

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DE AGUA A TRAVÉS DE PRUEBAS DE JARRAS

REPORTE FINAL DE RESIDENCIA PROFESIONAL QUE PRESENTA:

Adrian de Jesús Pérez Mejía

Como requisito para acreditar la Residencia Profesional de la Licenciatura en:

INGENIERIA QUÍMICA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas
14 de Febrero de 2023



**IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE
CARACTERIZACIÓN DE AGUA A TRAVÉS DE
PRUEBAS DE JARRAS**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi profundo agradecimiento a mis padres Raúl y Amalia, ellos representan para mí el mayor ejemplo de superación y siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. A pesar de no contar con un conocimiento académico extenso, su presencia constante en mis momentos más difíciles ha sido mi mayor fortaleza y motivación diaria. Además, quiero reconocer el respaldo material y económico que me brindaron, permitiéndome culminar con éxito este proyecto. Su contribución ha sido invaluable y les estoy eternamente agradecido.

Agradezco a mis hermanos Karina, Christian, Jhonathan, Ahtiziri y Leonardo, quienes han sido mi apoyo inquebrantable a lo largo de este viaje académico. Existe un proverbio que dice: "un hermano nace en la adversidad" (Proverbios 17:17), y mis hermanos son una prueba de ello, agradezco por su compañía constante, su apoyo incondicional desde el inicio hasta el final de este proyecto y por ser el sólido respaldo que siempre necesité. Su presencia ha sido un regalo invaluable, y su influencia ha enriquecido mi camino de maneras incontables.

Por último, quiero agradecer al equipo de CBR Ingeniería por brindarme apoyo durante mi estadía en su institución, a mis maestros por proporcionarme el conocimiento necesario para mi formación estudiantil y a todas las figuras de ficción que me animaron a jamás darme por vencido.

DEDICATORIA

A mí mismo, por la perseverancia y el esfuerzo para nunca rendirme

RESUMEN

En la actualidad, nos enfrentamos a una aguda crisis hídrica derivada de la generación de aguas residuales y la carencia de tratamientos adecuados, principalmente en el ámbito industrial. La clave para abordar este desafío radica en el desarrollo de trenes de tratamiento de aguas residuales, siendo las pruebas fisicoquímicas una herramienta esencial. Estas pruebas no solo reducen costos, sino que también permiten explorar diversas opciones de diseño. Este proyecto se centra en desarrollar de la mano de CBR ingeniería, un protocolo que detalla paso a paso, las actividades necesarias para ejecutar pruebas de jarras, dando como resultado un protocolo con los respectivos subtrotocolos: Medidas de seguridad; Recolección, preservación y almacenamiento de muestras; Preparación de soluciones; Diseño de Jarras y ejecución de las pruebas. La elaboración de este proyecto contribuye al diseño efectivo de plantas de tratamiento de aguas residuales y a las necesidades de CBR Ingeniería, una empresa líder en el diseño de plantas. Además, constituye una guía para personas con poca experiencia en la ejecución de las pruebas fisicoquímicas, utilizando la metodología de las pruebas de jarras.

INDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	8
INDICE DE TABLAS	8
1.- INTRODUCCIÓN.....	9
2.- DESCRIPCION DE LA EMPRESA.....	13
2.1.- Datos generales.....	13
2.1.1.- Nombre o razón social	13
2.1.2.- Ubicación de la organización.....	13
2.1.3.- Giro de la organización.....	13
2.2.- Breve reseña de la empresa.....	13
2.3.- Misión, visión y políticas.....	14
2.4.- Principales productos y servicios.....	15
2.5.- Características del área en el que se participó	16
2.5.1.- Descripción del área de Proyectos Industriales	16
2.5.2.- Funciones y actividades del residente.....	17
3.- PROBLEMAS A RESOLVER.....	19
4.- JUSTIFICACION	20
5.- OBJETIVOS	21
5.1.- Objetivo General.....	21
5.2.- Objetivos Específicos	21
6.- ALCANCE	21
7.- MARCO TEORICO	22
7.1.- Calidad del Agua Residual	22
7.1.1 Parámetros Físicos	23
7.1.2 Parámetros Químicos	24
7.1.3 Parámetros Biológicos	30
7.1.4 Parámetros Bacteriológicos.....	33
7.2.- Marco Normativo.....	33
7.3.- Partículas Coloidales.....	36
7.3.1 Carga eléctrica y doble capa	37
7.3.2 Propiedades de los coloides	38
7.4.- Coagulación	39

7.4.1 Mecanismos de la coagulación.....	39
7.4.2 Etapas de la coagulación	41
7.4.3 Factores que afectan la coagulación.....	41
7.4.4 Coagulantes más utilizados	44
7.5.- Flocculación	45
7.5.1 Mecanismos de flocculación.....	46
7.5.2 Factores que afectan a la flocculación	46
7.5.3 Flocculantes más utilizados	47
7.6.- Aplicación de coagulantes y flocculantes.....	47
7.7.- Sedimentación, Flotación y filtración.....	48
7.7.1 Sedimentación.....	48
7.7.2 Flotación.....	49
7.7.3 Filtración	49
7.8.- Pruebas de Jarras.....	50
7.8.1 Equipo de prueba de jarras	51
7.8.2 Dosificación	51
7.8.3 Interferencias.....	52
7.8.4 Índice de Willcomb	52
7.8.5 Variables de respuesta.....	53
8.- METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS DE JARRAS.....	56
8.1.- Campo de aplicación.....	56
8.2.- Responsabilidades.....	56
8.3.- Medidas de seguridad	56
8.4.- Recolección, preservación y almacenamiento de muestras	56
8.5.- Materiales, reactivos y equipos.....	57
8.5.1 Materiales.....	57
8.5.2 Reactivos.....	57
8.5.3 Equipos.....	57
8.6.- Diagrama.....	58
8.7.- Preparación de soluciones.....	59
8.8.- Caracterización de la muestra	60
8.9.- Diseño de las jarras	62
9.- RESULTADOS	65

9.1.- Ejecución	65
9.2.- Formatos (Ejemplos)	68
10.- CONCLUSION.....	71
11.- COMPETENCIAS DESARROLLADAS	72
12. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	73

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Logo de CBR Ingeniería	13
Ilustración 2. Distribución de tamaños de partículas en el agua	26
Ilustración 3. Ciclo del Nitrógeno	27
Ilustración 4. Ciclo del Azufre	29
Ilustración 5. Influencia de la Temperatura y el tiempo en la DBO	31
Ilustración 6. Clasificación de los coloides	36
Ilustración 7. Modelo de la doble capa eléctrica en una partícula coloidal.....	37
Ilustración 8. Proceso de Coagulación	39
Ilustración 9. Retromezcladores.....	43
Ilustración 10. Ejemplo de un equipo de pruebas de jarras.....	50
Ilustración 11. Gráfica de turbidez residual y color verdadero en una prueba de jarras	54
Ilustración 12. Diagrama del proceso de Prueba de Jarras.....	58
Ilustración 13. Formato de reporte de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería.....	68
Ilustración 14. Formato de reporte de resultados de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería	69
Ilustración 15. Formato de reporte de resultados de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería (Continuación)	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996 y su metodología de prueba.....	34
Tabla 2. Límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y su metodología de prueba.....	35
Tabla 3. Límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1998 y su metodología de prueba.....	36
Tabla 4. Índice de Willcomb.....	53
Tabla 5. Condiciones de tiempo y mezcla en una prueba de jarras	62

1.- INTRODUCCIÓN

El agua cubre aproximadamente el 72% de la superficie del planeta Tierra y representa entre el 50% y el 90% de la masa de los seres vivos. Es una sustancia abundante, sin embargo, de toda la masa existente en el planeta una cantidad no mayor al 0.7% de esta se encuentra en forma de ríos y lagos que es donde cuenta regularmente con las condiciones tanto físicas como químicas más convenientes para su consumo ya sea para alimentación, higiene y las diversas actividades que el ser humano realiza como la agricultura y la industria principalmente (Muñoz, 2008).

Para la especie humana, las necesidades de agua y de energía han ido siempre en orden creciente, a medida que se ha desarrollado la civilización y ha crecido la población en casi todas las áreas habitadas de la superficie terrestre. Al mismo tiempo, y casi desde el inicio de la actividad humana, el desarrollo ha obstaculizado cada vez más el uso y disfrute del agua a causa del vertido desordenado de residuos líquidos a los cursos de agua y a las zonas costeras próximas a las áreas habitadas (Kangarini, 2011). Este problema traerá consigo un sin fin de consecuencias de dimensiones inimaginables para la humanidad y para los ecosistemas existentes por la excesiva contaminación del agua y de otros muchos factores de similar importancia.

En la actualidad la mayor parte de las masas contaminadas de aguas residuales no tienen ningún tipo de tratamiento, simplemente se descargan en el lago, río o mar más cercano y se deja que los sistemas naturales se encarguen de lo demás; sin embargo la degradación de los desechos de forma natural ya no es suficiente para que el agua recobre las características necesarias para satisfacer nuestras cada vez más exigentes necesidades; debido a que nuestros desechos son cada vez mayores y su composición química más compleja (Muñoz, 2008). Como consecuencia de todo ello, el ingenio humano ha ideado a lo largo de la historia diferentes sistemas de aprovechamiento y de tratamiento de las aguas, tanto en su aspecto energético como desde el punto de vista de su uso en alimentación y en aplicaciones agrarias (Kangarini, 2011).

El avance en la evolución de sistemas para el tratamiento de aguas residuales se volvió más notorio en el siglo XX. Estos sistemas fueron considerados por mucho tiempo como un riesgo potencial para la salud y molestos para aglomeraciones urbanas (Hernández et al., 2017). Los primeros registros de tratamiento de aguas residuales se remontan a las antiguas civilizaciones, como la romana y la griega, que construyeron sistemas de alcantarillado para eliminar aguas residuales de las áreas urbanas. Por su parte, los egipcios incorporaban ciertas sustancias minerales y vegetales para facilitar la precipitación de las partículas y clarificar el agua, entre ellas la piedra de alumbre, elemento que hoy en día se sigue usando para procesos de coagulación en plantas potabilizadoras. Sin embargo, con la caída del imperio romano comenzó lo que se conoce como “la era de la obscuridad sanitaria”. La Revolución Industrial aumento la contaminación de las aguas, lo que llevó a una mayor concienciación y esfuerzos en el tratamiento de aguas residuales. Las investigaciones de Robert Koch en 1881, en las que descubre las propiedades destructivas del cloro respecto a las bacterias, marcan el mayor

hito en el tratamiento de las aguas: es en Londres, en 1905, cuando se introduce el cloro como desinfectante tras un brote de fiebre tifoidea (Doménech, 2003). No fue hasta el año de 1913 en el Reino Unido, cuando a través de diversos experimentos se produjo un efluente altamente tratado, en el que se creía que los lodos habían sido activados al igual que el carbón activado, por lo que el proceso fue llamado “Lodos Activados”, proceso que hasta la actualidad se sigue utilizando.

Con el avance de las tecnologías de tratamiento y el creciente desafío de la contaminación del agua, han surgido organizaciones y sistemas especializados en la gestión de aguas residuales. En este contexto, las normativas mexicanas juegan un papel esencial en la preservación del medio ambiente y la protección de los recursos hídricos.

La actualización reciente de la Norma Oficial Mexicana NOM-001 destaca como un hito significativo en la elevación de los estándares de calidad para las descargas de aguas residuales. Este avance incluye la integración de parámetros clave como la toxicidad relativa, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la evaluación del color. La decisión de ampliar estos criterios se basa en la necesidad de una detección más precisa de contaminantes, reconociendo limitaciones previas, como el subregistro de contaminantes orgánicos no biodegradables bajo la prueba tradicional de DBO5.

Paralelamente, las normativas NOM-002-Semarnat-1996 y NOM-003-Semarnat-1997 desempeñan roles fundamentales al establecer criterios preventivos para minimizar el impacto ambiental y asegurar la eficiencia y durabilidad de las Plantas de Tratamiento Municipales. Estas normativas, inspiradas en estándares de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), no solo cumplen con requerimientos legales, sino que también generan beneficios significativos para el entorno ambiental. En conjunto, estas normativas representan el compromiso de México con prácticas sostenibles y la preservación activa de sus cuerpos de agua, afrontando de manera integral los desafíos actuales relacionados con la gestión y tratamiento de aguas residuales.

El objetivo general de los tratamientos es disminuir la cantidad de agentes contaminantes en las masas de agua dependiendo no sólo del tipo de contaminantes presentes en ellas, sino considerando el uso que se le dará nuevamente una vez que el agua haya cumplido con el tratamiento adecuado (Muñoz 2008). Bajo este contexto uno de los mayores desafíos es proporcionado por el tratamiento de aguas residuales de origen industrial. Debido a sus particularidades y complejas composiciones de contaminantes, las aguas provenientes del sector industrial no siempre pueden ser tratadas con los métodos convencionales, por lo que requieren sistemas especializados y específicos para su tratamiento. Uno de los tratamientos que ha ganado relevancia en los últimos años es el tratamiento fisicoquímico de coagulación-floculación, debido a que es una alternativa viable, eficiente y económica.

La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado,

aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras. El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia, se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración. (Andía, 2000).

Es muy importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente. Un proceso de coagulación y floculación mal realizado puede conducir a una degradación rápida del agua y representa gastos de operación no justificados. Es de vital importancia considerando que cantidades muy pequeñas de coagulante impiden la neutralización total de la carga del coloide por lo que la formación de flóculos es mínima; mientras que dosis muy altas de coagulante invierten la carga de las partículas coloidales haciendo que se formen gran cantidad de flóculos pequeños que se tardan demasiado en sedimentar (Tafur y Quevedo, 2014). A pesar de considerarse procesos simples y de fácil ejecución, el proceso de coagulación-floculación se puede ver afectado por distintos parámetros dentro de los que destacan el pH, la temperatura, el tipo de químico, el tipo de mezcla y el flujo volumétrico del afluente. Esto implica la necesidad de realizar una amplia cantidad de pruebas para conocer las condiciones más eficaces para el tratamiento. En este sentido, las pruebas de jarras son el mejor método, ya que, permiten simular escenarios y condiciones de planta dentro de un laboratorio, esto facilita la identificación de procesos, productos y dosificaciones adecuadas para el tratamiento del agua, disminuyendo el costo de investigación y optimizando el proceso.

De acuerdo con la información obtenida, probablemente el primer ensayo de prueba de jarras fue realizado por W. L. Langelier en la Universidad de California en 1918. Las primeras aplicaciones y el desarrollo inicial corresponden a John Baylis, Bartow y Petterson, Fleming, Nolte y Kromer. Aportes tecnológicos posteriores fueron realizados por Tolman, Niekel, Gekershausen, Langelier-Ludwig, Cross et al., C. Henry, Smith, Straub, Elliassen, Norcon, Cox y otros, que perfeccionan continuamente el ensayo y lo aplican con éxito a diversas condiciones de coagulación de las aguas. Estos autores orientaron principalmente el modelo de prueba de jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación (Vargas, 2004, p. 221).

Debido a la importancia que tiene la coagulación-floculación como método de tratamiento de aguas residuales, en este proyecto de residencia profesional se llevó a cabo un proyecto que tiene como objetivo proporcionar evidencia empírica de la eficiencia de la coagulación-floculación en la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales, lo que a su vez impulsará el desarrollo de soluciones en el tratamiento, beneficiando tanto al medio ambiente como a la empresa CBR Ingeniería en la ampliación de su cartera de servicios. A través de la investigación y el desarrollo experimental, se busca estandarizar la

metodología para la aplicación efectiva de las pruebas de jarras. En el transcurso de este proyecto, se explorarán los fundamentos teóricos de las pruebas de jarras, se analizarán los desafíos específicos relacionados con las aguas residuales industriales y se presentarán los resultados de los experimentos realizados para tener como resultado un protocolo o guía de laboratorio para la correcta ejecución de las pruebas. Asimismo, se discutirán las implicaciones prácticas de esta investigación y su contribución a la preservación del medio ambiente y al cumplimiento de las normativas del país.

2.- DESCRIPCION DE LA EMPRESA

2.1.- Datos generales

Ilustración 1. Logo de CBR Ingeniería



Fuente: CBR Ingeniería (2020)

2.1.1.- Nombre o razón social

CBR Ingeniería

2.1.2.- Ubicación de la organización

Avenida Nezahualcóyotl 12A, Cumbres del Conín, El Marqués, Querétaro.

2.1.3.- Giro de la organización

Ingeniería Ambiental en Tratamiento de Agua.

2.2.- Breve reseña de la empresa

CBR Ingeniería, es una empresa mexicana con una respetable trayectoria de 15 años en la industria, ha logrado un impacto significativo al instalar más de 300 plantas de tratamiento de agua en diversas ubicaciones a lo largo de la república. Esta empresa fue fundada por la Ingeniera Química Cecilia Bribiesca Rangel y el Ingeniero Alejandro Fernández de Ortega, quienes establecieron la visión y los valores fundamentales que guían su enfoque.

El compromiso de CBR Ingeniería radica en brindar soluciones de alta calidad, basadas en la mejor tecnología disponible en el mercado, y todo ello al precio más razonable. Lo que distingue a esta empresa es su filosofía transparente y honesta, la cual prioriza la satisfacción del cliente y el compromiso con la ética en los negocios.

CBR Ingeniería es ampliamente reconocida por su sistema de gestión de calidad, el cual ha sido certificado bajo ISO 9001. Esta acreditación garantiza que la empresa opera con los más altos estándares de calidad en todos los aspectos de su negocio y se traduce en un compromiso constante con la excelencia y la mejora continua en sus procesos y servicios.

Una de las características más destacadas de CBR Ingeniería es su tecnología patentada, denominada WEA (Water Engineering of America). Esta tecnología optimiza el

proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados en aireación extendida, lo que se traduce en beneficios como la disminución de olores, la reducción del tiempo de mantenimiento y operación, la minimización del espacio requerido para instalar las plantas y, sobre todo, la reducción de la cantidad de lodos generados.

El objetivo central de CBR Ingeniería es contribuir al cuidado del medio ambiente y abordar los desafíos relacionados con el agua. Lo logran mediante soluciones de tratamiento innovadoras y constantemente actualizadas. Su enfoque en tecnología avanzada, el compromiso con la sostenibilidad y la certificación ISO 9000 los convierten en un socio de confianza para la gestión efectiva del agua en una variedad de entornos y aplicaciones. Esta empresa está comprometida con la búsqueda constante de soluciones sostenibles y eficientes para los desafíos del tratamiento del agua en México y más allá.

2.3.- Misión, visión y políticas

Misión:

En CBR Ingeniería nos dedicamos a diseñar, producir e implementar sistemas y servicios de tratamiento de agua eficaces y de la más alta calidad, cumpliendo con los requerimientos de nuestros clientes y siendo competitivos en el mercado nacional e internacional.

Visión:

En el 2025 seremos la empresa líder a nivel nacional en sistemas de tratamiento de aguas para el sector privado, con presencia significativa a nivel internacional y en el sector gubernamental.

Políticas de calidad:

En CBR Ingeniería, la calidad es un compromiso inquebrantable que impregna cada aspecto de nuestra labor. Reconocemos que la calidad es un factor determinante en la satisfacción del cliente, la integridad de nuestros productos y servicios, y el respeto que sentimos por el medio ambiente. En este sentido, hemos desarrollado políticas de calidad sólidas que guían nuestras operaciones diarias y reflejan nuestro compromiso con la mejora continua. Estas políticas no solo son una declaración de intenciones, sino un marco sólido que nos permite ofrecer productos y servicios de la más alta calidad. A continuación, presento las políticas de calidad que forman la columna vertebral de nuestro compromiso con la excelencia:

1. Entregar productos y servicios que cumplen con los requerimientos y necesidades de nuestros clientes.
2. La mejora continua en nuestros productos, servicios y sistemas de gestión de la calidad.

