

Tratamiento de agua potable y residuales

AUTOR

Luis Javier Mejia Brito

DIRECTOR

PhD. Julio Isaac Maldonado

Ingeniero Ambiental

Universidad de Pamplona

Facultad de ingeniería y arquitectura

Departamento de ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa de ingeniería Civil

Pamplona

2025

Tratamiento de agua potable y residuales

AUTOR

Luis Javier Mejia Brito

DIRECTOR

PhD. Julio Isaac Maldonado

Ingeniero Ambiental

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

Universidad de Pamplona

Facultad de ingeniería y arquitectura

Departamento de ingeniería Ambiental, Civil y Química

Programa de ingeniería Civil

Pamplona

2025

Agradecimientos

Quiero expresar un especial agradecimiento primeramente a mi familia, que ha sido el sostén para tener mi formación académica, ellos han sido un pilar fundamental para poder formarme como profesional, me han ayudado tanto económicamente, como emocional para seguir el camino, quiero agradecerles especialmente a mis tíos, mi tío Jeiner Luis Mejia, que ha sido como un padre durante todo este tiempo, me ha apoyado en mis decisiones y nunca me ha juzgado, doy en verdad mis más sinceros agradecimientos, al igual que mi tía Gianna Katherine Mejia, que ha sido como una segunda mamá, y también me ha apoyado en prácticamente toda mi vida, quiero agradecerle también a mi abuela, que es mi madre, ella me ha ayudado desde el primer momento en que comencé a respirar, ha sido mi soporte y mi apoyo durante toda mi existencia de todo corazón le doy las gracias, también a mi mamá Estela Rosa Brito Epiayu, ella no tan solo me dio la vida, si no que me ha ayudado y apoyado y me ha visto crecer, gracias por tantos esfuerzos y sacrificios que ha hecho para formarme. También doy gracias de todo corazón a mis demás familiares que también me han ayudado como mi tío Rafael Amauris Pinto, mi tía Ruth Pinto, mi padrino Daimer Rafael Ríos, todos ellos han sido mi soporte de muchas formas para que yo logre ser un profesional, también quiero agradecerle a mi bisabuela Ilsa María Carrillo, le agradezco por ayudarme durante toda mi vida, me ayudo a ser un hombre de bien y por guiarme en el buen camino, quiero también darles las gracias a todos mis docentes, que durante este tiempo me formaron como profesional y me brindaron sus conocimientos y herramientas para formar un excelente ingeniero civil, y a la Universidad de Pamplona que me abrió sus puertas y me permitió cursar esta hermosa carrera; les doy las gracias a todos, porque sin ustedes no habría podido llegar tan lejos.

Tabla de Contenido

Resumen.....	11
Introducción	13
Antecedentes	14
Capítulo 1: Generalidades del agua y su importancia.....	30
1.1 Propiedades del agua.....	30
1.1.1 Temperatura:	31
1.1.2 Olor-Sabor:	31
1.1.3 Turbiedad:.....	31
1.1.4 Conductividad:.....	32
1.1.5 Oxígeno disuelto:.....	32
1.1.6 Dureza:.....	32
1.1.7 Alcalinidad:	33
1.1.8 pH:	33
1.1.9 Cloro residual:	34
1.1.10 Cloro Total:.....	34
1.1.11 Metales Pesados:.....	35
1.1.12 Coliformes en el agua totales:	35
1.1.13 Coliformes que provienen de la materia fecal:	35

1.1.14 Giardia:	36
1.1.15 Cryptosporidium:	36
1.2 Ciclo del agua.....	37
1.3 Usos que se le da al agua y generación residuos.	39
1.4 Importancia de la gestión y tratado del agua.....	40
1.5 Normativa Colombiana Vigentes	40
1.5.1 Régimen de los Servicios Públicos Domésticos.....	41
1.5.2 Sistema de protección y regulación del agua.....	41
1.5.3 Normativa para los parámetros de calidad del agua	41
1.5.4 Recopilación de normas medioambientales	42
Capítulo 2: Tratamiento de agua potable	44
2.1 Conceptos básicos sobre la potabilización del agua	44
2.2 Calidad del agua potable	45
2.3 Procesos convencionales de tratamiento:	49
2.3.1 Pre – sedimentación:.....	51
2.3.2 Pre – Cloración:	52
2.3.3 Aireación:	52
2.3.4 Coagulación	53
2.3.5 Floculación	53

2.3.2 Decantación convencional:.....	57
2.3.3 Decantación de alta tasa:	58
2.3.3 Filtración:.....	59
2.3.4 Desinfección:	61
2.4 Normativa y estándares de agua potable	63
2.5 índice que muestra el riesgo por consumo de agua potable (IRCA).....	68
Capítulo 3: Tratamiento de aguas residuales.	69
3.1 Componentes del agua residual.....	69
3.2 Parámetros sobre la calidad de aguas con residuos.....	71
3.2.1 Parámetros en muestras simples	72
3.2.2 Parámetros en muestras compuestas o integrales.	72
3.3 Proceso de tratamiento:	73
3.4 Clasificación de los tratamientos de aguas residuales.....	74
3.4.1 Tratamiento inicial o preliminar	74
3.4.2 Tratamiento inicial.....	75
3.4.3 Segundo tratamiento	78
3.4.4 Tercer tratamiento.....	82
3.4.5 Tratamientos mediante lagunas	83
3.4.6 Tratamiento para desinfección de las aguas con presencia de residuos	86

3.4.7 Tratamiento de lodos	89
3.5 Eficacia del procedimiento de tratamiento.....	94
3.6 Normativa sobre el vertimiento de aguas contaminadas en Colombia.	96
3.6.1 Decretos:	96
3.7.2 Resoluciones.	97
Capítulo 4: Impactos ambientales y retos actuales.	99
4.1 Consecuencias de un tratamiento inadecuado.....	99
4.1.1 Consecuencias inmediatas	99
4.1.2 Impacto a largo plazo	99
4.1.3 Impacto Ambiental de las Aguas No Tratadas	100
4.1.4 Enfermedades Transmitidas por el Agua.....	100
4.1.5 Afectaciones en la calidad de vida	100
4.2 Contaminación emergente.....	101
4.3 Retos en países en desarrollo.	104
Discusiones	106
Conclusiones	108

Tablas de datos

Tabla 1. Procesos de pretratamiento del agua residual. Vickie G. Olson (2017)	75
Tabla 2. Características de los lodos presentes en las aguas con residuos. Oropeza García, N., (2019).	91
Tabla 3. Eficacia de los procesos de tratamiento de aguas con residuos (RAS 2000).....	95

Tabla de figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico del agua, Adaptado de Estrela, (2018)	38
Figura 2. Clasificación de la fuente (RAS 2000).....	50
Figura 3. Esquema de la fuente de producción de aguas residuales de pre-sedimentación. Tuset, S. (2017).....	51
Figura 4. Ejemplo de coagulación – floculación del agua. American water (2007).....	54
Figura 5. Ejemplos de Patógenos del Agua. American water (2006).....	55
Figura 6. Proceso de decantación convencional del agua. Guía de purificadores de agua (2017)	58
Figura 7. Decantación laminar o de alta tasa wikiwater (2025)	59
Figura 8. Instalación Típica de Tratamiento de Agua en una planta de Bebidas	63
Figura 9. La Resolución 2115 de 2007 establece que cada característica de calidad del agua tiene una puntuación de riesgo.....	68
Figura 10. Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Tuset, S. (2017).....	79
Figura 11. Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Tuset, S. (2017).....	80
Figura 12. Reactores Biológico de Biopelícula en Lecho Móvil (MBBR)	82
Figura 13. Esquema general de un proceso de lagunaje Instituto tecnológico de Canarias (2011)	85
Figura 14. Proceso de desinfección químico. Instituto del agua (2024).....	86
Figura 15. Hornos de incineración. Cdta (2020)	93
Figura 16. Propósitos principales de las CE y consecuencias perjudiciales para el medio ambiente, extraído de Rout et al. (2022).....	103

Resumen

En esta monografía se abarcaron los temas de tratamiento de aguas, tanto como se puede potabilizar, como también que hacer con el agua residual que se produce por actividades humanas, todo esto se hace con la finalidad de que el agua sea segura para consumir o para verter sin causar daño al medio ambiente. Se mostraron los procesos que se usan para que el agua esté libre de riesgos en general, se enfoca en quitar contaminantes y residuos para poder devolver el agua al cauce sin que esta afecte el ecosistema, también se tuvo en cuenta cuales son los procesos correctos hasta convertir el agua para que sea potable, desde el primer momento en que se capta desde las principales fuentes como ríos, lagos, lagunas, o pozos subterráneos, se debe de tener presente también las complicaciones que se dan en el proceso de potabilización, ya que es fundamental corregir estas al comienzo del proceso, para evitar futuros inconvenientes, estos problemas podrían ser como; el agua no viene limpia, trae consigo sedimentos y puede tener presencia de sustancias peligrosas, como contaminantes emergentes que arrojan las industrias de la zona. Un tema también importante son las normas de vertimiento ya que se deben de ejecutar, puesto que la ley en Colombia dicta que se deben de tratar las aguas que se utilizaron, porque generalmente quedan con presencia de desechos domésticos e industriales, grasas y/o productos químicos, todo esto para hacer énfasis en que el tratamiento es importante ya que evita enfermedades, se cuida la salud, la naturaleza y el ambiente garantizando agua segura para las familias.

Palabras clave: agua, consumo, fuentes, microorganismos, potabilizar, residuales.

Abstrac

In this monograph the topics of water treatment were covered, both how to make it drinkable, as well as what to do with the wastewater that is produced by human activities, all this is done in order to make the water safe to consume or to pour without causing damage to the environment. The processes used to make the water risk-free in general were shown, focusing on removing contaminants and waste in order to return the water to the waterway without affecting the ecosystem, and also taking into account the correct processes to convert the water into drinkable water, from the first moment it is captured from the main sources such as rivers, lakes, lagoons, or subway wells, we must also keep in mind the complications that occur in the process of purification, as it is essential to correct these at the beginning of the process, to avoid future problems, these problems could be as; The water is not clean, it brings with it sediments and may have the presence of dangerous substances, such as emerging contaminants that are dumped by the industries in the area. Another important issue is the discharge regulations that must be enforced, since the law in Colombia dictates that the water used must be treated, because it generally contains domestic and industrial waste, grease and/or chemical products, all this to emphasize that treatment is important because it prevents diseases, protects health, nature and the environment and guarantees safe water for families.

Key words: water, consumption, sources, microorganisms, drinking, waste, wastewater.

Introducción

Como fuente primaria de vida en la Tierra, el agua es muy necesaria para muchos aspectos de nuestra vida cotidiana, estos son; beber, cocinar, limpiar, agricultura y es vital en operaciones industriales. Sin embargo, el agua no se puede usar directamente ya que esta contiene microorganismos, o materia orgánica que afectan la salud y por esto es mejor tratarla con procesos como la potabilización de esta para si poder darle uso sin inconvenientes que afecten la salud humana, y también si no se trata puede terminar contaminando aún más el medio ambiente. Por estas razones, lo mejor es tratar el agua para hacerla potable o limpiarla después de su uso para que pueda devolverse a la naturaleza sin causar más contaminación.

Los seres humanos han innovado como especie, en el uso de diferentes técnicas o herramientas que sirvan para potabilizar el agua, ya que al tener la necesidad de evitar enfermedades que afectaran a la hora de consumir el agua, se buscaron opciones para potabilizar esta, con estos procesos lo que se busca es eliminar o remover los microorganismos que están presentes, también los sedimentos y presencia de desechos que podrían enfermarnos, los principales procesos que se suelen implementar son, procesos tanto físicos como químicos o biológicos, ya que estos garantizan se pueda distribuir el agua limpia a los hogares de muchas familias, o donde se necesite.

Este trabajo investigativo se buscó enfatizar de una manera sencilla y detallada como se pueden aprovechar estas herramientas y usarlas eficientemente, ya que esto es un tema sumamente importante para la salud, el ambiente, y así poder luchar contra los desafíos que se presentan en las regiones que no tienen acceso a este recurso.

Antecedentes

Internacionales

En su estudio llamado, “ Transforming drinking water treatment residuals into efficient adsorbents: A review of activation and modification methods: ”, de Zoroufchi Benis, K. (2024), nos habla sobre como los residuos, que normalmente se encuentran en el agua son como, metales y residuos orgánicos que, si se manipulan incorrectamente, ponen la salud en peligro y el medio ambiente, y se eliminan en vertederos o cuerpos de agua. Pero desde 2015, ha habido más interés en su empleo como adsorbentes para eliminar contaminantes, incluidos metales pesados, colorantes y fosfatos del agua debido a su bajo costo y alto potencial de reutilización. La técnica fue una revisión integral de estudios realizados entre 2015 y 2024. Se investigó el impacto de una serie de procedimientos, como la activación térmica, la activación química, la granulación, la paletización y la fabricación de compuestos, en las propiedades fisicoquímicas y la capacidad de adsorción del DWTR. Esta investigación permitió identificar mejoras significativas en el rendimiento de los adsorbentes, así como problemas pendientes, como la regeneración de los materiales y la viabilidad económica a gran escala.

En el artículo titulado “Physical-chemical characterisation of an alum-based water treatment sludge in different raw water turbidity scenarios: a review ”, de Castro-Jiménez, C. C. et al, (2024), este nos habla sobre la reutilización del coagulante o adsorbente. Pruebas piloto de coagulación, floculación y sedimentación formaban parte de la metodología, junto con el análisis estadístico de datos operativos previos y una caracterización exhaustiva del lodo mediante métodos como el análisis del tamaño de las partículas, la dispersión de rayos X (DRX), espectroscopia infrarroja (FTIR) y fluorescencia de rayos X (XRF). Una versión modificada del

modelo de Kawamura se destacó por su excelente precisión ($R^2 = 1,0$) entre los modelos matemáticos examinados para predecir la formación de lodos. Los resultados revelaron que el contenido y composición del lodo varían significativamente con la turbidez del agua fuente, siendo mayor el potencial de valorización en escenarios de alta turbidez.

El artículo de Kato, S., & Kansha, Y. (2024). “Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques”, este nos habla sobre la creciente escasez de agua y la contaminación ambiental, este estudio destaca la necesidad de emplear una tecnología eficiente y sostenible para eliminar contaminantes tales como metales pesados, compuestos orgánicos, nutrientes y partículas suspendidas. Se evaluó exhaustivamente la bibliografía científica y técnica pertinente para seleccionar las empresas clave en función del volumen de residuos, la diversidad de contaminantes y el impacto en el ambiente. Este método compara las tecnologías actuales y emergentes para ayudar a hacer juicios bien informados sobre el tratamiento de residuos industriales.

El artículo llamado “Wastewater surveillance for public health: a review”, de Levy, J. I., et al, (2023), este estudio destaca la vigilancia del agua con presencia de residuos como herramienta para la vigilancia comunitaria en tiempo real de las enfermedades infecciosas. Al permitir la detección de virus como el SARS-CoV-2, la influenza, el simiovirus y otros antes de que se informen los casos clínicos, este enfoque proporciona una imagen representativa de la salud. Las técnicas se basan en muestras de agua residual y técnicas sofisticadas como PCR cuantitativa y secuenciación genómica, tanto dirigida (amplicones) como no dirigida (metagenómica), para identificar variaciones, mutaciones y nuevos patógenos. El método ha demostrado ser eficaz, asequible y adaptable, incluso en entornos con recursos limitados, mejorando la vigilancia epidemiológica en todo el mundo.

El artículo de Singh, B. J et al, (2023), “A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers”, este estudio discute la investigación que identifica problemas perdurables tales como la falta de infraestructura, el incumplimiento de las regulaciones y la falta de tecnología moderna en las plantas de tratamiento. Además, reconoce los factores clave que favorecen el desarrollo sostenible, la tecnología innovadora y los sistemas de reglamentación eficaces. Al identificar tecnologías clave, incluyendo nanotecnología, biorremediación e inteligencia artificial para mejorar el uso de aguas con residuos industriales, este análisis fue capaz de sintetizar tendencias, lagunas de conocimiento y potencial futuro.

El estudio de Iwuozor, K. O et al, (2023), “ Prospects and challenges of utilizing sugarcane bagasse as a bio-coagulant precursor for water treatment”, publicado en junio de 2023 en la revista Biotechnology Reports, este estudio nos dice que los restos de la caña de azúcar, un agrícola abundante, tiene la capacidad, propiedades químicas, aplicaciones y limitaciones para coagular contaminantes en agua, que son los principales objetivos de este estudio de revisión. Para hacer esto, los autores revisaron estudios anteriores que utilizaron una variedad de técnicas experimentales, tales como tratamientos químicos usando NaOH, HCl y HSO y procedimientos de activación usando AlCl₃/NH₄⁺ OH. Evaluaron factores tales (pH, dosis de coagulante, rendimiento de extracción y la eficacia en la eliminación de contaminantes y turbidez). El análisis revela que, aunque el bagazo tiene resultados prometedores como coagulante natural, todavía hay problemas, como la falta de uniformidad y la necesidad de perfeccionar los métodos de extracción y procesamiento.

El artículo titulado “ Wastewater treatment, reuse, and disposal-associated effects on environment and health: a review ”, de Choudri, B. S et al, (2020), este estudio analiza los métodos de gestión de suelos y biosólidos, las tecnologías tradicionales e innovadoras, las

preocupaciones toxicológicas, los efectos sobre las plantas y los ecosistemas, y los nuevos contaminantes, metales pesados, medicamentos, y los microbios resistentes que fueron evaluados a la luz de la creciente preocupación sobre estos temas. La metodología consistió en un examen anual de la literatura científica especializada que incluyó una serie de técnicas experimentales y análisis de riesgos en diversos contextos geográficos e industriales.

El artículo de Sun, S et al (2020), “Characteristics of organic pollutants in source water and purification evaluations in drinking water treatment plants”, este estudio examina las crecientes preocupaciones acerca de los contaminantes emergentes (ECC) en los sistemas que proveen de agua, particularmente en Shanghai, China. Estos contaminantes incluyen pesticidas, antibióticos, microcistinas (MC) y subproductos de desinfección (DBP). Estas sustancias tienen efectos dañinos en la salud, incluso en dosis bajas. Debido a la carencia de datos su comportamiento en los sistemas de aguas con residuos urbanos, la metodología del estudio de 2018 comprendió la visualización de agua cruda y tratada en dos ubicaciones a través de tres embalses y seis instalaciones de tratamiento. El más común y difícil de eliminar era un fragmento menor de 1 kDa, fue la fracción más común y desafiante de eliminar, según el estudio, que definió los residuos orgánicos utilizando la distribución del peso molecular. Los resultados demostraron que los tratamientos avanzados aumentan significativamente la eficiencia de eliminación de los CCA, especialmente antibióticos y pesticidas, con tasas de eliminación que superan con frecuencia el 70%.

El artículo titulado “ The impact of UV treatment on microbial control and DBPs formation in full-scale drinking water systems in northern China: a review ”, de Ao, X. et al, (2020), este estudio examina los efectos de la desinfección ultravioleta (UV) en el control microbiológico y el desarrollo de subproductos de la desinfección (DBPs) en sistemas reales de

agua potable en ciudades como Beijing y Tianjin. La motivación del estudio se debe al cambio numerosas fuentes de agua en la región septentrional de china y a la necesidad de evaluar técnicas eficaces de desinfección contra microorganismos resistentes al cloro. Como parte de la metodología, se tomaron muestras de tres plantas que tratan el agua (ETAP) y sus formas de distribución. La composición bacteriana fue examinada usando técnicas tales como microscopia de fluorescencia (FCM), PCR cuantitativa (qPCR), secuenciación de alta resolución, e investigación heterocromática de placas (HPC). También se midió la formación de DBPs regulados y nitrogenados bajo tratamientos con y sin UV. El estudio concluye que el tratamiento UV puede reducir la proliferación microbiana sin generar aumentos significativos en los niveles de DBPs, aunque su eficacia depende del tiempo de aplicación y condiciones del sistema.

El artículo “ Modification of Polysulfone Ultrafiltration Membranes via Addition of Anionic Polyelectrolyte Based on Acrylamide and Sodium Acrylate to the Coagulation Bath to Improve Antifouling Performance in Water Treatment: a review ”, de Plisko, et al (2020), este estudio examina cómo la adición de un polielectrolito aniónico (PASA) a la baja coagulación durante la fabricación de membranas puede aumentar su capacidad anti-incrustación. Debido a que la acumulación de residuos orgánicos en estas membranas reduce su vida útil y eficiencia, se sugirió que se cambiara su estructura utilizando la técnica de separación de fases no inducidas por disolventes (NIPS). El procedimiento consistía en fabricar membranas de polisulfona con diferentes concentraciones de PASA y temperaturas de coagulación, evaluando sus características mediante espectroscopia FTIR, mediciones del ángulo de contacto y del potencial zeta, microscopia electrónica (SEM, AFM), y pruebas de filtración utilizando agua real y soluciones modelo. Los resultados demostraron que el PASA mejora la hidrofobicidad, la carga

superficial y la resistencia al ensuciamiento de las membranas, lo que permite mejorar el rendimiento del tratamiento del agua.

El artículo llamado “ Microplastics in drinking water treatment – Current knowledge and research needs: a review ”, de Novotna, K et al, (2019), este estudio discute cómo la falta de conocimiento de como los potenciales de los (micro plásticos) en la salud ha aumentado debido a su reciente descubrimiento en agua dulce, océanos y, más recientemente, en instalaciones de tratamiento (ETAP). Lo cual el estudio buscaba era comprender mejor la presencia, comportamientos y rasgos de PM en fuentes de agua y a lo largo del proceso de potabilización. Para esto, se hizo un análisis del conjunto de investigaciones sobre la detección, descripción y eliminación de partículas mediante diversas técnicas de tratamiento, como la coagulación, el filtrado y la tecnología punta. Además, las PMs se contrastan con otros contaminantes comunes, y se encuentran importantes lagunas de conocimiento para mejorar la eficiencia de las tecnologías existentes y sugerir nuevas técnicas de eliminación, con especial énfasis en las partículas de tamaño micrométrico (menos de 10 μm), que son las más comunes y difíciles de eliminar.

