



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre y cuando den crédito y licencia a las nuevas creaciones bajo los mismos términos. Esta licencia suele ser comparada con las licencias copyleft de software libre y de código abierto. Todas las nuevas obras basadas en la suya portarán la misma licencia, así que cualesquiera obras derivadas permitirán también uso comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA

EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al documento cuyo título es:

INFLUENCIA DE LA ARCILLA ACTIVADA PARA MEJORAR AMBIENTALMENTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA

Presentado por:

GHEMINA JESHUA HUAYANCA FUENTES

Autor del Proyecto de Tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 00% (PORCENTAJE DE SIMILITUD) por lo cual se otorga el calificativo de:

APROBADO, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es menor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica, 16 de enero del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



Dra. ROSA LUZ GALINDO PASACHE
DIRECTORA (S)

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA



**"INFLUENCIA DE LA ARCILLA ACTIVADA PARA MEJORAR
AMBIENTALMENTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA"**

**LINEA DE INVESTIGACIÓN:
Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles**

INFORME FINAL DE TESIS

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

AUTOR: Bach. HUAYANCA FUENTES, Ghemina Jeshua

ASESOR: Dr. Rosalío Cusi Palomino

Ica, Perú

2023

DEDICATORIA

Dedico primeramente a Dios, por haber llegado en este momento importante para mí,

De la misma manera, dedico esta tesis a mi madre, por su confianza y el apoyo brindado, corrigiendo mis faltas y celebrando mis victorias.

A mi pequeño hijito, que es mi inspiración a seguir superándome día a día.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por protegerme, ayudarme, dándome valor y fortaleza para terminar esta etapa.

A mi madre, por ayudarme en este trayecto alentándome a seguir adelante.

Al Ing. Cusi Palomino, por su asesoría y valiosa guía en la realización de la misma.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA.....	54
2.1. Experimentación	54
2.1.1. Toma de muestras	54
2.1.2. Preparativo de muestras para el análisis	54
2.1.3. Análisis del agua residual	54
2.1.4. Sólidos totales, fijos y volátiles a 550°C.....	55
2.1.5. Sólidos suspendidos totales a 103°C-105°C	55
2.1.6. Sólidos Suspendidos volátiles y fijos a 550°C	56
2.1.7. Sólidos sedimentables	56
2.1.8. Medida del pH	57
2.1.9. Análisis microbiano de AR	58
2.1.10. Análisis de la bentonita	61
2.1.11. Propiedades fisicoquímicas de la bentonita.....	65
III. RESULTADOS.....	69
II.1. Ejecución del análisis del Agua Residual(AR)	69
II.2. Resultados del análisis de la bentonita.....	69
IV. DISCUSIÓN	76
V. CONCLUSIONES.....	77
VI. RECOMENDACIONES	78

VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	Referencias	79
VIII.	ANEXOS	81
	ANEXO A: TABLA DE HOSKINS.....	81
	ANEXO B: REGISTRO FOTOGRÁFICO	82
	ANEXO C: CERTIFICACIÓN DE LABORATORIO	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 : CONSTITUYENTES DE LAS BENTONITAS	24
TABLA 2: COMPOSICIÓN QUÍMICA H₂O SERVIDAS	60
TABLA 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BENTONITA EMPLEADA	60
TABLA 4: PROPIEDADES FÍSICAS DE LA BENTONITA	61
TABLA 5: RESISTENCIA DE LA BENTONITA A LOS COMPUESTOS QUÍMICOS	61
TABLA 6: RESULTADO DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA BENTONITA CON AGUA POTABLE	61
TABLA 7: RESULTADO DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA BENTONITA CON AGUA RESIDUAL	62
TABLA 8: EVALUACIÓN SÓLIDOS TOTALES (ST)	62
TABLA 9: EVALUACIÓN DE SS (SÓLIDOS SUNPENDIDOS)	63
TABLA 10: EVALUACIÓN SÓLIDOS DISUELTOS (SD)	63
TABLA 11: EVALUACIÓN DE LOS SSED (SÓLIDOS SEDIMENTABLES)	64
TABLA 12: EVALUACIÓN DEL PH ÓPTIMO	64
TABLA 13: ENSAYOS MICROBIOLÓGICOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	6
FIG. 2 VERTIDO DE AGUAS CONTAMINADAS	7
FIG. 3 EFECTOS E IMPACTOS DE LA CONTAMINACIÓN	12
FIG. 4 CRIBAS (RASTRILLOS) (BELZONA)	13
FIG. 5 ESQUEMA DE PTAR (BOSS TECH)	14
FIG. 6 ESTERILIZACIÓN DE LAS AR	15
FIG. 7 PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN	17
FIG. 8 DISPOSICIÓN TÍPICA - CUENCA DE CONTACTO	19
FIG. 9 ARCILLA BENTONITA	22
FIG. 10 CARACTERÍSTICAS Y USO DE LA ARCILLA ACTIVADA	23
FIG. 11 VALORES DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) DE MINERALES ARCILLOSOS Y ZEOLITA	25
FIG. 12 VISTA ESQUEMÁTICA DEL INTERCAMBIO CATIÓNICO	26
FIG. 13 SELECTIVIDAD DE IONES METÁLICOS	26
FIG. 14 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS ARCILLAS MÁS COMUNES	27
FIG. 15 DIAGRAMA DE ESTRUCTURAS MOLECULARES DE ARCILLOSOS	32
FIG. 16 AGUAS RESIDUALES	42
FIG. 17 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	43
FIG. 18 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA VS. CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA	44
FIG. 19 CONTAMINANTES CONSERVATIVOS Y NO CONSERVATIVOS	45

RESUMEN

Las aguas residuales constituyen el origen de la contaminación ambiental. Las aguas residuales se producen en hogares, comercio, industria, también en instituciones gubernamentales donde utilizan el agua para diversos fines. Esta agua contaminada proviene del entorno doméstico y del crecimiento industrial a consecuencia del aumento poblacional y expansión industrial, especialmente en países desarrollados. Contaminantes tales como metales pesados, cianuro, compuestos orgánicos tóxicos, nitrógeno, fósforo, fenoles, sólidos en suspensión, colorantes y volátiles de las industrias y las descargas de agua sin tratar de los hogares son de gran preocupación ambiental y de salud pública. Diversas técnicas de tratamiento. De acuerdo a procesos físicos, químicos o biológicos, utilizándose en eliminar contaminantes orgánicos de las corrientes de agua potable. El proceso físico más utilizado es la adsorción con carbón activado. En el presente estudio, se adoptó un proceso que utiliza arcilla activada, que proporciona una mejor eficiencia. El presente trabajo investigó el efecto de la arcilla activada para la eficiencia para la eliminación de contaminantes de las corrientes de aguas residuales. Arcilla activada ácida producida. mejor eficiencia que la arcilla activada con leche alcalina. La eficiencia de eliminación incrementó con la duración de contacto, disminución de la cantidad inicial de contaminantes e incremento en proporción de sólido a líquido.

Palabras clave: Arcillas activadas, aguas residuales, Tratamiento de aguas.

ABSTRACT

Wastewater is the main source of environmental pollution. Wastewater is waste water from households, commercial establishments, industries and government institutions that use water for various purposes. This polluted water comes from domestic environment and industrial growth due to population growth and industrial expansion, especially in developed countries. Pollutants such as heavy metals, cyanide, toxic organic compounds, nitrogen, phosphorus, phenols, suspended solids, dyes and volatiles from industries, and raw water discharges from homes are of major environmental and public health concern.

various treatment techniques; Based on physical, chemical or biological processes, they are used to remove organic pollutants from potable water streams. The most commonly used physical process is adsorption using activated carbon. In the present study, a process using activated clay was adopted, which provides better efficiency. The present work investigated the effect of activated clay on the efficiency of pollutant removal from wastewater streams. Acid activated clay produced better efficiency than alkaline milk activated clay. Removal efficiency increased with increasing contact time, decreasing initial pollutant concentration, and increasing solid to liquid ratio.

Keywords: Activated clays, wastewater, water treatment.

I. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua representa una de las principales dificultades mundiales del siglo a la luz del crecimiento de la población, los usos agrícolas, la utilización industrial y el cambio climático. Aguas residuales industriales o domésticas contienen numerosos contaminantes, incluidos compuestos inorgánicos y orgánicos, así como patógenos peligrosos a humanos, animales y las plantas.

Quiróz Pedraza, (2009) afirma que las crisis del agua son ahora algo común y una preocupación global; Las reservas disponibles de fluidos vitales están disminuyendo y poco se está haciendo para abordar este grave problema. El objetivo principal de sus informes de cumplimiento es el diseño de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR), dentro UNMSM, reduciendo el vertido de contaminantes al mar utilizando agua tratadas para el riego de zonas verdes; además de estudiantes y/o profesionales interesados en la materia, conocimientos, procedimientos y/o métodos de diseño; proporcionando así suficiente información.

En su informe se puede encontrar y comprender fácilmente la investigación básica necesaria para inicial el diseño de una PTAR; también se determinan los parámetros para diseñar, entender las diversas opciones de una PTAR, y finalmente se elegir la más adecuada; también muestra que incluye cálculos operativos para diseñar, costos y operatividad de la Planta.

Espinoza Paz, (2010), expone que las lagunas de oxidación de San Juan de Miraflores diseñada en los 60 del siglo pasado, para el tratar los canales de drenaje de Ciudad de Dios y Pamplona, con una capacidad promedio de tratamiento de 160 l/s, con un área de 20 hectáreas para el tratamiento y para el año 1998 ingresaba un flujo de 450 l/s aproximadamente, la instalación de estanques para la piscicultura redujo la superficie tratada en 5 hectáreas y provoco una sobrecarga hidráulica. Las aguas residuales orgánicas generan aguas residuales con parámetros que exceden estándares al descargar, generando preocupaciones en la salud. Lo que motivó a ampliar, modificando el tratamiento de San Juan manteniendo a la fábrica en un contexto ecológico. La zona simula un oasis en medio del desierto, incluyendo San Juan de Miraflores y Villa El Salvador. Paralelamente se ampliará el área de abastecimiento de aguas residuales por medio del tratamiento de aguas residuales de captadores de agua en Villa El Salvador.

Una ventaja adicional es la disminución de la contaminación en las costas causada al impactar las descargas de aguas residuales de los colectores de Surco quien es dueño del sistema San Juan, recolectando aproximadamente de 6,500 l/s de aguas residuales, liberándolos excluyendo los tratamientos dentro del mar La Chira, Chorrillos, en la bahía de Miraflores, ocasionando en el entorno marino de la costa causando una variedad de salud, la degradación a la contaminación de playas y a la afectación de los recursos marinos.

Arce Jáuregui, (2013), propone que el agua es fundamental en la Tierra, recuerda que la vida la Tierra no se puede vivir sin agua; y que aproximadamente el 71% de la superficie terrestre se compone de agua, y aunque su tamaño, un pequeño porcentaje está destinado para consumir; al referirse al agua potable y su uso en limpieza de alimentos, materiales, diferentes actividades; aunque el agua es un recurso fundamental, lamentablemente se desperdicia en actividades rutinarias de menor prioridad, sin garantizar que su ciclo regular se complete adecuadamente. Esto ha llevado a una disminución progresiva de la cantidad de agua disponible para el consumo humano.

Vivimos tiempos críticos en los que el uso correcto y racional del agua puede cambiar la vida del ser humano en el futuro, Perú está dotado de aguas subterráneas que abastecen y saturan a un número importante de la población. El bajo coste del agua en comparación a otros países puede ser la razón que se desconoce cómo utilizar el agua de forma adecuada y consciente.

En el Perú, aún no se ha resuelto el problema de la interrupción del ciclo adecuado de uso del agua, ya que después de su empleo, es necesario someterla a procesos de tratamiento antes de devolverla a sus fuentes mediante efluentes apropiados. Para algunas zonas, la atención se centra solamente en el resguardo de aguas residuales provenientes de hogares, generando problemas de salud y medioambientales y el descontrol operativo en relación a las empresas de agua.

Asimismo, las formas de reutilizar el agua y a través de un sistema de investigación, elabora soluciones factibles y económicamente viables; estas soluciones no solo se centrarán en la utilización prudente del agua, sino también en mejorar la calidad de vida. a las personas dentro de la urbanización sostenible.

Arocutipá Lorenzo, (2013), explica los problemas actuales por el mal estado de salud de la población, debido a que tienen mayor probabilidad de padecer enfermedades gastrointestinales e infecciosas, que provocan dificultades medioambientales originadas por un sistema de tratamiento de aguas residuales ineficiente e inadecuado en la ciudad, esto resulta crucial hallar respuestas a estas cuestiones.

El propósito establecido en la investigación consiste en analizar la influencia de los parámetros físicos, químicos y biológicos en la calidad del agua residual de la laguna de estabilización. Además, se pretende proponer técnicamente la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales con el objetivo de disminuir la contaminación generada por las descargas directas de aguas residuales hacia el cuerpo receptor; el procedimiento de metodología propuesto consiste en realizar evaluación, identificación, recopilación de datos y muestreo en diferentes puntos del sistema, seguido de análisis de laboratorio. Los resultados para DBO5 y DQO mostraron valores elevados, excediendo los Límites Máximos Permitidos (LMP) establecidos por el DS 003-2010-MINAM. Esto indica un alto nivel de contaminación, afectando la vida acuática en el río Inambari. En consecuencia, el efluente de agua residual no cumple con los LMP requeridos para su vertido en el cuerpo receptor. En conclusión, se detectaron factores responsables de dicha situación. Estas causas se examinaron para entender los efectos que generan, y al mismo tiempo, se observó la contaminación del entorno, lo que resulta en una calidad de vida insatisfactoria para la población.

Largo Castro & Villamarín Coral, (2013), exponen que la problemática de la contaminación ambiental representa uno de los mayores desafíos de la sociedad contemporánea. Especialmente, la contaminación del agua ha adquirido una relevancia significativa debido a sus impactos directos en la vida del planeta. Para contrarrestar la contaminación se debe evitar el vertimiento de aguas residuales sin tratar en los cuerpos de agua que suministran a las ciudades e industrias. Dado que los efluentes varían en diversidad y complejidad, se requiere un enfoque específico para cada caso en particular.

Las aguas residuales provenientes de la industria contienen diversos contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos. Los compuestos fenólicos son especialmente preocupantes debido a su impacto perjudicial para la salud de la sociedad, pues representan riesgos significativos para el medio ambiente al poder incorporarse a los ciclos naturales. Por ello, deben ser eliminados o reducidos a niveles tolerables.

El tratamiento de aguas residuales (TAR) más eficiente conduce a producir efluentes que cumplen estándares de calidad, en un bajo costo como requisitos mínimos de operación y mantenimiento. La deficiencia de agua y la demanda en constante aumento de agua limpia han atraído la atracción de investigadores a nivel mundial en busca de soluciones rentables a favor de la gestión, purificación y reutilización de aguas residuales. Existen numerosas técnicas químicas empleadas en el TAR, como la coagulación química, la reacción de Fenton, el intercambio iónico, la precipitación, la combinación de ultrasonido-ozono, ultra- filtración, técnicas electroquímicas, adsorción y columnas empacadas en aplicaciones para eliminar trazas y elementos pesados, microcontaminantes y otros materiales peligrosos (es decir, necesidad bioquímica de oxígeno (DBO), necesidad química de oxígeno (DQO), pintura, fenol, aceite y grasa, suspensión de sólidos totales (SST) y bacterias coliformes) de AR industriales, municipales y de drenaje, y medios acuosos [1].

Entre todas las técnicas mencionadas anteriormente, la adsorción en minerales arcillosos es vista como un procedimiento especialmente poderoso, particularmente en lo que se refiere al uso de materiales de bajo costo, biodegradables y respetuosas con el entorno para la eliminación de contaminantes en aguas residuales y soluciones acuosas. Los minerales de arcilla forman excelentes barreras naturales debido a su pequeño tamaño de grano, área de superficie específica, alta eficiencia con alta capacidad de absorción y sus procesos diagenéticos (que causan una alta densidad natural).

Además, tienen la capacidad de cerrar fisuras y grietas (que pueden formar caminos para los lixiviados). Además, su reactividad química permite la inmovilización de importantes contaminantes. Mayormente las investigaciones han evidenciado que los materiales naturales pueden actuar como buenos adsorbentes para materiales tóxicos, incluidos los metales pesados, mientras que los tipos y la accesibilidad de los minerales arcillosos también son importantes porque están involucrados en la selección de los contaminantes que se tratan.

En esta tesis, se utiliza el tipo de minerales de arcilla activada, es decir, minerales de bentonita para evaluarlo en un TAR para la ciudad de Ica, con respecto al hecho de que estas aguas residuales fueron remitidas al Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la UNICA por la suscrita autora del trabajo de tesis, como muestras para ser analizadas para diferentes parámetros.

Los restos de estas muestras se descargaron en las aguas residuales de drenaje del Laboratorio.

MARCO TEÓRICO

Las aguas residuales son aquellas que provienen del sistema de suministro de agua de una población, tras haber experimentado alteraciones debido a diversos usos en actividades a nivel doméstico, industrial y comunitario. [1].

Clasificación de AR (Aguas Residuales)

Según su procedencia, las AR pueden ser categorizadas como:

- **Domésticas:** empleadas con propósitos sanitarios, como en baños, cocinas, lavanderías, etc. Principalmente comprenden desechos humanos que ingresan a las redes de alcantarillado a través de descargas de las instalaciones hidráulicas de edificaciones, así como residuos generados en establecimientos de comercio, públicos y demás.
- **Industriales:** Son fluidos originados en las actividades industriales y presentan atributos particulares que varían según el tipo de industria.
- **Infiltración y caudal adicionales:** Las aguas subterráneas ingresan al sistema de alcantarillado mediante conexiones de tuberías, defectos en las paredes de las tuberías, inspecciones y tuberías de limpieza, entre otros. Asimismo, existen aguas pluviales que se descargan a través de diversas fuentes, canales, drenaje y colector de lluvia.
- **Pluviales:** Se trata de precipitaciones pluviales que liberan cantidades significativas de agua sobre la superficie del suelo. Una porción de este líquido es drenada, mientras que otra parte fluye por la superficie, transportando consigo arena, tierra, hojas y otros desechos presentes en el suelo. [2].



Fig. 1 Clasificación de las aguas residuales [2]

Polución de las AR.

En base a los principios establecidos en la Carta Europea del Agua, en el 5° artí., establece: "La contaminación consiste en una transformación, comúnmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciendo impropia o dañina para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, y para los animales domésticos y la vida natural" [3].

Tipos de contaminación. Contaminantes

Se dividen en dos grupos:

- Originada por motivos naturales o geoquímicos.
- Generada como resultado de la actividad humana, por origen industrial o urbano.

Para estos grupos, tanto por causa natural como humana, se producen cambios físicos, químicos o biológicos en el agua, a menudo volviéndola inadecuada para ciertos propósitos. Dependiendo del tipo de alteración, los contaminantes se clasifican como físico, químico o biológico [4].



