



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales
Doctorado en Ciencias de los Materiales**

**“Caracterización Y Comportamiento Capacitivo De Xenotima
Del Estado De Hidalgo”**

T E S I S

Que para obtener el título de:

Licenciado en ingeniería de Materiales

P R E S E N T A

Abel Flores Cruz

Directores de Tesis

Dr. Juan Hernández Ávila.

Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

Mineral de la Reforma, Hgo., agosto 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 19 de septiembre de 2025

Número de control: ICBI-D/1684/2025

Asunto: Autorización de impresión.

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

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 al egresado de la Licenciatura en Ingeniería de Materiales **Abel Flores Cruz**, quien presenta el trabajo de titulación "**Caracterización y comportamiento capacitivo de xenotima del Estado de Hidalgo**", 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. Eduardo Cerecedo Sáenz

Secretario: Dra. Monserrat Cruz Hernández

Vocal: Dr. Juan Hernández Ávila

Suplente: Dr. Javier Flores Badillo

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

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

QVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

Índice

Índice	1
Tabla de Ilustraciones	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	6
Abstract.....	8
Capítulo 1 Introducción	11
Introducción	11
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
Hipótesis	13
Justificación	14
Capítulo 2 Marco Teórico	16
Marco Teórico.....	16
Importancia De Los Elementos De Tierras Raras (ETR) Y La Xenotima	16
Ambientes geológicos de la xenotima a escala global	16
Rifts Como Fábricas Metalogenéticas De ETR	17
Marco Geológico Regional: El Rift De Molango (Hidalgo, México)	18
Formación Atotonilco El Grande: Estratigrafía, Litología Y Cronología.....	18
Antecedentes Mineralógicos De La Xenotima En Atotonilco El Grande	19
Historia De Exploración Local Y Correlaciones Con Otros Distritos	19
Materiales Dieléctricos	19
Teoría De Band-Gap	20
Clasificación De Materiales Dieléctricos	21
Aplicaciones De Materiales Dieléctricos	21
Control Tectónico Y Evolución Del Yacimiento Atotonilco El Grande	22
Caracterización Estructural	22
Comportamiento Capacitivo Y Propiedades Dieléctricas	23
Teoría de la temperatura de Curie en materiales piezoeléctricos	24
La determinación experimental de la temperatura de Curie	24
Soluciones Sólidas.....	25

Reglas De Hume-Rothery	25
Aplicaciones Tecnológicas Y Materiales Derivados	27
Formación Atotonilco El Grande.	27
Capítulo 3 Materiales Y Métodos	30
Materiales y métodos.....	30
Obtención de muestra (xenotima).....	30
Caracterización Química Y Mineralógica	31
Técnicas de caracterización.....	32
Representación de Estructuras Cristalinas en VESTA	32
Difracción De Rayos X (DRX)	33
Preparación de la muestra.....	34
Microscopía Electrónica De Barrido (MEB)	35
Preparación de muestra	36
Microscopía De Fuerza Atómica (AFM)	37
Espectroscopía Fotoelectrónica De Rayos X (XPS)	38
Medición De Conductancia Eléctrica	39
Capítulo 4 Resultados.....	41
Resultados.....	41
Descripción De La Estructura Tipo Rift Y La Mineralización Asociada	41
Difracción De Rayos X (XRD)	45
Espectroscopía Fotoelectrónica De Rayos X (XPS)	48
Microscopía Electrónica De Barrido (SEM-EDS)	50
Microscopía De Fuerza Atómica (AFM)	53
Caracterización Térmica Y Eléctrica De La Xenotima	54
Capítulo 5 Discusión.....	62
Discusión	62
Conclusiones	67
Referencias.....	70

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Xenotima.....	11
Ilustración 2. Ubicación geográfica del área de estudio, en el estado de Hidalgo.....	28
Ilustración 3.Difractometro Marca Inel, modelo Equinox 2000	34
Ilustración 4.Espectroscopia Fotoelectronica de rayos x (XPS).	36
Ilustración 5.Equipo Brunker Multimode 8. Bruker. (2023). Bruker. https://www.bruker.com/en/index.html	37
Ilustración 6.Espectrometro K-ALPHA (Thermo Scientific) (XPS). Thermo Fisher Scientific. (2023). Thermo Fisher Scientific.	38
Ilustración 7.Multímetro Fluke 189 de alta precisión.	39
Ilustración 8.Rift Molango	41
Ilustración 9.Espectro De Difracción De Rayos X De La Muestra De Xenotima	45
Ilustración 10.Estructuras Cristalinas Y Morfologías De ZrP_2O_7 (A), Xenotima-(Y) (B), Pretulita (C) Y Xenotima-(Yb) (D).....	46
Ilustración 11.Espectros XPS del mineral xenotima.	50
Ilustración 12.Caracterización correlativa mediante MEB–EDS y mapeo elemental de fases minerales metasomáticas: morfología, composición química y distribución espacial.	51
Ilustración 13.Análisis de topografía superficial mediante AFM: xenotima (A) y resultados de la muestra (B).	53
Ilustración 14.Caracterización de la muestra de xenotima: (A) análisis eléctrico, (B) análisis térmico.	55
Ilustración 15.Montaje para la caracterización térmica de la muestra de xenotima.	57

Agradecimientos

El presente trabajo de tesis representa no solo el esfuerzo académico de varios años, sino también el resultado de la constancia, el apoyo y la inspiración de muchas personas e instituciones que me han acompañado a lo largo de este camino.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para superar cada reto, así como la paciencia para enfrentar las dificultades que se presentaron durante mi formación.

A mi familia, mi más sincero agradecimiento. A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios y su ejemplo de responsabilidad, disciplina y perseverancia. Ellos han sido mi mayor motivación y el pilar fundamental de mi vida. A mis hermanos, quienes con sus palabras de aliento, comprensión y apoyo constante me animaron a seguir adelante en los momentos de mayor incertidumbre. Sin su respaldo este logro no hubiera sido posible.

A Itzamara Martínez Peña, mi compañera de vida y fuente constante de inspiración, gracias por tu amor incondicional, tu paciencia en los momentos de incertidumbre y tu fe en mí incluso cuando yo dudaba. Tu apoyo emocional y tu presencia serena han sido pilares fundamentales durante este proceso. Cada logro alcanzado en esta tesis lleva también tu huella, y por ello te dedico con profundo cariño este esfuerzo culminado.

Extiendo también mi gratitud a mis asesores de tesis y profesores de la carrera de Ingeniería de Materiales. Su guía, conocimientos, consejos y exigencia académica fueron clave no solo para la culminación de este trabajo, sino también para mi formación como

futuro profesional. Cada enseñanza recibida, tanto en el aula como en el laboratorio, ha dejado una huella profunda en mi desarrollo personal y académico.

Agradezco especialmente a mis compañeros de generación, con quienes compartí horas de estudio, discusiones técnicas, trabajos en equipo y experiencias inolvidables. Con ellos aprendí el valor de la colaboración, la amistad y la solidaridad en el proceso de aprendizaje.

De igual manera, reconozco el apoyo de la universidad y de las instituciones que, directa o indirectamente, brindaron recursos, espacios y herramientas para la realización de este proyecto. Su compromiso con la educación y la investigación fue fundamental para lograr los objetivos planteados.

A mis amigos, gracias por su compañía, paciencia y apoyo en los momentos de cansancio, por sus palabras de aliento y por recordarme que este camino, aunque exigente, también debía disfrutarse.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron a este logro, mi más sincero agradecimiento. Cada gesto, cada consejo y cada muestra de apoyo se reflejan en la culminación de esta etapa tan importante de mi vida.

Este trabajo está dedicado a todos ustedes, con la esperanza de que sea un reflejo de su confianza en mí y un homenaje a todo lo aprendido y compartido en estos años.

Resumen

Se investigaron el comportamiento capacitivo y la caracterización estructural de la xenotima localizada en la Formación Atotonilco el Grande, Hidalgo, México. La zona de estudio se encuentra en un entorno de rift extensional conocido como el Rift de Molango, donde los procesos tectónicos y volcánicos favorecieron la concentración de minerales estratégicos como la xenotima. La xenotima fue caracterizada mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS), espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) y microscopía de fuerza atómica (AFM). Las fases cristalinas identificadas incluyen xenotima-(Y) y xenotima-(Yb). Las partículas de xenotima presentan morfologías subhedrales, junto con fases minerales como pirofosfato de zirconio (ZrP_2O_7), y pretulita (ScPO_4), que podrían ser remanentes de procesos metasomáticos difusivos que promovieron la sustitución isomórfica de elementos de tierras raras dentro de una matriz rica en fósforo y zirconio.

Las pruebas eléctricas demostraron que la xenotima se comporta como un High Pass Filter (HPF), con una respuesta eficiente de señal por encima de los 100 kHz, lo que sugiere su posible uso en dispositivos electrónicos de alta frecuencia. La caracterización térmica reveló constantes dieléctricas elevadas (~ 500) y dos transiciones ferroeléctricas (a 70 °C y 300 °C), indicativas de un material dieléctrico de Clase I con estabilidad ferroeléctrica de Clase II.

Estos hallazgos posicionan a la xenotima como un material prometedor para el sector tecnológico, particularmente en el desarrollo de capacitores de alta estabilidad, dispositivos de almacenamiento de energía y rectificadores de estado sólido. Además, el estudio destaca la relevancia de los sistemas de rift como ambientes geológicos

favorables para la concentración de elementos críticos estratégicos en México, lo que impulsa nuevas estrategias de exploración de recursos minerales para tecnologías avanzadas.

Abstract

The capacitive behavior and structural characterization of xenotime located in the Atotonilco el Grande Formation, Hidalgo, Mexico, were investigated. The study area is associated with an extensional rift environment known as the Molango Rift, where tectonic and volcanic processes facilitated the concentration of strategic minerals such as xenotime. Xenotime was characterized using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM–EDS), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and atomic force microscopy (AFM). The identified crystalline phases include xenotime-(Y) (PDF 96-101-1144) and xenotime-(Yb) (PDF 96-152-9051). The xenotime particles exhibit subhedral morphologies, along with mineral phases such as zirconium pyrophosphate (ZrP_2O_7 , PDF 96-153-4358) and pretulite (ScPO_4 , PDF 96-900-1950), which may be remnants of diffusive metasomatic processes that promoted isomorphic substitution of rare earth elements within a phosphorus- and zirconium-rich matrix.

Electrical tests demonstrated that xenotime behaves as a high-pass filter (HPF), with efficient signal response above 100 kHz, suggesting its potential use in high-frequency electronic devices. Thermal characterization revealed high dielectric constants (~ 500) and two ferroelectric transitions (at 70 °C and 300 °C), indicative of a Class I dielectric material with Class II ferroelectric stability.

These findings position xenotime as a promising material for the technology sector, particularly in the development of high-stability capacitors, energy storage devices, and solid-state rectifiers. Furthermore, the study underscores the relevance of rift systems as

favorable geological environments for the concentration of strategic critical elements in Mexico, encouraging new exploration strategies for high-tech mineral resources.

Capítulo 1

Capítulo 1 Introducción

Introducción

En los últimos años, la demanda de materiales estratégicos como los elementos de tierras raras (ETR) ha crecido considerablemente, debido a su uso en tecnologías emergentes, dispositivos electrónicos, energías limpias, defensa y medicina (Filho et al., 2023). Dentro de este grupo, los ETR pesados como el itrio (Y), el escandio (Sc) y el iterbio (Yb) son de especial interés por sus propiedades eléctricas y ópticas (Rasool, 2025).

La xenotima (YPO_4) es un mineral fosfatado que contiene principalmente itrio y otros ETR pesados, como: Disprosio (Dy), Erblio (Er) y Lutecio (Lu) y ocurre típicamente en pegmatitas y arenas minerales pesadas (Rasool, 2025) La estructura de la xenotima incluye cationes de tierras raras coordinados con ocho átomos de oxígeno (REO_8), característica de los fosfatos tipo xenotima (Rafiuddin et al., 2022).



Ilustración 1. Xenotima

Este mineral suele formarse en distintos contextos geológicos incluyendo ambientes tectónicos favorables a la concentración de ETR, como los ambientes tipo rift, donde procesos de alteración hidrotermal pueden concentrar estos elementos (Haque, 2014).

En México, la Formación Atotonilco el Grande, ubicada en el estado de Hidalgo, representa un ejemplo notable de este tipo de ambiente. Se trata de una secuencia sedimentaria volcánica del Plioceno con un espesor de 500 a 600 m, que incluye coladas basálticas con estructuras volcánicas como tubos de explosión, disyunción columnar y bolas de lava acrecionales (González Segura et al., 2022).