El artículo llamado, “Desalinización mediante tecnologías de membranas como alternativa al problema de la escasez de agua dulce: un artículo ”, de Grueso et al., (2019), esta revisión examina los avances mundiales en los procesos de desalinización como un remedio para la creciente escasez de agua limpia debido al incremento de la población y la contaminación hidrológica. El estudio comenzó en el segundo semestre de 2017 y forma parte del proyecto de investigación “Tratamiento de aguas salobres por ósmosis inversa: una alternativa a la escasez de agua dulce en Colombia.”, al revisar la literatura académica sobre métodos, la metodología

documental identificó desafíos actuales y futuros, como la integración de fuentes de energía renovables, la optimización del pretratamiento y la innovación en materiales de membrana.

El artículo “Rainwater as a Source of Drinking Water: Health Impacts and Rainwater Treatment: a review ”, de Khayan, K. et al, (2019), este estudio examina los problemas que causa el uso del agua de lluvia como fuente potable en las comunidades tropicales de Indonesia debido a la contaminación por plomo (Pb) de contaminantes atmosféricos y tejados de zinc. Como parte de la metodología mixta transversal y experimental del estudio, se utilizó un sistema de tratamiento basado en el filtrado con arena moluscated y carbón activado después de recoger muestras de agua de lluvia y 40 residencias. Los resultados, que mostraron una disminución del 99,47% en los niveles de Pb, un aumento significativo en el pH del agua y una disminución del 72% en la turbidez, mostraron que el sistema asegura que el agua de la estación lluviosa sea apta para el consumo humano.

La investigación llamada “Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review ”, de Sillanpää, M., et al (2018), en este estudio se analiza el resultado del aumento global de la concentración y complejidad de NOM en las fuentes de agua durante los últimos diez a veinte años. Esto ha causado problemas significativos para las tecnologías de tratamiento tradicionales, ya que el NOM ayuda a crear subproductos de desinfección e interfiere con procesos como el filtrado por membrana, la oxidación y la adsorción. Comparar la eficacia de diversos coagulantes a base de metal (como los basados en aluminio, hierro y cobre), polímeros sintéticos, biocoagulantes y coagulantes, así como procesos integrados que combinan la coagulación con otras tecnologías como las membranas, oxidación, adsorción e intercambio iónico. Teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas del agua a tratar, así como la variabilidad espacio-temporal de los NOMs.

El artículo “Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review:”, de Sillanpää, M. et al, (2018), según este estudio, aunque la sustancia en sí no es nociva, hace un excelente trabajo en la producción de subproductos de desinfección (DBP), que causan efectos adversos en la salud y calidad del agua limpia. La metodología del estudio consiste en un análisis exhaustivo de las investigaciones sobre la aplicación de procesos avanzados de oxidación (POA) tales como la ozonización, la luz UV, los procesos de Fenton, la fotocatálisis heterogénea, y sus combinaciones con otras tecnologías como membranas y adsorbentes que se llevaron a cabo entre 2010 y 2016. Al comparar la eficacia, los procedimientos y los entornos operativos de estos métodos, se evalúa la viabilidad técnica y financiera de eliminar el NOM y reducir el DBP.

El estudio de Fernández A, S. I. (2015), “Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile”, nos habla sobre cómo se tratan las aguas en las plantas y como ha sido históricamente mal regulado en Chile, lo que ha llevado a prácticas inadecuadas como el vertimiento directo de agua con residuos. Esto pasa ya que no hay regulaciones específicas para los residuos líquidos generados en estas instalaciones, aunque regulaciones como D.S. No 90/2000 regulan otros tipos de eliminación. A este respecto, el estudio destaca el trabajo anterior de Matamoros (2005), que describió el agua sobrante de las plantas de tratamiento y estableció un precedente técnico para el desarrollo de procesos adecuados de eliminación. A escala mundial, naciones como Estados Unidos y México y Colombia han desarrollado regulaciones avanzadas que establecen límites y parámetros de control específicos para estas aguas, evidenciando la necesidad de que Chile adopte criterios similares. En consecuencia, el presente estudio se alinea con estos antecedentes internacionales y

propone lineamientos para definir procesos adecuados de tratamiento y disposición según el tipo de planta y los residuos generados.

El artículo “Drinking water microbiology - from measurement to management: a review”, de Proctor, C. R., & Hammes, F. (2015), este estudio investiga cómo los avances en instrumentos microbiológicos permiten una descripción completa de los microbiomas del agua potable desde la fuente hasta el grifo. A pesar del enfoque convencional, ahora entendemos la complejidad de las comunidades microbianas en biopartículas, sedimentos y agua en varias etapas del sistema de distribución de enfermedades fecales. Con el fin de comprender la diversidad, abundancia y funcionalidad de los microbianos, se ejecutó una evolución crítica de la literatura científica contemporánea utilizando métodos tales como el análisis de citas de flujo, el análisis metagenómico y la secuenciación de próxima generación (NGS). El estudio recomienda pasar de un enfoque puramente descriptivo a una gestión activa del microbioma del agua potable para garantizar la distribución segura y sostenible del recurso. Esto implicará promover comunidades microbianas beneficiosas mediante el diseño de sistemas, la selección de materiales y el control de nutrientes.

El estudio realizado por Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora, V. (2013) “Tratamiento de aguas residuales en México”, este estudio discute el tratamiento de aguas con residuos y cómo ha cambiado mucho en las últimas décadas debido a la implementación de regulaciones ambientales severas y modelos de cooperación público-privada. Uno de los desarrollos clave es el uso del modelo DBOT (Design-Build-Operate-Transfer), que se ha utilizado desde principios de los años 2000 en varios países, incluido México, para facilitar la construcción y operación de proyectos hidroeléctricos a gran escala como el Atotonilco Planta de Tratamiento (2009-2012), uno de los más grandes del mundo. Además, desde 2008, se ha fortalecido a escala mundial el impulso para

la recuperación de agua residual tratada para actividades agrícolas, industriales y acuíferos, este estudio fue adoptado por México con el apoyo de normas técnicas como la NOM-014-CONAGUA-2003 y la NOM-015-CONAGUA-2007. Estas acciones se enmarcan en una tendencia internacional que busca no solo mitigar la contaminación hídrica, sino asegurar la sostenibilidad del recurso mediante incentivos, regulaciones y financiamiento multilateral como el proporcionado por el Banco Interamericano de Desarrollo (2013), que ha promovido lineamientos replicables en América Latina.

El artículo llamado “Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review ”, de Matilainen, A. et al, (2010), este artículo destaca un problema importante para las operaciones de tratamiento de agua, que es causado por el aumento en la cantidad y complejidad del material orgánico natural en las fuentes de agua durante los últimos 10 a 20 años. El NOM tiene un impacto adverso en la calidad del agua en las redes de distribución, estimula el crecimiento biológico en las redes, aumenta la demanda de desinfectantes y coagulantes, crea subproductos peligrosos e incrementa su consumo, y facilita la eliminación de metales pesados y contaminantes orgánicos. Como resultado, se han utilizado técnicas de eliminación más rentables y eficaces. La metodología consiste en una revisión exhaustiva de estudios recientes que examinan el funcionamiento, la eficacia, las ventajas y los inconvenientes de diversas técnicas de coagulación, así como sus interacciones con membranas, oxidación y filtración de carbón activado.

Nacionales

El artículo “Water Quality, Heavy Metals, and Antifungal Susceptibility to Fluconazole of Yeasts from Water Systems: a review ”, de Caicedo-Bejarano et al (2023), este estudio plantea un desafío importante para nosotros; la principal fuerza motriz detrás de él es la preocupación

por las infecciones bacterianas y la resistencia a los antibióticos en hábitats acuáticos urbanos. Además del análisis físico-químico, la medición del peso de los metales y las pruebas de micro dilución para la susceptibilidad antifúngica, se utilizó una metodología basada en la detección de levadura e identificación molecular de levaduras en las muestras de agua con residuos. Se mostro una alta diversidad de especies, una preponderancia del género *Cándida* y un porcentaje relativo de cepas resistentes al fluconazol. Estos resultados se relacionaron con la presencia de metales como Cr, Cd y Pb, lo que puede indicar que la contaminación ambiental y la resistencia microbiana son mutuamente seleccionadas.

El artículo de Bejarano Suescún, J. C., et al, (2022). titulado “Optimización del tratamiento de agua para consumo humano en la inspección de policía de Cambao del municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, Colombia”, este artículo discute los problemas con el sistema de potabilización del agua en esa área, donde la planta para tratar el agua potable (PTAP) carece de un sistema adecuado de dosificación de coagulante debido a la falta de una curva de calibración, lo que pone en peligro la población. La investigación incluyó la necesidad de mejorar el proceso de coagulación-floculación para lograr una reducción efectiva de la turbidez, que es un parámetro crucial en la seguridad del agua. Para ello, se utilizó una metodología con enfoque descriptivo y exploratorio, que incluyó visitas técnicas al PTAP, un examen de sus condiciones operativas y la realización de pruebas de laboratorio utilizando el test jarras, según la norma NTC 3903, a fin de determinar la dosis eficiente de coagulante (hidroxicloruro de aluminio) con base en los niveles iniciales de turbiedad del agua cruda.

El artículo titulado “ Chlorination for low-cost household water disinfection - A critical review and status in three Latin American countries: a review ”, de Nielsen et al (2022), este estudio examina la eficacia y sostenibilidad del cloro como método de desinfección de agua

doméstica en zonas rurales de México, Colombia y Brasil. Aunque esta técnica es ampliamente recomendada debido a su bajo costo y facilidad de uso, se enfrenta a obstáculos significativos en su aplicación real, tales como la dosificación inadecuada, la baja aceptación del usuario y la limitada disponibilidad del producto. La metodología empleada consistió en una revisión crítica de la literatura científica y literaria, analizando más de 3.500 documentos y eligiendo 202 estudios pertinentes junto con estudios de caso en los tres países. En el estudio se hace hincapié en que la consideración de las condiciones locales es esencial para lograr una aplicación eficaz y sostenible, el comportamiento de los usuarios y garantizar un acceso constante a productos de calidad.

El estudio llamado “ Development and implementation of a water-safety plan for drinking-water supply system of Cali, Colombia: a review ”, de Pérez vidal, A., et al, (2020), este estudio describe el desarrollo y la aplicación de un (PSA) en el sistema que distribuye de agua potable de California. La metodología propuesta por el OMS, que se basa en fases como la de reunir un equipo de trabajo, identificar peligros, evaluar riesgos y planificar medidas de control, fue adoptada en respuesta a los problemas relacionados con la calidad del agua desde la captura hasta el consumidor. En la técnica se utilizaron combinaciones de visitas de inspección, matrices de riesgos, análisis de registros históricos, comprobación y herramientas del sistema de información geoespacial. El estudio encontró 103 eventos dañinos y mostró que las fases más críticas eran el consumidor final y la captura, lo que sugiere mejorar las medidas de control y fomentar la cooperación interinstitucional.

El estudio “Evaluación y comparación de buenas prácticas y nuevas tecnologías en el manejo de aguas residuales en la PTAR La Calera - Colombia y Juan Díaz – Panamá: un estudio ”, de Niño Cárdenas, (2018), muestra los antecedentes latinoamericanos relevantes en el campo

del tratamiento de aguas con residuos. En Colombia, el PTAR La Calera fue construido en 1991 bajo el convenio CAR-Municipio y entregado al municipio en 2012. Aunque estaba destinado a eliminar más del 85% de la carga orgánica, su eficacia era solo entre el 60 y el 70 por ciento. La pieza central, en funcionamiento desde 2006, es el EDAR de Juan Díaz, una planta de vanguardia con tratamiento bioquímico, recuperación de gas y cogeneración energética. Además, según el informe, en Colombia, sólo el 31% de las ciudades tienen instalaciones para el tratamiento del agua con residuos, y solo el 9% del agua del país recibe algún tipo de tratamiento. Estas cifras demuestran la necesidad de aplicar las mejores prácticas y tecnologías de vanguardia, como las que se observan en Panamá.

El artículo titulado “ Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración: un estudio ”, de Torres-Parra et al (2017), este estudio sugiere un enfoque descentralizado para el tratamiento del agua en las zonas rurales colombianas utilizando un sistema llamado Torre de Tratamiento. Este sistema utiliza materiales granulares como arena, carbón activado, gravilla y piedra pómez para filtración y clarificación utilizando piedra de alumbre. La metodología consistió en diseñar, construir y probar el prototipo en un entorno de laboratorio utilizando agua contaminada simulada y un estudio descriptivo sin una prueba estadística. Los resultados mostraron una eficiencia de remoción del 99,9 por ciento en coliformes, 98 por ciento de turbideces y 83 por ciento de color, demostrando que el sistema puede producir agua potable en áreas sin acceso a sistemas acueductos tradicionales.

El artículo “Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia: un estudio”, de Lizarazo B et al, (2013), este estudio identifica cuales son los parámetros importantes del tratamiento de aguas con residuos en Colombia, también nos habla de cómo fue la construcción de la primera depuradora (Vitelma) en 1933, marcando el inicio de la

infraestructura sanitaria en el país. Además, reconoce la evolución de los sistemas desde los métodos anaerobios como los pozos sépticos (introducidos globalmente en el siglo XIX) hasta la implementación de sistemas biológicos, químicos y físicos modernos. A nivel normativo, destaca la importancia del Decreto 1594 de 1984, la Ley 99 de 1993 y el CONPES 3177 de 2002, los cuales han servido de base legal para regular el vertimiento, tratamiento y reusó del agua.

Internacionalmente, se hace mención a normativas como la Norma Boliviana NB 688-01, que refleja el esfuerzo de países latinoamericanos por actualizar sus políticas de saneamiento básico y facilitar el acceso a servicios de tratamiento en poblaciones vulnerables.

El artículo titulado “ Wastewater use in agriculture: Irrigation of sugar cane with effluents from the Cañaveralejo wastewater treatment plant in Cali, Colombia: a review”, de Madera, C. A., et al, (2009), este estudio investiga la viabilidad de utilizar aguas residuales tratadas para regar la caña en lugar de la gran dependencia del Valle del Cauca de los fertilizantes químicos y el agua. La metodología consistió en un experimento con 18 parcelas en condiciones controladas, utilizando tres tipos de riego: agua subterránea, efluente primario convencional (CPT) y efluente primario mejorado químicamente (EPT). Tras la cosecha, se evaluaron el contenido de azúcar (Brix) y las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de la caña. Los resultados mostraron que, aunque ambos efluentes cumplieron con los estándares fisicoquímicos para riego, su calidad microbiológica fue deficiente, lo que requiere controles sanitarios adicionales para proteger la salud de los trabajadores agrícolas.

Regionales

El artículo “Technical implications of light greywater production and quality for decentralized treatment and reuse: A case study in Bucaramanga, Colombia: a review”, de Burgos-Arias, J., et al, (2025), este estudio aborda la escasez de datos precisos sobre la cantidad

y el calibre de las aguas grises ligeras en América Latina, lo que limita el desarrollo de sistemas descentralizados. Se utilizaron datos de hogares representativos, donde se analizaron 27 muestras desde en el aspecto fisicoquímico y biológico, y se hizo un seguimiento del consumo de agua y la obtención de LBV durante más de tres meses. Los resultados muestran una producción media de 33,83 L/persona/día con una elevada carga orgánica, baja concentración nutricional y coliformes, lo que indica la presencia de importantes obstáculos técnicos para tratar el agua y su reutilización segura.

El estudio “Análisis documental de la evolución de los sistemas de tratamiento de agua potable en Bucaramanga y su área metropolitana: un estudio”, de Cardona Ortiz, R. R. (2015), de acuerdo con este estudio, uno de los principales precursores del tratamiento de agua en la ciudad de Bucaramanga y áreas aledañas es el Plan Departamental de Aguas de Santander (PDA), vigente desde el año 2000 como iniciativa gubernamental para mejorar el acceso al agua en los municipios del departamento. A nivel legislativo, el texto reconoce la importancia de medidas como la Ley 142 de 1994, dictamina que el sistema de servicios públicos domiciliarios, y la Ley 1176 de 2007, que promueve la inversión regional en infraestructura de agua y saneamiento. Con el fin de mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la responsabilidad social en el suministro de agua segura, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) también ha adoptado ideas que son provenientes del PMNU (Pacto mundial de las naciones unidas, 2005). Esta visión se ve reforzada por el desarrollo institucional del acueducto desde 1916 hasta su restauración en la década de 2000, que se unieron para proporcionar una infraestructura vital para el noreste de Colombia.

Locales

El estudio “ Remoción de nutrientes por coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, en Valledupar, Colombia: un estudio ”, de, De Armas Duarte, D., y Ramírez Hernández, L. F. (2015), este estudio habla sobre la efectividad de coagulantes naturales como “Moringa oleífera y cardón guajiro”, así como químicos como Policloruro de aluminio, o PAC, y sulfato de aluminio, en la remoción de nutrientes y sedimentos de las aguas residuales que son enviadas a la planta de tratamiento de aguas residuales El Salguero en Valledupar, Cesar. El estudio se inició por la necesidad de tratamiento en los casos en que los sistemas actuales generan vertimientos con altas cargas contaminantes, principalmente en términos de fosfato, DQO, DBO, turbidez y algas. El planteamiento experimental utilizado se basó en pruebas en frascos de laboratorio utilizando aguas residuales extraídas directamente del efluente de la planta. Aunque todos los coagulantes evaluados resultaron prometedores, el PAC destacó tanto por su rendimiento general como por su viabilidad buscando economía. Con un impacto ambiental menos negativo, los coagulantes naturales -especialmente el cardón guajiro- alcanzaron niveles significativos de eliminación de fósforo. Las propiedades fisicoquímicas se evaluaron mediante métodos estándar tras la aplicación de concentraciones variables de los coagulantes elegidos (APHA, AWWA y WEF).

Capítulo 1: Generalidades del agua y su importancia.

En este capítulo se hace una introducción a lo que sería en general el agua y su relevancia en la vida en la tierra, se abarcaran diversos temas donde se explica a profundidad de que trata el agua. El agua es sumamente importante ya que para que la vida prospere debe de estar presente en la tierra, esta preserva los ecosistemas, regula el clima y facilita las actividades humanas y agrícolas. Los principales inconvenientes que afectan son la contaminación, y la escasez amenazan la disponibilidad de esta, y es importante comprender y buscar formas para apoyar un uso adecuado de este recurso vital.

1.1 Propiedades del agua

El agua posee diversas propiedades, tiene propiedades físicas, químicas y biológicas cuando nos referimos a esto podemos ver que el agua está formada por una asociación de moléculas de 2, 3 y hasta 12 unidades de H_2O . El agua puede encontrarse en diferentes estados, líquida, sólida, gaseoso ya que al cambio de temperatura esta puede cambiar sus propiedades físicas y pasar de un estado a otro, por otro lado, tenemos que la densidad del agua es de 0,9999 g/cc a una temperatura de 20°C, su tensión superficial varía según la temperatura en que se encuentre, disminuyendo desde 75,5 din/cm a 0°C hasta que llegue a un valor donde se comiencen a dar los otros estados físicos del agua.

El agua tiene o posee otras propiedades como, la poca compresibilidad y tiene una alta capacidad calorífica que varía entre 34°C a 36°C, esto es muy beneficioso ya que el agua contribuye en la normalización del clima de la tierra, en donde los océanos actúan como termostatos en donde el agua fría se traslada hacia las zonas donde la temperatura es mayor haciendo que baje unos grados.

Parámetros físicos:**1.1.1 Temperatura:**

La temperatura depende de la radiación del sol si esta varia esto puede afectar, por ejemplo; solubilidad (sales y gases en el agua), también las demás características que tiene el agua (Marín Galvín, R., s. f.).

1.1.2 Olor-Sabor:

Como tal el agua no posee sabor en su estado base, pero dependiendo de la presencia de demás sustancias, se podría tener un sabor, existen dos formas de que el agua posea sabor y olor, en estado natural y artificial. En estado natural la presencia de gases, sales o compuestos inorgánicos/orgánicos podría dotar de sabor a el agua, en estado artificial pueden ser también compuestos inorgánicos/orgánicos, y estos probablemente deriven de sustancias agregadas a estas, ejemplos de los olores y sabores que pueden estar presente en el agua, es el olor a huevos podridos que deriva de la molecular de H_2S , un compuesto inorgánico que se encuentra en aguas poco oxigenadas (Marín Galvín, R., s. f.).

1.1.3 Turbiedad:

La presencia de partículas en suspensión, que pueden encontrarse en arcillas, limos, coloides orgánicos, plancton y criaturas microscópicas, es lo que lo provoca. Estos componentes pueden tener diferentes tamaños, entre estos están entre (10nm hasta 0.1 mm), se puede relacionar con tres categorías de partículas: minerales, partículas de origen orgánico húmicas y partículas filamentosas. Los minerales que se pueden encontrar en el agua provienen de erosiones de suelos y rocas, y estas por lo general suelen estar cubiertas por capas de restos

orgánicos, estas conforman la mayoría de los componentes que flotan en la superficie del agua (Marín Galvín, R., s. f.).

1.1.4 Conductividad:

La conductividad depende de los electrolitos disueltos en el agua ya que estos generan conductividad, también se ve afectada por el pH, los gases disueltos, el tiempo de contacto, los suelos drenados, la composición mineralógica y todo lo demás que influye en la solubilidad de las sales. La conductividad tiene relación con los residuos secos, en concreto el valor de residuo seco en mg/L en agua natural poco contaminada es 0.5 – 1.0 el valor en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Marín Galvín, R., s. f.).

1.1.5 Oxígeno disuelto:

El oxígeno disuelto suele proceder del aire y es crucial para el agua, por lo que un bajo contenido de oxígeno en el agua podría ser un signo de alta contaminación, ya sea por una elevada (MO) o por presencia de bacterias. Por este motivo, utilizamos este parámetro como indicador de los niveles de contaminación. La vida acuática se ve sometida a estrés cuando la concentración de oxígeno disperso/disuelto en el agua desciende a 5 mg/L; muchos peces pueden perecer si la concentración de oxígeno desciende por debajo de 1 a 2 mg/L durante algunas horas (Olivera, 2019).

1.1.6 Dureza:

Según la biblioteca nacional de Chile (2012), se denomina dureza del agua como el contenido mineral del agua, en particular el de iones de calcio. (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Cuando estos minerales aparecen en formaciones geológicas ricas en determinados elementos,

como dolomitas y calizas, se incorporan al agua. Existen dos formas principales de dureza: la dureza temporal, vinculada a los bicarbonatos y que puede eliminarse filtrando el agua, y la dureza permanente, vinculada a la sal y al agua y que puede eliminarse con determinadas terapias. Aunque el consumo excesivo de agua no tiene riesgos para la salud humana, puede provocar problemas en los sistemas domésticos e industriales, como depósitos en tuberías y electrodomésticos y una reducción de la eficacia de los detergentes.

