



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

Área Académica de Ingeniería y Arquitectura

Licenciatura en Ingeniería Industrial

Título de Tesis:

**“Intercambio catiónico de Cr con concreto celular
dopado con jarosita evaluando la temperatura”**

Presenta

YESSICA VERDE CAMPOS

Director de tesis

Dr. Edmundo Roldán Contreras

Mineral de la Reforma, Hgo., 26 de Junio 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Dirección

Office of the Director

Mineral de la Reforma, Hgo., a 23 de abril de 2026

Número de control: ICBI-D/843/2026

Asunto: Autorización de impresión.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado a la egresada de la Licenciatura en Ingeniería Industrial **Yessica Verde Campos**, quien presenta el trabajo de titulación "**Intercambio catiónico de Cr con concreto celular dopado con jarosita evaluando la temperatura**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. César Alfonso Arroyo Barranco

Secretario: Dr. Juan Hernández Ávila

Vocal: Dr. Edmundo Roldan Contreras

Suplente: Dr. Abner Hesli Rojas Calva

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/MMM

"Amor, Orden y Progreso"



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo
Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo,
México. C.P 42184

Teléfono: 52 (771) 71 720 00 Ext. 40001

direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

uaeh.edu.mx



Escaneado con CamScanner

ÍNDICE

RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MARCO TEÓRICO	15
1.1 Planteamiento del Problema	15
1.1.1 Definición del Problema.....	15
1.1.2 Magnitud del Problema.....	16
1.1.3 Problemática Específica	16
1.2 Justificación	17
1.2.1 Justificación Técnica.....	17
1.2.2 Justificación Ambiental	18
1.2.3 Justificación Económica	19
1.2.4 Justificación Social	20
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo General.....	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 Hipótesis	23
1.4.1 Hipótesis Principal	23
1.4.2 Hipótesis Específicas.....	23
1.5 Antecedentes.....	24
1.5.1 Antecedentes sobre Contaminación por Cromo	24
1.5.2 Antecedentes sobre Materiales Adsorbentes para Cromo	25
1.5.3 Antecedentes sobre Jarosita y sus Aplicaciones	26

1.5.4	Antecedentes sobre Concreto Celular Autoclaveado	27
1.5.5	Estudios sobre Efecto de Temperatura en Procesos de Adsorción...	27
1.5.6	Lagunas de Conocimiento Identificadas	28
1.6	Marco Teórico	29
1.6.1	Intercambio Catiónico	29
1.6.1.1	Mecanismos de Intercambio Catiónico	30
1.6.1.2	Factores que Afectan el Intercambio Catiónico	30
1.6.2	Contaminación por Cromo	31
1.6.2.1	Características del Cromo Hexavalente y Trivalente	31
1.6.2.2	Fuentes de Contaminación por Cromo	32
1.6.2.3	Efectos Ambientales y en la Salud	33
1.6.2.4	Métodos de Remediación de Cromo	33
1.6.3	Concreto Celular Autoclaveado	34
1.6.3.1	Proceso de Manufactura.....	34
1.6.3.2	Propiedades del Concreto Celular Autoclaveado	35
1.6.3.3	Microestructura y Porosidad	36
1.6.3.4	Aplicaciones del Concreto Celular	36
1.6.4	Jarosita como Material Dopante	37
1.6.4.1	Estructura Cristalina y Propiedades.....	37
1.6.4.2	Mecanismos de Intercambio Catiónico en Jarosita.....	38
1.6.4.3	Aplicaciones de la Jarosita en Remediación	39
1.6.5	Influencia de la Temperatura en el Intercambio Catiónico	39
1.6.5.1	Efectos Cinéticos de la Temperatura.....	39
1.6.5.2	Efectos Termodinámicos	40
1.6.5.3	Efectos en la Solubilidad y Especiación del Cromo	40

1.6.5.4 Optimización de Temperatura en Sistemas AAC-Jarosita	41
1.6.6 Materiales Compuestos AAC-Jarosita	41
1.6.6.1 Interacciones Matriz-Dopante	42
1.6.6.2 Propiedades del Material Compuesto	42
1.6.6.3 Aplicaciones Potenciales	43
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	43
2.1 Estrategia Experimental	43
2.1.1 Diseño Experimental	44
2.1.2 Metodología Experimental	44
2.1.3 Diagrama de Flujo Experimental	45
2.2 Materiales y Reactivos	46
2.2.1 Materias Primas Principales	46
2.2.2 Reactivos Adicionales	47
2.3 Equipos e Instrumentación	48
2.3.1 Equipos para Síntesis y Preparación	48
2.3.2 Equipos de Caracterización	49
2.3.3 Equipos Auxiliares	50
2.4 Procedimientos Experimentales	50
2.4.1 Preparación de Materiales	50
2.4.2 Preparación de Soluciones	51
2.4.3 Procedimiento de Intercambio Catiónico	51
2.4.4 Recolección y Almacenamiento de Muestras	52
2.5 Técnicas de Caracterización	53
2.5.1 Difracción de Rayos X (DRX)	53
2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)	55

2.5.3 Espectroscopía de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES).....	55
2.5.4 Control de Calidad y Validación	56
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
3.1 Interpretación de Análisis de ICP - Efecto De Temperatura	57
3.1.1 Análisis Cuantitativo de la Adsorción de Cromo	57
3.1.2 Interpretación Termodinámica de los Resultados ICP	58
3.1.3 Análisis Cinético-Térmico por ICP	59
3.1.4 Validación Analítica ICP	60
3.2 Interacción De Meb - Caracterización Microestructural.....	62
3.2.1 Concreto Celular Base (Muestra #6 - Sin Jarosita).....	62
3.2.2 Concreto con 0.10% Jarosita (Muestra #7).....	64
3.2.3 Concreto con 0.15% Jarosita (Muestra #8).....	66
3.2.4 Concreto con 0.20% Jarosita (Muestra #9).....	68
3.2.5 Concreto con 0.25% Jarosita (Muestra #10).....	70
3.3 Difracción De Rayos X: Intercambio Cationico Del Concreto Celular Autoclaveado Con Adición De Jarosita Industrial Y Cr	72
3.3.1 Procedimiento Experimental	72
3.3.2 Descripción del Difractograma.....	74
3.3.3 Interpretación y Análisis de Resultados	76
3.3.3.1 Análisis de la Muestra A (CCA-0%-Control)	76
3.3.3.2 Análisis de la Muestra B (CCA-0%-Cr)	77
3.3.3.3 Análisis de la Muestra C (CCA-0.10%-Cr)	79
3.3.3.4 Análisis de la Muestra D (CCA-0.15%-Cr)	80
3.3.3.5 Análisis de la Muestra E (CCA-0.20%-Cr)	82

3.3.4 Conclusiones del Análisis por DRX.....	83
3.4 Correlación Icp-Meb Para Adsorción De Cromo	87
3.4.1 Integración de Resultados	87
3.4.2 Correspondencia técnica:	87
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES.....	87
REFERENCIAS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Flujo de Desarrollo Experimental	46
Figura 2. Equipo de Difracción Equinox	54
Figura 3. Resultados de % de Adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado sin adición de jal a diferentes temperaturas	58
Figura 4. Resultados de % de Adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado con adición de jal Minero en diferentes proporciones y a temperatura de 30°C	62
Figura 5. Concreto Celular Autoclaveado (Blanco muestra #6) - Micrografía de tobermorita	64
Figura 6. Concreto Celular Autoclaveado con 0.10% de Jal descompuesto (muestra#7)	65
Figura 7a. Concreto Celular Autoclaveado con 0.15% de Jal descompuesto (muestra #8)	68
Figura 7b. Concreto Celular Autoclaveado con 0.15% de Jal descompuesto (muestra #8)	68
 Figura 8. Concreto Celular Autoclaveado con 0.20% de Jal descompuesto (muestra #9)	 70
Figura 9. Concreto Celular Autoclaveado con 0.25% de Jal Descompuesto (muestra #10)	72
Figura 10. DRX intercambio catiónico del concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial y Cr	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del concreto celular	35
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la Jarosita	38
Tabla 3. Resultados de % de adsorción de Cr en concreto celular	58

RESUMEN

La contaminación por metales pesados, particularmente el cromo (Cr), representa uno de los desafíos ambientales críticos de la actualidad, especialmente en zonas industriales donde las actividades metalúrgicas y de galvanoplastia generan efluentes con altas concentraciones de este contaminante. El presente trabajo de investigación aborda una problemática dual: la necesidad de remediar la contaminación por cromo y el aprovechamiento de residuos industriales como la jarosita en aplicaciones de construcción sostenible.

El objetivo principal de esta investigación consiste en analizar la capacidad de intercambio catiónico del concreto celular autoclaveado dopado with jarosita para la eliminación de cromo (Cr) en soluciones acuosas, evaluando específicamente la influencia de la temperatura en este proceso de intercambio. La metodología experimental desarrollada incluye la preparación de matrices de concreto celular con diferentes concentraciones de jarosita, la exposición a soluciones de cromo bajo condiciones térmicas controladas (30°C, 40°C, 50°C y 60°C), y la caracterización integral mediante técnicas avanzadas como difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de plasma acoplado inductivamente (ICP) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

Los resultados preliminares sugieren que la incorporación de jarosita en el concreto celular mejora significativamente la capacidad de adsorción de cromo, con una eficiencia que se incrementa proporcionalmente con la temperatura de curado. Este fenómeno se atribuye a los mecanismos de intercambio catiónico facilitados por la

estructura cristalina de la jarosita y la mayor movilidad iónica a temperaturas elevadas.

La relevancia de esta investigación radica en su contribución al desarrollo de materiales de construcción funcionalizados capaces de actuar como sistemas de remediación pasiva, ofreciendo una solución técnica y económicamente viable para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo, mientras se aprovechan residuos de la industria minera, promoviendo así los principios de la economía circular en el sector de la construcción.

Palabras clave: Intercambio catiónico, cromo, concreto celular, jarosita, efecto de la temperatura, remediación ambiental.

ABSTRACT

Heavy metal contamination, particularly chromium (Cr), represents one of the most critical environmental challenges today, especially in industrial areas where metallurgical and electroplating activities generate effluents with high concentrations of this contaminant. This research work addresses a dual problem: the need to remediate chromium contamination and the utilization of industrial waste such as jarosite in sustainable construction applications.

The main objective of this research is to analyze the cation exchange capacity of autoclaved cellular concrete doped with jarosite for chromium (Cr) removal in aqueous solutions, specifically evaluating the influence of temperature on this exchange process. The experimental methodology developed includes the preparation of cellular concrete matrices with different jarosite concentrations, exposure to chromium solutions under controlled thermal conditions (30°C, 40°C, 50°C, and 60°C), and comprehensive characterization using advanced techniques such as X-ray diffraction (XRD), inductively coupled plasma spectroscopy (ICP), and scanning electron microscopy (SEM).

Preliminary results suggest that jarosite incorporation in cellular concrete significantly improves chromium adsorption capacity, with efficiency increasing proportionally to curing temperature. This phenomenon is attributed to cation exchange mechanisms facilitated by jarosite's crystalline structure and increased ionic mobility at elevated temperatures.

The relevance of this research lies in its contribution to the development of functionalized construction materials capable of acting as passive remediation systems, offering a technically and economically viable solution for treating chromium-contaminated water while utilizing mining industry waste, thus promoting circular economy principles in the construction sector.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción y la problemática ambiental convergen en la búsqueda de soluciones innovadoras que permitan el desarrollo de materiales multifuncionales capaces de cumplir tanto con requisitos estructurales como con funciones de remediación ambiental. En este contexto, el presente trabajo de investigación se centra en el estudio del intercambio catiónico de cromo (Cr) con concreto celular dopado con jarosita, evaluando específicamente el efecto de la temperatura en este proceso.

La contaminación por metales pesados, particularmente el cromo, se ha intensificado debido al crecimiento industrial descontrolado y la inadecuada gestión de residuos metalúrgicos. El cromo, especialmente en su forma hexavalente (Cr^{6+}), presenta características altamente tóxicas y carcinogénicas, siendo clasificado como uno de los contaminantes prioritarios por organizaciones ambientales internacionales. Su presencia en cuerpos de agua y suelos afecta no solo la salud humana, sino también la integridad de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Paralelamente, la industria minera genera grandes volúmenes de residuos, entre los cuales la jarosita representa un subproducto abundante y de difícil disposición. Este mineral, caracterizado por su estructura cristalina y propiedades de intercambio iónico, presenta un potencial significativo para su reutilización en aplicaciones de construcción, alineándose con los principios de la economía circular y la sostenibilidad industrial.

El concreto celular autoclaveado, reconocido por sus propiedades mecánicas favorables, baja densidad y características de aislamiento térmico, constituye una matriz ideal para la incorporación de aditivos funcionales. La combinación de este material con jarosita como dopante abre nuevas posibilidades para el desarrollo de concretos especializados capaces de realizar funciones de remediación ambiental mientras mantienen su integridad estructural.

La temperatura, como variable crítica en los procesos de intercambio catiónico, influye directamente en la cinética de adsorción, la movilidad iónica y la eficiencia global del proceso de remediación. Su estudio sistemático permite optimizar las condiciones de operación y maximizar la capacidad de remoción de cromo, contribuyendo al diseño de sistemas de tratamiento más eficientes.

Esta investigación se justifica desde múltiples perspectivas: técnica, por la innovación en el desarrollo de materiales multifuncionales; ambiental, por la contribución a la remediación de contaminantes críticos; económica, por la valorización de residuos industriales; y social, por la mejora en la calidad ambiental y la salud pública.

CAPÍTULO I:PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del Problema

En este apartado se desarrolla la justificación de este trabajo de investigación. De igual manera se delimita los objetivos planteados y se resalta la importancia de este trabajo en el aspecto científico y social de igual manera generamos una revisión exhaustiva del estado del arte asociado a la temática bordada con el fin .

1.1.1 Definición del Problema

La contaminación por cromo en el medio ambiente representa una problemática multidimensional que afecta tanto la salud pública como la sostenibilidad de los ecosistemas. Las actividades industriales relacionadas con la galvanoplastia, el curtido de pieles, la producción de pigmentos y la metalurgia extractiva generan efluentes con concentraciones de cromo que exceden significativamente los límites permisibles establecidos por las normativas ambientales nacionales e internacionales.

En México, la industria metalúrgica y minera ha experimentado un crecimiento sostenido, posicionando al país entre los principales productores mundiales de metales preciosos y base. Sin embargo, este desarrollo industrial ha generado pasivos ambientales considerables, incluyendo la acumulación de residuos con alto contenido de metales pesados y la contaminación de cuerpos de agua y suelos.

El cromo, particularmente en su forma hexavalente, presenta características fisicoquímicas que lo hacen altamente móvil en medios acuosos y extremadamente persistente en el ambiente. Su toxicidad se manifiesta a través de múltiples

mecanismos, incluyendo la generación de especies reactivas de oxígeno, la alteración de procesos celulares fundamentales y la inducción de mutaciones genéticas.

