonces un enfoque cuantitativo-deductivo mediante datos de mediciones para verificar si los resultados corroboran la hipótesis planteada en cuanto a la efectividad del uso de inmovilizados como parte de una de las fases de depuración de aguas residuales de una PTAR.

Los análisis de laboratorio de la muestra de agua tomada de la PTAR a tratar, fueron realizados por los biólogos desarrolladores de los inmovilizados, quienes a partir de los resultados, seleccionaron el tipo de microalgas y bacterias adecuadas para elaborar los inmovilizados de aplicación a la PTAR. La colocación del producto biotecnológico, el seguimiento, modificaciones in situ y registro de datos, fueron efectuadas por un ingeniero químico especializado en aguas y directamente encargado de la operación de la PTAR objeto de estudio. La tabulación de datos, análisis de resultados y gráficos, fueron desarrollados por los investigadores.

Para el desarrollo de la investigación, se llevaron a cabo una serie de etapas que se describen brevemente a continuación:

- **Selección in situ:** Búsqueda de sitios que cuenten con una planta de tratamiento de aguas residuales, dispuestas a implementar un tratamiento con microorganismos, considerando además que se requiere de una persona experta en el manejo de una PTAR, quien pueda hacer el seguimiento y los ajustes necesarios para la implementación del tratamiento.
- **Elaboración de inmovilizados:** Es necesario realizar un análisis previo del agua a tratar para la incorporación de los microorganismos y conocer la capacidad del tanque de la PTAR donde se implementará el tratamiento, para así mismo realizar el cálculo de la cantidad de esferas de inmovilizados que se requieren para poner en marcha su implementación.
- **Entrega de inmovilizados:** Se determina cómo será la entrega de inmovilizados para su transporte y traslado al sitio de implementación, el tipo de empaque y materiales necesarios para el mantenimiento de los inmovilizados sin que sufran alguna alteración y que sean de fácil manipulación.
- **Instalación de los inmovilizados:** Es importante determinar cómo se instalarán los inmovilizados en el sitio de disposición para su uso en la PTAR y que cumplan su función de depuración.
- **Pruebas in situ:** Una vez seleccionado el sitio de aplicación de los microorganismos, la forma de traslado y colocación dentro de la PTAR, se inician las pruebas por una persona idónea en el manejo de una PTAR, quien hará el seguimiento diario y las modificaciones a que haya lugar de acuerdo a lo observado durante el tiempo de aplicación.
- **Resultados:** Los resultados determinarán si se cumple la hipótesis de la efectividad de los inmovilizados en la disminución de carga contaminante de las aguas a tratar de la PTAR. Se espera que, con el tratamiento de los inmovilizados y sin el uso de otro elemento distinto (químicos convencionales) disminuya la DQO a niveles de 900 ppm o menos, que es lo exigido por la Resolución 0631 de 2015, para la actividad que se realiza en la PTAR objeto del tratamiento.



grasas de la zona de restaurantes del centro comercial, en donde las cargas contaminantes no eran muy altas (menor a 5.000 ppm de entrada).

## 10.2. Elaboración de inmovilizados

Teniendo seleccionado el sitio de aplicación para el tratamiento, se realizó una prueba de agua de la PTAR para identificar el tipo y carga contaminante, a través de uno de los laboratorios debidamente acreditado por el IDEAM para este fin, así como la realización de caracterización de la PTAR.

A continuación se presentan los parámetros fisicoquímicos que se evaluaron en el análisis de la muestra de agua de la PTAR, necesarios para conocer las cargas contaminantes del agua residual y así determinar el tipo y cantidad de microorganismos a utilizar en el tratamiento biológico con los inmovilizados.

**Tabla 5.** Parámetros fisicoquímicos PTAR seleccionada

Alcalinidad	CaCO <sub>3</sub>
Amoniaco	NH <sub>3</sub>
Amonio	NH <sub>4</sub>
Calcio	Ca <sup>+2</sup>
Cloruros	Cl <sup>-</sup>
Demanda Biológica de Oxígeno	DBO
Demanda Química de Oxígeno	DQO
Fósforo Total	P
Fósforo inorgánico	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Fósforo orgánico	PO <sub>4</sub> (Ortofosfatos)
Hierro	Fe
Magnesio	Mg <sup>+2</sup>
Nitritos	NO <sub>2</sub> – N
Nitrito de Sodio	NaNO <sub>2</sub>
Nitrógeno Amoniacal	NH <sub>3</sub> – N
Oxígeno Disuelto	DO
pH	
Potasio Total	K <sup>+</sup>
Óxido de Potasio	K <sub>2</sub> O

**Fuente.** Datos informados por la bióloga

### ***10.2.1. Caracterización de la PTAR***

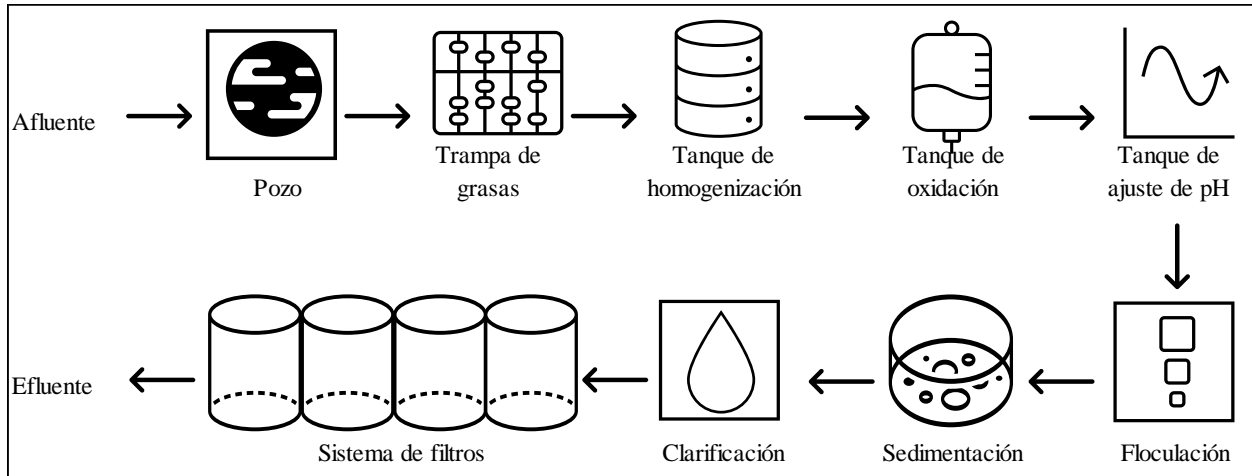
La PTAR objeto de estudio tiene un caudal de 1 L/s (litros por segundo) lo que corresponde a un volumen mensual tratado de 2.592 m<sup>3</sup>. Las entradas de carga orgánica en DQO son de 15.000 ppm o superior, ya que esta es la medida máxima del fotómetro. El valor de pH programado está entre 7.0 y 9.0 unidades.

La PTAR objeto de la aplicación de los inmovilizados in situ, maneja las siguientes etapas de tratamiento:

- *Pozo*: Sitio donde se reciben inicialmente las aguas residuales provenientes de la fábrica de sabores y aromas artificiales.
- *Trampa de grasas*: Dispositivo donde se separan y recolectan las grasas y elementos sólidos de las aguas residuales, por medio físico y por diferencia de densidad.
- *Tanque de homogenización*: Tanque donde se regula el flujo entrante tanto en caudal como en composición.
- *Tanque de oxidación*: Tanque donde se realiza la descomposición de elementos orgánicos e inorgánicos, mediante la oxidación con ozono.
- *Tanque de ajuste de pH*: Allí se lleva a cabo el ajuste de pH del agua por medio de la adición de un ácido o una base, para el caso se utiliza cal.
- *Coagulación y floculación*: La coagulación es la desestabilización de partículas coloidales por la adición de un reactivo químico, llamado coagulante. Esto ocurre a través de la neutralización de las cargas. (Lenntech). La floculación es la acumulación de partículas desestabilizadas y micro partículas, y posteriormente la formación de copos de tamaño deseado. Uno debe añadir otra sustancia química llamada floculante en orden de facilitar la formación de copos llamados flóculos. (Lenntech)
- *Sedimentación*: Asentamiento de partículas sólidas en un sistema líquido debido a la gravedad. (Lenntech) *Clarificación*: Proceso de eliminación de materiales coloidales del agua. La clarificación es un paso final en un sistema de lodos cerrado cuando se necesita un efluente claro. (Oilfield Glossary)
- *Filtración*: Separación de sólidos y líquidos usando una sustancia porosa que solo permite pasar al líquido a través de él. (Lenntech). El agua clarificada es succionada por medio de bombas

centrífugas hacia filtros de presión que en su interior tienen gravas soporte, arena sílice y carbón activado para filtrar el agua y obtener una mayor y mejor calidad de agua.

**Imagen 1.** Diagrama básico de la PTAR objeto de estudio



**Fuente.** Elaboración propia

**Imagen 2.** Vista general de la PTAR objeto de estudio



**Fuente.** Fotografía de ASV Ingeniería

### 10.2.2. Inmovilizados

De acuerdo con los parámetros fisicoquímicos del agua de la PTAR, los biólogos determinaron la clase de microorganismos a utilizar para el tratamiento, que para el caso de estudio fue la microalga *Chlorella sorokiniana* y la bacteria *Azospirillum brasilense*, las cuales se obtienen a partir de una cepa que se llevan a un caldo nutritivo para su multiplicación y se inmovilizan posteriormente en un biopolímero.

La cantidad se fijó de acuerdo a la proporción de cantidad de alginato (material de las esferas para la inmovilización) y microorganismos, por agua a tratar en una relación 1:1 (de Bashan L. , Bashan, Hernández, & Morey, 2004), para este caso específico de tratamiento, ya que las proporciones dependen de las concentraciones necesarias de acuerdo al tipo de agua residual a tratar. Se solicitó la elaboración de 10 kilos de inmovilizados, teniendo en cuenta que por cada metro cúbico de agua a tratar se requiere de un kilo de inmovilizados y el tanque de homogenización en el cual se depositaron los inmovilizados tiene un volumen de 10 m<sup>3</sup>.

Con el fin de llevar a cabo una segunda prueba, se solicitó la elaboración de otros 3 kilos de inmovilizados ya que fue posible recuperar aproximadamente un 70% de los inmovilizados utilizados en la prueba inicial. Se hizo necesario mantener los inmovilizados en reposo (ayuno) por un periodo de 45 días debido a la entrada en cuarentena efecto de la contingencia presentada por Covid-19.

#### Imagen 3. Inmovilizados



Fuente. Fotografía propia

### 10.3. Entrega de inmovilizados

Los inmovilizados se entregaron al ingeniero químico encargado de la PTAR, en un empaque de malla con un peso de 1 kilo, cada uno dentro de una bolsa plástica con cierre hermético. Para su transporte se utilizaron contenedores plásticos como se muestra en la Imagen 5.

El objetivo de contener los inmovilizados en una malla, es porque deben tener contacto con el agua a tratar para que puedan realizar su acción depuradora y porque las esferas no se pueden dejar libres ya que se perderían en el flujo, además de no poder realizar adecuadamente la interacción que se pretende con los elementos contaminantes del agua para su depuración.

**Imagen 4.** Empaque inmovilizados



**Imagen 5.** Transporte de inmovilizados



**Fuente.** Fotografías propias

### 10.4. Instalación de los inmovilizados

Para comprobar el nivel de remoción de los inmovilizados, se requiere que éstos tengan contacto directo con el agua residual a tratar, así que fue necesario buscar la forma de mantener el contacto permanente. Inicialmente cada malla de inmovilizados se introdujo en un tubo de PVC con una apertura circular en los laterales superior e inferior, sostenido por un flotador, para ser introducidos en el tanque de homogenización de la PTAR. En la Imagen 7 se observa el flotador y el tubo con los inmovilizados queda completamente sumergido, que es lo que se requiere para que los inmovilizados puedan llevar a cabo la acción de depuración. Posteriormente se hizo una modificación prescindiendo del tubo de PVC y se ajustaron las bolsas de malla con los inmovilizados a un soporte para que quedaran suspendidas (ver Imagen 12), lo que permitió una

mayor practicidad para su manipulación y un mejoramiento en el contacto directo con el agua a tratar.