1.1.7 Alcalinidad:

Según el SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje, s.f.), la alcalinidad en el agua evalúa qué tanto puede ésta contrarrestar los ácidos; piénsalo como un amortiguador que impide alteraciones repentinas en su pH al añadir elementos ácidos. Esta cualidad se da gracias a iones como los bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-). Dichos iones se crean cuando las sales de calcio, magnesio y sodio se incorporan a las rocas calizas al descomponerse en los ríos. La alcalinidad varía en función del pH del agua: si este es superior a 8,3, los hidróxidos y algunos carbonatos contribuyen a la alcalinidad; si el pH está entre 4,3 y 8,3, los bicarbonatos y carbonatos contribuyen a la alcalinidad; y si el pH es inferior a 4,3, no existe alcalinidad.

Parámetros Químicos:

1.1.8 pH:

Sabemos que el pH es la propiedad del H_2O que se debe a la importante actividad de los microbios acuáticos y al balance de carbono. Es fundamental para la vida microscópica que está presente en el agua, ya que si es muy ácido no podría haber vida, para que haya un equilibrio

correcto en el pH del agua tiene que haber un balance de CO_2 en agua, también de CO_3^{2-} e insolubilización de HCO_3 , ya que estos demuestran la cantidad que hay en el agua. El valor del pH en las aguas superficiales ronda entre 6-8-5 en donde las aguas que están en el subsuelo son las más ácidas respecto a las superficiales (Marín Galvín, R., s. f.).

1.1.9 Cloro residual:

Es el material más utilizado en los sistemas de desinfección, que incluyen la eliminación, desactivación o extracción de los microorganismos nocivos presentes. La desactivación y/o destrucción de los m.o tiene como consecuencia el cese de su crecimiento y/o reproducción, lo que puede dar lugar a enfermedades si no se controla (Olivera, 2019).

1.1.10 Cloro Total:

Según la revista Higiene ambiental (2023), titulado “*Calidad del agua de consumo, el cloro residual como indicador*”, la suma del cloro que sobra libre y el cloro que sobra revuelto en el agua luego de limpiarla se llama cloro total al tratar aguas usadas. El ion hipoclorito (OCl^-) y el ácido hipocloroso (HOCl), son tipos de cloro que sobra libre, mientras que el amoníaco y el cloro se juntan para hacer cloraminas, que es el cloro que sobra combinado. Para estar seguros de que la limpieza funciona bien y de que queda suficiente cloro para evitar que crezcan bichos malos en las tuberías de agua limpia, hay que medir el cloro total.

Pero, vigilar estas cantidades es clave, pues mucho cloro que sobra daña la salud y el planeta, y poco cloro podría significar que no se está limpiando bien. Entonces es muy importante, revisar siempre el cloro total es algo normal en las plantas que limpian el agua sucia, así se asegura que el agua quede segura y buena.

1.1.11 Metales Pesados:

Según Reyes et al, (2016), “los metales que tienen mayores efectos sobre la salud son el cadmio, el mercurio, el plomo y el arsénico. Los riesgos para la salud varían en función de la concentración de estos metales en el agua que se consume”, la exposición prolongada o la bioacumulación también pueden repercutir en la salud, ya que estos metales pueden dañar el organismo y/o provocar cáncer.

Parámetros Biológicos y/o microbiológicos:

1.1.12 Coliformes en el agua totales:

Su principal atributo es la manera de fermentar lactosa correctamente, generando gas y ácido a una temperatura de 30 a 37 grados Celsius durante una media de 48 horas. Son generadas por la bacteria Enterobacteriácea (Olivera, 2019).

1.1.13 Coliformes que provienen de la materia fecal:

Según Chavarría Márquez, et al (2023), los coliformes fecales son bichos que señalan si el agua está sucia por excremento, y sirven para saber si el agua que bebemos está bien. En su estudio del agua que llega por tubos en Ahuaycha, Perú, vieron que estos bichos pueden dar dolor de estómago, como diarrea, gastritis, cólera, disentería y fiebre tifoidea. Si se hallan coliformes fecales en el agua que tomamos, puede que haya caca, lo que es muy malo para la salud de todos. Por eso, hay que estar atentos y vigilarlos para que el agua que bebemos no nos haga daño.

1.1.14 Giardia:

La Giardia, es un protozoo parásito, que provoca un malestar estomacal llamado giardiasis. Este parásito, cuyo nombre formal es *Giardia lamblia* (o *G. intestinalis* o *G. duodenalis*), habita en los intestinos de personas y animales con la infección, y se propaga mediante huevos expulsados en las deposiciones (Abreu Acosta. et al, 2002).

Según Abreu Acosta, et al, (2002), hallar *Giardia lamblia* en aguas sucias que se limpian para regar cultivos es un peligro serio para todos, ya que sus quistes aguantan mucho los lavados normales. En su estudio en Tenerife, España, vieron quistes de *Giardia lamblia* en el agua sucia limpiada para regar, mostrando que los procesos para lavarla y llevarla lejos no quitan del todo estos bichos. Esto enseña que hay que poner más cuidado y vigilancia para asegurar que el agua que se usa otra vez en el campo sea segura.

1.1.15 *Cryptosporidium*:

Según un estudio realizado por (Abreu Acosta et al., 2002). Titulado “*Presencia de Giardia lamblia y Cryptosporidium, en aguas residuales depuradas reutilizadas para riego agrícola en la isla de Tenerife, España. Efectos del transporte a larga distancia sobre la calidad del agua reutilizada*”, al igual que *Giardia lamblia*, el *Cryptosporidium* es un protozoo parásito que prevalece en las aguas con residuos tratadas y supone un grave peligro para la salud porque sus ooquistes que aguantan los procesos de purificación estándar, tanto los humanos como los animales, en particular aquellos con sistemas inmunitarios comprometidos, pueden contraer infecciones gastrointestinales por ooquistes de *Cryptosporidium*, que pueden persistir en el medio ambiente. Gracias a unos estudios que se realizaron en Tenerife (España), se dieron cuenta que estos parásitos no se erradican totalmente del agua durante el tratamiento y transporte de las

aguas con residuos para el riego agrícola. Esto subraya la necesidad de tomar precauciones adicionales para garantizar la calidad del agua regenerada.

1.2 Ciclo del agua

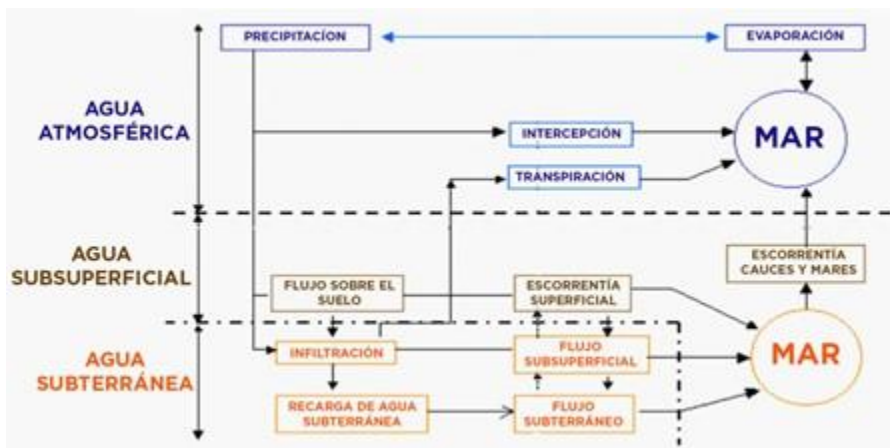
El (PHI) “Programa hidrológico internacional” de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) define el ciclo del agua de la siguiente manera:

“describe cómo existe y se mueve el agua en la Tierra. Nos informa de que el agua está siempre en movimiento y cambiando de estado, pasando de líquido a sólido «hielo» o vapor y viceversa. La vida en la Tierra siempre ha dependido del ciclo del agua, que existe desde hace miles de millones de años. Sin el ciclo del agua, el mundo no estaría habitado.”

Como se definió en el anterior texto, para el planeta tierra el agua es un recurso muy importante y vital que siempre ha estado presente, y que ha ayudado en la formación de vida en la tierra. Este vital recurso se puede ver en diferentes estados, tanto líquido, solido, gaseoso, en estado sólido tenemos que el agua se puede encontrar como (hielo, nieve), en el estado líquido y gaseoso como (vapor de agua). El agua tiene presencia en diversas formas, se puede encontrar en las nubes, océanos, ríos, lagos, lagunas, mares, también en los glaciares en los polos. Es sumamente importante mencionar que existe cantidad grande de agua que es retenida en todos los seres del planeta, pero como tal la cantidad de agua presente no cambia en el planeta, solo se transforma o pasa de estado a otro y cambia de lugar. En función de la temperatura en la que se encuentre en el ambiente el agua puede transformarse y pasar de estado a otro, esto es lo que se denomina como “Ciclo del agua” o “Ciclo hidrológico” (Ocaña y Quijano, 2016).

Figura 1.

Ciclo hidrológico del agua, Adaptado de Estrela, (2018).



Nota: Datos obtenidos de https://aquabook.agua.gob.ar/399_0 en donde se explica cómo funciona el ciclo hidrológico del agua.

El ciclo comienza con, la evaporación en los mares u océanos. El agua comienza a elevarse como vapor de agua hacia las nubes, este vapor se enfría y luego se vuelve a condensar en las nubes y se precipita de nuevo a la superficie de la tierra, el agua en las nubes puede caer también no solo como gotas de agua, si no como granizo o también como nieve, una vez que cae en la tierra, esta es aprovechada por los seres vivos, pero otra parte se escurre en la superficie, hasta llegar a los ríos o lagos, esto se denomina escorrentía superficial, pero también cuando el agua cae en la superficie puede hacer el proceso de la infiltración y llegar a pozos subterráneos de agua, a este proceso en donde se forman aguas subterráneas se le denomina como percolación, y por ultimo esta la transpiración que es un proceso donde el agua que cae y llega a las plantas, es aprovechada por estas y luego de haber pasado por las raíces, tallos o troncos vuelve a las hojas y mediante la transpiración vuelve a las nubes.

1.3 Usos que se le da al agua y generación residuos.

El agua residual que es producida por los seres humanos diariamente, son transportas a las plantas a través del sistema de alcantarillado, este proceso se debe de realizar para evitar enfermedades por acumulación de desechos humanos. El caudal no siempre es constante o regular en el día, en estos casos los sistemas de alcantarillados son separativos, esto se debe a que el caudal de agua residual desciende en mayor parte de noche y depende mucho de la población que este sirviendo.

El sistema de alcantarillado puede ser diseñado para recoger solamente aguas residuales, o también puede ser combinado, que es cuando hace para captar agua con residuos y también aguas provenientes de lluvia, en estos casos se debe de tener mucho cuidado a la hora de diseñar el sistema de alcantarillado ya que al ingresar el caudal que es para aguas de lluvia haciendo que sea más difícil luego tratar estas aguas.

El agua residual se compone por un 99.9% de agua y el restante es “materia sólida”, los residuos que están presentes en el agua dependen de la concentración por habitante y las costumbres de la población servida, y se compone por sus características químicas lo que se traduce como calidad. Los residuos que se encuentran por lo general siempre están compuestos por minerales y m.o ; Mientras que la materia orgánica es únicamente el resultado de las acciones humanas y está formado en parte por materia carbonosa, lípidos y restos de proteínas, la materia mineral procede de los subproductos que los seres humanos desechan en su vida cotidiana, así como de la calidad del agua que los abastece.

1.4 Importancia de la gestión y tratado del agua

La importancia de gestionar y darle un tratamiento al agua se debe a que es de suma importancia para evitar la propagación de enfermedades, contaminación tanto física, química, biológica de los cuerpos de aguas en donde el agua va a parar. Con todo esto se busca evitar que:

- a) Haya daños en los abastecimientos públicos, industriales o privados.
- b) Evitar daños a las aguas destinadas al recreo.
- c) Evitar perjudicar a la disminución del valor del suelo y a la agricultura.
- d) Evitar que haya un impacto ecológico por contaminación de afluentes cercanos.

Gracias a la necesidad de evitar enfermedades y contaminación el ser humano se vio en la obligación de crear formas de tratar las aguas con residuos que producía, por lo cual el tratamiento de aguas con residuos ha ido de la mano, se define por el crecimiento de la densidad de población y de la industria a medida que avanza la civilización.

Si tenemos en cuenta la falta de tratar el agua con residuos producida por el ser humano, podemos decir que hay varias razones por las cuales es importante tratar el agua estas razones suelen ser de carácter higiénico, o de salud, también razones económicas. Debido a todo esto es importante tratar el agua residual no solo por salud que es la más importante si no también debido a las otras razones ya mencionadas.

1.5 Normativa Colombiana Vigentes

Agua potable:

1.5.1 Régimen de los Servicios Públicos Domésticos

El marco legal que rige el suministro de agua y otros servicios públicos domiciliarios en Colombia está establecido por la Ley 142 de 1994. Su objetivo primordial es garantizar la eficacia, accesibilidad y excelencia de estos servicios. La ley establece principios como la cobertura universal, la prestación de servicios eficientes y la sostenibilidad económica. En cuanto al tratamiento del agua potable, la ley pretende garantizar que el agua sea segura y accesible para todas las comunidades, al tiempo que garantiza el acceso a los servicios y priorizar la salud.

1.5.2 Sistema de protección y regulación del agua

Mediante el Decreto 1575 de 2007 Se establece un sistema esencial para regular y salvaguardar la calidad para su consumo. Su alcance abarca:

- **Reglamentación del tratamiento del Agua:** describe las normas que deben cumplir las instalaciones de tratamiento del agua para garantizar su seguridad, contiene las formas para diseñar , como funcionan y el mantenimiento de las plantas.
- **Las funciones de las organizaciones encargadas de vigilar y controlar la calidad:** como las autoridades sanitarias y medioambientales locales, se describen en las Responsabilidades de las Entidades de Control. Estas organizaciones deben velar por el cumplimiento de la normativa y adoptar las medidas correctoras necesarias.

1.5.3 Normativa para los parámetros de calidad del agua

La resolución del año 2007, 2115 dictamina que los requisitos específicos que debe cumplir el agua potable:

- **Requisitos Fisicoquímicos:** Los requisitos fisicoquímicos incluyen límites para parámetros como el pH, la turbidez, el cloro libre y contaminantes como metales pesados y nitratos. Estas normas garantizan que el agua no sólo sea segura, sino también estéticamente agradable para los usuarios.
- **Requisitos Microbiológicos:** Los límites de presencia de microorganismos nocivos están definidos por los requisitos microbiológicos. Para garantizar que no haya bacterias, virus o protozoos potencialmente peligrosos en el agua, la resolución establece determinadas normas.

Procedimientos de Monitoreo y Control:

La resolución describe los procedimientos de realización de pruebas y controles para cumplir con la norma:

- **Frecuencia de las pruebas:** Determina la frecuencia con la que deben realizarse las pruebas de calidad del agua en función del tamaño y tipo del sistema de abastecimiento.
- **Métodos analíticos:** Especifica los procedimientos y métodos aceptados para evaluar los parámetros de calidad del agua, garantizando la precisión y fiabilidad de los resultados.
- **Medidas correctoras:** Ofrece instrucciones sobre lo que debe hacerse si el agua no cumple las normas exigidas. Esto puede implicar alertar a los consumidores, poner remedios adicionales y actuar para solucionar cualquier deficiencia.

1.5.4 Recopilación de normas medioambientales

En el Decreto 1076 de 2015 se compilan varias normativas, en especial las que tienen que ver con la gestión del agua:

- **Compilación Normativa:** Este proceso simplifica la aplicación y comprensión de la normativa ambiental vigente al organizarla y combinarla en un solo documento. Abarca las normas relativas a la gestión de efluentes, el tratamiento de aguas residuales y la protección de las fuentes de agua.
- **Coordinación Normativa:** Mejora la coordinación entre los diversos organismos y reglamentos, lo que conduce a un enfoque más lógico y eficiente de la gestión de los recursos hídricos.

Impacto en la Gestión del Recurso Hídrico

La gestión del agua se ve considerablemente afectada por la aplicación de este decreto:

- **Optimización de Procesos:** La aplicación de técnicas de gestión eficaces y sostenibles en las instalaciones de tratamiento de aguas y la protección de las fuentes de agua se ven facilitadas por la optimización de los procesos.
- **Cumplimiento de la normativa medioambiental:** Garantiza que las operaciones de tratamiento de aguas cumplan la normativa medioambiental, protegiendo los ecosistemas y la salud pública en el proceso.

Capítulo 2: Tratamiento de agua potable

En este capítulo se abarca el tratamiento de agua potable, su importancia y como se ejecutan los procesos para poder potabilizar el agua, ya que esta es un recurso de gran importancia y con esto se busca que sea apta para el consumo humano. Se explica cómo se desarrolla estos procesos, como, por ejemplo, la sedimentación, coagulación, floculación, decantación y filtración son alguno de los procesos que se utilizan para potabilizar el agua, ya que estos procesos cada uno cumple su función y se busca eliminar las impurezas, los microorganismos y las sustancias que son peligrosas para el ser humano. Gracias a estas técnicas, se garantiza que cumpla con los estándares. También se habla de las tecnologías y técnicas actuales más utilizadas.

2.1 Conceptos básicos sobre la potabilización del agua

Se estima que no toda el agua que posee el planeta no es apta para el consumo, esto quiere decir que solo el 2,5% de las tres cuartas partes de agua que posee el planeta es agua dulce, el agua potable solamente puede ser agua dulce. El agua dulce que tiene el planeta se distribuye de varias maneras, casi el 70% del agua que se puede tomar se encuentra en los polos congelada, el 30% restante se distribuye como humedad en los suelos o formando acuíferos y solo el 1% está en las cuencas hidrográficas que forman ríos, lagos o arroyos. Pero tan solo la ridícula cantidad de 0,025% es agua potable y es apta para el consumo.

Para tener en cuenta que significa que el agua sea potable tenemos que entender que debe de ser apta para el consumo humano, y que no tenga algún añadido que pueda afectar la salud de las poblaciones humanas, es decir que no posea microorganismos perjudiciales o sustancias químicas nocivas. Cuando nos referimos a que el agua es potable es el agua que consumimos

diariamente en nuestros hogares y no proviene directamente de la naturaleza si no que paso por diversos procesos para potabilizarla y así poder consumirla sin riesgos.

Algo que se debe de tener presente siempre es que el agua se puede renovar, pero no significa que sea ilimitado, con el pasar de los años esta se ha vuelto más escasa y son demasiadas las poblaciones en todo el mundo que no cuentan con esta. Organizaciones como UNICEF y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han centrado todos sus esfuerzos en luchar para que todas las poblaciones del mundo tengan acceso a agua potable ya que esta va de la mano con la salud pública. La OMS establece que, para tener acceso a agua potable, las fuentes de donde provenga esta debe de estar a menos de 1 Kilómetro de distancia, para poder extraer lo más posible, esta cantidad de agua por lo mínimo debe ser de 20 litros/día por cada integrante de familia.

2.2 Calidad del agua potable

Todas las personas requieren un acceso fácil, seguro y suficiente al agua para mejorar su salud porque es esencial para la vida en la Tierra. Dado que la calidad del agua es crucial para el desarrollo sostenible, abarca la salud del ambiente (Villena, 2018), para ello, se analizan los parámetros a tener en cuenta como; microbiológicos, físicos y químicos, y los resultados se apoyan en los estándares de calidad ambiental (ECA), especificados en la normativa nacional vigente, y en los catálogos de calidad del agua desarrollados por la (OMS, 2011) (Bracho & Fernández, 2012).

Existen diversos parámetros a tener en cuenta para saber si es apta para el consumo, algunos de estos parámetros a tener en cuenta son:

Parámetros Físicos: Se refiere a los atributos físicos del agua que son perceptibles a los sentidos (olfato, gusto, vista, tacto y oído). Estos atributos son organolépticos (olor, sabor y color), así

como la turbidez, la temperatura y la conductividad, y afectan directamente a las condiciones estéticas del agua (Flores et al., 2019).

- **Temperatura:** Una de las propiedades más cruciales del agua es su temperatura, que afecta a la velocidad de las reacciones químicas y puede utilizarse para evaluar si un agua determinada es apropiada para un uso concreto. También influye en otras variables fisicoquímicas como el pH, la conductividad eléctrica y el déficit de oxígeno (Paniagua, 2017).
- **Conductividad:** La conductividad eléctrica se refiere, a como se transmite la energía eléctrica en el agua esto es debido a las sustancias que están disueltas y son ionizadas y están presentes en el agua, esto viene siendo lo opuesto a la característica de resistencia siendo esto un indicador de mineralización. Se tiene en cuenta que la capacidad de conductividad eléctrica del agua viene siendo proporcional a los materiales que tenga presentes y si son materiales o minerales sólidos que han sido diluidos en agua, todo lo cual es necesario considerar para determinar que la conductividad aumenta con la concentración de materiales (Olivera, 2019).

Parámetros Químicos: Este parámetro abarca lo que sería los componentes orgánicos, inorgánicos o gases que se encuentran presentes en el agua, los componentes orgánicos (MO) que están en el agua si a mayor concentración la calidad del agua será menor, en los componentes inorgánicos los que son más importantes como el PH, concentración de las sales, gases que se encuentran presente por lo general consisten en nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno, que son los gases que mayormente se encuentran en la superficie (atmosfera), ahora los gases que se encuentran presentes en las aguas con residuos son como; el amoniaco, el sulfuro de hidrogeno, y el metano, estos provienen en mayor parte de los materiales orgánicos, mientras que

en el agua que ha sido desinfectada o potabilizada se puede encontrar ozono, según lo que se haya vertido (Flores et al, 2019).

