

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluación de un floculante polimérico natural aniónico para la remoción
de plomo en aguas residuales

Por:

PAVEL CONRADO ALONSO CHINO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de un floculante polimérico natural aniónico para la remoción de plomo
en aguas residuales

Por:

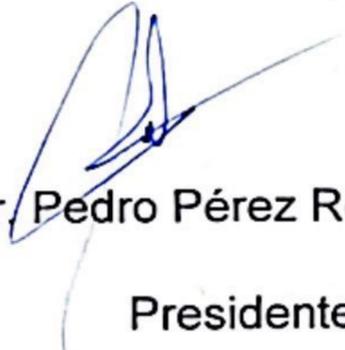
PAVEL CONRADO ALONSO CHINO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el jurado examinador:


Dr. Pedro Pérez Rodríguez

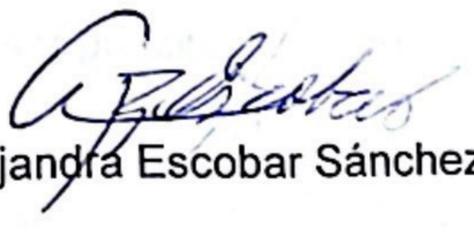
Presidente


M.C. Diego Antonio Corona Martínez

Vocal


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Vocal


M.C. Alejandra Escobar Sánchez

Vocal suplente


M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluación de un floculante polimérico natural aniónico para la remoción de plomo
en aguas residuales

Por:

PAVEL CONRADO ALONSO CHINO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Pedro Pérez Rodríguez

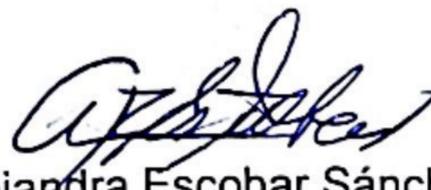
Asesor principal interno


M.C. Diego Antonio Corona Martínez

Asesor principal externo


Dra. Silvia Yudith Martínez Amador

Coasesor


M.C. Alejandra Escobar Sánchez

Coasesor

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre de 2023

DERECHOS DE AUTOR Y DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrectamente en los siguientes aspectos:

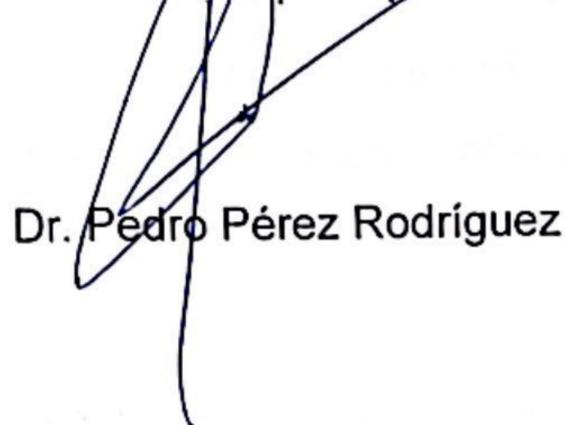
Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (cortar y pegar); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (autoplagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo, tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor. Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Pavel Conrado Alonso Chino

Asesor principal



Dr. Pedro Pérez Rodríguez

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a toda mi familia, que me han acompañado a lo largo de mi vida, han estado presentes en cada etapa de mi formación académica, con ustedes he pasado los mejores momentos de mi vida, este logro no solo es mío sino también suyo, comparto mi felicidad con las personas que siempre han estado para mí, mi familia.

A mi madre, Martha Chino Aguirre gracias por inculcarme los valores que me han guiado a ser la persona que hoy en día soy, tu cariño y apoyo incondicional que me transmites son el motor que me dan la fuerza para no darme por vencido y lograr mis objetivos que me propongo. Gracias por enseñarme el significado del amor de madre, siempre estaré agradecido por todo el sacrificio que haces e hiciste por mí y mis hermanos.

A mi padre, Eliseo Alonso Astudillo por guiarme por el buen camino en mi vida, en mi formación académica y personal, por todas las enseñanzas que me inculcaste desde mi infancia hasta la fecha, eres mi ejemplo de superación y perseverancia, me has ayudado y motivado a creer en mí y en mis proyectos que me he propuesto durante a lo largo del tiempo, por tu apoyo, confianza y sacrificio estoy donde he logrado estar.

A mis hermanos, Martha Patricia, Paula Leticia, Marcos Eliseo y Alma Delia, por todos los buenos momentos que me han regalado, más que mis hermanos son mis mejores amigos, son de las personas que más quiero y en las que más confianza tengo, siempre estaré orgulloso de todos sus logros que cumplan, la felicidad de ustedes es también la mía.

A mis tíos, Alberta Alonso Astudillo y Juan Ojeda quienes formaron parte de mi educación académica, estoy agradecido por permitirme entrar, formar parte de su hogar y hacerme sentir como en casa, pase momentos muy agradables durante mi estancia con ustedes. El apoyo moral que recibí por parte de ambos me motivó a creer en mí y en mis capacidades para lograr mis objetivos.

A mis amigos y compañeros Deyanira, Mauro, Fernando y Cristóbal gracias por acompañarme durante esta travesía, estoy orgulloso de haber compartido esta etapa con ustedes desde hace cinco años, sé que la vida nos prepara cosas buenas como profesionistas, estamos a un paso de lograrlo y compartir dicha felicidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por abrirme las puertas de esta gloriosa institución y permitirme realizar mis estudios de educación superior en ella, por todas las experiencias y amigos que he conocido durante mi estancia en esta universidad, con orgullo puedo decir que me he formado en la mejor universidad de agronomía del país.

A mi asesor, Dr. Pedro Pérez Rodríguez por permitirme y darme la oportunidad de participar en este proyecto de investigación, agradezco la orientación, apoyo, tiempo y confianza que me brindo durante la etapa de elaboración de este proyecto, sin su ayuda no sería posible la realización de este trabajo.

Al M.C. Diego Antonio Corona Martínez por su apoyo durante la realización de esta investigación, su apoyo y orientación fueron fundamentales para poder hacer un buen trabajo en este proyecto, gracias por el tiempo que me brindo y los consejos para mejorar cada día.

A la Dra. Silvia Yudith Martínez Amador por brindarme su amplio conocimiento, apoyo técnico y empírico los cuales fueron de gran ayuda durante la etapa experimental de este proyecto.

Agradezco a mi maestra M.C Alejandra Escobar Sánchez gracias por todos los conocimientos impartidos durante mi etapa en esta universidad, sus comentarios motivacionales que influyeron para continuar con la carrera y mejorar cada día como alumno y persona.

A mis maestros, los cuales me compartieron los conocimientos necesarios para progresar a lo largo del programa educativo, por su motivación para continuar y no darme por vencido en una de las mejores carreras impartidas en esta universidad, son pilares importantes en mi educación universal.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVO GENERAL	15
Objetivos específicos	15
HIPÓTESIS	16
CAPÍTULO I - REVISIÓN DE LITERATURA	17
1.1 El agua como recurso vital en el medio ambiente	17
1.2 Recursos hídricos en México	18
1.3 Tratamiento de aguas residuales una tecnología presente a lo largo de la historia	19
1.4 Gestión y legislación ambiental en el tratamiento de aguas residuales	20
1.5 Ciclo socio-natural de agua	20
1.6 Sustancias químicas presentes en aguas residuales	21
1.6.1 Componentes orgánicos.....	21
1.6.2 Componentes inorgánicos.....	22
1.7 Contaminantes químicos en aguas residuales	23
1.7.1 El plomo en el agua.....	24
1.8 Efectos negativos de un mal manejo del agua residual	25
1.9 Tecnologías en el tratamiento del agua	26
1.9.1 Osmosis inversa.....	27
1.9.2 Oxidación avanzada.....	27
1.9.3 Biodisco.....	28
1.10 Coagulación	29
1.11 Floculación	30
1.11.1 Tipos de coagulantes y floculantes	31
1.11.1.1 Floculantes catiónicos	31
1.11.1.2 Floculantes aniónicos	31
1.11.1.3 Floculantes a base de polímeros naturales: Biofloculantes.....	32
1.11.2 Factores que promueven la coagulación-floculación.....	32

1.11.3 Concentración de coagulante-floculante	33
1.11.4 Temperatura	33
1.11.5 Peso molecular	33
1.11.6 Biofloculantes a base de almidón	34
1.11.7 Polímero lineal: Amilosa	35
1.11.8 Polímero lineal: Amilopectina	36
1.11.9 Cambios en almidón	36
CAPÍTULO II - MATERIALES Y MÉTODOS	37
2.1 Ubicación del estudio experimental	37
2.2 Síntesis del copolímero aniónico	37
2.2.1 Modificación del polímero natural	37
2.3 Preparación de la solución de Pb	37
2.4 Evaluación de los floculantes poliméricos	38
2.5 Filtración	39
2.6 Cuantificación de metales pesados por absorción atómica	39
CAPÍTULO III - RESULTADOS Y DISCUSIONES	40
3.1 Floculante M ₁	41
3.2 Floculante M ₂	42
3.3 Floculante M ₃	43
Conclusiones	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Eutrofización de un lago por presencia de nitratos y fosfatos.....	24
Figura 2. Proceso del tratamiento de agua mediante osmosis inversa.....	27
Figura 3. Procesos avanzados de oxidación, comparación de los tratamientos con radiación UV, Ozono y otros PAO (ASAP, 2019).....	28
Figura 4. Diagrama de eliminación de nitrógeno usando biodiscos (Iagua, 2023).	29
Figura 5. Principio de coagulación y floculación	30
Figura 6. Comparativa de una muestra de agua residual con floculantes	31
Figura 7. Estructura molecular de almidón simple	34
Figura 8. Estructura molecular de la Amilosa	35
Figura 9. Porcentajes de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico sintetizado (M ₁).....	41
Figura 10. Porcentajes de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico sintetizado (M ₂).....	42
Figura 11. Porcentaje de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico (M ₃)	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos definidos en el desarrollo experimental.....	39
Tabla 2. Porcentajes de remoción de plomo.....	40