**Imagen 6.** Preparación de inmobilizados



**Imagen 7.** Disposición dentro del tanque



**Fuente.** Fotografías de ASV Ingeniería

### 10.5. Pruebas in situ – Aplicación de metodología

Los inmobilizados se aplicaron directamente en el tanque de homogenización y a donde llega el agua residual de la fabricación de sabores y fragancias artificiales de la empresa SYMRISE LTDA en Bogotá, antes de pasar como afluente a la PTAR, con una carga orgánica igual o superior a las 15.000 ppm. de DQO. Los inmobilizados se mantuvieron por un periodo de un mes sin utilizar otro elemento distinto a los productos fisicoquímicos convencionales que se utilizan durante la fase de aplicación de la PTAR objeto de estudio: coagulantes, floculantes y polímeros. El uso de cal es necesario para ajustar el pH del agua residual, bien sea que se utilice el tratamiento convencional o un tratamiento biológico. Los inmobilizados se sumergieron al medio dentro de tubos de PVC perforados con una adaptación de flotadores para evitar su desplazamiento al fondo del tanque.

El objetivo de la prueba es comprobar si el uso de los inmobilizados funciona como un tratamiento biológico depurador de las aguas residuales, que pueda alcanzar los límites de vertimiento de acuerdo a la normativa, específicamente sobre los niveles de DQO. La Resolución

631 de 2015 fija el nivel límite permitido a 900 ppm para la DQO, por más que evidenciamos unos niveles de DQO en entrada iguales o superiores a 15.000 ppm.

Los inmovilizados se mantuvieron en el tanque de homogenización por un periodo de 33 días. Durante la prueba fue necesario hacer seguimiento a los niveles de DQO y modificar el pH del agua (Tabla 5) para aumentar la formación de floc y lograr el efecto de los inmovilizados. La PTAR maneja un pH entre 7 y 9, permitiendo una modificación hasta 11. El valor de 7 es el que está parametrizado en el tanque de homogenización, el agua residual puede llegar con un nivel menor, por lo cual se requiere ajustar y subir las unidades de pH con cal.

**Tabla 6.** Seguimiento diario DQO y pH – Prueba 1

Día	9/12/19	10/12/19	11/12/19	12/12/19	13/12/19	14/12/19	15/12/19	16/12/19	17/12/19	18/12/19	19/12/19
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	14.500	13.000	12.000
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Día	20/12/19	21/12/19	22/12/19	23/12/19	24/12/19	25/12/19	26/12/19	27/12/19	28/12/19	29/12/19	30/12/19
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	11.266	10.000	9.850	9.200	8.600	8.000	7.600	6.250	5.800	4.700	4.250
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	7	7	7	7	7	7	7	10	10	10	10

Día	31/12/19	1/1/20	2/1/20	3/1/20	4/1/20	5/1/20	6/1/20	7/1/20	8/1/20	9/1/20	10/1/20
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	4.150	4.000	3.950	3.920	3.850	3.820	3.779	3.750	3.735	3.720	3.712
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

**Fuente.** Elaboración propia, a partir de las lecturas realizadas por el ingeniero químico

En vista de que no se llegó al resultado esperado que era disminuir la DQO en salida a niveles de 900 ppm, se programó una segunda prueba con un 70% de los inmovilizados ya utilizados, completando la cantidad a 10 kilos con una nueva muestra de inmovilizados. Debido a la contingencia por efecto de la pandemia por Covid-19, fue necesario mantener los inmovilizados en reposo (ayuno) por un término de 45 días. Dentro de ese tiempo los inmovilizados se mantuvieron dentro de las bolsas plásticas con agua potable, haciendo recambios de agua cada 5 días y exponiéndolas al sol durante el día. Durante la noche se dejaron en un sitio cerrado y cubierto.

Pasado el término de reposo de 45 días, los inmovilizados fueron depositados nuevamente en el tanque de homogenización de la PTAR hasta el día 24 con un pH de 7. Al no hallar cambios significativos en la DQO con un proceso lento en su disminución, los inmovilizados fueron instalados en el tanque de estabilización de pH con agitación por aire, llevándolos a un pH entre 10 y 11. Posteriormente, fueron ubicados en el tanque de coagulación y floculación desde el día 25 hasta finalizar la prueba el día 43. El proceso de modificación de pH se ejecuta debido a que a pH bajo (de 5 a 7) los inmovilizados no cumplen su función de remoción. Como en la primera prueba, se realizó un seguimiento diario de los niveles de DQO.

**Tabla 7.** Seguimiento diario DQO – Prueba 2

Día	30/04/20	01/05/20	02/05/20	03/05/20	04/05/20	05/05/20	06/05/20	07/05/20	08/05/20	09/05/20	10/05/20
DQO Entrada	15.000	14.900	15.000	15.000	14.000	14.300	13.600	13.897	15.000	14.900	15.000
DQO Salida	15.000	12.000	9.000	7.000	6.500	6.000	5.700	5.230	5.200	5.110	5.000
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Día	11/05/20	12/05/20	13/05/20	14/05/20	15/05/20	16/05/20	17/05/20	18/05/20	19/05/20	20/05/20	21/05/20
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	4.950	4.900	4.800	4.732	4.620	4.520	4.490	4.430	4.400	4.392	4.350
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Día	22/05/20	23/05/20	24/05/20	25/05/20	26/05/20	27/05/20	28/05/20	29/05/20	30/05/20	31/05/20	01/06/20
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	4.345	4.341	2.500	1.900	1.750	1.600	1.520	1.420	1.331	1.280	1.232
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	7	7	10-11	10-12	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11

Día	02/06/20	03/06/20	04/06/20	05/06/20	06/06/20	07/06/20	08/06/20	09/06/20	10/06/20	11/06/20
DQO Entrada	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000	15.000
DQO Salida	1.150	1.020	1.000	918	895	820	819	814	810	798
DQO exigida MADS	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
pH	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11	10-11

**Fuente.** Elaboración propia, a partir de las lecturas realizadas por el ingeniero químico

**Imagen 8.** Evidencia de algunas lecturas de DQO en fotómetro durante la prueba 2

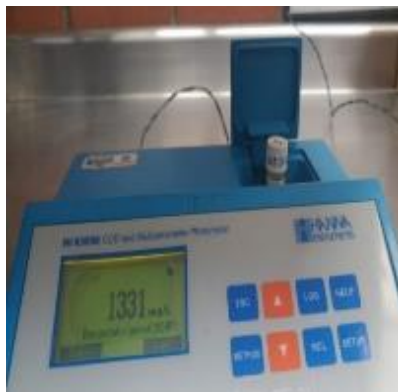
Día 8: mayo 7, entrada DQO



Día 8: mayo 7, salida DQO



Día 31: mayo 30



Día 37: junio 5



Día 43: junio 11



**Fuente.** Fotografías de ASV Ingeniería

**Imagen 9.** Tanque de estabilización de pH - señalado en el círculo rojo



**Fuente.** Fotografía ASV Ingeniería

**Imagen 10.** Tanque de coagulación y floculación - señalado en el círculo rojo



**Fuente.** Fotografía ASV Ingeniería

**Imagen 11.** Ubicación de los inmobilizados suspendidos para depositar directamente en el tanque de coagulación y floculación (Reubicación durante la Prueba 2)



**Fuente.** Fotografía ASV Ingeniería

## 10.6. Exposición de resultados

Los resultados indicarán en principio si los inmobilizados actúan de forma efectiva en la acción de depuración dentro de las aguas residuales a tratar en la PTAR objeto de estudio y posteriormente si con el seguimiento de la DQO, los niveles disminuyen y alcanzan los límites permisibles por la normatividad vigente.

### *10.6.1. Prueba 1*

Los primeros 8 días fueron de adaptación al medio en el que se sumergieron los inmobilizados. Empezaron a activarse y a bajar la DQO desde el día 9 del tratamiento. El día 19 se aumentó el pH del agua a 10, observando una mejor activación de los inmobilizados y llegando al final de la prueba en el día 33 con una DQO de 3.712 ppm. El fotómetro de medición de la DQO tiene una lectura máxima de 15.000 ppm.

La Tabla 8 muestra las lecturas de entrada y salida de la DQO y el efecto de los inmobilizados en forma porcentual de acuerdo con la lectura del día anterior y para las dos pruebas realizadas.

Manteniendo el pH en 7, se produce un promedio de 7,55% de efecto positivo de los inmovilizados en la disminución de la DQO diaria, con picos altos de 10,34% el día 10 y de 11,24% el día 13; el día 14 el efecto disminuyó en un 1,50%.

Al aumentar el pH a 10 el día 19, se incrementó el efecto de los inmovilizados en un 17,76%, teniendo un efecto mayor el día 21 con un 18,97% y un promedio de 4,46% durante los 15 días que se mantuvo el mismo pH en 7. Se evidencia una disminución de su efecto desde el día 25 en un promedio del 0,83% y se llega a una lectura final de DQO al día 33 en 3.712 ppm, lo cual no logra alcanzar el límite permitido por normatividad que corresponde a 900 ppm.

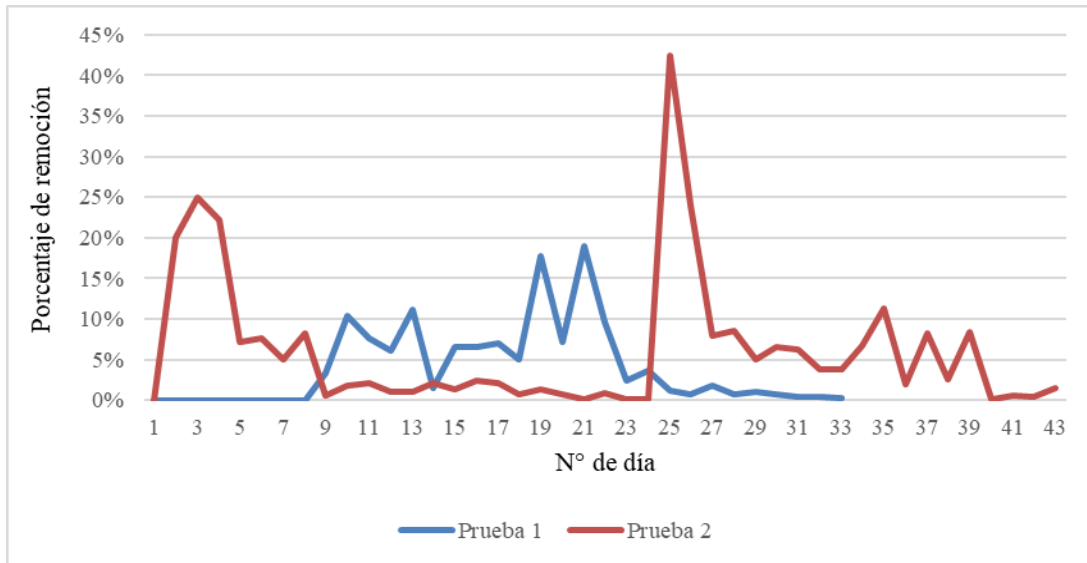
### ***10.6.2. Prueba 2***

Debido a que no se llegó al resultado esperado que era disminuir la DQO a niveles de 900 ppm, se programó una segunda prueba, esta vez se eliminaron los tubos de PVC y los flotadores para ubicar las mallas de los inmovilizados suspendidos de un soporte (ver Imagen 11) y depositarlos en el tanque de homogenización de la PTAR con un pH de 7. Al no percibir mayor acción de depuración, al día 25 del tratamiento los inmovilizados se instalan en el tanque de estabilización de pH con agitación por aire y son llevados a un pH entre 10 a 11, con reubicación posterior en el tanque de coagulación y floculación, mejorando la DQO a 1.331 ppm y estabilizándolo en 798 ppm a los 43 días de tratamiento.

Para la segunda prueba se mantiene inicialmente el pH en 7 (ver Tabla 8) y se produce un efecto inmediato al segundo día de un 20% con una lectura de DQO de 12.000 ppm, efecto rápido que ocurre debido a que un 70% aproximado de los inmovilizados usados en la segunda prueba correspondían a los utilizados en la primera prueba, por lo cual ya estaban adaptados al tipo de agua a tratar. Los días 3 y 4 presentan un mejoramiento del 22% y 22,22% respectivamente, decayendo a un 7,14% al día 5 y un promedio de 7,55%. Durante los siguientes 3 días, se mantiene un promedio de 7,02% hasta el día 8. Del día 9 al 24, los inmovilizados se mantienen en un 1,15% de efecto de remoción que va disminuyendo durante los últimos 5 días de este periodo. Al aumentar el pH a niveles entre 10-11 y modificar el sitio de ubicación de los inmovilizados, el día 25 se incrementó el efecto de remoción en un 42,41%, decayó el día 25 en un 24% y se mantuvo en un promedio de 6,37% durante los 11 días siguientes, pasando por debajo del límite máximo de vertimiento al día 38 (895 ppm para una norma de 900 ppm) y alcanzando los 798 ppm al final del

día 43 de la prueba. La Gráfica 2 presenta el comparativo de porcentajes de efecto diario de los inmovilizados sobre la DQO para las dos pruebas durante los días de tratamiento, de acuerdo a la información de la Tabla 8.

