

Optimización de un sistema de tratamiento mediante ensayos de tratabilidad para la remoción de materia orgánica en aguas residuales de alta complejidad

Optimization of a treatment system through treatability tests for the removal of organic matter in high complexity wastewater

Jessica J. Salgado¹
Diana C. Rodríguez²
Gustavo A. Peñuela³

¹Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Medellín, Colombia. Email: correo

²Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Medellín, Colombia. Email: correo

³Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigaciones Universitarias (SIU), Medellín, Colombia. Email: correo

 OPEN ACCESS



Copyright:

©2022. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución no comercial SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación.

Recibido: 30-05-2020.

Revisado: 30-09-2021.

Aprobado: 05-02-2022.

Doi: 10.21500/20275846.4741

Referenciar así:

J. J. Salgado, D. C. Rodríguez y G. A. Peñuela, "Optimización de un sistema de tratamiento mediante ensayos de tratabilidad para la remoción de materia orgánica en aguas residuales de alta complejidad," *Ingenierías USBMed*, vol. 13, n.º 1, pp. 46–55, 2022.

Disponibilidad de datos:

todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses:

los autores han declarado que no hay conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.

Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. La implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales eficientes se hace indispensable para evitar el deterioro ambiental, así como el desequilibrio de los procesos biogeoquímicos y la variación en las características fisicoquímicas y microbiológicas, de modo que se minimicen los problemas de salud pública. En este sentido, se hace necesario realizar una caracterización de las aguas residuales con el fin de seleccionar el tren de tratamiento más adecuado y, de esta manera, garantizar una adecuada remoción de los contaminantes presentes en dicha agua. En el presente trabajo se realizó el seguimiento a un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas provenientes de un restaurante en el que se sirven alimentos que son previamente preparados en otras instalaciones, y el cual funciona una vez al día durante el período comprendido entre las 12:00 y las 14:00. Se encontró que dichas aguas presentan altos contenidos de detergentes, grasas y aceites, y baja cantidad de materia orgánica biodegradable; por lo cual, se realizaron ensayos de tratabilidad tanto fisicoquímicos como biológicos, con el fin de determinar la manera más eficiente de tratar estas aguas residuales y poder cumplir con la normatividad vigente en Colombia para aguas residuales procedentes de estas actividades. Los resultados permitieron definir un tren de tratamiento óptimo compuesto por una combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos de tipo aerobios para lograr una eficiencia de remoción total del 63.5% en materia orgánica.

Palabras Clave. Biodegradabilidad; Coagulación; Filtración; Floculación; Tratabilidad.

Abstract. The implementation of efficient wastewater treatment systems is essential to avoid the environment degradation, as well as the imbalance of the biogeochemical processes and the variation in the physicochemical and microbiological characteristics so that public health problems are diminished. In this sense, it is necessary to carry out a characterization of the wastewater in order to select the most suitable treatment train and, in this way, to guarantee an adequate removal of the contaminants presented in that water. In the present work, a domestic wastewater treatment system was monitored from a restaurant in which food is served, which is previously prepared in other facilities, and which works once a day from 12:00 to 14:00. These waters were found to have high contents of detergents, fats and oils, and a low amount of biodegradable organic matter. Therefore, both physicochemical and biological treatability tests were carried out in order to determine the most efficient way to treat this wastewater and to be able to comply with current regulations in Colombia for wastewater coming from these activities. The results allowed the definition of an optimal treatment train composed of a combination of aerobic physicochemical and biological processes to achieve a total removal efficiency of 63.5% in organic matter.

Keywords. Biodegradability; Coagulation; Filtration; Flocculation; Treatability.

I. Introducción

Las aguas residuales son aquellas que provienen de una variedad de fuentes que incluyen hogares, escuelas, oficinas, hospitales e instalaciones comerciales e industriales [1]; actualmente, las enfermedades de origen hídrico y en especial aquellas asociadas a las aguas residuales han sido objeto de interés público debido a la problemática social que conlleva la mala disposición de estas [2] y en especial en las zonas rurales, donde el poco conocimiento y los problemas de saneamiento potencian los peligros que trae consigo arrojar un agua residual de origen doméstico sin ningún tipo de tratamiento a un cuerpo de agua, haciendo la población fácilmente vulnerable a brotes de enfermedades de origen hídrico como las diarreas, o por cualquier bacteria, parásito, protozoo, etc. [3], que se encuentran comúnmente en las aguas residuales, además del daño que le hacen al ecosistema del cuerpo de agua, alterando la flora y fauna de este [4]. Por estos motivos, las aguas residuales antes de su descarga a los cursos y cuerpos receptores deben recibir algún tipo de tratamiento que modifique sus condiciones iniciales [5].

En el tratamiento de las aguas residuales, se emplean una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos que tienen como objetivo disminuir la carga contaminante, minimizando los riesgos tanto para el medio ambiente como para las poblaciones cercanas a las fuentes de agua [6], además de cumplir con los límites legales existentes. Es por esto, que la selección del sistema de tratamiento depende de la naturaleza del agua residual a tratar, del uso al cual se le destinará al efluente final [7], la compatibilidad y eficiencias de las distintas operaciones y procesos, los medios disponibles de evacuación de los contaminantes finales y la posibilidad económica de las distintas combinaciones [5].

Para el caso de los tratamientos fisicoquímicos, usualmente se emplean ensayos de tratabilidad, los cuales son llevados a cabo en el laboratorio o a escala piloto, y que permiten establecer conocer en detalle la naturaleza de las aguas residuales y así mismo, definir los procesos y operaciones adecuados para el tratamiento del agua [8], así como la estandarización de dosis o tiempos óptimos en diferentes procesos. El test de jarras, es considerado un ensayo de tratabilidad, el cual se basa en evaluar el proceso de coagulación, floculación y sedimentación, en donde en la fase de coagulación se desestabilizan las partículas coloidales al romper las fuerzas repulsivas debido a la presencia de cargas del mismo signo en la superficie de los coloides [1], por lo tanto, las partículas se combinan para formar partículas más grandes y esto se logra mediante la mezcla rápida de la solución que extiende el agente coagulante en toda la masa de agua [9]. Por su parte, la floculación es un proceso físico en el cual los sólidos coloidales desestabilizados en la coagulación se unen en partícu-

las más grandes usando bajos niveles de cizallamiento [10]. Esto puede hacerse mediante el uso de mezcladores estáticos o dinámicos [11]. Una vez que los flocs han ganado tamaño y a su vez peso, comienza la última fase de sedimentación, en la cual un tanque en reposo les permite asentarse y luego ser retirados del agua [12].