- **Oxígeno disperso o disuelto:** El oxígeno disperso proviene del aire por lo general y tiene una mayor presencia en el agua, es muy indispensable ya que si su presencia es muy pequeña esto nos puede indicar que el agua está contaminada, ya que hay una mayor presencia de materiales orgánicos o presencia de actividad bacteriana intensa, por esta razón este parámetro es muy indispensable tenerlo en cuenta y este es el que determina el nivel de contaminación presente en el agua. Si los niveles de oxígeno en agua decaen por debajo de 5mg/L, la vida acuática presente comienza a morir, si los niveles llegan a estar entre 1 a 2mg/L por al menos unas cuantas horas pueden morir la mayoría de peces presentes (Olivera, 2019).
- **PH:** El PH es un indicativo con mayor con gran alcance en los procesos o fenómenos que ocurren en el agua y en la infraestructura de distribución, este parámetro nos puede decir si el agua poseerá efectos perjudiciales directamente en la salud, también puede influir en la desinfección y coagulación del agua (Giraldo y Carvajal, 2019).
- **Cloro residual o sobrante:** Este químico que usamos en mayor parte para la correcta desinfección del agua por sus características que ayudan en la extracción, desactivación y eliminación de materiales orgánicos y patógenos presentes en el agua. El cloro es un químico potente que ayuda en la destrucción de MO y evita el crecimiento o reproducción de estos, ya que si no son eliminados estos podrían causar enfermedades de transmisión hídrica (Olivera, 2019).
- **Dureza:** Según la biblioteca nacional de Chile (2012). Se denomina dureza del agua como la concentración de minerales en el agua, principalmente iones de calcio (Ca^{2+}) y magnesio

(Mg^{2+}). Cuando estos minerales aparecen en formaciones geológicas ricas en determinados elementos, como dolomitas y calizas, se incorporan al agua. Existen dos formas principales de dureza: la dureza temporal, vinculada a los bicarbonatos y que puede eliminarse filtrando el agua, y la dureza permanente, vinculada a la sal y al agua y que puede eliminarse con determinadas terapias. Aunque el consumo excesivo de agua no tiene riesgos para la salud humana, puede provocar problemas en los sistemas domésticos e industriales, como depósitos en tuberías y electrodomésticos y una reducción de la eficacia de los detergentes.

- **Alcalinidad:** Según el SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje, s.f.), la alcalinidad en el agua evalúa qué tanto puede ésta contrarrestar los ácidos; piénsalo como un amortiguador que impide alteraciones repentinas en su pH al añadir elementos ácidos. Esta cualidad se da gracias a iones como los bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e hidróxidos (OH^-). Dichos iones se crean cuando las sales de calcio, magnesio y sodio se incorporan a las rocas calizas al descomponerse en los ríos. La alcalinidad varía en función del pH del agua: si el pH es superior a 8,3, los hidróxidos y algunos carbonatos contribuyen a la alcalinidad; si el pH está entre 4,3 y 8,3, los bicarbonatos y carbonatos contribuyen a la alcalinidad; y si el pH es inferior a 4,3, no existe alcalinidad.
- **Metales Pesados:** Según Reyes et al, (2016), “los metales que tienen mayores efectos sobre la salud humana son el cadmio, el mercurio, el plomo y el arsénico. Los riesgos para la salud humana varían en función de la concentración de estos metales en el agua que se consume. La exposición prolongada o la bioacumulación también pueden repercutir en la salud, ya que estos metales pueden dañar el organismo y/o provocar cáncer.”

Parámetros Biológicos/microbiológicos: El agua que consume el ser humano es de origen superficial, esto quiere decir que se encuentran expuesta a diversas causas las cuales podrían

cambiar pureza en muchos cambios que pueden ser tanto complejos o simples con diferentes intensidades. El cambio del agua se puede deber a eventos naturales o actividades antrópicas, esto sería el uso doméstico que se le da a el agua y debido a la manera en que se genera las aguas residuales, diversas actividades como las agrícolas, mineras, o industriales, pueden incidir en esto. La contaminación por desechos fecales en las cuencas hídricas de consumo humano como ríos, arroyos, mayormente es uno de los mayores problemas presentes que tiende más a preocupar a los países que aún están en desarrollo y se consideran subdesarrollados, algo que se debe de tener en cuenta son los indicadores comunes que se basan en determinar la presencia de materiales orgánicos más comunes como restos orgánicos y bacterias coliformes que contaminan las heces, y que son patógenos ya que estos producen el cólera (Flores et al., 2019).

2.3 Procesos convencionales de tratamiento:

El agua se potabiliza mediante diversos procesos, antes de ser apta para el consumo, el agua debe ser tratada, y el grado de tratamiento define la idoneidad del agua.

Estos procesos se pueden ver en la siguiente tabla donde se clasifica la fuente:

Figura 2.*Clasificación de la fuente (RAS 2000)*

Parámetros	Análisis según		Nivel de calidad de acuerdo al grado de polución			
	Norma técnica NTC	Standard Method ASTM	1. Fuente aceptable	2. Fuente regular	3. Fuente deficiente	4. Fuente muy deficiente
DBO 5 días	3630					
Promedio Mensual mg/L			≤ 1.5	1.5 – 2.5	2.5 - 4	> 4
Máximo diario mg/L			1 – 3	3 – 4	4 – 6	> 6
Coliformes totales (NMP/100 mL)						
Promedio mensual		D – 3870	0 – 50	50 - 500	500 – 5000	≥ 5000
Oxígeno disuelto mg/L	4705	D – 888	≥ 4	≥ 4	≥ 4	< 4
PH promedio	3651	D – 1293	6.0 – 8.5	5.0 – 9.0	3.8 - 10.5	
Turbiedad (UNT)	4707	D – 1889	< 2	2 – 40	40 – 150	≥ 150
Color verdadero (UPC)			< 10	10 – 20	20 – 40	≥ 40
Gusto y olor		D – 1292	Inofensivo	Inofensivo	Inofensivo	Inaceptable
Cloruros (mg/L – Cl)		D - 512	< 50	50 – 150	150 – 200	300
Fluoruros (mg/L – F)		D - 1179	< 1.2	< 1.2	< 1.2	≥ 1.7
GRADO DE TRATAMIENTO						
- Necesita un tratamiento convencional			NO	NO	Si, hay veces (ver requisitos para uso FLDE: literal C.7.4.3.3)	SI
- Necesita unos tratamientos específicos			NO	NO	NO	SI
- Procesos de tratamiento utilizados			Desinfección + Estabilización	Filtración lenta o Filtración Directa + (1)	Pretratamiento + [Coagulación + Sedimentación + Filtración Rápida o [Filtración lenta + Diversas etapas + (1)	(1) = (3) + Tratamientos específicos.

Nota: Datos obtenidos de clasificación de la fuente según (RAS 2000). En donde nos explican cuáles son los parámetros, según la norma a tener en cuenta, y se clasifica la fuente según la DBO y demás parámetros.

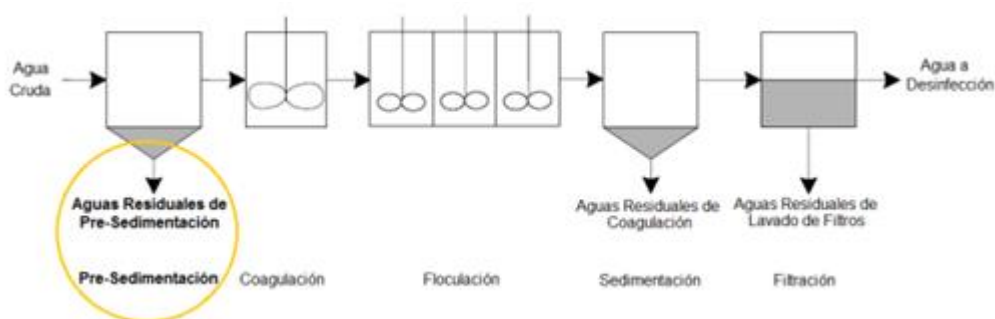
Los procesos de tratamiento se describen a continuación:

2.3.1 Pre – sedimentación:

Para disminuir la carga de sólidos en las operaciones posteriores, algunas instalaciones de tratamiento de agua potable utilizan el procedimiento de presedimentación antes de la coagulación, cuyo parámetro crucial es la turbidez.

Figura 3.

Esquema de la fuente de producción de aguas residuales de pre-sedimentación. Tuset, S. (2017)



Nota: Datos obtenidos de

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/133319/Tratamiento-de-disposicion-de-aguas-residuales-en-plantas-de.pdf;sequence=1>, en donde se explica el esquema de producción de aguas residuales en el proceso de pre sedimentación.

Arenas, limos, arcillas y otras sustancias sedimentarias presentes en el agua bruta constituyen la parte sólida de este efluente. La capacidad de espesamiento y deshidratación que se prevé conseguir con el tratamiento puede mantenerse cuando estas aguas residuales se tratan junto con las procedentes de operaciones posteriores (Westerhoff, 1978).

2.3.2 Pre – Cloración:

Según el artículo de, Xiaoyu Cheng et al, (2023), titulado “ Formation and transformation of pre-chlorination-formed disinfection byproducts in drinking water treatment process”, la pre-cloración se describe como:

“Es un proceso rentable que se utiliza ampliamente en plantas de tratamiento de agua potable (DWTPs) de todo el mundo para inactivar células de algas, degradar toxinas y mejorar la resiliencia del proceso de tratamiento ante cambios en la calidad del agua fuente. No obstante, este proceso desplaza la formación de subproductos de desinfección (DBPs) del final al inicio del tren de tratamiento, lo que significa que los DBPs atraviesan las mismas etapas del tratamiento, a diferencia de la DOM (materia orgánica disuelta). Los DBPs finales encontrados en el agua tratada pueden ser precedidos e intermediados tanto por DOM como por DBPs.”

2.3.3 Aireación:

Según el artículo de L. Åmand, G. Olsson y B. Carlsson (2013) titulado “Aeration control – a review”, publicado en Water Science & Technology, la aireación en el tratamiento de aguas con residuos se define como:

“En lugar de utilizar DOM (materia orgánica disuelta), la aireación es necesaria para mantener la biomasa en suspensión y suministrar suficiente oxígeno disuelto (OD) a los organismos aerobios que eliminan la demanda biológica de oxígeno (DBO) y nitrifican los sistemas de lodos activados. Tanto la DOM como los DBPs tienen la capacidad de preceder e intermediar los DBPs finales que se observan en el agua tratada.”

2.3.4 Coagulación

El proceso de coagulación del agua causa un aumento del tamaño de la masa coagulada (flóculo) y su rápida agrupación, haciendo que el proceso sea eficiente y disminuya el tiempo que se puede utilizar en el proceso de sedimentación en el agua. Para poder estos procesos se añaden productos químicos como “sales” que están mayormente con cargas positivas (sales de hierro, sales de aluminio, polielectrolitos) ya que estas hacen a un lado las partículas con iones que tienen carga negativa y reducen efectivamente el tamaño de la carga de las partículas que se encuentran en el agua (Rodríguez Salcedo.,2008).

Según Rodríguez Salcedo (2008), este nos explica que cuando el agua potable es tratada, el proceso de coagulación es causado por de agregarle coagulantes químicos , y un ejemplo de esto son los sulfatos aluminicos, estos químicos se le agregan al agua cruda, y en este proceso ellos neutralizan las cargas negativas de los elementos suspendidos, lo que les permite aglutinarse y crear las grandes partículas conocidas como flóculos. Este procedimiento es necesario para reducir la turbidez y mejorar la calidad del agua, este proceso debe realizarse antes de la filtración y la desinfección.

2.3.5 Floculación

Los materiales orgánicos o solidos que se encuentran en la parte superficial del agua como materia coloidal, son materiales que necesitan ser removidos del agua para poder tratarlos, los materiales coloidales son: sílice, hierro, arcilla y otros elementos. La correcta y mejor manera de quitar la mayoría de estas impurezas es realizar un proceso que la sedimentación, que se basa en utilizar simplemente la acción de la gravedad, pero se debe de tener en cuenta que la mayoría de estas impurezas, son muy pequeñas para poder obtener un proceso de eliminación

eficaz, se necesita gastar mucho tiempo para quitar o separar los elementos gruesos suspendidos en el agua, por lo tanto también es importante clarificar el agua, y ya que son diversos procesos o la combinación de varios procesos, su objetivo es reducir la concentración de sustancias sólidas que flotan en un líquido. (American Water (2007).

Figura 4.

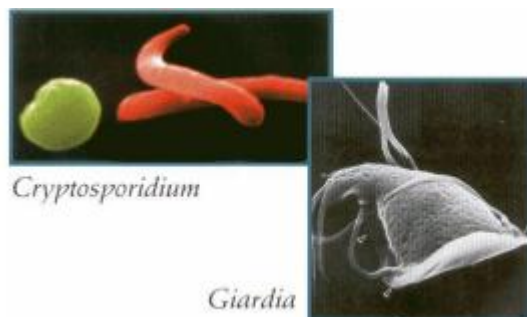
Ejemplo de coagulación – floculación del agua. American Water (2007).



Nota: Datos obtenidos de American Water Works Association, “Pre-Treatment Field Guide” 2007.

Figura 5.

Ejemplos de Patógenos del Agua. American Water (2006).



Nota: Datos obtenidos de Drinking water microbiology: American Water Works Association, 2006.

2.3.4.1 Ayudantes de la coagulación:

Según el artículo de Xiaoyu C, et al (2023), titulado “Formation and transformation of pre-chlorination-formed disinfection byproducts in drinking water treatment process”, se tiene ayudante en la coagulación a elementos como el cloruro férrico (FeCl_3) y Ploricloruro de aluminio (PACl), que fueron utilizados para mejorar la eficiencia del tratamiento de agua:

Cuando se combinan con la preoxidación (como la preozonización) y el filtrado asistido por BAC (cloruro de benzalconio), estos coagulantes sirven de ayuda indirecta al mejorar la eliminación de los residuos orgánicos DOM (Dissolved Organic Matter), que son precursores de los subproductos de la desinfección DBP (Disinfection By-products). Sin embargo, el estudio también señala que, aunque la coagulación-clarificación es eficaz para deshacerse de los precursores orgánicos, no lo es mucho para eliminar los DBP que ya se han formado.

2.3.4.2 Coagulantes naturales:

Según el artículo de M.S. Islam, et al (2023) titulado “A review on Natural Coagulants in Wastewater Treatment”, se tiene que los coagulantes naturales son sustancias obtenidas de fuentes biológicas como plantas, animales o microorganismos, que se emplean para flocular, coagular y para eliminar contaminantes del agua con residuos. Se describen como:

Estos coagulantes se valoran porque son menos tóxicos, biodegradables, económicos y producen menos contaminantes que los coagulantes químicos.

Coagulantes de origen vegetal: Los coagulantes naturales elaborados a partir de especies vegetales incluyen extractos de plantas o componentes vegetales como frutos, semillas, raíces u hojas. Alguno de estos ejemplos que son comunes en utilizar son las semillas de moringa (*Moringa oleifera*), las semillas de alumbre, las cáscaras de plátano, las semillas de okra, las semillas de sachá inchi.

- **Moringa oleífera:** Esta planta, originaria de la India y extendida por Asia, África y América, se utiliza mucho porque tiene propiedades saludables. Pertenece a la familia de las Moringáceas. Ha demostrado excelentes resultados en el tratamiento del agua, especialmente en la eliminación de diferentes contaminantes como colorantes, partículas en suspensión, turbidez y demanda química de oxígeno. Se ha demostrado que sus semillas enteras y sin cáscara pueden tratar eficazmente el agua formando un polvo hidrosoluble (Okuda 2001, citado en Bravo, 2017).
- **Opuntia ficus-indica:** Esta planta es un tipo de cactus que se adapta fácilmente a regiones en donde hay poca presencia de agua, a veces denominado tuna o cactácea. Presenta floraciones de colores vibrantes, un tallo verde carnoso y hojas con pequeñas espinas. Produce frutos

sabrosos y carnosos. Con resultados notables de más del 70% y el 50%, respectivamente, esta especie se utiliza para eliminar la turbidez y el color del agua (Castellanos, 2017).

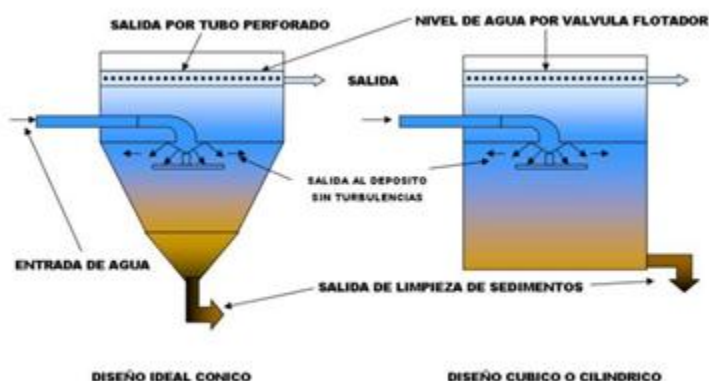
- **Castaño de Indias:** Esta planta es autóctona de Europa y sus extractos tienen un alto contenido en proteínas (entre el 45% y el 55%). Se ha demostrado que estos extractos son muy eficaces para quitar o remover los sólidos totales en suspensión y la turbidez (Sciban 2009, como se menciona en Bravo, 2017).
- **Plantago Mayor L:** Esta planta, que crece en diversos lugares húmedos, se suele moler y disolver sus semillas en una solución de cloruro sódico (NaCl) al 0,9% para extraer sus principios activos. Estos polisacáridos viscosos son los ingredientes activos utilizados para eliminar el color del agua (Beltrán-Heredia 2009, como se menciona en Bravo, 2017).

2.3.2 Decantación convencional:

La decantación es el proceso en donde se separa el agua de la materia sólida o de líquidos que tenga mayor volumen mediante la técnica de trasiego de la capa superior en donde se busca que la materia sólida que es más pesada se sedimente y vaya al fondo. En el caso del proceso de decantación de las aguas para su correcto tratamiento, será la decantación la que permita eliminar los materiales en suspensión mediante el proceso de sedimentación. Este tipo de decantación puede dividirse en dos categorías en función de la dirección del agua: decantadores de flujo hacia los lados (horizontal) y decantadores de flujo hacia arriba (vertical) (Metcalf & Eddy 2014).

Figura 6.

Proceso de decantación convencional del agua. Guía de purificadores de agua (2017)



Nota: Datos obtenidos de <https://www.guiapurificadoresdeagua.com/la-decantacion-del-agua/>

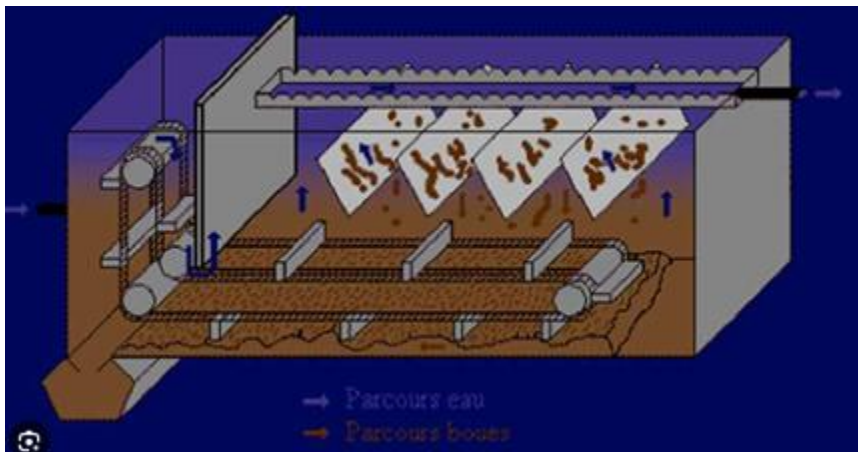
2.3.3 Decantación de alta tasa:

La decantación de alta tasa es una técnica que se emplea demasiado para tratar aguas con residuos, ya que sirve para acelerar la sedimentación de los sólidos en suspensión. Esta tecnología es especialmente útil para plantas con limitaciones de espacio o que requieren una gran capacidad de tratamiento, ya que permite reducir los tanques de sedimentación y aumentar la eficacia del tratamiento (Metcalf & Eddy 2014).

Dado que el decantador de tipo laminar tiene una superficie requerida menor que el decantador convencional, la tasa será mayor en el de tipo laminar. Esto se conoce como "decantación laminar", y es evidente porque el área de sedimentación no es el área superficial, sino el área creada por los módulos de sedimentación horizontal que se implantan en estos sistemas. El término "decantación laminar" se refiere al flujo que se generará entre los sistemas del módulo de sedimentación, que es de tipo laminar. Esta alta tasa se conoce como tasa aparente (flujo por área de sedimentación) (wikiwater, 2025).

Figura 7.

Decantación laminar o de alta tasa wikiwater (2025)



Nota: Datos obtenidos de <https://wikiwater.fr/e24-el-pretratamiento-por>

2.3.3 Filtración:

Una vez que se ha realizado el proceso de decantación del agua para así poder terminar el proceso de sedimentación que clarifica el agua, se pasa a la parte donde se busca filtrar el agua, y este proceso es en donde se trata de filtrar el agua si tiene presencia de materias orgánicas/inorgánicas suspendida. De esta forma, las partículas que no se han sedimentado en la máquina de decantación son retenidas en los diversos filtros que se utilizan. El filtro que comúnmente se utiliza más es la arena por sus propiedades abrasivas y además porque atrapa partículas que son grandes, y esta es puesta sobre una cama de grava como soporte que retiene más partículas.

Los filtros que siempre se utilizan o se prefieren para realizar el proceso de potabilización y son filtros veloces en lo que el agua paso y fue sometida a un tratamiento de floculación y coagulación (Sharma, Daverey & Verma, 2017).

2.3.3.1 Filtración lenta:

Es un método que sirve para tratar el agua y los residuos que tiene, es de bajo coste y bajo consumo energético que combina procesos biológicos, físicos y químicos para eliminar contaminantes. Según Sharma, et al (2017), esta técnica consiste en un filtrante formado por tapones de arena fina y gruesa, en el que se desarrolla una biocapa conocida como manto de arena. Esta biocapa es esencial para eliminar microorganismos patógenos como Salmonella, Giardia, Escherichia coli y virus como el MS2, así como para lograr una elevada reducción de la turbidez, los sólidos en suspensión, los materiales orgánicos y algunos metales pesados. Con una tasa de filtración que oscila entre 0,1 y 0,3 m³/h, el sistema depende de la acción combinada de varios mecanismos, como la adsorción, el filtrado mecánico, la degradación microbiana y la biodegradación. Por su facilidad de uso, eficacia y sostenibilidad, la (OMS) la recomienda como tecnología de punto de uso, especialmente útil en zonas rurales o con acceso limitado a los tratamientos convencionales. Esta técnica ha mostrado su eficacia para tratar el agua como para el tratamiento terciario de las aguas con residuos (Sharma, Daverey & Verma, 2017).

2.3.3.2 Filtración Rápida de flujo descendente:

Según Grueso Domínguez, M. C. (2021), la filtración rápida descendente es fundamental para tratar el agua, en el que el agua pasa a través de un medio granular poroso con el fin de remover los sólidos en suspensión. Este tipo de filtración se basa en mecanismos de transporte (como cernido, sedimentación, impacto y difusión) y adhesión de partículas al medio filtrante, y requiere pretratamientos como coagulación, floculación y sedimentación para funcionar eficazmente. A diferencia de los filtros lentos, los filtros rápidos funcionan con cargas superficiales sustancialmente mayores, lo que afecta al diseño y al coste del sistema de tratamiento.