**Gráfica 2.** Porcentaje de remoción diaria de los inmovilizados



**Fuente.** Elaboración propia

**Tabla 8.** Lecturas DQO y porcentaje de efecto causado por los inmovilizados sobre la DQO

Día	DQO-Entrada (ppm) P1-P2	Prueba 1			Prueba 2		
		DQO-Salida (ppm)	pH	% efecto tratam.	DQO-Salida (ppm)	pH	% efecto tratam.
1	15.000-15.000	15.000	7	0,00%	15.000	7	0,00%
2	15.000-15.000	15.000	7	0,00%	12.000	7	20,00%
3	15.000-15.000	15.000	7	0,00%	9.000	7	25,00%
4	15.000-15.000	15.000	7	0,00%	7.000	7	22,22%
5	15.000-14.000	15.000	7	0,00%	6.500	7	7,14%
6	15.000-14.300	15.000	7	0,00%	6.000	7	7,69%
7	15.000-13.600	15.000	7	0,00%	5.700	7	5,00%
8	15.000-13.897	15.000	7	0,00%	5.230	7	8,25%
9	15.000-15.000	14.500	7	3,33%	5.200	7	0,57%
10	15.000-14.900	13.000	7	10,34%	5.110	7	1,73%
11	15.000-15.000	12.000	7	7,69%	5.000	7	2,15%
12	15.000-15.000	11.266	7	6,12%	4.950	7	1,00%
13	15.000-15.000	10.000	7	11,24%	4.900	7	1,01%
14	15.000-15.000	9.850	7	1,50%	4.800	7	2,04%
15	15.000-15.000	9.200	7	6,60%	4.732	7	1,42%
16	15.000-15.000	8.600	7	6,52%	4.620	7	2,37%
17	15.000-15.000	8.000	7	6,98%	4.520	7	2,16%
18	15.000-15.000	7.600	7	5,00%	4.490	7	0,66%
19	15.000-15.000	6.250	10	17,76%	4.430	7	1,34%
20	15.000-15.000	5.800	10	7,20%	4.400	7	0,68%
21	15.000-15.000	4.700	10	18,97%	4.392	7	0,18%
22	15.000-15.000	4.250	10	9,57%	4.350	7	0,96%
23	15.000-15.000	4.150	10	2,35%	4.345	7	0,11%
24	15.000-15.000	4.000	10	3,61%	4.341	7	0,09%
25	15.000-15.000	3.950	10	1,25%	2.500	10-11	42,41%
26	15.000-15.000	3.920	10	0,76%	1.900	10-11	24,00%
27	15.000-15.000	3.850	10	1,79%	1.750	10-11	7,89%
28	15.000-15.000	3.820	10	0,78%	1.600	10-11	8,57%
29	15.000-15.000	3.779	10	1,07%	1.520	10-11	5,00%
30	15.000-15.000	3.750	10	0,77%	1.420	10-11	6,58%
31	15.000-15.000	3.735	10	0,40%	1.331	10-11	6,27%
32	15.000-15.000	3.720	10	0,40%	1.280	10-11	3,83%
33	15.000-15.000	3.712	10	0,22%	1.232	10-11	3,75%
34	15.000-15.000				1.150	10-11	6,66%
35	15.000-15.000				1.020	10-11	11,30%
36	15.000-15.000				1.000	10-11	1,96%
37	15.000-15.000				918	10-11	8,20%
38	15.000-15.000				895	10-11	2,51%
39	15.000-15.000				820	10-11	8,38%
40	15.000-15.000				819	10-11	0,12%
41	15.000-15.000				814	10-11	0,61%
42	15.000-15.000				810	10-11	0,49%
43	15.000-15.000				798	10-11	1,48%

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 9.** Porcentaje de acción de remoción de los inmovilizados – Prueba 2

Día	DQO-Entrada (ppm)	Prueba 2		Carga de entrada	Carga de salida	Porcentaje de remoción
		DQO-Salida (ppm)	pH			
1	15.000	15.000	7	645,00	645,00	0,00%
2	14.900	12.000	7	640,70	516,00	19,46%
3	15.000	9.000	7	645,00	387,00	40,00%
4	15.000	7.000	7	645,00	301,00	53,33%
5	14.000	6.500	7	602,00	279,50	53,57%
6	14.300	6.000	7	614,90	258,00	58,04%
7	13.600	5.700	7	584,80	245,10	58,09%
8	13.897	5.230	7	597,57	224,89	62,37%
9	15.000	5.200	7	645,00	223,60	65,33%
10	14.900	5.110	7	640,70	219,73	65,70%
11	15.000	5.000	7	645,00	215,00	66,67%
12	15.000	4.950	7	645,00	212,85	67,00%
13	15.000	4.900	7	645,00	210,70	67,33%
14	15.000	4.800	7	645,00	206,40	68,00%
15	15.000	4.732	7	645,00	203,48	68,45%
16	15.000	4.620	7	645,00	198,66	69,20%
17	15.000	4.520	7	645,00	194,36	69,87%
18	15.000	4.490	7	645,00	193,07	70,07%
19	15.000	4.430	7	645,00	190,49	70,47%
20	15.000	4.400	7	645,00	189,20	70,67%
21	15.000	4.392	7	645,00	188,86	70,72%
22	15.000	4.350	7	645,00	187,05	71,00%
23	15.000	4.345	7	645,00	186,84	71,03%
24	15.000	4.341	7	645,00	186,66	71,06%
25	15.000	2.500	10-11	645,00	107,50	83,33%
26	15.000	1.900	10-11	645,00	81,70	87,33%
27	15.000	1.750	10-11	645,00	75,25	88,33%
28	15.000	1.600	10-11	645,00	68,80	89,33%
29	15.000	1.520	10-11	645,00	65,36	89,87%
30	15.000	1.420	10-11	645,00	61,06	90,53%
31	15.000	1.331	10-11	645,00	57,23	91,13%
32	15.000	1.280	10-11	645,00	55,04	91,47%
33	15.000	1.232	10-11	645,00	52,98	91,79%
34	15.000	1.150	10-11	645,00	49,45	92,33%
35	15.000	1.020	10-11	645,00	43,86	93,20%
36	15.000	1.000	10-11	645,00	43,00	93,33%
37	15.000	918	10-11	645,00	39,47	93,88%
38	15.000	895	10-11	645,00	38,49	94,03%
39	15.000	820	10-11	645,00	35,26	94,53%
40	15.000	819	10-11	645,00	35,22	94,54%
41	15.000	814	10-11	645,00	35,00	94,57%
42	15.000	810	10-11	645,00	34,83	94,60%
43	15.000	798	10-11	645,00	34,31	94,68%

Fuente. Elaboración propia

### 10.7. Análisis de los resultados

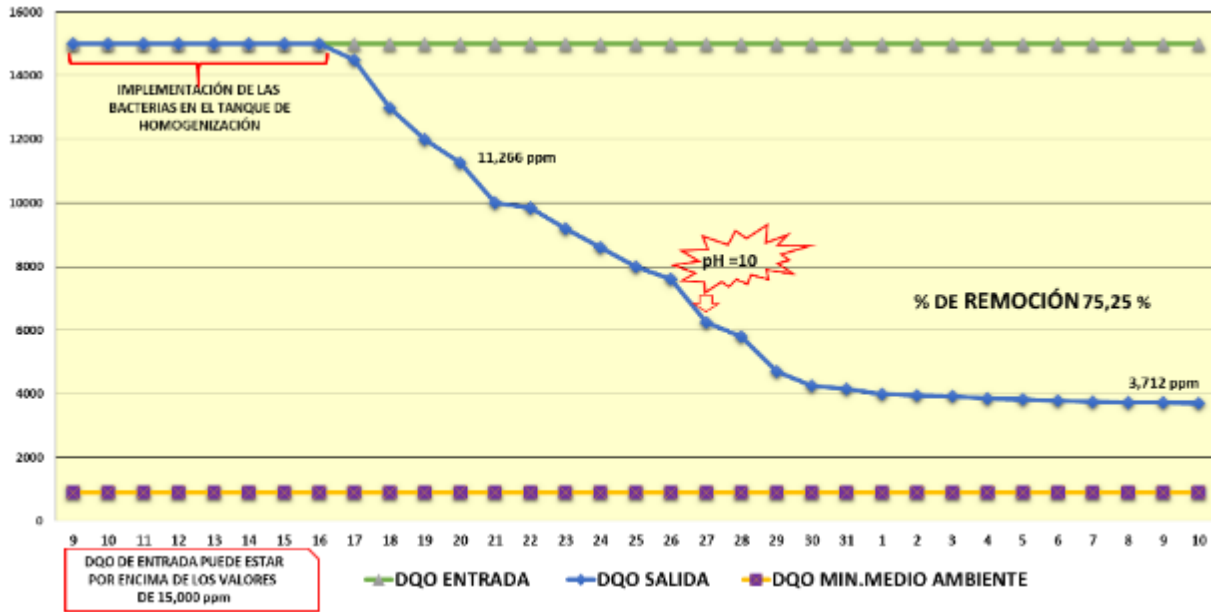
Durante la primera prueba fue más largo el proceso de adaptación de los inmovilizados, lo que tardó 8 días y su efecto de remoción se produjo hasta el día 9, frente a un efecto de remoción casi inmediato a partir del segundo día en la segunda prueba con un 20% de porcentaje de remoción (ver Tabla 8). Este cambio positivo se produce por la previa adaptación que ya tenían los inmovilizados utilizados en la primera prueba, al poderse recuperar al menos un 70% solo fue necesario producir un 30% más de inmovilizados, lo que se tradujo en un mayor resultado de remoción.

En las dos pruebas se inició el proceso con un pH de 7 que al ser elevado a un nivel de 10, inmediatamente se vio reflejada la efectividad de remoción de los inmovilizados, con un 17,76% al día 19 en la primera prueba y un 12% de efectividad en la segunda prueba respecto a la primera (Tabla 8), mientras en la segunda prueba se obtuvo un 42,41% al día 25 de prueba, con un 10% de efectividad respecto a la primera.

De acuerdo a lo observado, podríamos suponer que al iniciar el tratamiento con un nivel de pH superior a 7 se tendría una disminución de DQO más rápido de lo esperado, logrando los límites permisibles por la normatividad en un menor tiempo.

En la Gráfica 3 se muestra la línea de descenso del nivel de DQO diario de la primera prueba durante 33 días (línea azul), con las líneas de referencia de la DQO de entrada (línea verde) y la DQO exigida por normatividad (línea amarilla). Se refleja que no alcanza a llegar a los límites exigidos, alcanzando un 75% de remoción con el tratamiento de inmovilizados.

**Gráfica 3.** Prueba 1 del tratamiento en la PTAR con los inmobilizados



**Fuente.** Elaboración propia

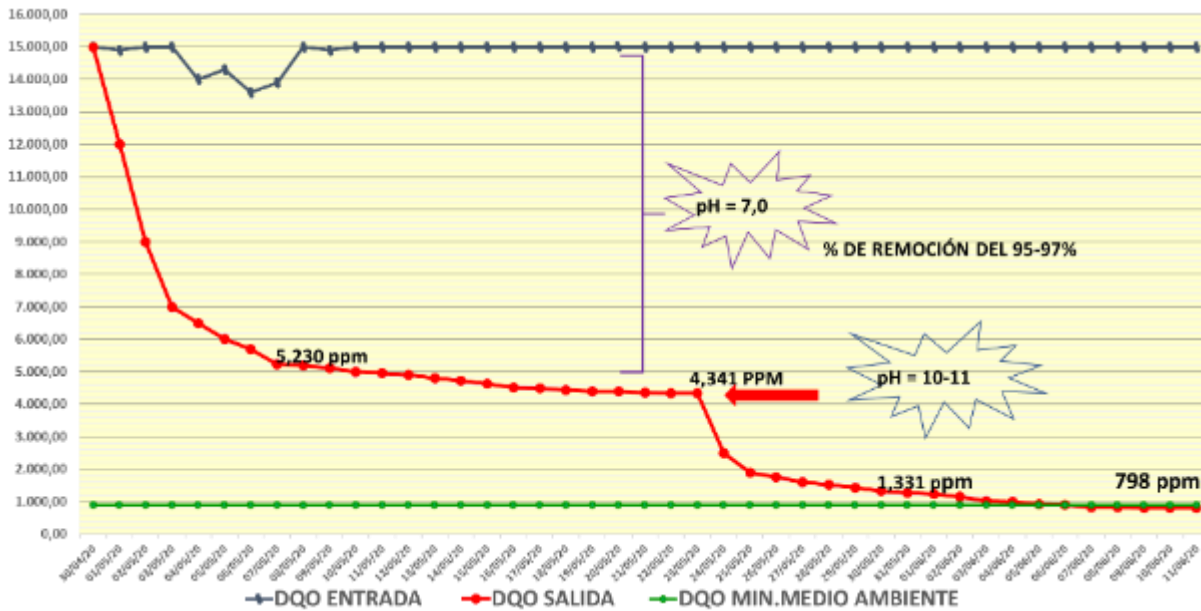
En la segunda prueba, luego de recuperar los inmobilizados del sitio inicial de implementación, haber realizado los cambios en el proceso fisicoquímico al elevar el pH a un valor entre 10-11 unidades y modificar el sitio de implementación del tratamiento, los resultados de los valores de vertimientos bajaron a un valor entre las 700 y 750 ppm de DQO.