Otra alternativa de tratamiento es la filtración, la cual consiste en la remoción de partículas suspendidas y coloidales presentes en una suspensión acuosa que escurre a través de un medio poroso [13], en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas) y del medio poroso [14]. Este proceso se utiliza como tratamiento de las aguas residuales, cuando estas tiene baja cantidad de sólidos en suspensión o como proceso de pulimento posterior a la eliminación de la materia orgánica. Dentro de los medios filtrantes más utilizados, se encuentra la arena, la cual tiene buena eficiencia, es económica y no se degrada en el tiempo, sin embargo, también se han utilizado materiales como la antracita, el granate, la magnetita, el carbón activado, entre otros [15]. La filtración usualmente es considerada como el resultado de dos mecanismos distintos pero complementarios: transporte y adherencia. Inicialmente, las partículas por remover son transportadas de la suspensión a la superficie de los granos del medio filtrante. Ellas permanecen adheridas a los granos, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento [13]. De acuerdo con las investigaciones realizadas por la Agencia de Protección Ambiental [16] de los Estados Unidos, el filtro debe producir un efluente con una turbiedad menor o igual a 0.10 UNT para garantizar que esté libre de huevos de parásitos (*Giardia lamblia*, *Cryptosporidium*). Para lograr esta eficiencia en la filtración, es necesario que los decantadores produzcan un agua con 2 UNT como máximo [14].

En el presente trabajo se realizaron ensayos de tratabilidad para la remoción de materia orgánica en el agua residual doméstica de un restaurante con altos contenidos de detergente y grasas y aceites, en donde se consideraron diferentes tipos de coagulantes y tiempos en cada una de las fases y se usaron filtros como método de pulimento. También se hicieron ensayos de filtración en columnas cilíndricas de acrílico y grava y filtros percoladores como tratamiento biológico de biomasa adherida.

II. Materiales y métodos

A. Sistema de tratamiento

Los ensayos se llevaron a cabo empleando el agua residual doméstica proveniente de un restaurante ubicado cerca al corregimiento el Jordán, a 32 Km del municipio de San Carlos (Antioquia-Colombia). Las coordenadas

son 6°12'39"N 74°50'26"O, con una temperatura media de 23° a 26° C y una altura de 1000 m.s.n.m [17]. El agua residual es generada a partir del lavado de ollas, platos, agua del baño maría donde se calientan los alimentos, lavado de pisos y el uso de los baños (Figura 1). Adicionalmente, el horario de funcionamiento del restaurante coincide con la hora del almuerzo (12:00 m – 14:00 pm), por lo tanto, el flujo de aguas residuales generadas es de tipo discontinuo. El sistema de tratamiento para estas aguas residuales está compuesto por una trampa de grasas con una capacidad de 0.25 m³ y un sistema anaerobio compacto; tanque séptico + filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) de 5 m³. El sistema FAFA contiene como medio de soporte zunchos. Luego del tratamiento biológico, se lleva a cabo un proceso fisicoquímico, en el cual se añade al agua en un tanque de forma manual, soda cáustica (NaOH), Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) y un polímero floculante, sin una dosis particular, posteriormente se lleva a un tanque de sedimentación y por último a un filtro artesanal de arena. Los lodos del proceso fisicoquímico son removidos manualmente, por ser considerados ecotóxicos y se disponen como residuos peligrosos.

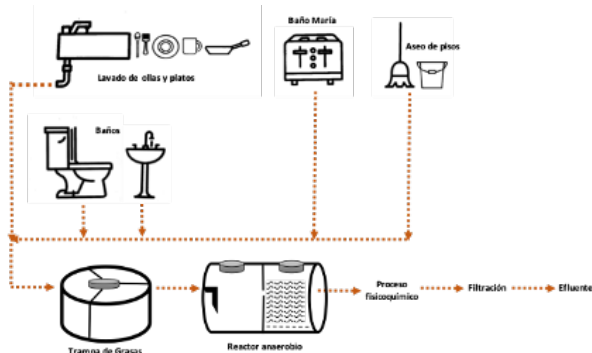


Figura 1. Esquema de la generación de las aguas residuales y el sistema de tratamiento

B. Caracterización del agua residual

Se realizó el seguimiento del agua residual generada y del sistema de tratamiento durante ocho (8) meses, tiempo en el cual se realizaron campañas de muestreo mensuales en las cuales se analizaron parámetros *in situ* y de laboratorio. Para el análisis de los parámetros *in situ* se utilizó un conductímetro WTW 3210 para medir la conductividad y un pH metro WTW pH 7110 para la lectura del pH, ambos fabricados por Xylem Group con sede principal en New York, EE.UU [18], así como un equipo multiparamétrico HQ40d fabricado por HACH, con sede principal en Bogotá, Colombia [19], para la medición del oxígeno disuelto. Adicionalmente, se analizaron los parámetros fisicoquímicos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Sólidos Totales (ST) y Volátiles (SV), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (Ssed), Alcalinidad Total (AT) y

Alcalinidad Parcial (AP), siguiendo los criterios analíticos del Estándar Métodos [20]. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio del grupo GDCON, laboratorio acreditado para el análisis de aguas por el IDEAM bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025, Resolución 1665 del 12 de julio de 2011. En la Tabla 1, se presentan las características iniciales del agua residual a tratar.

Tabla 1. Caracterización inicial del agua residual

| Parámetro | Valor |
|---|------------------|
| DQO (mg O ₂ /L) | 991.145±35.450 |
| DBO ₅ (mgO ₂ /L) | 391.500 ± 23.541 |
| ST (mg/L) | 743.00±21.99 |
| SST (mg/L) | 246.00±30.57 |
| Ssed (ml/L) | <1.00±0.54 |
| pH | 4.53±1.12 |
| Conductividad (μS/cm) | 377.00±23.03 |
| Oxígeno disuelto (mg O ₂ /L) | 1.71±0.45 |

C. Ensayos de tratabilidad

Con el fin de mejorar las eficiencias y optimizar el sistema de tratamiento tanto biológico como fisicoquímico, se realizaron análisis de tratabilidad en el laboratorio, mediante ensayos de coagulación – floculación, filtración, filtros percoladores y biodegradabilidad.