2.3.3.3 Filtración Rápida de flujo ascendente:

Según, Grueso Domínguez, M. C. (2021), la filtración rápida de flujo ascendente se refiere a un método de tratamiento de agua en el que recorre verticalmente hacia arriba por un filtro de tamiz hecho de grava de varios tamaños que se coloca en tapas. Este tipo de filtrado permite mantener los sólidos mayoritariamente en el fondo del filtro, lo que facilita su limpieza mediante un lavado hidráulico o de fondo. Una de sus ventajas es que la dirección del flujo ayuda a reducir la interferencia de diferencias de temperatura o densidad, mejorando como se comporta hidráulicamente en la unidad al evitar zonas muertas o corticales hidroeléctricas.

2.3.4 Desinfección:

El proceso final del tratamiento de aguas potables siempre será la desinfección, ya que es uno de los procesos más fundamentales para eliminar la mayoría patógenos que se alojan en el agua y que los otros procesos no elimina. Se tienen diferentes tipos de plantas, en algunos casos las plantas son muy sencillas por lo tanto no se puede evitar esta etapa, ya que ésta es la única etapa del proceso que elimina los agentes que causan enfermedades. Algunos ejemplos básicos de desinfección son los siguientes:

- Tratamientos físicos.
- Tratamientos químicos y radiación.

2.3.4.1 Desinfección Física:

Según el artículo de Rosal, R. (2019). “Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas”, la desinfección física del agua se refiere a los métodos que no requieren el uso de productos químicos para deshacerse o inactivar los patógenos. Entre los métodos físicos se encuentran los tratamientos térmicos, la radiación ultravioleta (UV) y los ultrasonidos.

Concretamente, la radiación UV, especialmente en la gama UV-C (200-280 nm), es eficaz para desactivar microorganismos dañando su ADN e impidiendo su capacidad de reproducirse y propagar la infección.

En la implementación de la radiación UV, si se usa la radiación UV con las propiedades del cloro, se puede lograr una mejor desinfección del agua, ya que los radicales cloros ($\text{Cl}\cdot$) e hidróxido ($\cdot\text{OH}$) reactivados que se producen cuando la luz UV y el cloro se combinan debido a un proceso conocido como fotólisis, que se suman al cloro restante necesario para la distribución del agua. Dado que el disulfuro orgánico absorbe la luz UV, las propiedades del agua afectan al funcionamiento del proceso UV/Cl (Wang et al., 2019).

2.3.4.2 Desinfección Química:

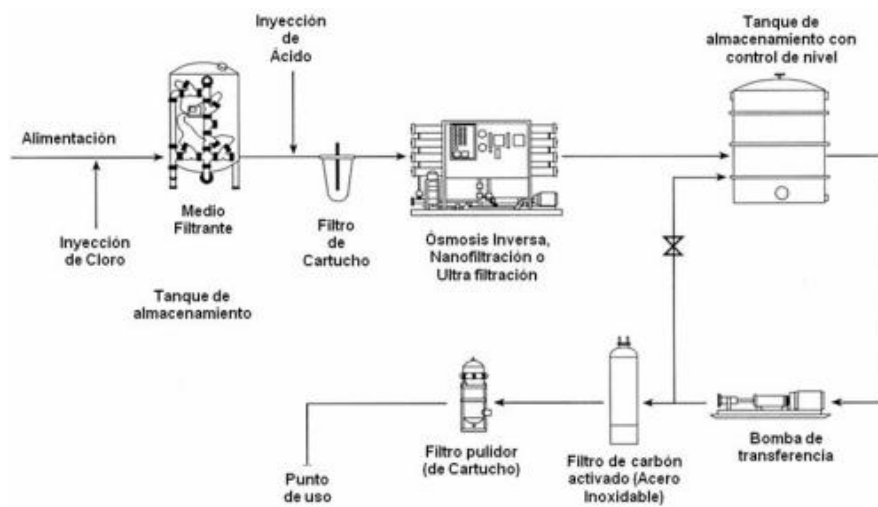
Según el artículo de Rosal, R. (2019). “Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas”, la desinfección química del agua es un proceso mediante el cual se busca quitar o desactivar los patógenos presentes en el agua utilizando agentes químicos, que “incluyen el cloro y sus derivados y el oxígeno, así como otras sustancias menos utilizadas como el permanganato o metales específicos” (p. 1). Estas sustancias actúan modificando la estructura microbiana y la función celular para cumplir las normas sanitarias establecidas para el agua potable humana.

Para eliminar las bacterias u otros microbios que pueda haber en el agua, se utiliza el método de la cloración, este proceso consiste en que tras disolverse e hidrolizarse en ácido hipocloroso (HOCl) en el agua, el Cl_2 se ioniza para formar el ion hipoclorito (OCl^-). Ambos son potentes antimicrobianos, y el total de ellos es cloro libre. La proporción de estas formas varía en función del pH de la solución: la especie OCl^- predomina en el intervalo de pH de 8,5-10, mientras que el HOCl es la forma dominante en el intervalo de pH de 4-6. A 4 °C, el Cl_2

permanece estable durante dos años, y a 24 °C, su concentración desciende al 50 % (Dang et al., 2016; Collivignarelli et al., 2018; Kampf, 2018b).

Figura 8.

Instalación Típica de Tratamiento de Agua en una planta de Bebidas. American Water (2007).



Nota: Datos obtenidos de Pre-Treatment Field Guide: American Water Works Association.2007

2.4 Normativa y estándares de agua potable

En esta sección se revisarán las normas que controlan la gestión del agua en Colombia.

La gestión del agua potable y la regulación de la protección de los ecosistemas hidrológicos y sus usos están separadas, según este análisis.

En este sentido, Colombia cuenta con dos organismos reguladores de la gestión del agua. La política nacional para la gestión integral de los recursos hídricos, la Ley 99 de 1993 y el Código de recursos naturales renovables de 1974 abordan diferentes facetas de la conservación y utilización del agua como recurso natural. El agua limpia como servicio domiciliario se rigen por la Ley 142 de 1994.

El recurso natural del agua

La política nacional del agua se fundamenta en la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, que sostiene diversos usos mutuamente excluidos y dependientes. Salió debido a la crisis que hay sobre el agua, que se estaba presentado en nuestro país, que se manifestaba en la presión insostenible sobre el suministro de agua provocada por el aumento población y demanda de agua (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010a, p.85). El Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) recopiló entonces datos de referencia sobre la disponibilidad, para crear este plan, hay que tener en cuenta los peligros, la calidad y la demanda de agua.

Por otra parte, su objetivo general quedó establecido así:

“Garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos mediante una gestión y un uso eficaces y eficientes, lo que se traduce en la ordenación del territorio y la preservación de los ecosistemas que controlan el suministro de agua, teniendo en cuenta el agua como componente del desarrollo social y económico, y estableciendo procedimientos de participación inclusiva y equitativa ”, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014, p. 96).

Servicio público domiciliario de agua potable

Desde la modalidad privada de prestación local (1875-1930), la gestión local bajo el modelo centralista (1910-1950), la modalidad asistencialista estatal (1945-1988), la modalidad descentralizada para prestar los servicios y la privatización (1980-1994), la política de servicios públicos en Colombia ha experimentado varias etapas distintas a lo largo de su historia. Ya lo decía Jaramillo en 1995. (Jaramillo,1995).

En cuanto al agua específicamente, la Ley 142, nos dictamina que el Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios, fue aprobada por el Congreso el 11 de julio de 1994. Debido a que promovió la competencia abierta en el suministro de servicios domiciliarios, esta ley produjo cambios en la industria del agua del país. Esto estableció el nuevo punto de vista sobre el agua como un servicio público.

El servicio público de acueducto se define como sigue en el punto 14.22 del artículo 14 de esta ley, que trata de las “Definiciones”:

“El servicio público domiciliario de agua potable es otra de sus denominaciones. Es la distribución municipal de agua potable, incluida su medición y conexión. Las operaciones complementarias como la captación y tratamiento del agua, su tratamiento, almacenamiento, conducción y transporte también están cubiertas por esta norma ”, (Congreso de la república de Colombia,1994 p. 34).

El agua presenta las siguientes características al convertirse en un servicio (Manrique et al., 2008).

1. Considerando el desarrollo del producto o servicio que ofrece al mercado, se trata de una actividad económicamente explotable de la que la parte privada se beneficia económicamente.
2. Se llega a la conclusión de que no se podría motivar a un tercero para llevarla a cabo si no se reconociera su valor.
3. Una actividad concesionable: es el componente primario que caracteriza al servicio público porque el Estado era propietario del suministro de agua potable.

4. Una actividad supervisada: garantiza que el privado se adhiere a la misión del Estado controlando la continuidad, la regularidad y la eficacia.

La promoción de la libertad económica por parte de la Constitución de 1991 es uno de los puntos de inflexión en la normalización nacional de los servicios modernos de agua potable. El estado debe proveer la prestación de los servicios, pero no ofrecerlos como tales. Una herramienta para lograr los objetivos sociales del estado y mejorar el bienestar general de la población.

Como resultado, el tipo de gobernanza que se practicaba anteriormente se modifica para incluir al sector empresarial como agente principal. “ Esto se hace entendiendo que el sector empresarial podrá hacer reajustes en términos de cobertura, calidad y precios que beneficiarán a las zonas que tienen más dificultades para acceder al agua.” “Esta intervención tradicional del Estado, que adoptaba la forma de prestación directa de servicios, ha evolucionado hacia la supervisión y gestión de servicios desarrollados por otros agentes” (Isaza, 2014, p. 25).

Además de la readecuación del sector público, cabe destacar que esta Constitución pretendía establecer un estado de derecho, que implica el cumplimiento de la jurisprudencia tanto individuales como colectivos.

Por lo tanto, el gobierno debe defender la justicia social y proteger la dignidad de sus ciudadanos. Sin embargo, incluso estas medidas de protección de la jurisprudencia siguen siendo insuficientes ya que no se protege bien este derecho. Esto podría deberse al contraste fundamental de la Carta Magna:

“Por un lado, el fundamento de la Constitución de 1991 para el desarrollo de un modelo económico y social neoliberal se opone frontalmente a su declaración del Estado Social de Derecho y la ampliación de los derechos sociales” , (Villar, 2007, p. 93).

Es independiente de las disposiciones constitucionales que regulan derechos en general, así como los derechos sociales, culturales y económicos. En cambio, otras fuentes jurisprudenciales colombianas han avanzado al definir el carácter y el alcance de este derecho (Isaza, 2014).

El Tribunal Constitucional ha intentado definir el acceso al agua segura como derecho fundamental desde sus primeras sentencias sobre el tema. En un primer momento, lo hizo de forma indirecta destacando la estrecha relación entre acceso a agua potable segura y derechos fundamentales claramente definidos que siempre se deben de tener en cuenta estos serían; dignidad humana, y posteriormente, mencionó explícitamente el agua como derecho real para todos los seres vivos. Para llevar a la realidad el derecho fundamental, el alto tribunal de Colombia creó posteriormente la idea del mínimo vital de agua (Isaza, 2014, p. 12).

Por lo tanto, resulta paradójico que, si bien el acceso al agua potable es esencial para mantener la vida, este servicio público también esté abierto a las fuerzas del mercado.

Así lo señala la Ley 142 de 1994, régimen de los servicios públicos domiciliarios, que establece que cada empresa de servicios públicos legalmente constituida puede perseguir sus fines sociales y, en consecuencia, fijar un precio que le permita recuperar gastos y ganar dinero. La ley también establece que los usuarios sólo pueden obtener el servicio de agua pagando por él.

2.5 índice que muestra el riesgo por consumo de agua potable (IRCA)

El (IRCA), según el “Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano (2022)”, muestra o evalúa la calidad del agua en función del nivel de riesgo al que se enfrenta la población teniendo en cuenta la ausencia de características del agua. El IRCA se calcula utilizando un medio ponderado que asigna pesos a las características en cada muestra examinada y permite clasificar el agua en cinco niveles de riesgo (sin riesgo, bajo, medio, alto y sanitariamente inviable).

Figura 9.

La Resolución 2115 de 2007 establece que cada característica de calidad del agua tiene una puntuación de riesgo.

Característica del agua	Puntaje de riesgo asociado
Color aparente	6
Turbiedad	15
pH	1,5
Cloro residual libre	15
Alcalinidad total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Dureza total	1
Sulfatos	1
Hierro total	1,5
Cloruros	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio (Al+3)	3
Fluoruros	1
COT (Contenido orgánico total)	3
Coliformes totales	15
Escherichia coli	25
Puntaje total asignado	100

Nota: Datos suministrados por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y el ministerio de la protección social. Resolución 2115. por la cual se describen las características,

instrumentos esenciales y periodicidad del sistema de control y monitoreo de la calidad del agua para uso humano (Jun 22, 2007).

Capítulo 3: Tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento del agua es un procedimiento fundamental para garantizar la salud . Por lo general casi en todos lados, el agua que se recoge de afluentes naturales (ríos, lagos, embalses, etc.), pero como se sabe estos pueden tener contaminantes físicos, químicos y biológicos, que se sabe que son potenciales peligros para la salud. Para eso como seres humanos desarrollamos procesos, técnicas y tecnologías para poder eliminar estas impurezas, lo que se hace es poner en marcha un conjunto de etapas de tratamiento que consisten en la coagulación, sedimentación, filtración y desinfección. Es necesario conocer estos procedimientos desde el punto de vista tecnico, puesto que el derecho de acceso al agua potable es un derecho básico que no está garantizado para toda la población que habita en el mundo.

3.1 Componentes del agua residual

El agua con residuos se compone de diversos materiales orgánicos e inorgánicos que se deben a la actividad humana, esto es muy cambiante a razón de que las causas que afectan a el agua son diversas. Estos factores que suelen afectar el agua vienen siendo como; La concentración o cantidad de agua se ve afectada por la ingesta media diaria y por habitante, y la composición química o calidad también se ve influida por los hábitos de la población.

En un aspecto general, el agua residual tiende a tener aproximadamente un 99.9% de agua y el restante es m.s (material solido) , los residuos que son sólidos están formados principalmente por minerales y materia orgánica. Los minerales provienen de los subproductos

que desechamos durante nuestro día a día y también de la calidad de agua de donde nos abastecemos. La actividad humana produce materia orgánica, compuesta principalmente por carbonatos, proteínas y lípidos.

En el caso de los elementos proteicos que están en el agua con presencia de residuos, estos constituyen entre un 40 y 50% de la materia orgánica presente, y están compuestas por aminoácidos y estos le proporcionan a las bacterias la mayoría de nutrientes para que puedan subsistir. De este porcentaje encontramos que un 50 a 60% de las proteínas presentes en el agua residual se encuentran disueltas y el 20 a 30% está en la fracción que es sedimentable. En comparación a la materia carbonácea esta representa a los hidratos de carbono en el agua y estos a su vez son almidones, azúcares y celulosa, teniendo que los dos primeros son degradables.

En pocas palabras, se cree que la composición del agua residual de la segunda etapa es diversa e incluye los siguientes porcentajes:

- El 20% de la materia es sedimentable, mientras que el 80% no lo es.
- Minerales tienen el 33% y la m.o sedimentable el 67%.
- Minerales tienen el 50% y la m.o no sedimentable el 50%.
- Minerales forman el 50% y la m.o el 50%.

También se debe de considerar si el agua residual está diluida con aguas provenientes de la lluvia, y si contiene partículas contaminantes que si se vierten de nuevo al cauce puede causar graves daños ambientales, y poner en riesgo la salud. Los contaminantes que se suelen encontrar principalmente en el agua con residuos y que pueden encontrarse dispersos o flotando se agrupan en:

- Componentes organicos con un grado que varía en biodegradabilidad.
- Compuestos nitrogenados con origen tanto mineral, u orgánico.
- Compuestos fosforados que provienen de minerales.
- Microorganismos como, virus, parásitos, bacterias, protozoos que son patógenos peligrosos.

Estos elementos le dan al agua residual características como:

- a) **Toxico:** Si hay presencia de muchos compuestos orgánicos/inorgánicos, estos suelen tener malos efectos sobre la vegetación , y fauna local.
- b) **Infecciones:** La transmisión de enfermedades a través del agua es una consecuencia potencial de la presencia de patógenos en el agua.
- c) **Pestilente:** Gracias a la presencia de m.o hay descomposición anaeróbica y esto causa malos olores.

También se debe de tener en cuenta que, si hay descargas de aguas grises e industriales, también se puede causar contaminación térmica y eutrofización de las aguas receptoras.

3.2 Parámetros sobre la calidad de aguas con residuos

El Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) regula la construcción, uso y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas con residuos en Colombia. El capítulo E.2: Caracterización de las aguas residuales determina los atributos mínimos de calidad del agua que deben ser evaluados para el adecuado diseño y funcionamiento de los sistemas de tratamiento. Estas características varían (baja, media, media-alta y alta) de acuerdo con la complejidad del sistema.

Los parámetros de calidad que se deben de tener en cuenta según el (RAS 2000) son:

3.2.1 Parámetros en muestras simples

- Niveles bajo, medio y alto:
 - Oxígeno disuelto
 - Aumento en el calor o temperatura
 - El pH
- Nivel superior:
 - Oxígeno que se ha disuelto
 - La temperatura
 - pH
 - La salinidad
 - La acidez

“La tabla E.2.2 enumera los parámetros que deben medirse para caracterizar las aguas residuales mediante muestreo instantáneo para cada nivel de servicio”.

La Resolución 0303 de 2017 deroga las Resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 del año 2005 y 2320 del 2009 y adopta el RAS.

3.2.2 Parámetros en muestras compuestas o integrales.

Los parámetros aumentan en complejidad dependiendo del nivel del sistema:

- Nivel bajo y medio:
 - Demanda de oxígeno
 - Sólidos que flotan, disueltos y sedimentables
 - Demanda química de oxígeno total y soluble

- Nitrógeno total
- Fósforo soluble y particulado
- Nivel medio – superior :
- Todos los anteriores
- Aceites
- Grasas
- Detergentes
- Nivel alto:
- Todos los anteriores
- Metales grandes como (Pb, Cr, Ni, Cd , Zn, Hg, Cu, Ag)
- Materiales de origen orgánico volátil
- Cloros

“En las muestras compuestas deben analizarse, entre otras cosas, la DBO₅ total y soluble, los sólidos en suspensión, la DQO, el nitrógeno Kjeldahl, el fósforo, los aceites, las grasas, los detergentes, los metales pesados y las sustancias orgánicas volátiles” (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000, p. E.18).

3.3 Proceso de tratamiento:

En la actualidad se agrupan los métodos de tratamientos de agua residuales en dos grupos grandes que son también independientes existen operaciones unitarias y procedimientos unitarios que determinan la eficacia de eliminación de la carga de m.o presente. En el caso primero predomina la aplicación de principios físicos y en el segundo la utilización de químicos o procesos biológicos.

Anteriormente los procesos u/o operaciones unitarias se agrupaban como tratamientos, primarios, secundarios, y terciarios. En estos tratamientos se agrupaban lo que era las operaciones físicas, también absorción biológica de materiales orgánicos, así como procedimientos que eliminaban los contaminantes que no se eliminaban durante el tratamiento inicial o secundario.

La aplicación del efluente tratado, las características de las aguas con residuos, la compatibilidad de las distintas operaciones y procesos, los recursos disponibles para la evaluación de contaminantes y la viabilidad de las distintas combinaciones de métodos desde el punto de vista económico influirán en la selección del mejor proceso.

3.4 Clasificación de los tratamientos de aguas residuales.

Los procesos por el cual se clasifican los procesos para tratar el agua residual y el orden en que se suelen ejecutar son los siguiente:

3.4.1 Tratamiento inicial o preliminar

El tratamiento preliminar que se les hace a las aguas residuales, este busca preparar o acondicionar, el objetivo es salvaguardar las instalaciones, garantizar que las obras de tratamiento sigan funcionando y tratar de minimizar las situaciones desfavorables que, en su mayoría, están asociadas a la estética de las depuradoras.

Estos objetivos de tratamiento inicial o preliminar se observan en la tabla 1.

Tabla 1.

Procesos de pretratamiento del agua con residuos. Vickie G. Olson (2017)

PROCESO	OBJETIVO
Rejas o tamices	Busca eliminar solidos gruesos.
Trituradores	Busca desmenuzar los sólidos.
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de grasas y aceites presentes en el agua.
Preaeración	Control de los olores y el mejoramiento del comportamiento hidráulica.

Nota: Tabla de procesos de pretratamiento del agua residual, donde se evidencian cuáles son los procesos que se utilizan en esta etapa y sus objetivos a considerar.

3.4.2 Tratamiento inicial

El objetivo de este tratamiento es extraer mecánica o físicamente algunos de los componentes sedimentables o flotantes del agua. Esto sugiere que, además de los materiales sólidos, una cantidad sustancial de la carga orgánica -que puede suponer entre el 25% y el 40% de la DBO y entre el 50% y el 65% de los sólidos en suspensión- puede eliminarse mediante un tratamiento básico de las aguas residuales.

Entre los tipos de tratamientos primarios que podemos ver son:

- Sedimentación primaria.
- Filtro de materiales gruesos.
- Floculación
- Precipitación de productos químicos
- oxidación de productos químicos.

- Filtración, sedimentación, floculación y coagulación

Unidades de tratamiento Primario:

3.4.2.1 Tanque Séptico

Las fosas sépticas combinan la separación de residuos y la digestión para tratar las aguas residuales domésticas de una vivienda o conjunto de viviendas. Este tipo de unidad es muy útil en zonas sin acceso a sistemas de alcantarillado, ya que permite un tratamiento parcial del agua servida mediante procesos físicos y biológicos dentro de un espacio cerrado.

También son sistemas independientes que sirven para eliminar el agua sobrante de un hogar o conjunto de hogares; mezcla sedimentación y digestión. Los sedimentos recogidos suelen entregarse a una instalación de tratamiento tras ser reexaminados periódicamente.

3.4.2.2 Tanque Imhoff

Un tanque Imhoff es un dispositivo de tratamiento primario utilizado para eliminar los sólidos en suspensión del agua doméstica sobrante. Consiste en una estructura de doble cámara que permite la sedimentación en la sección superior y la digestión de la mitad inferior sin interferir entre sí. Su diseño sencillo, libre de componentes mecánicos, lo hace adecuado para comunidades de hasta 5.000 habitantes, en particular aquellas en las que se necesita una solución económica y de bajo mantenimiento para el tratamiento inicial del agua servida.