Esta tesis busca caracterizar, desde un enfoque mineralógico y funcional, la xenotima presente en esta formación.

Para ello se emplearon técnicas como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB–EDS), espectroscopía de fotoelectrones (XPS), microscopía de fuerza atómica (AFM) y pruebas dieléctricas.

Los resultados obtenidos permitirán conocer mejor las propiedades de este material, con posibles aplicaciones en el desarrollo de dispositivos electrónicos de alta frecuencia, capacitores dieléctricos y tecnologías emergentes, al tiempo que se promueve el aprovechamiento de recursos minerales estratégicos nacionales.

Objetivo General

Determinar el comportamiento capacitivo de la xenotima del estado de Hidalgo, mediante técnicas de análisis instrumental, como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB–EDS), espectroscopía de fotoelectrones (XPS), microscopía de fuerza atómica (AFM) y pruebas dieléctricas para conocer el comportamiento capacitivo y determinar sus posibles usos.

Objetivos Específicos

Caracterizar las fases cristalinas mediante difracción de rayos X (DRX).

Estudiar la morfología y composición química de la xenotima mediante MEB–EDS.

Analizar los elementos presentes en superficie con espectroscopía de fotoelectrones (XPS).

Determinar la respuesta eléctrica (frecuencia de corte) del mineral y calcular su constante dieléctrica en función de la temperatura.

Determinar la rugosidad superficial a escala nanométrica mediante AFM.

Hipótesis

La xenotima (YPO_4) presente en la Formación Atotonilco el Grande, Hidalgo, posiblemente pueda presentar propiedades estructurales, morfológicas y eléctricas así mismo un comportamiento capacitivo tipo High Pass Filter (HPF), a su vez una elevada constante dieléctrica, lo que puede convertirse en un material potencial para aplicaciones tecnológicas en dispositivos electrónicos de alta frecuencia.

Justificación

La caracterización integral de minerales estratégicos como la xenotima permite no solo ampliar el conocimiento científico sobre su génesis y propiedades, sino también evaluar su potencial funcional para aplicaciones tecnológicas.

Este trabajo se justifica por los siguientes motivos:

Académico: aporta información original sobre un mineral poco estudiado en México, mediante el uso de técnicas avanzadas como DRX, MEB–EDS, XPS, AFM y pruebas dieléctricas, favoreciendo la formación de capacidades técnicas y analíticas en la caracterización de materiales mediante equipos de última generación, fortaleciendo la infraestructura académica nacional.

Tecnológico: permite explorar la viabilidad del uso de la xenotima como material dieléctrico en capacitores o dispositivos electrónicos de alta frecuencia.

Económico y estratégico: contribuye a la identificación de nuevos recursos minerales en México, con aplicaciones potenciales en sectores industriales de alto valor, como energías renovables (turbinas eólicas), la electrónica (teléfonos móviles, pantallas LED), la industria automotriz (vehículos eléctricos), la defensa y aeroespacial (sistemas de misiles y satélites), la medicina (resonancias magnéticas) y la industria química (catalizadores y pigmentos).

Capítulo 2

Capítulo 2 Marco Teórico

Marco Teórico

Importancia De Los Elementos De Tierras Raras (ETR) Y La Xenotima

En las últimas décadas, la búsqueda de materias primas críticas para tecnologías de punta como: electrónica, movilidad eléctrica, energías renovables, telecomunicaciones y defensa, ha puesto a los elementos de tierras raras (ETR) en el centro de la agenda científica y tecnológica. Los elementos de tierras raras (lantánidos, itrio y escandio) ocurren en más de 250 minerales siendo la bastnasita $(\text{Ce, La})\text{CO}_3\text{F}$, la monacita $(\text{Ce, La, Nd, Th})(\text{PO}_4)$ y la loparita $(\text{Na, Ce, Ca, Sr})(\text{Ti, Nb, Fe})\text{O}_3$, los más comunes teniendo una demanda creciendo al ritmo de la transición energética y la digitalización (Nimila et al., 2020).

En este contexto, la xenotima (YPO_4) destaca por concentrar preferentemente elementos de tierras raras pesadas (HREE) e Y, razón por la cual es considerada un mineral estratégico para cadenas de suministro de alto valor agregado (Hoshino et al., 2016).

Ambientes geológicos de la xenotima a escala global

La xenotima se ha documentado en una variedad de contextos geológicos, lo que evidencia su plasticidad génica: carbonatitas y sistemas asociados (p. ej., Bayan Obo, China), sistemas hidrotermales, ambientes metasomáticos, granitoides, greisens, rocas alcalinas y entornos relacionados con rifts (Yang et al., 2024; Kui-Feng et al., 2023). Asimismo, se registran ocurrencias en depósitos Cu–U–V (mina Eureka, norte de España) con alteración fosfatada de ETR vinculada a tectónica extensional. En Mongolia,

se encuentra asociada en una sucesión ígnea bimodal peralcalina con enriquecimiento en Zr, Nb, HREE, Y, U, Th y Ta, adyacentes a ensamblajes peraluminosos con Sn, W, Ta, Li y Nd (Dostal & Gerel, 2022).

También se han descrito asociaciones con mineralización tipo SEDEX de Pb–Zn (Wali Arain et al., 2021), sistemas Cu–ETR en el norte de China (Yu et al., 2024) y depósitos sedimentarios fosfatados en Egipto, donde pueden encontrarse en ambientes alternativos como sedimentos de aguas profundas, plataformas continentales, ríos, arroyos, lagos y depósitos de fosforitas (Yu et al., 2024,Obaidala et al., 2023).

Este abanico de ejemplos resalta el papel de los sistemas tipo rift y cuencas extensivas como ambientes favorables para la concentración de elementos de tierras raras y otros metales estratégicos (Lisboa et al., 2023; Sillitoe & Rodríguez, 2023; Walter et al., 2023).

Rifts Como Fábricas Metalogenéticas De ETR

En términos metalogenéticos, los rifts por su arquitectura de fallas normales, subsidencia y magmatismo bimodal crean vías eficientes para la circulación de fluidos y la concentración de metales. En el registro geológico, se reconoce que estas configuraciones extensionales pueden hospedar mineralizaciones de elementos de tierras raras y Au, además de favorecer la génesis de depósitos SEDEX y red beds, entre otros (Jara et al., 2023; Walter et al., 2023; Lisboa et al., 2023).

La identificación y delimitación de estas estructuras descansa en análisis geodinámicos y geoquímicos integrados, que permiten inferir paleogeografías de

apertura, pulsos de magmatismo y fases de reactivación tectónica relevantes para la mineralización de fosfatos de ETR como la xenotima.

Marco Geológico Regional: El Rift De Molango (Hidalgo, México)

El área de estudio se ubica en el denominado “Rift de Molango”, una estructura extensional post-laramídica que controla la arquitectura de la cuenca y la distribución de unidades del Jurásico–Terciario. El análisis de campo y métodos indirectos de exploración permitieron reconocer fallas normales que marginan el rift y tres eventos tectónicos principales: (i) apertura del Golfo de México y fragmentación de Pangea “Durante el Jurásico Medio”, con formación de grabens; (ii) subsidencia progresiva y transgresión marina (Jurásico Superior–Cretácico), con transición siliciclástica–carbonatada; y (iii) reactivación extensional post-pliocénica con desarrollo de fallas normales directamente vinculadas a la mineralización de xenotima. En conjunto, el sistema de horsts y grabens impone el control estructural principal del yacimiento (Cerecedo Sáenz et al., 2023).

Formación Atotonilco El Grande: Estratigrafía, Litología Y Cronología

La Formación Atotonilco el Grande aflora cerca de la localidad homónima en Hidalgo. Está conformada por lutitas, conglomerados y una secuencia bimodal de basaltos interestratificados con depósitos piroclásticos dacíticos a riolíticos; descansa en discordancia sobre rocas máficas de la Fm. Tlanchinol y supera los 400 m de espesor. Dataciones K–Ar indican una edad pliocénica entre 5.15 ± 0.25 Ma y 2.56 ± 0.08 Ma (Cantagrel & Robin, 1979), en línea con la pulsación extensional y volcánica que sella la etapa regresiva terciaria en el rift.

Antecedentes Mineralógicos De La Xenotima En Atotonilco El Grande

Los estudios mineralógicos basados en DRX, MEB–EDS, XPS y AFM confirman la presencia de una solución sólida fosfatada de elementos de tierras raras, con fases cristalinas bien identificadas: xenotima-(Y), xenotima-(Yb), pretulita (ScPO_4) y pirofosfato de zirconio (ZrP_2O_7). Estas fases, típicas de condiciones de temperatura media–alta ($\sim 600\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$), son coherentes con un escenario metasomático de contacto durante la evolución del rift (Rodríguez-Lugo et al., 2024)

Historia De Exploración Local Y Correlaciones Con Otros Distritos

La aproximación metodológica en el área se apoyó en técnicas de prospección indirecta, correlación estratigráfica y análisis estructural, lo que permitió comparar la sucesión bimodal de Atotonilco el Grande con afloramientos mineralizados en Mongolia (Nb–Ta) y con el sistema de Bayan Obo (Fe–P–REE), de atributos geodinámicos que favorecen la concentración de ETR (Dostal & Gerel, 2022; Yang et al., 2024). De manera paralela, en la propia formación se han documentado niveles con lepidolita portadora de litio (Vera-Morales et al., 2024), lo que sugiere pulsos metasomáticos tardíos, que formaron co-ocurrencias de elementos críticos (Li–HREE) en el mismo sistema.

Materiales Dieléctricos

Los materiales dieléctricos son sólidos que prácticamente no permiten el flujo de corriente eléctrica, pero sí se polarizan bajo un campo eléctrico, almacenando energía por la separación de cargas; su conductividad es muy baja y su constante dieléctrica alta comparada con los conductores (Wiley, 2012). Se clasifican según su comportamiento eléctrico y la estabilidad ante variaciones de temperatura, voltaje y frecuencia,

distinguiéndose entre dieléctricos lineales o paraeléctricos, ferroelectricos, relaxores, entre otros, así como en las clases comerciales de cerámicos: Clase I y Clase II (Laadjal, Kaddouri & Belbachir, 2023).

Teoria De Band-Gap

La teoría del band-gap (brecha de banda) explica que los materiales dieléctricos tienen una separación energética significativa entre la banda de valencia y la banda de conducción, suficientemente grande para impedir que los electrones salten espontáneamente mediante excitaciones térmicas normales, lo que resulta en una muy baja conductividad eléctrica; el tamaño de la bandgap también está inversamente correlacionado, en muchos casos, con la constante dieléctrica estática: materiales con gap muy grande tienden a tener constante dieléctrica más baja y viceversa (Ravichandran, Wang, Wager, 2016; Lu & Meng, 2015).

Clasificación De Materiales Dieléctricos

En la clasificación de materiales dieléctricos cerámicos para capacitores, los materiales de Clase I son aquellos dieléctricos lineales o paraeléctricos, con constante dieléctrica relativamente modesta (por ejemplo, en el rango de ~5 a algunos cientos), con alta estabilidad frente a cambios de temperatura, voltaje, frecuencia, baja pérdida de disipación (“dielectric loss”) y buen coeficiente de temperatura (ej. cerámicos NP0 / C0G) (EPCI Academy, s. f.; Laadjal et al., 2023). Los materiales de Clase II son generalmente ferroelectricos o basados en materiales ferroelectricos como titanatos (ej. titanatos de bario), que presentan constantes dieléctricas mucho más altas, permitiendo capacitancias elevadas, pero sacrificando estabilidad: su capacitancia varía con temperatura, voltaje, frecuencia, y envejecen más (“aging”), además de tener mayor factor de disipación (Laadjal et al., 2023; Guide to Ceramic Capacitor Dielectrics, Altium, 2022).

Aplicaciones De Materiales Dieléctricos

Las principales aplicaciones difieren: los dieléctricos de Clase I se utilizan donde la precisión, estabilidad y baja pérdida son críticas, como circuitos resonantes, filtros de RF, osciladores de alta frecuencia, calibraciones de medición; mientras que los de Clase II se emplean cuando se necesita alta capacitancia en espacios pequeños, para desacoplamiento, suavizado de voltaje, acoplamiento, bypass, almacenamiento temporal de carga, donde cierto grado de variación es aceptable (Laadjal et al., 2023; Guide to Ceramic Capacitor Dielectrics, Altium, 2022).