RESUMEN

La contaminación de los recursos hídricos es un importante impacto negativo al medio ambiente, debido a que generalmente las aguas residuales no siempre reciben un buen tratamiento biológico o químico, por lo cual el objetivo de esta investigación se centra en evaluar la eficiencia de un agente floculante polimérico natural aniónico para la remoción de plomo en aguas residuales. Se utilizó un sistema de matraces Erlenmeyer de 250 ml con diferentes cantidades de muestras específicas del floculante con una agitación constante de (n) rpm a 24 h después se filtró la mezcla resultante en papel de 40 μm , posterior a la filtración se procedió a cuantificar la concentración de Pb en las muestras obtenidas, utilizando un Espectrómetro de Absorción Atómica (Varían, SpectrAA-S). Los resultados más destacables de dicha investigación se dieron en la muestra número tres (M₃) la cual obtuvo dos tratamientos con un 6.67% de remoción de Pb, por lo cual dicha muestra demostró ser más efectiva que las anteriores. Sin embargo, dado los resultados obtenidos, es posible que el floculante polimérico mostró un bajo nivel de remoción de Pb en el agua residual en las condiciones estudiadas, por lo tanto, es necesario realizar más estudios en distintas condiciones experimentales para determinar el método más viable para ser aplicado en el proceso de floculación-coagulación.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial, la urbanización y la industrialización, conllevan a una mayor demanda de recursos para abastecer a la sociedad, por lo que en consecuencia también existe un aumento en la contaminación del medio ambiente.

El agua es un recurso hídrico de suma importancia, ya que su uso es cotidiano en actividades de las diferentes industrias de producción, por lo tanto su cuidado y ahorro debe de ser prioritario.

En el caso de las fuentes de agua, contaminación ambiental causada por metales pesados se está convirtiendo en un serio desafío debido a sus efectos negativos en la salud, las propiedades del suelo y los cultivos agrícolas. En el caso de México se han presentado problemas de contaminación con metales pesados en cuerpos de agua, esto genera una gran problemática para la salud humana y de los seres vivos en general, lo cual conlleva a una desestabilización ecológica.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) surgen como una alternativa para lograr un mayor aprovechamiento del agua residual, ya que en estas plantas se tiene la capacidad de remover contaminantes presentes en el agua, por lo tanto, al eliminar dichos contaminantes se puede lograr obtener una mejor calidad del agua y minimizar o eliminar los efectos de la contaminación en el agua.

En cuanto al aprovechamiento del agua tratada, esta puede ser destinada a diferentes usos dependiendo de sus características fisicoquímicas lo anterior está regulado por diferentes normas oficiales mexicanas, de acuerdo con estas características se puede determinar si la calidad del agua es viable para ser reutilizada en algún servicio público.

La necesidad de tratar el agua contaminada promovió el desarrollo de una gran variedad de investigaciones para mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes en el agua residual por medio de métodos físicos, químicos, adsorción, biológicos y electroquímicos, sin embargo, existen contaminantes, como los metales pesados los cuales son relativamente complicados de remover

eficazmente del agua por sus propiedades químicas. (Saleh, 2011, Saleh, 2017, Saleh, 2018, Saleh y Abulkibash, 2011)

Uno de los métodos para el tratamiento de aguas residuales y la remoción de contaminantes en la misma, es la aplicación de la coagulación química y el proceso de floculación en el tratamiento de aguas residuales, el cual incluye la adición de productos químicos para cambiar el estado físico de los sólidos suspendidos y disueltos y, a continuación, facilitar su eliminación mediante el proceso de sedimentación. La coagulación se utiliza para eliminar contaminantes de formas suspendidas o coloidales que no se sedimentan al reposar o se sedimentan lentamente, y se considera el procedimiento de pretratamiento más útil en el tratamiento de aguas residuales.

Atendiendo este problema prioritario, se realizó la investigación correspondiente estudiando un floculante polimérico natural aniónico con diferentes alternativas de tratamientos para lograr la remoción del plomo en el agua residual y con ello contribuir con un impacto positivo al medio ambiente. Con dicho estudio también se busca aportar conocimientos científicos para la mejora continua de esta nueva biotecnología.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de un agente floculante polimérico natural aniónico para la remoción de plomo en aguas residuales sintéticas.

Objetivos específicos:

1. Sintetizar el agente floculante polimérico natural aniónico a base de almidón modificado químicamente.
2. Evaluar la capacidad del agente floculante para remover plomo soluble en muestras de agua residual sintética.

HIPÓTESIS

El uso de un floculante polimérico natural aniónico a base de almidón en una muestra de agua residual sintética promoverá la remoción de plomo soluble en la misma.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 El agua como recurso vital en el medio ambiente

El medio ambiente está conformado por un conjunto de ecosistemas los cuales están habitados por diferentes especies de seres vivos incluyendo a los seres humanos, es importante resaltar que, el cuidado del medio ambiente debe ser preocupante debido a que la estabilidad y supervivencia del ser humano depende de este mismo ya que en el medio ambiente se producen los recursos necesarios para la prosperidad de la vida en general.

Argoytia (2020) menciona que el agua es un compuesto vital, cada una de sus moléculas es algo fuera de lo común por sus características físicas y químicas, de modo que la vida en este planeta se debe a sus propiedades. Nuestro cuerpo es casi del todo agua y esta participa en reacciones químicas propias del organismo que determinan las respuestas biológicas

Ordóñez (2020) menciona que el agua es, en efecto, el recurso máspreciado de la humanidad, sin el cual no hay posibilidad de vida. Cuando el agua es escasa, la sequía atormenta por igual a plantas, animales, al hombre y, en general, a todos los organismos vivos.

Nuestro planeta está conformado por un 71% de agua, en el cual existen un sinnúmero de especies que cohabitan en ese ecosistema y las cuales han evolucionado con el tiempo debido a los cambios climáticos a lo largo de la historia, sin embargo, el ser humano y sus actividades productivas, hacen más complejo la estabilidad de dichos ecosistemas ya que la contaminación del agua cada vez es más común y con mayor grado de afectación.

El agua es el hábitat de una comunidad biológica fundamental en el planeta: el plancton, animales y vegetales microscópicos que viven suspendidos en el agua marina o continental y que son el alimento que sostiene a prácticamente todas las pesquerías en el mundo (Argoytia, 2020).

1.2 Recursos hídricos en México

De acuerdo con Martínez- Austria, *et al* (2019), en México los ríos y arroyos constituyen una red hidrográfica de 6.33×10^5 km, en la que destacan 51 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento anual y cuyas cuencas ocupan el 65% del territorio nacional. Las aguas superficiales en nuestro país cuentan con 757 cuencas hidrográficas de las cuales solo 649 cuentan con la disponibilidad de agua.

El territorio mexicano cuenta con 653 acuíferos y el número de acuíferos sobreexplotados ha aumentado de 32 en 1975 a 36 en 1981, en 80 en 1985, 97 en 2001, 101 en 2008 y 105 para el 2015 (CONAGUA, 2016).

El aumento exhaustivo de acuíferos explotados puede desencadenar problemas ambientales severos ya que pueden reducir el abastecimiento en humedales, manantiales, alterando el flujo de agua en ríos y ocasionando el hundimiento de suelos.

La extracción intensiva de aguas subterráneas también puede generar problemas en la calidad del agua debido a que favorecen procesos como la homogenización de aguas subterráneas con aguas superficiales, propagación de contaminantes de fuentes puntuales como las aguas residuales industriales y municipales sin tratar.

En cuanto al agua extraída en México, se estima que el 76.3% es utilizada en la agricultura, el 14.6% en el abastecimiento público, el 4.8% en la generación de energía y el 4.3% en la industria autoabastecida (Martínez-Austria *et al.* 2019).

Con el aumento de la población en los próximos años, se requerirá una mayor explotación de los recursos hídricos, esto con el fin de satisfacer las necesidades básicas de la sociedad en general, la mejor manera de contrarrestar una sobreexplotación de los recursos es haciendo uso de tecnologías sustentables las cuales nos ayuden a mitigar los problemas ambientales que se produzcan derivado de la extracción del agua.

1.3 Tratamiento de aguas residuales una tecnología presente a lo largo de la historia

La problemática por el desabasto y la contaminación del agua conlleva a desarrollar tecnologías las cuales nos permitan mantener un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos sin afectar negativamente el medioambiente, así como también para mejorar los procesos productivos agrícolas y de la industria en general.

Las plantas de tratamiento de agua residual surgen como una medida de aprovechamiento del agua, fue en París en el año de 1806 cuando se construyó la primera planta importante de tratamiento, en ella se sedimentaba el agua durante 12 horas y se filtraba (Teamb, 2019).

El primer sistema de alcantarillado “moderno” para aguas residuales se construyó en 1842 en Hamburgo, Alemania, por un innovador ingeniero inglés llamado Lindley. Un incendio destruyó la parte antigua de Hamburgo y al efectuar la reconstrucción se encomendó a Lindley el diseño y construcción del alcantarillado; el sistema incluyó muchos de los principios que todavía se usan en la actualidad (Bahena,2019).