3.4.2.3 Filtrantes Anaeróbicos de Flujo vertical o ascendente

Según el estudio de grado “Eficiencia de los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente en Aguas Remanentes de la Granja Experimental Botana: Un estudio”, de Moncayo Loaiza, M. M., & Grijalba Zarama, D. (2017), los Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente (FAFA) son sistemas de tratamiento biológico que funcionan en un ambiente anaeróbico y su función es remover la

materia orgánica de las aguas con residuos. Ya que los filtros tienen una estructura que hace que el agua con residuos fluya hacia arriba a través de un medio que filtre, facilitando la sedimentación de sólidos y el contacto prolongado con los microorganismos. Esto permite una purificación eficaz del agua, sobre todo en procesos relacionados con actividades pecuarias.

3.4.2.4 Reactor Anaeróbico de Pantallas (RAP)

Según el artículo Romero Rojas, J. A., & Rojas Hernández, F. (2001). “Una evaluación del RAP”, el Reactor Anaeróbico de Pantallas (RAP) es un tipo de reactor diseñado para el tratamiento de aguas con residuos que opera en condiciones estrictamente anaeróbicas. Se distingue por tener una serie de compartimentos internos o de pantalla que canalizan el flujo del agua de forma ascendente y en forma de pistón. Esta característica permite mantener una alta concentración de biomasa activa, alargando el tiempo de contacto entre el agua con residuos y los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica. Gracias a esta capacidad, el RAP mejora significativamente la eficacia de la eliminación de la carga contaminada, incluidas las aguas residuales con bajas concentraciones. También ofrece ventajas operativas, como bajos costes de funcionamiento y mantenimiento y sencillez de construcción. Esta tecnología es muy útil en comunidades pequeñas y sistemas descentralizados.

3.4.2.5 Reactor Anaeróbico de Flujo hacia arriba o ascendente a través un manto de lodos (UASB)

Según el artículo “Evaluación de un reactor de manto de lodo con flujo ascendente (UASB) con cambios de velocidad de alimentación: Un estudio”, de Galindo, E., et al (2008), el reactor UASB es un sistema de tratamiento anaerobio bioquímico que permite eliminar el agua residual permitiendo que el líquido ascienda a través de un manto de lodos activo compuesto por microorganismos. Este tipo de reactor facilita la degradación de las m.o y la producción de

biogás sin necesidad de medios de soporte, ya que el mismo lugar actúa como medio de contacto. Esta clase de reactor facilita la degradación de la m.o y la producción de biogás sin necesidad de medios de soporte, ya que el mismo lodo sirve como medio de contacto. El diseño de la UASB permite una separación eficaz de sólidos, líquidos y gases, y su funcionamiento está influenciado por factores como la velocidad ascendente y el tiempo de retención hidráulica, que contribuyen a la pérdida de biomasa, la eficiencia de eliminación de DQO y la producción de metano.

3.4.3 Segundo tratamiento

Dado que las aguas residuales han sido sometidas previamente a un tratamiento primario y el agua ha sido acondicionada, el objetivo del tratamiento secundario es disminuir la cantidad de compuestos orgánicos en el agua, En esta etapa sólo se llevan a cabo procesos biológicos. La materia orgánica que estaba disuelta o finamente dividida se reduce o transforma en sólidos sedimentables floculantes mediante este proceso, en donde se aprovecha para separarlos mediante el proceso de sedimentación en tanques utilizados para la decantación. Los procesos más utilizados son los filtros percoladores y los lodos activados.

Normalmente, estos procedimientos se ajustan para satisfacer las demandas únicas de cada tratamiento. Estos procedimientos también incluyen el tratamiento anaerobio, que es uno de los más populares por su eficacia y economía, el tratamiento biológico con oxígeno puro y las lagunas de estabilización y aireación. Esta categoría de tratamientos biológicos se compone de los siguientes y tiene una eficacia del 85% al 95% en la eliminación de la DBO.

3.4.3.1 Aeróbicos

Una técnica biológica denominada tratamiento aeróbico de aguas residuales emplea oxígeno para descomponer los contaminantes orgánicos y otros contaminantes como el flúor y el

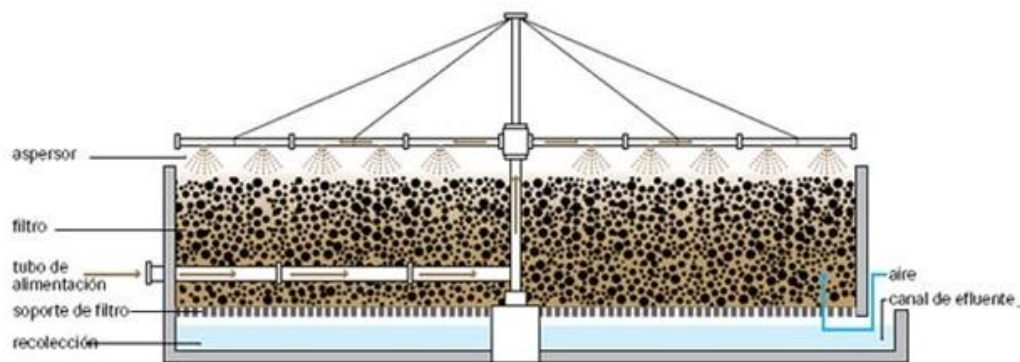
nitrógeno. Un compresor o soplador de aire es un dispositivo mecánico de aireación que mezcla constantemente oxígeno con el agua residual. El contenido orgánico del agua sobrante es consumido por microbios aeróbicos, que lo transforman en dióxido de carbono y biomasa biodegradable.

3.4.3.2 Filtros Percoladores

Los filtros percoladores son discos en el que el agua del desecho decantado sobre el filtro se deja caer sobre este. Cuando el agua pasa a través de los poros del filtro, la m.o se descompone por la biomasa que cubre la sustancia del filtro.

Figura 10.

Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Tuset, S. (2017).



Nota: Datos obtenidos de Tuset, S. (2017). Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Condorchem Enviro Solutions. <https://condorchem.com/es/blog/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

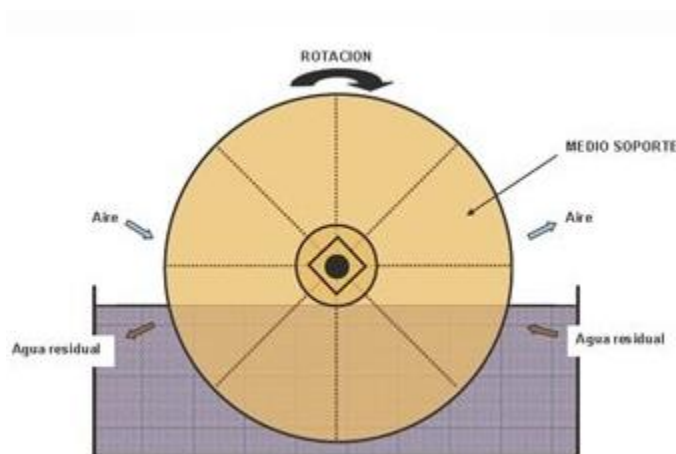
3.4.3.3 Discos Biológicos Rotatorios

Un disco biológico rotatorio es un disco que su interior tiene un reactor, una colección de discos que giran sobre un eje horizontal compuestos de un material determinado (madera, PVC,

polietileno ondulado o poliestireno ondulado). Una capa de biomasa bacteriana se forma lentamente sobre este soporte, utilizando los materiales orgánicos solubles en las aguas residuales como sustrato para su metabolismo. Al entrar en contacto el aire con la superficie del disco, la biomasa que se adhiere a él absorbe el oxígeno necesario para que el material orgánico del agua sobrante se descomponga durante el período de inmersión.

Figura 11.

Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Tuset, S. (2017).



Nota: Datos obtenidos de Tuset, S. (2017). Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Condorchem Enviro Solutions. <https://condorchem.com/es/blog/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

3.4.3.4 Lodos Activados

Según Guananga Díaz et al., (2024), es una técnica biológica aeróbica muy popular para el segundo tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales. consiste en un reactor donde una gran población de microorganismos, principalmente bacterias heterotróficas como *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, descomponen los materiales

orgánicos disueltos, cuando hay oxígeno presente. Con la ayuda de un tanque aireado, un tanque sedimentador secundario y un mecanismo de recirculación del lodo, el sistema puede eliminar la demanda biológica de oxígeno (DBO) con una alta eficiencia-reducciones del 85 al 95% son posibles. Otros microorganismos que mejoran la floculación y la claridad del efluente incluyen rotíferos, hongos y protozoos. Este enfoque tiene ventajas como una alta eficiencia.

Tipos:

Zanjón de Oxidación: Un ejemplo de sistema biológico de tratamiento para el agua sobrante es un zanjón oxidativo, que actúa activando los iones por exposición prolongada al aire. Este sistema se trata sobre un canal elíptico u oval con curvaturas que permiten la circulación continua del licor mezclado (agua que todavía contiene microorganismos). Los acondicionadores de aire mecánicos, como cepillos horizontales, jaulas o discos, se utilizan para mezclar y oxigenar el agua, promoviendo así la actividad biológica para la eliminación de materia orgánica.

Hay dos tipos:

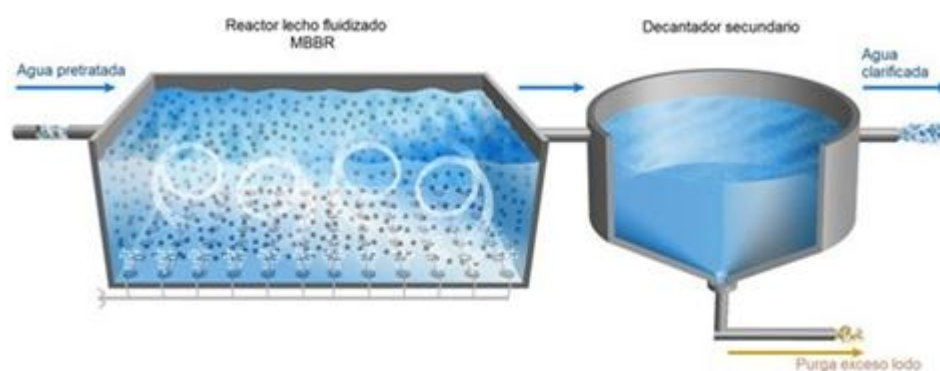
- Aireación Prolongada
- Aireación Escalonada

Reactor Biológico de Membrana (MBR): Con la característica única de tener una membrana de ultrafiltración en su interior, este reactor es comparable a los fangos activos. Este método ofrece ventajas significativas sobre los decantadores secundarios convencionales al permitir separar el fango y el líquido a través de membranas. Es una alternativa para situaciones en las que hay poco espacio.

Reactores Biológico de Biopelícula en Lecho Móvil (MBBR): Los MBBR son muy utilizados ya que permiten el cultivo bacteriano purificador, es un biofilm que se adhiere a soportes con una superficie específica alta (relleno de filtro). Los soportes del reactor biológico están en movimiento y sumergidos.

Figura 12.

Reactores Biológico de Biopelícula en Lecho Móvil (MBBR). Tuset, S. (2017).



Nota: Datos obtenidos de Tuset, S. (2017). Sistemas con reactores aeróbicos para tratar aguas residuales. Condorchem Enviro Solutions. <https://condorchem.com/es/blog/sistemas-con-reactores-aerobicos-para-tratar-aguas-residuales/>

3.4.4 Tercer tratamiento

Este busca complementar los procesos mencionados para producir efluentes más sanos con cargas contaminantes reducidas. Estos efluentes pueden utilizarse para diversos fines, como el agua industrial, el ocio o la recarga de acuíferos, entre otros. A continuación, se enumeran los productos químicos o compuestos que se eliminan con frecuencia:

- a. Nitratos y fosfatos.
- b. huevos de parásitos.

- c. químicos que causan estrés.
- d. Algas
- e. Virus y bacterias
- f. Radionucleidos
- g. Sólidos disueltos y totales.
- h. Temperatura.

3.4.5 Tratamientos mediante lagunas

El tipo más básico de tratamiento de aguas con residuos son los estanques de estabilización. Estos sistemas vienen en una variedad de formas, cada uno de los cuales requiere una cantidad particular de espacio y simplicidad operativa.

3.4.5.1 Clasificación de las Lagunas

Lagunas Aeróbicas: Los procedimientos de remoción de DBO son similares a los procedimientos de la facultad en Laguna. Una parte significativa de los sólidos de aguas residuales y biomasa se descompone anaeróbicamente en el fondo de la laguna, lo que es opcional.

Alguna de las características más fundamentales de las lagunas aerobias es qué; Tienen poca profundidad, la profundidad suele ser de entre 30 y 50 cm, permite que la luz solar entre más fácilmente y favorece la fotosíntesis de las algas que allí se encuentran. Mediante la fotosíntesis, las algas liberan oxígeno en el agua, que las bacterias aerobias utilizan para descomponer los materiales orgánicos y producir biomasa. Con una eficacia de eliminación superior al 90%, esta técnica permite disminuir notablemente la (DBO).

Laguna Anaeróbicas: Las lagunas anaeróbicas más profundas y pequeñas eliminan entre el 50 y el 70 por ciento de la DBO, mientras que la laguna opcional mantiene la DBO en reposo. El área del sistema es menor que la de una laguna alternativa.

Las características fundamentales de las lagunas anaeróbicas es que estas lagunas suelen tener una profundidad entre 3 y 5 metros y retenciones hidráulicas con tiempos de 2 a 5 días. Su principal función es la reducción de sólidos en la superficie y la (DBO), alcanzar eficiencias de remoción de sólidos en la superficie del 50 al 60% y de DBO del 40 al 50%. Durante esto se crea gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) debido a la digestión anaerobia de la materia orgánica. Estas lagunas requieren un mantenimiento periódico, incluyendo la remoción de lodos acumulados cada 5 a 10 años y el control de olores, ya que pueden producir compuestos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) que generan olores desagradables.

Lagunas Aireadas: La alta energía introducida por la unidad de volumen del lago hace que los sólidos (en su mayoría biomasa) permanezcan dispersos en el medio líquido o en una mezcla completa. La mayor concentración de bacterias resultante en el medio líquido mejora la capacidad del sistema para mover la DBO, lo que permite que la laguna tenga un volumen más bajo que una laguna facultativa con aire acondicionado. Sin embargo, hay altas concentraciones de solutos (bacterias) en las aguas residuales que deben ser eliminadas antes de que se produzca el vertimiento del receptor corporal. Las condiciones para tal remoción son proporcionadas por la laguna de decantación donde se encuentra el agua abajo. En períodos de algunos años, se debe retirar el lodo de la laguna de decantación.

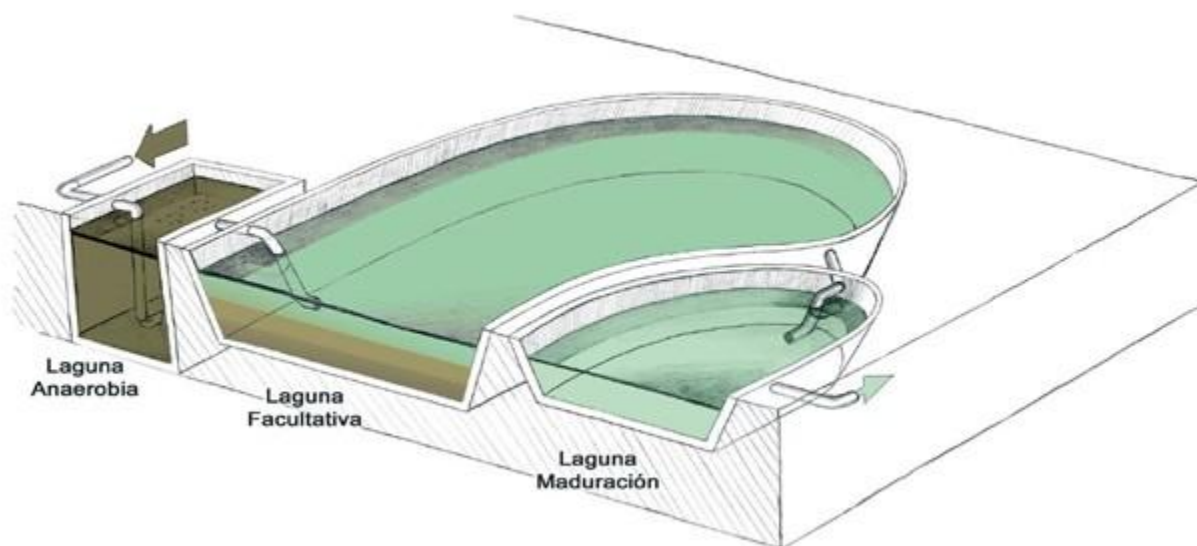
Lagunas facultativas: El tipo más básico de sistema de separación estabilizadora son las separaciones opcionales. En esencia, el procedimiento implica mantener las aguas residuales el

tiempo suficiente para que surjan procesos de estabilización de la materia orgánica. Por lo tanto, la preponderancia de los fenómenos naturales está relacionada con las ventajas y desventajas principales de las lagunas opcionales.

Lagunas de maduración: La eliminación de los organismos nocivos es el objetivo principal de la brecha de maduración. Los factores ambientales desfavorables para las bacterias patógenas, como la luz UV, el pH alto, el DO elevado, la temperatura corporal reducida, la falta de nutrición y la depredación por otras especies, son predominantes en las lagunas de maduración. Los huevos de helmintos y quistes protozoarios tienen tendencia a asentarse. Las lagunas de maduración son un postratamiento para procesos que eliminan la DBO. A menudo se construyen como un único espacio con mamparos (a veces llamados deflectores) que lo dividen, o como una serie de espacios. La eficacia de la erradicación coliforme es muy alta.

Figura 13.

Esquema general de un proceso de lagunaje Instituto tecnológico de Canarias (2011)



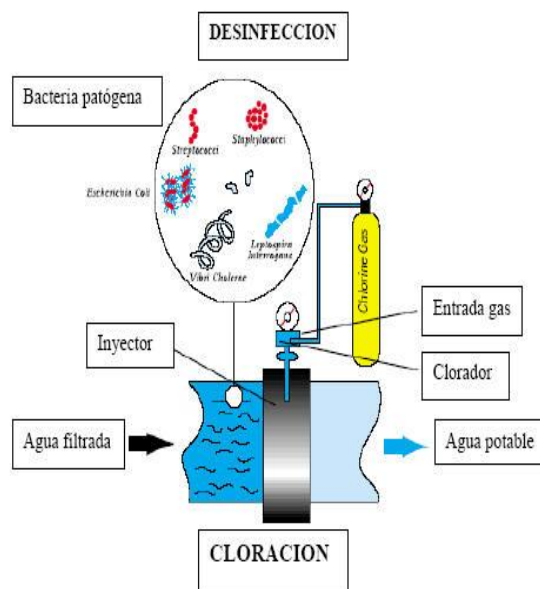
Nota: Datos obtenidos de <https://depuranatura.blogspot.com/2011/05/lagunas-anaerobias.html>

3.4.6 Tratamiento para desinfección de las aguas con presencia de residuos

Antes de que las aguas residuales tratadas se eliminen definitivamente, se utilizan sobre todo para reducir la cantidad de organismos que afectan. Quistes amebianos en aguas residuales tratadas antes de su eliminación se buscan remover estos porque son causantes de enfermedades y es de suma importancia su remoción. En concreto, los organismos causantes de enfermedades se destruyen como parte del proceso de desinfección. La desinfección química a base de cloro es el método más utilizado, aunque la radiación también es importante.

Figura 14.

Proceso de desinfección químico. Instituto del agua (2024)



Nota: Datos obtenidos del Instituto del agua. (2024, 19 enero). Cloración de Aguas Residuales:

Guía Esencial para un Tratamiento Efectivo | Instituto del Agua. Instituto del

Agua. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/cloracion-de-aguas-residualesaguas-residuales/>

3.4.6.1 Desinfección con lagunas de maduración

El artículo “Disinfection Processes and Mechanisms in Wastewater Stabilization Ponds: A Review”, de Liu, Hall & Champagne (2018), afirma que para potabilizar el agua se utiliza varios procesos, estos procesos pueden ser físicos, químicos y biológicos para desinfectar las lagunas de maduración, esto se hace ya que hace parte del sistema de estanques de estabilización de aguas residuales. Factores como la radiación solar, el elevado pH provocado por la fotosíntesis de las algas, la sedimentación, la degradación microbiana y la retención a largo plazo del agua en condiciones reguladas son algunos de los factores más importantes. Estos elementos funcionan sin necesidad de insumos químicos externos, lo que hace que el sistema sea una forma eficaz y asequible de eliminar bacterias, virus, protozoos y huevos de helmintos.

3.4.6.2 Desinfección por cloración

La sustancia más utilizada para esterilizar y oxidar las distintas sustancias químicas del agua es el cloro. Pero en ocasiones, la presencia de otras sustancias con las que el cloro es menos eficaz o la formación de compuestos orgánicos clorados de muy dudosa calidad (como los trihalometanos) cuando el cloro reacciona con otras sustancias orgánicas impiden que se cumpla el objetivo previsto.

A continuación, se enumeran los elementos que resaltan en el proceso de desinfección y tratamiento con cloro:

- La concentración y la distribución de los organismos que deben eliminarse, así como la concentración y la distribución del desinfectante.
- El tipo de agua tratada y su temperatura.
- La duración del contacto cloro-agua.

- El pH del agua.

Se debe de tener cuenta las consideraciones anteriores y debido a que los organismos que se encuentran en el agua pueden ser extremadamente variados y tener necesidades variables de cloro para que así se pueda dar su correcta eliminación. Para que la cloración sea eficaz y el agua tratada sea segura es necesaria una dispersión constante de cloro en el agua y una dosificación suficiente. El sabor ya es detectable a partir de 0,1 a 0,2 partes por millón de cloro residual libre en el agua, y se hace más evidente cuanto mayores son la temperatura y la dureza del agua.

3.4.6.3 Otros tipos de desinfección

- **Luz Ultravioleta:** La luz (UV), es una radiación no ionizante, y debido a su facilidad de uso y seguridad, es la mayor técnica que se utiliza y hace gran parte del trabajo para la desinfección del agua y esto se debe realizar a una longitud de onda de 250 nm para que sea eficaz
- **Ozonización:** El ozono se ha utilizado para desinfectar el agua potable, ya que muchas empresas de agua lo emplean, con una producción diaria de más de 100 kg. A pesar de que el color ha cambiado, no hay pruebas de que alguien haya sido perjudicado por las enormes cantidades de oxígeno que se han utilizado durante el siglo pasado. Sin embargo, el ozono debe manejarse con cuidado.