Control Tectónico Y Evolución Del Yacimiento Atotonilco El Grande

La evolución del depósito se interpreta en una secuencia de eventos: (i) sedimentación siliciclástica bajo régimen extensional y condiciones reductoras; (ii) oxigenación y transgresión marina (Jurásico Superior) con precipitación de carbonatos; (iii) superposición compresiva laramídica; y (iv) renovación extensional durante el Terciario con volcanismo bimodal hasta el Plioceno, fase crítica para el emplazamiento de xenotima. Las fallas normales NO–SE y N–S condicionan la permeabilidad y focos de flujo de fluidos, mientras que la cobertura basáltica superior contribuye a la preservación del sistema mineralizado (Cerecedo Sáenz et al., 2023).

Caracterización Estructural

La xenotima es un mineral de fosfato de tierras raras cuya fórmula general es YPO_4 , perteneciente al grupo de los ortofosfatos de tierras raras (Ni et al., 1995). Cristaliza en el sistema tetragonal con grupo espacial $I4_1/amd$, presentando una estructura análoga al circón (Calvo & Faggiani, 1974).

Su densidad oscila entre 4.4 y 5.1 g/cm³ y la dureza se ubica en torno a 4.5 en la escala de Mohs (Mindat, n.d.). El color típico varía de marrón a grisáceo, con un brillo vítreo y alta birrefringencia.

Químicamente, la xenotima puede incorporar elementos como Dy, Er, Yb o Gd mediante sustitución isomórfica, así como trazas de U y Th, lo que influye en su radiactividad y estabilidad estructural (Ni et al., 1995). Bajo presiones extremas (~17 GPa para YPO_4), su estructura tetragonal se caracteriza por una celda unitaria con dos ejes de la misma longitud e iguales a 90° entre sí, y un tercer eje de longitud diferente ($a=b \neq c$,

con ángulos $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$). puede transformarse en la de tipo monacita, caracterizada por coordinación 9 (Wang et al., 2023).

Comportamiento Capacitivo Y Propiedades Dieléctricas

Los ortofosfatos tipo xenotima presentan una constante dieléctrica relativamente baja en comparación con los de tipo monacita, atribuida a su menor polarizabilidad iónica (Li et al., 2008). Sin embargo, muestran factores de calidad ($Q \cdot f$) superiores a 60 000 GHz y coeficientes de temperatura de la frecuencia resonante negativos (-17 a -56 ppm/ $^\circ\text{C}$), lo que los hace adecuados para aplicaciones en microondas y resonadores de alta precisión (Li et al., 2008).

La relación entre estructura y propiedades dieléctricas se puede describir mediante modelos como la ecuación de Clausius–Mosotti, que vincula la polarizabilidad de los iones con la constante dieléctrica global del cristal molecular (α) de los átomos y moléculas con la constante dieléctrica (ϵ_r) de un material. (Li et al., 2008).

Se describe como:
$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$

Donde (ϵ_0) es la permitividad del vacío y (N) es el número de moléculas por unidad de volumen. Esta ecuación es fundamental en el estudio de las propiedades eléctricas de los materiales dieléctricos.

Teoría de la temperatura de Curie en materiales piezoelectricos

La temperatura de Curie constituye un parámetro fundamental en el estudio de materiales ferroelectricos y piezoelectricos, ya que define el punto a partir del cual ocurre la transición de fase entre el estado ferroelectrico y el estado paraelectrico. De manera general, este fenómeno se describe como el valor de temperatura en el que la constante dieléctrica del material alcanza un máximo, para luego comenzar a decrecer de forma característica (Lee et al., 2014). En términos estructurales, por debajo de la temperatura de Curie los dominios ferroelectricos presentan una polarización espontánea orientada, mientras que por encima de ella se pierde este orden, y el material adquiere un comportamiento paraelectrico (Bouchy et al., 2022).

La determinación experimental de la temperatura de Curie

Se lleva a cabo mediante la medición de la permitividad dieléctrica en función de la temperatura. En este procedimiento, la muestra es calentada de manera controlada y se registra la variación de la constante dieléctrica, identificando el máximo de la curva como la temperatura de Curie (Hernández-Moreno et al., 2023). Adicionalmente, en la región paraelectrico la relación entre la permitividad y la temperatura puede describirse mediante la ley de Curie-Weiss, lo que permite corroborar la transición de fase y caracterizar la naturaleza del cambio estructural. Este parámetro es crítico, ya que determina la estabilidad térmica de las propiedades piezoelectricas y condiciona el rango de aplicaciones tecnológicas de los materiales, como sensores, actuadores y dispositivos de almacenamiento de energía.

Soluciones Sólidas

Una solución sólida es una fase cristalina única en la que átomos de uno o más elementos (soluto/s) se incorporan al cristal de otro (solvente), ya sea sustituyendo átomos del solvente (solución sólida sustitucional) o acomodándose en los huecos entre ellos (solución sólida intersticial) (Bhadeshia, s. f.; Study.com, 2023). Estas mezclas atómicas homogéneas afectan significativamente propiedades como la dureza, conductividad eléctrica, resistencia al desgaste o a la corrosión.

Reglas De Hume-Rothery

William Hume-Rothery formuló en la primera mitad del siglo XX un conjunto de criterios empíricos que permiten prever cuándo dos metales (o elementos metálicos) tendrán solubilidad significativa en estado sólido. Aunque no son leyes absolutas, sus reglas han demostrado ser muy útiles en metalurgia y diseño de aleaciones. (Bhadeshia, s. f.; Battezzati, 2018). A continuación, se describen estas reglas principales:

Tamaño atómico: La diferencia entre los radios atómicos del soluto y del solvente no debe exceder aproximadamente el 15 %. Si la diferencia es mayor, la distorsión de la red cristalina suele ser muy grande, lo que favorece la formación de fases secundarias en vez de una solución sólida extensa. (Bhadeshia, s. f.; Battezzati, 2018)

Estructura cristalina similar: Para que exista buena solubilidad, los elementos deben tener estructuras cristalinas iguales o muy parecidas (por ejemplo, ambos FCC, ambos BCC, etc.). Diferencias considerables en la estructura cristalina limitan la solubilidad sólida. (Bhadeshia, s. f.; Study.com, 2023)

Valencia: Elementos con valencias similares tienen mayor predisposición a disolverse entre sí. Además, se observa que un elemento de menor valencia tiende a disolver en otro de mayor valencia con mayor facilidad que al revés. (Bhadeshia, s. f.; Battezzati, 2018)

Electronegatividad: La diferencia de electronegatividad entre soluto y solvente debe ser pequeña; grandes diferencias favorecen la formación de compuestos intermetálicos en lugar de soluciones sólidas. (Bhadeshia, s. f.; Study.com, 2023)

Concentración electrónica (o electrones por átomo): Aunque no siempre se incluye explícitamente como una de las reglas clásicas, Hume-Rothery observó que la estabilidad de algunas fases intermedias o compuestos especiales está relacionada con la relación de electrones de valencia por átomo (electron concentration e/a). Esto es especialmente relevante en aleaciones binarias y en la formación de fase β , γ -brass, etc. (Battezzati, 2018)

Aplicaciones Tecnológicas Y Materiales Derivados

El fosfato de iterbio YbPO_4 con estructura tipo xenotima presenta excelente estabilidad térmica (hasta $\sim 2000^\circ\text{C}$) y propiedades fotoluminiscentes en el infrarrojo, lo que lo hace útil para composites (2021, in Yu.I.2024).

Cerámicas basadas en fosfatos tipo xenotima muestran gran resistencia térmica ($1300\text{--}1500^\circ\text{C}$), estabilidad química frente a SiO_2 , TiO_2 y Al_2O_3 , y conductividades térmicas moderadas ($\sim 12\text{ W/m}\cdot\text{K}$), lo que las hace viables como recubrimientos protectores y barreras térmicas (Hao et al., 1998, in Yu.I.2024).

Estudios recientes en fosfatos de alta entropía de estructura xenotima han demostrado su potencial como recubrimientos barrera ambiental (EBC), con coeficientes de expansión térmica ($\sim 5.96 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$) compatibles con sustratos de SiC y baja conductividad térmica ($2.25\text{--}4.38\text{ W/m}\cdot\text{K}$) (Liu et al., 2023).

Formación Atotonilco El Grande.

La Formación Atotonilco el Grande aflora cerca de la localidad homónima en el estado de Hidalgo, México.

Está compuesta principalmente por lutitas, conglomerados y una secuencia bimodal de basaltos interestratificados con depósitos piroclásticos de composición dacítica a riolítica (Wali Arain et al., 2021).

En el área de estudio, esta sucesión litológica yace en discordancia sobre rocas ígneas máficas de la Formación Tlanchinol y alcanza un espesor superior a los 400 metros.

La datación mediante potasio-argón (K–Ar) asigna una edad pliocénica a esta secuencia, con valores que oscilan entre 2.56 ± 0.08 Ma y 5.15 ± 0.25 Ma (Hoshino et al., 2016).

La caracterización del afloramiento se llevó a cabo mediante análisis geológicos, litológicos y estructurales con el fin de delimitar las unidades terciarias y optimizar la recolección de muestras.

Las muestras se obtuvieron mediante muestreo tipo chip y channel, se homogenizaron y se cuartearon para garantizar su representatividad en los análisis mineralógicos y geoquímicos posteriores.

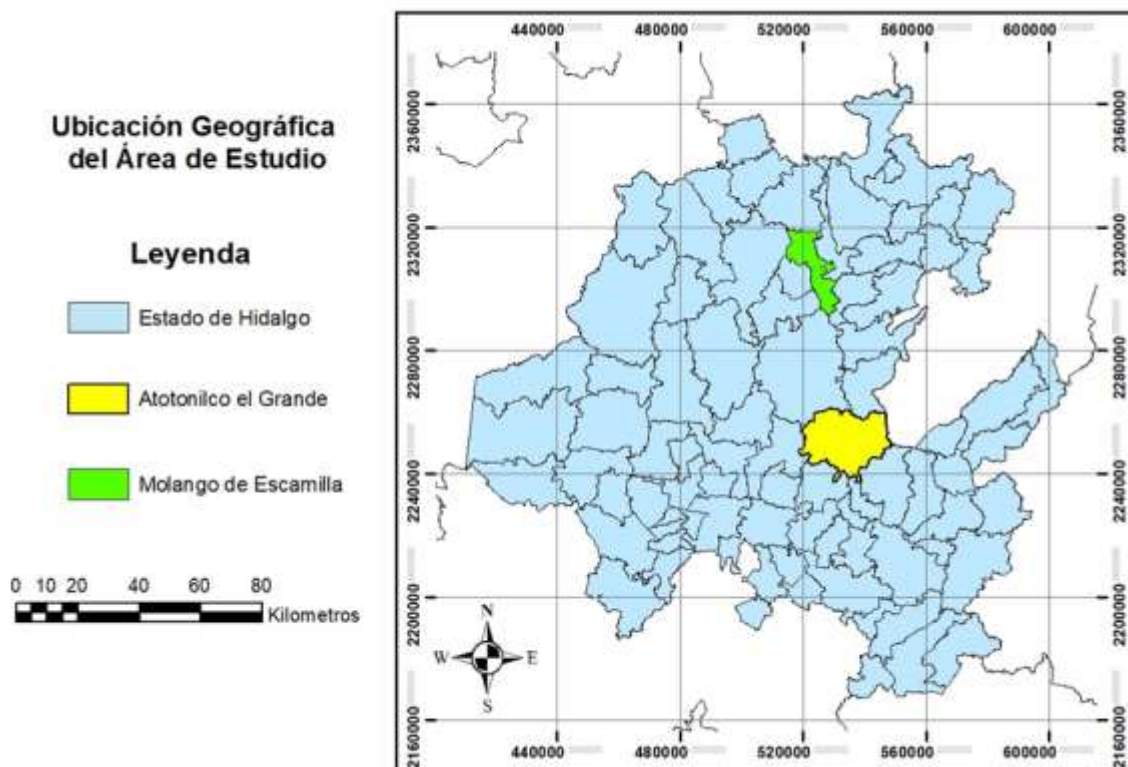


Ilustración 2. Ubicación geográfica del área de estudio, en el estado de Hidalgo.

Capítulo 3

Capítulo 3 Materiales Y Métodos

Materiales y métodos

La metodología de este estudio se basó en técnicas de prospección que emplean métodos indirectos de exploración geológica, conforme a investigaciones previas. El trabajo de campo permitió delinear las etapas transgresivas y regresivas de la secuencia estratigráfica, representadas respectivamente por depósitos marinos siliciclásticos del Jurásico Inferior y la Formación Atotonilco el Grande (Terciario) (Wali Arain et al., 2021).

Obtención de muestra (xenotima)

Para el desarrollo de este estudio, se recolectó el mineral (xenotima) de la formación Atotonilco el grande. Se utilizaron dos tipos de muestras del mineral xenotima, con el objetivo de evaluar posibles variaciones en sus propiedades físico-químicas según su morfología.