Fig. 2 Vertido de aguas contaminadas [4]

a) Contaminantes que alteran los caracteres organolépticos del agua

Color

El color de un agua se deriva naturalmente o debido a contaminación. Cada una de las aguas tienen diferentes tonalidades dependiendo de las diferentes condiciones. Este matiz más o menos distinto es el color del agua, que surge de causas internas o externas. El primero es causado por sustancias disueltas y materia suspendida en la misma agua, y el segundo es la captación de radiación de una longitud de onda más extensa. Las aguas residuales domésticas frescas constituyen un color gris y se vuelven negras con el tiempo. La industria dependerá de la tipología para la producción, materia prima, proceso, entre otras. [5].

Olor

Los olores del agua pueden ser causados por sustancias químicas (fenoles, cloro), sustancias orgánicas descompuestas (emisión de gas) o determinados organismos (algas, hongos, etc.). Parra, afirma que “las propiedades del olor es una cantidad pequeña provoca una gran cantidad [6].

Si bien las aguas residuales domésticas frescas no tienen olor, solo aumentan con el tiempo a medida que la descomposición anaeróbica libera gases tales como sulfuro de hidrógeno o metano. En el caso de las aguas industriales, el

aroma variará según los compuestos presentes en el proceso. En entornos acuáticos naturales, si se percibe algún olor, se debe a la descomposición de materiales naturales, como, por ejemplo, las huevas de peces.

Sabor

Las AR domésticas y en industria, este factor no se considera porque el agua no es apta para beber. Su efecto sobre el medio receptor es el aroma de la fauna acuática o aguas destinadas a uso aguas abajo.

Grasas y aceites

Son las sustancias que se encuentran en un estado libre, independientemente de si provienen de fuentes animales, vegetales o minerales. Se destacan los subproductos del petróleo, pues su presencia en colectores y su evaporación pueden generar atmósferas tóxicas.

Son compuestos insolubles en H₂O y tienen una densidad menor que ella (gracias a la tensión superficial), generalmente generan emulsiones, interfases o una capa superficial extensa a pesar de su baja concentración. Su impacto en el entorno receptor perjudica al ambiente, ya que impregnan plantas y animales, afectando la fotosíntesis, respiración y transpiración. En otras palabras, obstaculiza la transferencia de oxígeno desde la atmósfera hacia la masa de líquido [7].

Espumas

El surgimiento de espumas en un curso de agua receptor, se trata de un impacto ocasionado por incidencia de otras sustancias contaminantes, generando un descenso de tensión superficial. En el caso de las ARU, la formación de espuma se debe a la presencia de proteínas y detergentes. En las aguas residuales industriales, la espuma puede deberse a tensoactivos, niveles elevados de salinidad y alcalinidad, partículas sólidas finas, entre otros factores. La existencia de espuma en el cuerpo receptor dificulta la transferencia de oxígeno, lo que resulta en una reducción de la fotosíntesis y, además, obstaculiza la autodepuración natural al afectar a los microorganismos.

Temperatura

Juega un papel crucial en varios procesos dentro del agua, tales como la solubilidad de gases y sales, así como en las reacciones biológicas que requieren una temperatura óptima para llevarse a cabo. Un aumento en la temperatura acelera la descomposición, lo que resulta en un aumento de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); simultáneamente, la solubilidad de este compuesto disminuye. La temperatura de las aguas residuales es más alta a la de ARN. La temperatura en las ciudades ronda los 15°C y en la industria según el tipo de procedimiento y una cantidad del agua utilizada. Cuando la temperatura se eleva del agua, el impacto primordial en el entorno receptor es una disminución en solubilidad del oxígeno en ella, lo que provoca cambios químicos y biológicos que conducen a la extinción de ciertas especies (salmónidos) en beneficio de otros (hongos) [8].

Radiactividad

Las aguas contienen una radiación natural originada por la existencia de isotopos de ciertos elementos. Esta forma de contaminación se origina en lugares como centros médicos, laboratorios farmacéuticos, plantas nucleares y similares.

Sólidos

El término "sólido" se refiere a cualquier elemento o compuesto presente en el agua que no sea el agua misma. Se catalogan sólidos filtrables y en suspensión según atraviesen o no un filtro; mientras que "fijos" y "volátiles" se refieren a sólidos inorgánicos y orgánicos respectivamente. La presencia de sólidos en suspensión o coloides (partículas con carga eléctrica) incrementa la turbidez, mientras que los sólidos disueltos impactan en la salinidad del entorno.

pH

La determinación de este parámetro es crucial para evaluar la calidad de las aguas residuales, porque esta zona del desarrollo del proceso biológico corresponde a un estrecho intervalo crítico, más allá del cual no hay vida debido a la desnaturalización de las proteínas biológicas. Cabe señalar que, debido a los cambios en el pH, el agua puede volverse corrosiva para los metales o los compuestos estables que contiene pueden volverse sustancias nocivas.

Las aguas residuales provenientes de hogares tienen una alcalinidad baja. En contextos industriales, esto dependerá de los productos finales, materias primas, entre otros [7].

b) Contaminantes químicos

Nitrógeno y fósforo

Tanto el nitrógeno como el fósforo, en forma de sales, son vitales para la vida por su participación en la composición de las proteínas. En los procesos biológicos, se encuentran alrededor de 45 gramos de Nitrógeno y 5 gramos de Fósforo por cada kilogramo de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) eliminada. En las aguas residuales de áreas urbanas, estos elementos son comunes y tienen su origen principalmente en desechos humanos y productos de limpieza.

Cuando estas aguas residuales urbanas son recientes, el nitrógeno se presenta en forma de nitrógeno orgánico (urea y compuestos proteínicos), transformándose posteriormente en forma amoniacal mediante la descomposición bacteriana. A medida que el agua se estabiliza, a través de procesos de oxidación, se generarán inicialmente nitritos, los cuales, a su vez, se convertirán en nitratos.

La consecuencia esencial en el medio anfitrión este fenómeno es referido como "eutrofización" del cuerpo de agua, que se traduce en un aumento excesivo del crecimiento de las algas[8].

Tóxicos

Ciertos compuestos químicos exhiben una toxicidad variable, destacando su relevancia debido a las consecuencias que su presencia en descargas provoca, generando diversos tipos de efectos como inmediato, crónico, subcrónico, latente, entre otros.

Entre los cationes, se resaltan los metales pesados, como el Cobre, Mercurio, Cromo, Cadmio, Zinc, Níquel, Hierro, Manganeso, Plomo, Arsénico, cuya toxicidad se debe a los problemas de bioacumulación a través de la cadena trófica.

Dentro de los aniones se incluyen sustancias como cianuros, cromatos, fluoruros, entre otros. También, se deben tener en cuenta otros compuestos con alta toxicidad, tales como plaguicida, fungicida y bactericida.

c) Contaminantes biológicos

Virus

Hay diversos tipos de virus que pueden estar presentes como agentes patógenos en ARU. Los virus originarios del tracto intestinal tienden a ser eliminados a través de las heces humanas.

Los virus excretados tienen la capacidad de mantenerse viables durante varias semanas en el entorno, especialmente en condiciones de baja temperatura (inferiores a 10 °C). Se ha observado que ciertos virus pueden conservar su viabilidad hasta por 41 días en agua o aguas residuales a 20 °C, durante 6 días dentro del río[9].

Los grupos de virus significativos para considerar son:

- Enterovirus (poliomelitis)
- Adenovirus
- Hepatitis a
- Reovirus
- Rotavirus (diarrea)

Bacterias

Las deposiciones de individuos saludables albergan una amplia diversidad de bacterias pertenecientes a numerosas especies. Estas bacterias ingresan al cuerpo humano principalmente a través de la ingestión, aunque algunas también pueden hacerlo por las vías respiratorias mediante la inhalación de aerosoles o por contacto con los ojos.

Cada individuo elimina diariamente entre cien mil millones y cuatrocientos mil millones de estos organismos, siendo especialmente abundantes las bacterias en forma de bastoncillo, conocidas como Coliformes. Debido a su alta prevalencia, resultan fáciles de detectar en aguas contaminadas y se emplean como indicadores. Su presencia señala la posibilidad de la existencia de microorganismos patógenos, mientras que su ausencia indica que el agua está libre de agentes causantes de enfermedades. Estos microorganismos se utilizan

para alertar sobre la contaminación fecal, siendo los más comúnmente utilizados:

- El coliforme fecal "escherichia coli"
- Bacterias anaerobias "clostridium", "bacteroides" y "bifidobacterium" [9].

Efectos de la contaminación

Los impactos perjudiciales generados por la contaminación del agua son diversos y numerosos, siendo destacados, entre otros, debido a su significativa importancia para la vida y la humanidad:

- Propagación de ENFERMEDADES.
- Acción TOXICA y CARCINOGENICA.
- Incidencia sobre producción de PRODUCTOS ALIMENTICIOS.
- Reducción de su EMPLEO INDUSTRIAL y AGROPECUARIO.
- Limitación sobre uso de agua con FINES RECREATIVOS.

Las aguas residuales, ya sean de origen industrial o urbano, al ser descargadas en un curso de agua, ocasionan una perturbación en los equilibrios físico-químicos y biológicos del agua. Sin embargo, si dicha agua ha sido sometida previamente a un proceso de tratamiento o depuración, los daños resultantes serán menores en comparación con la descarga de agua sin tratar, siendo aún menos perjudiciales cuanto más exhaustivo haya sido el tratamiento. El nivel de tratamiento debe adaptarse a las características reológicas del cuerpo receptor, teniendo en consideración los siguientes factores:

- Relación de caudales entre el cauce receptor y el vertido.
- Estado de las aguas del río antes de recibir el vertido.
- Características del cauce receptor en los kilómetros posteriores al vertido (pendiente del río, presencia de cascadas que facilitarán la aireación natural...).
- Posibilidad de otros vertidos aguas abajo.
- Posibilidad de tomas de agua cerca del punto de vertido.

Flores et al. afirman que: “En relación con todo esto, es muy importante el conocimiento de las Constantes de Des-oxigenación y Re-oxigenación, para poder saber en todo momento la carga contaminante que el río puede admitir sin llegar a sufrir un desequilibrio biológico irreversible” [10].



Fig. 3 Efectos e impactos de la contaminación [10].

La polución del agua desencadena una serie de eventos no deseados que pueden ser fácilmente detectados en un río. Cada conjunto de estos eventos ocurre en una zona específica, la cual puede variar de un día a otro, pero está claramente definida en el tiempo. Estos eventos pueden ser controlados y medidos desde el punto donde se llevó a cabo la descarga de aguas residuales provocando contaminación.

- A niveles altos de concentración el contenido en SS es del orden de 350 ppm y el contenido en DBO5 de 300 ppm.
- A niveles medios de concentración el contenido en SS y en DBO5 es de 200 ppm.
- A niveles bajos de concentración el contenido en SS y en DBO5 es de 100 ppm [10].

Proceso primario del TAR.

Cribado: Las AR que ingresan a tratamiento contienen madera, rocas e incluso cadáveres de animales. Si no se eliminan todos, pueden causar problemas más adelante en el tratamiento. Muchos materiales se utilizan para llenar espacios vacíos en la superficie terrestre.

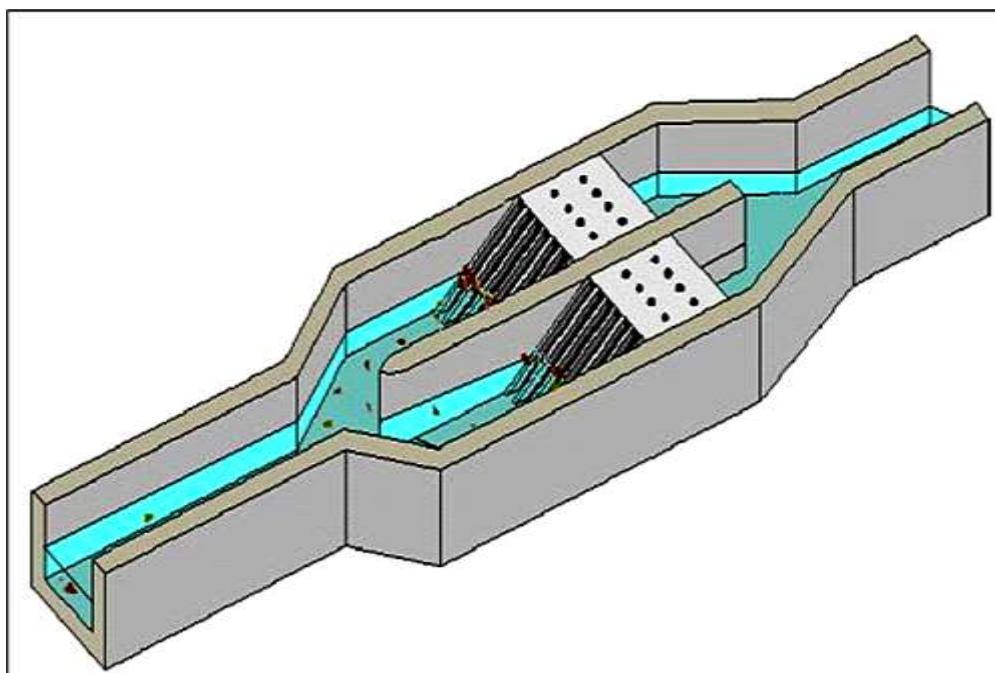


Fig. 4 Cribas (Rastrillos) (Belzona) [11]

Bombeo: La red de alcantarillado dependen de la gravedad para llevar las AR fuera de la casa a una PTA. Por tanto, las PTARs se ubican en áreas con bajos niveles de agua, generalmente cerca de ríos, donde el agua purificada se devuelve al medio ambiente. Si la instalación está construida sobre el suelo, las AR deben bombearse al tanque de aireación. De aquí, se activa la gravedad para transportar las AR a través del tratamiento [11].

Aireación: el primer paso que realiza una PTA consiste cuando agitan el drenaje y cuando está expuesto al aire. Provocando que algunos gases disueltos (sulfuro de hidrógeno, tenga olor a huevo podrido) salgan del agua con mal sabor y olor. Luego, las aguas residuales ingresan a tanques de concreto largos y paralelos. Cada tanque está dividido en dos partes. En la primera parte, el aire se bombea al agua.

Eliminación de lodos: El agua residual luego ingresa a la segunda sección, el tanque de decantación. La sustancia sedimentada (la parte orgánica del drenaje) puede depositarse aquí y se bombea fuera del tanque. Parte del agua se elimina en una operación conocida como "espesamiento" y el sedimento acumulándose en "tanques de digestión".

Eliminación de escoria: a medida que el lodo sedimenta al fondo del tanque, el material más liviano flota hacia la parte superior. Este "rosa" incluye grasa, aceite, plástico y jabón. Los ríos barren lentamente la superficie de estos tanques, eliminando las aguas residuales. La escoria "espesa" es impulsado mediante bombas junto a lodos al "tanque de recuperación". Muchas ciudades también utilizan la filtración en el tratamiento de aguas residuales. Una vez eliminados los sólidos, el líquido atraviesa una filtración mediante un material (arena) moviéndose por la gravedad. Este método repele prácticamente todos los tipos de bacterias, reduce la turbidez y el color, elimina los olores, reduce los niveles de hierro y elimina los sólidos residuales del agua. En ocasiones, el agua presenta filtraciones por medio de partículas de carbón eliminando partículas orgánicas. Los hogares implementan este método [11].

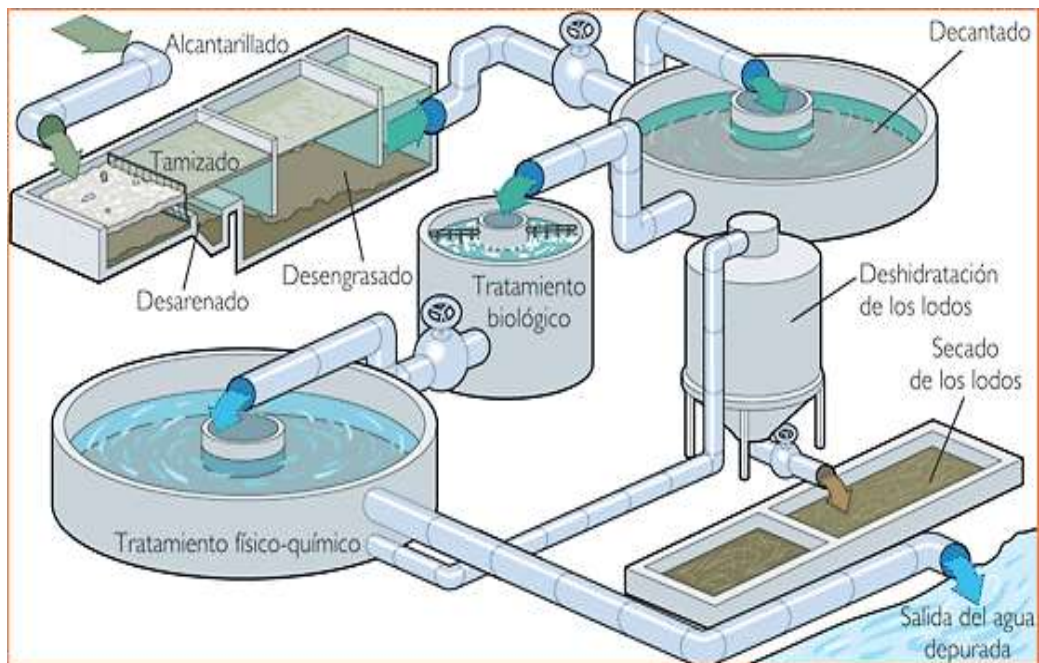


Fig. 5 Esquema de PTAR (Boss Tech) [11]

Desinfección: Finalmente, las AR desembocan en una piscina de "cloración", donde se añade cloro para matar las bacterias que suponen un riesgo, como se hace en las piscinas. Después de matar las bacterias, el cloro se elimina casi por completo, pero en ocasiones se necesita contrarrestar el cloro añadiendo diferentes sustancias químicas. Brinda protección a peces, otras especies marinas que pueden resultar dañadas incluso con pequeñas cantidades de cloro. El agua tratada, conocida como agua residual, se descarga en un río o mar cercano.