Así como la filtración se mostró como un método de tratamiento efectivo para reducir la turbiedad, desinfectantes como el hipoclorito de sodio (NaClO) jugaron un gran papel en la reducción del número de brotes epidémicos en los comienzos del siglo XX. En 1908 se empleó el cloro por primera vez como un desinfectante primario del agua potable de New Jersey. El ozono como desinfectante, también empezó a emplearse por estas fechas en Europa (Serviquality, 2016).

De acuerdo con Teamb (2019) en 1996, se patenta el proceso SHARON (Single reactor system for High activity Ammonium Removal Over Nitrite), para el tratamiento de aguas residuales. Este proceso implica la nitrificación parcial del tratamiento de aguas residuales utilizado para la eliminación de amoníaco y componentes de nitrógeno orgánico de las corrientes de flujo de aguas residuales; mientras que en 1999 el Instituto Coreano de Ciencia y Tecnología patenta la primera celda de combustible microbiana, la cual hace uso de microbios para generar electricidad a partir de la energía bioquímica generada durante el metabolismo de sustratos

orgánicos, que sería el primer paso para aprovechar el tratamiento de aguas residuales con el fin de producir electricidad.

Se ha demostrado que, con el paso del tiempo, se busca la manera de realizar mejoras en las tecnologías con el fin de dar una mayor especificidad a los procesos, los cuales al ser más complejos y específicos tienden a tener más eficiencia en el propósito para el que están diseñados.

1.4 Gestión y legislación ambiental en el tratamiento de aguas residuales

Los procesos de producción están normados bajo protocolos de seguridad ambiental establecidos por el gobierno de cada país, en México la gestión y legislación están impartidos como reglamentos para planes de acciones correctivas y preventivas las cuales son implementadas por organizaciones a través de un sistema de calidad ambiental, donde se consideren el uso racional de los recursos, seguridad laboral y las correcciones y prevenciones de los impactos ambientales.

Para que el ser humano y el medio ambiente puedan vivir en un ecosistema con un entorno de salud y bienestar social, se aplica la legislación ambiental, la cual establece todas aquellas leyes, tratados, convenios y reglamentos en favor del medio ambiente regulando la interacción de los seres humanos y el medio natural (GRN,2016). En cuanto al tratamiento de aguas residuales CBR INGENIERIA (2021), menciona que existen normas oficiales mexicanas las cuales regulan su actividad y calidad productiva, esto con el fin de mantener una mayor prevención sobre el medio ambiente y la salud de la sociedad en general.

1.5 Ciclo socio-natural de agua

Linton & Budds (2014) mencionan que el ciclo hidro social se define como “un proceso socio-natural mediante el cual el agua y la sociedad se crean y rehacen mutuamente a través del espacio y el tiempo”.

Las acciones antropogénicas a lo largo de la historia han generado como consecuencia una huella humana que se encuentra prácticamente en todas las fuentes de agua (contaminación, regulación de ríos, sucesos naturales asociadas al

cambio climático, etc.) lo anterior mencionado es una evidencia de la importancia que implica el estudio del ciclo hidro social.

Un gran avance de la ecología política ha sido la reconceptualización de la relación entre cultura y naturaleza para impugnar la noción convencional occidental de que la naturaleza está separada de la cultura (Roca-Servant & Ocando, 2019).

De acuerdo con Stevenson, *et al* (2018), menciona que las relaciones alrededor del agua dan pie a comprender como distintos grupos sociales se han posicionado de manera diferente a lo largo de la historia, en sus relaciones con el estado, el derecho, la propiedad, el capitalismo, la tierra y la naturaleza en general.

Tomando en cuenta lo anterior y respecto al agua, esta perspectiva nos permite visualizar el futuro de los proyectos modernos sobre la naturaleza al tomar en cuenta al agua como un recurso fundamental para la aglomeración del capital y la planificación estratégica por delante de otras procreaciones de la naturaleza.

1.6 Sustancias químicas presentes en aguas residuales

Los contaminantes en el agua, principalmente metales e hidrocarburos nocivos para la salud humana y ambiental, pueden llegar al medio ambiente a través de procesos industriales, residuos municipales y actividades agrícolas. Además de interferir con la biodiversidad, estos contaminantes, directa o indirectamente, pueden ingresar a la cadena alimentaria humana, dañando o reduciendo la calidad de vida y causando varias enfermedades.

1.6.1 Componentes orgánicos

Las sustancias químicas orgánicas más comunes que podemos encontrar en aguas residuales son: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, compuestos orgánicos volátiles, entre otros

Hablamos de un compuesto orgánico cuando este contiene como estructura base una cadena hidrocarbonada y en el que el carbono comparte electrones para generar un enlace covalente.

Osorio *et al* (2021) menciona lo siguiente; los carbohidratos constituyen el 25% de los componentes orgánicos de las aguas residuales domésticas que están conformadas por azúcares, almidones los cuales se degradan por la actividad microbiana presente en las aguas residuales

Los lípidos conforman el 10% de los componentes orgánicos presentes en el agua residual, estos son considerados indeseables ya que generan daños por obstrucción en tuberías por lo cual, también generan malos olores y generan un impacto negativo en la proliferación de los microorganismos los cuales son importantes en el proceso de la degradación de la materia orgánica.

Las proteínas constituyen el 65% del material orgánico de las aguas residuales domésticas y son los principales componentes químicos que se trata en los sistemas de tratamiento, también se produce el ácido sulfhídrico debido a los aminoácidos azufrados presentes en las proteínas.

1.6.2 Componentes inorgánicos

Los componentes inorgánicos son aquellos en los cuales no encontraremos el carbono e hidrogeno en su estructura por lo cual, dichos componentes más comunes son:

- Nitratos (NO_3^-): Son nutrientes los cuales se encuentran naturalmente en el medio ambiente y están disponibles para las plantas, estos pueden ser absorbidos por los organismos vivos (Greenpeace, 2022) Los nitratos pueden ser nocivos para los ecosistemas y la salud humana debido al excesivo uso de los fertilizantes artificiales, ya que alteran las cantidades presentes en el medio ambiente.
- Sulfatos (SO_4^{2-}): Los sulfatos pueden tener su origen en que las aguas atraviesen terrenos ricos en yesos o a la contaminación con aguas residuales industriales. Los sulfatos se reducen químicamente a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno (H_2S) bajo la acción bacteriana en condiciones anaerobias (Ambientum, 2022).

- Cromo (Cr^{3+} y Cr^{4+}): Es uno de los elementos que se encuentra presente en las aguas residuales procedentes de una gran variedad de procesos industriales, su toxicidad dependerá de su estado de oxidación y concentración (ECOMAR, 2020).
- Hierro (Fe^{2+} y Fe^{3+}): Está presente en las aguas residuales debido a la producción de acero y otros materiales, este se encuentra trivalente en las aguas superficiales, y puede llegar a formar compuestos químicos producen serios problemas de salud (Osorio *et al.* 2021).
- Cloro (Cl^-): Es uno de los iones inorgánico que se encuentra en gran cantidad de las aguas residuales, naturales y residuales tratadas, también se genera por la disolución de minerales en cuerpos de agua por actividades industriales o domésticas.
- Calcio (Ca^{2+}): El Calcio pasa a los cuerpos de agua por disolución de carbonatos y sulfatos especialmente de yesos, al tener un alto contenido de este elemento en el agua, así como de magnesio, se denomina agua dura, debido a la gran cantidad de minerales disueltos en la misma.
- Zinc (Zn^{2+}): Es un metal que puede estar presente en el agua potable o residual como resultado de la actividad industrial o de la corrosión de tuberías y otras infraestructuras dicho lo anterior, la presencia de zinc en el agua puede ser perjudicial para la salud y el medio ambiente (Carbotecnia, 2023).
- Plomo (Pb^{2+}): El plomo es uno de los contaminantes inorgánicos no biodegradables más problemáticos, que actúa como un metal tóxico en aguas residuales industriales y potables, el cual tiene un impacto significativamente negativo en la biodiversidad, además de que acumula con facilidad en el medio ambiente y los organismos.

1.7 Contaminantes químicos en aguas residuales

El agua es un recurso indispensable para las actividades productivas del ser humano, pero también es un elemento de suma importancia para la sobrevivencia de los seres vivos en general, por lo que la contaminación por sustancias químicas a

cuerpos hídricos supone un gran riesgo de salud para los ser humano y ecosistemas en general.

En los campos agrícolas, el uso excesivo de fertilizantes como los nitratos y fosfatos generan que la precipitación y el riego produzcan aguas residuales ricas en nitrógeno las cuales se concentran en los ríos, arroyos y lagos. Esto conduce a la eutrofización por el rápido crecimiento de algas, agotamiento de oxígeno debido al aumento de algas, cambio de especies y redes alimentarias, la generación de cianotoxinas que causa la muerte de muchos peces y otras vidas acuáticas (Grijalva *et al.* 2020).

1.7.1 El plomo en el agua

En cuanto a la contaminación por metales pesados en el agua, el plomo es de particular interés debido al crecimiento de las industrias que generan grandes cantidades de aguas residuales con metales pesados. Tales como la industria de fabricación de baterías y la minería son los principales contribuyentes en la contaminación de algunos mantos acuíferos, que muchas veces termina en la red de servicio de agua y el sistema de fontanería de algunas comunidades (Carbotecnia, 2021).