Muestra A: Pulverizada y tamizada

Esta muestra fue obtenida mediante un proceso de trituración mecánica de la xenotima en bruto, seguido de tamizado con mallas de diferentes granulometrías para asegurar una distribución homogénea de partículas. El polvo resultante fue almacenado en recipientes herméticos para evitar la absorción de humedad y contaminación ambiental. Este formato permitió realizar análisis de superficie, composición elemental y comportamiento térmico con mayor precisión.

Muestra B: En forma de cubo

La segunda muestra consistió en fragmentos de xenotima cortados en forma cúbica, con dimensiones aproximadas de 2cm × 2cm × 2 cm. Este cubo fue seleccionado por su integridad estructural y ausencia de fracturas visibles.

Ambas muestras fueron etiquetadas y registradas conforme a los protocolos de trazabilidad del laboratorio. La preparación se realizó bajo condiciones controladas para garantizar la reproducibilidad de los resultados y minimizar interferencias externas.

Caracterización Química Y Mineralógica

La caracterización mineralógica tuvo como objetivo identificar con precisión las fases minerales presentes en las muestras analizadas. El análisis mineralógico a granel se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) utilizando un difractómetro Equinox 2000 (INEL, Francia), con radiación Co-K α 1 ($\lambda = 1.78901 \text{ \AA}$), operado a 30 kV y 20 mA, con una velocidad de barrido de 22°/min.

Las fases cristalinas se identificaron mediante el software Match 3.0 (Crystal Impact, Alemania) y la base de datos COD Inorganics (actualizada al 8 de diciembre de 2024).

La caracterización textural, morfológica y composicional fue complementada mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplada a espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), utilizando un sistema JEOL JSM-IT300 (JEOL, Japón) operado a 30 kV, equipado con un detector de OXFORD Instruments (Reino Unido).

Adicionalmente, se realizó microscopía de fuerza atómica (DP-AFM) con un sistema Bruker Multimode 8, con resolución de 1–3 nm, operando en modo de contacto sobre un área de $1 \times 1 \mu\text{m}$.

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) se llevó a cabo con un espectrómetro K-ALPHA (Thermo Scientific), utilizando radiación Al K α (1486.6 eV) a 12 kV y 40 W.

Los espectros XPS se adquirieron tanto en modo de barrido amplio (0–1350 eV) como en modo de alta resolución (0.1 eV/paso), después de una limpieza superficial mediante bombardeo iónico de argón.

Técnicas de caracterización

Representación de Estructuras Cristalinas en VESTA

Las estructuras cristalinas de la xenotima fueron modeladas utilizando el software VESTA, a partir de los datos obtenidos por difracción de rayos X (DRX). Se emplearon los parámetros cristalográficos identificados en los análisis, como el sistema cristalino, grupo espacial y constantes de red, junto con los archivos CIF correspondientes a las fases xenotima-(Y), xenotima-(Yb), pretulita (ScPO₄) y ZrP₂O₇.

Estos datos fueron cargados en VESTA para generar representaciones tridimensionales precisas de las celdas unitarias, permitiendo visualizar la coordinación de los cationes de tierras raras con los grupos fosfato. Las estructuras obtenidas facilitaron la interpretación de la relación entre la arquitectura cristalina y las propiedades dieléctricas observadas, reforzando la correlación entre estructura y funcionalidad del material (Momma & Izumi, 2011).

Difracción De Rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X nos proporciona información tanto cuantitativa como cualitativa, donde nos proporciona el tipo de sistema cristalino de la muestra, los distintos minerales presentes, composición aproximada, tamaño de partícula, su orientación, etc.

La técnica presenta una gran versatilidad para el análisis de muestra, mientras estas sean conductoras.

Se utilizó un difractómetro INEL Equinox 2000 ilustración 3, con radiación Cu K α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), voltaje de 40 kV y corriente de 30 mA.

- Rango de barrido: 10–80° (2 θ).
- Paso: 0.02°/s.

El análisis se realizó con la base de datos ICDD-PDF4 para identificación de fases y software Match y VESTA para modelado cristalino.



*Ilustración 3. Difractómetro Marca Inel,
modelo Equinox 2000*

Preparación de la muestra

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) en muestras de núcleo fueron preparadas pulverizando la muestra en un mortero de ágata a un tamaño de partícula aproximado de $-10\ \mu\text{m}$.

Luego se compactó en un porta muestras de aluminio de aproximadamente 1 cm de diámetro, con el apoyo de un pistón de Al de 2.54 cm de longitud.

La muestra así montada; se colocó en un difractómetro Marca Inel, modelo Equinox 2000 provisto de un detector curvo operable con mezcla de gas Etano- Argón de alta pureza 99.9 %.

Este tipo de análisis efectuado es de la zona mineralizada, y cuyos datos obtenidos del difractograma se compararon y evaluaron con el software de difracción Match 1.0

Microscopia Electrónica De Barrido (MEB)

La microscopia electrónica de barrido o por sus siglas en inglés (SEM) Scanning Electron Microscopy, es una técnica de caracterización muy versátil para el análisis microestructural de sólidos, esta técnica nos proporciona información como lo es la morfología y topografía de la superficie del material, con esta técnica podemos realizar análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos presentes.

Datos del equipo y condiciones de trabajo

- Microscopio de barrido de bajo vacío.
- Modelo JSM-IT3000, con un alcance de 500,000 magnificaciones.
- Con un tamaño situ (spot size) de 10-2 a 10-5 ampliaciones.
- Aceleración de voltaje de 30Kv
- Equipado con un detector de energía retro dispersiva de rayos X
- (EDS) X-max Oxford



*Ilustración 4. Espectroscopia
Fotoelectronica de rayos x
(XPS).*

Preparación de muestra

La muestra se depositó sobre una cinta adhesiva de grafito que posteriormente se recubrieron con una capa delgada de oro, con la finalidad de obtener una mejor conductividad y tener mejor resolución de las imágenes.

Microscopia De Fuerza Atómica (AFM)

Se realizó microscopía de fuerza atómica (DP-AFM) con un sistema Bruker Multimode 8, con resolución de 1–3 nm, operando en modo de contacto sobre un área de $1 \times 1 \mu\text{m}$.



*Ilustración 5. Equipo
Bruker Multimode 8.
Bruker. (2023). Bruker.
<https://www.bruker.com/en/index.html>*

Espectroscopía Fotoelectrónica De Rayos X (XPS)

La espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) se llevó a cabo con un espectrómetro K-ALPHA (Thermo Scientific), utilizando radiación Al K α (1486.6 eV) a 12 kV y 40 W.



Ilustración 6. Espectrometro K-ALPHA (Thermo Scientific) (XPS). Thermo Fisher Scientific. (2023). Thermo Fisher Scientific.

Los espectros XPS se adquirieron tanto en modo de barrido amplio (0–1350 eV) como en modo de alta resolución (0.1 eV/paso), después de una limpieza superficial mediante bombardeo iónico de argón.

Medición De Conductancia Eléctrica

La conductancia se midió en pastillas prensadas de las muestras (13 mm de diámetro, 2 mm de espesor), con electrodos de cobre.

- Instrumento: Multímetro FLUKE 189 de alta precisión.
- Método: aplicación de corriente continua y registro de la resistencia.
- La conductividad eléctrica (σ) se calculó mediante la ley de Ohm y la relación geométrica:

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A}$$

donde L es el espesor, A el área de la muestra y R la resistencia medida.



Ilustración 7. Multímetro Fluke 189 de alta precisión.

Capítulo 4

Capítulo 4 Resultados

Resultados

El trabajo de campo permitió delinear las etapas transgresivas y regresivas de la secuencia estratigráfica, representadas respectivamente por depósitos marinos siliciclásticos del Jurásico Inferior y la Formación Atotonilco el Grande (Terciario).

Las correlaciones estratigráficas y litológicas revelaron similitudes significativas entre la configuración bimodal de esta formación y otros afloramientos mineralizados, como los de Mongolia (Nb–Ta) y Bayan Obo.

Descripción De La Estructura Tipo Rift Y La Mineralización Asociada

El análisis integrado de datos de campo y de métodos indirectos de exploración permitió identificar una estructura tectónica principal en el área de estudio, correspondiente a un sistema tipo rift denominado “Rift de Molango” (Cerecedo-Sáenz et al., 2025).

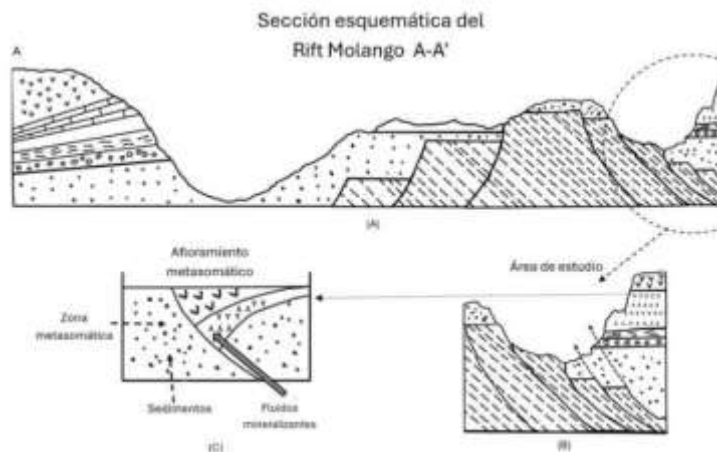


Ilustración 8. Rift Molango

En (A) se observa la sección esquemática a través de Rift Molango, en donde en el centro se presenta el alto del basamento flanqueado por secuencias transgresivas del

Jurásico Inferior. En (B) se observa un acercamiento de la zona de estudio que muestra zonas con canales de conducción de fluidos mineralizantes. En (C) la zona con contenidos de minerales como xenotima y lepidolita. Se presenta la correlación litológica de la etapa transgresiva del Jurásico en el área de estudio, y por otro lado fue observada una unidad continental de tobas y derrames basálticos correspondientes a la Formación Atotonilco el Grande (Vera-Morales et al., 2024).

Las estructuras tectónicas presentes en la región corresponden predominantemente a fallas normales post-laramídicas, localizadas en la periferia del rift, las cuales se caracterizan por el desplazamiento vertical del bloque colgante hacia el basamento, configurando fallas marginales típicas de sistemas extensionales (Cárdenas-Reyes et al., 2019).

En la evolución tectónica se reconocen tres eventos principales:

Jurásico Medio – apertura del Golfo de México y fragmentación de Pangea.

Durante este periodo se generaron estructuras tipo graben y la terminación lateral abrupta de la Formación Cahuásas, marcando el inicio de la subsidencia regional bajo un régimen extensional (Armstrong-Altrin et al., 2013).

Jurásico Superior – subsidencia y transgresión marina.

Se produjo una transición de depósitos siliciclásticos a carbonatados, registrados en las formaciones Santiago, Chipoco y Pimienta, proceso que continuó durante el Cretácico (Armstrong-Altrin et al., 2013).

Post-Plioceno – régimen extensional renovado.

Este evento se asocia al desarrollo de nuevas fallas normales vinculadas directamente con la mineralización de xenotima y el volcanismo bimodal que caracterizó al Terciario tardío (Cerecedo-Sáenz et al., 2018).

La etapa regresiva se consolidó durante el Terciario (Plioceno), representada por la Formación Atotonilco el Grande, donde la mineralización de xenotima está estructuralmente controlada por un sistema de horsts y grabens con orientaciones NO–SE y N–S, heredadas de la tectónica jurásica (Cárdenas-Reyes et al., 2019).

La evolución geológica del área sugiere que la mineralización de xenotima se formó en un contexto de rift, iniciado con depósitos transgresivos heterocrónicos. La secuencia comenzó con sedimentos siliciclásticos en ambientes reductores del Triásico–Jurásico, seguidos por una transgresión marina oxigenada en el Jurásico Superior, que favoreció la precipitación de carbonatos (Armstrong-Altrin et al., 2013).

Posteriormente, los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramídica fueron sobreimpuestos por fuerzas extensionales renovadas y volcanismo bimodal durante el Terciario, proceso que persistió hasta el Plioceno (Cerecedo-Sáenz et al., 2018). Esta fase final es crítica, ya que marcó el emplazamiento de la mineralización de xenotima dentro de una secuencia volcánica:

Unidad basal: toba dacítica con fragmentos de roca volcánica, indicadores de intensa actividad piroclástica.

Unidad intermedia: tobas riolíticas y dacíticas, constituyen el horizonte principal mineralizado, donde se identifican asociaciones minerales como poligorskita, lepidolita,

xenotima, perlita y niveles basálticos (Cerecedo-Sáenz et al., 2025). La xenotima presenta un enriquecimiento en elementos de tierras raras (ETR), especialmente bajo condiciones de baja movilidad, lo que sugiere procesos de concentración secundaria.