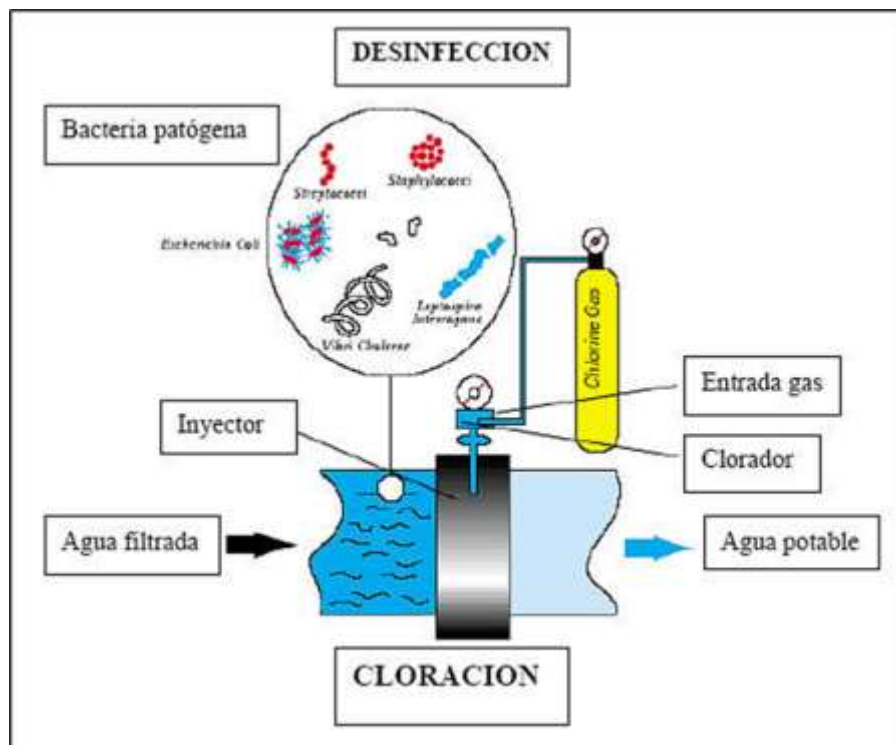


Fig. 6 Esterilización de las AR (<http://www.elaguapotable.com/cloracion1.htm>)

Disposición de residuos: Otra parte del TAR se integra por la gestión de los últimos residuos sólidos restantes. Estos sólidos se almacenan en grandes tanques calentados llamados "tanques de digestión" durante 20 a 30 días. Aquí, los desechos sólidos son "digeridos" por bacterias, lo que reduce su tamaño, olor y elimina posibles portadores de enfermedades. Al terminar el producto eventualmente debe envirarse a la superficie desnudas con el fin de usarse como relleno, sin embargo, en ocasiones es empleado como fertilizante [9].

➤ **Coagulación y floculación de contaminantes del agua**

El TA se divide en: clarificación, desinfección, acondicionamiento químico y acondicionamiento sensorial. Para la investigación busca describir la fase de aclaración, que implica una remoción de finos.

Se divide: coagulación, floculación, sedimentación y/o filtración.

González S, Valdivia C:

“El agua consta de tres impurezas principales: físicas, químicas y biológicas. Se puede decir que las impurezas sólidas totales se dividen en partículas no filtrables o suspendidas, filtrables o disueltas, y la tercera posibilidad es un caso intermedio correspondiente a los coloides. En general, los coloides no tienen limitaciones fijas de tamaño y suelen ser estudiados por métodos fisicoquímicos de sus propiedades.

La decantación de materiales coloidales puede demorar hasta 755 días, y es importante cambiarla [11].”

Para comprender mejor el estudio del TA, se introdujo el concepto de turbidez. La turbidez siendo característica visual de la muestra que dispersa y absorbe la luz en lugar de propagarla en una trayectoria recta. Hay dos tipos de equipos que miden la turbidez. El primer tipo de equipo: El Nefelómetro de aguja de platino y la vela de Jackson, siendo adecuados en la medición de turbidez alta.

Otro tipo es: Nefelómetro Hach, utilizada en la medición de la turbidez baja (nefelométricamente). Asimismo, la turbidez, puede precisar color. Si la turbidez no es eliminada, se llama color aparente, de lo contrario es el verdadero color del agua. Se suele medir mediante tuberías de Nessler. Su color es originado por la masa orgánica u otro mineral que este suspendido y coloides. Generalmente, las sustancias liófilas cumplen la responsabilidad de dar color al agua.

Con respecto a los coloides, la microscopía electrónica puede utilizar para clasificarlos en el rango de tamaño de 1 μm a 1000 μm . Los coloides son clasificados en una variedad de aspectos. Cuando están estabilizados por una capa de hidratación, pueden considerarse liófilos, si son repelidos por el solvente, pueden considerarse liófobos y, por lo tanto, menos estables. También se clasifican por el período en finales (cambios de manera

rápida) y diarias (duraderas). Químicamente, existe dos categorías: orgánicos e inorgánicos [3].

Conforme al tipo de aglomerados están clasificados por moleculares (poliméricos) e híbridos. Finalmente, en base a su forma, se puede decir que el cilíndrico es más fácil de aglomerar que el esférico o poliédrico [11].

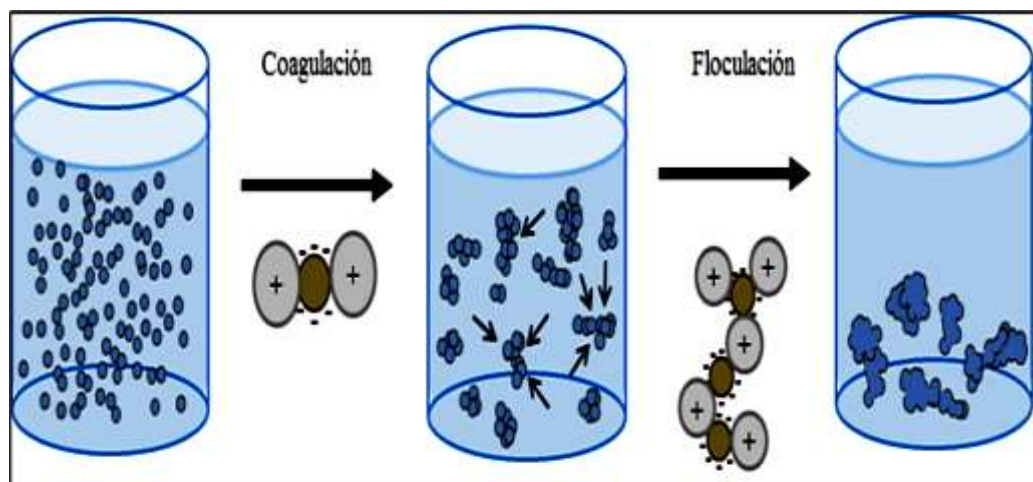


Fig. 7 Proceso de coagulación – floculación [12].

Coagulación y floculación.

Constituyen dos procedimientos en la fase de clarificación del agua. Estos se resumen en un paso en el que las partículas se combinan en pequeños fragmentos llamados flóculos en su peso superando al del agua logrando que se sedimenten.

La coagulación es un procedimiento de desequilibrio de partículas en suspensión, reduciendo así la fuerza de separación entre ellas. La floculación se refiere al fenómeno del movimiento en un líquido permitiendo a las partículas entrar en contacto. Lo que significa que se forman puentes químicos entre las partículas y por tanto la red de coagulación, que será espacial y porosa. Por lo tanto, a medida que crecen las partículas agregadas, se formarán flóculos que son lo suficientemente grandes y pesados para asentarse.

EPA (1996):

"El término coagulación se refiere a la reacción que ocurre cuando se agrega un agente químico (un coagulante), que resulta en la formación de un producto insoluble. La coagulación comienza cuando se agrega el coagulante al agua y dura una fracción de un segundo [12]".

➤ **Desinfección de AR**

Se refiere a la eliminación, inactivación o eliminación de microorganismos patógenos. La destrucción y/o inactivación de microorganismos significa el término en la propagación. Cuando no se puede eliminar, el agua será imbebible y propensa a enfermedades.

Desinfectante: Estos reactivos también eliminan contaminantes orgánicos que sirven como nutrientes o refugio para microorganismos [13].

Compuestos para desinfección de agua:

- ✓ Cloro (Cl_2)
- ✓ Óxido cloroso (ClO_2)
- ✓ Hipoclorito (OCl^-)
- ✓ Ozono (O_3)
- ✓ Halógeno: bromo (Br_2), yodo (I)
- ✓ Bromuro de cloro (BrCl)
- ✓ Metal: cobre (Cu^2), plata (Ag)
- ✓ Permanganato de potasio (KMnO_4)
- ✓ Fenoles
- ✓ Alcoholes
- ✓ Jabón y detergente
- ✓ Sal de amonio
- ✓ Peróxido de hidrógeno
- ✓ Diversos ácidos, bases

Métodos físicos de desinfección del agua:

- ✓ Ultravioleta (UV)
- ✓ Radiación de electrones

- ✓ Rayos gamma
- ✓ Sonido
- ✓ Calor

Factores que influyen en la desinfección.

Además del cloro residual, se ven afectados por diversos factores en la eficiencia del procedimiento de desinfección:

- El punto adecuado de inyección en la corriente de flujo y la mezcla completa son esenciales para un tratamiento completo.
- Una vez que el cloro se inyecta en la corriente de flujo y se mezcla, el flujo pasa a un recipiente de contacto de cloro. Este es un tanque diseñado para proporcionar un tiempo de detención adecuado (tiempo de contacto) para asegurar una reacción completa del cloro a los patógenos. El diseño de la cuenca de contacto de cloro es de vital importancia para maximizar el tiempo de detención a través de la cuenca y minimizar los cortocircuitos. Los deflectores dentro de los recipientes ayudan a minimizar los cortocircuitos y ayudan a mezclar. Tenga en cuenta que la relación de largo a ancho es 40:1, y que la unidad generalmente está diseñada para proporcionar 30 minutos de tiempo de contacto con el flujo promedio mensual máximo, o 15 minutos de tiempo de contacto con el flujo máximo por hora.
- El pretratamiento efectivo reducirá los sólidos en suspensión y el contenido orgánico de la corriente de aguas residuales, lo que permite que el desinfectante sea más efectivo para reducir los patógenos.

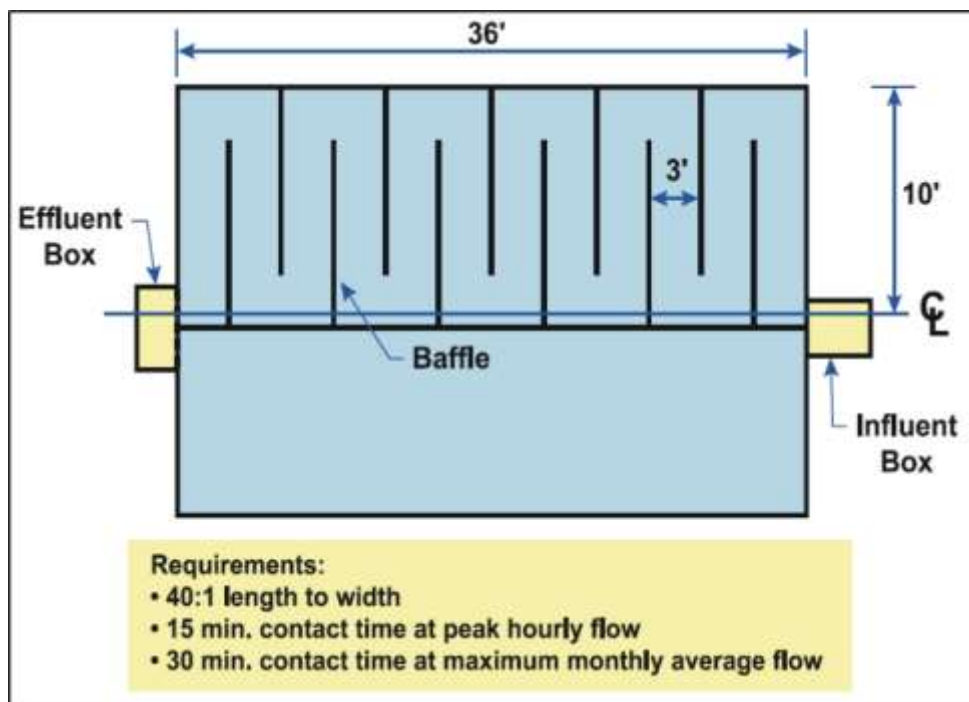


Fig. 8 Disposición típica - cuenca de contacto [11]

Coagulantes no metálicos.

Polielectrolitos.

En los primeros años de la década de 1970, en varios países de América Latina, se implementaron tecnologías para el tratamiento de agua potable dirigidas a naciones en desarrollo. Estos nuevos enfoques han reemplazado en gran medida el uso de sistemas electromecánicos en los procesos unitarios, favoreciendo principalmente los sistemas hidráulicos. Además, se promovió el empleo de coagulantes naturales propios de cada región con el fin de reducir, parcial o completamente, la dependencia de reactivos químicos importados.

Es relevante destacar que en Estados Unidos y América Latina se emplean polímeros sintéticos en el proceso de clarificación del agua. Sin embargo, es crucial investigar y mantener un estricto control de calidad sobre la toxicidad de los polielectrolitos sintéticos, ya que en algunos casos los monómeros empleados para fabricar estos polímeros pueden ser perjudiciales. Por contraste, los polímeros naturales suelen tener una toxicidad baja o inexistente, ya que se utilizan en productos consumibles. Estos aspectos destacan la importancia de la investigación en esta área y la obtención de resultados positivos en esta etapa inicial [3].

Los fundamentos teóricos de las sustancias naturales, se centran en el coagulante natural alternativo. Específicamente, se explora la obtención, preservación y aplicación de los polisacáridos presentes en la Tuna *Opuntia ficus* como coagulante y/o coadyuvante de coagulación en aguas superficiales con elevada turbidez y alcalinidad. Los carbohidratos comprenden componentes esenciales como azúcares, dextrinas, almidones, celulosas, hemicelulosas, pectinas y ciertas gomas. Desde una perspectiva química, estos compuestos están compuestos exclusivamente por carbono, hidrógeno y oxígeno. Un ejemplo claro sería la glucosa y otros azúcares simples que tienen una estructura anular y constan de 6 átomos de carbono, 12 átomos de hidrógeno y 6 átomos de oxígeno.

La variación clave se encuentra en cómo el oxígeno y el hidrógeno se sitúan alrededor de la estructura anular, lo que resulta en cambios en la solubilidad, el sabor dulce y otras características de los azúcares. A pesar de que los carbohidratos pueden ser sintetizados en laboratorios, el costo asociado es alto, por lo que la preferencia recae en la obtención a través de recursos naturales. Los polisacáridos se conceptualizan como polímeros de condensación, donde los monosacáridos o sus derivados se enlazan mediante uniones glicosídicas con la consiguiente eliminación de agua. La hidrólisis completa de los polisacáridos produce exclusivamente monosacáridos o sus derivados. Estos compuestos, presentes mayormente en la naturaleza, exhiben un elevado peso molecular, a menudo conteniendo cientos a miles de unidades de monosacáridos [9].

El concepto de "polisacárido" se aplica a compuestos que incluyen 10 o más unidades de monosacáridos. Si las cadenas formadas por este polímero tienen muchos grupos funcionales iónicos, se les llama "polielectrolitos". En su forma natural, tienden a agruparse en tejidos junto con otros elementos, existiendo en forma de mezclas. En ciertos casos, la pureza alcanza niveles significativos; por ejemplo, en la fibra de algodón, la celulosa constituye el 98% de la materia seca. Algunas gomas vegetales consisten casi exclusivamente de carbohidratos. La combinación de polisacáridos con otros polisacáridos y productos biológicos complica la separación y purificación de un polisacárido particular, pues se encuentran unidos por enlaces secundarios fuertes.

Desinfectantes naturales.

De acuerdo a Jahn S. A, Dirar H., (1979):

“Se denomina en este trabajo desinfectante natural a la sustancia compuesta por la combinación sinérgica de principios activos extraídos de productos vegetales, así como metabolitos ácidos de microorganismos benéficos. Los principios activos de la composición incluyen ácidos orgánicos naturales, alcaloides asociados a agentes estabilizantes y tensioactivos, reguladores de pH para lograr una mayor penetración y efecto residual” [14].

Mecanismo de acción

Los agentes desinfectantes de origen natural actúan en las membranas celulares, enzimas y ácidos nucleicos de los microorganismos. Además, reaccionan con los grupos carboxilo, sulfhidrilo y amino presentes en las proteínas y ácidos nucleicos, provocando su desnaturalización. Por otro lado, el efecto de un tensioactivo como la saponina se centra en la masa orgánica y la membrana celular microbiana, facilitando la penetración de otros componentes microbicidas. Esto altera la arquitectura celular y conduce a la muerte del microorganismo patógeno [14].

➤ Arcilla Bentonita

Las bentonitas, clasificadas como suelos arcillosos montmorilloníticos con alta plasticidad y expansión, son materiales sólidos compuestos por láminas moleculares. Estas láminas consisten en arreglos tetraédricos de sílice y octaédricos de alúmina que se unen covalentemente en una relación Si:Al (2:1), resultando en una superficie polianiónica. La estructura cristalina de estos sólidos está determinada por la ocupación del espacio interlamilar por sus contraiones y ligantes.

Es una formación de arcilla natural en la superficie de la tierra que consiste principalmente en mont-morillonita, perteneciente dentro del grupo de minerales

de arcilla de esmectita 2: 1. La unidad estructural fundamental está formada por dos láminas coordinadas tetraédricamente de iones de silicio Si^{4+} que abarcan una lámina coordinada octaédrica intercalada de iones de aluminio Al^{3+} . La carga negativa dentro de la superficie de arcilla de bentonita resulta de la sustitución isomorfa del catión trivalente Al^{3+} por Si^{4+} en la capa tetraédrica y el catión divalente Mg^{2+} por Al^{3+} en la capa octaédrica.

La arcilla de bentonita se puede utilizar como un adsorbente exitoso para muchas sustancias tóxicas y cationes para suelo, agua y aire, pero muestra una menor afinidad hacia los grupos negativos (fosfatos) debido a la ausencia de sitios de adsorción reactivos para los aniones en el agua. En comparación con otros tipos de arcilla, tiene excelentes propiedades de sorción y tiene sitios de sorción accesibles dentro de su espacio entre capas, así como en su superficie exterior y sus bordes [9].

La bentonita se clasifica comúnmente según su ión intercambiable, ya sea por su contenido de sodio (Na) o por su contenido de calcio (Ca). Esta arcilla es apreciada por sus propiedades de adsorción, derivadas de su amplia área superficial, capacidad de expansión y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Muchas de estas propiedades están vinculadas a la sustitución isomórfica en la estructura cristalina [15].

➤ **Origen y Obtención**

Los primeros yacimientos de bentonita se encontraron en Fort Benton, Wyoming, Estados Unidos, hace más de cien años, de ahí su denominación. La bentonita se origina a partir de cenizas volcánicas y se forma a través de procesos de erosión adicionales. La mayoría de los depósitos significativos desde el punto de vista económico se han creado mediante la hidrólisis de rocas volcánicas.



Fig. 9 Arcilla bentonita [15].

Hoy en día, la extracción de este material se realiza al aire libre, empleando métodos mecánicos convencionales. El procesamiento industrial del producto extraído de la cantera está determinado por la naturaleza del material y su destino final. Esto suele ser tan simple como la reducción a la molienda, eliminando la humedad y por último la molienda al tamaño de partícula requerido.

La bentonita altamente expansiva generalmente presenta alrededor del 30% de contenido de humedad al llegar a la instalación de procesamiento, mientras que en otras bentonitas este porcentaje puede rondar el 25%. Luego del proceso de tratamiento, el contenido de humedad de la bentonita varía entre el 7% y el 8%. La temperatura utilizada en el secado está condicionada al uso futuro de la bentonita. La temperatura elevada es utilizada al prepararse la materia prima obteniendo partículas absorbentes [15].