Figura 1. Eutrofización de un lago por presencia de nitratos y fosfatos.

El plomo puede infiltrarse en el agua potable cuando las tuberías de servicio que contienen plomo se corroen; en especial, donde el agua contiene altos niveles de acidez o poco contenido mineral que corroe las tuberías y los elementos fijos (EPA, 2022). La presencia de metales pesados en el agua que consumimos representa un riesgo a la salud pública. Dentro de este tipo de metales, destacan As, Cd y Pb por su alta toxicidad (Moreno & Clamont, 2018). En el caso del Pb se observa neuro y nefrotoxicidad, alteraciones psicomotoras, hipertensión, alteraciones cardiovasculares y del sistema hematológico, además de posible desarrollo de cáncer en pulmón, estómago, cerebro y riñón (Moreno & Clamont, 2018).

La población infantil es sensible a esta sustancia, dado que puede absorber de cuatro a cinco veces más que un adulto, lo cual puede ocasionar problemas cognitivos como retraso mental, dificultades de aprendizaje, trastornos de conducta, anemia, daño en los riñones y el cerebro, debilidad muscular (Gómez *et al.* 2020) por lo que es de gran importancia capturar eficazmente el Pb (II) de las aguas residuales antes de ser vertidas al medio ambiente para reducir sus daños a los seres humanos y los organismos.

1.8 Efectos negativos de un mal manejo del agua residual

La gestión efectiva de los recursos hídricos es de gran importancia para garantizar la sustentabilidad del medio ambiente y de las industrias. Por lo que la eliminación y tratamiento efectivo de aguas residuales es un área clave para manejar adecuadamente la descarga de efluentes industriales ya que de no hacerlo de manera adecuada, estos pueden generar contaminación y graves problemas a la salud y el medio ambiente.

Con el fin de abordar el problema del agua residual se están desarrollando y aplicando diversas tecnologías de tratamiento de aguas contaminadas, incluyendo métodos de tratamiento físico, químico y biológico.

El agua residual es aplicada en diversos espacios públicos, sobre todo en el riego de áreas verdes, así como en el riego de campos agrícolas, lo cual beneficia a dichos cultivos y productores los cuales, al hacer uso de esta agua tratada, le están dando

una segunda oportunidad así como una mejora económica al producir alimentos con recursos reutilizados, además de que aumentan la concentración de algunos nutrientes en el suelo como nitrógeno, fósforo y carbono orgánico (García-Carrillo *et al.* 2020). Sin embargo, un mal manejo del agua residual puede conllevar desde un problema ambiental hasta problemas de salud graves en los seres vivos en general. El uso inadecuado del agua residual cruda o tratada genera varios problemas sobre las propiedades químicas y físicas del suelo (García-Carrillo *et al.*, 2020).

Los cambios fisicoquímicos del suelo por la presencia de agua residual tratada también pueden generar problemas en la microbiología del suelo, alterando el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico entre otros, inclusive puede llegar a provocar un suelo infértil, esto dependerá de la calidad del agua residual que se aplica en dicho suelo.

El tratamiento biológico al agua residual es de suma importancia, al no tener un buen manejo de este proceso mencionado, se corre el riesgo de contener patógenos los cuales puedan ser propagados por medio del riego de áreas verdes en espacios públicos y provocar enfermedades en los seres humanos.

1.9 Tecnologías en el tratamiento del agua

El desarrollo de tecnología ocupa un rol muy importante en el tratamiento de aguas residuales ya que nos proporciona las herramientas y soluciones para una mejora continua en la eficiencia, calidad y sostenibilidad de los procesos de tratamiento.

Con el paso de los años, se han llevado a cabo importantes avances en materia de investigación para el desarrollo de nuevas tecnologías que generen una gestión más eficiente del agua y su posterior tratamiento para prevenir y reducir la contaminación de los recursos hídricos. Hoy en día existen muchos avances tecnológicos que proporcionan mayor eficacia en los diferentes procesos de tratamiento, de los cuales se mencionan algunos con relevancia para este trabajo.

1.9.1 Osmosis inversa

Es un proceso tecnológico el cual trabaja mediante la aplicación de alta presión, por lo cual el agua es forzada a pasar a través de filtros de mayor a menor porosidad y también por membranas semipermeables y con ello se deja atrás a los contaminantes que dicho efluente pueda contener, el resultado de este proceso depende del agua utilizada y en gran medida de los tipos de membrana, así como de la presión de operación. Cabe mencionar que este proceso esta comercialmente disponible, permite una separación física, requiere poco espacio, es altamente eficiente incluso en concentraciones altas de contaminantes, no requiere reactivos químicos, y genera pocos residuos sólidos. Sin embargo es costoso, requiere membranas especiales, tiene un flujo limitado de operación, no es muy eficiente en concentraciones bajas y las membranas deben de ser acordes al proceso de interés.

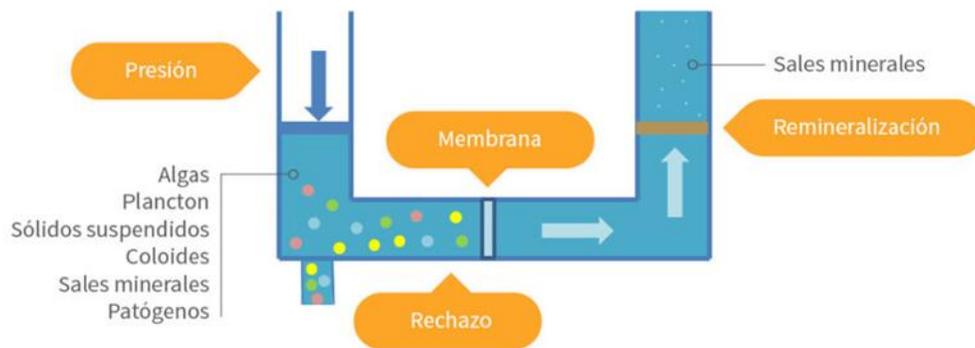


Figura 2. Proceso del tratamiento de agua mediante osmosis inversa.

1.9.2 Oxidación avanzada

La oxidación avanzada es un proceso en el que se utilizan reactivos químicos o radicales libres para descomponer contaminantes orgánicos persistentes en el agua residual. Esta tecnología es especialmente efectiva para tratar compuestos químicos resistentes a los métodos convencionales de tratamiento (IDRICA, 2023).

Mediante la combinación de Ozono, UV y peróxido de hidrógeno creamos radicales Hidroxilo, el mayor oxidante para la eliminación de contaminantes orgánicos. El radical hidroxilo tiene un potencial de oxidación mayor que el ozono o el peróxido por

separado y normalmente reacciona un millón de veces más rápido por lo que hay menor tiempo de contacto y huella ambiental (ASAP S.T. 2019).

Los procesos avanzados de oxidación (PAO) son procesos complementarios de los tratamiento físicos, químicos y microbiológicos, ya que aumentan la eficiencia por medio de destrucción química de contaminantes presentes en el agua, sin generar nuevos residuos contaminantes como lodos y gases (Cure, Gómez, 2020).

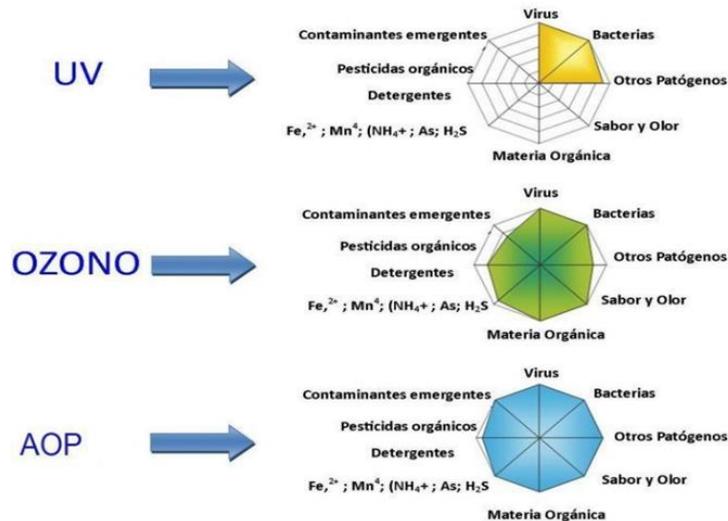


Figura 3. Procesos avanzados de oxidación, comparación de los tratamientos con radiación UV, Ozono y otros PAO (ASAP, 2019).

Este proceso presenta la ventaja de ser rápido, eficiente y simple, promueve una mejor biodegradabilidad de los productos, no genera lodos y puede ser aplicado para tratamientos biológicos de aguas y eliminar bacterias y virus. Sin embargo requiere químicos, su eficiencia está directamente ligada a la capacidad del oxidante utilizado, se pueden formar compuestos intermedarios desconocidos y puede llegar a generar compuestos volátiles y aromáticos.

1.9.3 Biodisco

Este sistema remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el agua residual, bajo condiciones aeróbicas. Los discos giran a velocidades de 1 y 2 r.p.m y aproximadamente el 40% del área superficial de los discos esta sumergida en el

agua residual que está contenida en un tanque de concreto X. Los microorganismos presentes en el agua residual comienzan a fijarse y multiplicarse en la superficie de los discos que se cubre con una película biológica (biomasa) de 2 a 4 milímetros de espesor (Guzmán *et al*, 2020).