3. La constante innovación en nuestros productos y procesos de cara a la competitividad y la mejora continua.
4. Ofrecer la mejor tecnología al mejor precio para el tratamiento de agua.
5. Contribuir al cuidado del medio ambiente mediante la implementación de sistemas de tratamiento de agua eficaces.
6. Ofrecer soluciones a la medida buscando siempre la propuesta más factible técnica y económicamente.
7. Formar una fraternidad con nuestros clientes para apoyarlos en la misión conjunta de cuidar el medio ambiente.

2.4.- Principales productos y servicios

1. Tratamiento de aguas residuales: En CBR Ingeniería nos especializamos en la fabricación de plantas de tratamiento de aguas residuales con la tecnología patentada WEA. Estas se elaboran buscando un sistema integral, sencillo, versátil e innovador, que permita adaptarse a la diversidad de requisitos, normativas y ubicaciones de los clientes. Para ello ofrecemos tres tipos de plantas:
 - Plantas de tratamiento portátiles: Estas plantas se componen de uno o varios módulos prefabricados a base de acero inoxidable. Su principal ventaja es su transportabilidad, lo que facilita su colocación en diversas ubicaciones. Además, con la tecnología patentada WEA, estas plantas requieren un espacio reducido para instalarse y operan de manera casi autónoma.
 - Plantas de tratamiento compactas: Utilizando el mismo proceso y tecnología que las plantas portátiles, las plantas compactas ofrecen los mismos beneficios, pero se fabrican en concreto. Aunque no son reubicables, estas plantas son ideales para el tratamiento de un mayor flujo de aguas residuales.
 - Plantas de tratamiento de alto flujo: Diseñadas para caudales que van desde los 5 hasta los 200 Litros por Segundo (LPS), estas plantas incorporan un digestor de lodos para la estabilización de estos y un reactor adicional. Esto las hace ideales para aplicaciones con grandes volúmenes de aguas residuales.
2. Potabilización de Agua: Ofrecemos servicios de potabilización de agua. Con un enfoque en la calidad y la innovación, trabajamos para garantizar que las comunidades tengan acceso a agua potable limpia y segura, contribuyendo así a la salud y el bienestar de la población.
3. Desalinización de agua: Nos especializamos en sistemas para remover sales contenidas en el agua de mar. Este proceso es crucial para convertir fuentes de agua

salina en agua dulce potable, y se logra mediante tecnologías avanzadas como la Osmosis Inversa y la Electrodesionización (EDI). La desalinización es esencial en áreas con acceso limitado a agua dulce y para industrias ubicadas en zonas costeras, por ello nos enorgullecemos de proporcionar soluciones efectivas y sostenibles para garantizar el acceso a agua de calidad.

4. Rehabilitaciones y conversiones: Ofrecemos servicios para mejorar y rehabilitar plantas existentes que puedan haber dejado de funcionar eficazmente o que ya no cumplan con las regulaciones vigentes. Para lograrlo, realizamos análisis exhaustivos de las instalaciones y procesos, identificando áreas que requieren mejoras o ajustes. Este enfoque de mejora y modernización es esencial para garantizar que las plantas existentes sigan siendo eficientes, cumplan con los estándares de calidad y aumenten su vida útil.
5. Tratamiento de Aguas Industriales: Somos un valioso aliado para una amplia gama de industrias como la del papel, farmacéuticas, metalmecánicas, textiles y muchas más. Nos especializamos en adaptar sus soluciones a las necesidades específicas de cada industria, proporcionando trenes de tratamiento personalizados. Estos trenes de tratamiento pueden incluir una variedad de métodos, como tratamientos fisicoquímicos, biológicos, procesos de oxidación avanzada, filtración y otros, con el objetivo de abordar los desafíos únicos de cada sector y garantizar que las instalaciones cumplan con las normativas aplicables.

2.5.- Características del área en el que se participó

2.5.1.- Descripción del área de Proyectos Industriales

El área de Proyectos Industriales de CBR Ingeniería, dirigida por la Ingeniera Química Jesica Morales Sandoval, desempeña un papel fundamental en la empresa, y a pesar de ser una adición reciente, su importancia es innegable. Esta área se enfoca en brindar soluciones a clientes que tienen necesidades especiales y que no se ajustan a las soluciones de plantas de tratamiento convencionales. Para lograrlo, trabaja en estrecha colaboración con los equipos de ventas y proyectos. La labor comienza estableciendo una relación sólida a través de conferencias, llamadas y evaluaciones exhaustivas.

El resultado de este esfuerzo es la propuesta de trenes de tratamiento personalizados, diseñados específicamente para satisfacer las necesidades del cliente. Además de desarrollar nuevas soluciones, el área de Proyectos Industriales también se dedica a analizar y estudiar plantas ya existentes con el objetivo de rehabilitarlas y optimizar su funcionamiento.

Para comprender mejor las necesidades de los clientes, el equipo realiza visitas a las plantas industriales, lo que les permite obtener información de primera mano sobre el funcionamiento y las características específicas de cada planta. Esto es particularmente útil

cuando los clientes tienen un conocimiento limitado sobre los requisitos de tratamiento de agua.

Un componente esencial de esta área es el laboratorio de análisis, donde se llevan a cabo pruebas en las muestras de agua para caracterizarlas y determinar el tratamiento más adecuado. Estas pruebas proporcionan información valiosa que guía la toma de decisiones y asegura que las soluciones sean efectivas.

Por último, el área de Proyectos Industriales se encarga de proponer posibles soluciones a la dirección general y de cotizar los equipos necesarios para el tratamiento. En resumen, esta área desempeña un papel esencial en la adaptación de las soluciones de CBR Ingeniería a las necesidades específicas de los clientes, contribuyendo a su éxito y a la gestión efectiva del agua en una variedad de aplicaciones industriales.

2.5.2.- Funciones y actividades del residente

Durante mi residencia profesional en CBR Ingeniería, tuve la oportunidad de participar en diversas actividades esenciales para el funcionamiento y desarrollo de la empresa. Mi enfoque principal estaba en apoyar a la Ingeniera Jesica Morales, desempeñando un papel en la gestión de proyectos y en el funcionamiento del área de laboratorio.

En mi tiempo en CBR Ingeniería, tuve la oportunidad de recibir una serie de capacitaciones que ampliaron mi comprensión en áreas clave. Estas capacitaciones abarcaron temas como la gestión de documentos, el funcionamiento e instalación de plantas de aguas residuales portátiles y el certificado de ISO 9000. Estas habilidades y conocimientos fueron fundamentales para abordar los desafíos presentados, además de proporcionarme conocimientos valiosos para mi futuro desempeño como Ingeniero Químico.

Participé activamente en la elaboración de documentos y registros esenciales para el área. Esto incluyó la realización de investigaciones detalladas para comprender mejor los requisitos específicos de diversas industrias. Trabajé en la elaboración de documentos relevantes, registros y llenado de cuestionarios, a través de los cuales podíamos conocer los requerimientos y necesidades de los clientes, presupuestos, análisis y demás características de cada proyecto.

En el laboratorio, desempeñé un papel fundamental al realizar caracterizaciones de muestras de agua. Adquirí experiencia y habilidades en la operación de equipos de medición para determinar parámetros críticos como el color, turbidez y DQO (Demanda Química de Oxígeno). Además, participé activamente en la realización de pruebas de jarras en muestras de posibles clientes. Estas pruebas eran esenciales para aplicar información precisa en la propuesta de soluciones para plantas de tratamiento.

En resumen, mis funciones durante las prácticas profesionales en CBR Ingeniería se centraron en apoyar la gestión de proyectos, la satisfacción del cliente y la operación efectiva

del laboratorio. Aprendí de manera práctica sobre el funcionamiento de la empresa y contribuí al desarrollo de soluciones de tratamiento de agua.

3.- PROBLEMAS A RESOLVER

- Ausencia de un protocolo de Trabajo para ejecutar Pruebas de Jarras en CBR Ingeniería: En el marco de las operaciones de CBR Ingeniería, se identifica la carencia de una guía de trabajo para la ejecución de pruebas de jarras. Esta ausencia genera inconsistencias en la realización de las pruebas fisicoquímicas, dificulta la interpretación precisa de los resultados y limita la capacidad de replicación. Con la elaboración de este protocolo se genera un aporte que beneficiará los servicios y productos proporcionados por CBR ingeniería.

4.- JUSTIFICACION

La preservación del medio ambiente se ha convertido en una de las principales preocupaciones a nivel mundial. La sostenibilidad de nuestro planeta depende en gran medida de la conservación de recursos naturales y la reducción de la contaminación. Las industrias, por su parte, son fuentes significativas de contaminantes que afectan directamente los cuerpos de agua y el medio ambiente en su conjunto. La liberación inadecuada de contaminantes industriales puede tener consecuencias devastadoras en la calidad del agua, la biodiversidad y, en última instancia, la salud humana. La contaminación industrial es un problema apremiante que requiere soluciones efectivas, y es responsabilidad de las industrias abordar este desafío con diligencia y responsabilidad.

La correcta gestión y tratamiento de aguas residuales industriales juega un papel crítico en esta ecuación, y las pruebas de jarras representan una herramienta de gran utilidad en este contexto. Su capacidad para evaluar y optimizar los procesos de coagulación y floculación tiene el potencial de minimizar el impacto ambiental de las actividades industriales, al tiempo que garantiza la conservación de los recursos hídricos. En el panorama actual, las pruebas de jarras responden a la necesidad de crear sistemas de tratamiento de aguas eficientes y con la capacidad de tratar contaminantes difíciles de remover.

Es por ello por lo que este proyecto nace con el objetivo central de abordar esta problemática. La elaboración de una guía o protocolo de laboratorio para la implementación de pruebas de jarras busca demostrar los beneficios de esta metodología y estandarizarla para su reproducibilidad bajo distintas condiciones. Al proporcionar una herramienta precisa y efectiva para optimizar los procesos de tratamiento de aguas residuales, este proyecto no solo busca mejorar la eficiencia de sus operaciones, sino también promover una gestión ambiental más responsable.

CBR Ingeniería es una empresa dedicada principalmente al tratamiento de aguas residuales domésticas y urbanas. Pese a sus casos de éxito en el sector industrial, cuenta con poca presencia en este sector debido a la complejidad de su tratamiento. Al realizar pruebas experimentales con muestras de posibles clientes, este proyecto también genera un aporte en el diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales e Industriales beneficiando así los servicios que CBR Ingeniería puede ofrecer.

5.- OBJETIVOS

5.1.- Objetivo General

- Elaborar un protocolo de laboratorio detallado de las actividades necesarias para la aplicación y ejecución de pruebas de jarras en la empresa CBR Ingeniería.

5.2.- Objetivos Específicos

- Sintetizar formatos que faciliten la ejecución, registro y seguimiento sistemático de las pruebas de jarras.
- Establecer recomendaciones para el diseño de pruebas de jarras.
- Crear una metodología de fácil comprensión para personas con poca experiencia en el desarrollo de las pruebas de jarras.

6.- ALCANCE

Este proyecto se realiza para la elaboración de un protocolo de prueba de jarras en la empresa CBR y su implementación se realizará en una etapa posterior de acuerdo a las necesidades de la empresa.

7.- MARCO TEORICO

7.1.- Calidad del Agua Residual

El término de “Aguas Residuales” se emplea para hacer referencia a un tipo de agua proveniente de diversas actividades antropogénicas y naturales, como consecuencia se ha contaminado con sustancias nocivas o impurezas. Estas aguas pueden ser generadas por hogares, industrias, negocios y sistemas de saneamiento. Algunos autores clasifican las aguas residuales en dos principales categorías:

Aguas Residuales Domésticas: Estas son aguas que provienen de viviendas, edificios, pequeños negocios y sistemas de saneamiento se constituyen principalmente de aguas usadas en actividades cotidianas como el lavado, duchas y descarga de inodoros. Estas aguas suelen contener principalmente contaminantes orgánicos y algunos contaminantes inorgánicos que son desechados a los sistemas de alcantarillado como detergentes y derivados de petróleo. Debido a su procedencia las aguas residuales domésticas presentan cierta uniformidad en su composición y carga contaminante, dependiendo principalmente de la densidad poblacional.

Aguas Residuales Industriales: Estas son aguas generadas por industrias y comercios que utilizan este elemento en sus procesos de producción, transformación y limpieza. Pueden contener una amplia gama de contaminantes dependiendo del tipo de Industria e incluso variando entre industrias del mismo giro. Debido a la cantidad de producción y al proceso, las industrias no siempre descargan vertidos de forma continua, sino solo en ciertos horarios o épocas del año. A diferencia de las aguas residuales urbanas, las industriales suelen presentar una combinación de contaminantes más compleja, lo que dificulta su tratamiento. Estos contaminantes pueden incluir sustancias químicas, metales pesados, aceites, grasas y otros materiales peligrosos.

Las industrias se pueden clasificar en cinco grupos de acuerdo la composición de sus aguas residuales:

Efluentes principalmente orgánicos:

- Papeleras
- Azucareras
- Lácteos
- Fermentación
- Alimentos

Efluentes orgánicos e inorgánicos:

- Refinerías
- Textiles
- Químicas

a) Efluentes principalmente inorgánicos:

- Recubrimientos de metales
- Minería
- Químicos Inorgánicos

Efluentes con materias en suspensión:

- Lavaderos de mineral y carbón
- Corte y Pulido de mármol y otros minerales
- Laminación en caliente y colada continua

b) Efluentes principalmente de refrigeración:

- Centrales térmicas
- Centrales nucleares

El agua residual alberga una variedad de sustancias químicas y organismos vivos, ya sea disueltos o en suspensión, que modifican sus características volviéndolas perjudiciales para el medio ambiente y el contacto humano. Debido a estas circunstancias, resulta fundamental someterla a un proceso de tratamiento con el fin de volverla apta para su reutilización o descarga.

La calidad del agua se califica como “el grado en el cual se ajusta a los estándares físicos, químicos y biológicos fijados por normas nacionales e internacionales” (Colín et al., 2014, p. 47).

7.1.1 Parámetros Físicos

Los parámetros físicos definen la percepción de la calidad del agua. Estos atributos, que impactan directamente en nuestros sentidos, como la vista y el olfato, son cruciales para evaluar la calidad estética del agua. En este contexto, los sabores y olores presentes en el agua residual se atribuyen a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición. La medición de estos aspectos se realiza considerando la dilución necesaria para reducirlos a niveles apenas detectables por los sentidos. Los principales parámetros son los siguientes:

Color: Se refiere a la tonalidad o apariencia visual que surge debido a la presencia de componentes tanto orgánicos como inorgánicos que otorgan pigmentación a las aguas residuales, pudiendo variar desde tonos blancos, amarillos, marrones e incluso verdosos, dependiendo de la naturaleza de los contaminantes presentes, lo que puede resultar en una experiencia estéticamente desagradable.

Cuando hablamos de agua existen dos tipos de color: el color verdadero que se determina cuando se ha removido la turbidez a través de un proceso de filtración o centrifugado, y el color aparente que se determina sobre la muestra original. La unidad de color es el color producido por un mg/L de ion cloroplatinato por lo que se representa como

mg/L de Pt-co. Para determinar con precisión el grado de coloración, se requiere el uso de instrumentos como un colorímetro o un espectrofotómetro y se suele medirlo junto con el pH, pues la concentración de color puede aumentar con el incremento del pH.

Turbidez: Romero (1999) define a la turbidez como “Una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de materiales suspendidos a los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua”. Cuando la luz incide en sobre las partículas en suspensión estas pueden remitirla en una o varias direcciones con la misma longitud de onda, con una longitud de onda mayor y/o en forma de radiación.

Comúnmente se mide en Unidades nefelométricas de Turbidez (NTU), unidad derivada de la técnica de medición conocida como nefelometría, en la cual se determina la turbidez mediante la intensidad del rayo de luz reemitido por la muestra. Es un parámetro de relevancia en la calidad del agua, que se refiere a su aspecto estético, originado por la presencia de partículas suspendidas, tanto coloidales como disueltas, dentro de las que se puede incluir materia como arcilla, materia orgánica e inorgánica, compuestos solubles con color y el plancton. Además, la turbidez sirve para establecer el tipo de filtración y sedimentación en un tratamiento.

Temperatura: La temperatura de las aguas residuales depende directamente de la procedencia del afluente y su composición. Tiene una influencia muy alta en las aguas residuales, como en la velocidad de las reacciones químicas y biológicas, la cantidad de oxígeno disuelto, crecimiento microbiano y solubilidad, por lo que, juega un papel muy importante en la selección del tratamiento. En general para la mayoría de los procesos se considera aceptable un rango de entre 10°C y 30°C.

Conductividad Eléctrica: La conductividad eléctrica no es más que la medida de la capacidad de un fluido para conducir energía en forma de electricidad. En el agua la conductividad está relacionada con la cantidad de iones disueltos, como los iones de sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y calcio (Ca^{2+}) por mencionar algunos. Se mide en siemens por metro (S/m) o en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) y ya existe una amplia variedad de instrumentos para su medición.