En la Gráfica 4, se muestra la línea de descenso del nivel de DQO diario de la segunda prueba durante 43 días (línea roja), con las líneas de referencia de la DQO de entrada (línea azul) y la DQO exigida por normatividad (línea verde). A diferencia de la Gráfica 3, refleja un descenso acelerado durante los primeros cuatro días empezando a desacelerar desde el día 5 y manteniendo una estabilidad de descenso casi plana hasta el momento en que se realiza el cambio de pH entre 10-11. A partir del siguiente día, se presenta nuevamente un descenso marcado que luego empieza a mostrar una línea más plana de descenso estable hasta llegar a la línea de la DQO de la norma, ubicándose por debajo de los límites exigidos (798 ppm) y reflejando un 95% de remoción, con un aumento de un 20% respecto al alcance de la primera prueba.

El resultado con la segunda prueba demuestra la efectividad del tratamiento con los inmobilizados al sobrepasar los límites de DQO exigidos por la Resolución 0631 de 2015,

señalados en el Artículo 8, de acuerdo al tipo de vertimiento de ARnD de la empresa dueña de la PTAR.

**Gráfica 4.** Prueba 2 del tratamiento en la PTAR con los inmobilizados



**Fuente.** Elaboración propia

Se constató además con el ingeniero químico encargado de la PTAR, que se presentó una disminución de lodo seco que proviene del tanque de homogenización, de 90 kg/mes a 45 kg/mes con la incorporación de los inmobilizados en el proceso de tratamiento en la etapa de coagulación y floculación. Éste se recupera después de pasar por un filtro prensa y posteriormente es retirado por un camión de recolección que lo lleva a incineración por considerarse un residuo peligroso. La reducción del 50% en la necesidad de camiones para evacuar los lodos secos es un ahorro económico y ambiental significativo, que podrá tomarse en cuenta para los cálculos de oportunidad económica.

### 10.8. Propuesta de investigación

De acuerdo con los resultados obtenidos y siendo esta una investigación exploratoria, por ser la primera vez que se aplica in situ un tratamiento de microorganismos inmobilizados para la depuración de aguas residuales en Colombia y con confirmación del biólogo investigador miembro de Bashan Foundation, a nivel mundial, se proponen varios temas que se pueden abarcar a una

investigación más profunda. Con esto, se mantendría la línea de investigación en cuanto al uso de microorganismos inmovilizados como una innovación de biotecnología de aplicación en el tratamiento de aguas residuales. Dichos temas se describen a continuación:

#### ***10.8.1. Reúso y recirculación del agua***

El uso de inmovilizados para la depuración de aguas residuales, podría llevar a las empresas e industrias que cuentan con plantas de tratamiento de agua, al reúso o recirculación, atendiendo a las disposiciones nacionales en Colombia en cuanto al uso del agua residual tratada a través de la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que describe los términos a continuación (MADS, 2014):

El *reúso del agua* se refiere a la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar y es objeto de la Resolución y normatividad, es decir, que se requiere permiso de vertimiento.

La *recirculación del agua* se realiza en el mismo predio, dentro de la misma actividad productiva y con la misma persona natural o jurídica, el agua no sale de las operaciones unitarias de la actividad y, por lo tanto, no es objeto de la Resolución de Reúso.

Lo anterior se podría aplicar, por ejemplo, para acciones como el reúso o recirculación del agua tratada en cuanto a actividades propias en cada empresa o industria específico y según sea el caso, excepto para su consumo a menos de que se llegue a un tratamiento adicional de potabilización. Se puede utilizar como limpieza de zonas comunes, en descarga de inodoros y riego.

#### ***10.8.2. Lodos***

Los productos químicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales tienden a generar mayor cantidad de lodo por volumen de agua tratada, denominado lodo inorgánico que proviene de la adición de productos químicos durante el proceso de tratamiento o de otras sustancias disueltas en el agua residual, que no alcanzan a ser eliminadas por acción bacteriana en el reactor

de lodos (Manahan, 2007). Durante el tratamiento con inmovilizados en la PTAR seleccionada para esta investigación, la carga de lodos disminuyó hasta en un 50%, de acuerdo a lo afirmado por el ingeniero encargado de la operación de la PTAR objeto de la aplicación de los inmovilizados.

En los estudios realizados con inmovilizados, no se ha experimentado con lodos debido a que las muestras de agua residual usadas para pruebas en laboratorio, no tenían un alto grado de sólidos o sedimentos, éstas ya habían tenido un procesamiento previo de depuración dentro de las fases de la PTAR de donde provenían. La explicación de la bióloga desarrolladora de los inmovilizados, es que a partir del metabolismo de los microorganismos, éstos tienen la capacidad de captar lo que esté a su alrededor mientras permanezcan en contacto con el agua a tratar, tiempo durante el cual ocurre una transformación de iones por acción de estos microorganismos inmovilizados, generando una modificación de sólidos que facilitan su sedimentación y por consiguiente, una disminución de los sólidos flotantes del agua residual.

La acción de microorganismos sobre lodos reduce la masa y el volumen del lodo por digestión o degradación, que posteriormente se acondiciona para concentrarlo, estabilizarlo, desecarlo y convertirlo de un material esencialmente líquido a un sólido húmedo que no contiene más de aproximadamente un 85% de agua. Como última acción, se requiere de su recolección y disposición final. (Manahan, 2007)

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y los resultados favorables en cuanto a la disminución de lodos durante el tratamiento aplicado en las dos pruebas, se presenta una oportunidad interesante de investigación del efecto de los inmovilizados en los lodos que se generan en una PTAR, lo que permitiría diseñar nuevos procesos de eliminación biológica de sólidos con el uso de los inmovilizados y podría generar una disminución o eliminación de productos o aditivos para su tratamiento y un ahorro por costos de recolección.

### ***10.8.3. Inoculante de Suelo***

En varios de los estudios realizados por Bashan Foundation, indican el uso de microorganismos inmovilizados para la recuperación de suelo, como se menciona en el trabajo base de esta investigación, donde además de las pruebas en laboratorio del uso de inmovilizados

en una muestra de agua residual industrial - ARI, se utiliza también en materia orgánica - MO, demostrando que “los iones captados en un solo ciclo de tratamiento tanto en ARI como en MO, generan efectos positivos en el crecimiento de pasto Ray Grass, incremento de Carbono Orgánico Total, porcentaje de Materia Orgánica y condiciones fisicoquímicas del suelo. (Merchán B., 2018).

Dado que estos estudios se han realizado en laboratorio, podría hacerse una investigación de aplicación in situ para verificar su efectividad y acción sobre la recuperación de suelos.

#### ***10.8.4. Depuración de aguas en tanques abiertos***

En tanques de agua dispuestos abiertamente (no en un sitio cerrado), la acción de los inmovilizados puede aumentar su efectividad, debido a que por acción de las microalgas que son organismos fotosintéticos y poseen clorofila, necesitan de luz para desarrollarse y crear materia orgánica. “La luz es un elemento que proporciona la energía a las microalgas para que puedan llevar a cabo la generación de nueva biomasa y es por tanto el motor del crecimiento. Las microalgas absorben muy intensamente la luz” (Fernández S., 2014). Resulta entonces otra oportunidad de investigar in situ la aplicación de los inmovilizados en este tipo de tanques y observar el proceso de depuración en el agua a tratar por la acción directa de la luz del sol en las microalgas, bien sea manteniendo los inmovilizados sumergidos lo más cercano a la superficie del agua, o bien después de un tratamiento de clarificación, lo que podría repercutir en un mejor sistema de tratamiento de forma biológica con mayor efectividad, con la oportunidad de reúso del agua.

## **11. ACERCAMIENTO A LOS COSTOS DEL TRATAMIENTO**

Para poder definir un costo aproximado del tratamiento biológico de depuración de aguas residuales con los inmovilizados, fue necesario realizar un estudio de mercado con empresas que manejan productos similares con microorganismos (algas y/o bacterias) en Colombia. En Bogotá se logró identificar 58 empresas que prestan servicios de tratamiento de aguas y las empresas que ofrecen productos biológicos son muy pocas. Se contactaron a 8 empresas que son las más representativas y al final se encontró que sólo 5 de ellas tienen productos específicos para el tratamiento de aguas residuales con microorganismos.

De acuerdo a las respuestas obtenidas de una muestra de 48 empresas que manejan productos convencionales para el tratamiento de aguas residuales, en cuanto a lo que estarían dispuestos a pagar por el tratamiento biológico con inmobilizados que se les ofreció, un 61,5% respondió que pagaría por debajo de \$100.000 el kilo de inmobilizados por m<sup>3</sup> de agua a tratar que permanezca dentro del tanque de homogenización, de coagulación o de floculación, durante el tratamiento mensual. Basados en estos resultados y teniendo en cuenta el valor que cobran las empresas que ofrecen productos biológicos para el tratamiento de aguas residuales, se determinó un precio de \$80.000 el kilo / m<sup>3</sup> de agua a tratar, lo que significa que el tratamiento con inmobilizados habría tenido un costo de \$800.000 durante el mes de prueba en la PTAR objeto de estudio, teniendo en cuenta que el volumen del tanque donde permanecieron sumergidos los inmobilizados fue de 10 m<sup>3</sup>.

Acorde a los datos suministrados por el ingeniero químico encargado del manejo y mantenimiento de la PTAR objeto de estudio, se elaboró la Tabla 9 de costos de tratamiento de aguas residuales comparado con los costos que se tendrían con el uso de inmobilizados, teniendo en cuenta que la PTAR maneja un caudal de 1 L/s y un volumen de aguas tratadas de 2.592 m<sup>3</sup> / mes.

Adicional, el operario directo de la PTAR tiene un salario mensual de \$1.014.980 y el pago mensual de parafiscales es de \$466.892 para un total mensual de \$1.481.872. Se requiere la contratación por el servicio de recolección y disposición de lodos que se obtienen de la PTAR, con un costo mensual de \$335.000, aproximadamente. Teniendo en cuenta los costos totales de insumos químicos, del operario y disposición de lodos, se tiene que el costo mensual de operación de la PTAR sería de \$2.571.344.

El ingeniero químico señaló que con el uso de los inmobilizados, el tiempo de trabajo del operario de la PTAR se reduciría a la mitad, debido a que no se necesitaría mantener una supervisión de tiempo completo, ya que los inmobilizados realizan una función natural permanente sin necesidad de recambios, manejo de dosificaciones, ni control permanente, lo que sí se necesita con los insumos químicos convencionales, motivo por el cual se podría reducir el servicio del

operario a medio tiempo. El servicio de recolección de lodos se disminuye a la mitad, debido a que los lodos se reducen en un 50%.