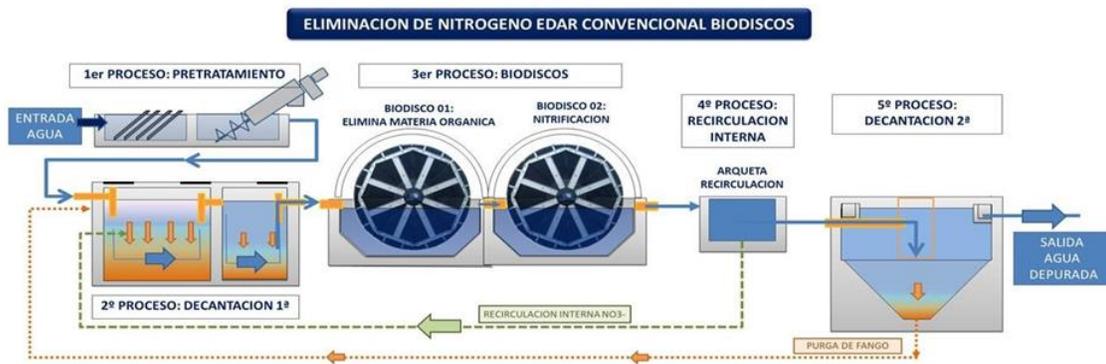


Figura 4. Diagrama de eliminación de nitrógeno usando biodiscos (Iagua, 2023).

El tratamiento con Biodisco proporciona un elevado rendimiento en la reducción de DBO5, a la vez que presenta un buen comportamiento frente a los tóxicos y una buena resistencia a las sobrecargas puntuales. El exclusivo diseño de los minidisos con estructura abanicada proporciona una mayor superficie de contacto para el crecimiento de los organismos y posibilita un desprendimiento más fácil de la biopelícula (Romero, 2018).

1.10 Coagulación

Dentro de los métodos fisicoquímicos para el tratamiento de aguas, se encuentra la coagulación, este se basa en la carga de los contaminantes solubles y las moléculas del coagulante. En este proceso se añaden productos químicos para cambiar el estado de los sólidos suspendidos y disueltos para su posterior floculación y eliminación. Este proceso se caracteriza por ser relativamente simple, se pueden utilizar una gran variedad de reactivos químicos, es muy eficiente para la formación de sedimentos. Sin embargo requiere una serie de parámetros bien optimizados para funcionar eficientemente y genera un volumen considerable de sedimentos.

1.11 Floculación

La floculación se puede definir como la aglutinación de partículas desestabilizadas electrostáticamente por el proceso de coagulación, el propósito de la floculación es a su vez aglomerar las partículas suspendidas en grandes copos, ya sea como precipitados o partículas en suspensión (Quino, 2020).

La floculación es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, promueven la aglomeración de las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su precipitación para su posterior filtrado como lo muestra la figura 5. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas servidas domésticas e industriales.

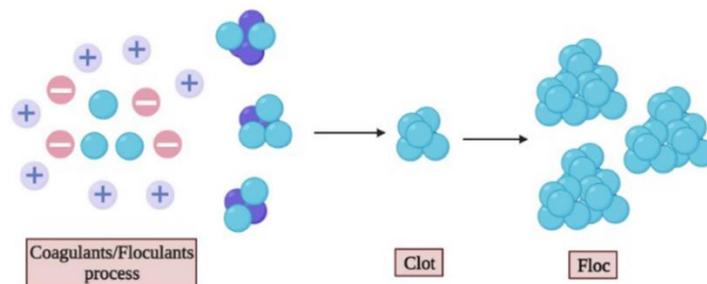


Fig. 5. Coagulation, and flocculation principle.

Figura 5. Principio de coagulación y floculación

De acuerdo con Jordán (2018) la densidad de los flóculos formados debe ser superior al del agua y estos se deben compactar para disminuir su grado de hidratación con el fin de producir un precipitado compacto, lo que produce una alta eficiencia en los procesos posteriores de sedimentación y filtración.



Figura 6. Comparativa de una muestra de agua residual con flocculantes

1.11.1 Tipos de coagulantes y flocculantes

Dentro de los tipos de coagulantes y flocculantes, se pueden clasificar como naturales y químicos, siendo los naturales aquellos basados en plantas y animales, como goma guar, goma arábica, almidón, quitosano y goma de xantana.

Los coagulantes químicos los podemos encontrar tres diferentes tipos los cuales son los siguientes: sales metálicas hidrolizantes (FeCl_3), ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), (MgCl_2) sales metálicas prehidrolizantes ($\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}$), ($\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$) y polímeros catiónicos sintéticos

1.11.1.1 Flocculantes catiónicos

Los flocculantes catiónicos están formados por macromoléculas con grupos cargados positivamente, lo que les permite interactuar electrostáticamente con las partículas cargadas negativamente presentes en el agua. Estas partículas pueden ser sólidos suspendidos, arcillas, materia orgánica y otros contaminantes que dan turbidez al agua (Vel I.CH. 2023).

1.11.1.2 Flocculantes aniónicos

Los flocculantes aniónicos tienen carga eléctrica negativa y se añaden al agua para neutralizar las partículas cargadas positivamente presentes en ella. Cuando se agregan al agua, los flocculantes aniónicos se combinan con las partículas suspendidas y sólidos disueltos con carga positiva, formando flocs o flóculos, que

son partículas más grandes y pesadas que se asientan rápidamente al fondo del tanque o se agrupan en la superficie, facilitando su posterior separación del agua (Vel I.Ch. 2023)

1.11.1.3 Floculantes a base de polímeros naturales: biofloculantes

Villanueva, Quispe (2020) mencionan que en los últimos años los científicos de todo el mundo han intentado hallar entre la flora y la fauna, especies endémicas capaces de remover con eficiencia las impurezas presentes en el agua destinadas para consumo humano.

De acuerdo con el estudio de Sánchez (2021) menciona que los biopolímeros son capaces de eliminar una gran gama de contaminantes suspendidos, pero eliminan en muy poca cantidad los sólidos disueltos, ya sean orgánicos e inorgánicos que se encuentran en aguas residuales, las cuales son provenientes de hogares, industrias, o causadas por la lluvia.

Con el paso de los años, han surgido evidencias científicas a base de artículos de investigación donde se menciona que el uso de semillas y extractos de plantas los cuales son seguros y eficientes para su uso en el proceso de potabilización de las aguas.

Aunque se han reportado muchos coagulantes de origen vegetal, solamente hay cuatro tipos muy conocidos entre la comunidad científica, a saber, semillas de Nirmali (*Strychnos potatorum*) Almidones, Moringa oleífera, Cactus y Taninos (Villanueva, Quispe, 2020).

1.11.2 Factores que promueven la coagulación-floculación

Los factores que afectan los procesos de coagulación-floculación son la concentración del coagulante, el tiempo de contacto, la temperatura y el pH. El tiempo de tratamiento es de gran importancia porque permite aumentar la probabilidad de que las partículas entren en contacto entre sí y se unan para generar aglomerados además de que un mayor tiempo de tratamiento permite que las partículas precipiten, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo. Por

otra parte, el pH es un factor prominente en la acción desestabilizadora de las sustancias coagulantes y floculantes al modificar la potencial zeta de la solución y disminuir la repulsión electrostática (Rojas, 2019).

1.11.3 Concentración de coagulante-floculante

La concentración de coagulantes tiene un gran impacto en el proceso de coagulación, medido por el grado de eliminación de partículas que causan turbidez del agua, ya que es necesario utilizar la cantidad adecuada para desestabilizar las partículas suspendidas y estas puedan agruparse, sin embargo no es conveniente utilizar un exceso de coagulantes debido a que pueden provocar una inversión de carga y evitar la precipitación de partículas. La concentración adecuada de coagulante depende de las partículas coloidales y del pH de la solución,

1.11.4 Temperatura

La temperatura tiene un efecto importante en el proceso de coagulación, al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad de las moléculas y, por lo tanto, aumenta la energía cinética. Además, al aumentar la temperatura aumentan las reacciones químicas; Con lo que, el aumento de la temperatura disminuye el tiempo de formación de flóculos y disminuye la viscosidad del agua.

1.11.5 Peso molecular

De acuerdo con el estudio de Rojas (2019), en la minería, los floculantes utilizados son polímeros sintéticos de alto peso molecular, cuyas moléculas son de cadena larga y con gran afinidad por las superficies sólidas. Estas macromoléculas se fijan por adsorción a las partículas y provocan así la floculación por formación de puentes Inter partículas.

Los floculantes de mayor peso molecular como los polielectrolitos son polímeros de alto peso molecular, naturales o sintéticos. Contienen unidades de bajo peso molecular combinadas químicamente para formar una molécula de tamaño coloidal en las que cada una de ellas tiene una o más cargas o grupos ionizables.