7.1.2 Parámetros Químicos

Los compuestos químicos disueltos en el agua residual pueden tener diversas fuentes, ya sea natural o industrial, y su impacto puede variar dependiendo de su concentración. El agua es un solvente universal que tiene la capacidad de disolver una amplia gama de elementos químicos, pero no todos son igualmente significativos y perjudiciales. Es crucial discernir entre aquellos elementos que son relevantes para el proceso de tratamiento del agua, especialmente cuando se busca cumplir con cierta normativa y garantizar la salud de los seres vivos que tienen contacto con ella. Los siguientes son los principales parámetros químicos:

pH: “El pH es la medida de la intensidad ácida o básica de una solución,” (Colín et al., 2014, p.51) y se expresa en una escala numérica que va desde 0 a 14, donde 7 es considerado neutral. Un pH por debajo de 7 indica que una sustancia es ácida, mientras que un pH por encima de 7 indica que es alcalina o básica. Con el pH determinamos la concentración de hidrogeniones en una disolución, es decir, la capacidad amortiguadora de un líquido y la contribución de los iones OH^- , CO_3^{2-} y HCO_3^- . La ecuación matemática para calcular el pH es la siguiente:

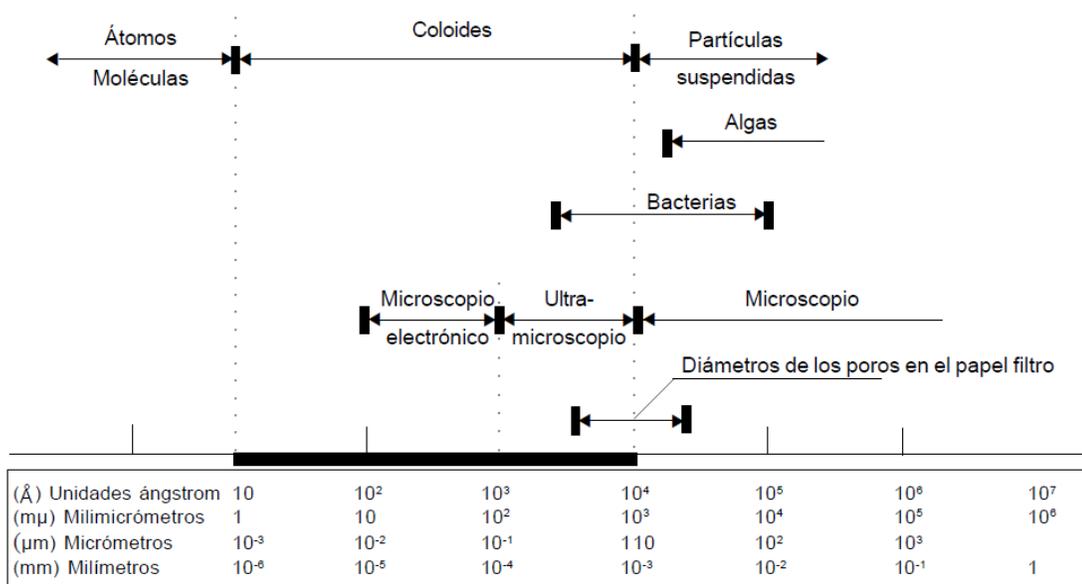
$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

Sólidos: Se refiere a la cantidad de materia sólida que se encuentra presente en el agua, ya sea en forma de partículas suspendidas (materia sólida que no se ha disuelto por completo), materia coloidal o sustancias disueltas (materia sólida completamente disuelta) y se expresan generalmente en términos de miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm). Pueden clasificarse dependiendo su tamaño y su asociación con el agua. En términos generales podemos clasificarlos de la siguiente manera:

- **Sólidos Totales (ST):** Es la suma de todas las partículas sólidas presentes en el agua. Para su determinación se realiza un proceso de evaporación y secado a una temperatura de 103-105°C, el residuo remanente es igual a los sólidos totales. Estos sólidos equivalen a la suma de los sólidos disueltos y suspendidos o sólidos fijos y volátiles respectivamente.
- **Sólidos Volátiles Totales (SVT):** Cuando se somete una muestra de agua a un proceso de calentamiento, existen componentes orgánicos que pueden convertirse en gas durante este proceso. Esta fracción volátil suele estar asociada principalmente con materia orgánica biodegradable, por lo que los sólidos volátiles totales se definen como la cantidad de materia orgánica capaz de volatilizarse por efecto de calcinación.
- **Sólidos Fijos Totales (SFT):** Es la fracción de sólidos que no se volatilizan durante el proceso de calcinación y correspondiente al 80% de los sólidos totales. Estos residuos incluyen minerales, sales y materia inorgánica.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Con partículas superiores a un micrómetro (1 μm) los Sólidos Suspendidos Totales (SST) o también conocidos como sólidos en suspensión, corresponden a la cantidad total de materia sólida, tanto orgánica como inorgánica presente en el agua, exceptuando los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Estos sólidos no se disuelven en el agua y son visibles, creando turbidez y en ocasiones color en el líquido. Para determinar los sólidos suspendidos totales, se realiza un proceso de filtración para retener las partículas sólidas del agua. Luego, se seca este filtro a 103-105 °C y se pesa.

- **Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV):** Es una categoría de los sólidos suspendidos totales que se refieren a la fracción de material sólido que se pierde en peso cuando se somete al proceso de calcinación. En otras palabras, los sólidos suspendidos volátiles representan la porción de sólidos suspendidos que contiene materia orgánica y resultan de la diferencia en peso de los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos fijos (SSF).
- **Sólidos Suspendidos Fijos (SSF):** Es la fracción de los sólidos suspendidos totales (SST) que permanece como residuo del proceso de calcinación y que representa a la materia inorgánica.
- **Sólidos Disueltos Totales (SDT):** Estas partículas son verdaderamente disueltas en el agua a nivel molecular y no son visibles. También se les conoce como sólidos filtrables, debido a que para determinarse se realiza un proceso de filtración para eliminar los sólidos suspendidos y posteriormente realizar un proceso de evaporación y secado a 103°C. Comprenden sólidos en solución verdadera y en estado coloidal con partículas inferiores a un micrómetro (1 μm).

Ilustración 2. Distribución de tamaños de partículas en el agua



Fuente: Tratamiento de agua para consumo humano manual 1 (2004)

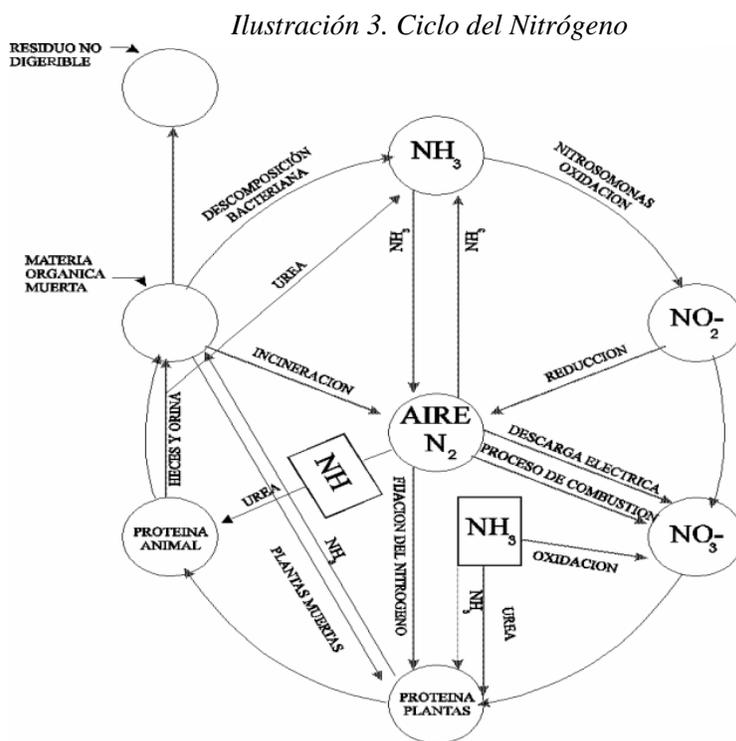
Grasas y Aceites: Estos compuestos se componen principalmente de ácidos grasos de procedencia animal o vegetal e hidrocarburos derivados del petróleo. Debido a que son inmiscibles con el agua, permanecen en la superficie en forma de natas o espumas que dificultan los procesos de tratamiento. Este fenómeno obstaculiza el intercambio de gases entre el agua y la atmósfera al impedir el paso de oxígeno y la liberación de dióxido de carbono (CO_2), pudiendo llegar a acidificar el agua.

Alcalinidad: Se define como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, reaccionar con iones hidrógeno y aceptar protones. Esta propiedad se ve favorecida por la presencia de iones bicarbonato (CO_3H^-), carbonato (CO_3), e hidroxilo (OH^-), así como fosfatos y ácidos de carácter débil. Además, se ve influenciada por el pH, la temperatura y la fuerza iónica. Durante el proceso de coagulación, reacciona con coagulantes hidrolizables, como sales de hierro y aluminio, y afecta el carácter corrosivo o incrustante del agua. Otras sustancias que contribuyen a la alcalinidad son los boratos y silicatos, pero en la práctica de tratamiento de aguas su contribución es insignificante.

Cloruros: Se refiere a la presencia de iones cloruros (Cl^-) asociados con el ion Na^+ en forma de sales. Debido al tamaño del ion, a partir de ciertas concentraciones los cloruros pueden proporcionar características corrosivas y erosionantes en el agua, en especial cuando se tiene un pH bajo.

Nitrógeno: Los compuestos nitrogenados son nutrientes importantes en los procesos de los organismos vivos. La química del nitrógeno es compleja debido a los estados de valencia que este elemento puede adoptar y al hecho de que las bacterias pueden interactuar en estos cambios de valencia. Dependiendo si las condiciones son aerobias o anaerobias, los efectos de estos cambios pueden ser negativos o positivos.

Cuando se habla de Nitrógeno en aguas residuales, las formas de interés son el nitrógeno amoniacal, nitrógeno de nitritos, nitrógeno de nitratos y nitrógeno orgánico. La relación existente entre estas distintas formas de este elemento, se observan a través del ciclo del nitrógeno presentado a continuación:



Fuente: Sawyer y McCarty (1978)

El nitrógeno orgánico se refiere a las formas inofensivas del nitrógeno como aminoácidos, aminas, polipéptidos, proteínas, etc. Las descargas de aguas residuales domésticas tienen un alto contenido de nitrógeno en forma de nitrógeno amoniacal (Amoníaco NH_3 o ion Amonio NH_4^+), dependiendo de las condiciones de pH y temperatura el nitrógeno amoniacal reacciona con el oxígeno disuelto formando nitratos (sales de ácido nítrico, HNO_3) y nitritos (sales de ácido nitroso, HNO_2).

“El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato. Es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se lo encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente para dar nitratos y que, generalmente, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y también por factores abióticos.” (Barrenechea A, 2004, p. 56)

El nitrógeno total es la suma de todas las formas de nitrógeno presente en una muestra de agua, lo que incluye el nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. Además, a la suma del nitrógeno amoniacal y el nitrógeno enlazado orgánicamente se le conoce como nitrógeno Total Kjeldahl

Metales Pesados: Son elementos con una densidad relativamente alta que debido a su toxicidad generan un impacto significativo en los seres vivos y los ecosistemas. Para este parámetro se consideran elementos con una densidad aproximada superior a los 6 g/cm^3 excepto por el Arsénico que es un no metal con una densidad de 5.7 g/cm^3 . La toxicidad de estos elementos depende de su especiación química, persistencia y tendencia de acumulación o bioacumulación.

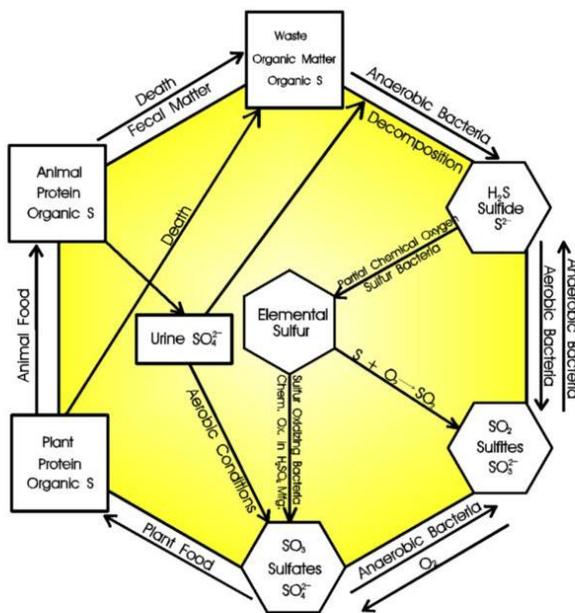
En el contexto de aguas residuales, las Normas Oficiales Mexicanas identifican como metales pesados el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Cianuro (Cn). El principio de medición de estos elementos en una muestra de agua residual es por espectrofotometría de absorción atómica, método analítico que se basa en la ley de Beer-Lambert donde se analiza la transición de orbitales mediante la absorción de luz a una determinada longitud de onda.

Las principales fuentes de descargas con concentraciones elevadas de metales pesados corresponden a las aguas residuales domésticas, plantas térmicas, fundidoras y acerías.

Azufre: “Tanto en la purificación de aguas como en el tratamiento de aguas residuales se presentan diferentes formas químicas del azufre de interés. Formas como el ion sulfuro S^{2-} ; ion hidrosulfuro HS^- ; ácido sulfhídrico H_2S ; tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$; ion tiosulfato $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$; dióxido de azufre SO_2 ; bisulfito de sodio NaHSO_3 ; metabisulfito de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$; ácido sulfuroso H_2SO_3 ; ion sulfito de hidrógeno HSO_3^- ; ion sulfito SO_3^{2-} ; ácido sulfúrico H_2SO_4 ; ion bisulfato HSO_4^- , e ion sulfato SO_4^{2-} son ejemplos comunes.” (Romero J, 1999, p.149)

La relación existente entre estas distintas formas de este elemento, se observan a través del ciclo del nitrógeno presentado a continuación:

Ilustración 4. Ciclo del Azufre



Fuente: Alken Murray Corp (s.f.)

Dentro del tratamiento de aguas residuales los compuestos del azufre más relevantes son los sulfatos y sulfuros. El ion sulfato (SO_4^{2-}) es un componente natural de las aguas superficiales que en proporción del contenido de calcio puede contribuir a la dureza del agua además de otorgar un olor desagradable y propiedades de corrosión.

Los sulfuros por otro lado son compuestos con número de oxidación -2 que pueden estar en forma suspendida o disuelta. Pueden estar presentes de manera natural en el agua, originándose de la disolución de minerales que los contienen. Además, son comunes en las descargas industriales de sectores como el textil, el curtido de cuero y el procesamiento de metales. Algunas bacterias son capaces de reducir los sulfatos a sulfuro, lo que puede llevar a la formación de sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas tóxico y corrosivo que no solo afecta la infraestructura de los tratamiento, sino que también puede disminuir la eficiencia del proceso y aumentar la generación de malos olores en los procesos aerobios.

Fosfatos: Son compuestos químicos que contienen el ion fosfato (PO_4^{3-}), comúnmente ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos, que contribuyen a la alcalinidad del agua. El fósforo influye en la producción de biomasa (materia orgánica) lo cual puede representar un aumento en la DBO, además de problemas de eutrofización y crecimiento de fitoplancton. Las concentraciones de fosfatos en descargas de aguas residuales son bajas salvo en casos de contaminación por fertilizantes fosfatados. La presencia de fosfatos puede

interferir con los procesos de coagulación. Cabe recalcar que, junto con el nitrógeno, el fósforo en sí es uno de los principales nutrientes en los procesos de digestión de las plantas de tratamiento biológico que funcionan mediante lodos activados.

7.1.3 Parámetros Biológicos

En el tratamiento de aguas residuales, los parámetros biológicos son fundamentales para evaluar la presencia y actividad de microorganismos. Estos parámetros incluyen, pero no se limitan a, la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), los coliformes totales y fecales, y la presencia de nutrientes esenciales, que son indicativos de procesos biológicos activos o contaminación orgánica.

Estos indicadores biológicos son esenciales para comprender la extensión de la contaminación orgánica y biológica, que puede ser resultado de actividades naturales o humanas. Fuentes comunes de esta contaminación incluyen la descomposición animal y vegetal, residuos domésticos, detergentes, y otros compuestos orgánicos. A diferencia de los contaminantes químicos o físicos, los biológicos son más complejos y difíciles de controlar por su inestabilidad, esto debido a que pueden variar sus concentraciones con el paso del tiempo lo cual es ocasionado por constantes actividades y reacciones que ocurren dentro del agua.

Oxígeno Disuelto (OD): Se define como la cantidad efectiva de Oxígeno gaseoso presente en el agua y se expresa en términos de su presencia en volumen (mg/L de O₂) o de su proporción en el agua saturada (%).

El oxígeno disuelto (OD) en el tratamiento de aguas residuales es un indicador fundamental tanto para la vida de organismos acuáticos como para los procesos de descomposición biológica. La concentración de OD en el agua puede variar considerablemente y depende de factores como la temperatura, la presión, la mineralización del agua, la fotosíntesis de plantas y algas, las reacciones de microorganismos y la turbulencia del agua.

Los niveles de OD no siempre son indicativos del estado del agua, aunque en ocasiones niveles bajos o la ausencia de oxígeno señalan una contaminación elevada, condiciones sépticas de la materia orgánica o una actividad bacteriana intensa, no es posible determinar el contenido ideal de oxígeno por lo que este puede presentar tanto aspectos positivos como negativos dependiendo de las circunstancias y condiciones del agua. En ciertos casos, el OD en el agua también puede influir en sus propiedades corrosivas. Esto se debe a que la capacidad corrosiva del agua puede aumentar con temperaturas más elevadas y disminuir con niveles de pH más bajos. Por lo tanto, comprender y gestionar los niveles de OD es crucial para mantener la calidad del agua y la eficacia del tratamiento de aguas residuales.

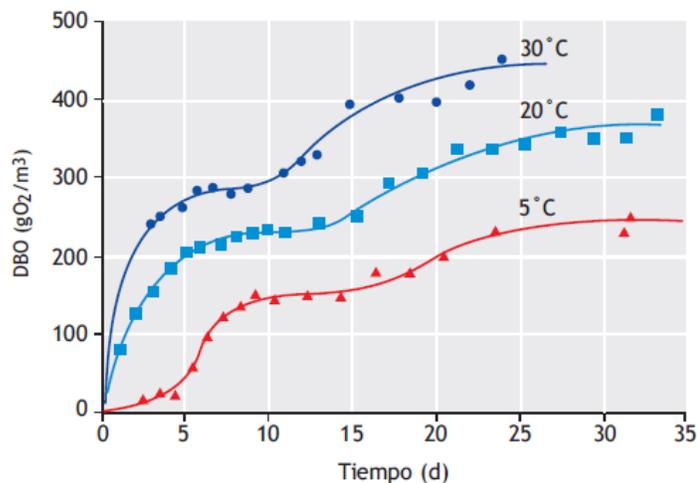
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Se refiere a la medida del oxígeno consumido por una comunidad microbiana en la descomposición de la materia orgánica de

una muestra de agua a lo largo de un período específico, en otras palabras, es la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente.

Este método, fundamental en el control de efluentes, mide el oxígeno necesario para la oxidación biológica y se calcula a partir de la diferencia entre los niveles de oxígeno disuelto al inicio y al final de un período de incubación preestablecido, bajo condiciones de temperatura controlada.

Las condiciones estándar de la normatividad mexicana establecen un tiempo de cinco días (DBO_5) y una temperatura de 20°C , aunque existen variantes como DBO_1 para resultados rápidos o DBO_7 cuando se busca simplicidad en el proceso. En situaciones donde se requiere identificar casi la totalidad de la materia orgánica biodegradable, se opta por el ensayo DBO_{25} . Es crucial mantener una temperatura constante durante el ensayo, ya que cualquier variación puede alterar significativamente la velocidad de las reacciones bioquímicas involucradas, esta influencia se puede observar en la ilustración 5.

Ilustración 5. Influencia de la Temperatura y el tiempo en la DBO



Fuente: Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño (2017)

Las condiciones medioambientales óptimas para el ensayo de DBO_5 son las siguientes:

- pH neutro
- Presencia de un inoculo inicial apropiado.
- Presencia de nutrientes necesarios para el crecimiento y desarrollo microbiano, tales como Nitrógeno, Fosforo, Magnesio y Calcio.
- Condiciones de oscuridad

La biodegradabilidad de las aguas residuales no es una característica fija, sino que varía considerablemente según la población microbiana presente. Estos microorganismos son los responsables de la degradación en el análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Aunque la biodegradabilidad no depende únicamente de las aguas residuales, las enzimas involucradas en el proceso de biodegradación y los productos resultantes si están influenciados por los componentes presentes en el agua.

Demanda Química de Oxígeno: Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO₂ y H₂O.



“Se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene, es decir, es la estimación de la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente presente en el agua, independientemente de su origen orgánico o mineral.” (Colín et al., 2014, p.56)

Específicamente representa el contenido orgánico total, oxidable por dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) o permanganato de potasio (KMnO₄) bajo condiciones de temperatura de 160°C y en medio de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). La prueba de DQO tiene la ventaja de ser más rápida que la de DBO₅ llegando a tomar alrededor de 3 horas y no está sujeto a tantas variables debido a que pocos son los elementos orgánicos que no pueden ser oxidados a CO₂.

Las aguas residuales domésticas y urbanas tienen valores de entre 260-600 ppm mientras que las aguas industriales pueden situarse entre 50-2000 ppm llenando en ciertos casos hasta los 5000 ppm.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son parámetros fundamentales en el análisis y tratamiento de aguas residuales, pero presentan diferencias significativas en lo que miden. Mientras que la DBO se enfoca únicamente en el material orgánico biodegradable, es decir, aquel que puede ser descompuesto por microorganismos, la DQO incluye tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable, oxidando químicamente la totalidad de los compuestos orgánicos presentes en la muestra, por lo que en cualquier muestra de agua el valor de la DQO siempre será mayor que el de la DBO₅ debido a que la DQO ya engloba a la DBO.