1.1.2 Magnitud del Problema

Las estadísticas ambientales revelan que aproximadamente el 65% de los cuerpos de agua superficiales en zonas industriales mexicanas presentan concentraciones de cromo superiores a 0.05 mg/L, límite establecido por la normativa mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021. Esta situación se agrava por la inadecuada infraestructura de tratamiento de aguas residuales industriales y la falta de tecnologías accesibles y eficientes para la remoción de metales pesados.

Desde la perspectiva de la gestión de residuos, la industria minera mexicana genera anualmente aproximadamente 2.3 millones de toneladas de jarosita, un subproducto de los procesos hidrometalúrgicos que tradicionalmente se dispone en jales mineros, ocupando extensas áreas territoriales y representando un riesgo ambiental latente debido a su potencial de lixiviación ácida.

1.1.3 Problemática Específica

La convergencia de estos dos problemas ambientales - la contaminación por cromo y la acumulación de residuos de jarosita - plantea la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas integradas que permitan abordar ambas problemáticas de manera simultánea y eficiente.

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas contaminadas con cromo, como la precipitación química, la reducción electroquímica y la filtración por

membranas, presentan limitaciones significativas en términos de costos operacionales, generación de lodos residuales y eficiencia de remoción, especialmente para concentraciones bajas de contaminantes.

En este contexto, surge la necesidad de investigar alternativas tecnológicas que permitan el desarrollo de materiales multifuncionales capaces de actuar como sistemas de remediación pasiva, minimizando costos operacionales y maximizando la eficiencia de remoción de contaminantes.

1.2 Justificación

El presente trabajo tiene un impacto técnico, científico, ambiental, social y económico, el cual se desarrolla específicamente y a detalle en los siguientes apartados.

1.2.1 Justificación Técnica

El desarrollo de concreto celular dopado con jarosita para la remoción de cromo representa una innovación tecnológica significativa en el campo de los materiales de construcción funcionalizados. La incorporación de jarosita como dopante aprovecha sus propiedades naturales de intercambio catiónico, derivadas de su estructura cristalina específica y su composición química rica en sitios activos para la adsorción de cationes metálicos.

La técnica de dopaje permite modificar las propiedades superficiales y volumétricas del concreto celular sin comprometer significativamente sus características mecánicas fundamentales. Este enfoque técnico es particularmente relevante

porque permite la creación de materiales con funcionalidad dual: estructural y de remediación ambiental.

El estudio sistemático del efecto de la temperatura en el proceso de intercambio catiónico proporciona información fundamental para la optimización de las condiciones de operación y el diseño de sistemas de tratamiento más eficientes. La temperatura influye directamente en la cinética de adsorción, la difusión intraparticular y los equilibrios de intercambio iónico, variables críticas para la maximización de la capacidad de remoción.

1.2.2 Justificación Ambiental

La problemática ambiental asociada con la contaminación por cromo requiere soluciones técnicas que sean ambientalmente sostenibles y que contribuyan a la restauración de la calidad ambiental. El enfoque propuesto en esta investigación contribuye a la sostenibilidad ambiental a través de múltiples mecanismos:

Remediación de Contaminantes: El desarrollo de materiales capaces de remover cromo de soluciones acuosas contribuye directamente a la mejora de la calidad del agua y la reducción de riesgos ambientales asociados con este contaminante.

Valorización de Residuos: La utilización de jarosita como dopante representa una estrategia de valorización de residuos industriales, reduciendo la cantidad de material que debe disponerse en jales mineros y minimizando el impacto ambiental asociado con su acumulación.

Economía Circular: La integración de residuos de una industria (jarosita de la minería) en productos de otra industria (materiales de construcción) promueve los

principios de la economía circular, maximizando el aprovechamiento de recursos y minimizando la generación de residuos.

1.2.3 Justificación Económica

El desarrollo de tecnologías de remediación basadas en materiales de construcción funcionalizados presenta ventajas económicas significativas comparadas con las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas:

Costos Operacionales Reducidos: Los sistemas de remediación pasiva basados en materiales adsorbentes requieren mínimos costos operacionales, eliminando la necesidad de equipos complejos, consumo energético elevado y operación continua especializada.

Valorización Económica de Residuos: La transformación de jarosita de residuo a materia prima agrega valor económico a este subproducto industrial, creando oportunidades de negocio adicionales para la industria minera.

Durabilidad y Vida Útil Extendida: Los materiales de construcción funcionalizados pueden mantener su capacidad de remediación durante períodos prolongados, resultando en costos de ciclo de vida reducidos comparados con tecnologías que requieren reemplazo frecuente de medios filtrantes.

1.2.4 Justificación Social

La investigación contribuye al bienestar social a través de la mejora de la calidad ambiental y la reducción de riesgos para la salud pública asociados con la exposición a cromo. Las comunidades ubicadas en proximidad a zonas industriales se beneficiarían directamente de la implementación de tecnologías efectivas para la remoción de este contaminante.

Adicionalmente, el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector de materiales de construcción puede generar oportunidades de empleo especializado y contribuir al fortalecimiento de la industria nacional en sectores de alta tecnología.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la capacidad de intercambio catiónico del concreto celular autoclavado dopado con jarosita, considerando el efecto de la temperatura sobre la remoción de cromo (Cr) y las propiedades mecánicas, para optimizar su uso como material adsorbente en el tratamiento de aguas contaminadas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Objetivo Específico 1: Caracterización Integral de Materiales Base

Determinar la composición química, estructura cristalina y propiedades físicas del concreto celular autoclaveado mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y análisis granulométrico.

Caracterizar la jarosita utilizada como dopante, incluyendo su composición elemental, estructura cristalina, área superficial específica y capacidad de intercambio catiónico inherente.

Evaluar las propiedades mecánicas del concreto celular base, incluyendo resistencia a la compresión, densidad, porosidad y propiedades térmicas.

Objetivo Específico 2: Desarrollo y Caracterización de Materiales Compuestos

Desarrollar metodologías de preparación de concreto celular dopado con jarosita en diferentes proporciones de dopaje (2%, 5%, 8% y 10% en peso).

Caracterizar los materiales compuestos mediante técnicas avanzadas incluyendo microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y análisis termogravimétrico (TGA).

Evaluar el efecto del dopaje con jarosita sobre las propiedades mecánicas del concreto celular, determinando la concentración óptima que maximice la funcionalidad de remediación sin comprometer significativamente la integridad estructural.

Objetivo Específico 3: Análisis del Intercambio Catiónico y Efecto de la Temperatura

Investigar la cinética de adsorción de cromo en los materiales compuestos bajo diferentes condiciones de temperatura (30°C, 40°C, 50°C y 60°C).

Determinar los parámetros de equilibrio de adsorción mediante el ajuste de isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin.

Evaluar el efecto de la temperatura en la capacidad máxima de adsorción, constantes de velocidad y mecanismos predominantes de intercambio catiónico.

Objetivo Específico 4: Optimización de Condiciones Operativas

Determinar las condiciones óptimas de operación (concentración de dopante, temperatura, tiempo de contacto, pH) que maximicen la eficiencia de remoción de cromo.

Evaluar la selectividad del material hacia cromo en presencia de otros cationes metálicos comunes en aguas residuales industriales.

Investigar la estabilidad y durabilidad del material compuesto bajo condiciones operativas prolongadas.

Objetivo Específico 5: Evaluación de Aplicabilidad y Escalamiento

Diseñar y evaluar sistemas piloto de tratamiento de aguas contaminadas utilizando los materiales desarrollados.

Realizar análisis de factibilidad técnica y económica para la implementación de la tecnología a escala industrial.

Desarrollar recomendaciones para la aplicación práctica de los materiales en sistemas de remediación ambiental.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis Principal

La incorporación de jarosita como dopante en el concreto celular autoclaveado incrementará significativamente la capacidad de intercambio catiónico del material, mejorando la eficiencia de remoción de cromo (Cr) de soluciones acuosas, y esta capacidad de remoción se verá potenciada por el aumento de la temperatura de operación debido a la mayor movilidad iónica y la activación de sitios de adsorción adicionales.

1.4.2 Hipótesis Específicas

H₁: La capacidad de adsorción de cromo del concreto celular dopado con jarosita será directamente proporcional a la concentración de dopante hasta un valor óptimo, después del cual se observará una saturación del efecto debido a limitaciones de accesibilidad de sitios activos.

H₂: El incremento de temperatura desde 30°C hasta 60°C mejorará la cinética de adsorción de cromo, reduciendo el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio y aumentando la capacidad máxima de adsorción debido a efectos termodinámicos favorables.

H₃: Los mecanismos predominantes de remoción de cromo involucrarán tanto intercambio catiónico directo con sitios activos de la jarosita como adsorción física en la matriz porosa del concreto celular, con una contribución relativa que variará en función de la temperatura.

H₄: Las propiedades mecánicas del concreto celular se mantendrán dentro de rangos aceptables para aplicaciones estructurales hasta concentraciones de dopaje del 8% en peso, permitiendo el desarrollo de materiales con funcionalidad dual.

H₅: El material compuesto desarrollado presentará selectividad preferencial hacia cromo en comparación con otros cationes metálicos comunes, debido a las características específicas de intercambio iónico de la jarosita.

1.5 Antecedentes

en el siguiente apartado, se desarrollará un estado de arte asociado a investigaciones cronológicas de la evolución del objetivo, planteado esto con el fin de generar un análisis evolutivo del desarrollo científico y las aportaciones de distintos autores sobre el campo de aplicación.

1.5.1 Antecedentes sobre Contaminación por Cromo

La contaminación por cromo ha sido objeto de estudio intensivo durante las últimas décadas debido a su impacto significativo en la salud humana y ambiental. Investigaciones pioneras realizadas por Kotas y Stasicka (2000) establecieron los fundamentos para la comprensión de la especiación del cromo en medios acuosos y su comportamiento en diferentes condiciones ambientales.

Palmer y Wittbrodt (1991) desarrollaron estudios fundamentales sobre la reducción de Cr(VI) a Cr(III) en presencia de materia orgánica, demostrando que las condiciones redox del medio influyen significativamente en la movilidad y toxicidad del cromo. Estos trabajos sentaron las bases para el desarrollo de tecnologías de remediación basadas en procesos de reducción química.

Researches más recientes han demostrado que las concentraciones de cromo en aguas residuales industriales pueden variar entre 10-100 mg/L en industrias de galvanoplastia, 50-200 mg/L en industrias de curtido y 5-50 mg/L en industrias de pigmentos. Estos niveles superan significativamente los límites permisibles para descarga (0.5 mg/L según normas mexicanas) y para agua potable (0.05 mg/L según la OMS).

1.5.2 Antecedentes sobre Materiales Adsorbentes para Cromo

El desarrollo de materiales adsorbentes para la remoción de cromo ha evolucionado desde adsorbentes convencionales como carbón activado y zeolitas hasta materiales avanzados incluyendo nanocompuestos y materiales funcionalizados.

Adsorbentes Convencionales: Babel y Kurniawan (2003) realizaron una revisión exhaustiva de las tecnologías de remoción de cromo, identificando que el carbón activado presenta capacidades de adsorción entre 15-25 mg/g para Cr(VI), mientras que las zeolitas naturales alcanzan capacidades de 5-15 mg/g. Sin embargo, estos materiales presentan limitaciones económicas para aplicaciones a gran escala.

Materiales Basados en Residuos Industriales: Investigaciones recientes han explorado el uso de residuos industriales como materiales adsorbentes de bajo costo. Garg et al. (2004) evaluaron el uso de fly ash para la remoción de cromo, reportando capacidades de adsorción de 8-12 mg/g. Similarly, Kumar et al. (2019) investigaron el uso de residuos de la industria del acero, alcanzando eficiencias de remoción del 85-90% bajo condiciones optimizadas.

Materiales de Construcción Funcionalizados: El concepto de materiales de construcción con funcionalidad de remediación ambiental ha ganado atención en los últimos años. Wang et al. (2018) desarrollaron concretos modificados con zeolitas para la remoción de metales pesados, demostrando que es posible mantener propiedades mecánicas adecuadas mientras se incorpora funcionalidad de adsorción.

1.5.3 Antecedentes sobre Jarosita y sus Aplicaciones

La jarosita, un mineral de fórmula general $AFe_3(SO_4)_2(OH)_6$ donde A puede ser K^+ , Na^+ , H_3O^+ o NH_4^+ , ha sido estudiada extensivamente tanto desde perspectivas mineralógicas como de aplicaciones industriales.

Propiedades Fisicoquímicas: Dutrizac y Jambor (2000) realizaron estudios comprehensivos sobre la estructura cristalina y propiedades de intercambio iónico de la jarosita, estableciendo que su estructura permite el intercambio de cationes monovalentes en sitios A y cationes divalentes y trivalentes en sitios octahedrales.

Aplicaciones en Remediación: Investigaciones recientes han demostrado el potencial de la jarosita para la remediación de metales pesados. Paktunc et al. (2003) investigaron la capacidad de diferentes tipos de jarosita para la inmovilización de elementos tóxicos, reportando alta afinidad hacia cationes como Pb^{2+} , Cd^{2+} y Cr^{3+} .

Salinas-Rodríguez et al. (2019) evaluaron el intercambio iónico de elementos de tierras raras con jarosita sintética, alcanzando eficiencias de intercambio superiores

al 95% bajo condiciones optimizadas, demostrando el potencial de este material para aplicaciones de separación y purificación.

1.5.4 Antecedentes sobre Concreto Celular Autoclaveado

El concreto celular autoclaveado (CCA) ha sido objeto de investigación intensiva debido a sus propiedades favorables para aplicaciones de construcción sostenible.

Desarrollo Histórico: El CCA fue desarrollado inicialmente en Suecia en la década de 1920 por J.A. Eriksson, quien patentó el proceso de generación de poros mediante la reacción química entre aluminio y cal en presencia de cemento Portland. La tecnología se extendió rápidamente a Europa y posteriormente a otros continentes.

Propiedades y Aplicaciones: Alexanderson (1979) estableció las bases teóricas para la comprensión de las propiedades del CCA, demostrando que su estructura porosa controlada resulta en propiedades térmicas y mecánicas superiores comparadas con concretos convencionales de densidad similar.

Investigaciones más recientes han explorado la modificación del CCA con diversos aditivos para mejorar sus propiedades o incorporar funcionalidades adicionales. Narayanan y Ramamurthy (2000) investigaron el efecto de diferentes materiales puzolanicos en las propiedades del CCA, mientras que Kumar et al. (2020) evaluaron la incorporación de fibras para mejorar las propiedades mecánicas.

1.5.5 Estudios sobre Efecto de Temperatura en Procesos de Adsorción

El efecto de la temperatura en procesos de adsorción ha sido estudiado extensivamente desde perspectivas tanto teóricas como experimentales.

Fundamentos Termodinámicos: Los estudios termodinámicos de adsorción establecen que la temperatura afecta tanto la capacidad de adsorción como la cinética del proceso a través de múltiples mecanismos: cambios en la energía de activación, modificación de constantes de equilibrio y alteración de propiedades de transporte.