1.11.6 Biofloculantes a base de almidón

El almidón es un polisacárido, es un producto natural de las plantas y a lo largo del tiempo se le ha dado una gran cantidad de usos desde procesos domésticos a procesos industriales, lo podemos encontrar en variedades de vegetales, frutas y granos. Dicho polímero natural consiste en la mezcla de dos glucanos, ya que cada partícula de almidón incluye principalmente amilosa y amilopectina. Como se puede observar en la figura 7

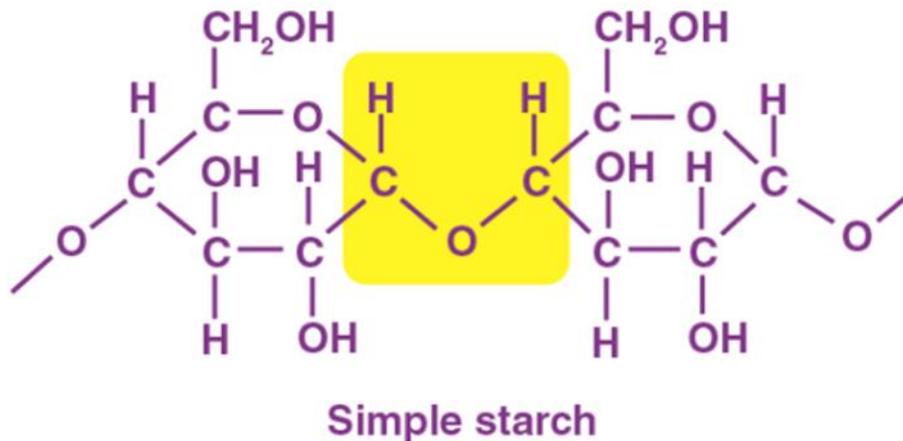


Figura 7. Estructura molecular de almidón simple

En el tratamiento de aguas, se ha observado que el uso del almidón modificado es una alternativa que permite disminuir el consumo de polímeros sintéticos comúnmente utilizados en el proceso de coagulación y floculación (polielectrolitos), reduciendo así los costos en plantas tratadoras (Galvéz-limon *et al*, 2021)

De acuerdo con múltiples investigaciones científicas, se ha concluido que el almidón de maíz es un coagulante-floculante que puede ser utilizado como una alternativa adicional para el tratamiento de aguas y que además sirve para la reducción de color y turbidez en aguas sin tratamiento previo (Velandia. 2021)

En base al estudio de investigación realizada por Acosta, Hernández (2021) el cual se basa en el uso de almidón nativo de malanga (*Colocasia esculenta*) como agente floculante, demostró que tiene la capacidad de remoción de la turbiedad en un

93.1% y de color del 94.7% por lo cual este resultado demuestra tener una buena eficacia para ser usado en el tratamiento de aguas.

1.11.7 Polímero lineal: Amilosa

La amilosa es el producto de la condensación de D-glucopiranosas por medio de obtener enlaces ramificadas glucosídicos α (1,4), que establece largas cadenas lineales con 200-2500 unidades y pesos moleculares hasta de un millón; es decir, la amilosa es una α -D-(1,4)-glucana cuya unidad repetitiva es la α -maltosa.

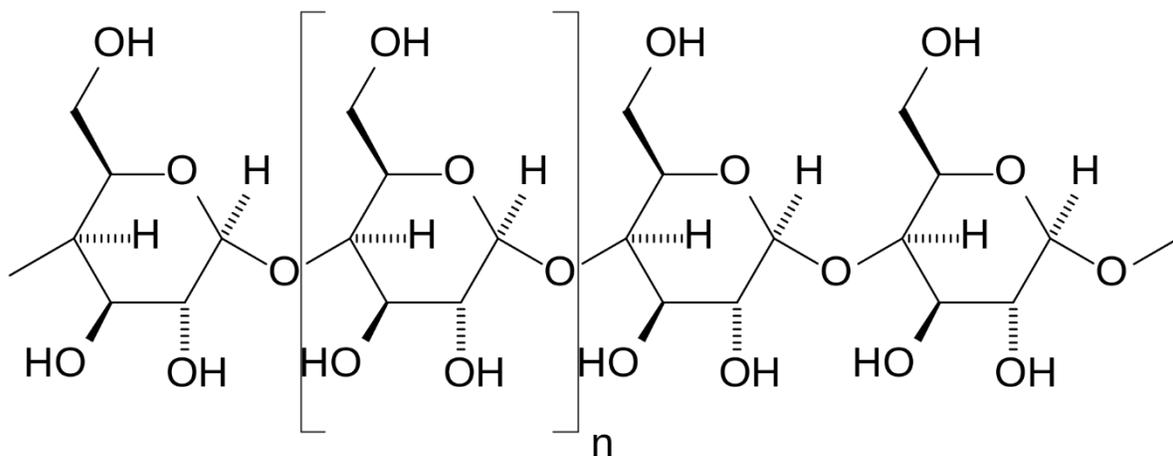


Figura 1. Estructura molecular de la Amilosa

La amilosa es, desde el punto de vista químico, un polímero de α -D-glucosa unidos entre sí por enlaces glicosídicos α -1,4 por lo cual esto quiere decir que un enlace covalente desde el carbono 1 de una de las glucosas hasta el carbono 4 de otra molécula de glucosa.

El peso molecular 150 000–1 000 000 de daltones, dependiendo del origen biológico. En promedio son unos 1500 residuos de glucosa unidos entre sí pero claro esto puede ser variable de acuerdo con su peso molecular.

Como hemos visto, el polímero de amilosa es esencialmente lineal. Sin embargo, en ocasiones se pueden presentar ramificaciones, pero éstas son tan deficientes por lo que se puede considerar al polímero como lineal o bien, tiene porciones lineales tan largas que esencialmente se comporta como un polímero lineal.

1.11.8 Polímero lineal: Amilopectina

León-Méndez et al (2020) menciona que la amilopectina es una macromolécula ramificada con cadenas lineales cortas unidas por enlaces glucosídicos α^{1-6} . Contiene de 10 a 60 unidades de glucosa y las cadenas laterales con 15 a 45 unidades de glucosa con un promedio de 5% de los enlaces α^{1-6} en puntos ramificados. El peso molecular de la amilopectina es de aproximadamente 1000 veces superior al peso molecular de la amilosa y oscila entre 1×10^7 a 5×10^8 g/mol.

1.11.9 Cambios en almidón

Al realizar cambios, el almidón puede conseguir propiedades funcionales que no se encuentren en los almidones nativos a pesar de ser un estabilizador de buena textura, presenta limitaciones tales como la resistencia de bajo cizallamiento, descomposición térmica y elevada tendencia a la retrogradación limitando así sus usos en algunas aplicaciones industriales (León- Méndez, 2020)

La modificación del almidón permite realizar o inhibir propiedades como consistencia, poder aglutinante, estabilidad a cambios de pH, temperatura y mejorar su gelificación, dispersión o fluidez (Poltec, 2021)

Se pueden realizar cambios o modificaciones de tipo biológico, para realizar estas técnicas se requiere un amplio conocimiento en la genética de la planta y sobre todo de la biología molecular.

Las transformaciones físicas y químicas están orientadas a superar las limitaciones que tienen los almidones nativos, por tanto limitan sus aplicaciones ya que muestran poca solubilidad a temperatura ambiente, resistencia a la hidrólisis enzimática, falta de características funcionales específicas, baja resistencia al esfuerzo cortante, descomposición térmica y alta sinéresis y retrogradación, por lo se deben implementar modificaciones para cambiar la estructura y obtener las propiedades funcionales requeridas (Algecira, 2023).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación del estudio experimental

La presente investigación fue realizada en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), en el Laboratorio de Planeación Ambiental y Edafología, ubicado en el Departamento de Ciencias del Suelo.

2.2 Síntesis del copolímero aniónico

La síntesis del copolímero aniónico se llevó a cabo bajo condiciones de atmósfera inerte. En un sistema conformado por un reactor de 500 mL se adicionaron las cantidades correspondientes de monómeros (anhídrido maleico y 4-vinilbencenosulfonato de sodio) en una relación molar de 50:50 (agente de transferencia e iniciador AIBN).

La reacción se llevó a cabo a 70 °C durante un periodo que se estableció de acuerdo con estudios cinéticos. El peso molecular del copolímero estuvo en función de la relación monómero: agente de transferencia. Por su parte, se manejó una relación agente de transferencia: iniciador de 10 a 1.

2.2.1 Modificación del polímero natural

En un sistema cerrado y bajo condiciones de atmosfera controlada, se mezclaron el almidón (grado reactivo) y el copolímero sintetizado en proporciones de 1:5, respectivamente. La reacción se llevó a cabo a 70 °C por un periodo de 7 horas, mezclando con un agitador mecánico a 3500 rpm durante toda la reacción.

2.3 Preparación de la solución de Pb

La preparación de la solución de plomo soluble (misma que fue utilizada en todos los experimentos) fue llevada a cabo en función de los cálculos presentados a continuación:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$V_1 = \frac{C_2V_2}{C_1}$$

$$V_1 = \frac{30 \text{ ppm} * 1000 \text{ ml}}{1000 \text{ ppm}} = 30 \text{ ml}$$

donde:

C_1 = es la concentración de la solución madre de Pb.

V_1 = es la cantidad de muestra de la solución madre que debe ser tomada para preparar la solución requerida.

C_2 = es la concentración de la solución a preparar.

V_2 = es el volumen a preparar de la solución requerida.

Considerando los cálculos anteriores, con la ayuda de una pipeta volumétrica, se extrajeron 30 ml de la solución madre de Pb (1000 ppm), vaciado este volumen en un matraz de aforación de 1 L, añadiendo agua desionizada para obtener la solución requerida para los experimentos.

2.4 Evaluación de los floculantes poliméricos

Se ordenaron y rotularon con su respectivo tratamiento, 15 matraces de aforación por cada muestra, incluyendo los blancos para después agregar los gramos correspondientes a cada matraz de aforación tal y como se muestra en la tabla 1.

Una vez que se completó el pesaje y se agregaron los gramos adecuados a cada tratamiento (como se muestra en la tabla 1), se agregó 100 ml de solución madre a 10 de los matraces de aforación, a excepción de 5 de ellos ya que a estos últimos se les agregó 100 ml de agua desionizada.