Esta relación varía dependiendo el tipo de efluente, siendo específica para diferentes fuentes, especialmente en aguas industriales y manteniéndose en cierto rango (1.5-2) en las aguas residuales domésticas. En el diseño de plantas de tratamiento de lodos activados, esta relación se convierte en un indicador clave para el control y operación de la planta. Además, esta proporción es un identificador del tipo de agua residual que se está analizando. Una relación menor a 0.2 sugiere un predominio de materia inorgánica mientras que un valor mayor a 0.6 indica mayor presencia de materia orgánica.

7.1.4 Parámetros Bacteriológicos

La calidad bacteriológica del agua es un aspecto crucial de la salud pública, dado que existe un conjunto de enfermedades hídricas cuya transmisión ocurre principalmente a través de la ingestión de agua contaminada. Por esta razón, es esencial llevar a cabo análisis bacteriológicos del agua. El agua, al ser un medio que contiene nutrientes esenciales, favorece el crecimiento de diversos microorganismos. Estos pueden ingresar a través de múltiples fuentes como el aire, suelo, plantas, animales vivos o en descomposición, fuentes minerales y, especialmente, de materia fecal.

La contaminación bacteriana del agua ha sido históricamente una fuente de epidemias, algunas de las cuales han tenido consecuencias mortales. Entre los principales indicadores bacterianos de contaminación en aguas residuales se encuentran *Escherichia coli*, coliformes fecales, enterococos fecales y clostridios. Para determinar su presencia, se utiliza comúnmente el método de tubos múltiples, expresando los resultados en términos del número más probable (NMP) por cada 100 mL de agua. Esta medición es fundamental para garantizar que el agua no representa un riesgo para la salud humana.

7.2.- Marco Normativo

En México, se ha establecido un marco regulatorio esencial para supervisar las descargas de aguas residuales en diferentes entornos. Este marco, emitido por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAT), desempeña un papel crucial en la protección ambiental al definir los límites máximos permisibles de contaminantes. Es importante destacar que el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) es obligatorio, subrayando su importancia en la preservación de la calidad del agua y del medio ambiente. Dentro de este marco podemos encontrar las siguientes normas:

- a) **NOM-001-SEMARNAT-2021:** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedades de la nación. Entró en vigor el 3 de abril de 2023, reemplazando la versión de 1996. Esta actualización refleja un enfoque más exhaustivo y detallado sobre los contaminantes, incluyendo parámetros adicionales como el Carbono Orgánico Total, la toxicidad aguda y el color verdadero. Significativamente, esta revisión elimina parámetros menos efectivos como la materia flotante, los sólidos sedimentables, y reemplaza la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) por la Demanda Química de Oxígeno (DQO), proporcionando una medición más precisa y completa de los contaminantes.
- b) **NOM-002-SEMARNAT-1996:** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Su enfoque principal es proteger la infraestructura de estos sistemas y las instalaciones de tratamiento público, excluyendo las aguas residuales

domésticas, pluviales o industriales siempre que se manejen por separado. Esta normativa se enfoca en la preservación de la infraestructura de alcantarillado y de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR's) de carácter público.

- c) **NOM-003-SEMARNAT-1997** Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos. Esta norma es particularmente relevante para la reutilización del agua, ya que abarca tanto usos con contacto directo, como el llenado de canales artificiales y el lavado de autos, como usos con contacto indirecto o esporádico, como el riego de áreas verdes.

Además de las NOM, existen las Normas Mexicanas (NMX), que, aunque son de cumplimiento voluntario, sirven como herramientas fundamentales para establecer la calidad del agua. Estas normas se centran en la estandarización de técnicas para determinar las concentraciones de diversos parámetros, complementando así el marco normativo y apoyando los esfuerzos para asegurar la calidad del agua en México. Las tablas 1,2 y 3 presentan los límites máximos permisibles de cada una de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) presentadas anteriormente, incluyendo las Normas Mexicanas (NMX) necesarias para la determinación de cada uno de los parámetros.

Tabla 1. Límites máximos permisibles de la NOM-002-SEMARNAT-1996 y su metodología de prueba

LIMITES PERMISIBLES NOM-002-SEMARNAT-1996					
PARÁMETROS	UNIDAD	LIM PERMISIBLE			Metodología de Prueba
		P.M	P.D.	V.I	
Grasas y Aceites	mg/L	50	75	100	NMX-AA-005-SCFI-2013
Sólidos sedimentables	mL/L	5	7.5	10	NMX-AA-004-SCFI-2013
Arsénico Total	mg/L	0.5	0.75	1	NMX-AA-46-1981 / NMX-AA-051-SCFI-2016
Cadmio Total	mg/L	0.5	0.75	1	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-60-1978
Cianuro Total	mg/L	1	1.5	2	NMX-AA-058-SCFI-2001
Cobre Total	mg/L	10	15	20	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-066-1981
Cromo Hexavalente	mg/L	0.5	0.75	1	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-044-SCFI-2014
Mercurio Total	mg/L	0.01	0.015	0.02	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-064-1981
Níquel total	mg/L	4	6	8	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-076-1981
Plomo Total	mg/L	1	1.5	2	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-057-1981
Zinc Total	mg/L	6	9	12	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-78-1982
pH	UpH	5.5 a 10			NMX-AA-008-SCFI-2016
Temperatura	°C			40	NMX-AA-007-SCFI-2013
Materia flotante		Ausente			NMX-AA-006-SCFI-2010
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO)*	mg/L	75	150		NMX-AA-030/1-SCFI-2012 / NMX-AA-030/2-SCFI-2011
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	60	72	84	NMX-AA-034-SCFI-2015

Fuente: Elaboración Propia (2023)

Tabla 2. Límites máximos permisibles de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y su metodología de prueba

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITES PERMISIBLES NOM-001-SEMARNAT-2021																		Metodología de Prueba									
		Ríos, Arroyos, Canales y Drenes						Embalques, Lagos y Lagunas						Zonas marinas mexicanas							Suelo								
		P.D		V.I	P.M		P.D		P.M	P.D		V.I	P.M		P.D		P.M		P.D		P.M		P.D		V.I				
Temperatura (°C)	mg/L	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	NMX-AA-007-SCFI-2013		
Grasas y aceites	mg/L	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	21	NMX-AA-005-SCFI-2013		
Sólidos suspendidos Totales	mg/L	60	72	84	20	24	28	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28	24	28	28	28	NMX-AA-034-SCFI-2015		
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	mg/L	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84	60	72	84	60	72	84	84	NMX-AA-030/1-SCFI-2012 / NMX-AA-030/2-SCFI-2011		
Carbono Orgánico Total	mg/L	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21	15	18	21	15	18	21	21	NMX-AA-187-SCFI-2021		
Nitrógeno Total	mg/L	25	30	35	15	18	21	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	15	15	15	30	NMX-AA-026-SCFI-2010 / NMX-AA-079-SCFI-2001 / NMX-AA-099-SCFI-2021		
Fósforo Total	mg/L	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	5	5	5	15	NMX-AA-029-SCFI-2001		
Huevos de Helminthos	Huevos/Litro	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15	NMX-AA-113-SCFI-2012		
Escherichia coli	NPM/100mL	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	500	500	500	500	200	NMX-AA-042-SCFI-2015 / NMX-AA-102-2006		
Enterococos fecales	NPM/100mL	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	500	500	500	200	NMX-AA-167-SCFI-2017 / NMX-AA-120-SCFI-2016		
pH	UPH	6 a 9																							NMX-AA-008-SCFI-2016				
Color Verdadero		Longitud de Onda																							Coeficiente de absorción espectral máximo				
		436nm																								7.0 m ⁻¹			
		525nm																								5.0 m ⁻¹			
Toxicidad aguda	UT	620nm																							3.0 m ⁻¹				
		2 - 15 minutos de exposición																											
Arsénico	mg/L	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.2	0.15	0.2	0.2	NMX-AA-46-1981 / NMX-AA-051-SCFI-2016
Cadmio	mg/L	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-60-1978
Cianuro	mg/L	1	2	3	1	1.5	2	2	2.5	3	2	2.5	3	3	1	1.5	2	2.5	3	1	1.5	2	1	1.5	2	2	2	2	NMX-AA-058-SCFI-2001
Cobre	mg/L	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	6	6	6	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-066-1981
Cromo	mg/L	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1	NMX-AA-044-SCFI-2014	
Mercurio	mg/L	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.01	0.01	NMX-AA-051-SCFI-2016 / NMX-AA-064-1981	
Níquel	mg/L	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	4	4	4	NMX-AA-051-SCFI-2016
Plomo	mg/L	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	NMX-AA-051-SCFI-2016
Zinc	mg/L	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	20	20	20	NMX-AA-051-SCFI-2016

Fuente: Elaboración propia (2023)

Tabla 3. Límites máximos permisibles de la NOM-003-SEMARNAT-1998 y su metodología de prueba

LÍMITES PERMISIBLES NOM-003-SEMARNAT-1998				
PARAMETROS	UNIDAD	LIM PERMISIBLE		METODOLOGÍA DE PRUEBA
		PROMEDIO MENSUAL		
		SERVICIO AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	SERVICIO AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	
Coliformes fecales	NMP/100mL	240	1000	NMX-AA-042-SCFI-2015 / NMX-AA-102-2006
Huevos de helminto	h/L	≤ 1	≤ 5	NMX-AA-113-SCFI-2012
Grasas y aceites	mg/L	15	15	NMX-AA-005-SCFI-2013
DBO5	mg/L	20	30	NMX-AA-028-SCFI-2021
SST	mg/L	20	30	NMX-AA-034-SCFI-2015
Materia flotante		Ausente		NMX-AA-006-SCFI-2010

Fuente: Elaboración propia (2023)

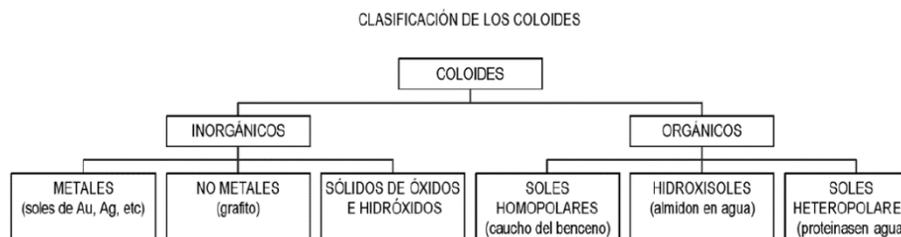
7.3.- Partículas Coloidales

Los coloides son suspensiones estables responsables de la turbiedad y el color en el agua, con un tamaño intermedio (1 nm a 1 µm) que las coloca entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. Debido a su tamaño reducido, no sedimentan fácilmente de manera natural, por lo que requieren de medios físicos y químicos para hacerlo.

Las partículas coloidales se clasifican generalmente en dos categorías: hidrofílicas (solubles en agua) e hidrofóbicas (insolubles en agua). Las partículas hidrofílicas suelen ser materia orgánica, mientras que las hidrofóbicas a menudo consisten en materia inorgánica.

Las partículas hidrofílicas, siendo compuestos polares, atraen hacia sí las moléculas de agua formando una película protectora que incrementa su estabilidad en soluciones acuosas. En contraste, las partículas hidrofóbicas incluyen materiales insolubles como ciertas arcillas, metales y grasas, que no interactúan de manera significativa con el agua y tienden a formar aglomeraciones. Otra forma de clasificación de las partículas coloidales se muestra en la ilustración 6.

Ilustración 6. Clasificación de los coloides



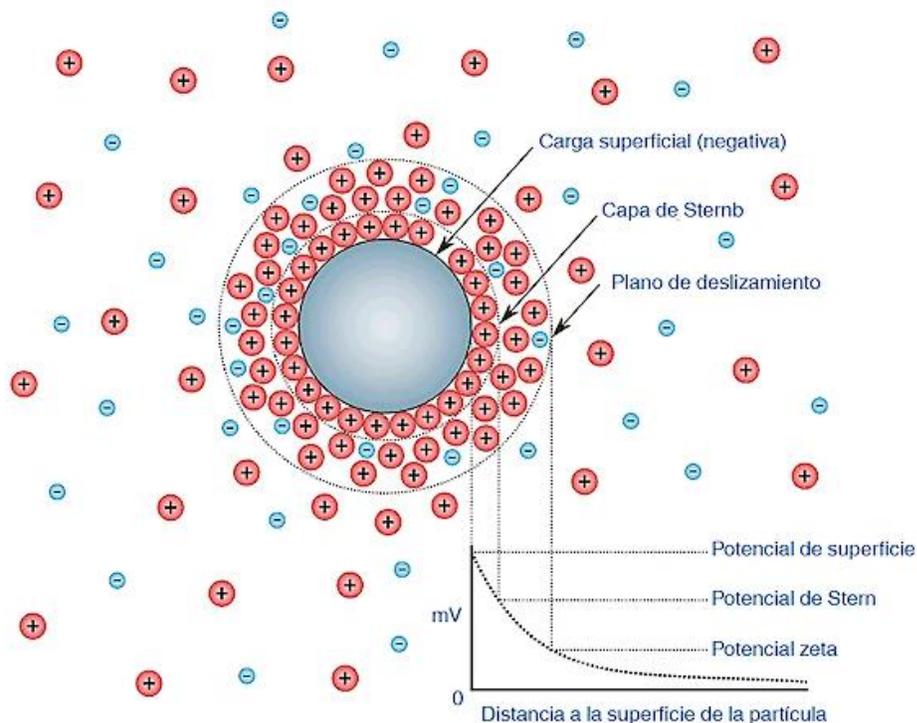
Fuente: Campos Medina (2003)

7.3.1 Carga eléctrica y doble capa

Las partículas coloidales poseen una carga eléctrica positiva o negativa llamada carga primaria, situada sobre su superficie, aunque la mayor parte de los coloides en aguas residuales poseen una carga primaria negativa. Estas cargas primarias atraen iones de signo contrario presentes en el agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas formando una capa adherida o comprimida que acaba neutralizando las cargas primarias, formando así una dispersión coloidal con carga eléctrica equilibrada. A su vez también se atrae un conglomerado menor de iones de igual carga que se adhieren débilmente a la partícula formando una capa difusa como se ve en la Ilustración 6. Como resultado de estas dos capas se forma una nube difusa de iones alrededor de las partículas la cual se conoce como doble capa eléctrica.

Para explicar mejor este concepto, en 1924 Stern presentó un modelo que acepta la coexistencia de la capa adherida o también llamada capa de Stern y la capa difusa. En este modelo existe un gradiente de potencial electrostático, siendo el máximo en la superficie de la partícula y disminuyendo a medida que aumenta la distancia con la misma. A este gradiente o potencial electrostático se le conoce como potencial Z.

Ilustración 7. Modelo de la doble capa eléctrica en una partícula coloidal



Fuente: Acniti (s.f.)

Cuando se acercan dos partículas coloidales se produce una interacción entre sus capas difusas dando lugar a una fuerza de repulsión electrostática que impide la aglomeración de estas partículas. A su vez también se genera una fuerza de atracción de Van der Waals producida por el movimiento continuo de las partículas. La suma de ambas fuerzas determina el equilibrio y estabilidad de los coloides, predominando en la mayoría de las ocasiones la fuerza de repulsión. A medida que el potencial Z disminuye las partículas pueden aproximarse hasta que se alcanza un punto llamado “punto isoeléctrico” donde el potencial Z es igual a 0.

7.3.2 Propiedades de los coloides

Las principales propiedades que definen el comportamiento de los coloides en el agua son las cinéticas, ópticas, de superficie y electrocinéticas (CEPIS,1992, p. 159).

Propiedades Cinéticas:

- **Movimiento browniano:** Dentro de la fase líquida las partículas presentan un movimiento constante y desordenado, que se denomina movimiento browniano. Al aumentar la temperatura del agua las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumentan su movimiento.
- **Difusión:** Es la dispersión que ocurre por la alta energía cinética del movimiento browniano.
- **Presión Osmótica:** Es la presión hidrostática que iguala dos medios, en este caso el agua y el sistema coloidal. Es posible calcular el número y peso de las partículas de un sistema coloidal mediante la determinación de la presión osmótica.

Propiedades ópticas:

- **Efecto Tyndall-Faraday:** Dependiendo del tamaño de las partículas de un sistema coloidal, estas provocan la dispersión de la luz.

Propiedades de superficie:

- **Adsorción:** La superficie específica de los coloides en general es muy alta. Esto permite que tengan una gran capacidad de adsorción de sustancias. (Pavón T. & Pacheco V., 2014, p.68)

Propiedades electrocinéticas:

- **Electroforesis:** Es un proceso que revela la presencia de la carga eléctrica primaria en las partículas coloidales aplicando una corriente directa en la solución coloidal. Al aplicar la corriente las partículas se mueven hacia el electrodo positivo o negativo dependiendo de su carga. Además, la electroforesis permite calcular el

potencial Z midiendo los milivoltios función de la densidad de la carga absorbida por el sistema coloidal.

7.4.- Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales lograda mediante la neutralización de las fuerzas que de repulsión y de Van der Waals mencionadas en la sección 6.3. Esto se consigue a través de la adición de elementos químicos (coagulantes) y la aplicación de energía de mezclado, con el objetivo de promover la aglomeración de las partículas en entidades más grandes y permitir su sedimentación debido al aumento de peso. Como resultado, se reduce la turbiedad y se disminuye la concentración de materias orgánicas y microorganismos en el agua. Este proceso ocurre de manera rápida, variando desde décimas de segundo hasta aproximadamente 100 segundos, dependiendo de factores como el pH, la temperatura y la cantidad de partículas presentes. Una parte esencial del proceso consiste en lograr una mezcla rápida que genere turbulencia, permitiendo así la dispersión rápida y uniforme del coagulante. En la ilustración 8 podemos ver como a través de la adición del coagulante el potencial Z que separa a las partículas se hace más pequeño.

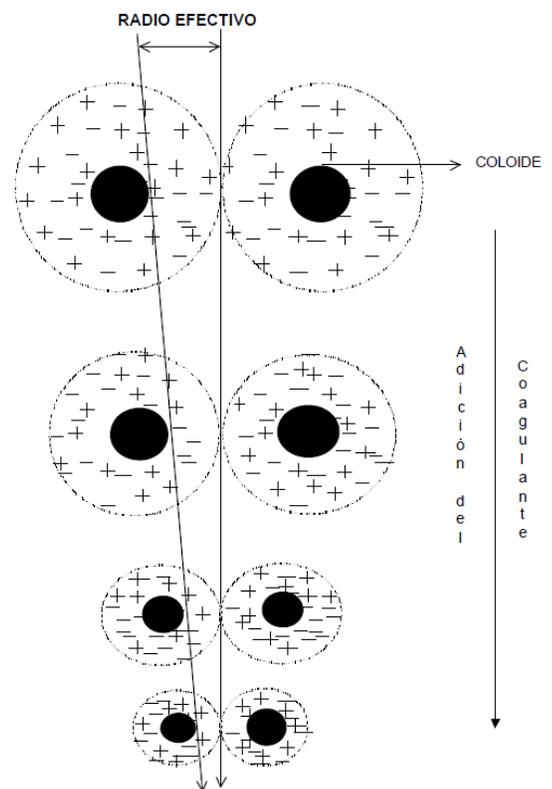
La coagulación es el resultado de dos fenómenos fundamentales, uno químico y otro físico. Químicamente, el coagulante reacciona con el agua para formar especies hidrolizadas con cargas opuestas a las de los coloides. Físicamente, implica el transporte de estas especies hidrolizadas, que se unen a las impurezas del agua formando productos insolubles.