**Tabla 10.** Costo unitario (COP/m<sup>3</sup>) del agua tratada al mes (Valores fijados en COP – Pesos colombianos)

Conceptos	Tratamiento convencional	Tratamiento con inmovilizados	Inmovilizados vs. Convencional
Insumos químicos		Inmovilizados	
Floculante	\$ 50	\$ 309	106%
Polímero	\$ 16		
Cloro	\$ 225		
Total	\$ 291	\$ 309	106%
Salario operario			
Salario	\$ 392	\$ 196	50%
Parafiscales	\$ 180	\$ 90	50%
Total	\$ 572	\$ 286	50%
Disposicion y certificado (lodos)			
Recolección mes	\$ 10	\$ 5	50%
Succión, transp. lavado	\$ 120	\$ 60	50%
Total	\$ 129	\$ 65	50%
<b>Totales por m<sup>3</sup></b>	<b>\$ 992</b>	<b>\$ 659</b>	<b>66%</b>

Fuente. Elaboración propia

## 12. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La eliminación de los residuos orgánicos en las aguas residuales industriales de forma convencional, presenta desventaja en cuanto a costos por el uso de reactivos químicos y lo que conlleva por la operación y monitoreo de una PTAR, pero mantiene la ventaja de ser sistemas eficientes siempre y cuando su diseño y modelación sean los adecuados para el tipo de agua a tratar.

En cumplimiento de los ODS, existe la oportunidad de implementar un tratamiento biológico en aguas residuales no domésticas, a través del uso de inmovilizados. En un tiempo no mayor a 30 días, en este caso específico, se obtuvo un efecto descontaminante dando como resultado el cumplimiento a la normatividad en cuando a los niveles permitidos de DQO para su vertimiento en el alcantarillado y/o afluentes de agua. Es prometedor para la remoción de la DQO, sin embargo no se ha podido tener más información sobre los otros contaminantes que podrían estar asociados a esta contaminación.

La regulación instaurada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia, que, además, a través de la promulgación de la Resolución 1207 de 2014, favorece el reúso de las aguas residuales tratadas en diferentes aplicaciones, trae beneficios para el desarrollo sostenible en las empresas que requieren tener una PTAR, ya que, a través de esta nueva biotecnología, pueden contribuir a un proceso de recirculación y reúso del agua, disminuyendo así la presión sobre los ecosistemas. Adicionalmente, se estarían incorporando a la economía circular como modelo de negocio, dentro los sistemas de producción y consumo a través de la optimización y reciclaje del agua, en concordancia con la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS, 2018).

En el proceso fisicoquímico normal que se realiza en la PTAR objeto del tratamiento con inmovilizados, los vertimientos al final de todo el proceso muestran valores de máximo 500 ppm en DQO, teniendo como referencia una lectura inicial de 15.000 ppm y considerando que lo exigido por la norma de acuerdo al tipo de actividad que realiza es de 900 ppm. El final de la segunda prueba con los inmovilizados arrojó un valor de DQO de 798 ppm con un porcentaje de remoción del 95%, teniendo en cuenta el no uso de los fisicoquímicos convencionales que se utilizan comúnmente en la PTAR seleccionada para el estudio durante todo el tratamiento, es decir,

que el efecto de remoción de la DQO fue causado únicamente por acción de los inmovilizados sin ningún aditamento durante el tiempo que se mantuvieron en el tanque de coagulación y floculación.

El uso de cal siempre será necesaria para neutralizar el pH del agua a tratar y crear las condiciones ambientales que requieren los inmovilizados para su acción depuradora, así como el uso de cloro en el tanque de desinfección para la eliminación de patógenos. El grado de clarificación final del agua tratada también requiere del paso de sistema de filtros que hacen parte de la PTAR.

El uso de microorganismos inmovilizados, es un sistema válido para el desarrollo e investigación de nuevos tratamientos de aguas residuales, con un impacto ambiental negativo mínimo, menos costos de inversión y menor complejidad de uso.

En cuanto a los costos estimados del tratamiento con inmovilizados frente al tratamiento convencional, a mismo volumen de agua tratada, el sobre costo de productos químicos estaría por encima un 6%. Sin embargo, el trabajo del operario de la PTAR se reduciría, disminuyendo los costos del operario en un 50% y en igual porcentaje se reduciría el servicio de recolección y disposición de lodos, por consiguiente, los costos mensuales decrecerían a favor de la empresa dueña de la PTAR quien es la que finalmente asume el valor del servicio.

### **12.1. Limitantes del tratamiento con inmovilizados**

Se requiere de un tiempo de adaptación de los microorganismos de aproximadamente 20 días a un mes, tiempo durante el cual se realiza un seguimiento para determinar las modificaciones necesarias y que el sistema opere eficientemente, lo que significa que cada PTAR requiere de un tratamiento específico. En las pruebas realizadas en esta investigación, fue necesario subir el pH para una mayor formación de floc y cambiar el sitio de disposición de los inmovilizados en la segunda prueba, para que el tratamiento mejorara el nivel de remoción.

Físicamente, el agua presentó un sistema de coagulación y floculación buena, aunque falta hacer más precipitación y a su vez, mayor clarificación del agua al final del tratamiento, para lo cual fue necesario el paso por la etapa de filtración de la PTAR, pasando por las cuatro unidades filtrantes con 350 kg de material filtrante cada uno, y llegar al grado de transparencia que se reflejó

en la muestra de agua tomada una vez culminado el tratamiento con los inmobilizados. No obstante lo anterior, se constató que la entrada de agua tenía una medida de turbidez de 85 NTU<sup>6</sup> antes del tratamiento y bajó a un 45 NTU después del tratamiento antes de pasar al sistema de filtración de la PTAR. Frente al nivel de turbidez del agua con el tratamiento convencional que es de aproximadamente 56 NTU, sí se logró una mejoría de alrededor de un 25% con el uso de inmobilizados

### 13. CONCLUSIONES

El uso de los inmobilizados garantiza la disminución de la DQO en el tratamiento de aguas residuales no domésticas, llegando en el caso de estudio por debajo de los límites permisibles de vertimiento de la norma. Lo anterior se puede afirmar, al comprobar los resultados de vertimiento de la PTAR objeto de estudio que después del tratamiento en la segunda prueba, se logró determinar que los valores indicados entre 700 y 750 ppm de DQO quedaron por debajo del límite establecido por la norma que es de 900 ppm, lo que cumpliría con lo expuesto en la Resolución 631 de 2015 para este parámetro específico.

En la PTAR seleccionada se identificaron niveles de DQO de entrada iguales o superiores a las 15.000 ppm, siendo apta para poder intervenir con la aplicación del método sugerido con inmobilizados, teniendo en cuenta que el límite permitido por norma de DQO de salida para dicha planta es de 900 ppm.

De acuerdo a la necesidad de remoción de DQO de la PTAR a intervenir y teniendo en cuenta el volumen del tanque donde se ubicaron los inmobilizados, fue posible determinar la elaboración de 10 kilos de inmobilizados, que para el caso de estudio fue de un kilo por metro cúbico de agua, con un volumen de 10 m<sup>3</sup>.

Se consiguió la aplicación de los inmobilizados en la fase primaria de la PTAR objeto de estudio, verificando la efectividad de remoción de la DQO, con alcance de un porcentaje de eficiencia mayor al 90% de la acción depuradora de los inmobilizados sobre la DQO, hecho que indica la alta eficiencia del producto en la remoción de DQO sobre este tipo de aguas residuales.

---

<sup>6</sup> NTU: Nephelometric Turbidity Unit (unidad nefelométrica de turbidez)

Respecto a la definición de costos, se puede afirmar que además de la reducción de costos en cuanto al uso de algunos insumos químicos en la PTAR, su operación y monitoreo, con la aplicación de inmovilizados como tratamiento biológico, se podría llegar a disminuir el consumo de agua desde la red de acueducto y por consiguiente disminuiría la facturación por consumo de agua, debido a la oportunidad de reúso.

El uso de los inmovilizados como tratamiento biológico en una PTAR como la seleccionada objeto de estudio, contribuye al cumplimiento de las metas instituidas en los ODS específicamente al Objetivo 6 – Agua limpia y saneamiento y a la regulación reglamentaria de vertimientos instaurada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en Colombia.

### **13.1. Recomendaciones**

Teniendo en cuenta que este sistema logró un 95% de eficiencia sobre la DQO, se requiere de más investigación para poder saber cómo se comporta este arreglo en otras PTAR con otras condiciones de contaminación. La meta es de poder cumplir con los valores mínimos permitidos por las normas y obtener un tratamiento biológico más eficiente, en los demás tipos de agua residual industrial de las distintas actividades económicas que menciona la Resolución 631 de 2015 y para todos los contaminantes cobijados por esta norma, no únicamente la DQO.

Para posteriores investigaciones de tratamiento de aguas residuales con el uso de inmovilizados, se recomienda hacer mediciones puntuales en cuanto a su actuación en los demás parámetros de medición que dicta la norma, distintos al de la DQO que se trató en esta investigación, así como en el grado de turbiedad final y su efecto en lodos.

Así mismo sería necesario hacer las mediciones correspondientes al resultado final del agua tratada con inmovilizados para su posterior reúso o recirculación en acciones relacionadas al tipo de actividad que desarrolle la empresa propietaria de la PTAR a intervenir.

### **13.2. Comentarios adicionales**

Con la adopción de este método con inmovilizados en el tratamiento de aguas residuales no domésticas, se incursiona en el uso de un tratamiento innovador de biotecnología que podría prestarse para la reutilización de aguas residuales, incorporándose a la economía circular como

modelo de negocio, dentro los sistemas de producción y consumo a través de la optimización y reciclaje del agua, en concordancia con la Estrategia Nacional de Economía Circular (MADS, 2018), permitiendo el reúso del agua tratada para actividades como riego, uso en sanitarios y limpieza en áreas comunes.

El uso de este tipo de tratamiento biológico con inmovilizados, ayuda a promover tanto en los proveedores de operación de PTAR como en las empresas que las requieren, la implementación de buenas prácticas para el manejo del agua y el reemplazo paulatino de insumos químicos convencionales con un potencial contaminante. A su vez, se contribuye en el desarrollo e investigación del uso de microorganismos para el tratamiento del agua y se puede reducir así la producción y transporte de insumos químicos.

## REFERENCIAS

- Alexander, M. (1973). *Biodegradation and Bioremediation*. Academic Press.
- Amy, G., & al, e. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales. Principios, modelación y diseño*. London, UK: IWA Publishing.
- Banco Mundial. (2019). *Agua*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>
- Cassidy, M., Lee, H., & Trevors, J. (1996). *Environmental applications of immobilized microbial cells, a review*. Obtenido de Journal of Industrial Microbiology: [https://watermark.silverchair.com/jimb0079.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW\\_Ercy7Dm3ZL\\_9Cf3qfKAc485ysgAAApowggKWBgkqhkiG9w0BBwagggKHMIIcGwI BADCCAnwGCSqGSIb3DQEHATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMgdFRFDpEUH1J5 CutAgEQgIICTQS4GRcLQtg8DIH3qsZhU6PodTiESDVSVAUA9jVRs\\_5JKq](https://watermark.silverchair.com/jimb0079.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kkhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAApowggKWBgkqhkiG9w0BBwagggKHMIIcGwI BADCCAnwGCSqGSIb3DQEHATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMgdFRFDpEUH1J5 CutAgEQgIICTQS4GRcLQtg8DIH3qsZhU6PodTiESDVSVAUA9jVRs_5JKq)
- Congreso de la República. (2009). *Ley 1333: Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de Funcion Pública: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=36879>
- Corporación Financiera Internacional. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad. Agua y saneamiento*. Obtenido de Grupo del Banco Mundial: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/fd7679d2-a349-4090-9af1-00c17eb5139d/0000199659ESes%2BWater%2Band%2BSanitation%2Brev%2Bcc.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jkD21kJ>
- de Bashan, L., & Bashan, Y. (2004). *Bacterias promotoras de crecimiento en plantas y microalgas verdes: un modelo conveniente para el estudio básico de las interacciones planta-bacteria*. Obtenido de Bashan Foundation: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/capitulo2bashan.pdf>
- de Bashan, L., & Bashan, Y. (2008). Joint immobilization of plant growth-promoting bacteria and green microalgae in alginate beads as an experimental model for studying plant-bacterium interactions. *Appl Environ Microbiol*, 74: 6797-6802.