Los matraces de aforación fueron vaciados en matraces Erlenmeyer de 250 ml con su respectivo rotulo que los diferencia de los demás, una vez que se realizó esto se taparon con cinta Parafilm y se procedió a insertarlos en una parrilla de agitación a una velocidad constante de (n) revoluciones durante 24 h.

Tabla 1. Tratamientos definidos en el desarrollo experimental.

Tratamiento	Cantidad de muestra a añadir (g)
1	0.1 g
2	0.25 g
3	0.50 g
4	1 g
5	2 g

2.5 Filtración

Para asegurar que el floculante polimérico no afectara las mediciones en el espectrofotómetro de absorción atómica se procedió a hacer una filtración de las muestras previamente agitadas, utilizando un papel filtro de 40 micras y filtrando por gravedad cada muestra individual. Este proceso fue repetido varias veces hasta observar una nula turbidez en la muestra filtrada.

2.6 Cuantificación de metales pesados por absorción atómica.

Una vez filtrada la solución, se procedió a cuantificar la concentración de Pb en las muestras obtenidas, utilizando un Espectrómetro de Absorción Atómica (Varían, SpectrAA-S) equipado con una lámpara de cátodo hueco, previo a la calibración del equipo y la realización de la curva de calibración correspondiente.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación, se presentan los resultados más relevantes obtenidos de la investigación realizada. La tabla 2 muestra el porcentaje de remoción de plomo por cada uno de los tres floculantes utilizados de los cuales se emplearon distintas cantidades de floculante, desde 0.1g hasta 2g.

Donde es posible apreciar la absorción de plomo por medio de la precipitación del floculante polimérico en los tratamientos alcanza un máximo de 6.67% en los tratamientos realizados.

Tabla 2. Porcentajes de remoción de plomo.

Tratamiento Floculante	T ₁ 0.1g	T ₂ 0.25g	T ₃ 0.5g	T ₄ 1g	T ₅ 2g
M ₁	5	6.67	4.85	1.62	1.47
M ₂	6.67	2.4	2.09	0.99	2.72
M ₃	1.67	3.34	6.67	3.34	6.67

3.1 Floculante M₁

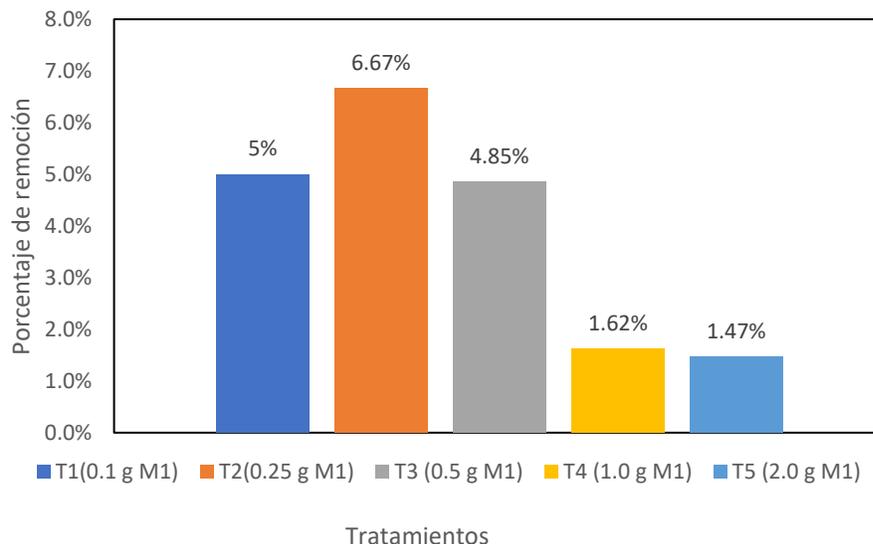


Figura 9. Porcentajes de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico sintetizado (M₁).

En la figura 9 se muestran los resultados para la remoción de Pb de la solución utilizando el copolímero aniónico (M₁).

De acuerdo con la figura 9, estos resultados muestran que el tratamiento número dos (T₂) con una cantidad de 0.25g de floculante tuvo un mayor porcentaje de remoción de plomo con un 6.67% mientras que el tratamiento número cinco (T₅) en el cual se utilizaron 2g de floculante tuvo el menor porcentaje de remoción con un 1.47%, por lo que es posible inferir que una mayor concentración de floculante en la solución inhibe la absorción de plomo de esta.

3.2 Floculante M₂

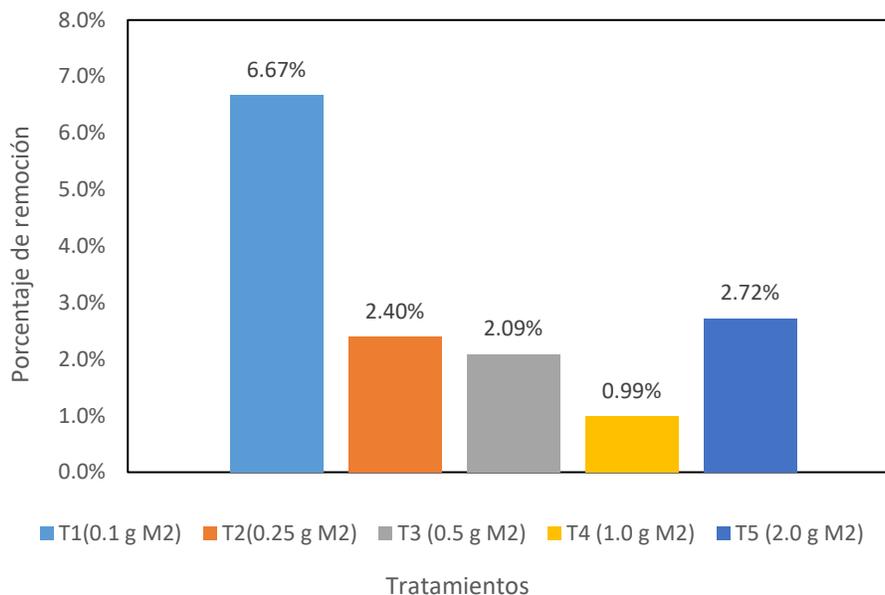


Figura 10. Porcentajes de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico sintetizado (M₂).

En la figura 10 se representan en porcentajes los resultados de absorción de plomo utilizando el floculante M₂ bajo distintas concentraciones. De acuerdo con la figura mencionada, se muestra que el tratamiento número uno (T₁) tuvo un mayor porcentaje de remoción que los otros tratamientos, con un 6.67%, también se observa que el tratamiento número cuatro (T₄) fue el que tuvo menor capacidad de remoción con un porcentaje de 0.99%, es destacable mencionar que conforme aumenta la cantidad de floculante, se reduce la capacidad de absorción, siguiendo un comportamiento similar al del floculante M₁.

3.3 Floculante M₃

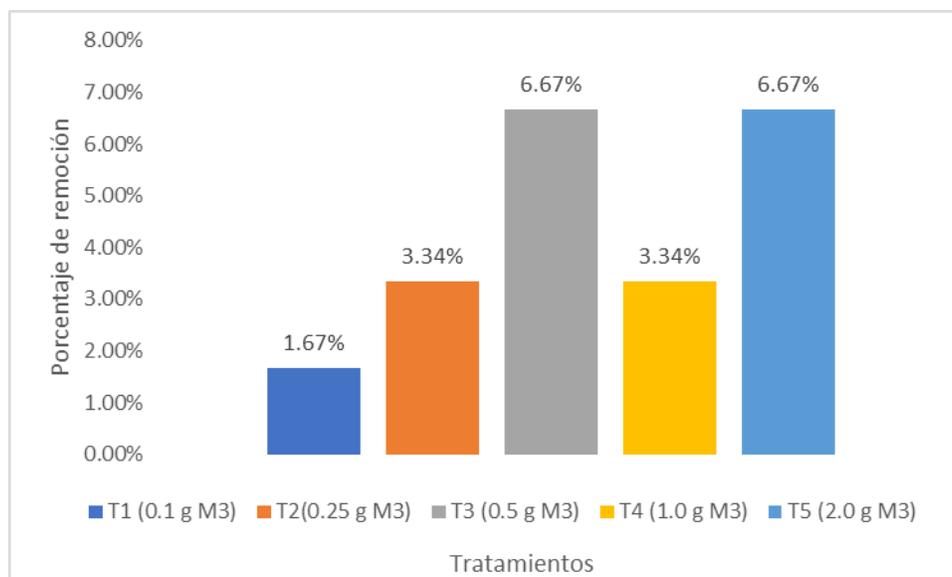


Figura 2. Porcentaje de remoción de plomo utilizando un copolímero aniónico (M₃)

En el caso del floculante M₃ este presentó los resultados mostrados en la figura 11, donde es posible apreciar que se logró una absorción de plomo del 6.67% en el tratamiento tres (T₃) y tratamiento cinco (T₅) ambos con un 6.67% de remoción de plomo (Pb), mientras que el tratamiento uno (T₁) fue el de menor capacidad de eliminación del contaminante mencionado con un 1.67% de remoción.

Los resultados obtenidos durante el experimento usando un copolímero aniónico para la remoción de plomo (Pb) en agua residual muestran porcentajes similares de remoción de plomo bajo las condiciones experimentales propuestas, evidenciando que bajas concentraciones de floculante son adecuadas para generar una remoción efectiva de plomo, ya que en los tratamientos M₁ y M₂ las concentraciones que lograron una mayor eliminación de plomo de la solución fueron las de 0.1g y 0.25g respectivamente.