➤ **Aplicaciones Industriales**

La bentonita se utiliza en diversas aplicaciones industriales. En la industria del petróleo, se usa en la elaboración de lodos de perforación. También se emplea en

la creación de moldes para la fundición, como agente de unión en la producción de pellets de hierro y en la clarificación de vinos y jugos. Además, se usa como material de sellado para desechos tóxicos, peligrosos y radiactivos. La bentonita tiene aplicaciones en la preparación de alimentos para animales, como catalizador en procesos químicos y como ingrediente inerte en la industria farmacéutica.

La bentonita ha sido empleada en la industria de detergentes como un agente emulsionante. En agricultura, se utiliza para mejorar las propiedades de suelos arenosos o ácidos. Asimismo, se usa en la producción de membranas de ósmosis inversa para desalinizar el agua. En la industria naturalista contemporánea, se utiliza como un producto para la limpieza del colon y la desinfección intestinal [13].



Fig. 10 Características y uso de la arcilla activada [13].

➤ **Composición química**

La composición química de la bentonita varía significativamente según su lugar de origen y formación. No obstante, diversos estudios han establecido un rango de porcentajes para los elementos constituyentes, expresados mayormente en forma de óxidos. En promedio los constituyentes de la bentonita son:

TABLA 1 : CONSTITUYENTES DE LAS BENTONITAS

CONSTITUYENT	PROMEDIO, %
E	
SiO ₂	47,9 – 51,2
Al ₂ O ₃	20,0 – 27,1
Fe ₂ O ₃	0,2 – 1,4
MgO	2,1 – 6,6
CaO	1,0 – 3,7
K ₂ O	0,2 – 0,6
Na ₂ O	0,3 – 0,8
H ₂ O	17,1 – 23,7

Fuente: Largo Castro & Villamarín Coral (2013)

➤ **Propiedades fisicoquímicas**

✓ **Área superficial**

La bentonita presenta una elevada área superficial específica, la cual se define como la suma del área superficial externa e interna de las partículas constituyentes por unidad de masa, expresada en m²/g. Esta característica se atribuye a la morfología laminar y al reducido tamaño de los cristales de la bentonita.

En condiciones de sequedad, las bentonitas sódicas exhiben una superficie específica que oscila entre 25 y 50 m²/g. Sin embargo, en suspensión acuosa, este valor se incrementa a 300 m²/g. En el caso de las bentonitas cálcicas, la superficie específica varía de 200 a 250 m²/g en estado seco [15].

✓ **Capacidad de hinchamiento**

La carga negativa de las láminas de bentonita es relativamente baja, lo que resulta en una proporción limitada de cationes interlaminares. La unión de las láminas con los cationes interlaminares es débil debido a esta baja carga. Este fenómeno facilita la penetración del agua en el espacio interlaminar, ocasionando un aumento en el espacio basal, lo que a su vez provoca el hinchamiento de la bentonita y la formación de suspensiones coloidales.

La hidratación de la montmorillonita ocurre de manera gradual. El agua penetra lentamente entre las láminas de silicio-oxígeno, que actúan como canales facilitando el acceso del agua. Cuando hay suficiente agua, los iones agrupados

en el área se hidratan, generando cargas positivas. Simultáneamente, las láminas de silicio-oxígeno desarrollan cargas negativas, lo que provoca la repulsión entre ellas, resultando en su separación y el característico hinchamiento de las bentonitas.

Es importante considerar que la capacidad de expansión está vinculada al tipo de bentonita. La disparidad en la expansión entre la bentonita sódica y la cálcica se atribuye a la intensidad de la atracción entre los cationes presentes en las capas. La mayor fuerza de atracción del catión calcio resulta en una disminución del volumen absorbido, mientras que la fuerza de atracción del catión sodio es menor, lo que posibilita una mayor retención de agua entre las capas [15].

✓ **Capacidad de intercambio de cationes (CIC)**

La CIC es definida como una suma de todos los cationes intercambiables donde la bentonita absorbe un nivel de pH determinado. Similar para medir una carga negativa en la totalidad del mineral.

Bentonita Na EUA	87-88
Bentonita Na Argentina	82-84
Bentonita Policatiónica VL Brasil	73-74
Bentonita Na Brasil	84-86
Bentonita Policatiónica VC Brasil	71-72
Zeolita C-M Cubana	191-194
Zeolita M-C ZN#200P102	185-191

Fig. 11 Valores de intercambio catiónico (CIC) de minerales arcillosos y zeolita [15].

La capacidad de intercambio está principalmente asociada con la capacidad de sustituir los cationes débilmente unidos a la estructura interlamelar de la bentonita por otros cationes presentes en una solución acuosa. En consecuencia, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de una bentonita varía entre 80 y 150 meq/100 g.

La relativa sencillez con la que los cationes pueden ser sustituidos en la región interlamina se explica en líneas generales por la secuencia: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{H}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ \ll \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$. En términos generales, una mayor carga y un menor radio atómico incrementan la preferencia de la bentonita por un determinado catión.

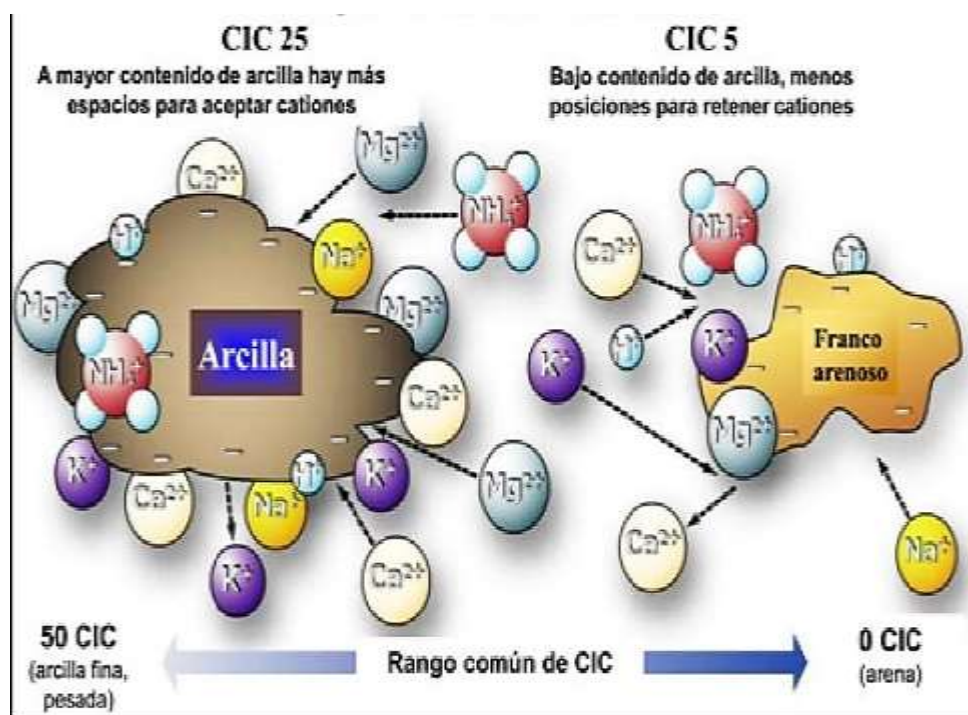


Fig. 12 Vista esquemática del intercambio catiónico [15].

✓ Capacidad de adsorción

Está relacionado a funciones de texto. Si se trata esencialmente de un proceso físico (al retener la acción capilar), denominada adsorción; donde existe una interacción química entre un adsorbente (bentonita) y un líquido llamado adsorbato, se llama adsorción.

La capacidad de adsorción es expresada como porcentaje del adsorbato referente a la masa, y las mismas arcillas, donde es capaz la adsorción dependiendo de una sustancia que se trate. [15].

Adsorbente	Selectividad
Bentonita natural	Cu (II) > Ni (II) > Pb (II) > Cd(II) ^{(a)(b)}
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Mn (II) ^{(a)(b)}
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Hg (II) ^(b)
Bentonita natural	Pb (II) > Cu (II) > Ni (II) > Cd(II) ^(a)
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Ni (II) > Cu(II) ^{(a)(b)}
Bentonita natural	Pb (II) > Cd (II) > Mn (II) ^(a)
Zeolita natural	Pb (II) > Cu (II) > Mn (II) > Zn(II) ^(a)
	Pb (II) > Cu (II) > Zn (II) > Mn(II) ^(b)

(a) En solución multi-metal y (b) mono-metal.

Fig. 13 Selectividad de iones metálicos [15].

✓ **Plasticidad.**

Las arcillas, en especial la bentonita, exhiben una notable plasticidad. Sin embargo, se reconoce que la bentonita contiene entre 20 y 40 veces más materiales arcillosos en forma coloidal en comparación con las arcillas plásticas convencionales. Esta característica se atribuye a la formación de una capa de agua alrededor de las partículas estratificadas, generando un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de las partículas entre sí cuando se aplica una fuerza.

➤ **Activación de Arcillas**

Los métodos de activación se emplean para mejorar las características fisicoquímicas de las arcillas, como su capacidad de hincharse y de adsorción, para adecuarlas a un uso particular. Los procedimientos más usuales para activar sólidos, especialmente las arcillas, son los térmicos, químicos y mecánicos.

➤ **Activación térmica**

Estos se fundamentan en el incremento de la reactividad del compuesto sólido ocasionado por variaciones de temperatura. Este procedimiento puede ocasionar alteraciones en las fases cristalinas de la estructura o la evaporación de componentes volátiles.

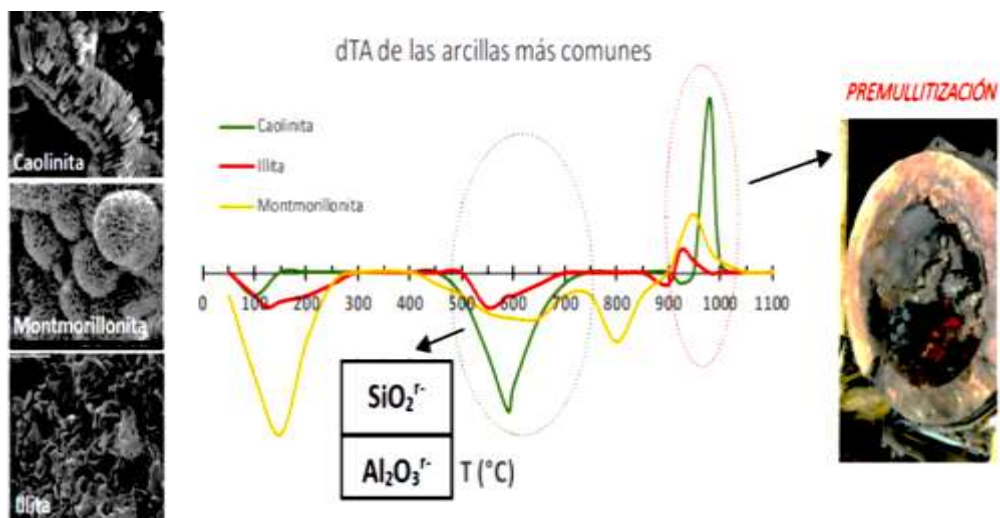


Fig. 14 Comportamiento térmico de las arcillas más comunes [13].

➤ **Activación Química**

A diferencia de los enfoques físicos, los métodos químicos inducen la formación de defectos no estequiométricos en el compuesto sólido, los cuales, a su vez, generan reactividad en dicho compuesto.

De acuerdo con investigaciones, se observa que la bentonita, al ser tratada con sustancias alcalinas, experimenta una mejora en su capacidad de hinchamiento. Por otro lado, cuando se somete a un tratamiento con ácidos inorgánicos, que propician la disolución de los carbonatos asociados y de elementos como Fe, Al y Mg, se incrementa tanto la superficie específica como la porosidad de la bentonita. En el caso de la bentonita organofílica, que resulta de recubrir las partículas de bentonita sódica con moléculas orgánicas polares que poseen cadenas largas, se vuelve hidrofóbica y adecuada para la intercalación de moléculas orgánicas.

➤ **Activación Mecánica**

Se fundamenta en el empleo de la molienda como un medio mecánico para inducir la activación química del material, abarcando desde alteraciones estructurales hasta descomposiciones químicas en los procesos de activación térmica y química [15].

➤ **Aplicaciones**

Los usos de esta técnica son diversos y extensos. Sus evaluaciones suministran información acerca de características tales como textura, dimensiones y configuración.

Comúnmente son utilizadas en disciplinas como ciencia de materiales, metalurgia, odontología, geología, paleontología y arqueología, control de calidad, botánica, investigación estructural y química de obras de arte, así como en los campos de electrónica y biotecnología química.

En el análisis de materiales, se emplea para llevar a cabo la caracterización microestructural, identificación, análisis de fases cristalinas y transiciones de fases en distintos materiales, evaluación de la composición de superficies y tamaños de grano, así como para la valoración de la degradación de materiales y la identificación del tipo de deterioro, como corrosión o fragilización, entre otros.

La generación de imágenes tridimensionales, la investigación de características morfológicas y topográficas, el análisis de enfermedades del folículo piloso, la exploración de la formación de biofilms y el examen de la interacción entre microorganismos y células eucariotas son ejemplos de las variadas aplicaciones de esta técnica [13].

➤ **Origen, estructura y propiedades básicas de los minerales arcillosos**

Los minerales arcillosos son productos de la meteorización de las rocas o de la acción hipotérmica y, por lo tanto, son minerales comunes en la Tierra. Pertenecen al grupo de minerales filosilicatos y exhiben una amplia variedad dependiendo de varios factores. Los minerales arcillosos están formados básicamente por al menos una hoja tetraédrica (T) y una hoja octaédrica (O), idealmente continuas.

Ambos están compuestos por un catión coordinado con 4 y 6 átomos de oxígeno, en el tetraedro y el octaedro respectivamente. Los cationes tetraédricos son principalmente Si^{4+} , Al^{3+} y Fe^{3+} , mientras que los cationes octaédricos son principalmente Al^{3+} , Fe^{3+} y Mg^{2+} . Estos últimos son importantes en la clasificación de los minerales arcillosos: dependiendo de la valencia de estos cationes, las capas pueden ser di- o trioctaédricas, correspondientes a la ocupación de esos sitios, es decir, en los minerales arcillosos trioctaédricos los lugares octaédricos comprometidos a cationes divalentes, mientras que en los minerales

arcillosos dioctaédricos un sitio de tres está vacío debido a los cationes octaédricos trivalentes [16].

Finalmente, algunas sustituciones (por ejemplo, $\text{Si}^{4+}/\text{Al}^{3+}$, $\text{Al}^{3+}/\text{Mg}^{2+}$) en láminas tetraédricas y/o octaédricas afectan el equilibrio de carga global. Estas sustituciones crean un déficit de carga positiva dentro de la capa que se llena al compensar los cationes inorgánicos naturalmente presentes en el ambiente (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , etc.). El número de sustituciones isomórficas determina la carga de la capa, con cargas que van desde 0 para el grupo del caolín hasta 1 y más para la mica verdadera.

La carga de la capa es un parámetro importante ya que gobierna el potencial de exfoliación de las capas. Por ejemplo, el espacio entre capas de los minerales arcillosos de alta carga es de difícil acceso (incluso para las moléculas de agua), mientras que el de los minerales arcillosos de baja carga es generalmente más fácil de alcanzar debido a la débil cohesión entre las capas. Como resultado, la esmectita son minerales arcillosos que se hinchan, mientras que la ilita y la vermiculita teóricamente no se hinchan [15].

Además, los cationes inorgánicos compensadores tienen diferentes propiedades. (monovalentes, divalentes) y también diversas capacidades de hidratación. Por ejemplo, el potencial de hidratación del Na^+ puede considerarse infinito mientras que el K^+ permite una sola capa de agua. En consecuencia, esta variedad en la potencia en hidratación de cada catión generando potencia en hinchamiento, una propiedad importante para varios minerales arcillosos.

Por lo tanto, los minerales arcillosos se clasifican según (i) la estructura de la capa, (ii) la densidad de carga de sus capas generada por las sustituciones isomórficas, y (iii) su carácter octaédrico. Por ejemplo, la CIC de los minerales arcillosos parece depender en gran medida de la carga de la capa, con un aumento entre la caolinita y la vermiculita dependiendo del aumento de la carga neta de la capa, y una disminución entre la vermiculita y la ilita debido a la mayor carga y a la falta de expansión. comportamiento de este último [16].

La reactividad de los minerales arcillosos influenciada por la existencia de enlaces no saturados, como los grupos $-\text{OH}$ coordinados de forma sencilla, que presentan una carga anfótera. Este tipo de grupo químico es muy significativo en las

caolinitas, que son los únicos grupos arcillosos que presentan grupos –OH en su superficie.

En cambio, muchos grupos –OH en esmectitas u otros arcillosos 2:1 están situados en el borde. Como resultado, mientras la mayor parte de la reactividad de las caolinitas está controlada por estas cargas anfóteras (es decir, carga ~0), la participación de dichas cargas en la reactividad total de arcillosos 2:1 es menos importante, pero sigue siendo significativa.

Los valores de SSA están descorrelacionados con la carga de la capa. El parámetro más importante que controla estos valores parece ser la organización/conformación de las capas. Por ejemplo, los valores elevados de SSA encontrando minerales arcillosos con forma de disco y fibrosos (es decir, paligorskita y sepiolita). Además, se pueden encontrar variaciones significativas en los SSA para el mismo tipo de arcilla: para la esmectita oscilan entre 23 y 87 m².g⁻¹, para la esmectita.

Estas variaciones son generadas por el fuerte impacto del catión de compensación en las mediciones SSA de N₂ BET y la posible heterogeneidad estructural y química de los minerales arcillosos, incluso dentro de un mismo tipo de arcilla. Por lo tanto, sigue siendo difícil estandarizar los valores de SSA para un tipo de arcilla específico.

2.5.1. Propiedades fisicoquímicas y caracterización de arcillosos

Dependiendo de la fuente geográfica de origen, las propiedades fisicoquímicas de arcillosos pueden variar y es el principal factor determinante para su utilización. La expresión "arcilla" se usa generalmente para referirse a aluminosilicatos cuyos tamaños de partículas caen en micras y poseen propiedades de intercambio catiónico. Con variedad en la orientación estructural, se clasifican en diversos grupos.

El grupo filosilicato o silicato laminar es más importantes para aplicaciones industriales y generalmente se denomina "minerales arcillosos". La estructura básica de los minerales arcillosos compuesto por la lámina tetraédrica de sílice polimerizada y la lámina octaédrica de alúmina. El octaedro de alúmina puede polimerizarse en dos dimensiones compartiendo cuatro átomos de oxígeno, donde dos átomos de oxígeno dejan sin compartir, proporcionando una carga negativa

de dos. Esta carga negativa se contrarresta con cationes hidratados, p. Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc., que se encuentran en el espacio interlamelar.

Dichos cationes interlaminares suelen ser intercambiables y su cantidad indica su capacidad al intercambiar un catiónico (CIC) en minerales arcillosos. Debido a sus partículas extremadamente finas, los minerales arcillosos tienden a exhibir las propiedades químicas de un coloide. En general, los minerales arcillosos se identifican de acuerdo con la carga neta de la capa, la disposición en la estructura de una capa y las especies entre capas.