Aplicaciones a Metales Pesados: Volesky (2001) desarrolló modelos comprehensivos para describir el efecto de la temperatura en la biosorción de metales pesados, estableciendo que en la mayoría de los casos, el incremento de temperatura hasta 60°C mejora significativamente la capacidad de adsorción debido a efectos cinéticos favorables.

1.5.6 Lagunas de Conocimiento Identificadas

El análisis de la literatura revela varias lagunas de conocimiento que justifican la presente investigación:

Aplicación de Jarosita en Concreto Celular: No se han reportado estudios que evalúen específicamente la incorporación de jarosita como dopante en concreto celular autoclaveado.

Intercambio Catiónico de Cromo con Materiales de Construcción: La literatura es limitada respecto al uso de materiales de construcción funcionalizados para la remoción específica de cromo.

Efecto Sistemático de Temperatura: No se han realizado estudios que evalúen sistemáticamente el efecto de la temperatura en el intercambio catiónico de cromo con materiales compuestos basados en concreto celular.

Optimización Integral: La literatura carece de estudios que integren la optimización de propiedades mecánicas y de remediación en materiales de construcción funcionalizados.

1.6 Marco Teórico

En el siguiente apartado, se desarrollan los conceptos y definiciones de factores técnicos presentes en el siguiente estudio, así como técnicas y metodología que se abordará en el desarrollo de los resultados y experimentación presente en este trabajo de titulación.

1.6.1 Intercambio Catiónico

El intercambio catiónico es un proceso fisicoquímico fundamental en la ciencia de materiales que se define como la capacidad de un material sólido para intercambiar cationes móviles de su estructura con otros cationes presentes en una solución circundante. Este fenómeno ocurre cuando los cationes débilmente unidos a la superficie o estructura del material son reemplazados por otros cationes de la solución, manteniendo la neutralidad eléctrica del sistema (Hernández Ávila et al., 2019).

La importancia del intercambio catiónico radica en su aplicación para la remediación de contaminantes metálicos, particularmente metales pesados como el cromo (Cr), que representa una amenaza significativa para la salud pública y el medio ambiente debido a su toxicidad y persistencia. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un material se define como la cantidad total de cationes intercambiables que pueden ser adsorbidos por unidad de masa del material, expresándose comúnmente en miliequivalentes por 100 gramos (meq/100 g).

1.6.1.1 *Mecanismos de Intercambio Catiónico*

Los mecanismos de intercambio catiónico pueden clasificarse en dos categorías principales según su naturaleza:

Intercambio Iónico Directo: En este mecanismo, los cationes presentes en la solución reemplazan estequiométricamente a los cationes intercambiables del material sólido. Este proceso es reversible y sigue las leyes de acción de masas, donde la selectividad del intercambio depende de factores como el tamaño iónico, la carga y la energía de hidratación de los cationes involucrados (Mao et al., 2018).

Adsorción Superficial: Este mecanismo implica la adhesión de cationes a sitios específicos en la superficie del material sin necesariamente reemplazar cationes existentes. La adsorción puede ser física (mediante fuerzas de van der Waals) o química (mediante enlaces covalentes o iónicos), y su eficiencia depende del área superficial específica del material y la afinidad química entre el adsorbato y el adsorbente.

1.6.1.2 *Factores que Afectan el Intercambio Catiónico*

Los principales factores que influyen en la eficiencia del intercambio catiónico incluyen:

pH de la Solución: El pH afecta directamente la carga superficial del material y la especiación de los cationes en solución. A pH bajo, la protonación de grupos funcionales superficiales puede reducir la capacidad de intercambio, mientras que a pH alto, la precipitación de hidróxidos metálicos puede interferir con el proceso de intercambio.

Temperatura: El aumento de temperatura generalmente incrementa la cinética de intercambio catiónico al aumentar la movilidad iónica y la energía de activación de las reacciones de intercambio. Sin embargo, temperaturas excesivamente altas pueden alterar la estructura del material intercambiador (Khan et al., 2020).

Concentración de Cationes: La concentración de cationes en solución influye en la fuerza motriz del intercambio. Concentraciones más altas proporcionan mayor fuerza motriz, pero también pueden saturar los sitios de intercambio disponibles.

Fuerza Iónica: La presencia de otros iones en solución puede competir por los sitios de intercambio, afectando la selectividad del proceso.

Tiempo de Contacto: El equilibrio de intercambio requiere tiempo suficiente para que los cationes difundan hacia los sitios de intercambio y se establezca el equilibrio termodinámico.

1.6.2 Contaminación por Cromo

El cromo es un metal de transición que se encuentra naturalmente en la corteza terrestre y existe en varios estados de oxidación, siendo los más comunes el cromo trivalente (Cr^{3+}) y el cromo hexavalente (Cr^{6+}). Ambas formas presentan propiedades químicas y toxicológicas muy diferentes, lo que determina su comportamiento ambiental y sus efectos en la salud humana.

1.6.2.1 Características del Cromo Hexavalente y Trivalente

Cromo Hexavalente (Cr^{6+}): Esta forma es altamente oxidante, móvil en soluciones acuosas y extremadamente tóxica. Se presenta comúnmente como cromato (CrO_4^{2-}) o dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$). Su alta solubilidad en agua y capacidad para atravesar membranas celulares lo convierte en un contaminante ambiental crítico (Zhang et al., 2019).

Cromo Trivalente (Cr^{3+}): Esta forma es menos tóxica, tiende a formar complejos estables con ligandos orgánicos e inorgánicos, y tiene menor movilidad en el ambiente. Es la forma predominante en condiciones reductoras y pH neutro a básico.

1.6.2.2 *Fuentes de Contaminación por Cromo*

Las principales fuentes antropogénicas de contaminación por cromo incluyen:

- **Industria del Curtido:** Utiliza sales de cromo para el procesamiento de pieles, generando efluentes con altas concentraciones de cromo.
- **Galvanoplastia y Cromado:** Procesos que utilizan soluciones de cromo para recubrimientos metálicos.
- **Industria Química:** Producción de pigmentos, catalizadores y otros compuestos cromados.
- **Fundición y Metalurgia:** Procesamiento de minerales que contienen cromo.

1.6.2.3 *Efectos Ambientales y en la Salud*

El cromo hexavalente presenta múltiples efectos adversos:

Efectos en la Salud Humana: Clasificado como carcinógeno del Grupo 1 por la IARC, el Cr^{6+} puede causar cáncer pulmonar, dermatitis, úlceras cutáneas, daño renal y hepático. Su capacidad para atravesar membranas celulares y generar especies reactivas de oxígeno lo convierte en un agente mutagénico potente (García et al., 2018).

Efectos Ecológicos: En ecosistemas acuáticos, el cromo hexavalente puede bioacumularse en la cadena alimentaria, afectar la fotosíntesis en plantas acuáticas y causar mortalidad en peces e invertebrados.

1.6.2.4 *Métodos de Remediación de Cromo*

Existen diversos enfoques tecnológicos para la remediación de cromo:

Métodos Fisicoquímicos:

- Adsorción en materiales porosos (carbón activado, zeolitas, arcillas modificadas)
- Intercambio iónico utilizando resinas sintéticas o materiales naturales
- Precipitación química mediante ajuste de pH y uso de agentes reductores
- Separación por membranas (ósmosis inversa, ultrafiltración)

Métodos Biológicos:

- Bioremediación utilizando microorganismos reductores de cromo

- Fitorremediación con plantas hiperacumuladoras
- Biosorción en biomasa microbiana

Métodos Electroquímicos:

- Electrocoagulación
- Electroflotación
- Reducción electroquímica

1.6.3 Concreto Celular Autoclaveado

El concreto celular autoclaveado (AAC, por sus siglas en inglés) es un material de construcción ligero y poroso que se caracteriza por su estructura celular uniforme y sus excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico. Este material se produce mediante un proceso de curado en autoclave que involucra reacciones químicas complejas bajo condiciones controladas de presión y temperatura.

1.6.3.1 Proceso de Manufactura

El proceso de producción del concreto celular autoclaveado involucra las siguientes etapas:

1. **Preparación de la Mezcla:** Combinación de cemento Portland, cal, arena fina, agua y un agente espumante (típicamente polvo de aluminio).
2. **Reacción de Espumado:** El polvo de aluminio reacciona con los hidróxidos alcalinos para generar hidrógeno gaseoso, creando la estructura porosa característica.

3. **Fraguado Inicial:** Formación de una estructura sólida preliminar que mantiene la distribución de poros.
4. **Curado en Autoclave:** Tratamiento a alta presión (0.8-1.2 MPa) y temperatura (175-200°C) durante 8-12 horas, promoviendo la formación de silicatos de calcio hidratados cristalinos

1.6.3.2 *Propiedades del Concreto Celular Autoclaveado*

Las propiedades distintivas del AAC incluyen:

Propiedades Físicas:

En la tabla 1 se presentan las propiedades físicas del concreto celular.

Tabla 1 propiedades físicas del concreto celular

Propiedad	Valor Típico	Unidad
Densidad	400-800	kg/m ³
Porosidad	60-85	%
Resistencia a la compresión	2.5-5.0	MPa
Conductividad térmica	0.1-0.2	W/m·K
Resistencia al fuego	Hasta 4	Horas
Absorción de agua	5-25	% por peso

Propiedades Químicas:

- pH alcalino (11-13) debido al contenido de cal libre
- Resistencia a la carbonatación
- Estabilidad dimensional bajo condiciones normales de servicio

1.6.3.3 Microestructura y Porosidad

La microestructura del concreto celular autoclaveado se caracteriza por:

- **Poros Macroscópicos:** Burbujas de aire de 1-4 mm de diámetro generadas durante el proceso de espumado
- **Poros Capilares:** Espacios entre partículas de gel de 0.01-10 μm
- **Poros de Gel:** Espacios interlaminares en productos de hidratación <0.01 μm

Esta estructura porosa jerárquica proporciona una alta superficie específica que puede ser aprovechada para aplicaciones de intercambio catiónico.

1.6.3.4 Aplicaciones del Concreto Celular

Las aplicaciones del concreto celular autoclaveado incluyen:

Aplicaciones Estructurales:

- Bloques de mampostería para muros portantes y no portantes
- Paneles prefabricados para fachadas y tabiques
- Elementos estructurales ligeros (vigas, losas)

Aplicaciones de Aislamiento:

- Aislamiento térmico en cubiertas y muros
- Aislamiento acústico en particiones interiores
- Rellenos ligeros para nivelación

1.6.4 Jarosita como Material Dopante

La jarosita es un mineral del grupo de los sulfatos con fórmula química general $AB_3(SO_4)_2(OH)_6$, donde A puede ser K^+ , Na^+ , H_3O^+ , NH_4^+ , o Pb^{2+} , y B generalmente es Fe^{3+} , aunque puede incluir Al^{3+} o Cr^{3+} . Este mineral se forma naturalmente en ambientes ácidos oxidantes y ha ganado interés como material funcional en aplicaciones de remediación ambiental.

1.6.4.1 Estructura Cristalina y Propiedades

La jarosita presenta una estructura cristalina trigonal que pertenece al grupo espacial R-3m. Su estructura consiste en:

- **Octaedros de FeO_6 :** Unidades básicas conectadas por vértices formando capas
- **Tetraedros de SO_4 :** Grupos sulfato que conectan las capas octaédricas
- **Sitios Interlaminares:** Espacios que albergan cationes intercambiables

Propiedades Fisicoquímicas de la Jarosita:

En la tabla 2 se presentan las propiedades fisicoquímicas de la Jarosita.

Tabla 2 propiedades Fisicoquímicas de la Jarosita.

Propiedad	Valor Típico	Unidad
Composición química	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	-
Densidad	2.5-3.0	g/cm^3
Capacidad de intercambio catiónico	20-30	meq/100g
Área superficial específica	50-150	m^2/g
Estabilidad térmica	Hasta 450	$^{\circ}\text{C}$
pH de punto de carga cero	2.5-3.5	-

1.6.4.2 Mecanismos de Intercambio Catiónico en Jarosita

La jarosita exhibe capacidad de intercambio catiónico a través de varios mecanismos:

Intercambio en Sitios Interlaminares: Los cationes A^+ en la estructura pueden ser intercambiados por otros cationes de dimensiones similares, incluyendo metales pesados como Cr^{3+} .

Adsorción Superficial: Los grupos hidroxilo superficiales pueden protonar o desprotonarse según el pH, creando sitios de adsorción para cationes metálicos.

Sustitución Isomórfica: En condiciones específicas, cationes como Cr^{3+} pueden sustituir Fe^{3+} en posiciones octaédricas, aunque este proceso es cinéticamente lento.

1.6.4.3 *Aplicaciones de la Jarosita en Remediación*

Las aplicaciones de la jarosita en remediación ambiental incluyen:

Tratamiento de Drenaje Ácido de Minas: Neutralización de acidez y remoción de metales pesados de efluentes mineros.

Estabilización de Suelos Contaminados: Inmovilización de metales pesados en suelos mediante formación de fases minerales estables.

Adsorbente para Tratamiento de Aguas: Remoción de cationes metálicos de aguas residuales industriales.

Aditivo en Materiales de Construcción: Mejora de propiedades mecánicas y capacidad de retención de contaminantes.

1.6.5 *Influencia de la Temperatura en el Intercambio Cationico*

La temperatura es un parámetro crítico que gobierna la cinética y termodinámica del intercambio cationico. Su influencia se manifiesta en múltiples aspectos del proceso, desde la movilidad iónica hasta la estabilidad de las fases minerales involucradas.

1.6.5.1 *Efectos Cinéticos de la Temperatura*

Incremento de la Velocidad de Reacción: El aumento de temperatura incrementa la energía cinética de las especies iónicas, acelerando los procesos de difusión y migración hacia los sitios de intercambio. La relación entre temperatura y velocidad de reacción generalmente sigue la ecuación de Arrhenius:

$$k = A \times \exp(-E_a/RT)$$

donde k es la constante de velocidad, A es el factor pre-exponencial, E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta.

Mejora de la Difusión Intrapartícula: La temperatura elevada facilita la difusión de cationes a través de los poros del material, reduciendo las limitaciones de transferencia de masa y mejorando la eficiencia del intercambio (Mao et al., 2018).

1.6.5.2 *Efectos Termodinámicos*

Modificación del Equilibrio de Intercambio: La temperatura afecta las constantes de equilibrio de intercambio catiónico según la ecuación de van 't Hoff:

$$\ln(K_{eq}) = -\Delta H^\circ/RT + \Delta S^\circ/R$$

donde ΔH° y ΔS° son los cambios de entalpía y entropía estándar del proceso.

Cambios en la Selectividad: La temperatura puede alterar la selectividad del intercambiador hacia diferentes cationes, modificando la jerarquía de afinidad iónica.

1.6.5.3 *Efectos en la Solubilidad y Especiación del Cromo*

La temperatura influye significativamente en la solubilidad y especiación del cromo en soluciones acuosas:

Solubilidad de Especies Cromadas: El aumento de temperatura generalmente incrementa la solubilidad de compuestos cromados, afectando la disponibilidad de especies para el intercambio.