7.4.1 Mecanismos de la coagulación

Compresión de la doble capa:

Un sistema coloidal puede ser desestabilizado por la adición de iones de carga contraria (contraiones) a la de las partículas que lo conforman. Este coagulante aumenta la concentración total de iones en la capa difusa alrededor de las partículas coloidales, lo que resulta en la compresión de la doble capa eléctrica y una disminución del potencial Z. Este cambio reduce la barrera potencial, permitiendo que las fuerzas atractivas de Van der Waals predominen sobre las repulsivas. En este proceso, la concentración del coagulante actúa de manera independiente de la concentración de coloides en el agua. La adición de contraiones desestabiliza el sistema

Ilustración 8. Proceso de Coagulación



Fuente: Andia Y. (2000)

coloidal facilitando la aglomeración de las partículas coloidales, un paso clave para su posterior eliminación.

Neutralización de la carga:

Este mecanismo se encuentra estrechamente ligado con la compresión de la doble capa. Al adicionar contraiones de mayor valencia, estos se adsorben sobre la superficie de las partículas coloidales anulando su potencial energético. En este mecanismo puede producirse una reestabilización de la carga primaria de la partícula, predominando nuevamente las fuerzas de repulsión. Este mecanismo es muy importante cuando se pretende usar un sistema de filtración directa, pues no se requiere la aglomeración de las partículas para su sedimentación.

Mecanismo de barrido (Inmersión dentro de un precipitado):

Al añadir una cantidad suficiente de coagulante se supera el producto de solubilidad de elementos en el agua, dando como resultado la formación de un precipitado que atrapa en su caída a las partículas coloidales. Este mecanismo se conoce como barrido o sweep coagulation y es comúnmente utilizado en plantas donde la coagulación y floculación anteceden a la filtración.

En la formación de los precipitados, la dosis óptima de coagulante no corresponde a aquella en la que el potencial Z es igual a 0, siendo una dosis más alta en el primer caso, por lo que económicamente resulta más costoso realizar la coagulación mediante este mecanismo.

Adsorción y puente entre partículas:

La coagulación se puede realizar mediante la aplicación de compuestos orgánicos sintéticos o naturales, que debido a sus largas cadenas moleculares contienen sitios ionizables capaces de interactuar con las partículas coloidales. Estas moléculas de polímero pueden adsorber partículas coloidales en varios puntos a lo largo de su estructura, creando así “puentes” entre las superficies coloidales. Una dosis excesiva puede llevar a la saturación de las superficies coloidales, dejando pocos o ningún centro activo disponible para la formación de puentes adicionales, lo cual inhibiría la aglomeración de partículas. Por tanto, la dosis óptima de coagulante debe ser proporcional a la concentración de partículas presentes en el sistema.

Dependiendo de sus sitios ionizables estos polímeros se pueden clasificar como:

- Catiónicos: Contienen sitios ionizables positivos.
- Aniónicos: Contienen sitios ionizables negativos.
- No iónicos o neutros: No contienen sitios ionizables

- Anfolíticos: Contienen una mezcla de sitios ionizables positivos y negativos

Los mecanismos predominantes en un proceso de coagulación que usa polímeros suelen ser la neutralización de las cargas y el puente entre partículas. La coagulación por barrido suele predominar en aguas que contienen un porcentaje pequeño de partículas coloidales.

7.4.2 Etapas de la coagulación

Algunos autores como Stumm y O'melia (1984) identificaron las siguientes etapas en el proceso de coagulación:

1. Hidrolisis de los coagulantes para formar especies hidrolíticas multinucleadas.
2. Desestabilización de los coloides
3. Aglomeración mediante el puente entre partículas.
4. Aglomeración mediante las fuerzas de Van der Waals.
5. Formación de flóculos.
6. Sedimentación.

7.4.3 Factores que afectan la coagulación

Temperatura:

La variación de 1° de temperatura en el proceso de coagulación conduce a la formación de corrientes de densidad que afectan la energía cinética de las partículas coloidales. Existen 2 rangos muy marcados en los que la temperatura genera variaciones en el proceso; uno que va de 0-10°C y otro de entre 10-40°C. En el primer rango la disminución de la temperatura aumenta la viscosidad del fluido a medida que se acerca al punto de congelación, impidiendo la aglomeración debido a la disminución del movimiento browniano, aumentando el tiempo de sedimentación y disminuyendo el porcentaje de remoción de partículas. En el rango de 10-40°C la viscosidad disminuye a medida que se incrementa la temperatura, mejorando la tasa de colisiones entre partículas y mejorando el proceso. El pH óptimo también varía con respecto a la temperatura.

pH:

Para cada coagulante y tipo de agua existe un pH óptimo en el que la coagulación se lleva a cabo rápidamente y con el porcentaje de remoción más alto. Este pH óptimo depende de la naturaleza de los iones en el agua y de la alcalinidad de esta. Cuando este proceso se lleva a cabo dentro de un rango de pH distinto puede requerir una mayor cantidad de coagulante lo que aumenta el costo del proceso. Cuando se requiere de una corrección del pH en el agua, este ajuste se realiza previo a la etapa de coagulación, ya que este pH asegura una completa disolución del coagulante.

Dosis de coagulante:

Además de la selección del coagulante, la dosis óptima define la calidad del agua clarificada y el tiempo del proceso. Una dosis baja no neutraliza totalmente la carga de las partículas coloidales y dan lugar a una formación menor de microfloculos y a una turbiedad residual elevada. Por otro lado, una dosis demasiado alta invierte la carga de la partícula y genera un exceso de microfloculos que aumentan el tiempo de sedimentación y de igual forma la turbiedad residual.

Algunos autores especulan que la concentración del coagulante tiene una influencia significativa en el proceso. El problema reside en que las cantidades de coagulante son muy pequeñas en comparación con el volumen del agua a tratar, por lo que, la dispersión del coagulante será más efectiva mientras mayor sea la dilución del coagulante, lo que da lugar a un proceso más eficiente. Tanto la concentración óptima como la dosis solo pueden determinarse mediante ensayos de “Pruebas de Jarras”, puesto que en este proceso se pueden variar fácilmente estos parámetros sin generar un costo significativo.

Concentración de coloides y alcalinidad:

Existen 4 posibles casos según la concentración de coloides y alcalinidad del agua:

- Alta concentración de coloides y baja alcalinidad: En este caso la desestabilización se realiza por medio de adsorción. Requieren una dosis de coagulante que incrementa con la concentración de las partículas y en ocasiones la adición de elementos que aumenten el pH.
- Alta concentración de coloides y alta alcalinidad: De igual manera que en el caso anterior, la desestabilización ocurre por adsorción y la dosis incrementa con respecto a la concentración de partículas. El pH permanece generalmente en una región neutral.
- Baja concentración de coloides y alta alcalinidad: La desestabilización se realiza mediante el mecanismo de barrido y requiere una alta concentración de coagulante. En ocasiones requiere la adición de partículas para aumentar la concentración coloidal y el choque interparticular.
- Baja concentración de coloides y alta alcalinidad: Se efectúa mediante el mecanismo de barrido y necesita de altas dosis de coagulante. Al adicionar el coagulante se disminuye el pH lo que en ocasiones requiere de la adición de elementos que eleven la alcalinidad.

Influencia de la mezcla rápida:

Vargas (2004) define a la mezcla rápida como “las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento que se dosifica el coagulante”(p.239). Esta mezcla rápida se lleva a cabo en una unidad de mezclado donde se inyecta el producto químico dentro de la zona de mayor turbulencia, con la finalidad de que la coagulación se de en las condiciones óptimas dependiendo del mecanismo que

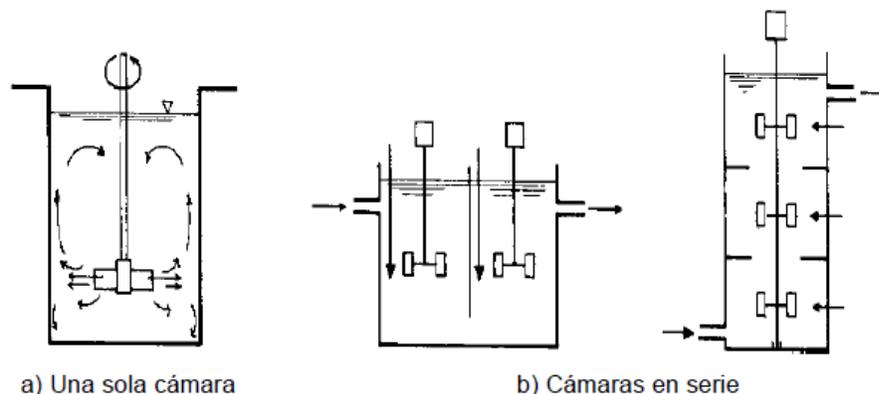
predomine. En la etapa de coagulación la mezcla es enérgica y de máximo 60 segundos, por ello se le conoce como mezcla rápida.

El grado de agitación de la masa de agua durante la adición del coagulante determina si se lleva a cabo una coagulación completa; condiciones de turbulencia y agitación desiguales llevan a una dispersión inadecuada del coagulante, dando como resultado un porcentaje de remoción menor y una baja formación de microflóculos. Esto se debe a que la masa de agua en algunas partes puede recibir mayor o menor cantidad de coagulante, lo que en una parte puede causar la reestabilización de las cargas y en otra concentraciones tan bajas que no permitan la aglomeración de partículas.

Las unidades de mezclado se pueden clasificar dependiendo del tipo de energía que utilizan para producir la agitación, teniendo así unidades mecánicas o hidráulicas. En los mezcladores del tipo mecánico se utiliza una fuerza externa para producir la agitación, normalmente un motor eléctrico que hace girar un rotor que contiene una serie de paletas. Por otro lado, la fuente de los mezcladores hidráulicos proviene del trabajo interno del fluido, por lo tanto, depende de las condiciones del flujo y de la geometría del mezclador, algunos ejemplos pueden ser los difusores y los coaguladores en forma de serpentin.

A pesar de depender de una fuente de energía externa, los mezcladores del tipo mecánico no varían su gradiente de velocidad y tienen la ventaja de permitir un control más preciso de la agitación mediante la velocidad y revoluciones del rotor, así como también permiten obtener una mayor fuerza de dispersión del coagulante. Por otra parte, los mezcladores hidráulicos son muy poco flexibles a las variaciones del caudal y tienen un costo mucho más elevado que los mezcladores mecánicos. Tanto en la industria como en el ensayo de pruebas de jarras, es común encontrar unidades de mezclado mecánicas llamadas retomezcladores, las cuales consisten de una o varias cámaras de mezclado y rotores de paletas como los que se presentan en la ilustración 9.

Ilustración 9. Retomezcladores



Fuente: Vargas L. (2004)

7.4.4 Coagulantes más utilizados

En el campo del tratamiento de aguas residuales y potables los coagulantes se clasifican ampliamente en dos categorías principales: orgánicos e inorgánicos. La elección entre coagulantes orgánicos e inorgánicos depende de varios factores, incluyendo las características del agua a tratar, los objetivos de calidad del agua deseada y consideraciones económicas.

Coagulantes inorgánicos: Principalmente se utilizan aquellos compuestos formados por sales de aluminio o hierro. Dependiendo del pH del agua a tratar, existen distintas solubilidades de los compuestos de hierro y aluminio. Cuando se agrega una cantidad menor a la del producto de solubilidad, se forman monómeros, dímeros y pequeños complejos hidroximetálicos dentro del proceso, mientras que, cuando se agrega una cantidad superior a la del producto de solubilidad, se forman precipitados hidróxidos y polímeros coloidales hidroximetálicos.

Para valores de pH que se encuentran debajo del punto isoelectrico del hidróxido metálico normalmente se utilizan complejos cargados positivamente predominando el mecanismo de neutralización y en menor dimensión el barrido y la formación de puentes. Por el lado contrario, para valores de pH superiores a su punto isoelectrico se utilizan complejos cargados negativamente, predominando el mecanismo de formación de puentes y en menor cantidad el mecanismo de barrido.

Los coagulantes inorgánicos más utilizados se componen principalmente de:

- Sulfato de Aluminio ($Al_2(SO_4)_3$)
- Aluminato de sodio ($NaAlO_2$)
- Cloruro de Aluminio ($AlCl_3$)
- Cloruro férrico ($FeCl_3$)
- Sulfato ferroso (Fe_2SO_4)
- Sulfato férrico ($Fe_2(SO_4)_3$)
- Alúmina (Al_2O_3)
- Policloruro de Aluminio también conocido como PAC

Coagulantes orgánicos: Los coagulantes orgánicos son polímeros lineales o ramificados que presentan grupos ionizables por que también se les conoce como polielectrolitos. Como se presentó en la sección 6.4.1, los polímeros pueden ser clasificados dependiendo de la carga del grupo ionizable como: catiónicos, aniónicos, neutros y anfóteros. Normalmente, las aguas residuales presentan partículas coloidales con cargas primarias negativas, debido a esto, los polímeros catiónicos no necesitan tener un peso molecular elevado para lograr una desestabilización, mientras que los polímeros aniónicos y no iónicos si la requieren para superar la barrera potencial de la doble capa entre las partículas. Los polímeros orgánicos se pueden subdividir en los siguientes dos grupos:

Polímeros sintéticos: Son productos elaborados industrialmente y comercializados para el proceso de coagulación y en ocasiones pueden usarse como floculantes. Los coagulantes sintéticos se componen principalmente de:

- Poliacrilamidas
- Policloruro de aluminio (PACl)
- Carbonato de magnesio ($MnCO_3$)
- Carbonato de calcio ($CaCO_3$)
- Permanganato de potasio ($KMnO_4$)

Polímeros naturales: Son polímeros formados por reacciones bioquímicas naturales que presentan propiedades coagulantes y floculantes. Estos compuestos se pueden obtener de animales y plantas, siendo constituidos principalmente por:

- Polisacáridos (almidón, celulosa y glucósidos)
- Proteínas (Caseína, gelatina, y olieratina)

Actualmente, el espectro de coagulantes disponibles para el tratamiento de aguas es extraordinariamente amplio y sigue en constante expansión. Gracias a estos avances, los profesionales del tratamiento de aguas pueden seleccionar entre una gama cada vez más amplia de coagulantes, optimizados para cumplir con requisitos específicos de calidad de agua y sostenibilidad ambiental.

7.5.- Floculación

En el proceso de coagulación se forman agregados conocidos como microfloculos, los cuales no cuentan con un tamaño lo suficientemente grande como para sedimentar con la rapidez deseada y conveniente para su separación. Entonces, se le llama floculación al proceso de aglomeración de la materia coloidal que tiene como objetivo formar flóculos de mayor peso y tamaño, mediante el aumento de la colisión y adherencia entre partículas.

Con respecto a la coagulación, la floculación se ve potenciada por un mezclado lento que permite la aglomeración de las partículas; una mezcla muy alta genera la ruptura de los flóculos ya formados, mientras que una mezcla muy lenta evita que se lleve a cabo el proceso de colisión adecuado. La mezcla lenta por sí sola no es del todo eficiente, lo que se resuelve mediante la adición de ayudantes de coagulación o coadyuvantes de coagulación mejor conocidos como floculantes. Comúnmente se utilizan polímeros orgánicos sintéticos o polielectrolitos que forman una red de puentes entre las superficies coloidales, mejorando indiscutiblemente el proceso de sedimentación y clarificación. Aunque también se pueden usar compuestos inorgánicos, estos presentan el problema de generar un lodo o fango de mayor volumen además de que alteran el pH del agua clarificada, a diferencia de los polímeros orgánicos que forman un lodo mucho más homogéneo y compacto.

Debido a que la floculación es un proceso similar a la coagulación, las unidades de mezclado se clasifican de igual manera como hidráulicos (floculadores de pantallas, helicoidales y de tuberías) y mecánicos (floculadores de paletas y turbinas), predominando siempre los mezcladores de tipo mecánico (floculadores de paletas y de turbinas). En ocasiones, el proceso de floculación se lleva a cabo dentro de la misma cámara que la coagulación, siendo la única variable que cambia las Revoluciones por minuto (RPM) del rotor, para el caso de los retromezcladores y el punto de dosificación en algunos hidráulicos.

7.5.1 Mecanismos de floculación

En el proceso de floculación gobiernan 3 mecanismos:

- **Floculación Pericinética:** Corresponde al movimiento browniano inducido por la energía térmica en el que las partículas se desplazan lentamente debido a la temperatura del agua, generando colisiones que llevan a la aglomeración. Este mecanismo ocurre dentro de un rango de partículas de alrededor de 1 micrómetro cuando se añade el coagulante para formar los primeros microflóculos.
- **Floculación Ortocinética:** Este mecanismo ocurre gracias al movimiento inducido por la mezcla lenta, dando lugar a la colisión de microflóculos con la fuerza y componentes necesarios para su aglomeración.
- **Floculación por sedimentación diferencial:** Se refiere al arrastre vertical que genera la formación de flóculos. Las partículas, microflóculos y flóculos de mayor tamaño sedimentan a mayor velocidad, generando una colisión vertical que también induce a la aglomeración.

Cuando la floculación Pericinética forma los microflóculos, inmediatamente da lugar a la aglomeración ortocinética y por consiguiente a la floculación por sedimentación diferencial. A pesar de lo antes mencionado, tanto la floculación Pericinética y por sedimentación tienen poca relevancia en el diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR's) debido a la lentitud de sus procesos, gobernando siempre el mecanismo de floculación ortocinética.

7.5.2 Factores que afectan a la floculación

Características del agua cruda:

La coagulación y floculación se pueden ver afectadas por la naturaleza del agua residual. En función del pH, la presencia de algunos iones dentro del agua puede influir en la interacción de los polímeros con las partículas coloidales dando lugar a un mayor tiempo de floculación. La naturaleza de las partículas que forman la suspensión también puede afectar directamente la velocidad de formación de flóculos e incluso inhibir el proceso, como en el caso de arenas y arcillas finas que no fueron removidas durante procesos de sedimentación primaria.

Tiempo de floculación:

La velocidad en la que se forman las aglomeraciones de partículas es directamente proporcional al proceso de floculación, por lo que, existe un tiempo óptimo para que este proceso se lleve a cabo. La permanencia de la masa dentro de la cámara de floculación durante un tiempo inferior al óptimo puede producir un porcentaje de turbiedad residual mucho más alto del requerido, mientras que un tiempo mayor no siempre tiene un efecto negativo, aunque en ocasiones puede generar rupturas en los flóculos.

Influencia del caudal:

El caudal dentro de una planta de tratamiento difícilmente permanece constante. Los mezcladores de tipo hidráulico son mucho más flexibles a las modificaciones del caudal, ajustándose a través del tiempo de retención y el gradiente de velocidad. En el caso de los mezcladores mecánicos que funcionan de forma continua, el efecto es mucho más perjudicial debido a que afecta el tiempo de residencia de la masa de agua y requiere muchas veces de la modificación de la potencia del rotor de paletas.