Unidad superior: coladas basálticas y conglomerados, que actuaron como una capa protectora, preservando las litologías mineralizadas (Cárdenas-Reyes et al., 2019).

En síntesis, la mineralización de xenotima en el Rift de Molango se encuentra estrechamente relacionada con la evolución tectónica y sedimentaria de un sistema de rift, cuyo control estructural y volcanismo asociado condicionaron la génesis y preservación del yacimiento.

Difracción De Rayos X (XRD)

El difractograma de rayos X (Figura 9) reveló la presencia de una solución sólida de fosfatos de elementos de tierras raras (ETR), incluyendo tanto ETR ligeros (Sc) como pesados (Y, Yb), alojados principalmente en una fase dominante de pirofosfato de zirconio (ZrP_2O_7). Las fases fosfatadas diluidas corresponden a YPO_4 , ScPO_4 y YbPO_4 .

La mineralogía identificada incluye fases típicamente formadas a temperaturas medias a altas (600–800 °C), tales como Xenotima-(Y), Xenotima-(Yb) y Pretulita.

Estas fases se atribuyen a procesos metasomáticos de contacto ocurridos dentro del estrato mineralizado de la Formación Atotonilco el Grande.

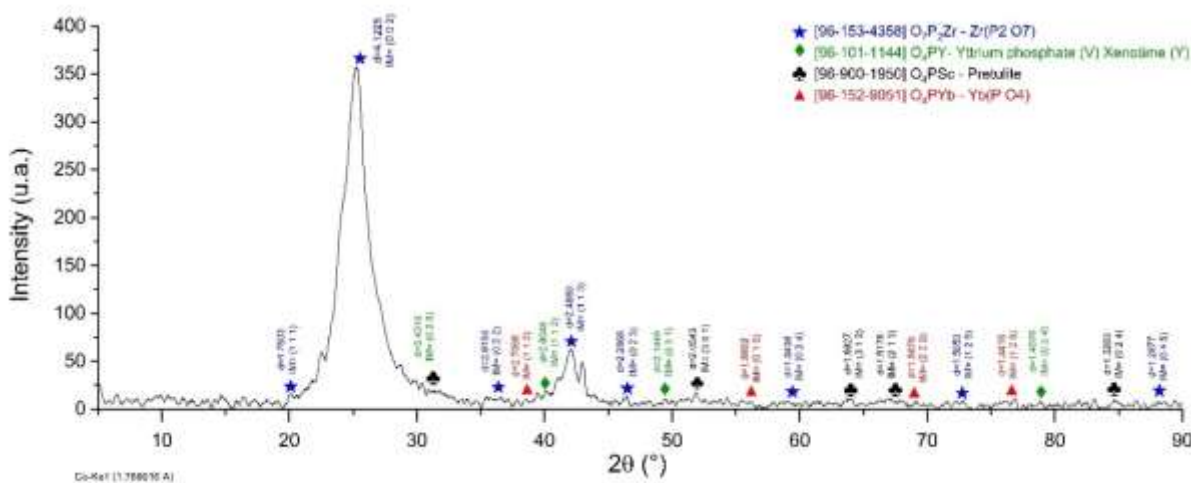


Ilustración 9. Espectro De Difracción De Rayos X De La Muestra De Xenotima

Además, la Figura 10 muestra los modelos estructurales de las fases cristalinas identificadas mediante el análisis de difracción de rayos X (DRX), generados con el software VESTA versión 3.4.6.

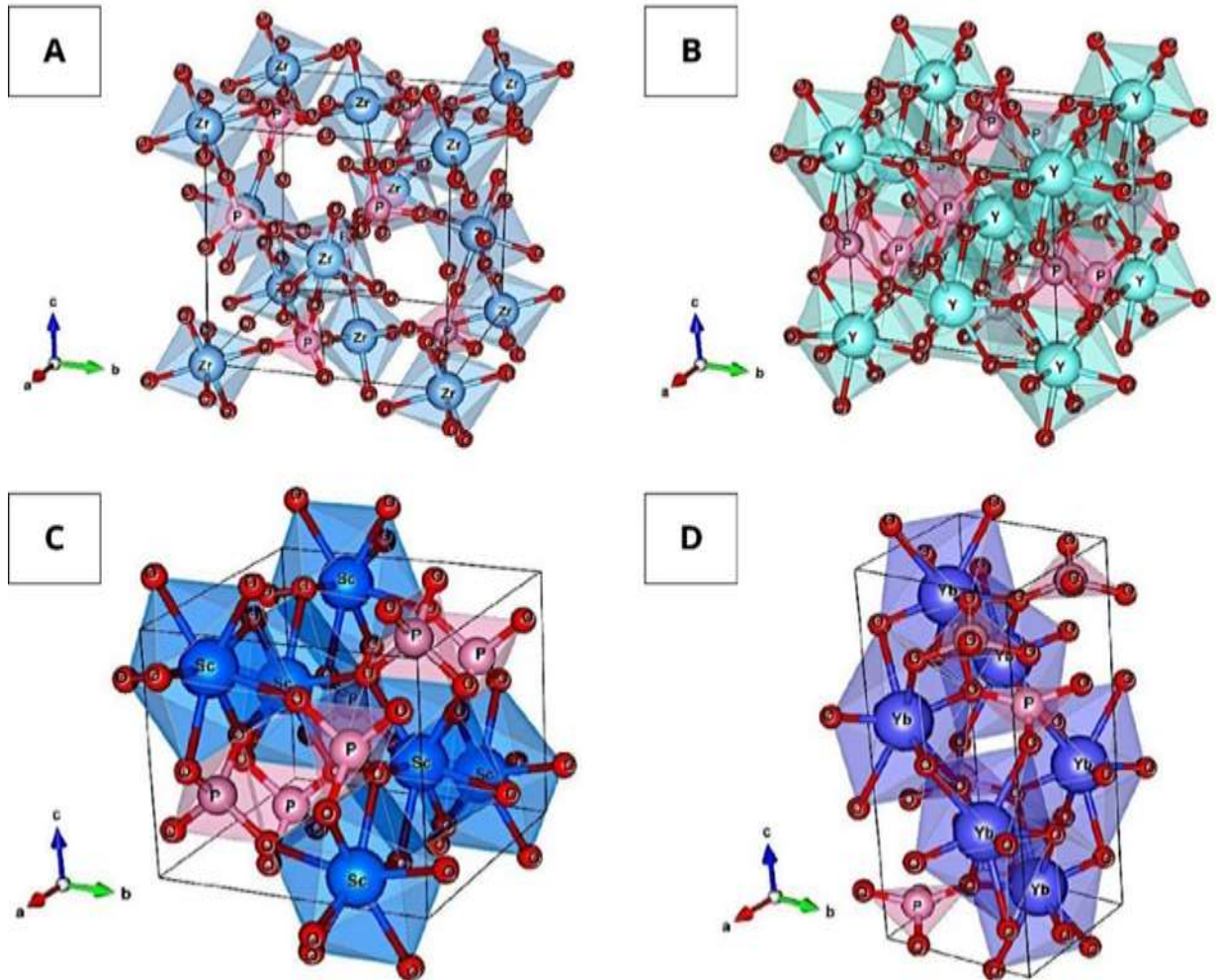


Ilustración 10. Estructuras Cristalinas Y Morfologías De ZrP_2O_7 (A), Xenotima-(Y) (B), Pretulita (C) Y Xenotima-(Yb) (D).

La Figura 10A presenta la estructura cristalina del pirofosfato de zirconio (ZrP_2O_7), caracterizada por un sistema ortorrómbico (grupo espacial $Pbca$) y una clase bipiramidal ortorrómbica centrosimétrica (mmm).

La morfología cristalina exhibe formas geométricas distintivas: a lo largo del eje Z se observa una bipirámide rómbica $\{111\}$ adyacente a un pinacoide $\{002\}$, mientras que prismas rómbicos $\{021\}$ se desarrollan a lo largo de los ejes X y Y.

Los parámetros de red calculados ($a = 8.245 \text{ \AA}$, $b = 8.245 \text{ \AA}$, $c = 8.245 \text{ \AA}$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $\beta = 69.67^\circ$) definen un volumen de celda unitaria de $560.49 \text{ \AA}^3$. La estructura presenta una coordinación octaédrica en torno a Zr^{4+} , con O^{2-} en los vértices, y una coordinación tetraédrica para P^{5+} , también rodeado por aniones oxígeno.

La Figura 10B muestra el modelo cristalográfico de xenotima-(Y) (YPO_4). Esta fase cristaliza en el sistema tetragonal (grupo espacial $I4_1/\text{amd}$) y pertenece a la clase bipiramidal ditetragonal centrosimétrica ($4/\text{mmm}$).

Su morfología incluye una bipirámide tetragonal $\{002\}/\{112\}$ a lo largo del eje Z y un prisma tetragonal $\{020\}$ en los planos X e Y. Los parámetros de red ($a = 6.862 \text{ \AA}$, $b = 6.862 \text{ \AA}$, $c = 6.174 \text{ \AA}$; relación $c/a = 0.8997$), con ángulos rectos ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), generan un volumen de celda unitaria de $290.72 \text{ \AA}^3$.

La estructura presenta coordinación dodecaédrica para Y^{3+} y coordinación tetraédrica para P^{5+} , ambos coordinados por O^{2-} .

La Figura 10C ilustra la estructura de la pretulita (ScPO_4), la cual también cristaliza en el sistema tetragonal (grupo espacial $I4_1/\text{amd}$) y pertenece a la clase $4/\text{mmm}$.

Su morfología está definida por una bipirámide ditetragonal $\{200\}$ y $\{301\}$ a lo largo del eje Z y prismas ditetragonales $\{312\}$ y $\{213\}$ en los ejes X e Y. Los parámetros de red ($a = 6.589 \text{ \AA}$, $b = 6.589 \text{ \AA}$, $c = 5.806 \text{ \AA}$; relación $c/a = 0.8811$), con ángulos ortogonales ($\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$), definen un volumen de celda unitaria de $252.07 \text{ \AA}^3$.

Al igual que en la xenotima-(Y), el Sc^{3+} presenta coordinación dodecaédrica con O^{2-} , mientras que el P^{5+} conserva una configuración tetraédrica

La Figura 10D corresponde a xenotima-(Yb) (YbPO_4), que cristaliza en el sistema tetragonal (grupo espacial $I4_1/a$) y pertenece a la clase 4/m.

Su morfología consiste en una bipirámide tetragonal $\{112\}/\{125\}/\{132\}$ a lo largo del eje Z y prismas tetragonales $\{101\}/\{220\}/\{015\}$ en los ejes X e Y. Los parámetros de red ($a = 4.491 \text{ \AA}$, $b = 4.491 \text{ \AA}$, $c = 10.352 \text{ \AA}$; relación $c/a = 2.3051$), con ángulos rectos, generan un volumen de celda unitaria de $208.79 \text{ \AA}^3$.

La estructura sigue el mismo patrón de coordinación que las fases anteriores, con Yb^{3+} en coordinación dodecaédrica y P^{5+} en entorno tetraédrico, ambos coordinados por O^{2-} .

Espectroscopía Fotoelectrónica De Rayos X (XPS)

La Figura 11 muestra el espectro de espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS), el cual permite identificar los elementos presentes en la superficie de las fases minerales analizadas.

El espectro revela la presencia de Li 1s a 54.83 eV, con una concentración superficial de 0.45%.

Esto se interpreta como un remanente residual resultante de la migración ascendente de fluidos metasomáticos hacia los niveles superiores del yacimiento (Arain et al., 2021)

Dicho proceso pudo haber favorecido la incorporación limitada de litio en la estructura de la solución sólida.

Además, el espectro exhibe picos característicos correspondientes a los principales elementos detectados: Si, S, C, O, Fe, Ca, Zn y Mg, lo que refleja la complejidad geoquímica del sistema mineralizado y la participación de múltiples procesos metasomáticos y/o hidrotermales durante la evolución del depósito.