Las arcillas se disponen alternativamente por estructuras laminares tetraédricas y octaédricas, las cuales se clasifican en diferentes tipos de capas. Tales estructuras se distinguen por el número de capas tetraédricas y octaédricas. Las diversidades en tales estructuras en capas se clasifican en diferentes clases, p. esmectitas (montmorillonita, saponita), mica (illita), caolinita, serpentina, pilofilita (talco), vermiculita y sepiolita. Los minerales arcillosos más comunes utilizados en las industrias del agua y las aguas residuales clasificándose en 3 tipos diferentes, es decir, 2:1 y 1:1, y grupos de zeolitas.

Los minerales arcillosos de tipo 2:1 consisten en dos láminas tetraédricas de silicio-oxígeno que intercalan una lámina tetraédrica de aluminio-oxígeno-hidroxilo (Fig. 15a). Hay tres grupos principales de minerales que poseen esta estructura, es decir, illita, vermiculita y esmectita. Cuando se sustituye de forma isomorfa de Al^{3+} por Si^{4+} en la hoja tetraédrica y Mg^{2+} o Fe^{2+} por Al^{3+} en las hojas octaédricas podría resultar en una carga superficial negativa en la arcilla. Estas cargas son permanentes y menos sujetas a los cambios de pH, aunque tales sensibilidades de pH varían con la arcilla huésped.

Esta carga desequilibrada se puede compensar con cationes intercambiables, es decir, Na^+ o Ca^{2+} , que se conservan relativamente sueltos, lo que da lugar a propiedades de intercambio catiónico. Se produce una segunda carga negativa como resultado de la disociación del hidrógeno en varios grupos hidroxilo, incluidos los grupos SiOH y AlOH , cuya propensión a disociarse aumenta con el aumento del pH. Otra fuente de carga negativa de las arcillas puede ser debido a sus átomos de borde de bajo número de coordinación; estas cargas pueden ser neutralizadas por cationes de compensación.

Esta estructura de capas de arcilla permite la expansión (propiedad de hinchamiento) cuando conecta con agua, lo que proporciona una superficie mineral adicional para la adsorción de cationes. Ejemplos de arcillas comunes 2:1 utilizadas en aplicaciones químicas e industriales son montmorillonita y bentonita. La montmorillonita posee un área de superficie muy grande, por tanto, ha sido objeto de muchos estudios que involucran nanocompuestos de arcilla. La bentonita se separa en diferentes tipos según el catión intercambiable dominante, es decir, bentonitas de Na y bentonitas de Ca. Adquiere propiedades únicas, como una gran relación de área de superficie químicamente activa a volumen, una alta CIC y una superficie interlamelar que posee características de hidratación inusuales.

Estas características les permiten ser modificados por una gama de diferentes tratamientos superficiales como la organoarcilla, el tratamiento ácido-alcalino y el polímero de injerto. Se ha informado ampliamente sobre uso de materiales basados en montmorillonita y bentonita en el TA, o sea, eliminación de Cr(VI), Pb (II), colorantes industriales, coagulación, floculación etc.

En contraste, el mineral arcilloso 1:1 se refiere a arcillas con una estructura que comprende capas alternativas de una hoja de sílice tetraédrica y una hoja de alúmina octaédrica, donde las capas conectadas mediante enlaces de hidrógeno. La caolinita es el arcillosos 1:1 más comúnmente conocidos, que se clasifica como un mineral filosilicatado (silicatos laminares) con la configuración química de $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Las capas se mantienen juntas para formar montones de arcilla con una separación basal de alrededor de $7,1^\circ\text{A}$.

La estructura reticular de la caolinita está casi en perfecto orden y, por lo tanto, hay una sustitución isomorfa relativamente baja, lo que lleva a un hinchamiento limitado de la caolinita en el agua (Fig. 15b). Tal disposición ordenada de la arcilla le da a la caolinita una estructura rígida y química y térmicamente estable con un bajo coeficiente de expansión. Por tanto, mucha de la actividad de sorción tiende a tener lugar en bordes y superficies de la arcilla.

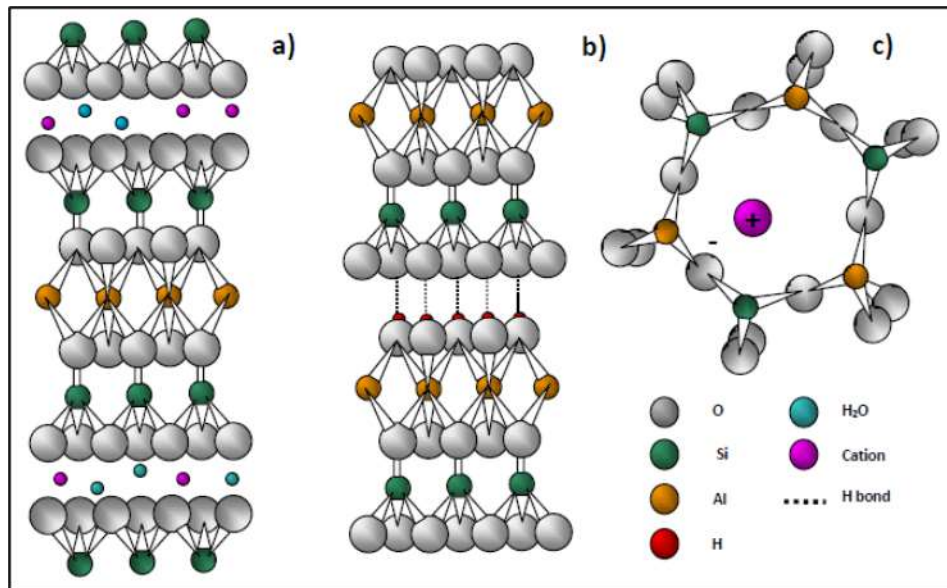


Fig. 15 Diagrama de estructuras moleculares de arcillosos: a) Bentonita (Montmorillonita), b) Caolinita y c) Zeolita [17]

➤ **Modificación de arcillosos**

Las propiedades fisicoquímicas de arcillosos cambian según la fuente geográfica de origen, y es el factor principal que determina su utilización final. Estas propiedades se pueden alterar mediante varios métodos de modificación para mejorar su capacidad funcional y eficiencia. Dichas alteraciones se han abordado en muchas publicaciones y se resumen a continuación.

➤ **Tratamiento ácido/álcali**

El método químico más común para la modificación se conoce como activación ácida. Esta modificación implica el tratamiento con ácido inorgánico concentrado, es decir, HCl o H₂SO₄. Este proceso produce un aumento en área superficial específica, la porosidad y la acidez superficial. Parámetros importantes para la acidificación, que determinan las propiedades de los productos, incluyen la naturaleza y tipo de arcilla, concentración de ácido, temperatura y tiempo de activación, etc.

Además, se cree que esta activación ácida promueve la actividad catalítica de la arcilla al aumentar el número de sitios de Brønsted y de Lewis potenciales. Komadel y Madejová [5] afirmaron que la acidificación en condiciones ácidas controladas puede inducir la disolución parcial de otros elementos (es decir, Fe y Mg) en la arquitectura arcillosa. Tal ataque ácido ocurre preferentemente en

la lámina octaédrica de alúmina, mientras que la lámina tetraédrica (es decir, SiO_4 y SiO_3OH) permanece prácticamente intacta.

Muchos estudios observaron el aumento de la porosidad en el rango de decenas de nanómetros después del tratamiento con ácido, en el que estos poros podrían formarse como cavidades en las superficies basales o de borde de las partículas de arcilla o el resultado de una disminución en las partículas debido a disolución parcial de partículas más grandes.

Los estudios de adsorción de la montmorillonita activada demostraron una mejora considerable en la capacidad de adsorción hacia los colorantes diazoácidos como el negro de amido y el naranja de metileno después de la acidificación con HCl. El aumento en su capacidad de adsorción se debió a la sustitución del Al^{3+} o Fe^{2+} de la arcilla por H^+ después de la acidificación demostrada por el análisis de área superficial específica (BET) y DRX.

El tratamiento químico bajo condiciones ácidas y alcalinas puede resultar en cambios notables en el comportamiento de los poros de los minerales arcillosos. Se reconoce que la alteración puede ser más frecuente en poros de tamaño nanométrico que en poros más grandes.

➤ **Tratamiento térmico**

La calcinación es otro método de tratamiento bien conocido para la activación de adsorbentes de arcilla. El calentamiento puede provocar la modificación de la estructura, las propiedades fisicoquímicas y la composición de los minerales arcillosos, incluida la resistencia, la cohesión, los límites de consistencia, el contenido de agua, la densidad seca máxima, el ángulo de fricción interna, la dimensión de partículas, la permeabilidad y la gravedad específica, etc.

Además, el tratamiento térmico puede ayudar a la estabilización para mantener importantes propiedades permanentes. Estos cambios concomitantes pueden variar de un grupo a otro, como la dimensión de partícula y el régimen de calentamiento. Elevar la temperatura a la etapa de deshidratación conduce a una pérdida de agua adsorbida que altera la macro y microporosidad de los minerales arcillosos, lo que resulta en el colapso de los espacios entre capas y la reducción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC). La pérdida parcial

del agua adsorbida y de hidratación puede aumentar la hidrofilia y la acidez superficial de los materiales.

A menudo, el tratamiento térmico está precedido por otro tratamiento, es decir, modificaciones químicas, para lograr un mejor rendimiento. Se ha sugerido que el tratamiento térmico se puede realizar de diferentes formas: i) sin mezclas ni pretratamiento; ii) mezclado con varios reactivos antes del calentamiento, iii) después del pretratamiento, es decir, activación con ácido; y iv) después del precalentamiento y pretratamiento, es decir, por activación ácida y posterior recalentamiento.

El nivel de tolerancia térmica puede variar según tipos de arcilla. Se sugiere que la deshidratación a alta temperatura puede causar el colapso irreversible de la composición. Las plaquetas se unen electrostáticamente. Por tanto, la deshidratación de los cationes resulta para reducir la capacidad adsorptiva.

➤ **Modificaciones de surfactante**

En general, estas arcillas naturales poseen características superficiales hidrofílicas y cargadas eléctricamente por la sustitución isomorfa en su red cristalina, y por tanto adsorbentes muy eficientes de iones y moléculas polares. La adopción de arcilla para erradicar contaminantes orgánicos no iónicos, por el contrario, es probablemente limitada. La modificación de la superficie utilizando polímeros funcionales es uno de los métodos más efectivos para alterar las propiedades de la superficie. Esta modificación de la superficie se lleva a cabo generalmente mediante dos enfoques principales: adsorción física o injerto químico de polímeros.

La superficie puede cambiar mediante la adsorción física de polímeros funcionales específicos, lo que mejora las propiedades sin alterar su estructura. Esta unión física generalmente está controlada por criterios termodinámicos, por tanto, resultan fuerzas débiles entre los polímeros adsorbidos y arcillosos, o sea, fuerzas de Van der Waals. Sin embargo, el injerto químico de polímeros funcionales puede generar capacidad de controlar y alterar las propiedades.

El método de injerto permite que la cadena de polímero se una estrechamente a las superficies de la arcilla mediante enlaces covalentes a través de la condensación de polímeros funcionalizados con grupos reactivos de las

arcillas. El procedimiento de injerto se puede llevar a cabo a través de diferentes vías. Por ejemplo, en el caso de minerales arcillosos 2:1, los compuestos invitados pueden intercalarse en estado vapor, líquido y sólido.

Los agentes de acoplamiento salinos se utilizan comúnmente para preparar microcompuestos a base de arcilla, sílice y fibra de vidrio, etc. Una vez que el mineral arcilloso se injerta con organosilano, su superficie hidrofílica se vuelve organofílica y se puede dispersar fácilmente en compuestos de baja polaridad, incluidos los polímeros. Shen et al estudiaron el mecanismo de injerto de solución salina en montmorillonita para la remediación ambiental. Descubrieron que la reacción de injerto del vapor de silano favorecía la intercalación del silano en la arcilla en comparación con la fase acuosa. Recientemente, se introdujeron un nuevo método de injerto, en el que se injertaban cadenas de polímeros en la superficie de las capas de silicato de arcilla mediante irradiación de rayos gamma de alta dosis. Este método se sugirió a más simple en comparación con los convencionales.

Las superficies modificadas con un tensioactivo de iones orgánicos se conocen como organoarcilla. Esta modificación del surfactante permite la transformación de superficies organofílicas en superficies organofóbicas y, por lo tanto, se puede mejorar la interacción de adsorción hacia compuestos orgánicos. La organoarcilla consta de capas orgánicas e inorgánicas alternas. La capa orgánica, o la capa hidrófoba, actuará como una fase orgánica para las sustancias orgánicas disueltas reaccionables. La modificación de superficies puede ir precedida de la inserción de cationes de alquilamonio o de un tensioactivo catiónico cuaternizado en el interlamelar para crear una zona de sorción para los contaminantes hidrofóbicos.

La naturaleza de esta zona se puede alterar utilizando varios tensioactivos, p. reemplazo de cationes intercambiables con cationes orgánicos que tienen grupos alquilo de cadena larga, varias cargas positivas, aspectos estructurales (número de ramificaciones alquílicas, presencia de fracciones aromáticas) e índice de polaridad de los grupos alquilo. A través de la unión hidrofóbica, los complejos de arcilla orgánica son eficientes en la adsorción de una variedad de moléculas orgánicas del agua. La aplicación de organoarcillas en la adsorción de compuestos orgánicos fue reconocida por primera vez por McBride et al.

Investigaron la adsorción de compuestos 2,4-D en Bentonite 24, un ion de montmorillonita intercambiado con iones de dimetilbencil octadecil amonio.

Desde entonces, las organoarcillas modificadas aplicaron una extensa variedad de casos prácticos para controlar la contaminación orgánica, como purificación del agua, al tratar las aguas residuales industriales y la remediación de aguas subterráneas contaminadas. Se sugiere que la organoarcilla puede superar al carbón activado convencional en algunas circunstancias, ya que el carbón activado es incapaz de eliminar moléculas grandes como el ácido húmico y el aceite y las grasas emulsionadas.

Numerosos estudios se han centrado en el uso de bentonita como sustrato para la síntesis de organoarcillas. Özcan et al introdujeron un gran tensioactivo catiónico orgánico en la bentonita de sodio para producir una bentonita modificada con bromuro de dodeciltrimetilamonio (bentonita DTMA), que mostró una mejora significativa en la eliminación del tinte ácido, que era aproximadamente 11 veces mayor que la arcilla original. La eficiencia de adsorción de las organoarcillas para eliminar contaminantes orgánicos dentro del agua ha sido evaluada y reportada en muchas publicaciones.

➤ **Aplicación de arcillas en el tratamiento de aguas residuales (TAR)**

Anteriormente se mencionó anteriormente, estos usos en los materiales arcillosos en los TAR pueden variar significativamente conforme sus propiedades funcionales o métodos de modificación para adaptarse a los fines de eliminación. Ahora bien, en el trabajo presentado aquí, se centró exclusivamente en dos enfoques de aplicación, es decir, como adsorbentes alternativos y como materiales catalíticos inducidos para la oxidación.

Minerales arcillosos como adsorbentes de bajo costo

En general, las aplicaciones de materiales nanoporosos se enfatizan principalmente en la retención de compuestos contaminados en los adsorbentes, mientras la degradación química de los componentes podría no ser predominante. Los mecanismos de supresión de contaminantes en agua ocurren ya sea por procesos de adsorción o exclusión por tamiz entre los espacios del material del lecho empacado. Las propiedades nativas de intercambio iónico de los materiales

arcillosos exhiben una capacidad altamente selectiva en supresión de contaminantes particulares.

Las cargas iónicas en superficie también pueden aumentar el potencial de adsorción al atraer sustancias contaminantes con carga opuesta y convertirlas en formas inofensivas o fáciles de eliminar. Tales mecanismos de combinación les permiten manejar una alta carga de contaminantes. La adsorción es superior al lado de otras tecnologías para la reutilización de AR en términos de costo inicial, flexibilidad y simplicidad del diseño del sistema, facilidad de operación y aplicación para muchos compuestos tóxicos y, lo que es más importante, ausencia de formación de sustancias peligrosas. El proceso llama más la atención, especialmente cuando los adsorbentes son económicos y no se requiere un pretratamiento excepcional.

El carbón activado es el adsorbente mayormente usado en las industrias de TAR por su alta eficacia en la supresión de polución inorgánica y orgánica. El carbón activado granular, por ejemplo, es particularmente eficaz en la eliminación de moléculas orgánicas grandes de medios acuosos. Sin embargo, existen algunas limitaciones asociadas con el uso de carbón activado. Se presenta alguna evidencia de que el carbón activado sufre de una cinética de adsorción lenta y una capacidad ineficiente.

Muchos autores han sugerido que la adsorción no selectiva de carbón activado hace que sea menos eficaz para eliminar compuestos orgánicos en corrientes acuosas contaminadas. Hopman et al afirmaron que la interferencia debida a la incidencia de materia orgánica natural (MON) puede disminuir drásticamente el potencial de adsorción y la vida útil del carbón activado. Además, en los estudios se observan tasas lentas de sorción y desorción de las sustancias absorbidas.

Otras limitaciones importantes del carbón activado son su alto costo y la regeneración poco práctica con una pérdida masiva de adsorbentes. La creciente demanda de tecnología de tratamiento eficiente y económica originó la búsqueda en adsorbentes alternativos de bajo costo para sustituir carbón activado comercial en la industria del agua. Entre los materiales naturales, los minerales arcillosos (aluminosilicatos) brindan varias ventajas importantes sobre otros adsorbentes alternativos.

Las arcillas son económicas, están disponibles en abundancia, no son tóxicas y tienen propiedades de adsorción prometedoras y potencial para el intercambio iónico de contaminantes cargados. Se han investigado variedades de minerales arcillosos como adsorbentes alternativos de bajo costo para el TAR, como la sepiolita, la caolinita, la montmorillonita, la esmectita, la bentonita y la zeolita. Estos minerales arcillosos son de interés de acuerdo a su variedad de propiedades estructurales y superficiales, alta estabilidad química, alta área superficial específica y alta capacidad de adsorción.

Estas características económicamente prometedoras y técnicamente factibles hacen que las arcillas sean adsorbentes alternativos prometedores en usos de tratamiento de agua. Para investigar la capacidad de adsorción de los adsorbentes de arcilla, es necesario considerar el impacto de varios parámetros importantes, como el pH y la temperatura de la solución, así como sus características de adsorción. La eficiencia adsorptiva se describe a menudo mediante isotermas de equilibrio de adsorción y estudios cinéticos. Se dan ejemplos de isotermas de adsorción comunes.

Isotermas de adsorción

El análisis de la isoterma de adsorción es de fundamental importancia para describir cómo interactúan las moléculas de adsorbato con la superficie del adsorbente. Los estudios de equilibrio determinan la capacidad del adsorbente y describen la isoterma de adsorción mediante constantes cuyos valores expresan las propiedades superficiales y la afinidad de los adsorbentes. La relación entre los datos de equilibrio y las ecuaciones teóricas o prácticas es esencial para la interpretación y predicción del grado de adsorción.

Entre ellos, se tienen los modelos de Langmuir y Freundlich son las isotermas más comunes debido a su simplicidad y capacidad para describir resultados experimentales en amplios rangos de concentración. También tienen en cuenta el efecto de la heterogeneidad de la superficie para iones desorbentes múltiples y únicos durante la adsorción [18].