7.5.3 Floculantes más utilizados

Los coagulantes más utilizados se componen a base de polímeros orgánicos sintéticos y naturales, además de algunos compuestos minerales como los que se presentan a continuación:

- Sílice activada
- Poliacrilamidas
- Copolímeros de la acrilamida
- Copolímeros del ácido acrílico
- Policloruro de Aluminio (PACl)
- Poliamidas
- Carbonato de sodio (Na_2CO_3)

7.6.- Aplicación de coagulantes y floculantes

Para la aplicación de los productos químicos que efectuaran el proceso de coagulación y floculación es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Estado de presentación del producto: Dependiendo del proveedor de los compuestos, la presentación puede ser sólida o líquida:

- **Productos sólidos:** Normalmente los floculantes son los productos químicos que se encuentran en esta presentación y para su aplicación, deben de elaborarse soluciones homogéneas, usando agua desmineralizada como solvente.

- **Productos líquidos:** Se pueden usar en estado puro o diluidos dependiendo de la concentración proporcionada por el proveedor.

Preparación de las soluciones o diluciones: Para la preparación de los productos que se dosificarán tanto en las plantas como en el ensayo de pruebas de jarras, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos para obtener un químico efectivo y eficiente:

- **Concentración:** La concentración es proporcionada por las pruebas de jarras en las que se toma en cuenta el límite de solubilidad y el volumen de las dosis.
- **Tanques de preparación:** En las plantas de tratamiento de alto flujo se requieren de tanques de mezclado para la preparación del producto. En estos tanques es necesaria una dispersión y agitación efectiva para conseguir la mezcla completa y homogénea.

Tipo de aplicación: Dependiendo de las condiciones de trabajo y los volúmenes de agua a tratar, se presentan las siguientes formas de aplicación:

- **Aplicación manual:** Se lleva a cabo a través de elementos que permitan transportar el producto químico. En la industria es muy poco común aplicar este método debido a que requiere de una mano de obra constante sin mencionar que la forma de dosificación es mediante un caudal irregular que puede afectar sobre todo el proceso de coagulación.
- **Sistemas de bombe:** En él se utilizan bombas dosificadoras, que permiten agregar el producto de forma continua o discontinua, transportándolo desde los tanques de preparación hasta las cámaras de coagulación y floculación, generando una dispersión más efectiva del producto. En sus distintas versiones, es el método más empleado en la industria de las plantas de tratamiento

7.7.- Sedimentación, Flotación y filtración

La separación de los flóculos o lodos formados durante la coagulación-floculación se realiza mediante las operaciones complementarias de sedimentación, flotación y filtración:

7.7.1 Sedimentación

En el manual de tratamiento de agua para consumo humano, Maldonado (2004) describe a la sedimentación como “la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua” (p.319). Esta operación unitaria elimina toda materia suspendida por diferencia de densidades, dando como resultado final un fluido clarificado y una suspensión concentrada. Las partículas suspendidas sedimentan se pueden clasificar dependiendo de las características de las partículas:

- **Partículas discretas:** Se refiere a las partículas que durante la caída no cambian su forma, tamaño o densidad, dando lugar a lo que se conoce como una sedimentación simple. Este tipo de sedimentación comúnmente tiene lugar en desarenadores y sedimentadores primarios.
- **Partículas floculentas:** Son las aglomeraciones formadas durante la coagulación y floculación, las cuales, si cambian sus características durante la caída, efectuando una sedimentación floculenta también conocida como decantación.

Existen dos fenómenos que dependen de la concentración de las partículas que se encuentran en suspensión. Cuando la concentración es baja, las partículas sedimentan sin interferir unas con otras dando lugar a un proceso denominado caída libre, tal es el caso de las partículas discretas. Por otra parte, cuando la concentración es alta se producen colisiones ocurriendo un depósito masivo en lugar de uno individual, produciendo así un fenómeno denominado depósito o caída interferida.

La decantación es el método de separación más utilizado en los sistemas de tratamiento y es la utilizada en el utilizado en los ensayos de pruebas de jarras. En la industria, la decantación tiene lugar en tanques de sedimentación que pueden ser rectangulares, circulares o lamelares y se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de partícula que se remueva como sedimentadores estáticos, dinámicos o laminares.

7.7.2 Flotación

Es un proceso de separación de partículas y líquidos que tienen una menor densidad a la de la fase líquida en la que se encuentran. Este proceso se logra mediante la inyección de un gas a una presión de entre 2 y 4 atmósferas, saturando el agua y produciendo una gran cantidad de burbujas que ascienden a través del líquido. La resultante fuerza de empuje de las burbujas, forma conjuntos entre los flocúlos o líquidos y las burbujas, conduciendo a un arrastre que lleva a los elementos a la superficie de la masa de agua donde son barridos o separados por medios mecánicos.

En el proceso de flotación las burbujas de aire se pueden generar mediante aire disperso, procesos electrolíticos y por la inyección de aire disuelto. Este último es el más utilizado en la industria del tratamiento de aguas residuales. Un claro ejemplo son los sistemas de flotación por aire disuelto también conocidos como DAF, que se utilizan para la remoción de grasas y aceites en los trenes de tratamiento.

7.7.3 Filtración

Es un proceso de remoción de las partículas presentes en un medio acuoso que se logra a través de un medio poroso o filtrante. En esta operación, el agua pasa a través del medio acumulándose sobre su superficie o a lo largo de todo su espesor por medio de un mecanismo de adherencia superficial influenciada por parámetros físicos y químicos.

El efecto visible del proceso de filtración es la disminución de la turbidez, aunque también aumenta la calidad de los parámetros químicos y biológicos debido a la amplitud de las partículas que se pueden remover. Es por ello por lo que la filtración se considera un proceso final en una planta de tratamiento, que usualmente se usa en correlación con la sedimentación para remover la turbiedad residual y en las pruebas de jarras se utiliza para la determinación del color verdadero.

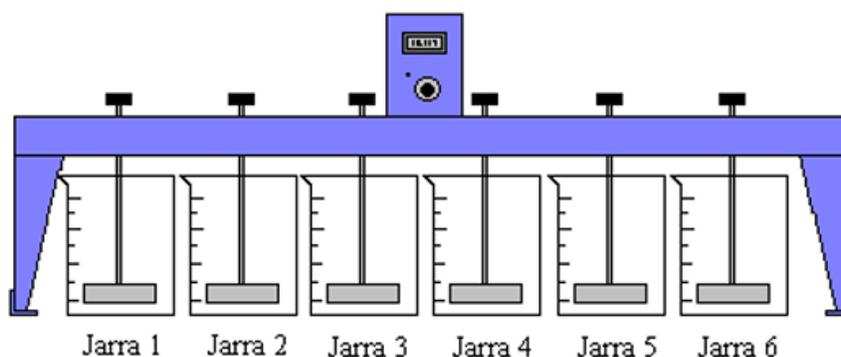
7.8.- Pruebas de Jarras

Las pruebas de jarras, conocidas también como ensayos "jar-test", son procedimientos de laboratorio fundamentales para simular y optimizar los procesos de coagulación, floculación y sedimentación empleados en plantas de tratamiento y potabilización de aguas. Estas pruebas son cruciales para el diseño y la eficiencia de las unidades de tratamiento fisicoquímico. Al realizarlas, se busca obtener agua de calidad superior, facilitando su separación por decantación y determinando la eficacia de distintas dosis de coagulantes en la reducción de la turbiedad. En estos ensayos denominamos "Jarras" a los vasos o recipientes utilizados para albergar cierta muestra de agua que será sometida a tratamiento.

El objetivo principal de estas pruebas es establecer la dosis óptima de coagulantes y floculantes, así como determinar las condiciones óptimas para los procesos mencionados, incluyendo el ajuste del pH, la definición de gradientes y tiempos de mezcla, así como las velocidades de sedimentación.

La obtención de la dosis óptima en una prueba de jarras depende enteramente del conocimiento y correcta ejecución del laboratorista, por lo que se requiere de conocimiento sobre el tratamiento de aguas y de ensayos minuciosos. Usualmente estas pruebas se realizan manteniendo una misma dosis de químico y variando el pH, para posteriormente mantener un mismo pH y variar la dosis de químico. La correcta ejecución de esta prueba facilita la comparación y valoración de diferentes químicos, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones en el tratamiento de aguas.

Ilustración 10. Ejemplo de un equipo de pruebas de jarras



Fuente: Estrada A. (2019)

7.8.1 Equipo de prueba de jarras

Para simular los procesos mencionados anteriormente, es un requisito indispensable contar con el equipo de prueba de jarras como el que se ve en la ilustración 10.

En la actualidad existen una gran variedad de diseños y modelos comerciales de estos equipos, los cuales, a pesar de tener ciertas diferencias, se componen principalmente de los siguientes elementos:

- **Agitadores:** Conectados a un eje y un motor mecánico, los rotores o agitadores cuentan con una serie de entre 2 y 6 paletas, capaces de operar a velocidades variables de 0-200 revoluciones por minuto (RPM), aunque algunas excepciones pueden operar hasta 400 revoluciones. Estos se pueden considerar como la parte más esencial del equipo y de las pruebas, debido a que se encargan de la mezcla rápida y lenta en el proceso de coagulación y floculación.
- **Iluminador:** Colocado en la base o en el centro del equipo se encuentra un iluminador o lámpara que permite una mejor observación de la formación de microflóculos y flóculos durante el proceso.
- **Vasos o Jarras:** Son vasos de precipitados de 1 o 2 litros de capacidad, diseñados específicamente para desarrollar los ensayos. Aunque se puede usar vasos de menor capacidad, esto no es recomendable, debido a que puede presentar dificultad a la hora de añadir los químicos y en la separación del agua clarificada. En algunos equipos, las jarras están diseñadas con un muestreador colocado a la mitad de la jarra, este permite extraer una muestra del agua clarificada sin necesidad de perturbar o mover la jarra y se compone de una llave y una manguera de muestreo.
- **Perilla de ajuste:** Sirve para ajustar la altura del rotor de paletas.
- **Panel de control:** Los equipos más actualizados cuentan con un panel digital en el que se puede programar el tiempo y la velocidad de las pruebas. Equipos más rudimentarios cuentan con perillas para ajustar tanto el tiempo como la velocidad.

7.8.2 Dosificación

Pocos equipos están equipados con unidades de dosificación de químicos, que permitan una administración simultánea a las jarras, lo que genera pequeños errores durante los ensayos. En la práctica se suelen medir las dosificaciones mediante el uso de jeringas hipodérmicas desechables, llenando una jeringa para cada una de las jarras, permitiendo una menor variación de tiempo en la adición con respecto a otros métodos como el uso de pipetas graduadas.

Al momento de la aplicación, se coloca cada una de las jeringas delante de cada jarra y se comienza con la mezcla correspondiente, adicionando el producto químico en el mayor punto de turbulencia cerca del agitador, para promover la mayor dispersión. Este tipo de aplicación es difícil de efectuarse para una sola persona.

7.8.3 Interferencias

Las principales variables que pueden presentar dificultad en el momento de la ejecución de los ensayos son las siguientes:

- Cambios de temperatura: Como se explicó en la sección 6.4.3, la temperatura puede crear corrientes que interfieran con la sedimentación, por lo que es necesario mantener la temperatura lo más constante posible.
- Intercambio gaseoso: La formación de burbujas debido a la mezcla, temperatura o reacciones internas, pueden dar lugar a un proceso de flotación.
- Calidad de la muestra: El tiempo entre la toma de la muestra y las pruebas de tratabilidad, pueden generar procesos de oxidación que afecten el pH y la calidad del agua.

En lo posible, debe evitarse lavar las jarras con detergentes no calificados para laboratorio, ya que muchos contienen componentes aniónicos que, de no ser removidos durante la limpieza del material, pueden afectar los resultados de los ensayos.

Es necesario recordar que la escala de las jarras no tiene comparación con el gran volumen de agua que se trata en la realidad de las plantas de tratamiento. No obstante, las pruebas de jarras siguen siendo el método más utilizado y de mejores resultados que se dispone para controlar y diseñar trenes de tratamiento fisicoquímicos.

7.8.4 Índice de Willcomb

Durante las pruebas, la observación es la principal herramienta del laboratorista, gracias a ella puede ver el desarrollo y formación de los flóculos, eligiendo las jarras que produzcan el floc de mejor calidad y descartando aquellas en las que el proceso no fue productivo, pudiendo así descartar condiciones y químicos, para llegar al mejor resultado. Para ello es necesario otorgar un valor a las características visualizadas durante el ensayo, por lo que se diseñó el índice de Willcomb que se presenta en la tabla 4. Aunque la observación depende directamente del criterio del laboratorista que lleva a cabo los ensayos, el índice de Willcomb presenta una gran herramienta para determinar la mejor jarra.

Tabla 4. Índice de Willcomb

Número del índice	Descripción	Observación
0	No visible	Ningún signo de aglutinación
2	Visible	Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso	Floc bien formado, pero uniformemente distribuido. (Sedimenta muy lentamente o no sedimenta).
6	Claro	Floc de tamaño relativamente grande pero que sedimenta con lentitud.
8	Bueno	Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente	Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina.

Fuente: Elaboración propia (2023)

7.8.5 Variables de respuesta

Durante la realización de las pruebas de jarras, así como al concluir las mismas, además del índice de Willcomb existen diversas variables que nos permiten identificar la jarra con los mejores resultados.

Tiempo de formación del floc:

Es el tiempo en que tarda en aparecer la primera aglomeración de partículas. Durante la coagulación es muy complicado visualizar el momento en el que se forman los microflóculos, en cambio durante la floculación, este proceso es más fácil de observar. La iluminación nos proporciona una ayuda muy importante durante esta determinación. Esta variable es de menor relevancia que las demás y, en muchas ocasiones, el floc que se forma más rápido, no es siempre el mejor.

Volumen de lodo:

Después de terminado el proceso de sedimentación, es necesario medir la cantidad de lodo formado. Para este proceso se puede utilizar un cono Imhoff o una probeta con la capacidad de la jarra y esperar a que el lodo se deposite durante un tiempo determinado. Esta variable es de suma importancia en el tratamiento de aguas residuales debido a que los lodos generados en una planta tienen que ser tratados mediante equipos especializados o en algunos casos ser llevados a disposición especial, por lo que económicamente es una variable que debe considerarse.

pH final:

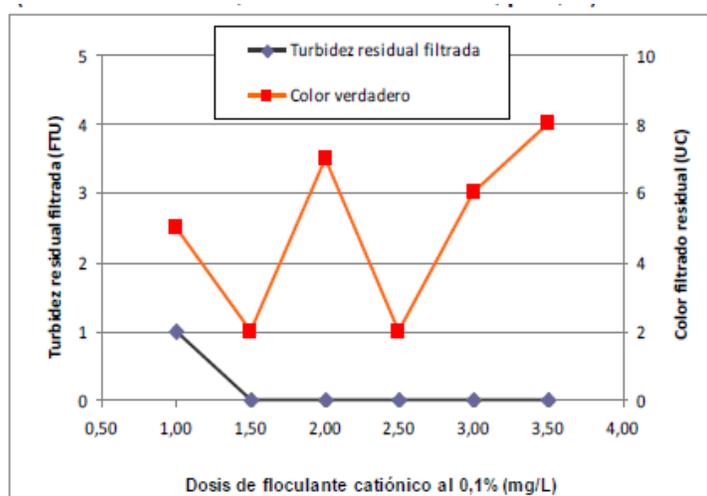
En las pruebas de jarras, el pH está constantemente modificándose y dependiendo de su valor final puede modificar los tratamientos posteriores, por lo que se recomienda medirlo después de cada prueba.

Turbiedad residual:

Es una de las variables más importantes en los tratamientos fisicoquímicos, debido a que las variables antes mencionadas, son de carácter observable o se ven afectadas por el error humano, diciendo poco sobre la eficiencia del proceso de coagulación-floculación. Recordemos que en la sección 6.1.1 se menciona que la turbidez es una interferencia causada por las partículas coloidales, siendo así, que la jarra con la turbiedad residual más baja puede ser la de mejor calidad. Esta determinación se logra extrayendo una muestra del agua clarificada después de 30-60 min de sedimentación a una distancia de entre 4 y 5 cm de profundidad. Posteriormente se pasa por un filtro de papel y se mide la turbiedad del agua filtrada usando un turbidímetro.

Con esta determinación se pueden reproducir los procesos de sedimentación y filtración usados comúnmente en la práctica del tratamiento de aguas. También, nos permite determinar la dosis óptima de los coagulantes y floculantes, mediante la elaboración de una gráfica como la que se presenta en la ilustración 11 donde el punto de inflexión más bajo de la curva, representa la mejor dosificación.

Ilustración 11. Gráfica de turbiedad residual y color verdadero en una prueba de jarras



Fuente: Quirós N., Vargas M & Jiménez J. (2010)

Color verdadero:

El color residual también es una variable que permite identificar la dosis óptima de coagulante y floculante, ya que, al igual que la turbiedad nos permite identificar la dosis en la que el agua clarificada presenta una menor concentración de partículas coloidales. Esta determinación se logra utilizando la misma muestra filtrada en la medición de la turbiedad y

evaluándola con un espectrofotómetro. Los resultados se pueden presentar junto con los de turbiedad residual como se muestra en la ilustración 11.

Los parámetros que nos permiten identificar y seleccionar la jarra optima, no se limitan a los antes mencionados, ya que, la calidad del agua final puede estar determinada por la normatividad que se desea cumplir o las características solicitadas por el dueño de la muestra, pudiendo así considerar parámetros tanto físicos, químicos, biológicos o microbiológicos, como los mencionados en la sección 6.1 de este proyecto.

8.- METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DE PRUEBAS DE JARRAS

Las pruebas de jarras presentan un método de laboratorio utilizado en el tratamiento de aguas para determinar las dosis óptimas de coagulantes y floculantes, simulando las condiciones de coagulación, floculación y sedimentación; El siguiente desarrollo metodológico describe el procedimiento y técnicas experimentales necesarias para la ejecución de pruebas de jarras.

8.1.- Campo de aplicación

Estas pruebas son aplicables a aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

8.2.- Responsabilidades

Personal de laboratorio: Apegarse a lo descrito en el presente procedimiento y realizar las pruebas cuidando la confiabilidad de estas.

8.3.- Medidas de seguridad

- a) No ha sido determinada la carcinogenicidad de todos los reactivos, por lo que cada sustancia química debe tratarse como peligro potencial a la salud. La exposición a estas sustancias debe reducirse al menor nivel posible.
- b) Cuando se trabaje con cualquiera de los compuestos químicos descritos en este método, debe usar todo el tiempo equipo de seguridad, tal como: batas, guantes de látex y lentes de seguridad.
- c) La preparación de todos los reactivos usados en este método debe efectuarse bajo una campana de extracción.
- d) Los residuos generados durante la ejecución de este trabajo se dispondrán de acuerdo con las políticas de calidad y en los lugares asignados por la autoridad que realiza las pruebas.

8.4.- Recolección, preservación y almacenamiento de muestras

- Deben recolectarse al menos 20 litros de muestra simple o compuesta en un recipiente plástico con tapa y agarradera, el cual debe estar perfectamente limpio y etiquetado con la siguiente información: Identificación de la descarga, número de muestra, fecha y hora de muestreo, punto de muestreo y nombre de la persona que efectúa el muestreo. Para ello puede referirse a la NMX-AA-003-1980.
- El tiempo de preservación debe ser el mínimo posible, para evitar reacciones y cambios en los parámetros del agua.

- Para esta prueba no se requiere adicionar ningún elemento para conservación de la muestra.

8.5.- Materiales, reactivos y equipos

8.5.1 Materiales

- Vasos de Precipitados de 1000 ó 2000 mL
- Vasos de Precipitados de 500 mL
- Vaso de precipitados de 250 mL
- Vaso de precipitados de 100 mL
- Pipetas volumétricas
- Jeringas de 1, 5 y 10 mL
- Agitadores magnéticos
- Agitador de vidrio
- Celdas para espectrofotómetro
- Conos de Imhoff
- Cronometro
- Embudo
- Matraz volumétrico de 100 mL
- Matraz volumétrico de 1000 mL
- Termómetro
- Celdas para turbidímetro.
- Celdas para espectrofotómetro.
- Probeta de 250 mL
- Probeta de 100 mL
- Filtros de 45 μ m para jeringas.