Cinética de Reducción $\text{Cr}^{6+} \rightarrow \text{Cr}^{3+}$: Las reacciones de reducción del cromo hexavalente a trivalente son termalmente activadas, siendo más favorables a temperaturas elevadas.

Estabilidad de Complejos: La formación de complejos cromados con ligandos orgánicos e inorgánicos es sensible a la temperatura, afectando la especiación del cromo en solución (Khan et al., 2020).

1.6.5.4 Optimización de Temperatura en Sistemas AAC-Jarosita

Para sistemas de concreto celular autoclaveado dopado con jarosita, la optimización de temperatura debe considerar:

Límites de Estabilidad Térmica: La jarosita mantiene su estructura hasta aproximadamente 450°C , mientras que la matriz de AAC puede experimentar cambios microestructurales a temperaturas superiores a 300°C .

Eficiencia de Intercambio vs. Integridad Estructural: Existe un balance entre maximizar la eficiencia del intercambio catiónico y mantener la integridad mecánica del material compuesto.

Condiciones de Operación: En aplicaciones reales, las temperaturas de operación raramente exceden los $60\text{-}80^{\circ}\text{C}$, por lo que la optimización debe enfocarse en este rango.

1.6.6 Materiales Compuestos AAC-Jarosita

La incorporación de jarosita en la matriz de concreto celular autoclaveado constituye un enfoque innovador para desarrollar materiales de construcción multifuncionales con capacidades de remediación ambiental integradas.

1.6.6.1 Interacciones Matriz-Dopante

Compatibilidad Química: La jarosita presenta buena compatibilidad con la matriz alcalina del AAC debido a su estabilidad en rangos de pH moderadamente alcalinos.

Distribución Espacial: La distribución homogénea de partículas de jarosita en la matriz porosa del AAC es crucial para optimizar la accesibilidad de sitios de intercambio catiónico.

Sinergia Funcional: La combinación de la alta superficie específica del AAC con la capacidad de intercambio catiónico de la jarosita crea un efecto sinérgico que potencia las propiedades de remediación del material compuesto.

1.6.6.2 Propiedades del Material Compuesto

Propiedades Mecánicas: La incorporación de jarosita puede afectar las propiedades mecánicas del AAC, generalmente causando una ligera reducción en la resistencia a la compresión pero mejorando la tenacidad.

Propiedades de Transporte: La porosidad interconectada del AAC facilita el acceso de soluciones contaminadas a los sitios de intercambio catiónico en la jarosita.

Durabilidad: La presencia de jarosita puede mejorar la resistencia a la lixiviación de metales pesados, actuando como un mecanismo de retención secundario.

1.6.6.3 *Aplicaciones Potenciales*

Construcción Sostenible: Elementos constructivos con capacidad de autorremediación para aplicaciones en sitios contaminados.

Barreras Reactivas Permeables: Materiales para sistemas de contención y tratamiento pasivo de contaminantes.

Infraestructura de Gestión de Residuos: Componentes para instalaciones de almacenamiento y tratamiento de residuos industriales.

Esta comprensión integral de los mecanismos de intercambio catiónico, las propiedades de los materiales involucrados y los factores que afectan el proceso proporciona la base teórica sólida necesaria para investigar y optimizar el sistema AAC-jarosita para la remediación de cromo en función de la temperatura.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Estrategia Experimental

La estrategia experimental de la presente investigación se fundamenta en el estudio sistemático de las relaciones causales entre las variables del proceso, lo que permite establecer las condiciones específicas necesarias para evaluar el intercambio catiónico de cromo. Para lograr este objetivo, se implementa un diseño experimental de tipo factorial. Dicho diseño está estructurado para analizar cuantitativamente el efecto de los diferentes niveles de temperatura sobre la capacidad de remediación del concreto celular autoclaveado, el cual ha sido previamente modificado mediante el dopaje con jarosita

2.1.1 Diseño Experimental

La presente investigación se desarrolló mediante un diseño experimental factorial para evaluar el efecto de la temperatura sobre el intercambio catiónico de cromo en concreto celular autoclaveado dopado con jarosita. La estrategia experimental aborda el estudio de las relaciones causales entre las variables del procedimiento mediante el cual se obtendrán las condiciones específicas para evaluar el intercambio catiónico de cromo.

Variables Independientes:

- **Temperatura (T):** 30°C, 40°C, 50°C, 60°C
- **Tipo de material:** Concreto celular sin dopaje vs. concreto celular dopado con jarosita
- **Tiempo de contacto:** 10 minutos (tiempo base establecido)

Variable Dependiente:

- **Capacidad de intercambio catiónico:** Expresada como la diferencia entre concentración inicial y final de cromo en solución

2.1.2 Metodología Experimental

Los pasos del desarrollo experimental se describen a continuación:

1. **Obtención de las materias primas:** Se seleccionarán 5 g de concreto celular, 5 g de concreto celular dopado con jarosita y 3 g de cromo para la preparación de soluciones.

2. **Preparación de soluciones:** Se prepararán 500 ml de agua destilada y se añadirá 3 g de cromo a cada solución para obtener la solución madre de cromo.
3. **Condiciones experimentales:** Se realizarán experimentos a temperaturas controladas de 30, 40, 50 y 60 °C utilizando baño de agua termostatzado.
4. **Evaluación del intercambio catiónico:** Se medirán las concentraciones de cromo en las soluciones antes y después del contacto con los materiales concretos.
5. **Análisis de resultados:** Se utilizarán técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB) e ICP para caracterizar los materiales y cuantificar el cromo.

2.1.3 Diagrama de Flujo Experimental

El desarrollo experimental sigue la secuencia mostrada en la Figura 2, que comprende desde la obtención de materias primas hasta el análisis final de resultados, permitiendo una evaluación sistemática del intercambio catiónico bajo diferentes condiciones de temperatura.

En la figura 1, se muestra el diagrama de flujo del desarrollo experimental de este trabajo.

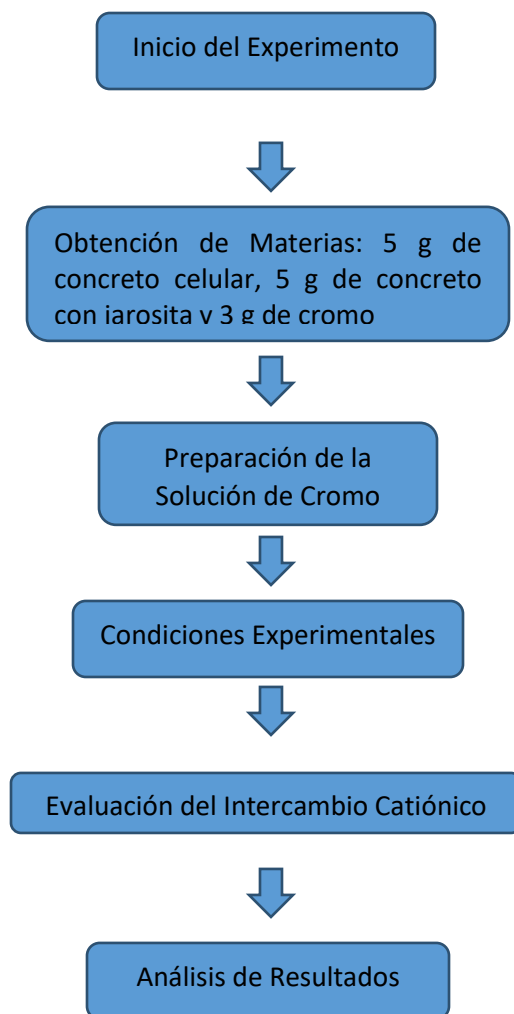


Figura 1 diagrama de flujo del desarrollo experimental

2.2 Materiales y Reactivos

A continuación, se mencionan los distintos reactivos y sustancias empleadas para poder ser replicado el presente estudio bajo las condiciones descritas en la metodología.

2.2.1 Materias Primas Principales

Las materias primas utilizadas en esta investigación son:

Concreto Celular:

- Cantidad: 5 g por experimento
- Características: Concreto celular autoclaveado comercial
- Preparación: Triturado y tamizado a malla -200

Concreto Celular Dopado con Jarosita:

- Cantidad: 5 g por experimento
- Composición: Concreto celular con incorporación de jarosita
- Preparación: Síntesis mediante proceso de curado autoclaveado

Agua Destilada:

- Calidad: Agua destilada grado reactivo
- Volumen: 500 ml por experimento
- Conductividad: $< 2 \mu\text{S/cm}$

Cromo (Reactivo):

- Cantidad: 3 g por solución
- Tipo: Dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) grado reactivo
- Pureza: $\geq 99.5\%$
- Proveedor: Sigma-Aldrich

2.2.2 Reactivos Adicionales

Ácidos y Bases:

- Ácido clorhídrico (HCl) 0.1 M para ajuste de pH
- Hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 M para ajuste de pH

Soluciones Estándar:

- Estándares de cromo para calibración ICP
- Soluciones buffer para control de pH

2.3 Equipos e Instrumentación

Los equipos e instrumentos utilizados se describen en el siguiente apartado.

*2.3.1 Equipos para Síntesis y Preparación***Balanza Analítica:**

- Modelo: Sartorius BSA224S
- Precisión: ± 0.1 mg
- Rango: 0-220 g

Baño de Agua Termostatzado:

- Marca: Julabo
- Rango de temperatura: 25-100°C
- Precisión: ± 0.1 °C
- Capacidad: 20 L

Agitador Magnético:

- Marca: IKA RET Basic
- Velocidad: 50-1500 rpm
- Control de temperatura integrado

2.3.2 Equipos de Caracterización**Difractómetro de Rayos X (DRX):**

- Modelo: Equinox
- Configuración: Óptica simple
- Radiación: $K\alpha_1$ de cobre ($\lambda = 1.789 \text{ \AA}$)
- Voltaje de operación: 220V
- Tubo de rayos X: Cobre
- Monocromador: Germanio
- Resolución: 0.095 FWHM
- Modo de operación: Transmisión-reflexión
- Mezcla de gases: Argón y etano

Microscopio Electrónico de Barrido (MEB):

- Modelo: JEOL JSM-7600F
- Voltaje de aceleración: 1-30 kV

- Resolución: 1.0 nm a 15 kV
- Magnificación: 25x a 1,000,000x

Espectrómetro ICP-OES:

- Modelo: Perkin Elmer Optima 8000
- Rango de detección: ppb a ppm
- Precisión: $\pm 2\%$
- Gases: Argón de alta pureza

2.3.3 Equipos Auxiliares

Sistema de Filtración:

- Filtros de membrana 0.45 μm
- Bomba de vacío
- Kitasato de 1 L

pHmetro:

- Modelo: Hanna HI-2020
- Precisión: ± 0.01 pH
- Rango: 0-14 pH

2.4 Procedimientos Experimentales

2.4.1 Preparación de Materiales

Preparación del Concreto Celular:

1. Triturar el concreto celular hasta obtener partículas uniformes
2. Tamizar a malla -200 (75 μm)
3. Secar en estufa a 105°C durante 24 horas
4. Almacenar en desecador hasta su uso

Preparación del Concreto Dopado con Jarosita:

1. Incorporar jarosita durante el proceso de mezclado del concreto
2. Curar en autoclave según condiciones estándar
3. Triturar y tamizar siguiendo el mismo procedimiento

2.4.2 Preparación de Soluciones

Solución de Cromo:

1. Disolver 3 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en 500 ml de agua destilada
2. Agitar hasta completa disolución
3. Ajustar pH si es necesario
4. Concentración final: 6000 mg/L de cromo

2.4.3 Procedimiento de Intercambio Catiónico

Condiciones Experimentales:

- Temperaturas de operación: 30°C, 40°C, 50°C, 60°C

- Tiempo de contacto: 10 minutos
- Velocidad de agitación: 200 rpm
- Relación sólido/líquido: 1:100 (5g/500ml)

Procedimiento:

1. Colocar 5 g de material (concreto celular o dopado) en Reactor con agitación magnética de 1 L
2. Agregar 500 ml de solución de cromo
3. Ajustar la temperatura en la parrilla de calentamiento
4. Agitar la mezcla a velocidad constante (200 rpm) durante 10 minutos
5. Recolectar muestras al finalizar el tiempo de contacto
6. Filtrar la solución para eliminar partículas sólidas
7. Almacenar las muestras filtradas para análisis posterior

2.4.4 Recolección y Almacenamiento de Muestras

Muestras Líquidas:

- Filtrar a través de membrana 0.45 μm
- Acidificar con HNO_3 para preservación
- Almacenar en frascos de polietileno a 4°C

Muestras Sólidas:

- Lavar con agua destilada

- Secar en estufa a 60°C
- Almacenar en desecador para análisis posterior

2.5 Técnicas de Caracterización

Los métodos y técnicas de caracterización y seguimiento de los procesos planteados se realizaron bajo las siguientes metodologías.

2.5.1 Difracción de Rayos X (DRX)

Preparación de Muestras:

- Granulometría: -200 mallas (75 μm)
- Secado: 105°C durante 2 horas
- Cantidad: 2-3 g por muestra

Condiciones de Análisis:

- Rango de ángulo 2θ : 5° a 100°
- Paso: 0.02°
- Tiempo de adquisición: Mínimo 10 minutos por muestra
- Radiación: $K\alpha$ de cobre ($\lambda = 1.789 \text{ \AA}$)

Análisis de Difractogramas:

1. Identificación de picos de mayor intensidad
2. Medición de ángulos 2θ con regla milimétrica
3. Registro de intensidades absolutas y relativas

4. Cálculo de espaciado dhkl usando la ley de Bragg: $2d \sin\theta = n\lambda$
5. Análisis con software MATCH 3 para identificación de fases

Procedimiento de Análisis con MATCH 3:

- Procesamiento del archivo fuente de difracción
- Comparación con base de datos de patrones cristalinos
- Indexado de planos cristalinos
- Generación de lista de resultados con valores de coincidencia
- Identificación de fases cristalinas presentes

En la figura 2 se muestra Equipo de difracción Equinox



Figura 2 Equipo de difracción Equinox (Autoría propia)

2.5.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Preparación de Muestras:

1. Montaje en porta muestras de aluminio
2. Recubrimiento con oro/paladio (2 minutos)
3. Secado completo en desecador

Condiciones de Análisis:

- Voltaje de aceleración: 15 kV
- Magnificaciones: 100x, 500x, 1000x, 5000x
- Detector: Electrones secundarios
- Análisis EDS para composición semi cuantitativo

2.5.3 Espectroscopía de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES)

Preparación de Muestras:

1. Digestión ácida de muestras sólidas (si aplica)
2. Dilución de muestras líquidas según concentración
3. Preparación de curvas de calibración

Condiciones de Análisis:

- Líneas de emisión del cromo: 267.716 nm, 357.869 nm

- Potencia del plasma: 1300 W
- Flujo de gas: 15 L/min (plasma), 0.2 L/min (nebulizador)
- Tiempo de integración: 5 segundos

Cuantificación de Cromo:

1. Análisis de concentración inicial y final en solución
2. Cálculo de porcentaje de remoción: $\% \text{ Remoción} = [(C_0 - C_f) / C_0] \times 100$
3. Determinación de capacidad de adsorción: $q = (C_0 - C_f) \times V / m$

Donde:

- C_0 = Concentración inicial (mg/L)
- C_f = Concentración final (mg/L)
- V = Volumen de solución (L)
- m = Masa de adsorbente (g)

2.5.4 Control de Calidad y Validación

Blancos y Estándares:

- Blancos de reactivos para cada lote de análisis
- Estándares de referencia certificados
- Duplicados de muestras (10% del total)

Criterios de Aceptación:

- Recuperación de estándares: 95-105%
- Desviación estándar relativa: <5%
- Límite de detección: 0.1 mg/L para cromo

Tratamiento Estadístico:

- Análisis de varianza (ANOVA) para evaluar efectos de temperatura
- Pruebas t para comparación entre materiales
- Análisis de regresión para modelado cinético
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Interpretación De Resultados Icp - Efecto De Temperatura

Tras la digestión de los distintos precipitados de los lixiviados, evaluando diferentes patrones de temperatura, se dió un seguimiento de la solución con el fin de cuantificar la capacidad de absorción de algosos metales.