Cinética y mecanismos de adsorción.

Analizar la cinética de adsorción resulta crucial al ofrecer detalles sobre los caminos de reacción y los mecanismos involucrados en el proceso de adsorción.

La tasa cinética obtenida sirve para determinar la explotación factible del adsorbente. Una tasa de absorción lenta a menudo presenta serias limitaciones para la aplicación práctica de adsorción. La adsorción es un proceso de reacción físico-química. Las moléculas se adhieren a una superficie de adsorbentes con los que entran en contacto, debido a las fuerzas de atracción en la superficie. El uso de la energía superficial para atraer y retener moléculas puede llevarse a cabo mediante interacción física o química.

El mecanismo de adsorción ocurre en tres pasos básicos, que son la difusión de la película, la difusión de los poros y la adhesión de las moléculas de soluto a las superficies adsorbentes. La difusión de la película es la penetración de la molécula de soluto del adsorbato a través de la "película superficial" de la partícula.

La difusión de poros implica la migración de moléculas de soluto a través de los poros a un sitio de adsorción. La adhesión ocurre cuando la molécula de soluto se adhiere a la superficie del poro. Cabe señalar que la velocidad de adsorción de una molécula en particular depende de su movilidad en la fase de solución, la estructura del poro del adsorbente, el tamaño de las partículas y la hidrodinámica del contacto entre la solución y la fase de partículas.

Otros parámetros clave en el rendimiento de adsorción de arcilla.

En general, el tamaño de los poros y de las partículas, la distribución de los poros, el área superficial y la química de la superficie de los poros son los principales factores de los procesos de sorción. Tchobanoglous, Burton, & Stensel (2003) sugirieron que la distribución de tamaño de los adsorbentes es un parámetro importante que afecta la cinética del proceso de intercambio iónico, ya que la tasa de intercambio es proporcional a la inversa del cuadrado del diámetro de la partícula.

La distribución adecuada del tamaño de los poros facilita el proceso de adsorción al proporcionar sitios de adsorción y los canales apropiados para transportar el adsorbato. Otros factores fisicoquímicos también afectan significativamente el rendimiento de adsorción. El pH de la solución ha sido identificado como uno de

los parámetros más importantes que afectan la adsorción de la arcilla. Es probable que el impacto del pH inicial en la capacidad de adsorción dependa de las propiedades superficiales del adsorbente y el adsorbato. La influencia de grupos funcionales ácidos y básicos en los bordes de los adsorbatos depende del pH [18].

Un cambio en el pH provoca una variación en la carga iónica de la superficie tanto del adsorbato como del adsorbente (potencial zeta), lo que da como resultado una interacción electrostática y una capacidad de intercambio iónico de los procesos de sorción. Además de esto, la solubilidad/disociación del adsorbente y el adsorbato en el medio acuoso también varía con los cambios de pH. Como se discutió anteriormente, las diferencias en las sensibilidades de pH entre arcillas se atribuyen a la disparidad en sus estructuras moleculares.

Respecto de la bentonita, la CIC depende principalmente de sustituciones en estructura reticular. Se sabe que cargas negativas son permanentes e independientes del pH. Mientras que las del caolín con baja sustitución isomorfa son causadas por los enlaces rotos alrededor de los bordes, del hidroxilo basal expuesto, y dependen relativamente del pH [18].

Además, el pH de la solución puede afectar significativamente la carga superficial del adsorbente y el grado de ionización y especiación del adsorbato. Dado que los minerales arcillosos están hechos principalmente de Al y Si, estos óxidos pueden hidrolizarse en solución acuosa, donde se crea la carga (positiva o negativa) en sus superficies. Se encontró que esta carga era proporcional al pH de la solución que rodea las partículas de óxido.

La adsorción favorable del colorante rojo Congo aniónico en diferentes caolinitas en regiones ácidas. Sugirieron que, a un pH más bajo, existe una alta atracción electrostática entre las cargas negativas de los tintes aniónicos y las cargas positivas tanto de la caolinita como de sus bordes, lo que aumenta la capacidad de adsorción del tinte. Se observó una interacción contrastante en el caso de la adsorción de colorante catiónico.

Otro parámetro importante que afecta la eficiencia de adsorción de los adsorbentes es la temperatura. La temperatura juega un papel en la alteración de la tasa de adsorción y desorción, ya que manipula la solubilidad de las sustancias, así como la expansión de los poros de los materiales porosos. En general, una temperatura

baja conduce a incrementar capacidades adsorptiva excepto en el caso de líquidos viscosos. Sin embargo, a menudo, la introducción de calor puede acelerar la adsorción.

Por ejemplo, la adsorción de fenol sobre la arcilla reveló una adsorción favorable a alta temperatura, lo que indica el aparente proceso endotérmico. Explicaron que este fenómeno se debe a un efecto de la temperatura relacionado con la presencia de puentes de hidrógeno en los compuestos fenólicos. El fenol es significativamente soluble en solución acuosa debido a la existencia de extensos enlaces de hidrógeno entre la molécula de fenol y el agua. A alta temperatura, estos enlaces de hidrógeno se rompen y hacen que el fenol sea menos soluble y muestre una mayor tendencia a adsorberse en la superficie de la arcilla en lugar de permanecer en la solución.

Situación Problemática

El crecimiento demográfico acelerado, la contaminación de fuentes naturales de agua superficial y subterránea originada por diversas actividades poblacionales (rurales y urbanas), la influencia de actividades industriales, pasivos ambientales y prácticas ilegales, así como la desigual distribución geográfica del recurso hídrico y extensos períodos de sequía, han impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras, como alternativas para el suministro de agua. En este contexto, las aguas residuales emergen como una fuente adicional alternativa para satisfacer principalmente las necesidades de agua en la agricultura.

Por motivos de salud pública y consideraciones ambientales, económicas y sociales, no es viable desechar directamente a fuentes naturales ni reutilizar sin un tratamiento previo las aguas residuales provenientes de usos poblacionales o procesos industriales. La responsabilidad recae en quienes las generan, quienes deben asumir los costos asociados con su tratamiento. Sin embargo, la mayoría de las aguas residuales producidas en el país no son sometidas a tratamiento y se liberan directamente en cursos de agua continentales o en el mar. En casos de escasez de agua superficial, se utilizan sin tratamiento para fines agrícolas.

Solamente una pequeña proporción es sometida a algún tipo de tratamiento antes de ser liberada. Resulta claro que las prácticas de gestión de aguas residuales son insuficientes, sin una planificación y supervisión adecuadas, dando lugar a la infiltración de volúmenes significativos. Esto conlleva el riesgo de contaminar los acuíferos utilizados para el suministro de agua potable en zonas urbanas, estableciéndose como una fuente dispersa de contaminación constante.

El tratamiento planificado y controlado de grandes cantidades de agua residual emerge como una fuente alternativa para satisfacer las necesidades de suministro de agua en diversos ámbitos, incluyendo poblacional, industrial, agrícola y recreativo. El agua tratada proveniente de aguas residuales es un recurso valioso capaz de sustituir una cantidad significativa de agua de alta calidad necesaria para actividades que no demandan la pureza del agua potable. Este tratamiento tiene un impacto crucial en la reducción de riesgos para la salud pública, en la protección de la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación, en la preservación de la calidad original del agua en fuentes naturales tanto superficiales como subterráneas, y en una mejor gestión gracias a su disponibilidad continua.

MARCO CONCEPTUAL

Agua residual:

Son líquidos acuosos, residuos derivados de actividades urbanas, industriales, ganaderas o agrícolas, se caracterizan por haber sufrido cambios en su calidad, debido a la incorporación de sustancias disueltas, en suspensión o agentes biológicos durante su proceso.



Fig. 16 Aguas Residuales [5].

Agua residual doméstica:

Se trata de aguas residuales originadas en áreas residenciales y de servicios, principalmente derivadas de excretas humanas y actividades domésticas.

Agua residual industrial:

Cualquier agua residual producida en instalaciones destinadas a llevar a cabo actividades industriales o comerciales, excluyendo las aguas residuales domésticas y las aguas de escorrentía pluvial.



Fig. 17 Plantas de Tratamiento de aguas residuales industriales [11]

Agua residual urbana:

Hace referencia a las aguas residuales provenientes de hogares o a la mezcla de éstas con aguas residuales industriales y/o aguas de lluvia que corren por la superficie.

Conductividad hidráulica no saturada:

La capacidad del suelo para conducir agua varía significativamente según la cantidad de humedad presente. Cuando el suelo no está completamente lleno de agua, la existencia de burbujas de aire modifica la disposición de los canales por donde fluye el agua, alterando así su capacidad de conducción. En condiciones no

saturadas, la tasa de infiltración es más alta debido al flujo a través de grietas y fracturas más grandes, las cuales tienden a cerrarse con la humedad debido al hinchamiento de las arcillas. En condiciones de sequedad significativa y según la composición del suelo, la absorción capilar puede ocasionar que, al principio del proceso de flujo, la velocidad de infiltración sea mucho más alta que cuando se llega a un estado constante.

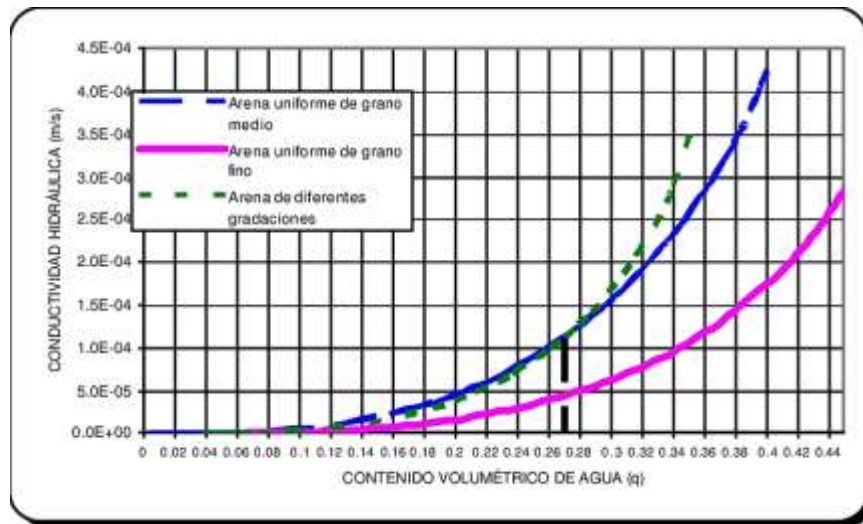


Fig. 18 Conductividad hidráulica vs. Contenido volumétrico de agua [10]

Contaminación:

Resultado de la acción de contaminar.

Contaminante:

Cualquier sustancia o forma de energía que no pertenezca a la composición natural del agua.

Contaminante conservativo:

Su composición química permanece constante en su interacción con el entorno físico o biológico. De este modo, al pasar a través del suelo y el acuífero, conserva todas sus características.

Contaminante no conservativo:

La composición química experimenta cambios al interactuar con los elementos bióticos y abióticos del entorno [13].



Fig. 19 Contaminantes Conservativos y No Conservativos [19]

Formulación del problema

¿Cómo influye la arcilla activada para mejorar ambientalmente el proceso de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Ica?

Objetivos

Objetivo General

Determinar la influencia de la arcilla activada para mejorar ambientalmente el proceso de purificación del agua residual en la ciudad de Ica.

Objetivos Específicos

- Determinar los efectos del uso de la arcilla activada en el proceso de purificación del agua residual en la ciudad de Ica.
- Determinar la disminución de la concentración de los sólidos suspendidos que contienen el agua residual de la ciudad de Ica, después del proceso de purificación.
- Determinar la reducción de la carga microbiana aplicando la arcilla activada en la purificación del agua residual de la ciudad de Ica.

Hipótesis y variables

Hipótesis

La arcilla activada influye positivamente para mejorar ambientalmente el proceso de purificación del agua residual en la ciudad de Ica.

a) Variable independiente

Concentración de la arcilla activada.

b) Variable dependiente

Mejoramiento ambiental del Proceso de purificación del agua residual en la ciudad de Ica.

II. ESTRATEGIA METODOLOGICA

Fue experimental y se ha realizado teniendo el propósito de brindar el tratamiento a las aguas residuales, tomando muestras en la ciudad de Ica, en las ubicaciones señaladas. Las muestras se han analizado en los laboratorios de la facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica, lugar en donde se ha realizado los análisis correspondientes

2.1.Experimentación

Antes de la descripción experimental se exponen conceptos importantes que serán de utilidad en la solución del problema y discusión de resultados.

2.1.1. Toma de muestras

Los lugares donde se acopiaron las muestras son:

- Urb. Santo Domingo de Guzmán.
- Calle Castrovirreyna.
- Urb. San Francisco.
- Urb. Los Viñedos de Santa María.
- Urb. San Joaquín IV Etapa.

Muestras colectadas y luego reunidas en recipiente único para disponer de muestra única y homogénea. (NOTA: Muestras colectadas con asistencia de la Empresa Municipal de Agua y Alcantarillado de Ica-EMAPICA).

2.1.2. Preparativo de muestras para el análisis

Una vez dentro del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional “San Luís Gonzaga” Ica, las muestras pusieron en el refrigerador, para mantenerlas a temperatura no mayor de 5°C. Como las muestras fueron captadas en frascos de un litro, en cada test se fueron retirando las botellas de una en una a fin de no alterar la sustancia del resto de muestras.

2.1.3. Análisis del agua residual

a) Sólidos totales

Se calienta una cápsula vacía en la mufla a 550 °C por 1 hora, se enfría y pesa. Se transfiere 100 mL de muestra en la cápsula pesada (vinculada con los sólidos dentro de la muestra, se elige el volumen muestral para proporcionar el residuo de 2,5 a 200 mg), se evapora dentro de la placa caliente, posteriormente llevan el receptáculo con la muestra evaporada a la estufa a 103-105°C por 1 hora, se

enfria la capsula en desecador luego se procede a pesar, se realiza la operacion repetidamente hasta resultado invariable [19].

Cálculos:

Sólidos totales mg/L = [(A-B) x 1000] / mL de muestra

A: Miligramos del receptáculo vacío.

B: Miligramos del receptáculo más residuo.

2.1.4. Sólidos totales, fijos y volátiles a 550°C.

El receptáculo está compuesto de restos de sólidos (totales) se calcina dentro del horno (550°C ± 5°C), obteniendo un peso constante, (con 15 a 20 minutos basta), se enfria en el desecador y se pesa.

Cálculos

La merma en peso durante la calcinación representa la volatilidad de sólidos, el residuo remanente en receptáculo, a sólidos fijos.

Sólidos volátiles totales (mg/L) = [(B - C) x 1000] / mL de muestra

Sólidos fijos totales (mg/L) = [(C - A) x 1000] / mL de muestra

A: Miligramos del receptáculo vacío.

B: Miligramos del receptáculo más residuo previo a calcinación.

C: Miligramos del receptáculo más residuo tras calcinación [19].

2.1.5. Sólidos suspendidos totales a 103°C-105°C

Método de filtración en disco de fibra de vidrio:

Procedimiento

Coloque el disco con la superficie áspera hacia arriba en el embudo de filtración, conecte la aspiradora y enjuague el disco con 20 mL de agua destilada. Mantenga la succión hasta que se eliminen por completo los restos de agua. Posteriormente, seque el disco en el horno a 103°C durante una hora. En caso de que vaya a medir sólidos volátiles, incinere en la mufla a 550°C±50°C durante 20 minutos, deje enfriar y pese.

Tome 100 mL de la muestra o un volumen que resulte en un residuo de entre 2,5 y 200 mg. Coloque el filtro en el embudo de filtración, conecte el vacío y comience

la succión. Pase la muestra, previamente agitada, a través del filtro de fibra de vidrio. Lave con tres porciones de 10 mL de agua destilada y continúe la succión durante aproximadamente 3 minutos. Después, seque el filtro en la estufa a 103°C-105°C durante una hora, enfríelo en el desecador y pese. Repita el ciclo de secado, enfriamiento y pesaje hasta obtener un peso constante [19].

Cálculos

$SST(mg/L) = [(B - A) \times 1000] / mL \text{ de muestra}$

A: Número de miligramos del filtro.

B: Número de miligramos del filtro con residuo seco.

2.1.6. Sólidos Suspendidos volátiles y fijos a 550°C

Somete el residuo presente en el filtro a una incineración a 550°C. Los residuos sólidos restantes indican lo sólido suspendido fijo y la pérdida de peso durante la incineración refleja el sólido suspendido volátil. Incinerar el residuo presente en el filtro después de la fijación SST a 550°C±50°C por 15 minutos, dejar enfriar en desecador y pesar. Repetir la secuencia de incineración, enfriamiento y pesado, repetida hasta lectura invariable [19].

Cálculos

$SSV (mg/L) = [(B - C) \times 1000] / mL \text{ de muestra}$

$SSF: (mg/L) = [(C - A) \times 1000] / mL \text{ de muestra}$

A: Miligramos (mg) del filtro.

B: Miligramos (mg) del filtro más residuo previo a calcinación.

C: Miligramos (mg) del filtro más residuo tras calcinación mg.

2.1.7. Sólidos sedimentables

Procedimiento

Mezcle la muestra y vierta un litro de la misma en un cono de Imhoff. Permita que se sedimente durante 45 minutos. Luego, agite suavemente el líquido en el cono utilizando un agitador o mediante la rotación del cono, facilitando así la liberación y sedimentación de los sólidos adheridos a las paredes del recipiente. Deje que sedimente durante 15 minutos adicionales. Registre la cantidad de sólidos sedimentables en mililitros por litro (mL/L), realizando la lectura en el cono [19].

Reporte:

Señalados como:

Sólidos sedimentables (mL /L / hora).

2.1.8. Medida del pH

Material y Reactivos

- pHmetro.
- Soluciones patrón de pH 4,00, pH 7,00 y pH 10.

Procedimiento

Si: Conductividad Eléctrica ≤ 100 mS/cm; las muestras no requieren preparación especial.

1. Ajuste del medidor de pH mediante las soluciones tampón de referencia (conforme indicaciones del aparato). NOTA: debe permanecer continuamente dentro de una solución 3M de KCl.
2. La temperatura de la muestra tiene que encontrarse en el rango apropiado para realizar la medición de pH (temperatura ambiente).
3. Se considerará el valor de pH de la muestra cuando la lectura se mantenga constante durante al menos 1 minuto. La precisión de la lectura puede ser de 0,1 unidades o 0,01 unidades.
4. Después de cada medición de pH en muestras distintas, se requiere enjuagar el electrodo con agua destilada y secarlo adecuadamente [20].

Resultados:

pH con una precisión de 0,1 unidades a la temperatura en la que se llevó a cabo la medición.

NOTAS:

Es preferible medir el pH del agua in situ para que el equilibrio iónico no cambie durante el transporte o durante el almacenamiento aproximadamente prolongado a la muestra en contenedores de almacenamiento.

En caso de que el pH de la muestra supere el valor de 8,30, debe ajustar el pHmetro utilizando una solución de pH 7 y solución de pH 9. En condiciones favorables de funcionamiento, la exactitud es de $\pm 0,02$ y la capacidad de respuesta es de 0,05.