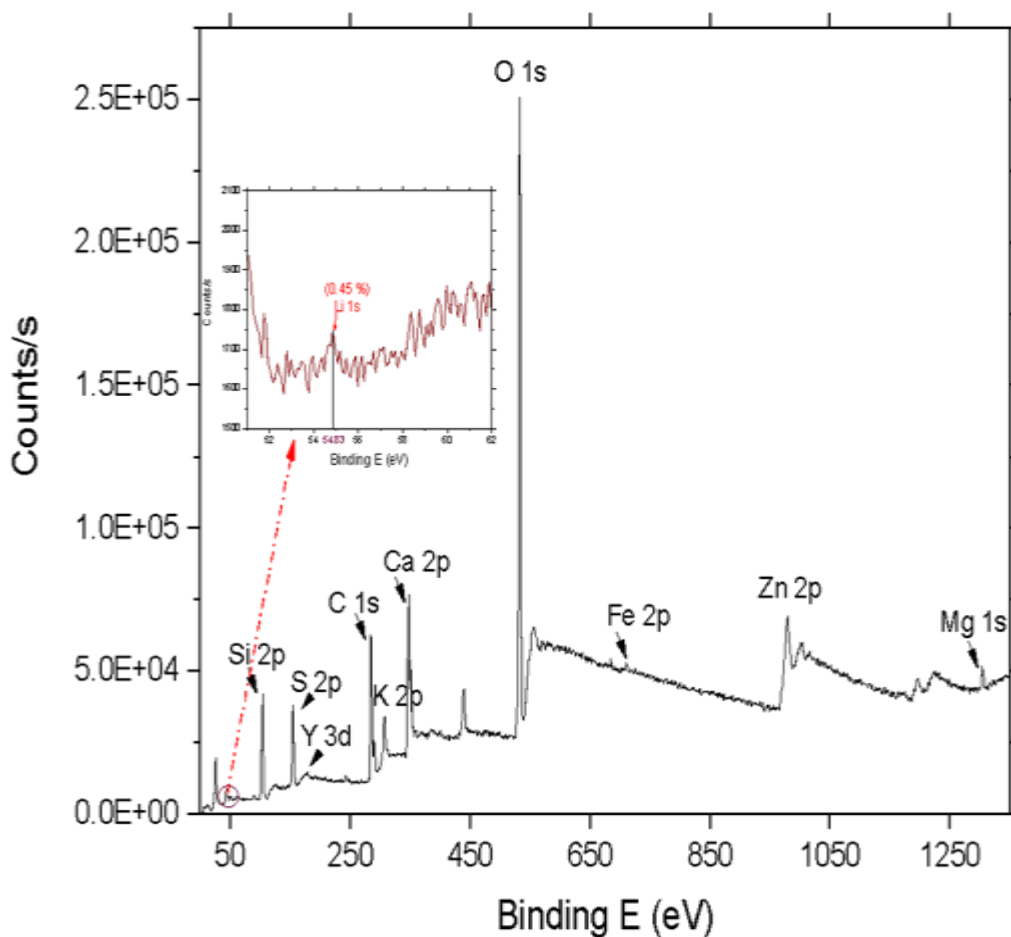


Ilustración 11. Espectros XPS del mineral xenotima.

Microscopía Electrónica De Barrido (SEM-EDS)

Para obtener una caracterización detallada de la microestructura y la distribución elemental de las fases cristalinas, se realizó un análisis localizado mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) acoplada a espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), como se muestra en la Figura 12.

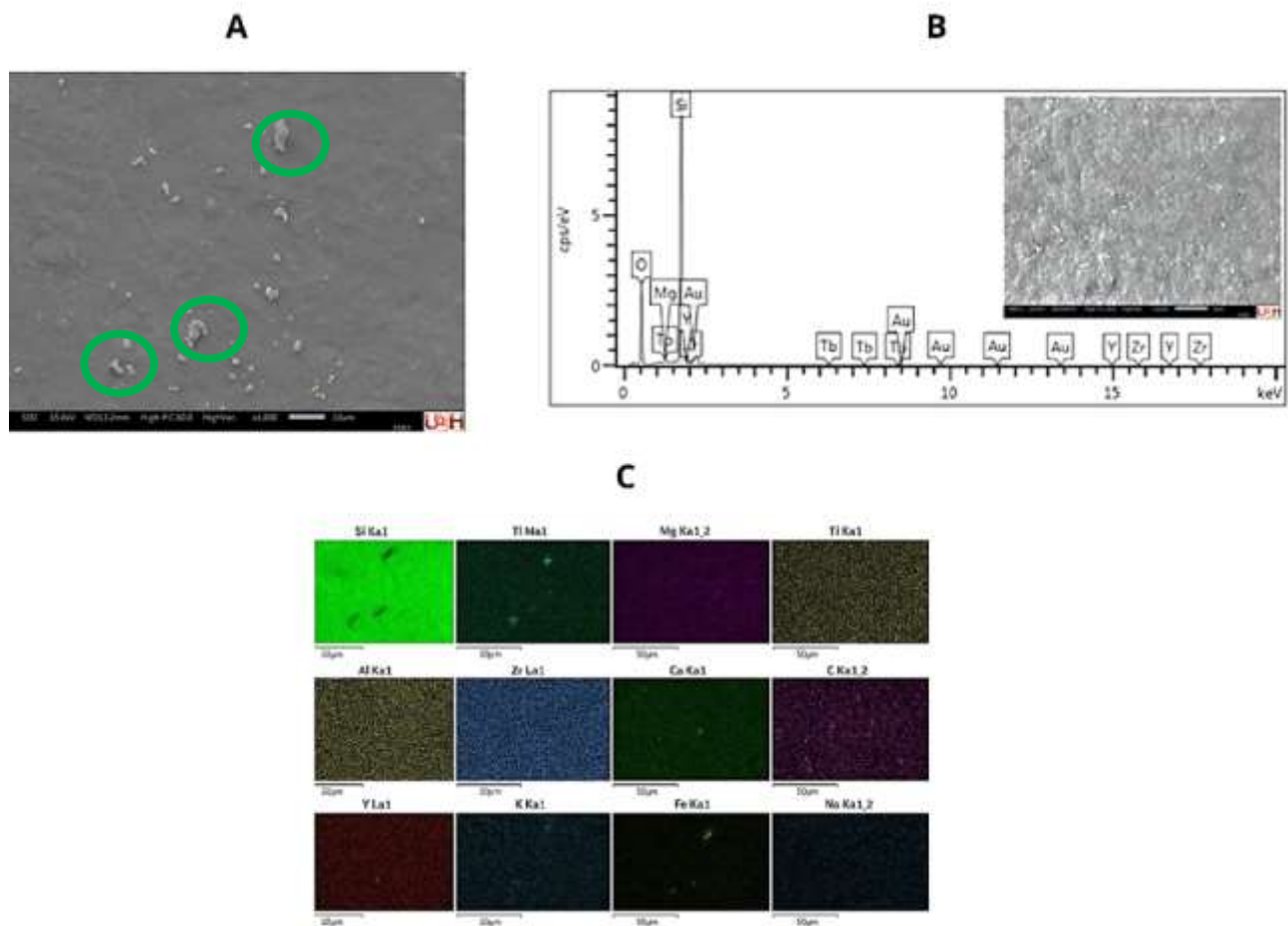


Ilustración 12. Caracterización correlativa mediante MEB-EDS y mapeo elemental de fases minerales metasomáticas: morfología, composición química y distribución espacial.

La Figura 12A muestra micrografías del mineral metasomático, revelando una morfología predominantemente lisa con rugosidad superficial aparente y características microestructurales similares entre partículas.

Se observan variaciones morfológicas en la forma cristalina, incluyendo hábitos euhedrales, subhedrales y anhedrales, así como diferencias en las texturas superficiales, tales como superficies lisas, fibrosas y sinuosas.

La Figura 12B presenta el espectro obtenido mediante microanálisis semicuantitativo por MEB–EDS, donde se identificaron silicio (Si) y carbono (C) como elementos mayoritarios.

Como elementos minoritarios se detectaron calcio (Ca), hierro (Fe), itrio (Y), tantalio (Ta), circonio (Zr) y fósforo (P), los cuales se asocian con la mineralización metasomática observada.

La Figura 12C muestra una compilación de mapas de distribución elemental generados mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS). Los mapas corresponden a las líneas de emisión de rayos X de Si, Ti, Mg, Ti, Al, Zr, Ca, Fe, Y, K, Na y O.

Cada elemento exhibe patrones espaciales distintivos que revelan una distribución heterogénea y zonas de enriquecimiento local. Cabe destacar que el silicio (Si) y el oxígeno (O) muestran señales generalizadas consistentes con la matriz fosfatada, mientras que el itrio (Y) y el circonio (Zr) presentan zonas localizadas de alta concentración asociadas con las fases de xenotima y pirofosfato de circonio.

El talio (Tl), potasio (K) y sodio (Na) aparecen en zonas más restringidas, posiblemente vinculadas a fluidos remanentes o fases minerales secundarias.

El mapeo elemental respalda la hipótesis de procesos metasomáticos y formación de soluciones sólidas dentro de un sistema químicamente complejo y texturalmente heterogéneo.

Microscopía De Fuerza Atómica (AFM)

La microscopía de fuerza atómica (AFM) es una técnica fundamental para caracterizar la topografía y la rugosidad superficial de los materiales a escala nanométrica, proporcionando información clave sobre su morfología y propiedades fisicoquímicas.

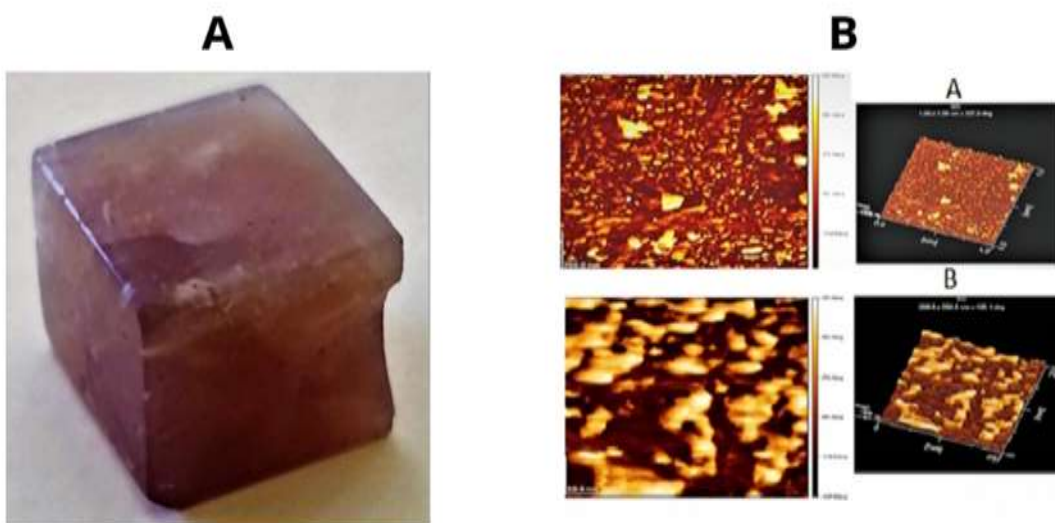


Ilustración 13. Análisis de topografía superficial mediante AFM: xenotima (A) y resultados de la muestra (B).

La Figura 13A presenta los resultados de microscopía de fuerza atómica (AFM) obtenidos para el mineral estudiado, destacando la topografía y rugosidad superficial a escala nanométrica.

El análisis se realizó utilizando un sistema AFM de doble sonda (DP-AFM) operando en modo de contacto, equipado con una sonda de silicio VIT_P_C-A (NT-MDT Spectrum Instruments), con una constante de fuerza de 0.6–1 N/m y una punta piramidal de 15 μm de altura.

Las mediciones se efectuaron sobre un área de $1 \times 1 \mu\text{m}$, localizada principalmente cerca de los bordes del cristal, donde suelen observarse líneas de triple contacto—características que podrían ser relevantes para futuras mediciones del ángulo de contacto.

La preparación de la muestra consistió en el corte y pulido de secciones de 3 mm de espesor.

Los resultados mostraron que la rugosidad superficial de la pretulita (ScPO_4) fue ligeramente mayor que la de la xenotima-(Y) (YPO_4), lo cual podría atribuirse a variaciones texturales internas relacionadas con sus procesos de formación.

La Figura 13B muestra los resultados correspondientes de topografía AFM para la xenotima.

Caracterización Térmica Y Eléctrica De La Xenotima

La muestra del mineral xenotima utilizada para la caracterización eléctrica y térmica fue preparada en forma de cubo con dimensiones de $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$. Seccionada con una sierra geológica tipo Buehler.

Todas sus seis caras fueron meticulosamente pulidas utilizando medios abrasivos de grano progresivamente más fino, finalizando con óxido de cerio de $1 \mu\text{m}$ como agente de pulido para obtener una superficie tipo espejo.

Este pulido de alta calidad minimizó las irregularidades superficiales y aseguró un contacto óptimo con los electrodos, mejorando así la precisión y la reproducibilidad de las mediciones dieléctricas y capacitivas.

La muestra corresponde a un agregado policristalino de origen natural y no a un monocrystal, y presenta límites de grano y microtexturas consistentes con procesos de crecimiento metasomático.