8.5.2 Reactivos

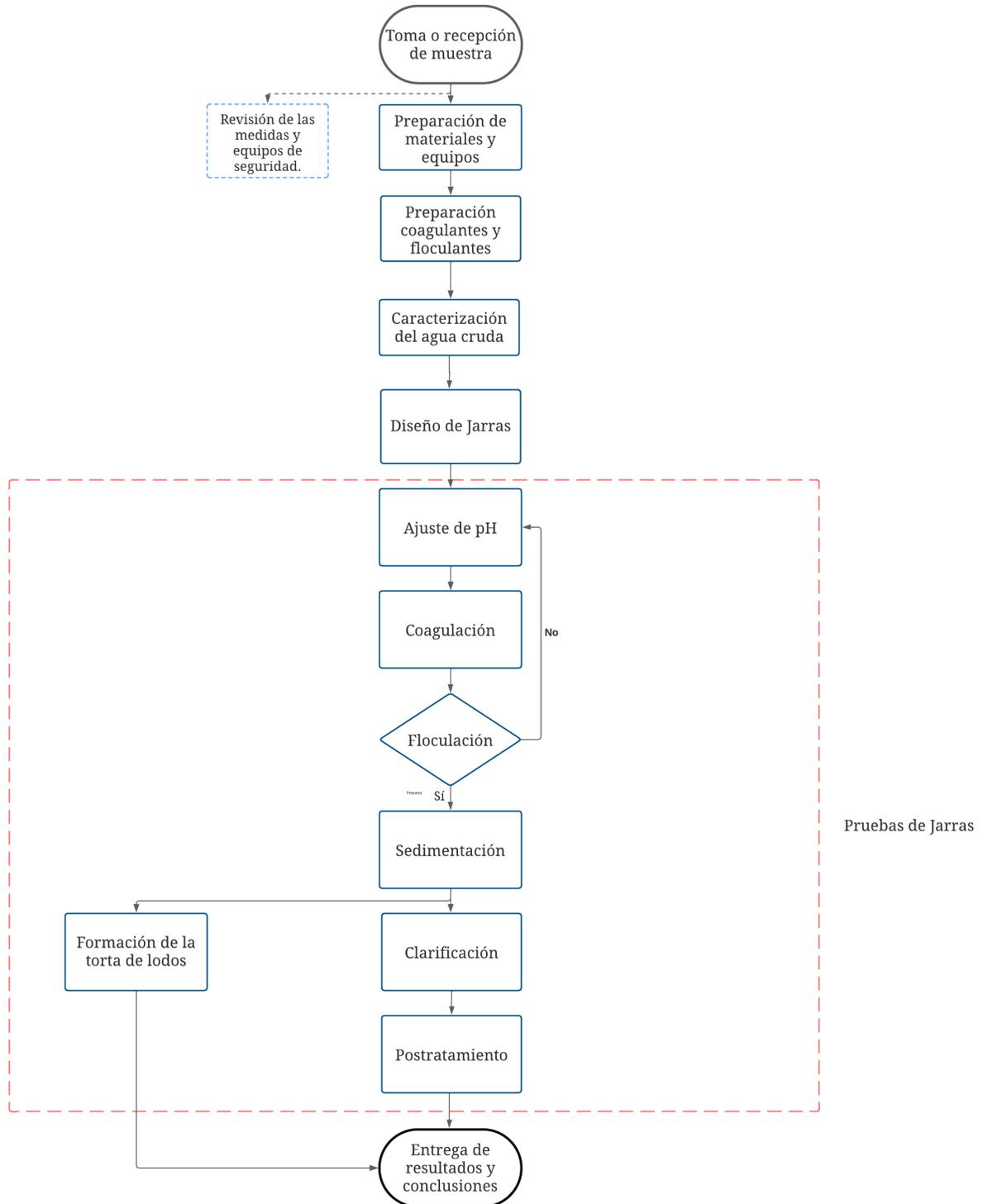
- Agua destilada (H₂O)
- Coagulantes
- Floculantes
- Hidróxido de Sodio (NaOH)
- Ácido Clorhídrico (HCl)

8.5.3 Equipos

- Equipo de Prueba de Jarras
- Turbidímetro
- Espectrofotómetro
- pH-metro
- Medidor multiparámetros (Conductividad Eléctrica/ SDT /Temperatura)
- Parrilla eléctrica con agitación

8.6.- Diagrama

Ilustración 12. Diagrama del proceso de Prueba de Jarras



Fuente: Elaboración Propia (2023)

8.7.- Preparación de soluciones

Solución de hidróxido de sodio al 10%:

1. Usando un vidrio de reloj, pesar en una balanza 10 g de hidróxido de sodio de grado reactivo.
2. Diluir con 50 mL de agua destilada en un vaso de ppt de 100 mL.
3. Agitar la mezcla usando una parrilla de agitación o un agitador de vidrio.
4. Transferir la solución a un matraz volumétrico de 100 mL.
5. Aforar el matraz volumétrico y agitar la solución.
6. Transferir la solución a un frasco y rotular como “Solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 10%”

Solución de ácido clorhídrico 0.1 N:

Para una solución 1N de HCl se necesitan 36.4g de HCl aforado a 1 litro. Por tanto, para una solución 0.1 N se requieren 3.64 g. Estos gramos corresponden a HCl en estado puro. Como normalmente el HCl comercial tiene una concentración de 37%, dividimos los 3.64 entre 0.37 y obtenemos que para esa concentración necesitamos de 9.84 g de HCl. Por último, dividimos entre la densidad del HCL concentrado que es de 1.19 g/mL y obtenemos que para 1 Litro de solución necesitamos adicionar 8.3 mL de ácido clorhídrico concentrado.

1. Tomar los 8.3 mL de HCl y los colocarlos en un vaso de ppt de 100 mL con 50 mL de agua.
2. Agitar la mezcla usando una parrilla de agitación o un agitador de vidrio.
3. Transferir la solución a un matraz volumétrico de 1000 mL.
4. Aforar el matraz volumétrico y agitar la solución.
5. Transferir la solución a un frasco ámbar y rotular como “Solución de ácido clorhídrico 0.1N”

Coagulante:

La norma ASTM D 2035-90 recomienda utilizar concentraciones de 10 (\pm 0.1) g/L, lo que es equivalente a preparar una solución al 1% (10 g de coagulante por cada litro de agua). Cuando el producto químico se encuentre en estado sólido preparar de la siguiente manera:

1. Usando un vidrio de reloj, pesar en una balanza 10 g de coagulante.
2. Diluir con 50 mL de agua destilada en un vaso de ppt de 100 mL.
3. Agitar la mezcla usando una parrilla de agitación o un agitador de vidrio.
4. Transferir la solución a un matraz volumétrico de 1000 mL.
5. Aforar el matraz volumétrico y agitar la solución.
6. Transferir la solución a un frasco y rotular como “Nombre del coagulante al 10%”

Cuando la presentación del coagulante se encuentra en forma líquida (solución) se recomienda realizar una dilución que permita obtener una concentración del 10%. Además, se recomienda preparar diariamente o antes de cada ensayo.

Floculante:

La norma ASTM D 2035-90 también recomienda utilizar una concentración del 0.1%. Para los floculantes que vienen en forma de polvo preparar de la siguiente manera:

1. Usando un vidrio de reloj, pesar en una balanza 1 g de coagulante.
2. Diluir con 50 mL de agua destilada en un vaso de ppt de 100 mL.
3. Agitar la mezcla usando una parrilla de agitación o un agitador de vidrio.
4. Transferir la solución a un matraz volumétrico de 1000 mL.
5. Aforar el matraz volumétrico y agitar la solución.
6. Transferir la solución a un frasco y rotular como “Nombre del floculante al 1%”

En la mayoría de los casos se utilizan polielectrolitos, por lo que, el proceso de agitación debe efectuarse durante un tiempo de 60 min para alcanzar una “maduración” completa y no se debe agitar a más de 450 RPM, debido a que esto podría dañar las cadenas del polímero. Cuando los floculantes se encuentran en forma líquida se recomienda realizar una dilución y mezclar durante 5 min para obtener una mezcla homogénea. Al igual que los coagulantes, los floculantes deben prepararse diariamente.

Dado que, en la práctica, las concentraciones de químicos siempre se mencionan en Partes Por Millón (PPM):

$$1 \text{ PPM} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0.0001\%$$

Cuando se adiciona 1 mL de coagulante, se están adicionando 10 PPM (mg/L), mientras que cada mL de floculante equivale a 1 PPM (mg/L). Se pueden utilizar otras concentraciones si se cree conveniente. El número de coagulantes y floculantes a utilizar responde al criterio del laboratorista.

8.8.- Caracterización de la muestra

Para cada serie de jarras se debe utilizar un formato que permita llevar un registro durante las pruebas y que funcione como reporte de estas. Este formato debe contener elementos para identificar la muestra, condiciones de las jarras, químicos utilizados, entre muchos otros (Consultar el ejemplo de la ilustración 13 del apartado 7.10 de este informe).

El primer apartado de este formato debe contener los parámetros iniciales que otorgan una identidad a la muestra, permiten diseñar y controlar las condiciones de las jarras y posteriormente determinan la jarra con el mejor tratamiento.

Para la caracterización se deben extraer 500 mL de muestra en un vaso de precipitados y determinar los parámetros que se presentan a continuación:

Temperatura:

1. Medir utilizando un termómetro o un medidor multiparámetros.

NOTA: Para realizar la prueba con mayor precisión, referirse a la NMX-AA-007-SCFI-2013 para la medición de temperatura.

pH:

1. Introducir en el vaso de precipitados con la muestra, una barra magnética y colocar en la parrilla de agitación a 400 RPM.
2. Introducir el electrodo del pH-metro cuidando que no se golpee con la barra magnética.
3. Esperar 1 minuto y registrar el valor en la hoja de reporte de pruebas de jarras.
4. Retirar el electrodo y enjuagar con agua destilada.

NOTA: En las muestras de agua residual, el pH puede no mantenerse constante. Por lo que se recomienda repetir la medición 3 veces para obtener un promedio. Para realizar la prueba con mayor precisión, referirse a la NMX-AA-008-SCFI-2000 para determinación de pH.

Conductividad Eléctrica:

1. Introducir el electrodo del medidor de conductividad dentro de la muestra.
2. Esperar 1 minuto y registrar el valor en la hoja de reporte de prueba de jarras.
3. Retirar el electrodo y enjuagar con agua destilada.

NOTA: Para realizar la prueba con mayor precisión, referirse a la NMX-AA-093-SCFI-2000 para determinación de conductividad.

Turbiedad:

1. Encender el turbidímetro.
2. Enjuagar dos veces la celda del turbidímetro usando la muestra.
3. Llenar la celda con la muestra.
4. Llenar otra celda con agua destilada o una disolución patrón (blanco).
5. Colocar la celda con el blanco en el compartimiento del turbidímetro.
6. Ajustar a cero el equipo usando el blanco.
7. Homogeneizar la celda con la muestra.
8. Colocar la celda con la muestra en el compartimiento del turbidímetro.
9. Leer la turbiedad de la muestra y registrar en el reporte de prueba de jarras.

NOTA: Para realizar la prueba con mayor precisión, referirse a la NMX-AA-038-SCFI-2001 para la determinación de turbiedad.

Color:

1. Encender el espectrofotómetro.
2. Filtrar al menos 50 mL de muestra a través de una membrana filtrante de 0.45 µm. En ocasiones la alta concentración de partículas en las muestras de agua residual, saturan con facilidad los filtros, en esos casos se puede medir el color de una muestra sin filtrar (color aparente)
3. Llenar una celda para espectrofotómetro con la muestra filtrada.
4. Llenar una celda con agua destilada (blanco)
5. Situar el equipo en la longitud necesaria.
6. Ajustar a “cero” el equipo usando el blanco.
7. Leer la absorbancia de la muestra.
8. Repetir la lectura 3 veces.
9. Registrar el valor en el reporte de prueba de jarras.

NOTA: Para realizar la prueba con mayor precisión, referirse a la NMX-AA-038-SCFI-2001 para la determinación de verdadero.

Para las determinaciones de turbiedad y color, cuando los valores sobrepasen la capacidad de medición de los equipos, se puede realizar una dilución 1/10 (1 mL de muestra con 9 mL de agua destilada). Una dilución mayor podría interferir en los valores de la determinación. Los resultados obtenidos se deben multiplicar por el valor de la dilución.

En ocasiones se puede requerir la determinación de otros parámetros como Demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total y sólidos disueltos totales por mencionar algunos. Estos parámetros pueden estar definidos por el emisor de la muestra, por el laboratorista o por los tratamientos consecuentes al proceso fisicoquímico.

8.9.- Diseño de las jarras

Velocidad y tiempo de la mezcla: Basándose en las recomendaciones de la norma ASTM D 2035-90, se proponen las siguientes condiciones de mezcla para todas las jarras y se incluye el tiempo de sedimentación para cada una de ellas:

Tabla 5. Condiciones de tiempo y mezcla en una prueba de jarras

Proceso	Velocidad (RPM)	Tiempo(min)
Mezcla rápida	100-120	1
Mezcla lenta	40-50	20
Sedimentación	0	15

Fuente: Elaboración propia (2024)

Volumen de las jarras: En las pruebas de jarras, se aconseja usar preferentemente volúmenes de muestra de 1000 mL. Sin embargo, si las circunstancias lo requieren, es posible utilizar volúmenes mayores, como 2000 mL e inferiores como 500 mL, aunque esto debería

considerarse como una última opción debido a que puede afectar la precisión y representatividad de los resultados.

Series: En esta sección se seleccionan los coagulantes y floculantes a utilizar, el rango de pH con el que se pretende trabajar y el conjunto de combinaciones que permita disminuir el margen de posibilidades. Para aquellos con experiencia en estas pruebas, es posible seleccionar de forma más rápida y eficaz las condiciones de las jarras. Esto permite reducir significativamente el número de ensayos y corridas necesarias, ya que se cuenta con un conocimiento previo que guía el diseño preliminar de las pruebas.

Por otro lado, en situaciones donde no se dispone de experiencia previa o puntos de referencia claros para la selección de condiciones en las pruebas de jarras, se sugiere seguir un procedimiento más detallado y sistemático como el que se presenta a continuación:

- **Serie 1:** La primera serie se realiza usando un único coagulante y manteniendo el pH normal del agua. En esta serie, se aplican distintas dosis del coagulante, como 10, 20, 30, 50, 100 y 150 PPM para las correspondientes jarras 1, 2, 3, 4, 5 y 6. Observando la formación de microflóculos y realizando evaluaciones visuales, se puede determinar si el coagulante es efectivo o no. Si el coagulante muestra efectividad, se descartan las jarras donde no hubo efecto y se centra la atención en las dosis que mostraron resultados positivos o mejores resultados sea el caso. Por ejemplo: si en las dosis de 10, 20, 100 y 150 PPM no se presenta ningún efecto, pero en las dosis de 30 y 50 si, a continuación, se realiza una serie de pruebas con dosis intermedias, por ejemplo, 30, 35, 40, 45 y 50 PPM, para afinar la dosificación y encontrar la dosis óptima del coagulante. El proceso anterior se repite para cada coagulante que se pretende evaluar.

- **Serie 2:** Una vez seleccionados los coagulantes y sus dosificaciones ideales, el siguiente paso en las pruebas es ajustar el pH para encontrar el valor óptimo que favorezca la coagulación. Estos ajustes se realizan mediante la adición de las soluciones de HCl y NaOH. El procedimiento depende del valor inicial de pH de la muestra de agua.

La primera corrida de ajuste de pH implica modificar el pH original de la muestra en 2 y 1 unidad por debajo y por encima, seguido de la aplicación de la dosis óptima del coagulante seleccionado. Posteriormente, se identifican las jarras con los mejores resultados y se procede a afinar el rango de pH para determinar el valor óptimo. Es importante considerar que, para muestras con un pH igual o inferior a 3, no se recomienda probar valores por debajo de este, ya que generalmente el pH óptimo para la coagulación se sitúa entre 5 y 9. De manera similar, para muestras con un pH igual o superior a 12, no se aconseja probar valores más altos.

Una vez establecido el pH óptimo, se repite este proceso de ajuste y evaluación para los demás coagulantes seleccionados, si los hubiere. Este enfoque sistemático asegura la optimización del proceso de coagulación en términos de la selección del coagulante y del ajuste del pH.

- **Serie 3:** La serie de pruebas en cuestión se enfoca en la selección del floculante más adecuado y en determinar su dosis óptima. El proceso comienza con el ajuste del pH de la muestra en la jarra, seguido de la adición de la dosis previamente seleccionada del coagulante. Acto seguido, se procede a dosificar 1, 2 y 3 PPM de cada floculante que se desea evaluar.

Una vez identificados los floculantes que producen un efecto positivo, se lleva a cabo otra serie de pruebas, siguiendo un procedimiento similar al empleado en la fase de coagulación, para precisar la dosis óptima del floculante. En esta etapa final, se consideran aspectos adicionales como la turbidez residual, el tiempo de sedimentación, el color real y volumen de lodos, parámetros relevantes que contribuyen a determinar cuál es la jarra que ofrece los mejores resultados.

Este método más exhaustivo es esencial para garantizar que se exploran adecuadamente todas las posibles condiciones de operación, permitiendo así identificar las más efectivas. Aunque este enfoque requiere más tiempo y recursos al inicio, es fundamental para acumular experiencia y conocimiento que, en el futuro, facilitarán la optimización de las pruebas de jarras.

9.- RESULTADOS

9.1.- Ejecución

La metodología por seguir para el desarrollo de una serie de pruebas de jarras es la siguiente:

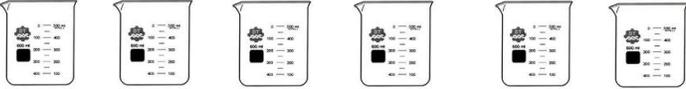
1. Preparar las soluciones como se explicó en la sección 7.7 de este informe.
2. Llenar los datos iniciales en el formato de reporte de prueba de jarras (Nombre del analista, fecha, código, etc.). Para ello véase el ejemplo de la ilustración 13 del apartado 7.10 de este informe.
3. Usando una probeta de 100mL, extraer 500 mL de muestra en un vaso de ppt.
4. Realizar la caracterización de la muestra y colocar los datos en el reporte.
5. Usando la probeta, medir el volumen necesario para cada jarra o vaso y etiquetarlos para su respectiva identificación.
6. Elevar las propelas del equipo de prueba de jarras y colocar cada vaso en su respectiva posición. Esto se hace de forma que las paletas queden descentradas y separadas de la pared de los vasos.
7. Llenar el formato de las pruebas con las condiciones bajo las que se realizará cada jarra.
8. Llenar una jeringa de 1 mL con la solución de HCl etiquetándola para su identificación.
9. Llenar una jeringa de 1 mL con la solución de hidróxido de sodio etiquetándola para su identificación.
10. Comenzar un mezclado con velocidad de 20-40 RPM.
11. Introducir el electrodo del equipo de medición de pH evitando que sea golpeado por las paletas de la propela.
12. Ajustar el pH de la jarra 2, adicionando gota a gota la solución de HCl o NaOH.
13. Anotar el volumen de solución agregado, en el reporte de las pruebas.
14. Retirar el electrodo y repetir los pasos 10, 11 y 12 para las jarras restantes. Usualmente a la jarra número 1 no se le realiza un ajuste de pH.
15. Llenar jeringas de 5 o 10 mL con las cantidades de coagulante y floculante seleccionadas, y colocarlas frente a su respectiva jarra.
16. Aumentar la velocidad del agitador a la mezcla rápida o instantánea (100-120 RPM).
17. Adicionar el coagulante en la sección de mayor turbulencia y comenzar la secuencia del cronometro. Esto se realiza de forma escalonada para cada jarra.
18. Esperar 1 minuto para finalizar el proceso de coagulación. Durante este tiempo es necesario anotar las observaciones relevantes, en el reporte de pruebas. Dado que es muy complicado ejecutar varias acciones y observaciones durante las pruebas, se recomienda que 2 personas realicen el ensayo, para que una pueda añadir el químico y otra pueda anotar las observaciones.
19. Reducir la velocidad según sea necesario para el proceso de mezcla lenta (40-50 RPM).
20. Registrar en las observaciones, el tiempo en el que de formación de los primeros flóculos.