- de Bashan, L., Bashan, Y., Hernández, J., & Morey, T. (2004). Microalgae growth-promoting bacteria as "helpers" for microalgae: A novel approach for removing ammonium and phosphorus from municipal wastewater. *Water Research* 38, 466-474.
- Diccionario de neologismos del español actual. (s/f). Obtenido de <https://www.um.es/neologismos/index.php/v/neologismo/830/biorremediacion>.
- Dominique, V., Murali, S., & Nisha, M. (2009). Phytoremediation efficiency of three micro algae *Chlorella vulgaris*, *Symnechocytis salina* and *Gloeocapsa gelatinosa*. *SB Adademic Review*. 138-146.
- Duque, J. (2010). *Biotecnología. Panorámica de un sector*. La Coruña, España: Netbiblo.
- Fernández S., J. (2014). Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas. *Interacción de las microalgas con la luz*. Universidad de Almería, España.
- González, L., & Bashan, Y. (2000). Increased growth of the microalga *Chlorella vulgaris* when co-immobilized and cocultured in alginate beads with the plant growth promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66: 1527-1531.
- Hernández C., S. (2011). *Inmovilización de microorganismos en esferas de alginato como protección contra condiciones adversas en un tratamiento de agua residual*. Obtenido de [https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/223/1/hernandez\\_s.pdf](https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/223/1/hernandez_s.pdf)
- Hernández S., J. (2004). Evaluación de un sistema de microalgas y bacterias para la eliminación de nutrientes de las aguas residuales domésticas. *Instituto Politécnico Nacional*. La Paz B.C.S. , México.
- Hernández S., R., Fernández C., C., & Baptista L., M. d. (2014). *Metodología de la Investigación -Sexta Edición*. México: McGraw Hill.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP6.pdf>

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua - ENA*. Obtenido de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA\\_2014.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf)

IDEAM. (2020). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*. Obtenido de Estudio Nacional del Agua: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019252/ESTUDIONACIONALDELAGUA.pdf>

Lenntech. (s.f.). *Glosario del agua*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/glosario-agua.htm>

López del P., S., & Martín C., S. (2017). Indicadores químicos - DQO. En *Depuración de aguas residuales* (págs. 36-37). España: Editorial Elearning S.L.

MADS. (2010). *Gestión del recurso hídrico - Calidad del agua*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad>

MADS. (2014). Resolución 1207. *Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas*. Bogotá, Colombia.

MADS. (2015). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Resolución 631 del 17 de marzo de 2015*. Colombia.

MADS. (2015). *Vertimientos y reuso de aguas residuales*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales>

MADS. (2018). *Estrategia Nacional de Economía Circular*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/estrategia-nacional-de-economia-circular-ec>.

MADS. (2019). *Estudio Nacional del Agua*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: [http://www.andi.com.co/Uploads/ENA\\_2018-comprimido.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf)

- Manahan, S. E. (2007). Tratamiento de aguas residuales. En *Introducción a la Química Ambiental* (págs. 209-215). México: Editorial Reverté S.A.
- Martínez T., M., & García R., M. (2012). Revisión: Aplicaciones ambientales de microorganismos inmovilizados. *Revista mexicana de ingeniería química*, Vol 11 N° 1.
- MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Obtenido de Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: [https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentacion%20Pol%20Nacional\\_Gestion%20Integral/libro\\_pol\\_nal\\_rec\\_hidrico.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Presentacion%20Pol%20Nacional_Gestion%20Integral/libro_pol_nal_rec_hidrico.pdf)
- Merchán B., A. (2018). *Recuperación de suelo degradado mediante microorganismos inmovilizados, aplicados en agua residual industrial y materia orgánica en descomposición*. INBIBO, Universidad El Bosque. Bogotá.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2011). *Situación actual y tendencia en la producción tratamiento y uso de aguas residuales y potencialidad de reuso agrícola*. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural: [https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/356/mod\\_page/content/128/Colombia\\_Informe%20Nacional.pdf](https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/356/mod_page/content/128/Colombia_Informe%20Nacional.pdf)
- Mishra, S., Jyot, J., Kuhad, R., & y Lal, B. (2001). Evaluation of inoculum addition to stimulate in situ bioremediation of oily-sludge-contaminated soil. *Applied and Environmental Microbiology* 67, 1675-1681.
- MVCT. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de agua potable y saneamiento básico - RAS. Sección II, Título E, Tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio: [https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710\\_ras\\_titulo\\_e\\_.pdf](https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/010710_ras_titulo_e_.pdf)
- Nair, I., Jayachandran, K., & Shashidhar, S. (2007). Treatment of paper factory effluent using a phenol degrading *Alcaligenes* sp. under free and immobilized conditions. *Bioresource Technology*, 98, 714-716.

- OCDE. (2019). *Informe anual sobre las directrices de la OCDE para empresas multinacionales*.  
Obtenido de Organización para la Economía, Cooperación y Desarrollo:  
<http://mneguidelines.oecd.org/annualreportsontheguidelines.htm>
- Oilfield Glossary. (s.f.). Obtenido de <https://glossary.oilfield.slb.com/es/>
- OMS. (2002). *Curso Internacional: Gestión integral de tratamiento de aguas residuales*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud - OMS.
- OMS. (2006). Organización Mundial de la Salud. *Guías para la calidad del agua potable*.
- OMS. (2018). *Archivos de países para el ODS 6.3.1 "Proporción de aguas residuales de forma segura"*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud:  
[https://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/monitoring/coverage/wastewater-country-files/en/](https://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/coverage/wastewater-country-files/en/)
- OMS. (2019). *Guías para el saneamiento y la salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/330097/9789243514703-spa.pdf>
- ONU. (2005). *El agua en la economía verde. Oportunidades y actuaciones en la industria, las ciudades, la agricultura y las cuecas hidrográficas*. Obtenido de Oficina de Naciones Unidas de Apoyo a la Década del Agua: Agua para la Vida 2005-2015:  
[https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green\\_economy\\_2011/pdf/alternativas\\_agua\\_econ\\_verde.pdf](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy_2011/pdf/alternativas_agua_econ_verde.pdf)
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible. Agua limpia y saneamiento*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas:  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- ONU. (2017). *Las aguas residuales también pueden ser herramientas para el desarrollo sostenible*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas:  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2017/03/las-aguas-residuales-tambien-pueden-ser-herramientas-para-el-desarrollo-sostenible/>

- ONU-DAES. (2014). *Agua y economía verde*. Obtenido de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas:  
[https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green\\_economy.shtml](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/green_economy.shtml)
- ONU-DAES. (2014). *Calidad del agua*. Obtenido de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas:  
<https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- OPS. (2000). *La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible*. Obtenido de Organización Panamericana de la Salud. Publicación científica N° 572:  
<https://www1.paho.org/hq/dmdocuments/salud-ambiente-desarrollo-sostenible2000.pdf>
- Oswald, W., & Gotaas, H. (1957). Photosynthesis in sewage treatment. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, 122: 73-105.
- PNUD. (2018). *El sector privado y su contribución a los ODS: un viaje hacia la recolección de datos mediante el reporte de sostenibilidad empresarial en Colombia*. Obtenido de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - Colombia:  
<https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/presscenter/articles/2018/10/170/mencion-del-impacto--datos-del-sector-privado-para-alcanzar-los.html>
- Reynolds, K. (septiembre / octubre de 2002). *Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica*. Obtenido de Agua Latinoamérica:  
[https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28\\_10-47-47111042.pdf](https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-09-28_10-47-47111042.pdf)
- SIC. (2014). *Boletín Tecnológico tratamiento de aguas residuales - Banco de Patentes*. Obtenido de Superintendencia de Industria y Comercio:  
[http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines\\_Tecnologicos/Boletin\\_Tratamiento\\_aguas\\_20140624.pdf](http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_Tratamiento_aguas_20140624.pdf)
- SSPD. (2017). *Calidad del Agua. Dianóstico Nacional*. Obtenido de Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios:  
[https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/ebook\\_calidad\\_de\\_agua-26-12-2017-vbibiana1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/ebook_calidad_de_agua-26-12-2017-vbibiana1.pdf)

- SSPD. (2020). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2019*. Obtenido de Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/estudio\\_sectorial\\_de\\_los\\_servicios\\_publicos\\_domiciliarios\\_de\\_acueducto\\_y\\_alcantarillado\\_28\\_dic\\_rev\\_1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/estudio_sectorial_de_los_servicios_publicos_domiciliarios_de_acueducto_y_alcantarillado_28_dic_rev_1.pdf)
- Tam, N., & Wong, Y. (Noviembre de 2000). Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmetal Pollution*, 110(2), 195-205.
- UN WATER. (2019). *No dejar a nadie atrás*. Obtenido de Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>
- UNESCO. (2017). *Aguas residuales. El recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: [https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef\\_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach\\_import\\_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F\\_%3D247647spa.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/p](https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/p)
- UNESCO. (2018). *Seguridad hídrica*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Cultura, las Ciencias y la Educación: <https://en.unesco.org/themes/water-security>
- UN-WATER. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidad para la Educación, la Ciencia y la Cultura: [https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef\\_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach\\_import\\_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F\\_%3D247647spa.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/p](https://unesdoc.unesco.org/in/documentViewer.xhtml?v=2.1.196&id=p::usmarcdef_0000247647&file=/in/rest/annotationSVC/DownloadWatermarkedAttachment/attach_import_1d789121-19f2-41a2-95eb-d848cdf39fd0%3F_%3D247647spa.pdf&locale=es&multi=true&ark=/ark:/48223/p)
- UN-WATER. (2018). *Progresos en el tratamiento de las aguas residuales*. Obtenido de <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/275972/9789243514895-spa.pdf?ua=1>

UNW-DPAC. (2015). *Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas:  
[https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/waterandsustainabledevelopment2015/pdf/04%20risk\\_water\\_quality\\_esp\\_web.pdf](https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/waterandsustainabledevelopment2015/pdf/04%20risk_water_quality_esp_web.pdf)

## ANEXOS

### ANEXO 1 – USO DE MICROORGANISMOS EN LA PTAR DE UN CENTRO COMERCIAL

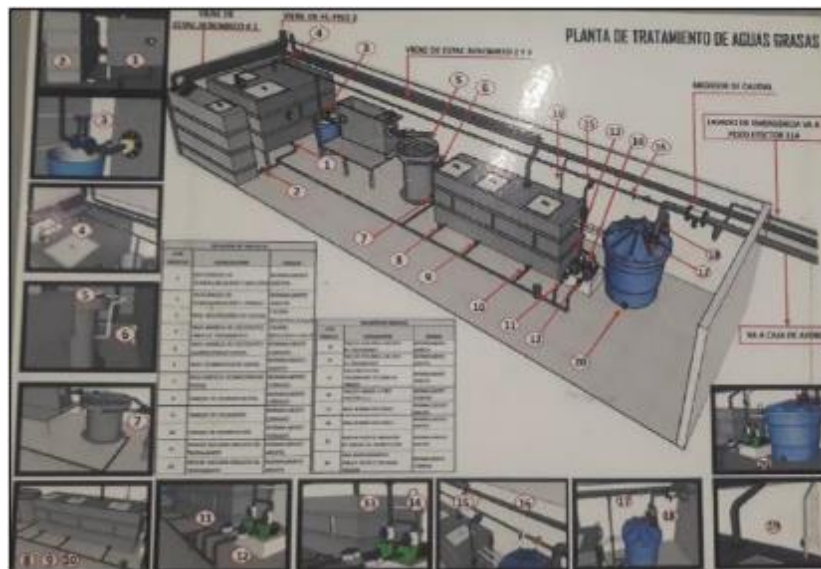
#### Diagnóstico y tratamiento

En el presente estudio se tomó una muestra de agua de la planta de tratamiento de retención de grasas (PTAG) del Centro Comercial Parque La Colina en Bogotá (Figura 1.), específicamente del tanque recolector de agua tratada (Figura 2.), dicha muestra fue analizada y tratada en el Laboratorio de Investigaciones de Biología (INBIBO), Universidad El Bosque, en Bogotá.

**Figura 1.** Muestra tomada de la Planta de Tratamiento de Aguas Grasas (PTAG), centro comercial Parque La Colina. Se puede apreciar la turbidez de la muestra, en su composición organoléptica se apreció un olor fuerte, tipo alcalino, común en aguas con alto contenido orgánico.



**Figura 2.** Esquema Planta de Tratamiento de Aguas Grasas (PTAG) del centro comercial La Colina, Bogotá, Colombia, la toma de muestra fue realizada en el tanque recolector, numeral 20.



**Fuente.** Fotografía investigadores

Se realizó el diagnóstico de los parámetros fisicoquímicos (Tabla 2.) que se encuentran en la muestra que, de acuerdo con el área de Operaciones del centro comercial, es vertida al alcantarillado público de la ciudad de Bogotá. Los análisis aplicados generaron los valores iniciales de los parámetros fisicoquímicos de los vertimientos, posteriormente se determinaron los protocolos conducentes (concentración de bacterias y microalgas) para la depuración de las aguas a tratar.