1) *Ensayos de Coagulación-Floculación*: Para los ensayos de coagulación-floculación se empleó un test de jarras digital (E&Q F6-300, fabricado por la compañía Elementos Químicos con sede principal en Bogotá, Colombia [21]), con un sistema de agitación de paletas múltiples y velocidad variable de 10 a 300 rpm. El ensayo de jarras se realizó en varios pasos de agitación siguiendo la metodología descrita por Lara et al. [22] y Ellouze et al. [23], con el fin de asegurar las fases de coagulación, floculación y sedimentación. La mezcla rápida (Coagulación) se realizó a 200 rpm durante 1 minuto, la mezcla lenta (Floculación) a 40 rpm durante 15 minutos y la sedimentación a 0 rpm durante 15 minutos.

Se evaluaron 3 coagulantes, los cuales se pueden encontrar fácilmente en el mercado y se usan ampliamente para el tratamiento fisicoquímico tanto de aguas potables como residuales; a) Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) tipo A sólido, se prepararon 2 soluciones al 10% y al 20% m/V y se evaluaron dosis desde 80 mg/L hasta 280 mg/L. b) Cloruro férrico (FeCl₃), se preparó una solución al 10% m/V de la sal y se evaluó inicialmente una concentración de 100 mg/L. c) Policloruro de aluminio (PAC) (Al₂(OH)₃Cl₃), se preparó una solución al 5% m/V, y se evaluaron dosis entre 120 mg/L y 220 mg/L. d) Polímero ayudante de floculación, se preparó una solución al 0.1% m/V y se evaluaron 3 dosis de 0.5 mg/L, 1.0 mg/L y 1.5 mg/L. Para seleccionar la dosis

más adecuada en cada test de jarras, se realizaron lecturas de turbiedad después de la fase de sedimentación del agua clarificada. A las jarras que obtuvieron mejor remoción en términos de turbiedad se les tomó muestras del agua clarificada para determinar la DQO y su porcentaje de remoción con respecto a la DQO inicial del agua residual.

2) *Ensayos de filtración:* Para la realización de estos ensayos, se utilizaron columnas de acrílico con un volumen útil de 0.003 m^3 y como material filtrante se empleó grava con un tamaño de 1.5" aproximadamente, un coeficiente de uniformidad <1.70 y una gravedad específica de 2.5. Las condiciones del ensayo fueron un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 8 horas y un caudal de 6.41 ml/min . Se tomaron muestras del afluente y efluente del filtro y se realizaron análisis de DQO, en donde se encontraron valores para afluente y efluente, respectivamente de 814.29 y $531.66 \text{ mg O}_2/\text{L}$.

3) *Ensayos con Filtro percolador:* Se empleó un filtro percolador de acrílico (Figura 2), con un diámetro de 0.07 m y una altura de 0.8 m . Como medio de soporte se empleó grava de 1.5" para permitir la adherencia de los microorganismos aerobios al medio de soporte. En este tipo de sistemas la aireación de los microorganismos se da por transferencia, por lo tanto, el proceso de alimentación de estos reactores funciona por goteo, mediante una placa perforada instalada en la parte superior y la transferencia se da mediante los orificios laterales ubicados a lo largo de la columna. Para el proceso de arranque se recirculó el agua residual durante 4 días, con una carga hidráulica de $5.61 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, empleando una bomba (Masterflex), con el fin de permitir la adherencia de los microorganismos al medio de soporte y tener una población de microorganismos propios del agua residual a tratar. Después del tiempo de arranque, se alimentaron diariamente los microorganismos con el agua residual de estudio y se realizaron mediciones diarias de DQO para evaluar la eficiencia de remoción. Se mantuvo el pH en valores del orden de 6.5 a 7.5 para permitir el adecuado funcionamiento del proceso biológico.

4) *Ensayos de biodegradabilidad:* Se llevó a cabo un ensayo de biodegradabilidad del afluente y del efluente con el fin de ofrecer criterios más acertados para decidir la pertinencia del uso de procesos fisicoquímicos o biológicos para el tratamiento del agua residual de estudio. La biodegradabilidad aerobia fue evaluada usando el procedimiento descrito por la NTC 4255:1997 mediante un ensayo estático empleando el método Zahn-Wellens, mediante botellas winkler [24]. Este ensayo se basa en la exposición del agua residual con una concentración conocida de materia orgánica, a un inóculo previamente aclimatado en medio acuoso, pH neutro y a una temperatura entre 20 y 25°C en un sistema por lotes, la concentración de la sustancia es medida mediante el análisis de la DQO en el tiempo. Para este ensayo se emplearon 5 L de agua destilada aireada previamente (hasta lograr la saturación), con una bom-

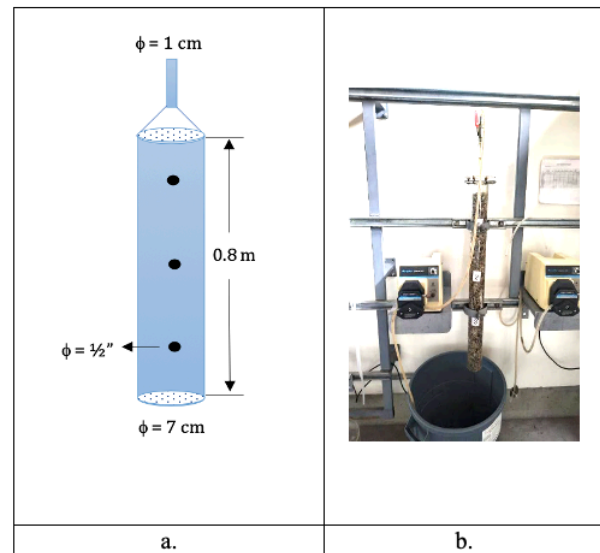


Figura 2. Filtro percolador. a) Dimensiones. b) Reactor en el laboratorio

ba aireadora con una capacidad de oxigenación 1200 cc/min y dos difusores de burbuja fina, se adicionaron 5 mL de macronutrientes, 5 mL de micronutrientes y 5 mL de microorganismos aerobios provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas. Esta agua se denominó agua de dilución. Para las muestras se prepararon balones volumétricos de 500 mL con una dilución de la muestra calculada a partir del valor de la DQO inicial, se aforó con agua de dilución y se llenaron los winkler. Para el blanco se llenó un winkler con agua de dilución. Las muestras fueron incubadas por períodos de 14 días, en cada día se destapaba una muestra para analizar la DQO y de esta manera calcular el porcentaje de biodegradabilidad, mediante la Ecuación (1):

$$\text{Porcentaje de Biodegradabilidad} = \frac{\text{DQO}_i - \text{DQO}_f}{\text{DQO}_i} \times 10^2 \quad (1)$$

Donde, DQO_i corresponde a la DQO inicial de la muestra (mg/L) y la DQO_f corresponde a la DQO de la muestra el día en que se destapa la botella (mg/L).