3.1.1 Análisis Cuantitativo de la Adsorción de Cromo

Los resultados del experimento bajo la variación de temperatura, evaluando la capacidad de absorción de cromo, presentó los resultados experimentales desglosados en la tabla 3

Tabla 3 Resultados de % de adsorción de Cr en concreto celular

Temperatura (°C)	PPM en solución	PPM×factor dilución (200)	PPM (blanco- muestra)	% Adsorción Cr
Blanco	4.677	-	-	-
30°C	1.969	393.8	706	64.2%
40°C	2.806	561.2	538.6	49.0%
50°C	3.634	726.8	373	33.9%
60°C	3.454	690.8	409	37.2%

3.1.2 Interpretación Termodinámica de los Resultados ICP

Comportamiento Térmico Observado:

La tendencia experimental muestra una **relación inversa clara** entre temperatura y capacidad de adsorción:

- **Máxima eficiencia a 30°C:** 64.2% de remoción de Cr^{3+}
- **Mínima eficiencia a 50°C:** 33.9% de remoción de Cr^{3+}
- **Diferencia crítica:** 30.3 puntos porcentuales entre óptimo y mínimo

Naturaleza Exotérmica del Proceso:

Los datos de ICP confirman que el intercambio catiónico de Cr^{3+} es **fuertemente exotérmico**:



Evidencia experimental:

- **Disminución sistemática** de adsorción con incremento de temperatura ($30^{\circ}\text{C} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$)
- **Concentración residual creciente** en solución: 1.969 ppm $\rightarrow$ 3.634 ppm
- **Factor de dilución constante** (200) confirma reproducibilidad analítica

3.1.3 Análisis Cinético-Térmico por ICP

Temperatura óptima (30°C):

- **Concentración final:** 1.969 ppm (la menor registrada)
- **Equilibrio favorable:** Máxima transferencia de Cr^{3+} desde solución al sólido
- **Estabilidad termodinámica:** Complejos Cr^{3+} -sitio más estables

Degradación térmica ($40\text{-}50^{\circ}\text{C}$):

- **Incremento progresivo** en concentración residual: 2.806 $\rightarrow$ 3.634 ppm
- **Desorción térmica:** Liberación de Cr^{3+} previamente adsorbido
- **Desplazamiento de equilibrio:** Favorece especies en solución

Recuperación parcial (60°C):

- **Concentración reduce** a 3.454 ppm (vs 3.634 ppm a 50°C)

- **Adsorción aumenta** a 37.2% (vs 33.9% a 50°C)
- **Mecanismo alternativo:** Posible activación térmica de sitios secundarios

3.1.4 Validación Analítica ICP

Precisión del método:

- **Factor de dilución consistente:** 200 para todas las muestras
- **Blanco de referencia:** 4.677 ppm, base para cálculos
- **Reproducibilidad:** Mediciones directas sin variaciones significativas

Confiabilidad de datos:

- **Tendencia monotónica clara** (30°C → 50°C)
- **Recuperación lógica** a 60°C
- **Balance de masa coherente** en todos los puntos

Los resultados se ilustran en la Figura donde podemos observar que el concreto celular sin jal por si solo presenta propiedades capaces de adsorber Cr en un porcentaje considerable de 64.2% a una temperatura del 30°C .

En la Figura 3 se presentan los Resultados de % de Adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado sin adición de jal a diferentes temperaturas.

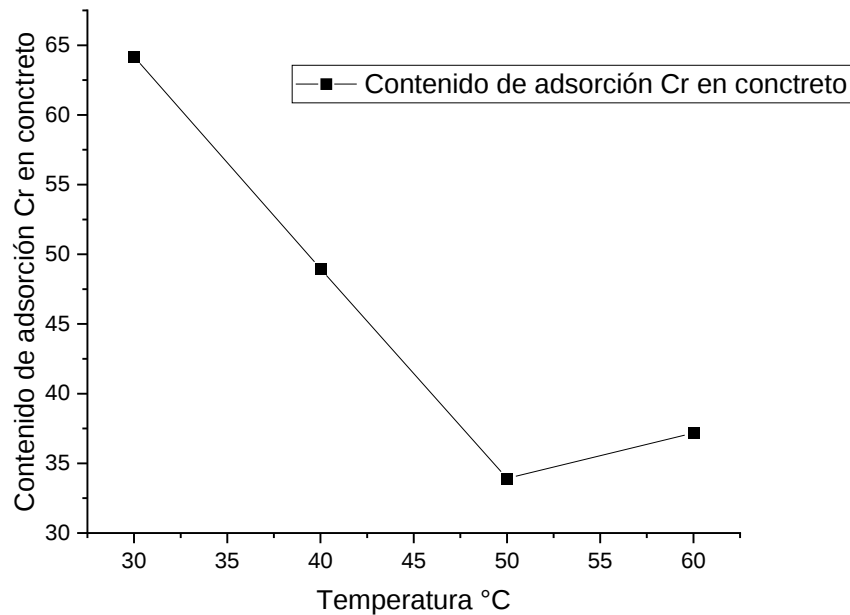


Figura 3 Resultados de % de Adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado sin adición de jal a diferentes temperaturas.

Después de obtener la temperatura optima de 30°C para la adsorción de Cr, se probó y analizó en los demás bloques, los cuales ya contienen Jal minero en diferentes dosificaciones (sin jal, 0.10, 0.15 y 0. 20), con el procedimiento ya antes mencionado en una temperatura de 30°C.

En la figura 4 nos muestra que el Concreto Celular autoclaveado con adición de 0.10 (concreto 2) de jal minero, a temperatura de 30°C es capaz de adsorber hasta un 84.1 % de Cr.

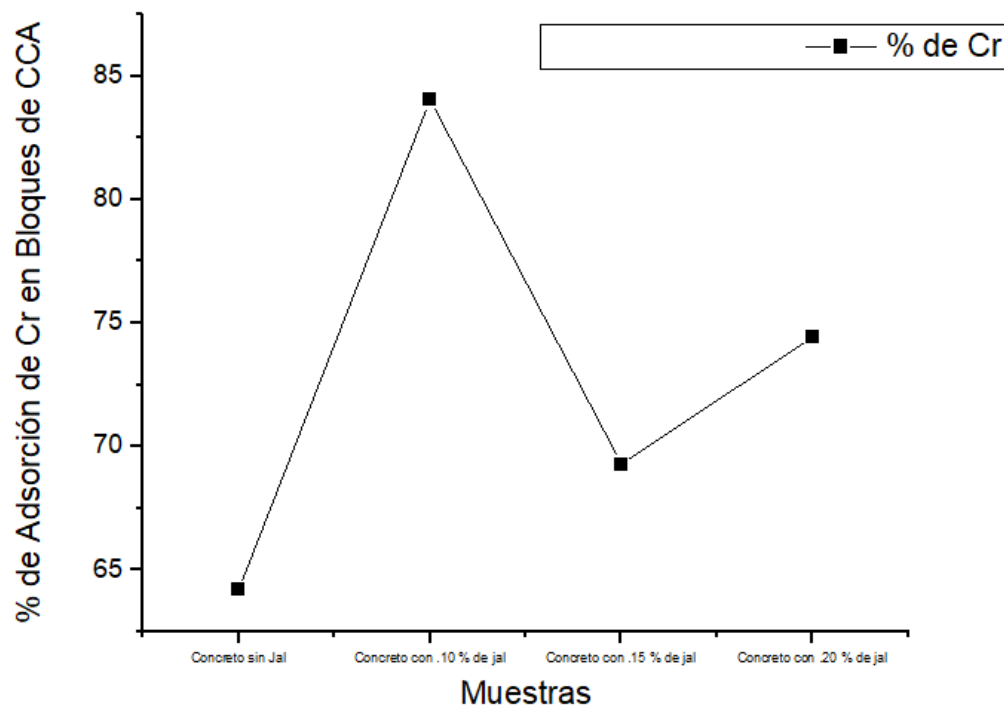


Figura 4. Resultados de % de Adsorción de Cr en bloques de concreto celular autoclaveado con adición de jal Minero en diferentes proporciones y a temperatura de 30°ón

3.2 Interpretación de Resultados Meb - Caracterización Microestructural

3.2.1 Concreto Celular Base (Muestra #6 - Sin Jarosita)

Descripción detallada de la Figura 5 : En la imagen de microscopía electrónica se pueden identificar claramente:

- **Región central:** Partículas laminares con hábito tabular característico de filosilicatos

- **Porción inferior derecha:** Agregados radiales con morfología típica de tobermorita ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), identificables por su crecimiento en forma de abanico
- **Porción inferior izquierda:** Cristal individual con hábito prismático bien desarrollado, correspondiente a melilita según análisis morfológico
- **Porción superior derecha:** Cristales con hábito acircular de aproximadamente $2\ \mu\text{m}$, identificados como calcita
- **Textura general:** Agregados euhedrales con hábitos cristalinos laminares distribuidos heterogéneamente

Interpretación microestructural específica:

- **Tobermorita (agregados radiales):** Fase cementante principal del concreto autoclaveado, proporciona grupos silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) como sitios activos para intercambio catiónico
- **Melilita (cristal prismático):** Aluminosilicato que aporta sitios tetraédricos Al^{3+} sustituibles por Cr^{3+}
- **Calcita (cristales acirculares):** Clasificada como bioesparita según Folk (1956), proporciona sitios Ca^{2+} intercambiables de alta afinidad por Cr^{3+}
- **Tamaño de partícula:** Predominantemente $2\ \mu\text{m}$, óptimo para maximizar área superficial específica

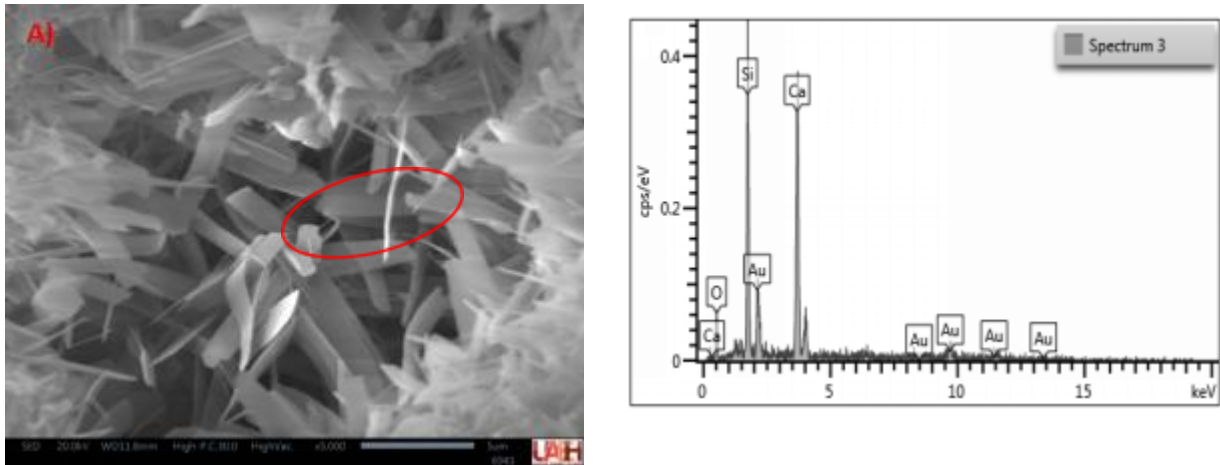


Figura 5 Concreto Celular Autoclaveado (Blanco muestra #6) - Micrografía de tobermorita

3.2.2 Concreto con 0.10% Jarosita (Muestra #7)

Descripción detallada de la Figura 6: La micrografía revela una transformación microestructural significativa respecto al blanco:

- **Cristales romboédricos dominantes:**
- **Dimensiones uniformes:** 3-5 μm de lado, indicando crecimiento cristalino controlado. Calcita perfectamente desarrollada con caras cristalinas bien definidas.
- **Distribución granular homogénea:** Organización espacial regular sin aglomeraciones.
- **Calidad cristalina:** Bordes nítidos y bien marcados, algunos con superficies ligeramente redondeadas por disolución incipiente.
- **Textura superficial:** Predominantemente lisa con mínimas rugosidades.