El oxígeno, un oxidante muy energético que es una forma alotrópica del oxígeno, se utiliza para desinfectar el agua y es conocido por su eficacia para oxidar compuestos orgánicos e inorgánicos, especialmente hierro y manganeso. Es más eficaz que el cloro para eliminar bacterias, virus y otros patógenos del agua debido a sus potentes cualidades oxidantes y

desinfectantes. A diferencia del cloro, el potencial de oxidación de 2,07 voltios es superior al de 1,36 voltios.

3.4.7 Tratamiento de lodos

Para tratar lodos, se usa varios productos, entre los que se incluyen los restos de decantación, la eliminación de arenas y el cribado. En este caso concreto se trata de los productos que se mantienen en los decantadores primarios y secundarios y en los decantadores secundarios, que constituyen la mayor parte de los subproductos.

El alto contenido en m.o putrescible de los lodos obliga a acondicionarlos antes de su eliminación, ya que son totalmente perjudiciales para el medio ambiente y no pueden dejarse a la intemperie.

Los distintos tipos de plantas de tratamiento de aguas con residuos producen distintos tipos de lodos. La sedimentación primaria produce lodos, que suelen representar entre el 0,22% y el 0,93% del volumen de aguas residuales y oscilan entre el 63% y el 83%. Los lodos contienen un porcentaje de compuestos volátiles.

Dependiendo de las técnicas empleadas, la cantidad de lodos procedentes del proceso de sedimentación secundaria varía. Lodos de filtración por goteo tienen un porcentaje medio de sólidos volátiles del 60% , así como un contenido de sólidos que cae entre el 0,08% y el 0,10% del caudal tratado. El rendimiento típico de los lodos activados es de 1,2 a 1,5 veces el volumen de agua que ha sido tratada hasta un 97% a 99% de humedad, y suele oscilar entre el 1,2% y el 1,1% del caudal tratado.

Las técnicas habituales de manipulación de lodos incluyen concentración, incluyendo espesamiento, digestión, acondicionamiento, secado o deshidratación, quemado y oxidación. Las tres técnicas más comunes para reducir la materia orgánica son la oxidación húmeda, la incineración y la digestión. Otras técnicas para eliminar la humedad son la deshidratación, el acondicionamiento y la concentración.

Lo que se busca al tratar los lodos es:

- a. Reducir significativamente la cantidad de materiales orgánicos volátiles.
- b. Añadir más sólidos fijos a la mezcla.
- c. Disminuye la cantidad de humedad.
- d. Separar las aguas residuales de los lodos para aumentar el drenaje.
- e. Producción de gas, principalmente metano.

Las propiedades de los lodos procedentes de diversos procedimientos de tratamiento se enumeran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características de los lodos presentes en las aguas con residuos. Oropeza García, N., (2019).

TIPO DE LODO	ASPECTO	OLOR	SECADO	HUMEDAD (%)
Primario	Pardo y pegajoso	Fuerte	Difícil	95.0 – 97.5
Secundario				
Filtro biológico	Ceniciento floculento	Medio	Medio	92.0 – 95.0
Lodo activado	Marrón floculento	Suave	Difícil	98.5 – 99.5
Precipitación química	Ceniciento gelatinoso	Fuerte	Difícil	93.9 – 95.0
Lodo séptico	Negro	Fuerte		
Lodo digerido	Negro homogéneo	Suave	Fácil	S.P 87 F.B 90 L.A 93 P.Q 90
S.P Sedimentador primario F.B Filtro biológico L.A Lodo activado P.Q Precipitación química.				

Nota: Tabla de características de los lodos, en donde se explica cuáles son los tipos de lodos que se dan por los procesos, y muestra sus características a tener en cuenta (Oropeza García, N., (2019).

3.4.7.1 TIPOS DE LODOS

Lechos de secado: Durante el proceso de secado se producen dos transferencias: una de calor y otra de masa. Cuando se aplica calor al agua del material que hay que secar, se elimina el vapor de agua. Al evaporar el agua contenida en los lodos, este tratamiento térmico normalmente implica el uso de hornos e incineradoras, así como la exposición al sol- puede reducir el peso de los lodos y eliminar gérmenes peligrosos (Cano, 2014).

Los secadores se pueden dividir básicamente en dos clases, según Cano (2014):

- **Secadores adiabáticos:** Este tipo de equipos utiliza un gas caliente para suministrar calor al agua de los lodos y, al mismo tiempo, liberar el vapor que se produce. Este gas caliente puede proceder de la combustión o del aire caliente.
- **Secadores no adiabáticos:** estos secadores transmiten calor al material de los lodos mediante el uso de una superficie sólida, como una placa metálica que sostiene el producto. Una bomba elimina el vapor de agua que se emite como resultado del vacío que se forma dentro del sistema; si el producto está expuesto al aire, la circulación de aire también puede eliminar el vapor de agua.

Incineración: Es el proceso de eliminar los lodos quemándolos. Los lodos de depuradora, sobre todo los de deshidratación, deben deshidratarse antes de quemarse debido a su alto contenido en agua. Los gases que salen de la incineradora suelen secar los lodos. Debido a su alto contenido calorífico, requieren muy poco combustible para arder (Caballero, 2020).

A medida que avanza el proceso, se oxidan completamente todos los olores, enfermedades y residuos orgánicos, por lo que se trata de un proceso de estabilización de sólidos muy completo. Se lleva a cabo a temperaturas superiores a 800 °C en una atmósfera oxigenada para lograr la descomposición de las moléculas orgánicas. Es esencial tener en cuenta la composición de los lodos, especialmente su capacidad calorífica, la presencia de metales grandes o pesados y la presencia de materia orgánica nociva, antes de iniciar este procedimiento. La

emisión de estos contaminantes como gases de combustión puede dar lugar a problemas de calidad del aire (Pinzón & Tellez, 2022).

Figura 15.

Hornos de incineración. Cda (2020)



Nota: datos obtenidos de González y Juan Carlos García, M. (s/f). Página Web del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. Usal. Es. Recuperado, de <https://cidta.usal.es/>

Filtros prensa: Esta técnica deshidrata los lodos sometiéndolos a alta presión. Las altas concentraciones de solutos en el lodo resultante, la filtración transparente, la deshidratación de materiales secos y una pureza del lodo del 35-45% son algunas de sus ventajas. Su complejidad hace necesario el uso de personal especializado y cualificado para su manejo y mantenimiento, lo que supone una desventaja (Pinzón & Tellez, 2022).

Centrifugación: Debido a la eficacia de la centrifugación en la eliminación de fases acuosas, especialmente en el caso de lodos oleosos o de hidrocarburos, es frecuente su uso en el tratamiento de lodos para separar las fases que los componen (Servicios Ecológicos, 2022).

Digestión de lodos: Al aplicar un tratamiento de digestión, los lodos se estabilizan debido a la disminución de bacterias nocivas. Además, los sólidos podrán reducirse ya que la mineralización los convertirá en dióxido de carbono y agua. Existen dos tipos de digestión: anaeróbica y aeróbica.

- **Digestión anaerobia:** El proceso por el que las bacterias descomponen los materiales orgánicos en un entorno sin oxígeno se conoce como digestión anaeróbica. Esta descomposición produce un biosólido rico en nitrógeno que puede utilizarse como materia prima para el compostaje o para mejorar el suelo, así como biogás, una fuente de energía renovable (Pérez, 2016).
- **Digestión aerobia:** Al procesar materia orgánica volátil o sólidos fraccionadores que producen olores desagradables en productos que no lo hacen y que minimizan la concentración de microorganismos patógenos, el objetivo principal de la digestión aeróbica es estabilizar los lodos o lechadas. En consecuencia, los productos químicos orgánicos sólidos que se encuentran en el lodo son sometidos a digestión aeróbica, lo que implica la transformación de microbios aerobios en productos inodores de CO₂ y H₂O (Pérez, 2016).

3.5 Eficacia del procedimiento de tratamiento

Las eficiencias de eliminación de los procedimientos para tratar inicialmente las aguas con residuos se muestran en la Tabla 3. También es importante tener en cuenta las numerosas opciones de tratamiento de aguas residuales, que se dividen en tratamientos primarios,

secundarios, terciarios y preparatorios. Gestión de los lodos y remoción del agua con residuos también deben tenerse en cuenta.

Tabla 3.

Eficacia de los procesos de tratamiento de aguas con residuos (RAS 2000)

PROCESO	DBO	DQO	SOLIDOS SUSPENDIDOS
Tratamiento preliminar			
Cribado fino	5 – 10	5 – 10	2 – 20
Cloración crudo o sedimentado	15 – 30	--	--
Tratamiento primario			
Sedimentación simple	25 – 40	20 – 35	40 – 70
Precipitación química	50 – 85	40 – 70	70 – 90
Tratamiento secundario			
Filtro percoladores	50 – 95	50 – 80	50 – 92
Lodos activados	55 – 95	50 – 80	55 – 95
Lagunas			
Primarias	75 – 85	60 – 70	85 – 95
Secundarias	90 – 95	80 – 70	85 – 95
Terciarias	85 – 95	60 – 70	85 – 95
Tratamiento terciario			
Cloración aguas tratadas	-	-	-

Nota: Tabla de eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales, donde se pueden observar los tratamientos y procesos a seguir, con los valores y parámetros establecidos por el ras (RAS 2000)

3.6 Normativa sobre el vertimiento de aguas contaminadas en Colombia.

3.6.1 Decretos:

3.7.1.1 Decreto 1541 de 26 de julio de 1978.

Las normas que rigen en Colombia como el decreto 1541 del año 1978, “De las aguas no marítimas”, se reglamenta por este decreto, que también desarrolla parcialmente la Ley 23 de 1973. Crea sistemas de control y vigilancia, regula los vertidos, clasifica los cursos de agua en función de sus vertidos e impone sanciones y restricciones.

3.6.1.2 Decreto 1594 de 1984.

El Título I de la Ley 09 de 1979, el Capítulo II del Título VI-Parte III-Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 contienen importantes regulaciones sobre el uso del agua y los residuos líquidos. Salvo los artículos 20 y 21, fue derogado por el artículo 79 del Decreto Nacional 3930 de 2010.

3.6.1.3 Decreto 302 de 25 de febrero de 2000.

Los servicios ofrecidos por las empresas de servicios públicos se rigen por la Ley 142 de 1994, domiciliarios, incluyendo las empresas comerciales, residenciales, industriales, oficiales y especiales; establece las obligaciones y responsabilidades de los usuarios, el régimen de acometida y los mediadores; regula el mantenimiento de las instalaciones domiciliarias y las causas de porque se terminan estos.

3.6.1.4 Decreto 3930 de 25 de octubre de 2010.

Regula en gran medida el uso del agua y los vertimientos líquidos, entre otros requisitos, según la Ley 9 de 1979, nombra al ministerio de vivienda y desarrollo territorial, organismo encargado de fijar los vertimientos máximos y estándares para el suelo, los sistemas de alcantarilla pública y los cursos de aguas someras y marinas.

3.6.1.5 Decreto 1076 de 26 de mayo de 2015.

A través de esto se desarrolla el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible. En este decreto se recopila la normativa vigente en materia ambiental. Se describe la estructura administrativa general y el funcionamiento del sector, así como la normativa relacionada con la biodiversidad, las licencias y permisos ambientales, los proyectos de mejora de infraestructuras de transporte, la ordenación y gestión de los hábitats acuáticos y, la mejor forma de usarlos, las aguas marinas, la calidad del aire, los residuos peligrosos y la autonomía y sostenibilidad regional.

3.7.2 Resoluciones.

3.6.2.1 Resolución 1433 de 2004.

El artículo 12 del Decreto 3100 de 2003 contiene normas que rigen la adopción de PSMV, planes para la gestión de aguas residuales y saneamiento, y otras opciones.⁶³ Describir los métodos de control de la autoridad ambiental, el mínimo necesario de planes de aguas residuales y saneamiento, y la demanda de que los proveedores de servicios de alcantarillado los apliquen durante un período mínimo de diez años.

3.6.2.2 Resolución 0075 de 2011.

El objetivo de esta resolución es adoptar el formato de presentación de informes sobre el cumplimiento de la norma para la descarga oportuna en el sistema público de alcantarillado.⁶⁴ Este documento debe ser presentado a las autoridades ambientales por las empresas públicas de servicios de alcantarillado una vez al año. Se busca establecer un formato de reporte para los suscriptores y/o usuarios cuyos predios o locales presten servicios comerciales, industriales, oficiales y especiales, con el fin de hacer seguimiento al cumplimiento de la norma de vertimiento oportuno al sistema de alcantarillado público. Cuando se detecte que el usuario no está cumpliendo con la norma de vertimiento oportuno al medio ambiente, el prestador del servicio de alcantarillado se pondrá en contacto con la autoridad ambiental competente para que se tomen las acciones pertinentes.

3.6.2.3 Resolución 631 de 2015.

Esta especifica normas suplementarias y valores y límites máximos admisibles para las descargas puntuales en los sistemas públicos de alcantarillado y las masas de agua. Las cantidades máximas y los parámetros que se permiten en función de la naturaleza de la actividad comercial, industrial o de servicios se especifican en el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010. Estos requisitos deben ser seguidos por aquellos que vierten cuerpos de agua y sistemas públicos de alcantarillado en la superficie.

3.6.2.4 Resolución 330 de 2017.

Esta regula los requisitos técnicos que deben cumplirse en los procesos de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y reparación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y

aseo. Esboza los requisitos técnicos para los sistemas que tratan las aguas residuales y los subproductos que producen.

Capítulo 4: Impactos ambientales y retos actuales.

4.1 Consecuencias de un tratamiento inadecuado.

4.1.1 Consecuencias inmediatas

Las aguas residuales no tratadas contribuyen directamente a ensuciar o contaminar el agua. Las masas de agua contienen elementos tóxicos que afectan a la vida acuática y alteran los ecosistemas. Numerosas especies están en peligro, y tanto plantas como animales sufren como consecuencia de la degradación de su hábitat natural. Dañar el agua contaminándola afecta también a las personas. Las comunidades cercanas a fuentes contaminadas se enfrentan a riesgos sanitarios y tienen menos acceso a agua limpia. Los contaminantes del agua potable pueden provocar enfermedades y otros problemas de salud (teamb, 2022).

4.1.2 Impacto a largo plazo

Aún más preocupantes son las consecuencias a largo plazo de las aguas con residuos no tratadas. La acumulación de desechos que contaminan las masas de agua puede provocar la eutrofización, un proceso que reduce la vida marina. Este proceso modifica los hábitats y afecta a la biodiversidad. Además, los contaminantes pueden penetrar en el suelo y afectar a las aguas subterráneas. Esto pone en riesgo las fuentes de agua y complica la futura depuración y tratamiento del agua. La contaminación es un gran problema persistente que requiere atención inmediata (teamb 2022).

4.1.3 Impacto Ambiental de las Aguas No Tratadas

La contaminación de la vida acuática es uno de los principales impactos ambientales de las aguas con residuos no tratadas. Los altos niveles de contaminantes que entran en ríos, lagos y océanos provocan el deterioro de estos ecosistemas acuáticos. Los contaminantes químicos y biológicos afectan negativamente a la vida marina y a la pureza del agua. Cuando el agua sobrante se libera sin tratar, crecen algas peligrosas. La vida acuática no puede sobrevivir en las zonas muertas creadas por estos gases, que también consumen oxígeno. Los peces y otras especies acuáticas se ven afectados, ya que un gran número de organismos perecen al bajar la cantidad de oxígeno liberada en el agua (teamb (2022)).

4.1.4 Enfermedades Transmitidas por el Agua

Las aguas con residuos no tratados son una de las principales causas de enfermedades transmitidas por el agua. Algunos ejemplos de contaminantes biológicos que pueden causar enfermedades graves en las personas son, las bacterias, los virus y los parásitos. Las comunidades que carecen de acceso a suficientes sistemas de tratamiento del agua son las más afectadas. El abandono y la exposición prolongada a aguas residuales no tratadas aumentan el riesgo de fracturas óseas. En muchas regiones del mundo ha aumentado la prevalencia de enfermedades relacionadas con el agua, lo que compromete la salud pública (teamb 2022).

4.1.5 Afectaciones en la calidad de vida

Una de las cosas que más se afecta es no tener acceso seguro al agua potable, porque no tienen plantas de tratamiento cercanas o no tienen, esto es una de las cosas que más pasa. El bienestar y la salud de las comunidades se ven directamente afectados por la contaminación del

agua. La escasez de este líquido de forma segura se ve limitado a las oportunidades de crecimiento y mejora de la calidad de vida. Las comunidades que dependen de fuentes de agua contaminada enfrentan desafíos cotidianos. La recogida de agua limpia se convierte en una tarea laboriosa, y aumenta el costo del tratamiento del agua. Estos obstáculos prolongan el ciclo de la pobreza y restringen las oportunidades de crecimiento y desarrollo sostenibles (teamb, 2022).

4.2 Contaminación emergente.

Es bien sabido que la presencia de elementos dañinos en los suministros de agua de la mayoría de los países es un problema; estos contaminantes suelen ser de origen farmacéutico y tienen un importante impacto negativo en la salud humana debido a sus componentes, que en ocasiones pueden ser imposibles de eliminar con los métodos tradicionales. Países como Chile, Colombia, Brasil y Argentina son los principales afectados por este tipo de contaminantes. Muchos de los animales que habitan los ecosistemas acuáticos acaban ingiriendo estas toxinas cuando se introducen en ellos, lo que repercute en la vida marina del lugar (Kimura & Richardson, 2017).

Como estos países carecen de normativa, se permite que los contaminantes se viertan en las fuentes de agua, lo que aumenta el riesgo y tiene un importante impacto negativo en la calidad de vida de las personas y en las fuentes de agua. Además, debido a la falta de información, es imposible establecer relaciones con los compuestos utilizados en la mayoría de las zonas.

Una evaluación sistemática de la tecnología de ozonización catalítica es presentada por Ángel O, A. C., et al, (2022), como un sistema potencial para la degradación de los radicales libres de contaminantes en desarrollo. También buscamos nuevas tecnologías que funcionen bien

en el laboratorio, pero se necesita más investigación para llevarlas a escala piloto e industrial. Sin embargo, también es fundamental reconocer que se están produciendo subproductos, por lo tanto, deben tomarse medidas adicionales para mejorar la eficacia de la eliminación de los contaminantes recién descubiertos.

Productos farmacéuticos como antibióticos, antidepresivos y hormonas; artículos de higiene personal como fragancias, exfoliantes y filtros UV; productos químicos industriales como perfluoratos y catalizadores; aditivos alimentarios; reciclaje en los sectores textil y automovilístico; y los micro- y nano plásticos son algunos ejemplos de contaminantes comunes (Khan et al., 2022). Actualmente se enumeran aproximadamente 3.000 categorías distintas de contaminantes emergentes (Ouda et al., 2021; Mohammadi et al., 2022).

Los contaminantes emergentes siempre encuentran su camino hacia fuentes de aguas superficiales y subterráneas donde se liberan los fluidos, ya que suelen ser muy difíciles de eliminar con métodos tradicionales. Debido a que los procesos avanzados de oxidación (POA) se han vuelto en una tecnología efectiva y avanzada para eliminar estos radicales libres, se han aplicado en los últimos años. Utilizando este método, una variedad de contaminantes orgánicos,

así como nuevos contaminantes emergentes pueden ser degradados eficientemente produciendo especies oxidantes altamente reactivas como hidroxiles (OH), (Kimura & Richardson, 2017).

Figura 16.

Propósitos principales de las CE y consecuencias perjudiciales para el medio ambiente, extraído de Rout et al. (2022).

Contaminantes emergentes	Función	Efectos adversos
Antibióticos (claritromicina, penicilina, sulfonamidas, roxitromicina, tetraciclina)	Sustancias antimicrobiales que detienen la infección matando o inhibiendo el crecimiento de las bacterias	Induce a la Resistencia antibiótica en las cadenas microbiales, altera la estructura de la comunidad microbiana, y causa la disminución de las algas, bacterias, nemátodos, etc.
Fragancias (galaxolida, mezclas de xileno, mezclas de cetona)	Usado como ingrediente de las fragancias en un amplio rango de productos de consumo humano incluyendo perfumes, cosméticos, shampoo, etc.	Tóxico para los organismos acuáticos, causa estrés de oxidación en los peces dorados, es carcinogénico para los roedores, puede causar daños en el sistema nervioso humano.
Preservativos (metilparabeno, 2-fenoxietanol)	Previene la descomposición microbiana y son usados en los cosméticos, artículos de aseo, etc., como ingredientes de preservativos	Responsables de las actividades de estrógenos débiles.
Retardantes de fuego (difencil éter polibromado o (PBDEs por sus siglas en inglés))	Usados como retardantes de flama en pinturas, plásticos, televisores, materiales de construcción, etc., para hacerlos difíciles de quemarse.	Afecta el cerebro y el Sistema nervioso, la actividad hormonal, la reproducción y la fertilidad.
Químicos Disruptivos endocrinos (ftalatos, bisfenol)	Grupo de químicos usados como plásticos, plastificantes, solventes/lubricantes industriales, etc.	Interfiere con el Sistema endocrino, los efectos de estrógenos en las ratas, efectos de feminización en los hombres, defectos de nacimiento y retrasos en el desarrollo.
Drogas antiinflamatorias sin esteroides (diclofenaco, ibuprofeno)	Reduce el dolor, fiebre e inflamación.	Incrementa el riesgo de las úlceras gastrointestinales, enfermedades del riñón, alteraciones en las branquias de la trucha arcoíris.
Reguladores Lipídicos (ácido clofibrato, gemfibrozil)	Regulación de los niveles de triglicéridos y el colesterol en sangre.	Inhibición de la bioluminiscencia, inhibición de microalgas.
Beta-blockers (atenolol, metoprolol)	Manejar los ritmos anormales en el corazón inhibiendo la hormona de la adrenalina y la noradrenalina.	Afecta la reproducción y el crecimiento de los peces, inhibición en los receptores de descarga de las branquias, impacto en los ciclos de respiración y los ritmos de actividad de las truchas.
Anticonvulsivos (carbamazepina)	Trata los desórdenes de personalidad y los problemas epilépticos	Estrés de oxidación en la trucha arcoíris, afecta el Sistema nervioso central.
Hormonas (estrón, testosterona)	Regulación del metabolismo, homeostasis, control del Desarrollo sexual.	Afectan la reproducción y la fertilidad, masculinización de hembras, feminización de los machos, reduce la fertilidad en los peces.
Hidrocarburos poliaromáticos (antraceno, pireno).	Usado en la manufactura de plásticos, pesticidas, tintes, etc.	Efectos cancerígenos, enfermedades cardiovasculares, desarrollo pobre en los fetos.
Sustancias alquiladas perfluoradas (ácido perfluorooctanoico)	Usado en la polimerización en las emulsiones, pulimentos, pinturas y recubrimientos.	Enfermedades tiroideas, daño del hígado, cáncer de riñón, reducción en la respuesta a las vacunas, efectos negativos en los niños no nacidos.
Nanomateriales (nanopartículas, nanocompuestos)	Usados en variedad de procesos de producción y de cuidado de la salud.	Afecta el Sistema respiratorio, la vida salvaje y causa daños ambientales.
Microbios (<i>Yersinia pestis</i> , <i>Vibrio cholerae</i>)	Implicaciones significantes en la biorremediación y la patogénesis.	Afecta el sistema gastrointestinal, el sistema inmune, tóxicos para el ambiente y la vida salvaje.