III. Resultados y análisis

A. Seguimiento de la planta de tratamiento

La planta de tratamiento de este restaurante funciona sólo en el horario de $12:00$ a $14:00 \text{ pm}$ ya que sirve los alimentos de los empleados de una empresa cercana. En este sitio no se realiza la preparación de alimentos, allí sólo se sirven y se lavan los implementos de cocina, por lo tanto, la generación de las aguas residuales se da como producto del lavado de ollas, platos, pisos, el agua del baño maría donde se calientan los alimentos y el baño, el cual es usado por los empleados, por lo tanto, el contenido principal de estas aguas residuales es jabones, grasas y aceites y menor proporción materia orgánica. Adicional a esto, debido al horario tan corto

de funcionamiento, el caudal de aguas residuales hacia la planta de tratamiento es de forma discontinua, lo que dificulta tener un proceso biológico, debido al metabolismo de las bacterias las cuales requieren una fuente permanente de materia orgánica.

Durante la visita inicial de diagnóstico, se observó que la trampa de grasas (Figura 3a), tenía una gran cantidad de grasas y aceites en los tres compartimentos, evidenciando la falta de mantenimiento del sistema, adicionalmente, el agua residual contenida en el tanque séptico (Figura 3b), tenía un color lechoso producto de los jabones y una pequeña capa de grasas, las cuales lograban pasar a través de la trampa con la ayuda de las altas temperaturas generadas en el agua caliente de los sistemas de baño maría, adicionalmente, no se encontró presencia de lodos anaerobios en el fondo del tanque, indicando que el sistema no está removiendo materia orgánica. En el sistema FAFA (Figura 3d), no se encontró adherencia de microorganismos, lo cual era de esperarse debido a que los zunchos tienen poca área superficial, lo que limita el crecimiento de los microorganismos en el medio de soporte, además, se encontró la formación de nata y bulking de lodos, de color blanco-rosado. La caracterización inicial arrojó una concentración de grasas y aceites en el afluente de 66.15 mg/L y de detergentes de 110.48 mg SAAM/L.



Figura 3. Sistema de tratamiento del restaurante. a) Trampa de grasas. b) Sistema anaerobio compacto (Tanque séptico + FAFA). c) Tanque séptico. d) Zunchos del FAFA. e) Lodos del proceso fisicoquímico

La Figura 4 muestra los resultados de laboratorio obtenidos en las campañas de muestreo para el sistema de tratamiento del restaurante. Esta planta de tratamiento debe cumplir con la Resolución 0631/2015 que es la resolución actual vigente en Colombia; “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” y específicamente con el Artículo 8 para aguas residuales domésticas (ARD) que tengan cargas ≤ 625 Kg/d,

según el cual, la concentración máxima permitida de DQO, DBO₅ y SST es 180 mg O₂/L, 90 mg O₂/L y 90 mg/L respectivamente. Para el caso de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Figura 4a), se evidencian valores muy elevados en el efluente del proceso (109.56 mg/L en promedio), indicando la necesidad de implementar un proceso más eficiente y destacando que el filtro que se tiene de pulimiento no es efectivo para este tipo de agua. En el caso de la DQO y la DBO₅ (Figura 4b y 4c), los resultados son iguales que los sólidos, hay concentraciones elevadas en el efluente del sistema, con valores promedios en el efluente de 974.74 mg O₂/L para la DQO y 486.31 mg O₂/L para la DBO₅, lo que implica que no hay cumplimiento de la normatividad vigente. Finalmente, en el caso del pH (Figura 4d) se encuentran pH muy ácidos tanto en el afluente como en el efluente del proceso, con una ligera tendencia a incrementarse el pH en el efluente, lo que puede ser producto de la transformación de las moléculas en el mismo proceso de tratamiento, el pH promedio del afluente fue de 4.75 y en el efluente de 4.91. Si se habla en términos de porcentaje de remoción, se encuentra que la planta de tratamiento tiene en promedio una remoción del 22.60% en ST, 51.12% en SST, 37.45% en DQO y 42.05% en DBO₅.

La Tabla 2 muestra los resultados de la relación DBO₅/DQO para el sistema de tratamiento del restaurante, la cual sirve como indicativo de la biodegradabilidad de las muestras. En este caso la biodegradabilidad se encuentra por debajo de 55%, considerándose moderadamente biodegradable, lo que implica que es necesario la combinación de procesos biológicos y fisicoquímicos o, por el contrario, sólo procesos fisicoquímicos.

Tabla 2. Resultados de DQO y DBO₅ de las muestras del sistema de tratamiento del restaurante

| Punto de muestreo | DQO (mg O ₂ /L) | DBO ₅ (mg O ₂ /L) | DBO ₅ /DQO (%) |
|-------------------|----------------------------|---|---------------------------|
| Afluente | 1353.548 ± 23.430 | 725.313 ± 32.564 | 54.0 |
| Efluente | 974.539 ± 41.453 | 486.315 ± 38.327 | 50.0 |

B. Análisis coagulación-floculación

Debido a que el agua residual del restaurante tenía un pH aproximado de 4.75, según los resultados de los muestreos realizados, y su alcalinidad total (AT) era muy baja y los coagulantes evaluados tienen mejor desempeño cuando el pH del agua está en el rango de 6.00 – 7.00, fue necesario añadir carbonato de calcio (CaCO₃) a las muestras de agua en el ensayo de test de jarras. Para determinar la cantidad de carbonato de calcio (CaCO₃) a añadir, se realizaron mediciones de alcalinidad total para cada test de jarras y se añadió la cantidad de carbonato de calcio (CaCO₃) que hiciera falta para obtener una alcalinidad total de 200 mg/L.