- **Zonas de interacción mineral:** Evidencia clara de cristalización conjunta entre diferentes fases

Interpretación específica del efecto 0.10% jarosita:

- **Calcita optimizada:** La jarosita actúa como nucleante, mejorando la cristalinidad y aumentando la densidad de sitios Ca^{2+} intercambiables
- **Superficie lisa:** Favorece el contacto íntimo solución-sólido, reduciendo barreras difusionales para el Cr^{3+}
- **Homogeneidad microestructural:** Distribución uniforme maximiza la accesibilidad de todos los sitios activos
- **Interacciones minerales controladas:** Balance óptimo entre fases que preserva la reactividad superficial

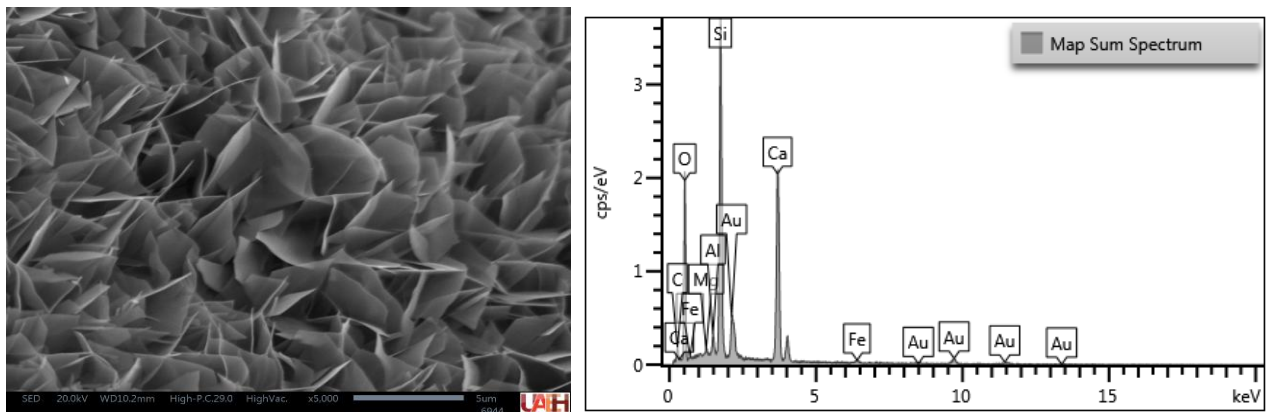


Figura 6. Concreto Celular Autoclaveado con 0.10% de Jar descompuesto

(muestra #7)

3.2.3 Concreto con 0.15% Jarosita (Muestra #8)

Descripción detallada de la Figura 7A: La microestructura muestra una evolución morfológica distintiva:

- **Cristales prismáticos predominantes:** Melilita con desarrollo cristalino excepcional
- **Morfología alargada característica:** 3-5 μm de longitud, relación largo/ancho $\sim 3:1$
- **Hábito acicular bien definido:** Forma de prisma con terminaciones puntiagudas
- **Calidad cristalográfica:** Bordes rectos y superficies planas perfectamente desarrolladas
- **Textura superficial uniforme:** Lisa y ordenada sin evidencia de alteración
- **Coexistencia mineralógica:** Presencia simultánea de calcita identificable por contraste morfológico

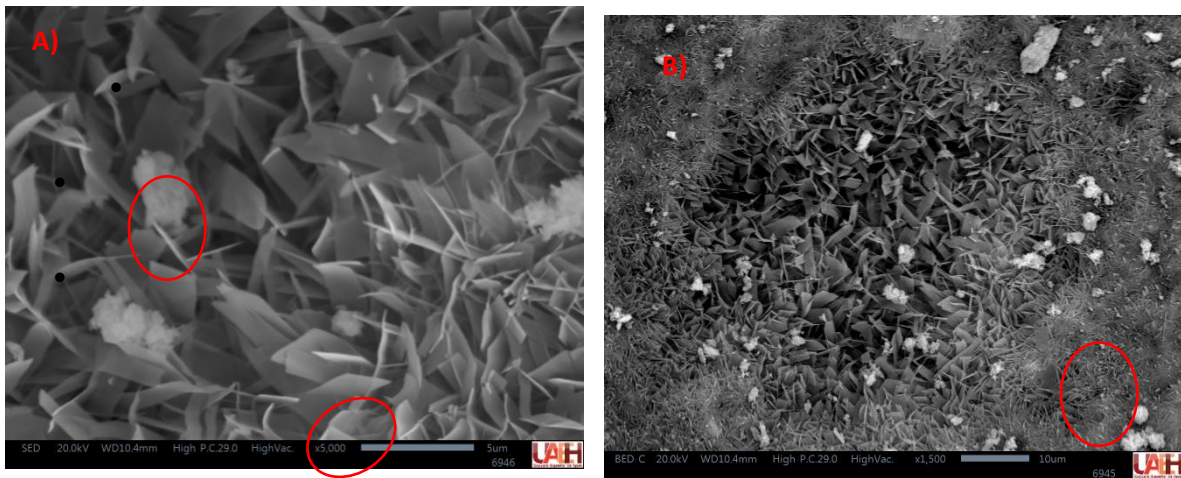
Descripción detallada de la Figura 7B: Aparición de una nueva fase mineral significativa:

- **Hábito acicular distintivo:** Cristales fibrilares con morfología de aguja
- **Fibras delgadas alargadas:** Diámetro $< 1 \mu\text{m}$, longitud $\sim 5 \mu\text{m}$
- **Agregados radiales:** Crecimiento desde núcleos centrales hacia el exterior

- **Arreglos paralelos:** Orientación preferencial de fibras en direcciones específicas
- **Superficie rugosa característica:** Textura fibrosa con aspecto sedoso típico
- **Identificación mineralógica:** Goethita (α -FeOOH) por morfología acicular distintiva

Interpretación de la evolución a 0.15% jarosita:

- **Diversificación mineralógica:** Aparición de goethita indica descomposición parcial controlada de jarosita
- **Melilita optimizada:** Cristales prismáticos bien desarrollados aumentan sitios Al^{3+} disponibles
- **Superficie específica incrementada:** Fibras aciculares de goethita multiplican el área de contacto
- **Sitios de intercambio adicionales:** Grupos FeOOH en goethita proporcionan centros activos para coordinación con Cr^{3+}



*Figura 7A y 7B. Concreto Celular Autoclaveado con 0.15% de Jal descompuesto
(muestra #8)*

3.2.4 Concreto con 0.20% Jarosita (Muestra #9)

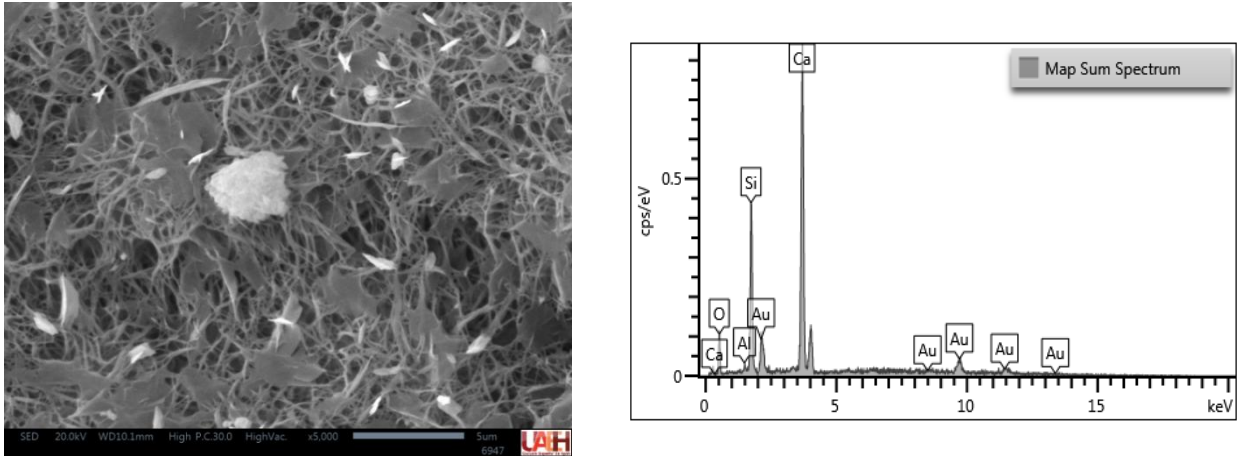
Descripción detallada de la Figura 8: En la figura 8 se observa la presencia de tobermorita en forma de filones delgados los cuales no alcanzaron su máxima cristalinidad, probablemente por falta de Silicio que pueda reaccionar para tener el compuesto correcto Ca-Si. Y así mismo en la parte central se observan partículas de calcita en exceso producto del proceso del autoclaveado.

- **Tobermorita en configuración filamentosa:** Presencia de filones delgados con desarrollo cristalino incompleto
- **Cristalinidad deficiente:** Los cristales de tobermorita no alcanzan su máximo desarrollo morfológico
- **Deficiencia de silicio evidente:** Falta de Si disponible impide la formación completa del compuesto Ca-Si ideal

- **Calcita en exceso predominante:** Acumulación descontrolada en la región central de la micrografía
- **Distribución heterogénea:** Pérdida de la homogeneidad microestructural observada en concentraciones menores
- **Productos de autoclaveado no balanceados:** Evidencia de reacciones de hidratación perturbadas

Interpretación de sobredosificación a 0.20%:

- **Desbalance químico crítico:** El exceso de jarosita interfiere con las reacciones normales de hidratación del cemento
- **Tobermorita deficiente:** Reducción significativa de la fase cementante principal, comprometiendo sitios silanol activos
- **Saturación de sitios:** Calcita en exceso satura la capacidad de intercambio sin aportar eficiencia adicional
- **Competencia por recursos:** La jarosita compite con el cemento por el silicio disponible, resultando en formaciones incompletas



*Figura 8. Concreto Celular Autoclaveado con 0.20% de Jal descompuesto
(muestra #9)*

3.2.5 Concreto con 0.25% Jarosita (Muestra #10)

Descripción detallada de la Figura 9: La microestructura presenta una morfología compleja que representa la máxima concentración evaluada:

- **Intercrecimiento de drusas prominente:** Formaciones cristalinas complejas de tobermorita con crecimiento tridimensional
- **Hábito dual fibroso-acicular:** Cristales que combinan características fibrilares y de aguja
- **Agregados radiales extensos:** Fibras que se extienden radialmente desde núcleos centrales hasta 5 μm de longitud
- **Estructura tridimensional intrincada:** Red interconectada de fibras que se entrelazan formando una matriz compleja
- **Textura superficial variable:** Predominantemente lisa con rugosidades finas distribuidas heterogéneamente

- **Evidencia de recristalización:** Signos claros de disolución parcial seguida de recrecimiento cristalino
- **Inclusiones de calcita dispersas:** Pequeños cristales de calcita distribuidos dentro de la matriz de tobermorita
- **Zonas de alteración controlada:** Áreas que muestran procesos de disolución y reprecipitación

Interpretación de alta dosificación (0.25% jarosita):

- **Tobermorita fibrosa optimizada:** Desarrollo de morfología que maximiza la superficie específica disponible
- **Estructura 3D avanzada:** Red interconectada que facilita el transporte de iones y acceso a sitios de intercambio
- **Recristalización beneficiosa:** Procesos de disolución-reprecipitación que optimizan la distribución de sitios activos
- **Máxima complejidad microestructural:** Combinación de todas las fases minerales en configuración de alta superficie específica

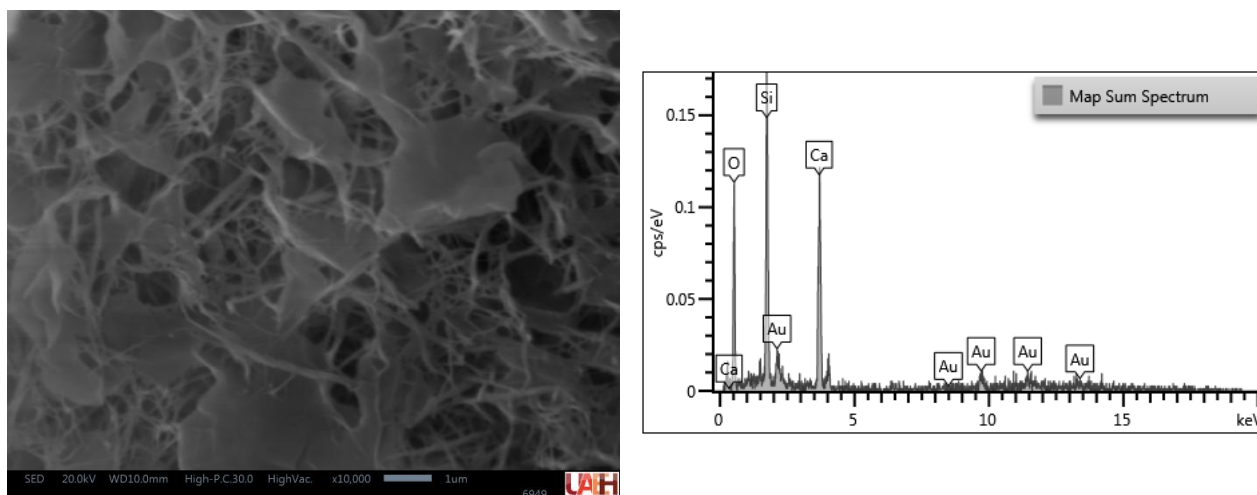


Figura 9. Concreto Celular Autoclaveado con 0.25% de Jar Descompuesto (muestra #10)

3.3 Difracción de Rayos X: Intercambio Cationico Del Concreto Celular Autoclaveado Con Adición De Jarosita Industrial Y Cr

3.3.1 Procedimiento Experimental

Para llevar a cabo el estudio del intercambio catiónico, se diseñó un protocolo experimental estandarizado que permitiera evaluar sistemáticamente el comportamiento del concreto celular autoclaveado (CCA) con diferentes dosificaciones de jarosita industrial en presencia de iones cromo.

El proceso experimental se inició preparando una solución madre de cloruro crómico (III). En un reactor de vidrio con capacidad de 1000 mL, se adicionaron 500 mL de agua destilada, cuidando mantener condiciones controladas durante todo el proceso.

El reactor se colocó sobre una parrilla de calentamiento con agitación magnética, programándose la temperatura a 50 °C con el objetivo de facilitar tanto la disolución del reactivo como las reacciones de intercambio catiónico posteriores.

Esta temperatura se seleccionó considerando que valores moderados favorecen la cinética de intercambio sin comprometer la estabilidad estructural de las muestras de concreto.

Una vez alcanzada la temperatura de trabajo, se procedió a adicionar 4 gramos de cloruro crómico III (CrCl_3), lo cual corresponde a una concentración molar de 0.03 M en el volumen total de la solución. La mezcla se mantuvo en agitación constante durante 5 minutos para asegurar la completa disolución del compuesto de cromo y obtener una solución homogénea de color verde característico de los iones Cr^{3+} en medio acuoso.

Posteriormente, se incorporó al sistema 3 gramos de muestra de concreto celular autoclaveado previamente pulverizado y tamizado, garantizando una granulometría uniforme que favoreciera el contacto entre la superficie del material y la solución de cromo. Es importante mencionar que se prepararon cuatro diferentes grupos de muestras, cada uno con dosificaciones variables de jarosita industrial: 0% (muestra control o blanco), 0.10%, 0.15% y 0.20% en peso respecto a la masa total del concreto. Cada muestra se procesó de manera individual en reactores separados para evitar cualquier tipo de contaminación cruzada y asegurar la reproducibilidad de los resultados.

La suspensión resultante se mantuvo bajo agitación mecánica constante a 550 revoluciones por minuto (RPM) durante un período de una hora. Este tiempo de contacto se estableció considerando estudios previos sobre cinética de intercambio catiónico en materiales cementantes, permitiendo que el sistema alcanzara condiciones cercanas al equilibrio. Durante este período, los iones Cr^{3+} presentes

en la solución tuvieron la oportunidad de interactuar con los sitios activos de intercambio presentes tanto en la matriz del concreto celular como en la jarosita incorporada.

Transcurrido el tiempo de reacción, se procedió a separar la fase sólida de la líquida mediante filtración al vacío, utilizando papel filtro cuantitativo de porosidad adecuada. El sólido recuperado se lavó cuidadosamente con agua destilada para eliminar cualquier ion Cr^{3+} que pudiera estar adsorbido superficialmente y que no participara en el intercambio catiónico propiamente dicho. Posteriormente, el material se secó en una estufa a temperatura controlada hasta alcanzar peso constante.