Se realizaron dos pruebas fundamentales sobre la muestra de xenotima para evaluar su comportamiento capacitivo desde una perspectiva tanto eléctrica como térmica.

Estas evaluaciones permitieron determinar propiedades clave que podrían ser altamente relevantes para futuras aplicaciones tecnológicas del material, así como para el desarrollo de una ficha técnica relacionada con las características funcionales de la fase mineral analizada.

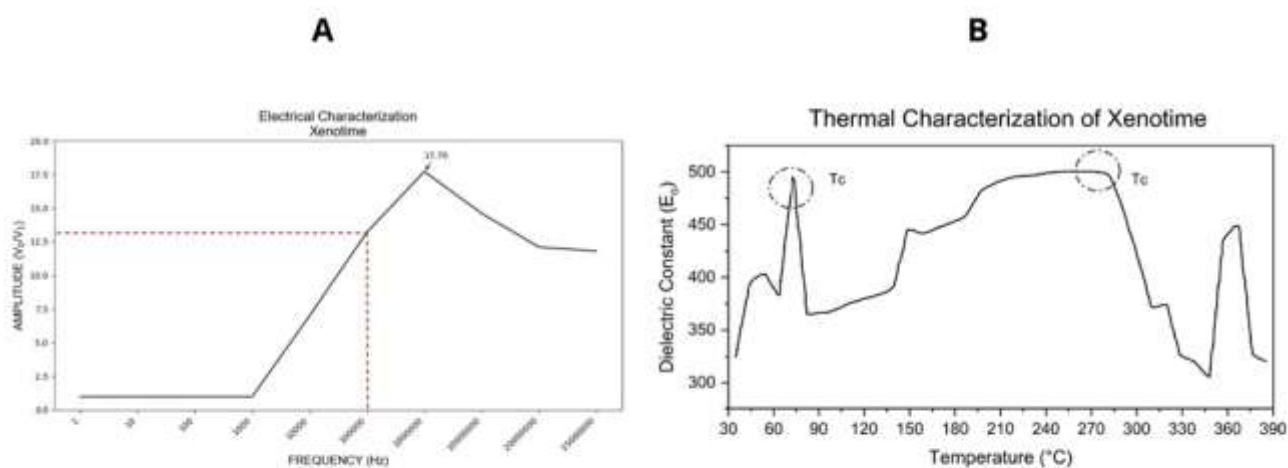


Ilustración 14. Caracterización de la muestra de xenotima: (A) análisis eléctrico, (B) análisis térmico.

El montaje experimental se basó en una configuración tipo RC, en la cual una resistencia de $10\text{ M}\Omega$ fue conectada en serie con la muestra de xenotima.

El objetivo fue determinar su frecuencia de operación y analizar su respuesta eléctrica.

Se utilizó un generador de funciones como fuente de señal y un osciloscopio para la adquisición de datos. El circuito fue sometido a un barrido de frecuencias, lo que permitió generar un diagrama de Bode y evaluar el comportamiento de la muestra frente a la variación de frecuencia.

La gráfica resultante, representativa de este análisis, se muestra en la Figura 14. La respuesta eléctrica de la xenotima, ilustrada en la Figura 14A, exhibe el comportamiento característico de un High Pass Filter (HPF).

Este comportamiento indica que el material presenta un desempeño eléctrico eficiente a frecuencias superiores a los 100 kHz , donde se observa una disminución significativa en la atenuación y un aumento correspondiente en la transmisión de la señal.

Estos resultados sugieren que la xenotima posee potencial para aplicaciones en sistemas electrónicos o de comunicación que operan en rangos de frecuencia superiores a los 100 kHz , particularmente en dispositivos que requieren capacidades de filtrado en alta frecuencia.

Para complementar el análisis eléctrico y ampliar la comprensión del desempeño del material bajo diversas condiciones operativas, también se llevó a cabo la caracterización térmica de la xenotima.

Esta se realizó utilizando un horno de laboratorio con capacidad máxima de hasta 700 °C.

Sin embargo, el análisis térmico se limitó a un rango de temperatura de hasta 400 °C para mitigar posibles riesgos asociados a la liberación de gases potencialmente tóxicos, dado que no se cuenta con datos previos sobre el comportamiento térmico completo del material.

El montaje experimental utilizado para esta prueba se muestra en la Figura 15.

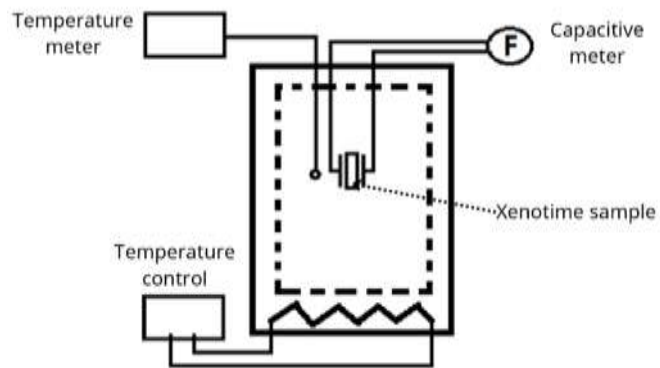


Ilustración 15. Montaje para la caracterización térmica de la muestra de xenotima.

Las mediciones de temperatura de la muestra de xenotima se registraron desde temperatura ambiente hasta 400 °C, con intervalos de 10 °C. La ecuación que describe su comportamiento es:

$$C = \frac{\epsilon_0 A_s}{d}$$

Donde:

C – Capacitancia (F)

ε_0 – Constante dieléctrica

d – Distancia entre placas (cm)

A_s – Área superficial(cm^2)

Para determinar la constante dieléctrica del material, la ecuación fue despejada para aislar ε_0 , resultando en la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r = \frac{dC}{\varepsilon_0 A_s}$$

Donde:

C – Valor obtenido mediante el valor de capacitancia

ε_r – Valor calculado

ε_0 – $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$

d – 0.02 m

A_s – 0.0004 m^2

Se observó una fluctuación en la constante dieléctrica relativa entre $\epsilon_r = 300$ y $\epsilon_r = 510$, con las transiciones correspondientes mostradas en la Figura 14B.

Además, se determinó que la magnitud de los valores de la constante dieléctrica depende del volumen de la muestra.

La estructura composicional de la solución sólida XPO_4 ($X = Y, Sc, Yb$) revela la presencia de iones trivalentes (Y^{3+}, Sc^{3+}, Yb^{3+}), tetravalentes (Zr^{4+}), pentavalentes (P^{5+}) y divalentes (O^{2-}).

Este arreglo iónico promueve un comportamiento semiconductor dual, con regiones tipo n (ricas en electrones) y tipo p (ricas en huecos), lo cual permite la formación de uniones internas p-n.

Estas uniones están particularmente asociadas a interacciones entre los elementos de tierras raras (ETR^{3+}) y el fósforo (P^{5+}), generando características de barrera de potencial típicas de dispositivos semiconductores (Cardarelli, 2018).

Este comportamiento se ve estabilizado por la presencia de Zr^{4+} , o posiblemente por sustituciones menores de Si^{4+} dentro de la red cristalina, actuando como un sustrato estructural.

Sin embargo, se considera poco probable la sustitución directa entre soluciones sólidas tipo circón ($ZrSiO_4$) y tipo xenotima (XPO_4) debido a restricciones estructurales y energéticas (Hoshino et al., 2016).

Desde el punto de vista eléctrico, la xenotima mostró una respuesta estable de High Pass Filter (HPF) a frecuencias superiores a los 100 kHz.

Adicionalmente, el análisis electro-térmico reveló una alta permitividad relativa (~500), con una primera temperatura de Curie registrada a 70 °C y una segunda transición a 300 °C, clasificando al material como un dieléctrico lineal de Clase I con comportamiento ferroeléctrico estable de Clase II (Cardarelli, 2018).

En términos comparativos, la constante dieléctrica de esta solución sólida supera a la de materiales convencionales como PbZrO_3 ($\epsilon \approx 200$), TiO_2 ($\epsilon = 85\text{--}170$), $\text{BaTiO}_3/\text{PMMA}$ ($\epsilon \approx 21.5$) y BaTiO_3 recubierto con Ni/PMMA ($\epsilon \approx 98$) (Park et al., 2019; Cardarelli, 2018).

Estos resultados posicionan a los minerales metasomáticos tipo XPO_4 como candidatos prometedores para aplicaciones tecnológicas como capacitores de alta estabilidad, diodos, celdas fotovoltaicas y rectificadores de estado sólido.

Capítulo 5

Capítulo 5 Discusión

Discusión

La caracterización mineralógica, estructural, eléctrica y térmica de la xenotima proveniente de la Formación Atotonilco el Grande resalta su estrecha relación con el contexto geodinámico del Rift de Molango.

La presencia de fases como xenotima-(Y), xenotima-(Yb), pretulita (ScPO_4) y pirofosfato de circonio (ZrP_2O_7) sugiere que el emplazamiento de fosfatos de elementos pesados de tierras raras (HREE) fue favorecido por procesos metasomáticos difusivos durante la evolución del rift, permitiendo sustituciones isomórficas dentro de matrices ricas en fósforo y circonio.

Aunque el análisis por DRX identifica estas fases como cristalográficamente distintas—xenotima-(Y), xenotima-(Yb) y pretulita—su asociación espacial sugiere que pueden presentarse como cristales limitados a una área composicionalmente o como agregados intercrecidos a escala microscópica.

Esta interpretación se ve respaldada por datos de MEB-EDS que evidencian gradientes químicos y continuidad microtextural entre las fases fosfatadas de tierras raras.

Tal comportamiento es consistente con sistemas metasomáticos de ETR, donde son comunes las soluciones sólidas complejas y los intercrecimientos epitaxiales (Hosino et al., 2016).

Adicionalmente, el mapeo elemental mediante EDS revela una distribución heterogénea de elementos mayoritarios y traza en la matriz mineralizada, con patrones limitados a un área bien definidos y zonas localizadas de enriquecimiento.

El silicio (Si) y el oxígeno (O) dominan la matriz de fondo, en concordancia con una red fosfatada, mientras que las fases portadoras de tierras raras, como el itrio (Y) y el circonio (Zr), presentan señales de alta intensidad confinadas a microdominios discretos.

La presencia de talio (Tl), potasio (K) y sodio (Na) en regiones periféricas o aisladas puede indicar removilización secundaria o metasomatismo inducido por fluidos.

Estas variaciones composicionales espacialmente resueltas refuerzan aún más el origen metasomático de la mineralización y apoyan la coexistencia de dichas fases como cristales zonados o dominios intercrecidos, lo que justifica la referencia a una solución sólida multicomponente estabilizada dentro del sistema fosfatado.

La asociación estructural entre los rasgos tipo horst y graben del rift y los niveles mineralizados de tobas dacíticas y riolíticas revela un control tectónico significativo sobre la concentración de ETR.

Esta vinculación tectónico mineralógica refuerza el modelo de exploración global que identifica a los sistemas relacionados con rift como ambientes clave para la formación de depósitos de elementos de tierras raras, en concordancia con casos documentados en Mongolia, China y España.

Más allá de su importancia científica, estos hallazgos también destacan el potencial de aprovechamiento económico de los minerales tipo xenotima en sectores tecnológicos de alto valor.

Las fases portadoras de ETR identificadas—particularmente aquellas enriquecidas en HREE como Y y Yb—podrían representar una fuente prometedora de elementos estratégicos para el desarrollo de materiales avanzados utilizados en electrónica, almacenamiento de energía y telecomunicaciones.

Esto subraya la importancia de integrar datos geológicos, mineralógicos y funcionales en los esquemas de evaluación de recursos, especialmente en entornos relacionados con rift que permanecen subexplorados, como el de Molango.

Desde una perspectiva funcional, las mediciones eléctricas demostraron que la xenotima exhibe un comportamiento de High Pass Filter (HPF) a frecuencias superiores a 100 kHz, lo cual es coherente con su estructura cristalina compacta y su capacidad para soportar polarización a alta frecuencia.

Esto se complementa con sus propiedades térmicas: la constante dieléctrica observada (~ 500) y las dos transiciones ferroeléctricas registradas a 70 °C y 300 °C son indicativas de un material dieléctrico de Clase I, con estabilidad térmica atribuida a su configuración iónica ($\text{REE}^{3+} \text{P}^{5+} \text{O}^{2-}$), reforzada por la presencia de Zr^{4+} .

En términos comparativos, la constante dieléctrica de la xenotima supera significativamente a la de materiales convencionales como PbZrO_3 y TiO_2 , posicionándola como un candidato competitivo para el diseño de capacitores de alta

estabilidad, sensores piezoeléctricos y componentes en dispositivos de comunicación de alta frecuencia.