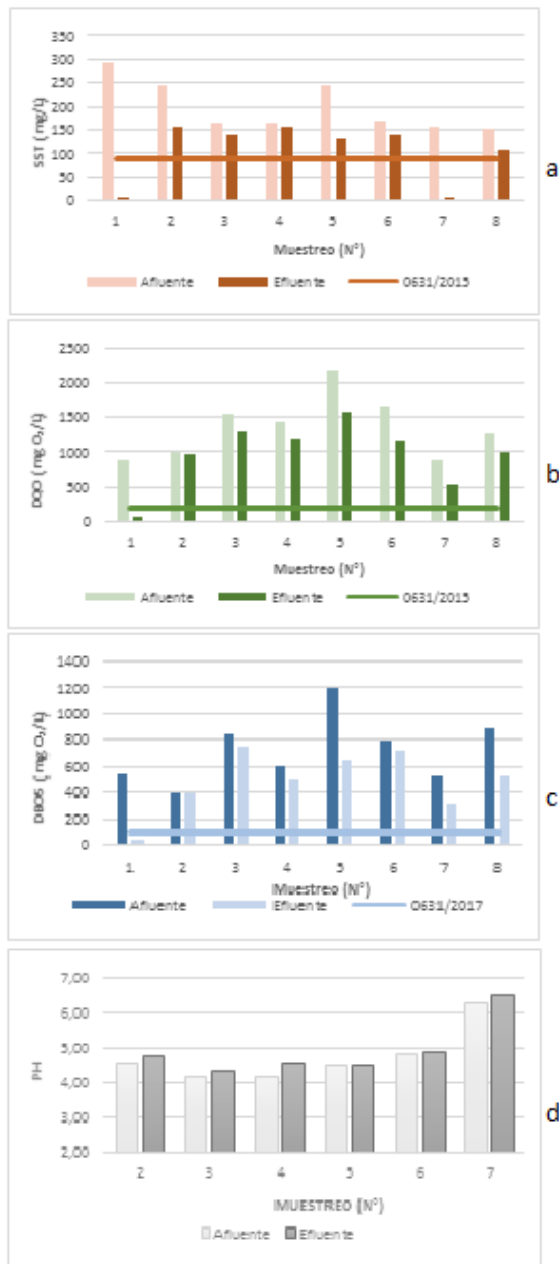


Figura 4. Cumplimiento del sistema de tratamiento del restaurante según la Resolución 0631/2015. a) SST. b) DQO. c) DBO5. d) pH

Por ejemplo, si la muestra presentaba una alcalinidad de 50 mg CaCO₃/L se debían agregar 150 mg de carbonato de calcio (CaCO₃) por litro de muestra en cada jarra. Sólo se analizaron los resultados obtenidos para los ensayos que se realizaron con Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) y con PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) como coagulante, pues no se obtuvieron buenos resultados usando sales de hierro como el cloruro férrico (Figura 5), ya que después del ensayo de test de jarras se evidenció una coloración amarilla, la cual es propia del hierro en forma disuelta.

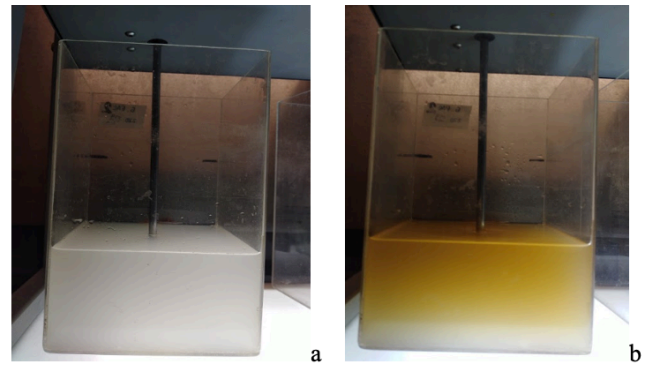


Figura 5. Ensayo de test de jarras con aplicación de Cloruro Férrico. a) Antes del ensayo. b) Después del ensayo

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos para la remoción de DQO y de turbiedad para los test de jarras que presentaron mejor desempeño. En cuanto a los resultados con Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) (N° 1 al 5), la mayor eficiencia en la remoción de turbiedad se dio con los ensayos N° 1 y 4 con eficiencias de 92.01% y 80.02% respectivamente, sin embargo, evaluando la remoción de DQO que es el principal parámetro de interés, se encontró que la mejor eficiencia de remoción fue para el ensayo N° 4 con un valor de 51.40%, seguido del ensayo N° 5 con un valor de 45.10%, ambos ensayos fueron llevados a cabo empleando Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) combinado con polímero y carbonato de calcio (CaCO₃) para el ajuste del pH. En cuanto al PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) (Ensayos N° 6 al 9), las mejores remociones tanto de turbiedad como DQO se encontraron en los ensayos N° 8 y 9 con valores de 90.14% y 91.25% para la turbiedad respectivamente y 48.20% y 56.20% para la DQO respectivamente. En este caso los ensayos se realizaron con PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) combinado con carbonato de calcio (CaCO₃) para el ajuste del pH. Los ensayos N° 10 y 11 se realizaron usando la dosis del coagulante que mejor porcentaje de remoción obtuvo (Ensayo N° 9) y filtrando el agua clarificada resultante por medio de dos filtros fabricados: uno con gravas de tamaños de 1.5” y 0.5”, y el otro con las mismas gravas más otro lecho de carbón activado, esto con el fin de determinar si la presencia de un filtro permitiría mejorar las eficiencias de remoción en el sistema. En este caso las remociones de DQO fueron muy similares 59.50% para N° 10 y 59.60% para N° 11, sin embargo, la remoción de turbiedad fue mejor en N° 10 con un valor de 97.59%, indicando que si bien los filtros actúan de forma similar para la remoción de la DQO, en cuanto a la turbiedad es posible que el filtro de carbón activado genera impurezas que alteren este parámetro, razón por la cual la eficiencia fue mejor en el ensayo con grava sin carbón activado. Estos resultados demostraron que los dos coagulantes requirieron un ajuste del pH para obtener eficiencias más elevadas, sin embargo, para el tipo de