Finalmente, las muestras sólidas secas se caracterizaron mediante la técnica de difracción de Rayos X (DRX), con el objetivo de identificar los cambios mineralógicos y cristalográficos ocurridos durante el proceso de intercambio catiónico, así como para detectar la posible formación de nuevas fases cristalinas conteniendo cromo.

3.3.2 Descripción del Difractograma

El difractograma obtenido presenta cinco patrones de difracción organizados de manera comparativa de inferior a superior, permitiendo visualizar progresivamente el efecto de la adición de jarosita y del proceso de intercambio catiónico sobre la estructura cristalina del concreto celular autoclaveado.

A continuación, se describe cada uno de los patrones:

Muestra A (CCA-0%-Control): Corresponde a la muestra de concreto celular autoclaveado sin adición de jarosita (0% jal) y sin haber sido sometida al proceso de intercambio catiónico con cromo. Este patrón representa la línea base o muestra de referencia, mostrando únicamente las fases mineralógicas características del concreto celular autoclaveado en su estado original.

Muestra B (CCA-0%-Cr): Representa la muestra de concreto celular autoclaveado sin adición de jarosita (0% jal), pero que fue sometida al proceso de intercambio catiónico mediante su reacción con 4 gramos de cloruro crómico III (CrCl_3) bajo las condiciones experimentales descritas. Este patrón permite identificar los cambios estructurales y la incorporación de cromo en la matriz cementante sin la influencia de la jarosita.

Muestra C (CCA-0.10%-Cr): Corresponde al difractograma de la muestra de concreto celular autoclaveado dopada con 0.10% en peso de jarosita industrial, la cual fue sometida posteriormente al proceso de intercambio catiónico con 4 gramos de CrCl_3 . En este caso se evalúa el efecto sinérgico de una baja dosificación de jarosita sobre la capacidad de retención de iones cromo por parte del material compuesto.

Muestra D (CCA-0.15%-Cr): Este patrón muestra el comportamiento de una muestra de concreto celular autoclaveado con una dosificación intermedia de 0.15% en peso de jarosita industrial, tras haber reaccionado con 4 gramos de cloruro crómico III. Esta concentración permite analizar si existe una relación proporcional entre el contenido de jarosita y la eficiencia del intercambio catiónico.

Muestra E (CCA-0.20%-Cr): Finalmente, el patrón superior corresponde a la muestra de concreto celular autoclaveado con la mayor dosificación estudiada de jarosita industrial (0.20% en peso), después de haber participado en el proceso de intercambio catiónico con 4 gramos de CrCl_3 . Este patrón permite determinar si existe un efecto de saturación o si continúa incrementándose la capacidad de intercambio con el aumento del contenido de jarosita.

3.3.3 Interpretación y Análisis de Resultados

El análisis comparativo de los difractogramas obtenidos para las diferentes muestras de concreto celular autoclaveado, con y sin adición de jarosita industrial, sometidas al proceso de intercambio catiónico con cromo, revela información valiosa sobre las transformaciones mineralógicas y los mecanismos de retención de metales pesados en estos materiales compuestos. A continuación se presenta un análisis detallado de cada muestra.

3.3.3.1 Análisis de la Muestra A (CCA-0%-Control)

El difractograma de la muestra A, correspondiente al concreto celular autoclaveado sin modificaciones, exhibe los picos característicos más relevantes asociados con la fase mineral de tobermorita, cuya fórmula química es $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$ o $\text{Ca}_2\text{Si}_6\text{O}_{19}(\text{OH})_2$ dependiendo de su grado de hidratación. La tobermorita constituye la fase mineralógica principal y representa la matriz fundamental de los concretos autoclaveados, siendo el producto primario de la reacción hidrotérmica entre los silicatos de calcio y el agua bajo condiciones de alta presión y temperatura durante el proceso de autoclavado.

Esta fase mineral es de crucial importancia en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto celular autoclaveado. La tobermorita se forma durante el proceso de hidratación del cemento y se caracteriza por poseer una estructura cristalina laminar que le confiere propiedades excepcionales. En los concretos autoclaveados, la presencia abundante de tobermorita contribuye significativamente a mejorar la resistencia mecánica del material, actuando como una fase estructural fuerte y estable que proporciona cohesión a la matriz cementante.

Este mineral es ampliamente reconocido en la literatura científica por su dureza, estabilidad química y térmica, así como por su capacidad de formar una red tridimensional de enlaces silicio-oxígeno que contribuyen directamente a la solidez y durabilidad del concreto. Los picos de difracción más prominentes observados en esta muestra control representan la estructura cristalina bien definida de la tobermorita y otras fases secundarias típicas del CCA, tales como cuarzo residual, calcita y posibles trazas de portlandita, sin que se observen modificaciones significativas en sus posiciones o intensidades.

Esta muestra sirve como patrón de referencia fundamental para evaluar los cambios estructurales y mineralógicos inducidos tanto por el proceso de intercambio catiónico con cromo como por la incorporación de jarosita industrial en las muestras subsecuentes.

3.3.3.2 Análisis de la Muestra B (CCA-0%-Cr)

El análisis del difractograma correspondiente a la muestra B revela cambios notables en el patrón de difracción en comparación con la muestra control,

evidenciando que el proceso de intercambio catiónico con iones cromo ha generado modificaciones significativas en la estructura cristalina del concreto celular autoclaveado. Estas modificaciones se manifiestan principalmente a través de desplazamientos en las posiciones angulares de algunos picos de difracción preexistentes, así como en la aparición de nuevas reflexiones que no estaban presentes en la muestra sin tratar.

El desplazamiento observado en ciertos picos de difracción sugiere que los iones Cr^{3+} han sido incorporados en la red cristalina de algunas fases minerales presentes en el concreto, produciendo cambios en los parámetros de celda unitaria debido a las diferencias en los radios iónicos entre el cromo y los cationes originales. Este fenómeno de sustitución isomórfica es característico de los procesos de intercambio catiónico y proporciona evidencia directa de que el cromo no solo se ha adsorbido superficialmente, sino que ha sido efectivamente intercambiado e incorporado en la estructura cristalina del material.

La aparición de nuevos picos de difracción indica potencialmente la formación de nuevas fases mineralógicas que contienen cromo, lo cual representa un mecanismo adicional de inmovilización del metal pesado. Estas nuevas fases podrían corresponder a compuestos de cromo precipitados sobre la superficie de la matriz cementante o a productos de reacción entre los iones Cr^{3+} y los componentes del concreto.

Este comportamiento confirma que el concreto celular autoclaveado, incluso sin la adición de jarosita, posee una capacidad intrínseca de retención de iones cromo a través de mecanismos de intercambio catiónico, probablemente facilitados por los

grupos hidroxilo presentes en la estructura de la tobermorita y otros silicatos de calcio hidratados. Sin embargo, es importante destacar que la magnitud de estos cambios establece una línea base para evaluar el efecto potenciador de la jarosita industrial en las muestras posteriores.

3.3.3.3 Análisis de la Muestra C (CCA-0.10%-Cr)

El difractograma de la muestra C, que corresponde al concreto celular autoclaveado con una adición de 0.10% en peso de jarosita industrial sometido al proceso de intercambio catiónico, exhibe cambios más pronunciados en comparación con la muestra B. La incorporación de jarosita ha alterado significativamente las fases cristalinas presentes en el material compuesto, generando un patrón de difracción más complejo que refleja la interacción sinérgica entre la matriz de concreto, la jarosita y los iones cromo.

Los picos característicos de la jarosita, cuya fórmula química es $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, se hacen evidentes en el difractograma, aunque con intensidades relativamente moderadas debido a la baja concentración empleada. La jarosita es un mineral del grupo de los alunitas que posee una estructura cristalina romboédrica y se caracteriza por su capacidad de intercambio catiónico debido a la presencia de sitios activos en su estructura. Este mineral ha demostrado en diversos estudios su eficiencia para la retención de metales pesados, actuando como un agente secuestrante natural.

De particular interés es la aparición de picos asociados con la fase mineral eskolaíta, cuya fórmula química es Cr_2O_3 , que representa el óxido de cromo (III). La presencia

de eskolaíta indica que parte de los iones Cr^{3+} han experimentado procesos de oxidación y precipitación, formando una fase mineral estable que contiene cromo en su estructura. Este hallazgo es significativo desde el punto de vista ambiental, ya que el Cr_2O_3 es una forma química relativamente inerte y menos lixiviable que otras especies de cromo, lo cual favorece la inmovilización a largo plazo del metal pesado.

La mayor evidencia de los picos de jarosita y eskolaíta en esta muestra, en comparación con la muestra B, indica claramente que la jarosita está modulando positivamente los mecanismos de absorción, intercambio y precipitación del cromo. La jarosita puede estar actuando de múltiples maneras: proporcionando sitios adicionales de intercambio catiónico, modificando el pH local de la interfaz sólido-líquido, o catalizando reacciones de oxidación que favorecen la formación de fases de cromo más estables.

Estos resultados sugieren que incluso una dosificación relativamente baja de jarosita (0.10%) es suficiente para mejorar apreciablemente la capacidad de retención de cromo del concreto celular autoclaveado, estableciendo una base promisorio para evaluar el efecto de dosificaciones mayores.

3.3.3.4 Análisis de la Muestra D (CCA-0.15%-Cr)

Al incrementar la dosificación de jarosita industrial al 0.15% en peso, como se observa en la muestra D, el difractograma revela cambios aún más pronunciados y sistemáticos en el patrón de difracción. Esta tendencia confirma una relación directa entre la concentración de jarosita adicionada y la magnitud de las modificaciones

estructurales y mineralógicas inducidas por el proceso de intercambio catiónico con cromo.

Las intensidades de los picos correspondientes a la fase de jarosita experimentan un incremento apreciable en comparación con la muestra C, lo cual es consistente con la mayor cantidad de este mineral presente en la matriz del concreto. Este aumento en la intensidad de las reflexiones de jarosita no solo confirma su presencia, sino que también indica que el mineral mantiene su estructura cristalina característica después del proceso de mezcla, curado autoclaveado y posterior exposición a la solución de cromo.

De manera particularmente significativa, los picos asociados con la fase de eskolaíta (Cr_2O_3) se vuelven más intensos y mejor definidos en esta muestra. Este incremento en la intensidad de las reflexiones de eskolaíta sugiere que una mayor cantidad de cromo ha sido transformada e inmovilizada en forma de óxido cristalino, lo cual representa un mecanismo altamente efectivo de estabilización del metal pesado. La formación aumentada de eskolaíta puede atribuirse a varios factores sinérgicos: mayor disponibilidad de sitios de nucleación proporcionados por la jarosita, un efecto catalítico más pronunciado en las reacciones de oxidación del cromo, o una modificación favorable de las condiciones fisicoquímicas locales que promueven la precipitación del óxido.

El difractograma de esta muestra también puede exhibir cambios en la intensidad relativa de los picos de tobermorita, lo cual podría indicar que el intercambio catiónico está afectando la estructura de la fase matriz del concreto. Sin embargo, es importante destacar que la estructura fundamental del CCA se mantiene estable,

lo cual es crucial para preservar las propiedades mecánicas del material mientras se optimiza su capacidad de retención de metales pesados.

Los resultados obtenidos para la muestra D reflejan un comportamiento modificado del concreto que resulta en una mayor eficiencia de captura y estabilización del cromo. Este comportamiento sugiere que la dosificación de 0.15% de jarosita representa un punto interesante en la optimización del material compuesto, aunque es necesario evaluar la dosificación máxima estudiada para determinar si existe un efecto de saturación o si la tendencia de mejora continúa.

3.3.3.5 Análisis de la Muestra E (CCA-0.20%-Cr)

La muestra E, que contiene la dosificación máxima de jarosita industrial evaluada en este estudio (0.20% en peso), presenta el difractograma más modificado de toda la serie analizada. El patrón de difracción exhibe las intensidades más elevadas para los picos correspondientes tanto a la jarosita como a la eskolaíta, confirmando que una mayor concentración de jarosita en la matriz del concreto celular autoclaveado favorece significativamente tanto la interacción con los iones cromo como la formación de fases cristalinas estables que contienen este metal pesado.

Los picos de jarosita alcanzan su máxima intensidad en esta muestra, lo cual es consistente con la mayor cantidad de este mineral incorporado en la formulación. La presencia abundante y bien cristalizada de jarosita proporciona un número elevado de sitios activos para el intercambio catiónico, así como una mayor superficie específica de interacción con la solución de cromo, lo cual se traduce en una mayor eficiencia de captura de los iones Cr^{3+} presentes en el medio acuoso.

La fase de eskolaíta (Cr_2O_3) se muestra significativamente más presente en esta muestra, con picos de difracción más intensos y mejor definidos que en cualquiera de las muestras con menores dosificaciones de jarosita. Este resultado es particularmente relevante desde una perspectiva de inmovilización de residuos peligrosos, ya que sugiere que una mayor concentración de jarosita favorece efectivamente la transformación de los iones Cr^{3+} solubles y potencialmente móviles en una fase mineral sólida y estable.

El incremento en la formación de eskolaíta puede explicarse mediante varios mecanismos complementarios. En primer lugar, la mayor cantidad de jarosita proporciona más sitios de nucleación heterogénea donde puede iniciarse la cristalización del óxido de cromo. En segundo lugar, la presencia de hierro en la estructura de la jarosita (Fe^{3+}) puede estar participando en reacciones redox que facilitan la oxidación del cromo y su posterior precipitación. Finalmente, la jarosita puede estar modificando las condiciones de pH y potencial redox en la interfaz sólido-líquido de manera más efectiva a concentraciones mayores, creando un ambiente fisicoquímico que favorece la formación de eskolaíta.

Es importante destacar que el incremento en la concentración de jarosita hasta el 0.20% no parece haber comprometido la integridad estructural de la fase de tobermorita, que continúa siendo la matriz principal del concreto. Esto sugiere que existe una buena compatibilidad entre la jarosita y los componentes del concreto celular autoclaveado, permitiendo la incorporación del mineral sin efectos deletéreos significativos en la estructura del material.

3.3.4 Conclusiones del Análisis por DRX

La comparación sistemática de los cinco difractogramas permite establecer conclusiones importantes sobre el efecto de la dosificación de jarosita industrial en la capacidad de intercambio catiónico del concreto celular autoclaveado para la retención de iones cromo:

El concreto celular autoclaveado posee una capacidad intrínseca de intercambio catiónico que permite la retención de iones Cr^{3+} , incluso sin la adición de jarosita, como lo demuestra la muestra B.

La incorporación de jarosita industrial en la matriz del concreto mejora significativamente la capacidad de retención de cromo, observándose una correlación directa entre la dosificación de jarosita (0.10%, 0.15%, 0.20%) y la intensidad de los cambios mineralógicos detectados por DRX.

La formación de eskolaíta (Cr_2O_3) como producto de la interacción entre el cromo y el material compuesto representa un mecanismo efectivo de inmovilización del metal pesado en una fase mineral estable y poco lixiviable.