Nota: Principales contaminantes emergentes de origen farmacéutico, donde se puede ver cuáles son las funciones y los efectos adversos que estos causan. Rout et al (2022).

4.3 Retos en países en desarrollo.

El tratamiento del agua y las aguas con residuos plantea varios problemas a la mayoría de los países en desarrollo. Estas dificultades podrían estar relacionadas con la infraestructura o cuestiones sociales, lo que limita la eficacia y el alcance de estos métodos de tratamiento de residuos y agua potable.

Los principales retos que se encuentran son:

- **Infraestructura deteriorada o insuficiente:** Existen numerosos problemas con la existencia de sistemas adecuados para la recogida y distribución del agua limpia tanto en las zonas del campo (rurales), como urbanas de países como Colombia. Además, muchos lugares carecen de alcantarillas adecuadas para el tratamiento de las aguas con residuos (OMS, 2023).
- **Falta de recursos técnicos y financiación:** Una de las principales cuestiones es la inversión en proyectos de tratamiento y saneamiento del agua, ya que a menudo es limitada y, por lo general, la mayoría de las plantas tienen tecnología obsoleta y limitada, que afecta la eficacia del tratamiento de aguas con residuos y la calidad del agua potable (UNESCO, 2023).
- **Crecimiento poblacional y urbanización descontrolada:** Debido al rápido crecimiento urbano, muchas ciudades en desarrollo enfrentan desafíos porque su rápido crecimiento excede la capacidad de los servicios públicos, lo que causa vertimientos directos en las fuentes de agua por las que pasan estas ciudades. (UNESCO, 2023).
- **Contaminación de las fuentes hídricas:** Debido a la falta de regulaciones, muchas veces las industrias o actividades agrícolas de la zona desechan los desechos de sus operaciones

en los ríos, quebradas o acuíferos cercanos, lo que daña la salud pública y requiere tratamiento. (UNESCO, 2023).

- **Marco legal y normativo débil o ineficaz:** Hay muchas leyes ambientales y de saneamiento, pero con frecuencia no se siguen, y también carecen de mecanismos de control y saneamiento, lo que significa que no consideran el riesgo de contaminar el agua. (UNESCO, 2023).
- **Desigualdad social:** Muchas de las comunidades más pobres del país carecen de agua limpia y segura lo que hace que la pobreza y los ciclos de enfermedades continúen. Guajira es una zona que carece esencialmente de acceso al agua y a un sistema adecuado de purificación (UNESCO, 2023).

Discusiones

Un tratamiento adecuado, es esencial para la sostenibilidad del ambiente y la salud en Colombia, como se sabe el acceso a este recurso para muchas zonas es prácticamente inaccesible y sigue siendo desigual. La revisión de las fuentes consultadas nos dice que los métodos tradicionales de tratamiento del agua y el tratamiento de aguas con residuos, como coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, siguen siendo muy necesarios para la correcta eliminación de los contaminantes químicos, físicos y biológicos ya que si no se realizan estos procesos no se puede garantizar agua de calidad. Autores como (Rodríguez Narváez et al., 2017), menciona que los enfoques que se le dan actualmente a estos tratamientos son inadecuados para hacerle frente a los nuevos contaminantes emergentes que se han vuelto más frecuentes en los cuerpos de agua en las últimas décadas, ya que estos son más difíciles de remover por los tratamientos convencionales, y estos provienen de productos químicos industriales, medicamentos arrojados a los cauces y también de micro plásticos, lo que afecta la salud publica en general.

Por consiguiente, es preciso emplear nuevas tecnologías más perfeccionadas y efectivas como la oxidación avanzada (POA), como la ozonización, el proceso de Fenton y la fotocatalisis, han probado ser muy efectivos descomponiendo contaminantes incrustados persistentes. De acuerdo con Nidheesh et al. (2023) y Giwa et al. (2023), tales avanzadas tecnologías generan radicales altamente reactivos que pueden destruir estructuras moleculares resistentes. Estas eliminan compuestos que no se pueden tratar adecuadamente a través del corriente sistema. Pero al mismo tiempo, estos métodos también acarrear problemas en la práctica y resultan caros, lo

que hace imposible su uso a gran escala, especialmente en aquellos lugares donde no se dispone de buena tecnología y los recursos no son abundantes.

Los humedales artificiales son también una vía sostenible, ecológica y barata para la purificación de agua. En el caso de Colombia, las zonas urbanas están altamente pobladas y coexisten las áreas rurales donde el acceso a agua limpia es escaso, por lo que resulta imprescindible adaptar soluciones a cada uno de estos contextos. Los no sólo pueden cumplir las funciones de parque ecológico urbano, sino que también integrarán recursos naturales en la zona de Shenyang, China. Mena Cabrera, Paolo Alexander. (2014) comprobaron su eficacia para tratar las aguas residuales del proceso, lo que muestra su relevancia en la vida de las comunidades rurales.

Por otro lado, una limitación clave encontrada en la revisión es que la urbanización acelerada influyó en el desarrollo. Más específicamente, la expansión de la urbanización ha dado lugar al crecimiento de las áreas urbanas, lo que ha conducido al aumento de la necesidad de agua potable y las aguas con residuos adicionales que se producen. Como resultado, las presiones sobre los sistemas existentes aumentaron significativamente. Por consiguiente, para abordar estas presiones, es importante invertir en infraestructura, fomentar un uso efectivo del recurso y promover la accesibilidad a la innovación. Como Rodríguez Narváez et al (2017), expresa, Los modelos híbridos con tecnologías convencionales ofrecen un enfoque integral y adaptable a diferentes escalas.

Conclusiones

Se ha podido evidenciar la importancia de los procedimientos como coagular, filtrar, desinfectar, en el caso del tratamiento de agua potable, lodos activados o tratamiento terciario en el caso de aguas con residuos, para poner de relieve la importancia del agua potable y el tratamiento de las aguas con residuos tanto para la salud humana como para la sostenibilidad ambiental. Además, es importante tener en cuenta las leyes y que estas deben de ser eficientes para así apoyar el acceso equitativo a este recurso, debemos hacer hincapié en la aplicación de tecnologías nuevas para abordar los nuevos contaminantes.

Cabe señalar que el tratamiento del agua es tanto un desafío técnico como una obligación ética. Dado a los cambios en el clima actual y la creciente de la población, debemos asegurarnos de que todos tengan acceso al agua limpia y trabajar para reutilizar las aguas residuales del uso diario con el fin de prevenir crisis hídricas y salvaguardar ecosistemas, que son de suma importancia.

Además, debe destacarse y concluirse que, incluso con los avances tecnológicos, todavía hay cuestiones que deben considerarse. Por ejemplo, los nuevos contaminantes que son difíciles de eliminar o el alto costo del mantenimiento de sistemas complejos son problemas importantes que deben abordarse si se quiere que el sistema siga siendo sostenible en el futuro en las zonas marginadas.

El progreso de la sociedad depende del tratamiento sostenible de los residuos y del agua potable. En este estudio hemos intentado demostrar que, a pesar de la aplicación de todos estos procedimientos, siempre existen limitaciones y dificultades que deben superarse. Estas dificultades son particularmente difíciles para muchas regiones de Colombia en este momento debido a impedimentos geográficos y económicos. Para garantizar que los recursos hídricos sean

adecuados y duraderos en el futuro, se requieren estrategias creativas y métodos sostenibles a largo plazo de reutilización del agua tratada.

Referencias

- Ao, X., Chen, Z., Li, S., Li, C., Lu, Z., & Sun, W. (2020). The impact of UV treatment on microbial control and DBPs formation in full-scale drinking water systems in northern China. *Journal of Environmental Sciences*, 87, 398–410.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.08.003>
- Åmand, L., Olsson, G., & Carlsson, B. (2013). Aeration control – a review. *Water Science & Technology*, 67(11), 2374–2390. DOI: 10.2166/wst.2013.139
- Abreu Acosta, N., Martín Delgado, M., Ortega Rivas, A., del Castillo Remiro, A., Aguiar González, E., & Valladares Hernández, B. (2002). Presencia de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* spp. en aguas residuales depuradas reutilizadas para riego agrícola en la isla de Tenerife, España. Efectos del transporte a larga distancia sobre la calidad del agua reutilizada. *Revista De Salud Ambiental*, 2(1), 2–7. Recuperado a partir de <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/414>
- Angel-Ospina, A. C., & Machuca-Martínez, F. (2022). Ozonización catalítica en el tratamiento de Contaminantes de Preocupación Emergente en aguas residuales: Un análisis bibliométrico. *Ingeniería Y Competitividad*, 24(1).
<https://doi.org/10.25100/iyv.v24i1.11603>
- Bejarano Suescún, J. C., Poveda Gómez, J. D., & Ospitia Prada, J. F. (2022). Optimización del tratamiento de agua para consumo humano en la inspección de policía de Cambao del municipio de San Juan de Rioseco, Cundinamarca, Colombia. Universidad Piloto de Colombia. <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2402>

- Burgos-Arias, J., Rey-Romero, D. C., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2025). Technical implications of light greywater production and quality for decentralized treatment and reuse: A case study in Bucaramanga, Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(381).
<https://doi.org/10.1007/s10661-025-13853-6>
- Bravo, M. A. (2017). Coagulantes y floculantes naturales usados en la reducción de turbidez, sólidos suspendidos, colorantes y metales pesados en aguas residuales [Tesis de Pregrado, Universidad Francisco José de Caldas].
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5609>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2012). *Informe sobre aguas duras: características y tratamiento*.
https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F36257%2F1%2FInforme_Aguas_Duras__F_.pdf
- Cardona Ortiz, R. R. (2015). Análisis documental de la evolución de los sistemas de tratamiento de agua potable en Bucaramanga y su área metropolitana (1994–2014) [Monografía de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia].
- Caicedo-Bejarano, L. D., Osorio-Vanegas, L. S., Ramírez-Castrillón, M., Castillo, J. E., Martínez-Garay, C. A., & Chávez-Vivas, M. (2023). Water quality, heavy metals, and antifungal susceptibility to fluconazole of yeasts from water systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3428.
<https://doi.org/10.3390/ijerph20043428>

- Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., & García, E. F. (2024). Physical-chemical characterisation of an alum-based water treatment sludge in different raw water turbidity scenarios. *Heliyon*, 10, e37579. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37579>
- Choudri, B. S., Al-Awadhi, T., Charabi, Y., & Al-Nasiri, N. (2020). Wastewater treatment, reuse, and disposal—associated effects on environment and health. *Water Environment Research*, 92(10), 1595–1602. <https://doi.org/10.1002/wer.1406>
- Cheng, X., Dong, H., & Qiang, Z. (2023). Formation and transformation of pre-chlorination-formed disinfection byproducts in drinking water treatment process. *Science of the Total Environment*, 904, 166241. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166241>
- Cano, O. (2014). Tipos de secado en alimentos. Buenavista - México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Caballero, A. (2020). Diseño de una planta de incineración de lodos de depuradora. Sevilla: Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Castellanos, F. L. (2017). Revision del uso de coagulantes natuarles en el proceso de clarificación del agua en Colombia [Tesis de Especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17102>
- Chavarría Márquez, E. Y., Huamaní Astocaza, L. L., Basurto Contreras, C. M., Gutierrez Collao, J. E., & Cusiche Huamaní, M. L. (2023). Determinación clásica de coliformes fecales en agua entubada en el distrito de Ahuaycha, Perú. *Revista Alfa*, 7(21), 560–566. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i21.236>

- De la Peña, M. E., Ducci, J., & Zamora, V. (2013). Tratamiento de aguas residuales en México (Nota Técnica No. IDB-TN-521). Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-México.pdf>
- De armas Duarte, D., & Ramírez Hernández, L. F. (2015). Remoción de nutrientes mediante coagulantes naturales y químicos en planta de tratamiento de aguas residuales, Valledupar, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 6(2), 183–196.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5628793>
- Fernández Acuña, S. I. (2015). Tratamiento y disposición de aguas residuales de plantas de tratamiento de agua potable en Chile [Memoria de título, Universidad de Chile]. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Grueso Domínguez, M. C. (2021). Evaluación y optimización de un sistema de potabilización con filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente: Una alternativa de tratamiento para pequeñas comunidades [Tesis de maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/20727>
- Galindo, E., Álvarez, L. H., & Ríos, A. M. (2008). Evaluación de un reactor de manto de lodo con flujo ascendente (UASB) con cambios de velocidad de alimentación. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 9(1), 39–50.
- Guananga Díaz, N. I., Guevara Iñiguez, L. E., González Cabrera, M. V., & Freytez Boggio, E. (2024). *Procesos biológicos aplicados a las aguas residuales*. Editorial Grupo Compás.

- Galeano Nieto, L. J., & Rojas Ibarra, V. D. (2016). Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez - Santander [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional UCATOLICA. <http://hdl.handle.net/10983/13930>
- Giwa, A., Yusuf, A., Balogun, H. A., Sambudi, N. S., Bilad, M. R., Adeyemi, I., Chakraborty, S., & Curcio, S. (2021). Recent advances in advanced oxidation processes for removal of contaminants from water: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 477–502. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.015>
- Higiene Ambiental. (2023, 5 de diciembre). Calidad del agua de consumo, el cloro residual como indicador. Recuperado el 6 de junio de 2025, de <https://higieneambiental.com/calidad-del-agua-de-consumo-cloro>
- Islam, M.S., Sojib, M.A., Islam, T., Shuvo, S.M., & Nesa, J. (2023). A review on Natural Coagulants in Wastewater Treatment. *Proceedings of the International Conference on Planning, Architecture and Civil Engineering (ICPACE)*, Rajshahi University of Engineering & Technology, Bangladesh. : https://www.researchgate.net/publication/376681325_A_review_on_Natural_Coagulants_in_Wastewater_Treatment
- Khayan, K., Husodo, A. H., Astuti, I., Sudarmadji, S., & Djohan, T. S. (2019). Rainwater as a source of drinking water: Health impacts and rainwater treatment. *Journal of Environmental and Public Health*, 2019, Article ID 1760950. <https://doi.org/10.1155/2019/1760950>

- Kato, S., & Kansha, Y. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 51064–51097.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Levy, J. I., Andersen, K. G., Knight, R., & Karthikeyan, S. (2023). Wastewater surveillance for public health. *Science*, 379(6627), 26–27. <https://doi.org/10.1126/science.ade2503>
- Liu, L., Hall, G., & Champagne, P. (2018). Disinfection processes and mechanisms in wastewater stabilization ponds: A review. *Environmental Reviews*, 26(4), 418–429.
<https://doi.org/10.1139/er-2018-0006>
- Lizarazo Becerra, J. M., & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia [Monografía de especialización, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Medicina, Especialización en Administración en Salud Pública.
- Madera, C. A., Silva, J., Mara, D. D., & Torres, P. (2009). Wastewater use in agriculture: Irrigation of sugar cane with effluents from the Cañaveralejo wastewater treatment plant in Cali, Colombia. *Environmental Technology*, 30(10), 1011–1015.
<https://doi.org/10.1080/09593330903020498>
- Metcalf & Eddy (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education. DOI:
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1570736>
- Ministerio de la Protección Social y Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2115. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y

frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano (Jun 22, 2007).

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico – RAS 2000: Título E. Tratamiento de aguas residuales. Bogotá, Colombia: Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.

Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 159(2), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>

Niño Cárdenas, C. M. (2018). Evaluación y comparación de las buenas prácticas y nuevas tecnologías en el manejo de aguas residuales en la planta de tratamiento de La Calera - Colombia y Juan Díaz - Panamá [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil.

Novotna, K., Cermakova, L., Pivokonska, L., Cajthaml, T., & Pivokonsky, M. (2019). Microplastics in drinking water treatment – Current knowledge and research needs. *Science of the Total Environment*, 667, 730–740. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.431>

Nielsen, A. M., Garcia, L. A. T., Silva, K. J. S., Sabogal-Paz, L. P., Hincapié, M. M., Montoya, L. J., Galeano, L., Galdos-Balzategui, A., Reygadas, F., Herrera, C., Golden, S., Byrne, J. A., & Fernández-Ibáñez, P. (2022). Chlorination for low-cost household water disinfection – A critical review and status in three Latin American countries. *International*

- Journal of Hygiene and Environmental Health, 244, 114004.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2022.114004>
- Nidheesh, P. V., Singh, T. S. A., & Kumar, M. S. (2023). Advanced oxidation processes for the treatment of emerging contaminants in water and wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109042. Doi: 10.2166/wst.2023.163
- Olivera, E. (2019). Influencia de la calidad de agua de consumo en la morbilidad por enfermedades de transmisión hídrica en la población infantil del distrito de Cácat-Recuay-Ancash durante el año 2016. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash, Perú. <https://n9.cl/zpvoq>
- Ochoa Barajas, H. A. (2004). Desinfectantes y nuevas tecnologías utilizadas en el tratamiento del agua potable [Trabajo de especialización, Universidad Industrial de Santander]. Universidad Industrial de Santander.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2023). Drinking-water. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Pérez Carrillo, S. (2017). Calidad del agua y salud pública en Colombia : un diagnóstico de las atenciones médicas atribuibles a la mala calidad del agua. Uniandes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/34228>
- Proctor, C. R., & Hammes, F. (2015). Drinking water microbiology—From measurement to management. *Current Opinion in Biotechnology*, 33, 87–94.
<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.12.014>

- Pérez-Vidal, A., Escobar-Rivera, J. C., & Torres-Lozada, P. (2020). Development and implementation of a water-safety plan for drinking-water supply system of Cali, Colombia. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 224, 113422. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.113422>
- Plisko, T. V., Bildyukevich, A. V., Burts, K. S., Hliavitskaya, T. A., Penkova, A. V., Ermakov, S. S., & Ulbricht, M. (2020). Modification of polysulfone ultrafiltration membranes via addition of anionic polyelectrolyte based on acrylamide and sodium acrylate to the coagulation bath to improve antifouling performance in water treatment. *Membranes*, 10(10), 264. <https://doi.org/10.3390/membranes10100264>
- Paniagua, O. (2017). Evaluación de la calidad del agua para consumo humano y fines agrícolas en las cuencas de la Región Huancavelica. Tesis, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú. <https://n9.cl/u823m>
- Pinzón, L., & Tellez, L. (2022). Diseño de una planta de deshidratación y secado de lodos industriales provenientes del proceso de enfriamiento de un horno incinerador de la empresa PROSARC S.A ESP. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de Ingeniería
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Diaz, M. y Gonzales, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16 (2), 66 - 77. Colombia. <https://n9.cl/zdoz>

- Rosal, R. (2019). Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas: Capítulo 50. Desinfección. En M. Díaz (Coord.), Ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas (pp. 1–10). Editorial Paraninfo. ISBN 978-84-283-4152-3.
- Romero Rojas, J. A., & Rojas Hernández, F. (2001). Una evaluación del RAP. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
<https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2245>
- Rodríguez Salcedo, C. F. (2008). *Uso y control del proceso de coagulación en plantas de tratamiento de agua potable* [Trabajo de grado, Universidad de Sucre]. Repositorio Unisucra. <http://repositorio.unisucra.edu.co/handle/001/298>
- Richardson, S.D. y Kimura, S.Y. (2017). Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. Elsevier BV, 8, 40-56.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.04.002>Contaminantes emergentes: Problemática, impacto y su tratamiento por procesos de oxidación avanzadaP. 165-170
- Rodríguez Narváez, O. M., Peralta-Hernández, J. M., Goonetilleke, A., & Bandala, E. R. (2017). Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. Chemical Engineering Journal, 323, 361–380. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.04.106>
- Sillanpää, M., Ncibi, M. C., Matilainen, A., & Vepsäläinen, M. (2018). Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. Chemosphere, 190, 54–71. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>
- Sun, S., Jiang, T., Lin, Y., Song, J., Zheng, Y., & An, D. (2020). Characteristics of organic pollutants in source water and purification evaluations in drinking water treatment plants.

- Science of the Total Environment, 733, 139277.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139277>
- Sillanpää, M., Ncibi, M. C., & Matilainen, A. (2018). Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 208, 56–76.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.009>
- Singh, B. J., Chakraborty, A., & Sehgal, R. (2023). A systematic review of industrial wastewater management: Evaluating challenges and enablers. *Journal of Environmental Management*, 348, 119230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119230>
- Torres-Parra, C. A., García-Ubaque, C. A., García-Ubaque, J. C., García-Vaca, M. C., & Pacheco-García, R. (2017). Agua segura para comunidades rurales a partir de un sistema alternativo de filtración. *Revista de Salud Pública*, 19(4), 453–459.
<https://doi.org/10.15446/rsap.v19n4.56039>
- UNESCO. (2023). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Acelerar el cambio. París: UNESCO.
- Verma, S., Daverey, A., & Sharma, A. (2017). Slow sand filtration for water and wastewater treatment – a review. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 47–58.
<https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1278278>
- Von Sperling, Marcos y Sanchez, Ivan A. (2021) *Lagunas de estabilización: tratamiento biológico de aguas residuales*. 1a. edición, 3 . Editorial Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. ISBN 978-958-5123-48-9

Westerhoff, G.P. 1978. Minimization of Water Treatment Plant Sludges. AWWA Seminar on Water Treatment Disposal. Atlantic City, United States. June 25, 6:1- 11.

Zoroufchi Benis, K. (2024). Transforming drinking water treatment residuals into efficient adsorbents: A review of activation and modification methods. *Environmental Research*, 262, 119893. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119893>