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos evaluados en el análisis del agua proveniente de la PTAG, Centro comercial La Colina

PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )
Amonio (NH <sub>4</sub> )
Calcio (Ca <sup>+2</sup> )
Demanda Química de Oxígeno (DQO)
Fósforo Total (P)
Fósforo Inorgánico (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Fósforo Orgánico (PO <sub>4</sub> ) (Ortofosfatos)
Hierro (Fe)
Magnesio (Mg <sup>+2</sup> )
Nitritos (NO <sub>2</sub> - N)
Nitrito de Sodio (NaNO <sub>2</sub> )
Nitrógeno Amoniacal (NH <sub>3</sub> - N)
Oxígeno Disuelto (DO)
pH
Potasio Total (K <sup>+</sup> )
Óxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)

**Fuente.** Elaboración propia

En la determinación del sistema de inmovilizado más eficiente para la depuración del agua contaminada y la concentración adecuada de microorganismos, se inició un estudio comparativo para la eliminación de los componentes en un tiempo de 20 días de tratamiento, utilizando 3 sistemas de inmovilizado diferentes comparados con un grupo control.

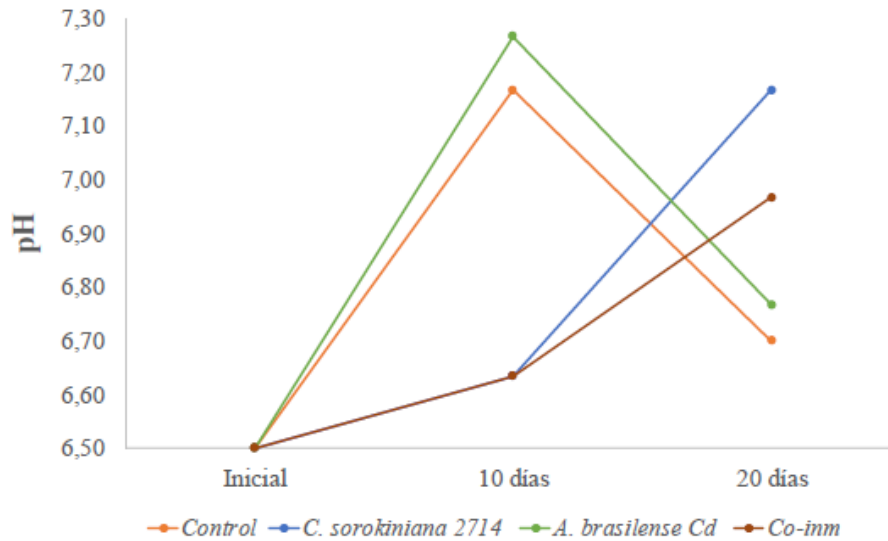
- Sistema control: Alginato sin microorganismos
- Sistema microalga: *Chlorella sorokiniana*
- Sistema bacteria: *Azospirillum brasilense*
- Sistema coinmovilizado: Microalga + bacteria

## Resultados

Se establecieron las concentraciones de parámetros fisicoquímicos en partes por millón (ppm) en la muestra inicial y después de la aplicación de los sistemas de tratamiento a los 10 y 20 días.

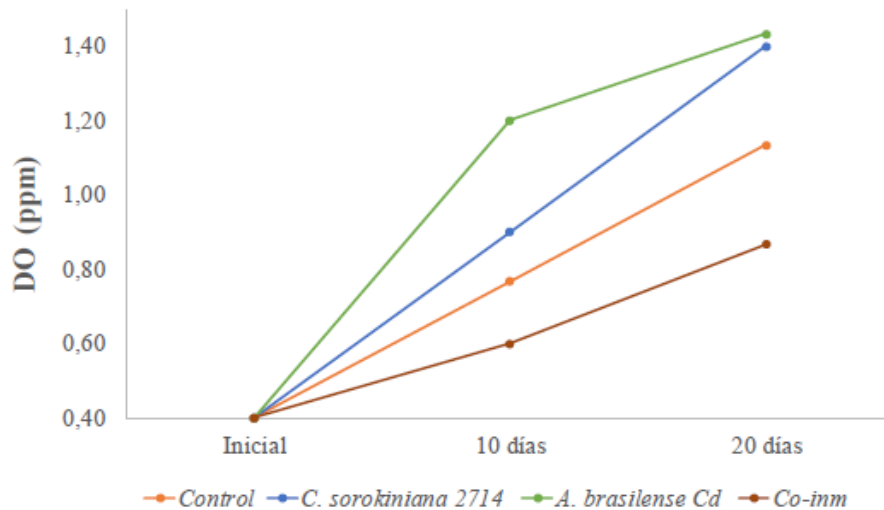
### Parámetros generales

#### pH



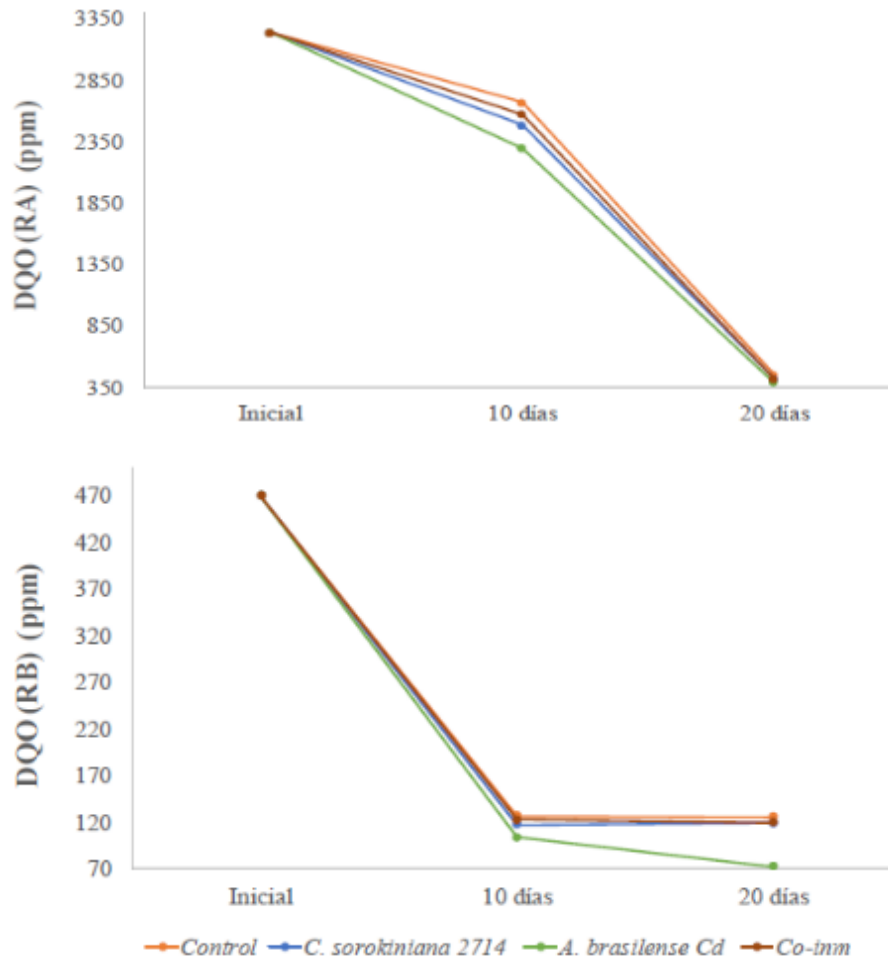
En la prueba inicial de la muestra se evidencia un pH con tendencia a la acidez, debido a los elementos contaminantes que se encuentran en el agua residual, con el paso del tiempo los valores tienden a la neutralidad por efecto de la liberación de amonio al medio, este comportamiento ocurrió con todos los sistemas analizados, manteniendo las condiciones dentro de los límites máximos permisibles 6,00 a 9,00 como indica la resolución.

#### Oxígeno disuelto



El oxígeno disponible en la muestra inicial fue de 0,40 ppm este valor se encuentra considerablemente por debajo del mínimo requerido en cuerpos de agua (5 ppm) para la estabilidad de los organismos vivos, después de la aplicación de los tratamientos estos valores aumentan al utilizar todos los sistemas, los valores máximos alcanzados al finalizar los 20 días fueron 1,43 ppm con el sistema de bacteria y 1,40 ppm con el sistema de microalga, lo que demuestra la efectividad de los tratamientos no solo en la disminución de iones, sino en el aumento de la concentración de oxígeno disponible con el paso del tiempo.

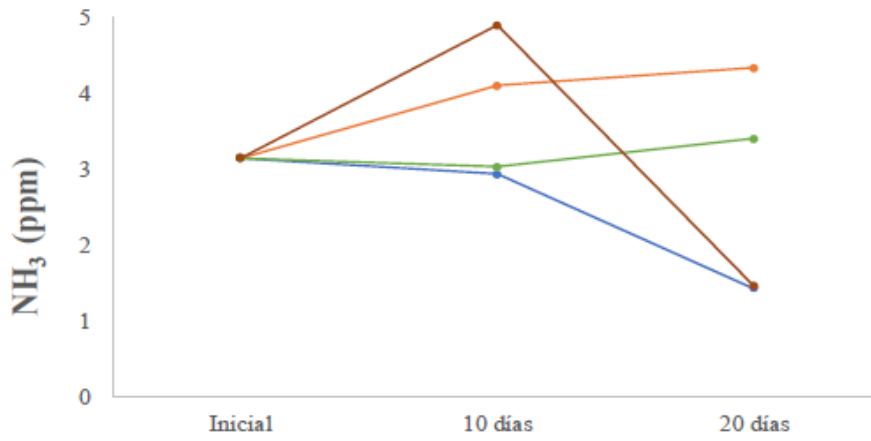
### Demanda Química de Oxígeno (DQO)



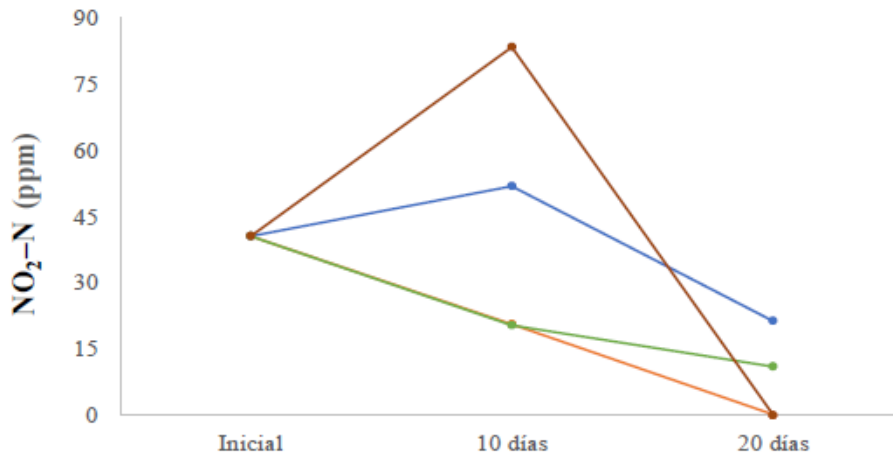
La DQO corresponde a las cargas de materia orgánica en la muestra, que en altas concentraciones afectan la estabilidad de los cuerpos de agua, en este caso la muestra analizada indica unos niveles considerablemente altos de materia orgánica con 3241 ppm en la prueba inicial, cifra superior a lo permitido en la resolución que indica el límite máximo en 150 ppm; después de la aplicación de los tratamientos las concentraciones disminuyeron por debajo del límite permisible hasta 72,33 ppm con el sistema de bacteria.