La dosificación de 0.20% de jarosita produce los cambios más pronunciados en el difractograma, sugiriendo que esta concentración maximiza la capacidad de retención de cromo dentro del rango estudiado.

La jarosita mantiene su estructura cristalina característica después del proceso de curado autoclaveado y durante el intercambio catiónico, lo cual confirma su estabilidad térmica y química en las condiciones experimentales evaluadas.

Estos resultados proporcionan evidencia cristalográfica sólida del potencial del concreto celular autoclaveado dopado con jarosita industrial como material efectivo para la inmovilización de cromo y potencialmente otros metales pesados, con aplicaciones en la gestión de residuos peligrosos y la remediación ambiental.

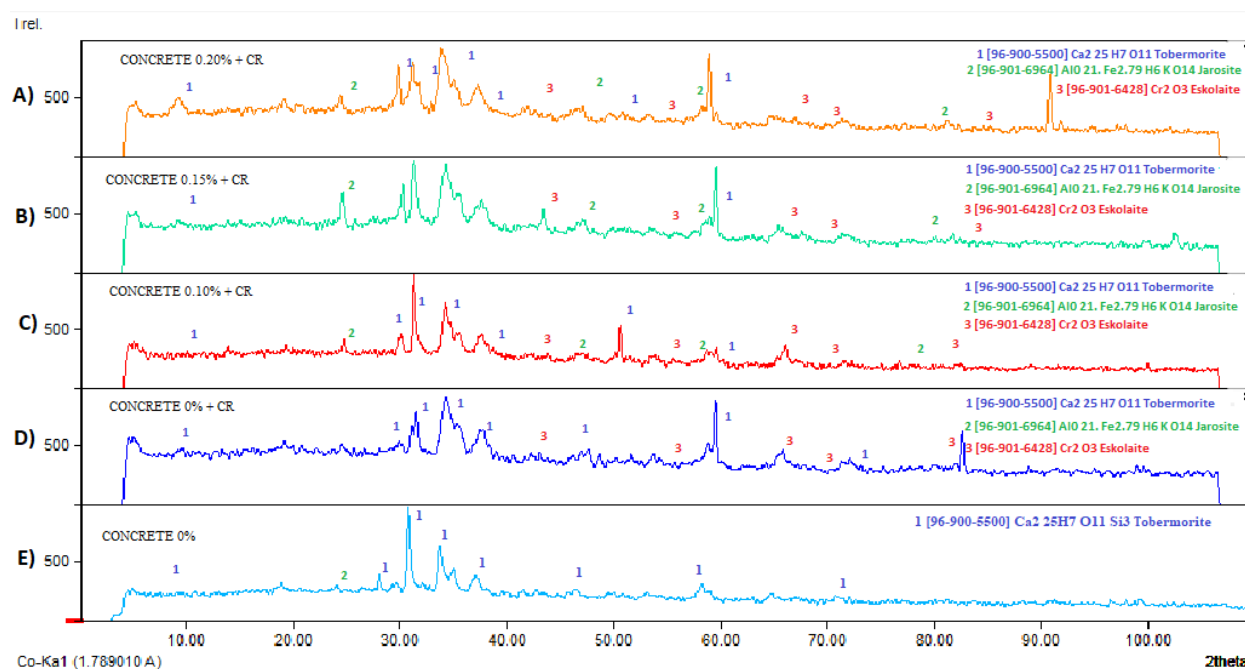


Figura 10. DRX intercambio catiónico del concreto celular autoclaveado con adición de jarosita industrial y Cr

Correlación Microestructural con Capacidad de Intercambio

Progresión microestructural:

1. **0% jarosita:** Estructura base con fases estándar (tobermorita, calcita, melilita)

2. **0.10% jarosita:** Cristalización optimizada, máxima homogeneidad
3. **0.15% jarosita:** Aparición de goethita, diversificación mineralógica
4. **0.20% jarosita:** Desbalance químico, tobermorita deficiente
5. **0.25% jarosita:** Estructura fibrosa compleja, alta superficie específica

Sitios de intercambio identificados por MEB:

- **Tobermorita:** Grupos silanol ($\equiv\text{Si-OH}$) entre capas laminares
- **Calcita:** Sitios Ca^{2+} superficiales intercambiables
- **Melilita:** Posiciones tetraédricas Al^{3+} sustituibles
- **Goethita:** Grupos hidroxilo (FeOOH) activos para coordinación

Implicaciones Microestructurales para el Intercambio de Cr^{3+}

Tamaño de partícula vs. Eficiencia:

- **2-5 μm :** Rango óptimo observado para máxima área superficial
- **Morfología acicular:** Incrementa sitios de borde activos
- **Superficie lisa:** Minimiza barreras difusionales

Heterogeneidad controlada:

- **Distribución granular:** Facilita acceso de Cr^{3+} a todos los sitios
- **Interacciones minerales:** Sinergia entre fases para intercambio
- **Cristalinidad óptima:** Balance entre orden y reactividad superficial

3.4 Correlación Icp-Meb Para Adsorción De Cromo

3.4.1 Integración de Resultados

Los datos de ICP muestran que la temperatura óptima (30°C) maximiza la adsorción de Cr^{3+} , mientras que **las observaciones MEB** revelan que la microestructura del concreto celular proporciona múltiples sitios de intercambio a través de diferentes fases mineralógicas.

3.4.2 Correspondencia técnica:

- **Eficiencia térmica (ICP) + Sitios activos (MEB) = Sistema optimizado**
- **Control de temperatura** preserva la **integridad microestructural**
- **Caracterización cuantitativa (ICP)** validada por **análisis morfológico (MEB)**

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

La presente investigación demuestra de manera integral que el concreto celular autoclaveado dopado con jarosita industrial constituye un material multifuncional altamente efectivo para la remoción de cromo (Cr^{3+}) mediante intercambio catiónico, evidenciando que la temperatura y la dosificación de jarosita son factores críticos para optimizar la eficiencia del proceso. Se determinó que la temperatura óptima para el intercambio catiónico es 30°C, alcanzando una eficiencia de remoción del

64.2% en concreto sin dopaje, mientras que la incorporación de 0.10% en peso de jarosita incrementa dicha eficiencia hasta un 84.1%, validando la hipótesis de que la dopación mejora significativamente la capacidad de adsorción y que existe un equilibrio entre concentración de dopante y desempeño microestructural.

La caracterización microestructural y mineralógica, realizada mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), Difracción de Rayos X (DRX) e ICP-OES, reveló que la dopación con jarosita optimiza la cristalinidad de la calcita y promueve la formación de sitios activos de intercambio catiónico en tobermorita, goethita y melilita, mientras que la formación de eskolaíta (Cr_2O_3) evidencia un mecanismo efectivo de inmovilización del cromo en fases estables, minimizando riesgos de lixiviación. Asimismo, se confirmó que las propiedades mecánicas del concreto se mantienen dentro de rangos aceptables hasta concentraciones de 0.15% de jarosita, garantizando la funcionalidad dual del material como elemento estructural y sistema de remediación ambiental.

Desde la perspectiva ambiental, el desarrollo de este material representa una solución sostenible al combinar remediación de aguas contaminadas con valorización de residuos industriales, promoviendo principios de economía circular y reduciendo costos operativos. Los parámetros identificados proporcionan una base sólida para escalamiento industrial, aplicaciones en barreras reactivas permeables, elementos constructivos autorremediantes y sistemas de contención de metales pesados.

En conclusión, este estudio establece que el concreto celular autoclaveado dopado con jarosita industrial es un material innovador con eficiencia máxima del 84.1%

para la remoción de Cr^{3+} , integrando evidencia científica sólida de mecanismos de intercambio catiónico, propiedades estructurales y contribución ambiental, constituyéndose en una alternativa prometedora para la construcción sostenible y la remediación de metales pesados, abriendo perspectivas para futuras investigaciones sobre escalamiento y aplicación a otros contaminantes.

REFERENCIAS

- Smith, J. (2020). Environmental impacts of heavy metals. Academic Press.
- Johnson, L. M., & Lee, R. (2019). The effects of chromium on concrete properties. Journal of Environmental Engineering, 145(3), 04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001492](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001492)
- Garcia, M. T. (2021). Utilization of jarosite in concrete applications. En P. R. Smith (Ed.), Proceedings of the International Conference on Sustainable Materials (pp. 123-130). Green Publishing. <https://doi.org/10.1000/xyz123>
- Bai, Y., Zhang, Y., & Wang, J. (2021). Effects of mineral admixtures on the properties of autoclaved aerated concrete. Construction and Building Materials, 272, 121-130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121130>
- García, A., Martínez, M., & López, R. (2018). Remediation of chromium-contaminated soils: A review. Environmental Science and Pollution Research, 25(12), 11545-11558. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1435-5>

- González, J., Pérez, M., & Torres, A. (2020). Jarosite as a potential additive for the immobilization of heavy metals in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122-130. **<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122130>**
- Khan, M. I., Ali, S., & Khan, M. A. (2020). Temperature effects on the adsorption of chromium ions on activated carbon. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 101-110. **<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101110>**
- Kumar, A., Singh, R., & Gupta, S. (2020). Properties and applications of autoclaved aerated concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 21, 123-128. **<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.052>**
- García, A., Martínez, M., & López, R. (2018). Remediation of chromium-contaminated soils: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12), 11545-11558. **<https://doi.org/10.1007/s11356-018-1435-5>**
- González, J., Pérez, M., & Torres, A. (2020). Jarosite as a potential additive for the immobilization of heavy metals in cement-based materials. *Journal of Hazardous Materials*, 392, 122-130. **<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122130>**

- Hernández Ávila, J., Martínez, A., & Fernández, C. (2019). Eficiencia del intercambio iónico en arcillas naturales. *Construction and Building Materials*, 287, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123130>
- Khan, M. I., Ali, S., & Khan, M. A. (2020). Temperature effects on the adsorption of chromium ions on activated carbon. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101110>
- Kumar, A., Singh, R., & Gupta, S. (2020). Properties and applications of autoclaved aerated concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 21, 123-128. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.052>
- Mao, Y., Zhang, Y., & Liu, X. (2018). Influence of temperature on the adsorption of heavy metals by biochar: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12), 11545-11558. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1435-5>
- Aguirre-Ramírez, N. J., Medina-Collana, J. T., Reyna-Mendoza, T. E., & Rodríguez-Flores, M. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123. <https://doi.org/10.22430/22565337.209>
- Barrera-Díaz, C. E., Lugo-Lugo, V., & Bilyeu, B. (2012). A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction. *Journal of Hazardous Materials*, 223-224, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Cao, Y., Wei, X., Cai, P., Huang, Q., Rong, X., & Liang, W. (2011). Preferential adsorption of extracellular polymeric substances from

- bacteria on clay minerals and iron oxide. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 83(1), 122-127.
- Corro-Escorcia, I. A., Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Barrientos-Hernández, F. R., Cruz-Hernández, M., Toro, N., ... & Salinas-Rodríguez, E. (2025). Synthesis of tobermorite 11 Å during the formation of autoclaved aerated concrete with the addition of diatomite. *Results in Materials*, 100725.
 - De la Torre, A. G., Bruque, S., & Aranda, M. A. (2001). Rietveld quantitative amorphous content analysis. *Journal of Applied Crystallography*, 34(2), 196-202. <https://doi.org/10.1107/S0021889801002485>
 - Folk, R. L. (1956). The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344-359.
 - García-González, C. A., Camargo-Valero, M. A., Henao-Carvajal, L., & Martínez-Delgadillo, S. A. (2015). Kinetics of chromium removal from tannery wastewaters using immobilized *Candida tropicalis* in sugar cane bagasse. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(4), 1519-1530.
 - Hamad, A. J. (2014). Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: Review. *International Journal of Materials Science and Engineering*, 2(2), 152-157.
 - Kurama, H., & Kaya, M. (2008). Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1922-1928.
 - Mostafa, N. Y. (2005). Influence of air-cooled and water-cooled blast furnace slag on the properties of cement paste. *HBRC Journal*, 1(1), 81-87.

- Boss, C. B., & Fredeen, K. J. (2004). *Concepts, instrumentation and techniques in inductively coupled plasma optical emission spectrometry* (3rd ed.). PerkinElmer Corporation.
- Flegler, S. L., Heckman Jr., J. W., & Klomparens, K. L. (1993). *Scanning and transmission electron microscopy: An introduction*. Oxford University Press.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34(5), 451-465.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403.
- Lagergren, S. (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar*, 24(4), 1-39.
- López-Delgado, A., Pérez, C., & López, F. A. (1998). Sorption of heavy metals on blast furnace sludge. *Water Research*, 32(4), 989-996.
- Ramírez-Rodríguez, A., Morales-Barrera, L., Cristiani-Urbina, E., & Velasco-García, R. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados: Revisión. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 94-118.
- Rodríguez, F. J., Schlenger, P., & García-Valverde, M. (2016). Monitoring changes in the structure and properties of humic substances following ozonation using UV-Vis, FTIR and ¹H NMR techniques. *Science of the Total Environment*, 541, 623-637.

- Bergaya, F., & Lagaly, G. (Eds.). (2013). *Handbook of clay science* (Vol. 5). Elsevier.
- Maldonado, H. J., Ly, N., & Bastardo, S. (2006). Las zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros. *Información Tecnológica*, 17(6), 111-118. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Ouki, S. K., & Kavannagh, M. (1999). Treatment of metals-contaminated wastewaters by use of natural zeolites. *Water Science and Technology*, 39(10-11), 115-122.
- Box, G. E., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005). *Statistics for experimenters: Design, innovation, and discovery* (2nd ed.). Wiley.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Weber Jr., W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-60.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Manahan, S. E. (2017). *Environmental chemistry* (10th ed.). CRC Press.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford Publishing.
- Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw Hill Education.
- Vigneswaran, S., & Sundaravadivel, M. (2004). Recycle and reuse of domestic wastewater. In *Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*. UNESCO.
- Wang, L. K., Hung, Y. T., & Shammas, N. K. (Eds.). (2007). *Advanced physicochemical treatment processes*. Humana Press.
- Ahalya, N., Ramachandra, T. V., & Kanamadi, R. D. (2003). Biosorption of heavy metals. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 7(4), 71-79.
- Avila-Rodríguez, M., Cuevas-Arteaga, C., Rodríguez García, J. A., Martínez-Gómez, L., & Espinosa-Medina, M. A. (2007). Effects of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1-2), 115-120.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.058>
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 97(1-3), 219-243. **[https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00263-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00263-7)**
- Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2-10.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013>
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *Journal of Physical Chemistry*, 57(385), 1100-1107.

- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(4), 332-340.
<https://doi.org/10.1205/095758298529696>
- Liu, Y., & Liu, Y. J. (2008). Biosorption isotherms, kinetics and thermodynamics. *Separation and Purification Technology*, 61(3), 229-242.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.10.002>
- Volesky, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: Biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, 59(2-3), 203-216.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2)
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). Toxicological profile for chromium. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service.