Además, la integración de técnicas avanzadas de caracterización—incluyendo DRX, MEB–EDS, XPS y AFM—no solo confirmó la composición química y textural del material, sino que también validó su potencial funcional para aplicaciones tecnológicas.

Este enfoque integral resalta la importancia de evaluar tanto el valor mineralógico como el funcional de los depósitos portadores de ETR en el contexto de la transición energética y la electrónica avanzada.

Finalmente, la identificación de litio en superficie mediante XPS, aunque en bajas concentraciones, es prometedora y sugiere una posible migración secundaria de fluidos metasomáticos.

Esto abre nuevas interrogantes sobre la evolución geoquímica del sistema, y el posible enriquecimiento en otros elementos críticos.

Además, aunque el litio fue detectado en concentraciones bajas (~0.45%) mediante XPS, su presencia podría indicar un proceso de enriquecimiento secundario impulsado por fluidos metasomáticos tardíos o la existencia de fases minerales portadoras de litio por debajo de los límites de detección del DRX y MEB–EDS.

Esta hipótesis se ve respaldada por hallazgos recientes de niveles ricos en lepidolita dentro de la misma formación, lo que sugiere acumulaciones localizadas de litio bajo condiciones metasomáticas (Vera-Morales et al., 2024)

Estos resultados justifican una investigación más profunda sobre el comportamiento geoquímico del litio y su posible asociación con asociaciones fosfatadas enriquecidas en ETR.

Conclusiones

La presente investigación permitió realizar una caracterización integral de la xenotima localizada en la Formación Atotonilco el Grande, en el estado de Hidalgo, México, desde una perspectiva mineralógica, estructural y funcional. Los resultados obtenidos aportan evidencia sólida sobre las propiedades físicas, químicas y eléctricas de este mineral estratégico, así como sobre su potencial aplicación en tecnologías emergentes.

Desde el punto de vista mineralógico, la xenotima fue identificada como parte de un ensamblaje fosfatado de elementos de tierras raras pesadas (HREE), en el que se reconocieron las fases cristalinas xenotima-(Y) y xenotima-(Yb), además de pretulita (ScPO_4) y pirofosfato de zirconio (ZrP_2O_7). Estas fases fueron determinadas mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de fotoelectrones (XPS) y microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS), lo que permitió establecer la naturaleza subhedral de las partículas, su composición química y la presencia de sustituciones isomórficas entre elementos de tierras raras. La coexistencia de estas fases sugiere un ambiente de formación metasomático, vinculado a procesos de alteración hidrotermal en un contexto tectónico extensional, como el Rift de Molango.

La caracterización superficial mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) reveló una rugosidad nanométrica homogénea, lo que indica una buena calidad estructural del mineral para aplicaciones funcionales. Esta información es relevante para el diseño de dispositivos que requieren interfaces limpias y uniformes, como sensores, capacitores y componentes dieléctricos.

En cuanto al comportamiento capacitivo, los ensayos eléctricos demostraron que la xenotima actúa como un High Pass Filter, (HPF), con una frecuencia de corte superior a los 100 kHz. Este hallazgo es particularmente significativo, ya que posiciona a la xenotima como un material funcional para aplicaciones en electrónica de alta frecuencia, incluyendo circuitos resonantes, osciladores, filtros de radiofrecuencia y sistemas de comunicación. La respuesta eficiente en el rango de frecuencias elevadas sugiere una baja pérdida dieléctrica y una buena estabilidad frente a variaciones de voltaje y temperatura.

La caracterización térmica complementó estos resultados al evidenciar una constante dieléctrica elevada (~500), junto con la presencia de dos transiciones ferroeléctricas bien definidas, a 70 °C y 300 °C. Estos valores permiten clasificar a la xenotima como un material dieléctrico híbrido, con comportamiento de Clase I en términos de estabilidad térmica y de Clase II en cuanto a su capacidad de almacenamiento energético. Esta dualidad amplía su rango de aplicaciones potenciales, desde capacitores de precisión hasta dispositivos de almacenamiento de energía y rectificadores de estado sólido.

Desde una perspectiva geológica, el estudio reafirma la importancia de los sistemas tipo rift como ambientes favorables para la concentración de elementos estratégicos. El Rift de Molango, en particular, presenta una arquitectura extensional post-laramídica que ha facilitado la circulación de fluidos mineralizantes y la formación de depósitos fosfatados ricos en tierras raras. La correlación estratigráfica y estructural con otros sistemas internacionales, como Bayan Obo (China) y afloramientos en

Mongolia, refuerza la relevancia metalogenética de esta región y su potencial para futuras exploraciones.

Finalmente, esta tesis contribuye al fortalecimiento del conocimiento científico sobre minerales estratégicos en México, al tiempo que propone una ruta metodológica replicable para la caracterización de materiales funcionales mediante técnicas avanzadas. Los resultados obtenidos no solo validan la hipótesis planteada, sino que abren nuevas líneas de investigación en el campo de los materiales dieléctricos, la geología económica y la ingeniería de dispositivos electrónicos.

Referencias

Balaram, V. (2023). Potential Future Alternative Resources for Rare Earth Elements: Opportunities and Challenges. *Minerals*, 13(3), 425. doi:10.3390/min13030425

Yu, L., Zou, H., Li, M., Pirajno, F., Cao, H., Xiao, B., Hou, M. (2024). Fingerprinting Pb-Zn mineralization events in the SW Yangtze Block, South China: A case from Yuanbaoshan deposit. *Ore Geology Reviews*, 165. doi:https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105878.

Jara, R., Ghiglione, M., Galliani, L., & Mpodozis, C. (2023). From rift to foreland basin: A case example from the Magallanes-Austral basin, southernmost Andes. *35*, 865 - 897. doi:https://doi.org/10.1111/bre.v35.3.

Sillitoe, R. H., & Rodríguez, G. (2023). Exhalative red-bed copper mineralization in travertine, Puna Plateau, northwest Argentina. *Mineralium Deposita*, 58(2), 243-261.

Walter, B. F., Giebel, R. J., Siegfried, P., Doggart, S., Macey, P., Schiebel, D., & Kolb, J. (2023). The genesis of hydrothermal veins in the Aukam valley SW Namibia—A far field consequence of Pangean rifting?. *Journal of Geochemical Exploration*, 250, 107229.

Lisboa, L., Filho, C., Monteiro, L., & Mansur, E. (2023). Gahnite, garnet and magnetite compositions of metamorphosed sediment-hosted Zn- Pb-(Cu-silver-Ag) deposits of the Mesoproterozoic Nova Brasilândia Group: Vectors for SEDEX deposits with Broken Hill- type affinities in the western Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 249. doi:https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107210

Cerecedo-Sáenz, E., Rodríguez-Lugo, V., Hernández-Ávila, J., Mendoza- Anaya, D., Reyes-Valderrama, M., Moreno-Pérez, E., & Salinas- Rodríguez, E. (2018). Mineralization of Rare Earths, Platinum and Gold in a Sedimentary Deposit, Found Using an Indirect Method of Exploration. *Aspects in Mining & Mineral*, 1(2). doi:10.31031/AMMS.2018.01.000510

Cantagrel, J.M. and Robin, C. (1979). K-Ar dating on Eastern Mexican volcanic rocks-relations between the andesitic and the alkaline provinces. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 5: 99-114.

Cardarelli, F. (2018). *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference* (3rd. Edition). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-38925-7>

Hoshino, M., Sanematsu, K., Watanabe, Y. (2016). REE Mineralogy and Resources, en J-C, Bünzli; V. K., Pecharsky (eds.). *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (Vol. 49, pp. 129-243). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcrc.2016.03.006>

Nimila, D., Nadeera, B., I.M.S.K, I., Sudath, R., Ranjith, P., Bandara, A., Kithsiri, D. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>

Park, S. J., Seo, I., Lee, K. Y., & Hyeong, K. (2019). Rare Earth Elements and Other Critical Metals in Deep Seabed Mineral Deposits: Composition and Implications for Resource Potential. *Minerals*, 9(3). doi:<https://doi.org/10.3390/min9010003>

Bat-t-ezzati, L. (2018). Solid Solutions in Metals: From Hume-Rothery's Rules to High Entropy Alloys. Università degli Studi di Torino.

Bhadeshia, H. K. D. H. (s. f.). Solid Solutions: The Hume-Rothery Rules. Universidad de Cambridge. Recuperado de

Pei, Z., et al. (2020). Machine-learning informed prediction of high-entropy solid solutions. npj Computational Materials, 6 (1).

Study.com. (2023, noviembre). Hume-Rothery Rules | Conditions & Examples. Recuperado de

Bouchy, S., Malakooti, M. H., Poole, Z. L., Krishnaswamy, S., & White, R. L. (2022). Characterization of the elastic, piezoelectric, and dielectric properties of lithium niobate single crystals from 25 °C to 900 °C. Crystals, 12(7), 953.

Hernández-Moreno, A. C., González-León, O., Cortés-Escobedo, C. A., & Reyes-Montero, P. J. (2023). Ferroelectric, dielectric and electromechanical properties of BCZT ceramics: Thermal stability and resonance behaviour. Materials, 16(6), 2268.

Lee, S. Y., Kim, S. J., & Kim, I. W. (2014). High Curie temperature $\text{BiInO}_3\text{--PbTiO}_3$ films: Correlation between composition and Curie temperature. Scientific Reports, 4, 5918.

Laadjal, M., Kaddouri, A., & Belbachir, M. (2023). Multilayer Ceramic Capacitors: An Overview of Failure Mechanisms and Dielectric Classes. Electronics, 12(6), 1297.

Lu, H., & Meng, X. (2015). Correlation between band gap, dielectric constant, Young's modulus and melting temperature of GaN nanocrystals and their size and shape dependences. *Scientific Reports*, 5, Article 16939.

Momma, K., & Izumi, F. (2011). VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data. *Journal of Applied Crystallography*, 44(6), 1272–1276.

Ravichandran, R., Wang, A. X., & Wager, J. F. (2016). Solid-state dielectric screening versus band gap trends and implications. *Optical Materials*, 60, 181-187.

Yang, Y., Song, W., Liu, Y., Zhu, X., Kynicky, J., & Chen, Q. (2024). Mineralogy and element geochemistry of the Bayan Obo (China) carbonatite dykes: Implications for REE mineralization. *Ore Geology Reviews*, 165, 15.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105873> [3] Suárez, M., García-Rivas, J., Morales, J.

Guide to Ceramic Capacitor Dielectrics and Other Types. (2022, 14 febrero). Altium.

EPCI Academy. (s. f.). Class I Ceramic Capacitors.

Kui-Feng, Y., Hong-Rui, F., Pirajno, F., & Liu, X. (2023). . Magnesium isotope fractionation in differentiation of mafic-alkaline- carbonatitic magma and Fe-P-REE-rich melt at Bayan Obo, China. *Ore Geology Review*, 157.
doi:[10.1016/j.oregeorev.2023.105466](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105466)

Cerecedo Sáenz, E., Salinas Rodríguez, E., & Hernández Ávila, J. (2023). El Rift Molango: El Rift Molango y sus recursos minerales (Edición en español). Editorial Académica Española. <https://www.amazon.com.mx/dp/6202151005>

Dostal, J., & Gerel, O. (2022). Occurrence of Niobium and Tantalum Mineralization in Mongolia. *Minerals*, 12(12). doi:<https://doi.org/10.3390/min12121529>

Vera-Morales, B. A., Hernández-Ávila, J., Salinas-Rodríguez, E., Cerecedo-Sáenz, E., Flores-Badillo, J., & Aquino-Torres, E. (2024). Ocurrencia de lepidolita con (Li) en la Formación Atotonilco el Grande, en el estado de Hidalgo. *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 11(11), 39–45. <https://doi.org/10.29057/aactm.v11i11.13151>

Wali Arain, A., Shakoor Mastoi, A., Daahar Hakro, A., Ahmed Rajper, R., Afzal Jamali, M., & Raza Bahatti, W. (2021). A preliminary review on the metallogeny of sediment-hosted Pb-Zn deposits in Balochistan, Pakistan. *Earth Science Malaysia (ESMY)*, 5, 19-26. doi:10.26480/esmy.01.2021.19.26

Liu, W., Mei, Y., Etschmann, B., Glenn, M., MacRae, C. M., Spinks, S. C., ... & Paterson, D. J. (2023). Germanium speciation in experimental and natural sphalerite: Implications for critical metal enrichment in hydrothermal Zn-Pb ores. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 342, 198-214.

Obaidala, N. A., Mahfouz, K. H., & Metwally, A. A. (2023). Mesozoic Sedimentary Succession in Egypt.. In *The Phanerozoic Geology and Natural Resources of Egypt* (pp. 169-219). Springer International Publishing. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-95637-0_6.