Factores confusos

Cuando el pH está por encima de 10, se produce el llamado error fundamental. En este caso, se recomienda utilizar electrodos resistentes a ambientes alcalinos. Cambios en el vidrio pueden causar lecturas erróneas, en cuyo caso se recomienda reemplazar el electrodo.

La sensibilidad de la lectura se verá afectada por el aceite en la muestra. En este caso, los errores de medición pueden eliminarse lavando los electrodos con agua, ácido clorhídrico diluido y agua con jabón o detergente [20].

2.1.9. Análisis microbiano de AR

Determinación de bacterias aerobias mesófilas (Método de conteo en placa)

Normalmente, este análisis realizado mediante inoculación del volumen llamado muestra del entorno sólido. Se incubó la temperatura determinada en un lapso determinado, luego se contó la cantidad de colonias logradas.

Se emplea agar nutritivo o placa de agar como medio (unos 15 ml por placa) [19].

Disolventes:

Se debe utilizar un disolvente que no sea bactericida. Mayormente, se puede utilizar agua del grifo, destilada o salina, o agua proteica al 0,1 % ajustada a pH 7.

Preparación del disolvente:

Preparar tubos de ensayo estériles con 9 ml de disolvente. La muestra se vuelve a agitar para su dilución. Luego abra el matraz, retire la tapa, vierta parte del contenido, vuelva a colocar la tapa y agite 10-15 veces para asegurarse de que las bacterias se distribuyan uniformemente en el líquido.

Luego se toma 1 ml de la muestra utilizando una pipeta esterilizada y transfiriéndose a un tubo de 9 ml de solvente. Por lo tanto, la muestra se diluyó 10 veces. Agite, vuelva a aspirar y expulse el líquido de la pipeta, luego transfiera 1 ml de la dilución a través de otra pipeta esterilizada a un nuevo tubo que contenga la dilución y repita hasta que se considere apropiado. Siembra directamente o diluye según las características del agua. Las muestras de agua superficial tratada o profunda estarán inoculadas y serán diluidas 1/10, el agua residual se usará al diluirse 1/10, 1/100, 1/1000.

Incubación:

Después, las muestras incubaron a 32–35 °C por 24 h. esta siembra profunda está completa.

Número de colonias en la placa:

Seleccione dos placas que corresponde a diluciones de 30 a 300 colonias.

Tome la media aritmética de los 2 números y multiplíquela por dilución (el inverso de la dilución usada). Informe los resultados como la cantidad de microorganismos aerobios mesófilos de mililitro o por gramo, si corresponde.

Ejemplo: diluir 1/100.

Placa 1: 72 colonias x 100 = 7200

Placa 2: 77 colonias x 100 = 7700

Promedio = $(7200 + 7700) / 2 = 7450$

Reportado: 7450 UFC/ml

Determinación del número más probable (NMP)/100 ml de bacterias coliformes totales (método de Wilson)**a) Ensayo presuntivo:****Siembra:**

Realizada tres veces en tubos que dispongan semillero McConkey o Lactosa Bilis Verde Brillante (LBVB), con la Campana de Durham. Se sembrarán:

03 tubos de semillero McConkey o LBVB 2% doble concentración: 10 mL

03 tubos de semillero McConkey o LBVB simple concentración: 1 mL

03 tubos de semillero McConkey o LBVB simple concentración: 0,1 mL

Colocar los tubos en incubación a una temperatura de 32 a 35 °C durante un periodo de 48 horas.

Calcular el NMP con los tubos que muestren resultados positivos (ácido y gas) utilizando la tabla de Hoskins. La producción de gas a las 48 horas se considera una indicación adecuada de la presencia de coliformes [19].

b) Prueba confirmatoria: diferenciación de bacterias coliformes.

Luego de 48 hs, las tuberías con potencial positivo en la prueba se inoculan con un asa, los tubos se concentran brevemente en una incubadora McConkey o LBVB y los tubos se incuban durante 48 horas con caldo triptonizado (para la prueba de indol). El baño de agua de prueba de

Eikman se prepara a $44,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las semillas se colocaron en tubos de manera secuencial que contenían medio de citrato Koser o Simmons y se incubaron a 32°C por 48 h.

La siembra final es realizada por un alambre recto evitando que nutrientes presentes en el cultivo inicial no entren en el tubo de citrato. Los tubos mostraban turbidez dentro de citrato de Koser o decoloración en citrato de Simmons (debido al crecimiento bacteriano I.A.C.) se consideraron positivos.

En caso de duda, esto se aclara añadiendo unas gotas de indicador bromotimol en color azul, que falta en el medio de citrato de Koser, al medio de citrato de Koser. El líquido se mantiene de color verde claro cuando es inexistente el desarrollo y se vuelve azul si las bacterias han usado el citrato. El pH va cambiando en este proceso.

1. Vierta en agar Endo o en presencia de azul de metileno de eosina (EMB) utilizando tubos de siembra McConkey o LBVB seleccionados para confirmar el resultado positivo para coliformes. Incubar las placas invertidas a $32\text{-}35^{\circ}\text{C}$ y examinar a las 24-48 hs. Observe estos materiales para verificar la existencia de coliformes característicos en el medio. La aparición de colonias de color oscuro o colonias con centro negro y periferia incolora y transparente en agar EMB o colonias de tonalidad roja con contornos de un halo rojo en agar Endo confirma la existencia de bacterias coliformes [19].

c) Prueba para la identificación de organismos coliformes mediante la prueba IMVIC (indol, rojo de metilo, voges proscawer, citrato).

Estudios de Escherichia coli

1. Seleccione caldo McConkey verde pálido con gas positivo o bilis con lactosa (Brila) de metal coliforme (NMP/100 ml).
2. Inocular los cultivos positivos seleccionados en los intestinos del caldo en los tubos de ensayo subsiguientes:
 - Mc Conkey o Brila Bouillon. - ansada en caldo de clara de huevo.
3. Incube portaobjetos McConkey o Brill a $44,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y compruebe si hay gasificación positiva después de 24 y 48 horas.

4. Los tubos McConkey o Brill con gas también son positivos para coliformes fecales porque solo los coliformes fecales producen ácido y gas a esta temperatura.
5. Después de 24 horas de incubación, se agregan 0,2-0,3 ml al agregar el reactivo de indol a los tubos de ensayo de agua que contienen proteínas. Agite los tubos y déjelos reposar durante 10 minutos. Las pruebas positivas para la producción de indol mostraron un color rojo oscuro, mientras que las pruebas negativas conservaron el color original del reactivo. Los coliformes fecales pueden considerarse positivos por cultivos que son positivos para gases McConkey o Brill a $44,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y producen indol en agua proteica [14].

2.1.10. Análisis de la bentonita

❖ Sílice (Procedimiento)

- 1) Pesar 1,0 gramos y colocar en un crisol de níquel, luego mezclar con 8-10 gramos de una combinación fundente de Na_2O_2 - NaOH y cubrir con una capa delgada de este mismo fundente.
- 2) Someter a fusión en un horno a una temperatura intensa ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante 5 minutos.
- 3) Verter la masa fundida en un molde de hierro adecuado o en una cápsula de níquel o en una cápsula especialmente diseñada para este propósito.
- 4) Limpiar el crisol de níquel en un recipiente, utilizando agua caliente o solución de HCl (1:1), intercalando con agua caliente y asegurándose de eliminar todas las partículas adheridas al crisol con una varilla de goma.
- 5) Transferir la combinación desde el molde de hierro a la cacerola y asegurarse de que se disuelva por completo, agregando agua si se requiere. Una vez que todo esté completamente disuelto, verter HCl hasta que la solución se vuelva clara.
- 6) Eliminar el líquido hasta obtener un residuo seco. Después de este proceso, dejar reposar en la placa caliente durante aproximadamente 10-15 minutos para propiciar la oxidación del hierro.
- 7) Enfriar la mezcla y mezclar 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) con 30 mL de agua caliente, luego calentar hasta que todas las sales solubles se hayan disuelto por completo.

- 8) Pasar la solución caliente a través de un papel de filtro N° 40, asegurándose de lavar la cacerola adecuadamente. Transferir el filtrado a un vaso de 400 mL y lavar el sólido precipitado dos veces con HCl (1:1) caliente y ocho veces con agua caliente. Guardar el líquido filtrado.
- 9) Poner el papel filtro con el sólido precipitado dentro de un crisol de arcilla y secarlo con la placa caliente.
- 10) Posteriormente, llevar a cabo la calcinación en la mufla eléctrica, calentándolo hasta alcanzar un brillo rojo a una temperatura de 1500°C durante 1 o 2 horas.
- 11) Dejar enfriar y medir el peso del residuo como sílice.
- 12) Realizar una prueba de control utilizando los mismos reactivos.

$$\%SiO_2 = \frac{\text{Peso residuo calcinado} * 100}{\text{Peso de muestra}}$$

Transferir el filtrado previamente reservado a un frasco volumétrico de 200 mL y ajustar el volumen a la marca mediante la adición de agua destilada. Agitar de manera efectiva y extraer la cantidad deseada cien c.c. para Fe, Ca y Mg los otros cien c.c. para ensayo de aluminio.

Para evitar diluciones, se debe tomar otra muestra exclusivamente para Al y seguir el mismo procedimiento, separando el SiO₂ y luego continuando con el Al[21].

❖ Hierro (Procedimiento)

1. En la mezcla obtenida de la dilución (100 mL) o del contenido del vaso si es un proceso directo, agregar 3 gramos de cloruro de amonio y 30 mL de hidróxido de amonio, y después hervir durante 8 minutos.
2. Realizar un filtrado en caliente mediante papel filtro N°4 y recolectar el líquido filtrado en un vaso de 600 mL. Lavar el sólido precipitado con agua caliente en cinco ocasiones (Guardar el líquido filtrado para analizar la presencia de Ca y Mg).
3. Transferir el precipitado de Fe al recipiente original, extendiendo el papel en el borde del vaso, y lavar con un chorro fino y con una solución caliente de HCl (1:1) tres veces, seguido de lavados con agua en tres ocasiones. Disolver completamente el precipitado con HCl, evitando un exceso de agua durante el lavado.

4. Llevar a ebullición y agregar cloruro estañoso goteando hasta que todo el Fe se reduzca (hasta que la solución se aclare), incorporando algunas gotas adicionales en exceso (2).
5. Mezclar con agua fría hasta alcanzar un volumen de 200 mL y enfriar. Después, incorporar 15 mL de solución fosfo-sulfúrica, 10 mL de solución de cloruro mercúrico y agregar 3 gotas de digenilamina como indicador.
6. Realizar la titulación con una solución valorada de bicromato de potasio. Realizar los cálculos correspondientes para Fe₂O₃.

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \% \text{Fe} * 1.4298$$

❖ **Oxido de calcio (Procedimiento)**

- a) Calentar el líquido filtrado que se separó del hierro hasta que hierva y agregar 25 mL de una solución al 5% de oxalato de amonio, hirviendo durante 10 minutos y permitiendo que el sólido precipitado se decante.
- b) Pasar la solución caliente a través de papel filtro N° 5, recolectando el líquido filtrado en un recipiente de 600 mL. Lavar el sólido precipitado en ocho ocasiones con agua caliente. Guardar el líquido filtrado para analizar la presencia de magnesio (asegurándose de lavar bien el precipitado de oxalato de calcio).
- c) Transferir el precipitado a un vaso de 400 mL junto con el papel filtro, agregar 0.2L de agua caliente y 0.02L de ácido sulfúrico diluido (1:1), y calentar a ebullición durante cinco minutos.
- d) Titular la solución caliente con una solución valorada de KMnO₄ (donde 1 mL equivale a 0.005 g de CaO). Descontar el valor obtenido en la prueba de blanco.
- e) Calcular el porcentaje de CaO

$$\% \text{CaO} = \frac{\text{mL de KmnO}_4 \text{ gastados} * 0.005 * 100}{\text{Peso de muestra}}$$

❖ **Magnesio (Procedimiento)**

1. Llevar a ebullición la solución de calcio apartada durante aproximadamente 100 minutos para eliminar el exceso de amonio, y posteriormente dejar enfriar.
2. Agregar 2 gotas de solución alcohólica de fenolftaleína como indicador, seguido de 25 mL de solución de fosfato amónico sódico (al 10%) y 30 mL de solución diluida de hidróxido de amonio (1:9) gradualmente hasta que la solución adquiera un tono rojo. Durante este proceso, agitar con una varilla para acelerar la precipitación. Una vez que ha precipitado, agregar el remanente de la disolución y dejar reposar durante toda la noche.
3. Filtrar a través de papel filtro N°4 y lavar en ocho ocasiones con una solución fría de hidróxido de amonio diluido (1:10), recogiendo el filtrado en un vaso grande (vaso de 600 mL) y descartando el líquido filtrado.
4. Colocar el papel filtro con el precipitado en un crisol de arcilla y secarlo sobre la plancha. Después del secado, calcinar en la mufla hasta alcanzar un rojo brillante, manteniendo la temperatura durante 2-3 horas. Posteriormente, enfriar y medir el residuo como $Mg_2P_2O_7$.
5. Realizar los cálculos para reportar como óxido de magnesio (MgO) mediante la fórmula $Mg_2P_2O_7 \times 0,36207$, o si se prefiere informar como Mg, usar la fórmula $Mg_2P_2O_7 \times 0,21839$ [21].

❖ **Alúmina (Procedimiento)**

- 1) Llevar la solución destinada a la obtención de alúmina a ebullición y exponerla al gas H_2S durante un lapso de 20 minutos. Permitir que el sólido precipitado decante.
- 2) Filtrar a través de papel filtro N°5, recogiendo el filtrado en un vaso de 600 mL y lavar el precipitado en tres ocasiones con agua caliente.
- 3) Hervir el filtrado hasta eliminar por completo el H_2S .
- 4) Añadir 5 mL de HNO_3 y evaporar hasta obtener 60 mL.
- 5) Diluir a 100 mL con agua destilada, agregar hidróxido de amonio, evitando la precipitación de hierro como hidróxido.

- 6) Incorporar 6 mL de HCl, 25 mL de solución de fosfato de sodio (10%), 30 mL de solución de tiosulfato de sodio (al 10%), 20 mL de ácido acético (1:1) y diluir con agua hasta alcanzar 400 mL. Hervir durante 30 minutos.
- 7) Filtrar en papel filtro N°40 y lavar en seis ocasiones con agua caliente. Descartar el líquido filtrado.
- 8) Colocar el papel con el precipitado en un crisol de arcilla, secar sobre la plancha y después de este proceso, calcinar en la mufla eléctrica hasta alcanzar un rojo brillante durante una hora.
- 9) Enfriar y medir el residuo como AlPO₄.
- 10) Excluir la prueba en blanco siguiendo el método y utilizando los mismos reactivos.
- 11) Realizar los cálculos y reportar como Al₂O₃ (AlPO₄ x 0,4178 = Al₂O₃); si se prefiere informar como Al, entonces (AlPO₄ x 0,22195 = Al) [21].

$$\%Al_2O_3 = \frac{\text{Peso } AlPO_4 * 0.4178 * 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

$$\%Al = \frac{\text{Peso } AlPO_4 * 0.22195 * 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

2.1.11. Propiedades fisicoquímicas de la bentonita

- **Resistencia química y mecánica.**

Resistencia mecánica

Se llevaron a cabo las siguientes pruebas para evaluar la resistencia mecánica:

- a) **Dureza:** Se evaluó la dureza de la bentonita mediante la prueba de abrasión en el lavado. Esta prueba se llevó a cabo en un vaso de precipitado con un agitador de eje flexible, operando a 350 rpm durante 20 minutos mientras se colocaba una muestra de 200 g de bentonita con 300 c.c. de agua destilada. Después de la agitación, se permitió que la muestra reposara durante 60 horas, y se calculó el porcentaje de bentonita que se desintegró o pulverizó. Posteriormente, se realizó el filtrado, secado y tamizado para obtener los resultados [21].

b) Friabilidad: La evaluación de la friabilidad se realiza triturando 50 g del material bentónico en un molino de bolas de 34 cm de diámetro, el cual gira a una velocidad de 25 r.p.m. Contiene 18 bolas de acero con un diámetro de 12 mm. Se efectúan dos mediciones, una después de quince minutos de funcionamiento (750 golpes, equivalentes a 375 vueltas) y otra a los 30 minutos (1500 golpes, es decir, 750 vueltas). Posteriormente, se establece la curva granulométrica del material después de cada ensayo, evaluando los cambios en la talla efectiva del mismo [21].

c) Tracción y Trituración: Este procedimiento se emplea para caracterizar mecánicamente el material bentónico. Consiste en poner en contacto 100 g (m) de material con una fracción (-1+ 0.5) mm y 150 c.c. de agua destilada en un equipo vibratorio que realiza 120 vibraciones por minuto durante 24 horas. Posteriormente, se procede al secado y tamizado del producto utilizando tamices de 0.5 y 0.25 mm. Se registran los pesos del rechazo (m1) y del material tamizado (m2) a través del tamiz de 0.25 mm. Los porcentajes de tracción y trituración se determinan de la siguiente manera:

$$\% \text{Tracción} = (m_2/m) \times 100$$

$$\% \text{Trituración} = (m_1/m) \times 100$$

Resistencia química

a) Ensayo de resistencia al ácido: Se analiza la pérdida de peso del material tras estar en contacto con ácido clorhídrico al 38% durante 24 horas. En el desarrollo de la prueba, se toman 20 gramos de bentonita y se colocan en un vaso de precipitados, al cual se le añaden 50 mL de ácido clorhídrico puro para análisis. Tras agitar y permitir un reposo de 24 horas, se procede a filtrar, enjuagar, secar y pesar nuevamente el material. El resultado se expresa como un porcentaje de pérdida de peso.

b) Ensayo de resistencia en diferentes medios: Este análisis se centra en la caracterización química de la bentonita, evaluando la contribución de sílice, la oxidabilidad y el residuo seco. Se lleva a cabo exponiendo 100 gramos del material a dos situaciones diferentes con 500 mL de diferentes soluciones: HCl 0.013 mol/L, NaCl 0.0085 mol/L; NaOH 0.005 mol/L, manteniendo el contacto durante 24 horas en cada caso. Después, se realiza

la filtración, enjuague con agua destilada, secado y pesaje. Finalmente, se calcula el porcentaje de pérdida [21].

- **Caracterización del material granular**

- a) Distribución granulométrica

Se empleó la metodología de tamizado siguiendo los procedimientos de clasificación mediante tamices normalizados, conforme a la normativa DIN 4188.

- b) Cálculo de la densidad de partículas

Se llevó a cabo la determinación picnométrica según el protocolo de prueba establecido por el laboratorio conforme a las directrices de DANA. En este proceso, se realiza la pesada inicial del picnómetro vacío con su tapón (P1). Luego, se introduce la bentonita en el picnómetro y se realiza una nueva pesada (M). El picnómetro se llena parcialmente con agua destilada y se calienta brevemente para eliminar posibles bolsas de aire en la muestra. Después de enfriar, se llena completamente con agua destilada y se realiza una pesada (S), asegurándose de que el agua alcance la parte superior del capilar sin exceso. La última pesada (W) se efectúa después de vaciar y volver a llenar el picnómetro solo con agua destilada. La densidad se calcula mediante la fórmula correspondiente.

$$G = (M - P) / (W + M - P - S), \text{ g/mL}$$

- c) Calcular la densidad aparente

La densidad aparente se determina midiendo el volumen de bentonita en una probeta graduada de cien mL junto con su masa correspondiente. Se utiliza un volumen de 50 mL en este procedimiento.