Tabla 3. Mejores porcentajes de remoción obtenidos en los diferentes ensayos de jarras realizados

| N° | Reactivos empleados | Dosis aplicadas (mg/L) | Remoción DQO (%) | Remoción Turbiedad (%) |
|----|---|------------------------|------------------|------------------------|
| 1 | Al ₂ SO ₄ (10% m/V) + CaCO ₃ | 90 | 31.10 ± 2.43 | 92.01 ± 1.25 |
| 2 | Al ₂ SO ₄ (10% m/V) + Polímero | 90 + 1.5 | 27.10 ± 3.01 | 5.72 ± 1.65 |
| 3 | Al ₂ SO ₄ (20% m/V) + Polímero | 260 + 1.5 | 36.30 ± 2.04 | 35.19 ± 2.03 |
| 4 | Al ₂ SO ₄ (10% m/V) + Polímero + CaCO ₃ (Ajuste pH) | 90 + 1.0 | 51.40 ± 1.54 | 80.02 ± 2.76 |
| 5 | Al ₂ SO ₄ (20% m/V) + Polímero + CaCO ₃ (Ajuste pH) | 260 + 0.5 | 45.10 ± 2.02 | 78.93 ± 3.21 |
| 6 | PAC (Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃) (5% m/V) | 180 | 48.30 ± 1.85 | 84.38 ± 1.04 |
| 7 | | 220 | 46.50 ± 2.04 | 88.57 ± 3.21 |
| 8 | PAC (Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃) (5% m/V) + CaCO ₃ (Ajuste pH) | 200 | 48.60 ± 2.32 | 90.14 ± 2.65 |
| 9 | | 220 | 56.20 ± 1.43 | 91.25 ± 1.32 |
| 10 | PAC (Al ₂ (OH) ₃ Cl ₃) (5% m/V) + | 220 | 59.50 ± 1.00 | 97.59 ± 0.97 |
| 11 | CaCO ₃ (Ajuste pH) + Filtración | 220 | 59.60 ± 1.33 | 92.04 ± 1.43 |

agua analizada, funcionó mejor el PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) con respecto al Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃). Es importante destacar que el PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) suele ser muy eficiente para la remoción de sustancias orgánicas comparado con el Sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃), donde su eficiencia en este caso es limitada.

En cuanto al uso del filtro con grava y/o con carbón activado, no representó una mejoría considerable en la eficiencia de remoción, sin embargo, es necesario evaluar también en etapas posteriores, el tiempo de retención hidráulico del filtro y más combinaciones de materiales. Si bien, se logra mejorar la eficiencia de remoción del sistema usando la coagulación-floculación, no es suficiente para que se cumpla con lo exigido en la Resolución 0631 de 2015, ya que la concentración promedio de DQO alcanzada con el ensayo N° 11 (Mejor remoción de DQO), fue de 648.74 mg O₂/L y la resolución permite hasta 180 mg O₂/L, lo que indica que solo con el proceso de coagulación-floculación no sería suficiente.

C. Análisis de filtración

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la DQO del afluente y efluente del filtro, el porcentaje de remoción obtenido con el ensayo, lo exigido por la Resolución 0631 de 2015 en términos de este parámetro en el efluente y el cumplimiento de esta exigencia. Se observa que el porcentaje de remoción es bajo (35%) y la concentración del efluente (531.66 mg O₂/L) sobrepasa los 180 mg O₂/L de DQO que es el máximo permitido por la norma que ampara los vertimientos del agua residual de estudio. Estos resultados son consistentes con lo encontrado en los ensayos de coagulación-floculación, donde la eficiencia de remoción de DQO no se vio significativamente afectada a la por la implementación de un filtro posterior al test de jarras, esto demuestra la naturaleza de los contaminantes en este tipo de agua no es principalmente material suspendido, sino disuelto, lo que dificulta la aplicación de procesos de filtración.

D. Ensayos biológicos con el filtro percolador

En la Tabla 5 se presentan los resultados del ensayo de remoción de DQO empleando un filtro percolador, en donde se detalla la DQO del afluente y efluente en los ensayos, lo exigido por la Resolución 0631 de 2015, el cumplimiento de esta resolución en las diferentes mediciones y el porcentaje de remoción obtenido. Los resultados de la Tabla 5 indican que con este ensayo tampoco se obtuvieron los resultados esperados, es decir, no se logró cumplir con lo que exige la Resolución 0631 de 2015, ya que la concentración más baja obtenida fue 711.326 mg O₂/L con una remoción de 28.88%. En este caso, el filtro percolador es adecuado para aguas residuales que no tengan una alta carga de sólidos suspendidos para evitar taponamientos en el sistema, sin embargo, teniendo en cuenta la moderada biodegradabilidad de este tipo de agua (54%), se concluye que los microorganismos adheridos al filtro percolador no tienen una fuente suficiente de carbono para llevar a cabo sus procesos metabólicos y por esto, un proceso biológico como el filtro percolador no es eficiente en la remoción de la DQO.

E. Análisis de biodegradabilidad

En la Figura 6 se observa la curva de remoción de las muestras de agua a los 14 días. La máxima biodegradación alcanzada para el afluente fue 46.59% y para el efluente fue de 63.45%. Si bien, se da una degradación de la materia orgánica presente en el agua, el porcentaje de degradación sigue estando por debajo del 80% en ambos casos. La curva muestra que el mayor porcentaje de degradación ocurrió en los primeros 5 días (Mayor pendiente de la curva) y en los siguientes días restantes, la cinética de degradación fue mucho más baja. Se encontró que la cinética de degradación es de orden 1 con una velocidad de 0.441 d⁻¹ (R² = 0.765) en el afluente y 0.470 d⁻¹ (R² = 0.836) en el efluente. Finalmente se destaca, que la degradación fue superior

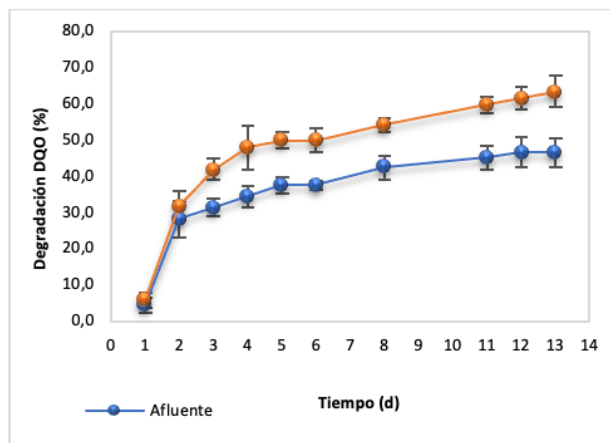
Tabla 4. Resultados de DQO con filtro de grava

| Muestra | DQO (mg O ₂ /L) | Remoción (%) | Resolución 0631, Art 8 | Cumplimiento |
|----------|----------------------------|--------------|---|--------------|
| Afluente | 814.29 ± 23.58 | 35 | Concentración máxima de efluente 180 mg O ₂ /L | No cumple |
| Efluente | 531.66 ± 43.64 | | | |