Mientras que el tratamiento M3 probó ser efectivo a mayores concentraciones. Lo que lleva a concluir que los tratamientos M1 y M2 poseen un mecanismo similar de coagulación, mientras que el M3 logra resultados similares a concentraciones mayores que los otros compuestos utilizados, posiblemente a cambios estructurales de los floculantes ya sea por un mayor peso molecular, o ramificaciones de las cadenas poliméricas que los conforman.

CONCLUSIONES

Dados los resultados obtenidos es posible concluir que en base a la investigación realizada técnica de coagulación/floculación es efectiva, ya que los agentes floculantes estudiados presentan factibilidad para la remoción de plomo en aguas residuales al precipitar el plomo de la solución y separarlo del agua residual.

Adicionalmente al éxito de la técnica de coagulación/floculación se puede sumar la capacidad de sintetizar con éxito agentes floculantes con base almidón de maíz, ya que en todos los tratamientos estudiados bajo las condiciones experimentales descritas lograron con éxito una eliminación adecuada del 6.67% del plomo disuelto en aguas residuales. Sin embargo, es necesario realizar más investigación para la síntesis de estos compuestos con el fin de determinar las condiciones óptimas de síntesis y probarlos bajo condiciones específicas de concentración, pH, tiempo y temperatura. Con lo que se sientan las bases para continuar con la transición de coagulantes químicos a coagulantes de origen natural basados en plantas que resultan económicamente más viables y amigables con el medio ambiente al no producir efluentes contaminantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambientum (2022). Determinación de sulfatos. Enciclopedia Medioambiental. 24 noviembre 2022. https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/determinacion_de_sulfatos.asp#:~:text=El%20contenido%20de%20sulfatos%20no%20suele,mismos%20en%20las%20aguas%20de%20bebida.&text=El%20contenido%20de%20sulfatos,las%20aguas%20de%20bebida.&text=de%20sulfatos%20no%20suele,mismos%20en%20las%20aguas
- Ana Laura Acosta-Bastar, José Roberto Hernández-Barajas. (2021). Dinámica de fluidos computacional del proceso de coagulación-floculación empleando almidón de malanga como floculante para potabilización de agua. Revista Mesoamericana de Investigación ISSN: 2683-3093 Volumen 1. Número 1. 2021 https://www.researchgate.net/publication/359479159_Dinamica_de_fluidos_computacional_del_proceso_de_coagulacion_floculacion_empleando_almidon_de_malanga_como_floculante_para_potabilizacion_de_agua
- Argoytia, L. L. (2022). El valor del agua. Ecofronteras, 33-36. <https://revistas.ecosur.mx/ecofronteras/index.php/eco/article/view/2042>
- ASAP S.T. Oxidación avanzada, tratamientos avanzados de fluidos. ASAP S.T. <https://asapservices.es/>
- Carbotecnia (2023). Zinc como contaminante en el agua potable. Empresa Carbotecnia. 9 de mayo 2023. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/el-zinc-como-contaminante-en-el-agua-potable/>
- Cure, Gómez. (2020). Análisis de alternativas para la potabilización de agua de lluvia para uso doméstico en zonas rurales de Colombia. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15410/13/CureSara_2020_PotabilizacionAguaLluvia.pdf

- ECOMAR (2020). ¿Qué son las aguas residuales? Fundación ECOMAR. [https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/#:~:text=Qu%C3%ADmicos%3A%20Los%20componentes%20qu%C3%ADmicos%20m%C3%A1s,prioritarios%20y%20azufre\)%3B%20gases%20](https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/#:~:text=Qu%C3%ADmicos%3A%20Los%20componentes%20qu%C3%ADmicos%20m%C3%A1s,prioritarios%20y%20azufre)%3B%20gases%20)
- García-Carrillo, M., J. G. Luna-Ortega, M. Á. Gallegos-Robles, P. Preciado-Rangel, M. G. Cervantes-Vázquez. (2020). Impacto de aguas residuales sobre algunas propiedades y acumulación de metales pesados en el suelo. *Terra Latinoamericana* 38: 907-916. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.556>
- Gómez-Aguilar, D.L., Esteban-Muñoz, J.A. y Baracaldo-Guzmán, D. (2020). Tecnologías no convencionales para la remoción de plomo presente en aguas residuales: una revisión bibliográfica 2010-2019. *Tecnura*, 24(64). 97-116 <https://doi.org/10.14483/22487638.15849>
- Greenpeace (2022). ¿Qué son los nitratos? Greenpeace. <https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/un-agua-de-mierda-el-legado-de-las-macrogranjas/que-son-los-nitratos/>
- Grijalva et al (2020). Contaminación del agua y aire por agentes químicos. *Recimundo, Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*. 23 quimica;2391 quimica ambiental. pp. 79-93 <https://www.recimundo.com/index.php/es/article/view/883>
- H. Mael Gálvez-Limón, Diana V. Félix-Alcalá. (2021). Tratamiento de aguas vía floculación usando materiales ambientalmente amigables: Ensayos en México. *Revista Ingeniería y Tecnología UAS*. <http://revistaingenieria.uas.edu.mx>
- IDRICA (2023). La revolución tecnológica en las plantas de tratamiento de aguas residuales. IDRICA. <https://www.idrica.com/es/blog/revolucion-plantas-aguas-residuales/>
- J. Bahena, (2019). Unidad 1 Antecedentes del tratamiento de aguas residuales. Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.academia.edu/36500244/Unidad_1_Antecedentes_del_tratamiento_de_aguas_residuales

- J. L. Velandia-Zuluaga. (2021). Evaluación del almidón de maíz y trigo como coagulante – floculante para la remoción de turbiedad y color aparente en acueductos rurales. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – Unad. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/40641/jlvelandiaz.pdf?sequence>
- Jordán. (2018). Sistema de coagulación-floculación a escala laboratorio y su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de preparación de pega para la elaboración de zapatos de cuero. Universidad Técnica de Ambato. http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/29346/1/Tesis_%20t1543mshi.pdf
- León-Méndez, Glicerio et al. (2020). Modificación química de almidones mediante reacciones de esterificación y su potencial uso en la industria cosmética. Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 2020, vol. 39, núm. 5, ISSN: 0798-0264. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4263365>
- Linton, J.y J. Budds (2014) The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational -dialectical approach to water. Geoforum, 57, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>.
- Martínez-Austria, P.F., Díaz-Delgado, C., Moeller-Chavez, G. (2019). Water security in Mexico: general diagnosis and main challenges. Ingeniería del agua, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/la.2019.10502>.
- N. A. Alegecira Enciso. (2023). Evaluación de la modificación de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) vía desramificación enzimática y entrecruzamiento y la utilización del almidón modificado para la obtención de películas biodegradables. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/84270/79491089.2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Ordóñez, J. I. (2020). El agua y el sector rural en Colombia. Revista de ingeniería, (49),10-17. <https://revistas.uniandes.edu.co/index.php/rdi/article/download/7486/7883>

- Osorio et al (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas, the quality of domestic waste water, A qualidade das águas residuais domésticas. Pol. Con. (Edición núm. 56) Vol. 6, No 3 marzo 2021, pp. 228-245. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>
- Poltec. (2021). Diferencias entre el almidón nativo y el almidón modificado en la industria de los alimentos. Poltec. <https://www.poltecsas.com/post/diferencias-entre-el-almid%C3%B3n-nativo-y-el-almid%C3%B3n-modificado-en-la-industria-de-los-alimentos#:~:text=La%20modificaci%C3%B3n%20del%20almid%C3%B3n%20permite,la%20pregelatinizaci%C3%B3n%20y%20la%20derivatizaci%C3%B3n>
- Quino. (2020). Evaluación de aguas residuales bajo el tratamiento a diferentes temperaturas de coagulación-floculación con semillas de durazno (*Prunus pérsica*), Tuna (*Opuntia ficus indica*) y cáscara de Papa (*Solanum tuberosum*) del río Jillusaya. Universidad Mayor de San Andrés. 1839-1852. Enero –Abril. 2020. ISSN: 2519-9382. <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/52/49>
- Roca-Servat & Ocando (2019). Si a la vida, al agua y al territorio. Revista europea de Estudios Latinoamericanos y del Caribe, No. 107 (January-June, 2019) pp. 117-138. <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26764795>
- Rojas, W. E. (2019). Tratamiento de agua potable con floculantes para minería, Cajamarca-2019 (Trabajo de investigación). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/26249>
- Serviqualita, (2016). Antecedentes históricos del tratamiento del agua. S.A. Calidad y Servicio. <https://serviqualita.es/index.php/inicio/blog/item/152-antecedentes-historicos-del-tratamiento-del-agua>
- Stevenson, S. (2018) Decolonizing hydrosocial relations: The river as a site of ethical encounter in Alan Michelson's TwoRow I. Decolonization: Indigeneity, Education & Society, 6(2), 94-113.

- Teamb Alternativa aplicada ambiental S.A. DE C.V. (2019). Historia de las plantas de agua <https://teamb.com.mx/historia-de-las-plantas-de-agua>.
- Villanueva Barragan, L. M., & Quispe Chahuara, L. C. (2020). Polímeros naturales para sustituir floculantes químicos en el tratamiento de aguas para consumo humano. Una revisión. https://www.academia.edu/90373344/Pol%C3%ADmeros_naturales_para_sustituir_floculantes_qu%C3%ADmicos_en_el_tratamiento_de_aguas_para_consumo_humano_Una_revisi%C3%B3n