21. Registrar observaciones cada 5 minutos durante el proceso de floculación.
- NOTA: En algunas ocasiones, la velocidad de mezclado puede romper las aglomeraciones. En estos casos se recomienda disminuir la velocidad hasta las 20 RPM.
22. Pasados 20 minutos de mezcla lenta, detener el proceso de mezclado.
23. Asignar un valor al floc formado en base al índice de Willcomb. Para ello véase la sección 6.8.3 de este reporte.
24. Anotar el tiempo en el que comienza la sedimentación
25. Esperar 15 minutos, realizando observaciones constantemente.
- NOTA: Normalmente se anota el tiempo requerido para que el volumen de partículas sedimente, pero, en algunas ocasiones las corrientes de convección impiden que el floc formado se deposite por completo. En estos casos el tiempo de sedimentación es aquel en el que las partículas o floc no sedimentado parezca estar moviéndose de igual manera hacia arriba y hacia abajo.
26. Usando una pipeta volumétrica se extraen 100 mL del sobrenadante de agua clarificada en un punto situado a la mitad del volumen de agua y se coloca una etiqueta para su identificación. Esto se realiza para cada jarra con resultados aceptables. Jarras donde el proceso no se efectuó correctamente pueden ser repetidas o descartadas.
27. Realizar una caracterización del sobrenadante (pH, temperatura y conductividad) y anotar los valores en el reporte de las pruebas.
28. Usando el filtro para jeringas de 45 μm , filtrar 50 mL del sobrenadante. Cuando el filtro se satura se debe cambiar.
29. Tomar la celda para espectrofotómetro y enjuagarla 2 veces con agua tratada y filtrada.
30. Llenar la celda con agua filtrada y llenar una segunda celda con agua destilada (Blanco).
31. Encender el espectrofotómetro y seleccionar el programa para medir color.
32. Calibrar el equipo usando el blanco.
33. Medir el valor del color verdadero y anotarlo en los resultados del reporte.
34. Usando sobrenadante sin filtrar, enjuagar una celda para turbidímetro.
35. Llenar la celda para turbidímetro con agua sin filtrar.
36. Encender el turbidímetro y medir el valor de turbiedad residual. Anotar este dato en los resultados del reporte.
37. En caso de requerirse, medir parámetros adicionales.
38. Después de 1 o 2 horas de sedimentación y formación de la torta de lodos, colocar cuidadosamente el volumen de la jarra en un cono Imhoff.
39. Esperar 1 hora más y anotar el volumen de lodo formado. Anotar este resultado en el reporte.
40. En algunas ocasiones se requieren de postratamientos como cloración, ozonificación y osmosis inversa. Estos tratamientos pueden depender de las características del tren que se pretende diseñar, de los resultados esperados o normativa que se desea cumplir. En este punto se pueden tomar 100 mL del sobrenadante y aplicar los postratamientos que el analista crea necesarios.

41. Lavar los materiales utilizados y repetir el proceso para una nueva serie de jarras. Se debe utilizar un reporte para cada serie de pruebas.
42. Una vez que se han determinado las mejores jarras, se repite el proceso para las mismas, con el objetivo de medir la reproducibilidad de los resultados y comparar las jarras de manera simultánea. Para esto se recomienda repetir cada jarra por duplicado.
43. Se elabora un formato con los mejores resultados, dosis óptimas de coagulante y floculante, conclusiones y evidencias. Para ello véase el ejemplo presentado la ilustración 14 y 15 del apartado 7.10 de este informe.

9.2.- Formatos (Ejemplos)

Ilustración 13. Formato de reporte de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería

	SISTEMA DE CALIDAD					CODIGO			
	PRUEBA DE JARRAS					FECHA			
Fecha: _____	Analista _____								
Proyecto: _____	Nombre de la muestra: _____								
DATOS DE AGUA CRUDA									
COLOR	<input type="text"/>	PH	<input type="text"/>	TEMP	<input type="text"/>	Cond	<input type="text"/>	Turbidez	<input type="text"/>
REACTIVOS Y CONCENTRACIONES									
Concentracion _____ Concentracion _____ Concentracion _____ Concentracion _____ Concentracion _____									
DATOS DEL PROCESO									
<u>MEZCLA RAPIDA</u>			<u>MEZCLA LENTA</u>						
<input type="text"/> RPM <input type="text"/> t			<input type="text"/> RPM <input type="text"/> t						
H _{inicial} <input type="text"/> H _{final} <input type="text"/>			H _{inicial} <input type="text"/> H _{final} <input type="text"/>						
H _{inicial} sedimentación <input type="text"/>			H _{inicial} sedimentación <input type="text"/>						
<u>FILTRACION</u>			<u>DESINFECCION</u>						
Medio filtrante _____			Quimico Empleado _____						
ADICIONES									
Ph _____ Oxidacion _____ Coagulación _____ Floculación _____ Desinfección _____ Filtración _____	_____	_____	_____	_____	_____	_____			
									
EVALUACIÓN									
Parametros: COLOR _____ TURBIEDAD _____ pH _____ No Indice de Floc _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____	_____ _____ _____ _____ _____			
Numero del Índice 0 2 4 6 8 10			Descripción Flujo coloidal: Ningún signo de aglomeración Visible: Flujo muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado Dispersos: Flujo bien formado pero uniformemente distribuido (Guillotina muy lentamente o no sedimenta) Claro: Flujo de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud Bueno: Flujo que se deposita fácil pero no completamente Excelente: Flujo que se deposita todo dejando el agua cristalina						
OBSERVACIONES									

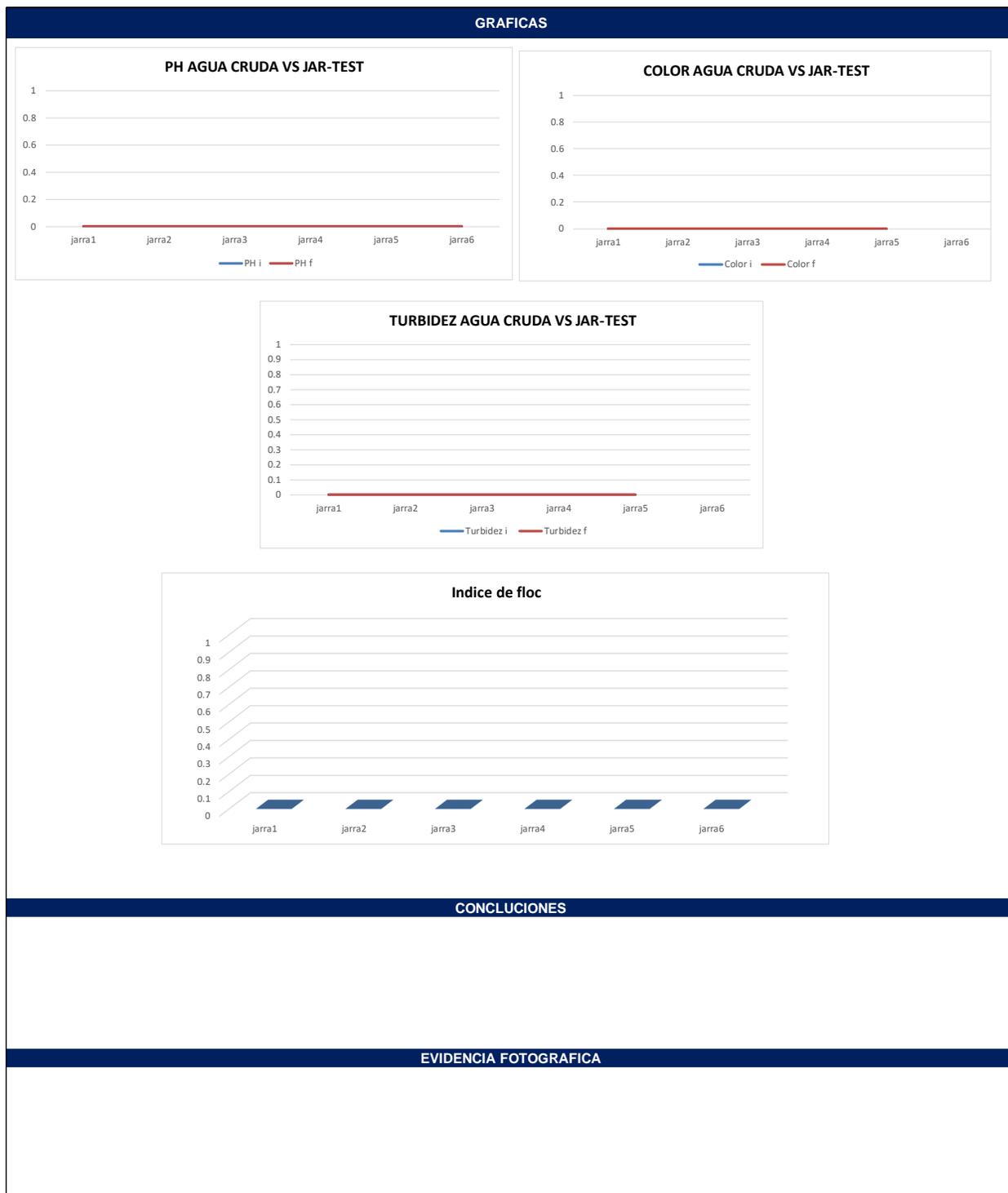
Fuente: Elaboración propia en CBR Ingeniería (2023)

Ilustración 14. Formato de reporte de resultados de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería

	SISTEMA DE CALIDAD						CODIGO
	REPORTE DE RESULTADOS DE PRUEBAS DE JARAS						FECHA
Nombre del Proyecto:							
OBJETIVO DE PRUEBA							
Datos de Agua Cruda							
PH	TEMPERATURA	CONDUCTIVIDAD	COLOR	TURBIDEZ	SDT	DQO	
Dosificaciones Usadas							
Oxidante							
Coagulante							
Floculante							
Desinfectante							
Resultados Obtenidos							
Parametros de agua final	JARRA 1	JARRA 2	JARRA 3	JARRA 4	JARRA 5	JARRA 6	
pH							
Color							
Turbidez							
Indice de Floc							
SDT							
CE							
DQO							

Fuente: Elaboración propia en CBR Ingeniería (2023)

Ilustración 15. Formato de reporte de resultados de prueba de jarras de la empresa CBR Ingeniería (Continuación)



Fuente: Elaboración propia en CBR Ingeniería (2023)

10.- CONCLUSION

La aplicación de pruebas de jarras en el tratamiento de aguas residuales, tanto de origen doméstico como industrial, se revela como una herramienta fundamental en el diseño de trenes de tratamiento. A pesar de su amplia utilidad, la escasez de literatura detallada sobre la ejecución paso a paso de estos ensayos genera una problemática significativa, especialmente para aquellos con escasa experiencia en este ámbito.

Durante la colaboración en CBR Ingeniería, se constató la relevancia de aplicar correctamente las pruebas fisicoquímicas. La experiencia adquirida permitió desarrollar un protocolo que, destacando por su simplicidad y eficacia, puede ser implementado por personal poco capacitado. Este logro cumple con el propósito central del proyecto al aportar a la ejecución de pruebas de jarras en la empresa, gracias a los formatos y el marco teórico generados para alcanzar los objetivos específicos.

A pesar de la aparente sencillez práctica de las pruebas de jarras, su complejidad radica en el diseño, dada la amplia gama de coagulantes y floculantes disponibles. La variabilidad en las características de cada agua residual puede generar incertidumbres en la aplicación del protocolo. Sin embargo, como método prevalente en el tratamiento de aguas residuales, este informe contribuye significativamente y abre el camino para futuras investigaciones.

Este proyecto se vuelve aún más crucial en el contexto actual de crisis relacionada con la contaminación de los cuerpos de agua. La creciente preocupación por la escasez de recursos hídricos y la necesidad urgente de abordar la contaminación del agua resalta la importancia de contar con guías efectivas para desarrollar tratamientos que mitiguen este problema global.

En conclusión, este protocolo brinda una guía detallada para el diseño y ejecución de pruebas de jarras, contribuyendo a la preservación del medio ambiente y al cumplimiento de normativas respondiendo a las necesidades específicas de CBR Ingeniería y su búsqueda de soluciones efectivas en el tratamiento de aguas residuales industriales.

11.- COMPETENCIAS DESARROLLADAS

A lo largo de este proyecto, he desarrollado competencias y habilidades que contribuyen a mi formación como ingeniero químico, brindándome una experiencia enriquecedora en la investigación y diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Algunas como:

Uso de equipos e instrumentos de laboratorio:

- Espectrofotómetro HACH DR-900
- Turbidímetro HACH 2100 Q
- Reactor para digestión de muestras HACH DRB200
- Ozonificador
- Equipo de prueba de jarras

Medición de parámetros dentro y fuera de laboratorio, tales como:

- pH
- Conductividad eléctrica
- Temperatura
- Sólidos suspendidos totales
- Sólidos disueltos totales
- Color
- Turbiedad
- DQO
- DBO₅

Habilidades técnicas en:

- Elaboración de formatos para recabar información
- Cotización de materiales de laboratorio
- Disposición de residuos peligrosos

Además de competencias en:

- Norma ISO 9001 para el manejo de documentos

En conclusión, este proyecto ha beneficiado mi perfil profesional y personal, proporcionándome habilidades técnicas y prácticas para abordar problemáticas relacionadas con el tratamiento de aguas residuales y la ingeniería química. La experiencia integral adquirida en este proceso enriquece mi trayectoria, preparándome para enfrentar desafíos futuros en este campo.

12. FUENTES DE INFORMACIÓN

- Acniti (s.f.) *El potencial zeta cosas importantes para las nanoburbujas*. Recuperado el 8 de diciembre de 2023 de <https://www.acniti.com/es/tecnolog%C3%ADa/potencial-zeta-burbujas-ultrafinas/>
- American Society for Testing and Materials (2016) *Standard practice for Coagulation-Floculation jar test of water ASTM D 2035-90*. ASTM Compass.
- Andía, Y. (2000). *Tratamiento de agua: coagulación y floculación*. Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua (SEDAPAL, Lima). <http://www.ingenieroambiental.com/4014/andia.pdf>
- Bolaños D. (2014) *Protocolo para el funcionamiento, control y operación del nuevo equipo de jarras de laboratorio de hidráulica y saneamiento* [Tesis de Titulación, Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería Civil] SIREN. Sistema Institucional de Recursos Digitales. <https://sired.udenar.edu.co/3041/>
- Campos E. (2003) *Tratamientos electroquímicos y radiación gamma en la remoción de contaminantes de un agua residual industrial*. [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México].
- Caviedes D., Muñoz R., Perdomo A., Rodríguez D. & Sandoval I., Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Ingeniería y Región*. 13, (1), 73-90. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5432290>
- Colín A., Diez A., Bernal L., Pacheco V. & Pavón T (2014) *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/52617>
- De la Peña M., Ducci J., Zamora V., (2013) *Tratamiento de aguas residuales en México*. BID: Banco Internacional de Desarrollo. <https://webimages.iadb.org/publications/spanish/document/Tratamiento-de-aguas-residuales-en-México.pdf>
- Doménech J. (2003) Depuración y Potabilización del agua. *Offarm*, 22, (8), 110-116. <https://www.elsevier.es/pt-revista-offarm-4-articulo-depuracion-potabilizacion-del-agua-13051504>
- Estrada A. (2019) *Evaluación de la coagulación mejorada con cloruro férrico para la reducción de atrazina*. [Tesis de titulación, Universidad del Valle]. Biblioteca digital de la Universidad del Valle. <https://hdl.handle.net/10893/17798>

- Hach (s.f.). *Nitrógeno total*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2023 de [https://es.hach.com/parameters/nitrogen#:~:text=El%20nitr%C3%B3geno%20total%20es%20la,el%20nitrito%20y%20el%20nittrato](https://es.hach.com/parameters/nitrogen#:~:text=El%20nitr%C3%B3geno%20total%20es%20la,el%20nitrito%20y%20el%20nitrato).
- Induanalisis (4 de junio de 2019) *DBO y DQO* Recuperado el 18 de noviembre de 2023 de https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/dbo_y_dqo_31
- Kangarani A. A. (2011). *EDAR para más de 100.000 habitantes equivalentes mediante fangos activos*. [Tesis de titulación, Universitat Politècnica de Catalunya] UPcommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/11131>.
- López C., Buitrón G., García H. y Cervantes F. (2017). *Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño*. IWA publishing. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30973>.
- Mascarós J. (2012) *Estudio de la eliminación físico-química de la turbidez en un agua residual de una industria cárnica*. [Tesis de maestría, Universidad politécnica de Valencia] RiuNet. Repositorio institucional de la universidad politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/27574>
- Muñoz A. (2008). *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. [Tesis de titulación, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo] RIA-UAEH repositorio institucional de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10873>.
- Ortiz L., Ángeles M. & Yolanda M. (2019) *Prueba de jarras*. Ricaxcan. Repositorio institucional de la Universidad Autónoma de Zacatecas. <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/3000>
- Osorio P., Peña D. (2002) *Determinación de la relación DQO/DBO5 en aguas residuales de comunas con población menor a 25 000 habitantes en la VII región*. Universidad Tec. Fed. Sta María.
- Quirós N., Vargas M & Jiménez J. (2010) *Desarrollo de coagulantes y floculantes para la remoción del color en aguas de consumo humano; el río Humo, Reserva Forestal Río Macho*. [Informe final de proyecto]. Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/2930>
- Romero J. (1999) *Calidad del Agua*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998, Junio 3) *Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Diario oficial de la federación. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>

- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (1998, Septiembre 21) *Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1998, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.* Diario oficial de la federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/311363/NOM_003_SEMARNAT.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (2022, Marzo 11) *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación.* Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
- Suarez V. & Trujillo D. (2011) *Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales.* [Tesis de Titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/684>
- Tafur L. & Quevedo R. (2014) *Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con quitosano extraído del exoesqueleto de camarón.* [Tesis de Titulación, Universidad de Tolima] RIUT Repositorio Institucional de la Universidad de Tolima. <https://repository.ut.edu.co/server/api/core/bitstreams/b218eef7-edba-4822-93dc-525e9e2e1c70/content>
- Toapanta M. & Chang J. (2009) *Calidad del Agua: Grasas y Aceites* [Proyecto de Investigación] Espol. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica de Litoral. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6161>
- Vargas, L., Aurazo M., Barrenechea A. & Maldonado V. (2004) *Tratamiento de agua para consumo humano en plantas de filtración rápida. Manual 1: Teoría, Tomo 1 y 2.* OPS/CEPIS. <https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/site/index.php/manuales/plantas-de-filtracion-rapida>