Tabla 5. Resultados de DQO con filtro de percolador

| Parámetro | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------------|--|------------------|-----------------|-----------------|
| DQO afluente (mg O ₂ /L) | 1012.274 ± 42.58 | 1009.543 ± 40.32 | 999.985 ± 21.43 | 999.985 ± 12.54 |
| DQO efluente (mg O ₂ /L) | 780.870 ± 31.43 | 797.255 ± 40.57 | 711.236 ± 34.75 | 758.084 ± 22.34 |
| % Remoción | 22.86 | 21.03 | 28.88 | 24.19 |
| Resolución 0631/2015 | Concentración máxima efluente 180 mg O ₂ /L | | | |
| Cumplimiento | No cumple | No cumple | No cumple | No cumple |

en el efluente, debido a que esta muestra ya había sido sometida a un proceso de tratamiento previo la cual posiblemente eliminó parte de las grasas y detergentes presentes, los cuales interfieren con el proceso de degradación realizado por los microorganismos.


Figura 6. Biodegradabilidad en 14 días de la muestra del agua del restaurante en el afluente y efluente

F. Balance de eficiencias

Realizando un balance final (Figura 7), se concluye que para este tipo de agua es necesario la combinación de procesos, ya que los procesos biológicos o fisicoquímicos por sí solos no son capaces de realizar la degradación completa de la materia orgánica. Teniendo en cuenta los mejores resultados obtenidos se propone una combinación de coagulación-floculación empleando PAC (Al₂(OH)₃Cl₃) y con ajuste de pH, lo que implicaría una remoción promedio de 56.2% y posteriormente un proceso biológico aerobio (Con aireación inducida) con una remoción aproximada de 63.5%, es decir, que todo el tren de tratamiento tendría una eficiencia de remoción del 84% (Dato teórico, sin considerar las sinergias que se pueden presentar entre cada proceso o de forma acoplada), siendo esta una alternativa sencilla y eficiente, sin embargo, en la Figura 7 se muestran diferentes opciones de tratamiento a partir

de los ensayos previos presentados, teniendo en cuenta que lo ideal es tener procesos con tiempos de retención largos, que garanticen que los microorganismos logren adaptarse y llevar a cabo sus procesos metabólicos adecuadamente, y así lograr las mejores eficiencias de remoción posibles por medio de procesos biológicos.

IV. Conclusiones

Se evidenció un exceso de grasas y aceites en la trampa de grasas del sistema de tratamiento del restaurante, lo que puede dar lugar a problemáticas en el funcionamiento de los procesos posteriores, así mismo, las aguas residuales generadas presentaron una condición de un flujo en discontinuo debido a la forma como se generan en este punto, lo que hace que el tiempo de retención en la trampa de grasas sea muy bajo, en este caso, se requiere implementación un tanque de ecualización y homogeneización previamente que permita distribuir el caudal total en 24 horas. Se encontró que para este tipo de agua no es adecuado un sistema de filtración, ya que los sólidos presentes son coloidales, por lo tanto, no se remueven mediante mecanismos físicos. Según los resultados de los ensayos de tratabilidad, se recomienda la combinación de procesos fisicoquímicos con biológicos aerobios, siendo la mejor combinación un ajuste de pH con carbonato de calcio (CaCO₃), adición de Policloruro de aluminio (Al₂(OH)₃Cl₃) al 5% m/V en una dosis de 220 mg/L a 200 rpm durante 1 min, posteriormente 40 rpm durante 15 min y una sedimentación durante 30 min, de esta manera se puede lograr un 56.2% de remoción de materia orgánica y finalmente un proceso biológico aerobio que termine de pulir el proceso de tratamiento para alcanzar una remoción adicional de un 63.5%. Es importante realizar mayores estudios sobre acoplamiento de procesos, en los cuales se evalúen los procesos no de forma separada y, por el contrario, evaluando la sinergia que se puede presentar en procesos combinados.