## Compuestos nitrogenados

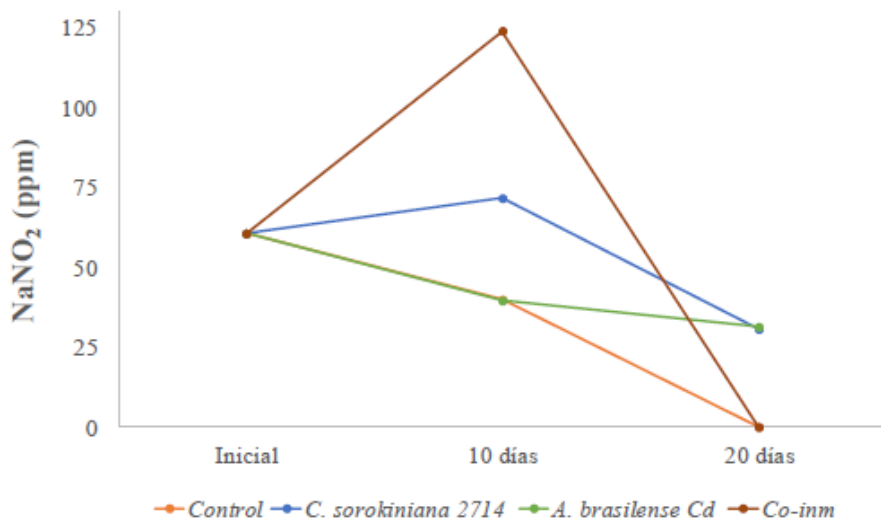
### Nitrógeno amoniacal



### Nitritos



### Nitrato de Sodio

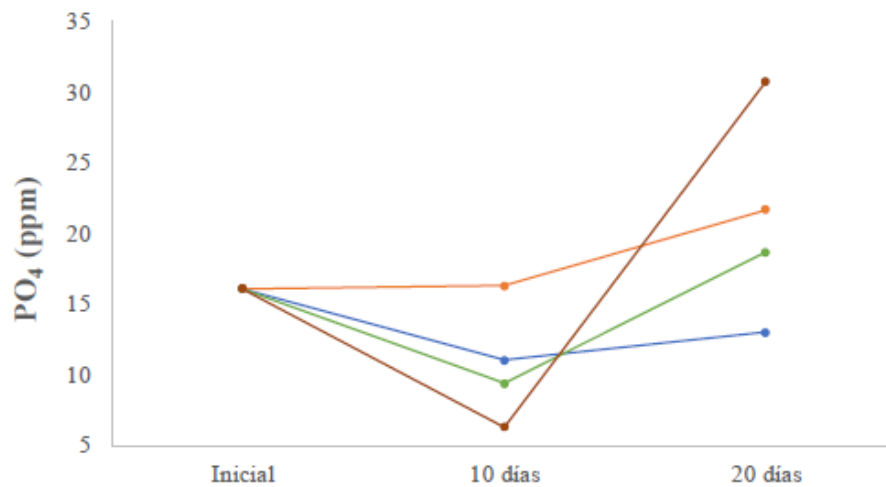


Los resultados obtenidos en los compuestos Nitrogenados demuestran una disminución en las concentraciones con todos los sistemas de inmovilizado, en el Nitrógeno amoniacal la disminución fue mejor con el sistema de microalga (3,1 ppm a 1,4 ppm). La concentración inicial de nitritos disminuyó de 40,67 ppm a 0 ppm con el coimmobilizado, mientras que el nitrito de Sodio pasó de 60,67 ppm a 0 ppm igualmente con el sistema de coimmobilizado.

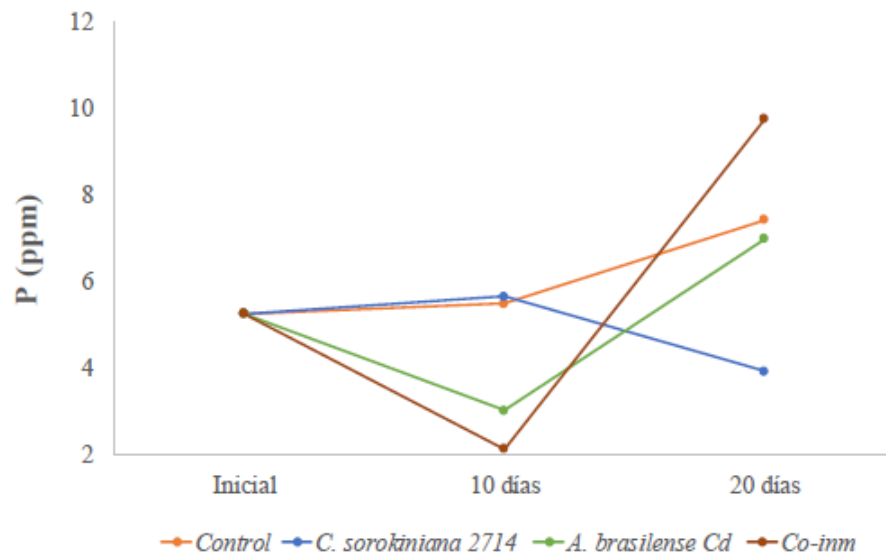
La disminución por parte del sistema control se debe a que la matriz de alginato puede captar iones, sin embargo, con el tiempo la disminución se reduce ya que no cuenta con microorganismos que metabolicen dichos iones.

## Compuestos de Fósforo

### Ortofosfatos



### Fósforo Total

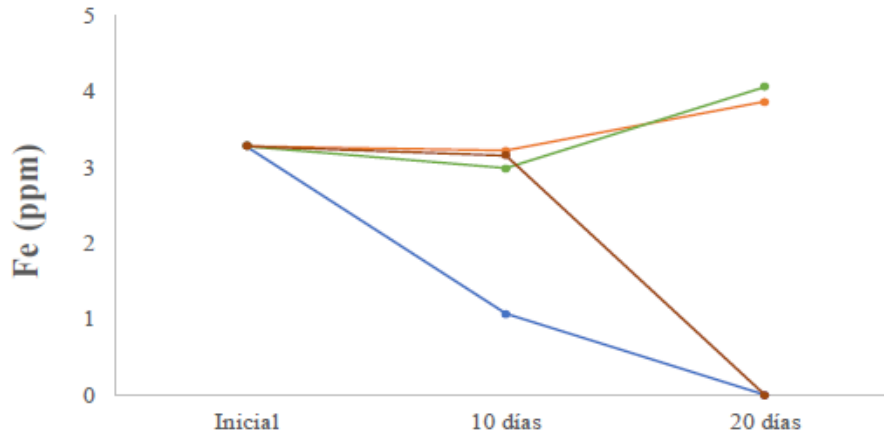


Respecto a los compuestos de Fósforo la disminución ocurrió hasta de 10 días después de la aplicación de los sistemas de tratamiento, el aumento posterior a este momento se debe a los

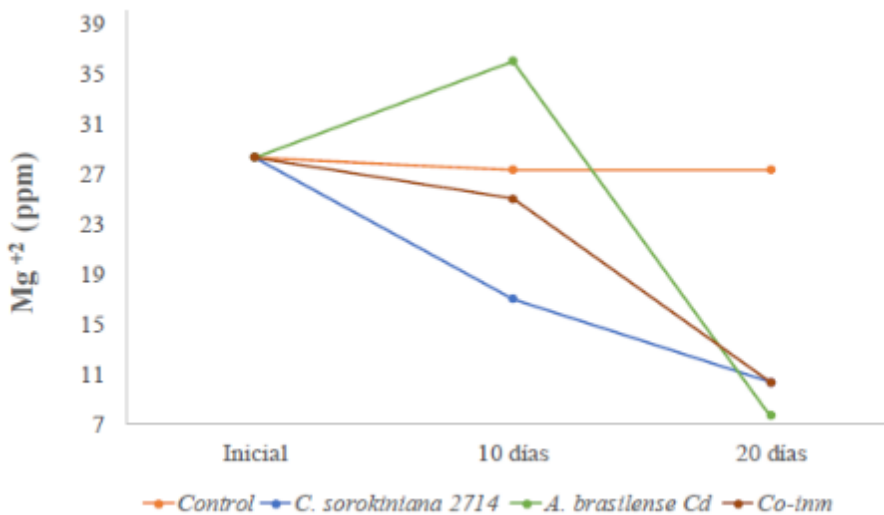
procesos de descomposición de los elementos formados por grupos fosfato de detergentes y grasas.

## Metales y metaloides

### Hierro



### Magnesio



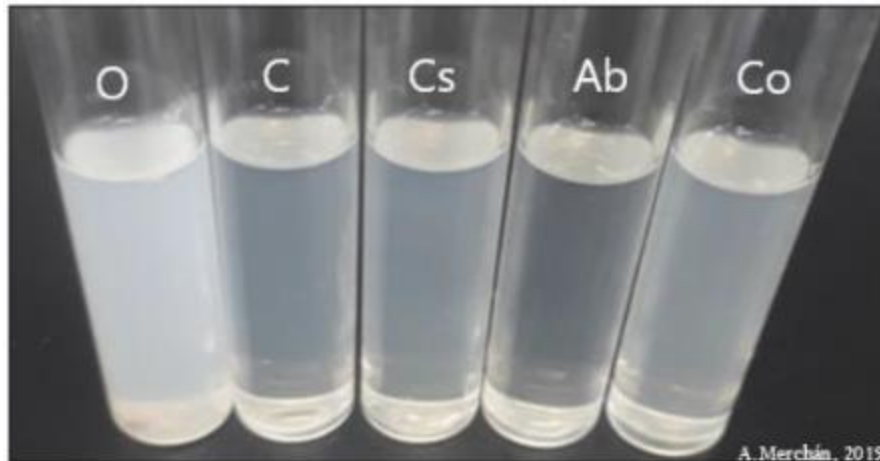
En el análisis de Hierro (Fe) se observa una disminución en las concentraciones utilizando los sistemas de microalga y coinmovilizado de 3,29 ppm a 0 ppm, esta concentración inicial supera 3 veces los valores máximos permitidos por la resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece un máximo de 1,00 ppm o mg/L de este elemento, por consiguiente el agua vertida al alcantarillado público, no cumple con lo exigido en la norma, de esta manera los sistemas mencionados disminuyen los valores incluso por debajo de lo estipulado.

En el caso del Magnesio (Mg+2) el valor inicial fue considerablemente alto alcanzando 28,33 ppm, la disminución ocurrió con todos los sistemas con microorganismos por debajo de 11 ppm, sin embargo, el mejor resultado fue obtenido con el inmovilizado de bacteria que redujo la

concentración inicial a 7,67 ppm demostrando la efectividad de los sistemas en la captación de metales en 20 días de tratamiento.

Después de la aplicación de los tratamientos en un ciclo de 20 días, se evidenciaron cambios en las características fisicoquímicas como turbidez aparente (Figura 3.) y olor que con el paso del tiempo fue menos fuerte. Se evidenció que los inmobilizados facilitaron la sedimentación del material particulado que inicialmente se observó como capas de grasas.

**Figura 3.** Muestras de agua residual, O: Original; y al finalizar el análisis de los sistemas, C: Control, Cs: *Chlorella sorokiniana*, Ab: *Azospirillum brasilense* y Co: Coinmovilizado



**Fuente.** Fotografía de Merchán (2019)

## Discusión y Conclusiones

Los resultados de esta investigación son preliminares, con el fin de demostrar la eficiencia de los microorganismos evaluados en la muestra de agua de la PTAG, los cambios en las características fisicoquímicas como olor, turbidez aparente del agua y sedimentación del material particulado, demuestran el efecto positivo de los tratamientos aplicados.

Conociendo el caudal de la PTAG del centro comercial que es de 2 litros por segundo (2 L/seg) y el tiempo de retención hidráulico que es de 2 horas, se hace necesario evaluar el comportamiento de los inmobilizados durante el tiempo de retención hidráulico, con el caudal de la planta, por lo tanto, habrá que situar un bio-reactor de bajo costo, para que los sistemas tengan el mismo efecto de saneamiento y liberación de iones contaminantes del agua proveniente de la PTAG evaluados a nivel de laboratorio.

Uno de los principales objetivos de los inmobilizados en el tratamiento de aguas residuales es la reutilización de estas en riego, sanitarios y limpieza de áreas sociales, disminuyendo el impacto ambientalmente negativo que pueden generar los procedimientos tradicionales, además con la posibilidad de disminuir el costo frente a los tratamientos convencionales de las ARnD, a su vez pueden optimizar la eficiencia de consumo de agua por parte de centro comercial, disminuyendo el costo de facturación en el servicio de agua y alcantarillado.

El uso de microorganismos en sistemas de inmobilizados, es una estrategia válida en el desarrollo de nuevos tratamientos de aguas residuales cuyo impacto negativo ambientalmente es mínimo, con menores costos de inversión, menor complejidad de uso, mayor efectividad en la captación de nutrientes y que no generan alteraciones en la composición del recurso hídrico en donde se generan los vertimientos.

Finalmente, las esferas de inmobilización después de la captación de nutrientes tienen potencial de uso para el mejoramiento del suelo, lo que a su vez genera un efecto positivo en el crecimiento de plantas, por ello es posible utilizar estas esferas como inoculante teniendo en cuenta las áreas verdes del centro comercial.

*Andrea Merchán, Bióloga egresada de la Universidad El Bosque. Estudio realizado en 2019.*