- d) Porosidad

La porosidad del conglomerado de bentonita se evaluó a través de la relación, que representa la forma convencional de definirla:

$$\varepsilon = (\rho_p - \rho_a) / \rho_p$$

Dónde:

ρ_p : densidad de partícula. (g/mL)

ρ_a : densidad aparente(g/mL)

ε : porosidad.

e) Capacidad adsorbente de bentonita con agua potable

- Verter 600 g de agua cruda en tres vasos de precipitados y etiquetarlos como A, B y C.
- Adicionar 20, 30 y 40 g de zeolita activada a los vasos de precipitados respectivamente.
- Agitar la zeolita y el agua en cada prueba durante 15 minutos a 40 RPM.
- Después de la mezcla, dejar reposar durante 20 minutos y separar la fase líquida utilizando una malla de 80 mesh.
- Registrar el peso neto del agua obtenido restando el peso inicial del material adsorbente y pesar la muestra. Repetir este procedimiento en tres ocasiones.

f) Capacidad adsorbente de bentonita con agua residual

- En tres vasos de precipitados, pesar 500 g de agua residual de la cual se han eliminado previamente las partículas en suspensión.
- Registrar el pH inicial.
- Realizar el ajuste de pH en los vasos de precipitados añadiendo 10 g de solución de hipoclorito de calcio al 1% P/P en todos.
- Adicionar 20, 30 y 40 gramos de bentonita activada respectivamente a los vasos de precipitados que contienen el agua residual.
- Mezclar la zeolita y el agua tratada en todas las muestras durante 15 minutos a 40 RPM.
- Después de la mezcla, dejar reposar durante 20 minutos y separar la fase líquida utilizando una malla de 80 mesh [21].

III. RESULTADOS

Seguidamente, se consignan los resultados de los test que se hicieron para demostrar la hipótesis planteada en el estudio de investigación.

a. Ejecución del análisis del Agua Residual(AR)

TABLA 2: COMPOSICIÓN QUÍMICA H₂O SERVIDAS

PARÁMETRO	UNIDAD	CONCENTRACION	LMP (*)
Sólidos totales		1645	1 000
Sólidos suspendidos		720	500
Sólidos disueltos	mg/L	536	500
Sólidos sedimentables		310	250
pH	-	6,3	6 – 9
Coliformes fecales		>10 000	10 000
Scherichia Coli	NP/100 mL	8500	10 000
Salmonella		5000	10 000

Fuente: Elaboración propia.

(*) D.S.N°003-2010 MINAN.

En la tabla 2 se detalla los resultados del análisis del AR, destacando una alta concentración de ST de 1645 mg/L, junto con SS (720 mg/L), sólidos disueltos (536 mg/L) y sedimentables (310 mg/L). También se evidencia una carga microbiana significativa en el agua residual en cuanto a coliformes fecales, con una cantidad superior a 10000 (NMP/100 mL), Escherichia coli (8500 NMP/100 mL) y salmonella (5000 NMP/100 mL).

b. Resultados del análisis de la bentonita

TABLA 3: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA BENTONITA UTILIZADA

COMPONENTE	% EN PESO
SiO ₂	64,67
Al ₂ O ₃	11,58
Fe ₂ O ₃	2,09
CaO	3,46
MgO	0,80
SiO ₂ / Al ₂ O ₃	5,47

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 presenta la composición química de la bentonita natural utilizada en las pruebas experimentales de depuración de aguas residuales. Se destaca un notable contenido de SiO₂ (64,67%) y óxido de aluminio (11,58%), resultando en una relación SiO₂/Al₂O₃ de 5,47. Esta proporción caracteriza a las bentonitas con un elevado contenido de sílice, conocidas como Clinoptilolita.

TABLA 4: PROPIEDADES FÍSICAS DE LA BENTONITA

PROPIEDAD	MAGNITUD
Dureza, %	2,1
Friabilidad para 15 min, %	11
Friabilidad para 30 min, %	21
Tracción, %	1,8
Trituración, %	3,2
Densidad de partículas	2,1
Densidad Aparente	1,03
Porosidad	0,51

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla 4 muestra los resultados de las propiedades físicas de la bentonita, en que se observa una dureza igual a 2,1%; igualmente se observa una tracción de 1,8% y trituración de 3,2%; su densidad es de 2,1 g/mL y la densidad aparente de 1,03 g/mL, además de una porosidad de 0,51.

TABLA 5: RESISTENCIA DE LA BENTONITA A LOS COMPUESTOS QUÍMICOS

PROPIEDAD	MAGNITUD (%)
Ácido clorhídrico en Solución	1,9
Cloruro de sodio en solución	1,6
Hidróxido de sodio en solución	2,2
Agua	2,9
HCl concentrado	3,8

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla 5 muestra la resistencia de la bentonita al contacto con las sustancias químicas, los valores dados indican la cantidad en porcentaje que se pierde de bentonita al interactuar químicamente con ácido clorhídrico en solución

(1,9%), con el cloruro de sodio en solución (1,6%) y el hidróxido de sodio en solución (2,2%), frente al agua la cantidad de bentonita que se disgrega es de 2,9% y con el ácido clorhídrico concentrado es de 3,8% lo que corresponde al más alto porcentaje.

TABLA 6: RESULTADO DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA BENTONITA CON AGUA POTABLE

CONDICIÓN	A	B	C
Peso del vaso de precipitados, g	304	312	307
Peso del agua, g	500	500	500
Peso del vaso más el agua, g	804	812	807
pH inicial	7,5	7,5	7,4
Peso bentonita, g	20	30	40
Peso agua filtrada, g	465	452	443
Peso agua adsorbida, g	35	48	57
Porcentaje de adsorción, %	7	9,6	11,4
pH final	7,9	8,1	8,3

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 6 muestra la capacidad adsorbente de la bentonita empleando el agua potable, en ella se puede observar que esta capacidad aumenta conforme se aumenta la cantidad de bentonita, así con 20 g hay una adsorción del 7%, con 30 g hay una adsorción de 9,6% y con 40 g de 11,4%; otro dato significativo es el pH del agua torna en alcalino con un pH máximo de 8,3 al agregar 40 g de material bentonítico.

TABLA 7: RESULTADO DE LA CAPACIDAD ADSORBENTE DE LA BENTONITA CON AGUA RESIDUAL

CONDICIÓN	A	B	C
Peso vaso de precipitados, g	304	312	307
Peso del agua, g	500	500	500
Peso vaso más el agua, g	804	812	807
pH inicial	9,4	9,4	9,4
Peso bentonita, g	20	30	40
Peso agua filtrada, g	458	445	437
Peso del agua adsorbida, g	42	55	63
Porcentaje de agua adsorbida, %	8,4	11,0	12,6
pH final	8,3	8,3	8,1

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 7 exhibe la capacidad de adsorción de la bentonita utilizando agua residual. Se evidencia un incremento en dicha capacidad a medida que se aumenta la cantidad de bentonita. Con 20 g, se logra una adsorción del 8,4%, con 30 g se alcanza el 11%, y con 40 g se registra un 12,6%. Un aspecto relevante es la reducción del pH del agua, llegando a un mínimo de pH 8,1 al incorporar el material bentonítico.

TABLA 8: EVALUACIÓN SÓLIDOS TOTALES (ST)

Nº	Bentonita, g	Tiempo de floculación, min	ST, mg/L
01	1	20	1551
02	2	20	931
03	3	20	211
04	4	20	142
05	5	20	113
06	6	20	70
07	7	20	25
08	8	20	6
09	9	20	6
10	10	20	6

Fuente: Elaboración propia.

Nota: ST inicial fueron de 1 645 mg/L.

Volumen muestral ensayado fue de 1000 mL.

La tabla 8 muestra resultados de los análisis hechos con la bentonita, conforme se agrega la bentonita en mayor cuantía, disminuye drásticamente los ST en muestra hasta llegar a 6 mg/L, la cantidad óptima de bentonita requerida para eliminar los ST es de 8 gramos por cada 1000 mL

TABLA 9: EVALUACIÓN DE SS (SÓLIDOS SUNPENDIDOS)

Nº	Bentonita, g	Tiempo, min	SS, mg/L
01	1	20	683
02	2	20	625
03	3	20	565
04	4	20	450
05	5	20	297
06	6	20	82
07	7	20	3
08	8	20	3
09	9	20	3
10	10	20	3

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La cantidad inicial de SS en muestra fue de 720 mg/L y muestra tomada para los ensayos 1000 mL.

La Tabla 9 presenta los resultados de los análisis realizados a los sólidos suspendidos (SS), revelando un descenso gradual desde 683 mg/L hasta 3 mg/L en un lapso de 20 minutos, al añadir 7 g de bentonita por cada 1000 mL de agua tratada.

TABLA 10: EVALUACIÓN SÓLIDOS DISUELTOS (SD)

Nº	Bentonita, g	Tiempo, min	SD, mg/L
01	1	20	514
02	2	20	468
03	3	20	419
04	4	20	329
05	5	20	224
06	6	20	114
07	7	20	46
08	8	20	8
09	9	20	3
10	10	20	3

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El contenido inicial de SD en la muestra fue de 536 mg/L cuyo volumen fue de 1000 mL.

La Tabla 10 exhibe los resultados obtenidos en los análisis para la determinación de sólidos disueltos, evidenciando una disminución gradual desde 536 mg/L hasta 3 mg/L mediante la adición de 9 gramos de bentonita.

TABLA 11: EVALUACIÓN DE LOS SSED (SÓLIDOS SEDIMENTABLES)

Nº	Bentonita, g	Tiempo, min	SSED, mg/L
01	1	20	294
02	2	20	252
03	3	20	212
04	4	20	164
05	5	20	107
06	6	20	27
07	7	20	10

08	8	20	2
09	9	20	2
10	10	20	2

Fuente: Elaboración propia.

Nota: La cantidad inicial de SSED en muestra fue de 310 mg/L y muestra tomada para los ensayos fue de 1000 mL.

La tabla 11 muestra los análisis hechos para determinar SSED, en la cual se observa una disminución progresiva, descendiendo desde 310 mg/L hasta 2 mg/L cuando la cuantía de bentonita agregada es 8 gramos.

TABLA 12: EVALUACIÓN DEL PH ÓPTIMO

Nº	ST, mg/L	pH
01	1551	6,3
02	931	6,5
03	211	6,8
04	142	7,1
05	113	7,5
06	70	7,8
07	25	8,1
08	6	8,5
09	6	8,7
10	6	8,9

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 12 presenta los cambios en la pH en muestra tratada con bentonita, que se fue agregando óxido de calcio para regular el pH aumentándolo hasta un nivel básico (alcalino) de 8,5, donde el efecto coagulante de la bentonita es efectivo.

TABLA 13: ENSAYOS MICROBIOLÓGICOS

Microorganismo	Unidades	Reporte
Coliformes totales		<10
Escherichia coli	NMP/100 mL	<10
Salmonella		<10

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 13, se evidencian los resultados microbiológicos obtenidos para el Agua Tratada mediante análisis de laboratorio con bentonita, en la que se puede ver que la carga microbiana patógena en agua resultante, se ha reducido notablemente a su máxima expresión < 10 .

IV. DISCUSIÓN

Los ensayos ejecutados durante la etapa experimental para establecer en qué medida se optimiza el proceso TAR de las lagunas de oxidación circunscritas en Ica, evidenciaron que este enfoque tiene un impacto beneficioso en las aguas tratadas, ya que no se han utilizado productos químicos para su descontaminación, sino más bien un mineral presente en la región de Ocucaje, distrito en la región sur de la provincia de Ica y que puede ser eficazmente utilizado en eliminar Sólidos Totales(ST), suspendidos(SS) y disueltos(SD) de manera similar para disminuir la carga microbiana presente en las AR.

La bentonita tiene una gran capacidad de adsorción, que favorece la retención de los ST, y SS incidentes en las AR, de igual manera, el mineral permite capturar diversos compuestos químicos y metales pesados presentes en el agua residual; esta capacidad contribuye a la reducción del pH en presencia de detergentes.

Durante la coagulación y floculación la bentonita no solo capta los SS, Solubles, y SD, sino que además contribuye a la captación de microbios patógenos presentes en las AR domésticas, lo que permite disminuir la carga microbiana a su máxima expresión < 10 NMP/100 mL.

La capacidad de la bentonita que retiene sólidos suspendidos, solubles y microorganismos es fortalecida cuando lleva el pH del líquido desde un nivel ácido de 6,3 a un nivel básico de 8,5, ya que la bentonita en estas condiciones tiene una mejor capacidad de captación o adsorción.

V. CONCLUSIONES

1. Se ha determinado que el uso de la arcilla activada ejerce una influencia ambiental positiva en la purificación del agua residual en Ica.
2. Una concentración promedio de SS contenidos en las AR en lagunas de oxidación que funcionan en Ica es de 720 mg/L.
3. Se logró determinar que la carga microbiana se reduce aplicando la arcilla activada en la purificación del agua residual hasta valores de < 10 NMP/100 mL
4. Las ventajas que se logran con bentonitas al tratar las aguas residuales son:
 - ✓ Ambientales, porque no se requiere de químicos para eliminar contaminantes.
 - ✓ Sanitarias, porque elimina junto con los sólidos suspendidos los microbios patógenos. Que hacen posible un tratamiento más eficiente de las AR.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas utilizando filtros en secuencia cargados de bentonita, con el fin de incrementar la velocidad del flujo y poder aplicar de manera más conveniente dicho mineral en el TAR.
2. Llevar a cabo un tratamiento preliminar de las aguas residuales domésticas con el propósito de eliminar los sólidos cuyo tamaño sea superior a 0,5 mm.y la grasa que contiene en exceso, ya que esta perjudicaría el tratamiento con bentonita.
3. Ampliar la investigación para abarcar el análisis de metales pesados y sales que presentan estas AR con el objetivo de determinar los niveles de absorción que pueda experimentar la bentonita empleada.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. E. Espinoza Paz, «Planta de tratamiento de aguas residuales San Juan de Miraflores,» Piura, Perú, 2010.
- [2] Metcalf & Eddy, Inc, Ingeniería de aguas industriales, Madrid: McGraw-Hill, 2003.
- [3] J. A. Romero Rojas, Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010.
- [4] Wikipedia, «Aguas Residuales,» 03 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>.
- [5] L. F. Arce Jáuregui, «Urbanizaciones sostenibles: Descentralización del tratamiento de aguas residuales residenciales,» Lima, 2013.
- [6] D. Parra, Estudio Ecológico del Agua, Bogotá. Colombia: Editorial Ciencia, 2007.
- [7] Á. Orozco Jaramillo, Bioingeniería de aguas residuales. Teoría y Diseño, Medellín: ACODAL, 2014.
- [8] P. A. Quiróz Pedraza, «Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos,» Lima, Perú, 2009.
- [9] M. Mahamud, A. Gutiérrez y H. Sastre, «Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de tratamiento,» *Ingeniería del Agua*, vol. 3, n° 3, pp. 45-54, Setiembre 1996.
- [10] E. Flores y et al., Estudio analítico de las aguas domésticas residuales., Caracas: Acta Cient. Venez., 2004.
- [11] S. González y C. Valdivia, «Tratamiento de las aguas residuales de un vertedero en un sistema de lodos activados,» *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Ambiental*, pp. 1-11, 2001.

- [12] EPA, Method 180.1. Determination of Turbidity by Nephelometry. Rev. 2.0. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes, Cincinnati, OH, EEUU.: US Environmental Protection Agency. , 1993.
- [13] J. E. López Hernández y et al, Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales, México: GIZ México, 2017.
- [14] S. A. Jahn y H. Dirar, «Studies on natural water coagulants in the Sudán, with special reference to Moringa oleifera seeds,» *Water SA*, vol. 2, n° 5, 1979.
- [15] D. P. Largo Castro y K. M. Villamarín Coral, «Caracterización y activación química de arcilla tipo bentonita para su evaluación en la efectividad de remoción de fenoles presentes en aguas residuales,» Pereira, Colombia, 2013.
- [16] F. Bergaya y G. Lagaly, Handbook of Clay Science, 2nd ed., Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [17] V. Vimonses, S. Lei, B. Jin, C. W. K. Chow y C. Saint, «Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials.,» *Chemical Engineering Journal*, n° 148, pp. 354-364, 2009.
- [18] L. R. Radovic, J. A. Schwarz y A. Contescu, Chemistry and Physics of carbon, New York: Marcel Dekker, 1999.
- [19] Hach Company, Manual de Análisis de agua. segunda edición en español., Loveland, Colorado, EE.UU.: Hach Company, 2000.
- [20] D. Harvey, Modern Analytic Chemistry, Bostón. USA.: McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [21] J. Linares, Investigación de bentonitas como materiales de sellado para almacenamiento de residuos radiactivos de alta actividad, Enresa, 1993.
- [22] G. Tchobanoglous, F. Burton y D. Stensel, Wastewater Engineering Treatment and Reuse, 4th ed., New York: McGraw-Hill, 2003.
- [23] J. Álvarez Guevara, «Control de calidad microbiológica del agua para consumo,» Tandil. Argentina., 2016.

VIII. ANEXOS

ANEXO A: TABLA DE HOSKINS

3 tubos de 10 ml.	3 tubos de 1 ml.	3 tubos de 0,1 ml.	Índice del NMP/100 ml.
0	0	1	3
0	1	0	3
1	0	0	4
1	0	1	7
1	1	0	7
1	1	1	11
1	2	0	11
2	0	0	9
2	0	1	14
2	1	0	15
2	1	1	20
2	2	0	21
2	2	1	28
3	0	0	23
3	0	1	39
3	0	2	64
3	1	0	43
3	1	1	75
3	1	2	120
3	2	0	93
3	2	1	150
3	2	2	210
3	3	0	240
3	3	1	460
3	3	2	1100

Fuente: Álvarez Guevara (2016)

ANEXO B: REGISTRO FOTOGRÁFICO



Foto 1. Realizando la prueba de jarras



Foto 2. Acondicionando la bentonita para los ensayos.



Foto 3. Pesaje de muestras.



Foto 4. Filtración del agua residual tratada con bentonita



Foto 5. Titulación de la muestra

ANEXO C: CERTIFICACIÓN DE LABORATORIO

CONSTANCIA

El director de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga, hace constar que la Bachiller: **HUAYANCA FUENTES GHEMINA JESHUA**; ha desarrollado en estos laboratorios la parte experimental de su tesis titulada **INFLUENCIA DE LA ARCILLA ACTIVADA PARA MEJORAR AMBIENTALMENTE EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE ICA**, durante los meses de mayo a julio del año 2019.

Se expide la presente, a solicitud de la interesada para los fines que crea conveniente, a los 9 días del mes de agosto del año 2019.

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA" DE ICA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

Mg. Armando Tolo Montalón
DIRECTOR DE LABORATORIO