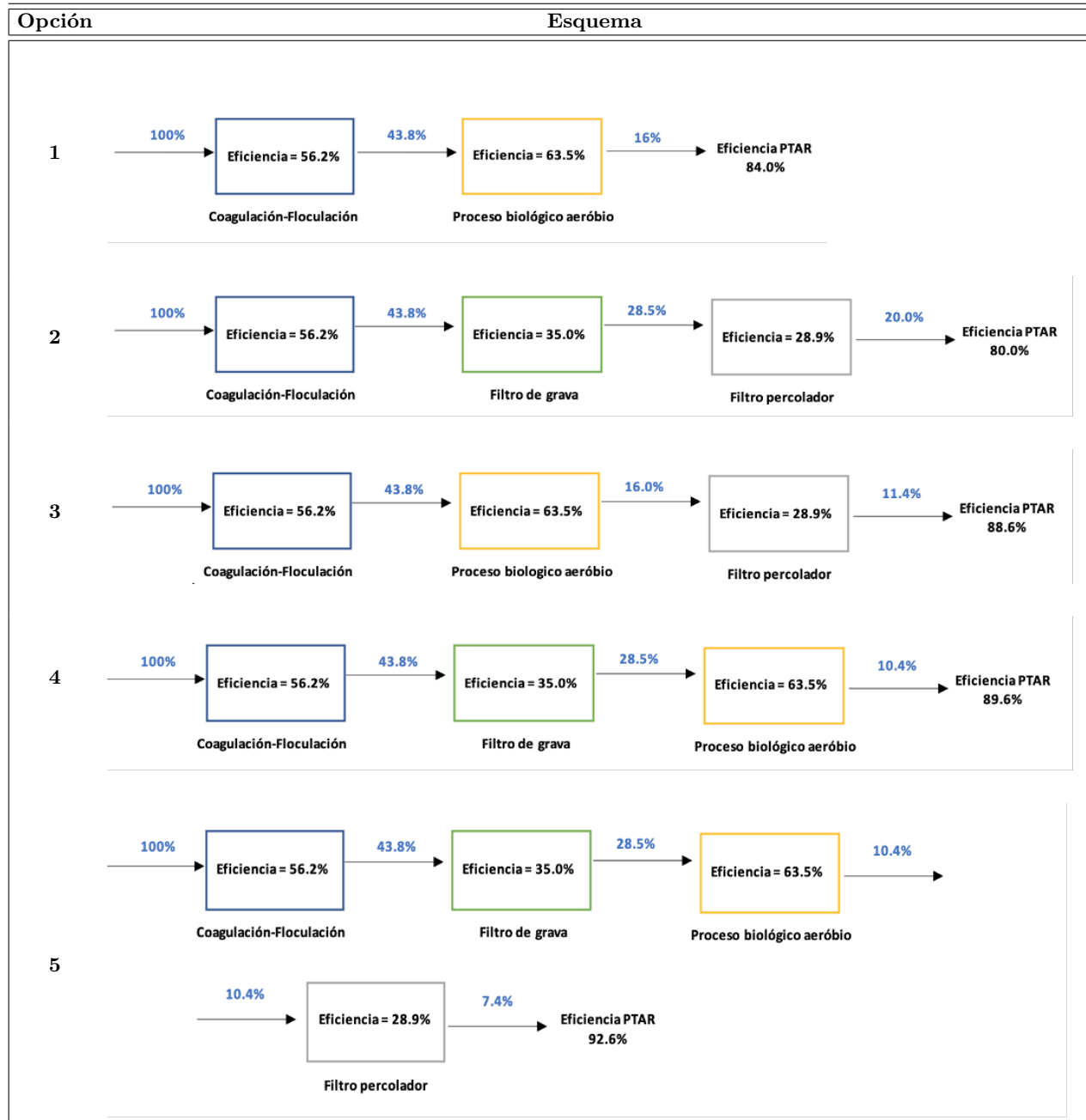


Figura 7. Alternativas de sistemas de tratamiento

V. Agradecimientos

Los autores agradecen al grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON) y el convenio No. 47/920 entre la Universidad de Antioquia y la empresa ISAGEN por el financiamiento de este trabajo.

Referencias

- [1] T. Asano, F. Burton y H. Leverenz, "Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications," *McGRAW-HILL. Metcalf & Eddy*, p. 354, 2007.
- [2] N. Cedié, "Herramientas para la toma de decisiones en salud pública basada en la evidencia y priorización de enfermedades," *Rev. Salud pública*, vol. 15, n.º 5, pp. 694–706, 2013.
- [3] J. Mills, K. Gage y A. Khan, "Potential influence of climate change on vector-borne and zoonotic diseases: A review and proposed research plan," *Environmental Health Perspectives*, vol. 118, n.º 11, pp. 1507–1514, 2010.
- [4] CEPIS, "Guía Para el Diseño de Tanques Sépticos, Tanques Imhof y Lagunas de Estabilización," *Lima*, pp. 1–35, 2005.

- [5] R. Rojas, “Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales,” *CEPIS/OPS-OMS*, pp. 1–19, 2002.
- [6] M. Molinos, T. Gómez, M. Garrido, R. Caballero y R. Sala, “Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: a composite indicator approach,” *Sci Total Environ*, vol. 497–498, pp. 607–617, 2014.
- [7] I. N. Shaikh, M. Ahammed y M. P. Sukanya, “Graywater treatment and reuse Sustainable Water and Wastewater Processing,” *Elsevier*, pp. 19–54, 2019.
- [8] G. Crini y E. Lichtfouse, “Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment,” *Environmental Chemistry Letters*, vol. 17, pp. 145–155, 2019.
- [9] S. Ahuja, “Advances in Water Purification Techniques,” *Elsevier*, 1st Ed., pp. 440, 2019.
- [10] M. Barakat, *ormalfont* “New trends in removing heavy metals from industrial wastewater,” *Arab J Chem*, vol. 4, pp. 361–377, 2011.
- [11] S. Moran, An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design,” *Elsevier*, pp. 466, 2018.
- [12] R. C. Bruno, “Bench scale continuous coagulation-flocculation of saline industrial wastewater contaminated by hydrocarbons,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 34, pp. 101156, 2020.
- [13] V. M. Yactayo, “Filtración. En CEPIS, Tratamiento de agua para consumo humano: plantas de filtración rápida,” Manual I: Teoría. Tomo I. Lima, 2004.
- [14] CEPIS, “Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría,” Tomo I. Lima, pp. 1–22, 2004.
- [15] X. Liu, B. Jiang, X. Yin, H. Y. Ma y B. S. Hsiao, “Highly permeable nanofibrous composite micro-filtration membranes for removal of nanoparticles and heavy metal ions,” *Sep Pur Technol*, vol. 233, pp. 115976, 2020.
- [16] EPA, “Folletos Informativos de Tecnología de Aguas Residuales de la EPA: Filtros intermitentes de arena,” Parte 1. Washington D.C, Estados Unidos, pp. 1–9, 2006.
- [17] Alcaldía de San Carlos, “Información general de San Carlos,” 2020. Consultado el 8 de abril de 2020. <http://www.sancarlos-antioquia.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Presentacion.aspx>.
- [18] Xylem Analytics, Consultado el 23 de septiembre de 2020. <https://www.xylemanalytics.com/en>.
- [19] Hach, Consultado el 23 de septiembre de 2020. <https://co.hach.com/>.
- [20] APHA, AWWA, WPCF, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,” 23th ed. Washington, DC, 2017.
- [21] Elementos Químicos, Consultado el 23 de septiembre. <http://www.elementosquimicos.com.co/>.
- [22] L. P, D. C. Rodríguez y G. Peñuela, “Application of coagulation by sweep for removal of metals in natural water used in dairy cattle,” *Afinidad LXXIV*, vol. 576, pp. 299–304, 2016.
- [23] E. Ellouze, N. Tahri y R. Amar, “Enhancement of textile wastewater treatment process using Nanofiltration,” *Desalination*, vol. 286, pp. 16–23, 2012.
- [24] ISO 9888, Water Quality - Evaluation of Ultimate Aerobic Biodegradability of Organic Compounds in Aqueous Medium - Static Test (Zahn-Wellens Method) (NTC 4255 :1997 Gestión ambiental. Calidad de agua. Evaluación de la biodegradabilidad aerobia de los compuestos orgánicos en medio acuoso. Ensayo estático (método ZAHN-WELLENS)).