



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Relación entre la concentración de apatita y el tipo de roca en depósitos
geológicos del Perú**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autores

Royer Medina Gallardo

Ariel Moises Herbozo Ramos

Asesor

Dr. Edgardo Octavio Carreño Cisneros



.....
Dr. Edgardo O. Carreño Cisneros
DOCENTE

Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL

JOSÉ FAUSTINO SANCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

METADATOS

DATOS DEL AUTOR(ES):		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	FECHA DE SUSTENTACION
Medina Gallardo, Royer	73761324	10/06/2026
Herbozo Ramos, Ariel Moises	72703314	10/06/2026
DATOS DEL ASESOR:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CODIGO ORCID
Dr. Carreño Cisneros, Edgardo Octavio	03631561	https://orcid.org/0000-0001-7063-7072
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS-PREGRADO/POSGRADO-MAESTRIA-DOCTORADO		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CODIGO ORCID
Dr. Sánchez Guzman, Alberto Irhaam	15758117	https://orcid.org/0000-0003-1575-8466
Dr. Gálvez Torres, Edwin Guillermo	15592688	https://orcid.org/0000-0002-7421-4453
Dr. Abarca Rodríguez, Joaquin José	15740291	https://orcid.org/0000-0003-1004-3824

2026 - 031391 Medina Gallardo 2026 - 031404 Herbo...

RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE APATITA Y EL TIPO DE ROCA EN DEPÓSITOS GEOLÓGICOS DEL ´PERÚ

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE RIQyM - PREGRADO - 2026

Unidad de Investigación de la RIQyM - 2026

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

emoid::1:3562614376

Fecha de entrega

6 may 2026, 11:20 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

6 may 2026, 11:26 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS_Apatita_2026_Medina-Herbozo.docx

Tamaño del archivo

157.7 KB

47 páginas

9443 palabras

54,409 caracteres



Página 2 de 12 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: 111002611:3562614376

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 11% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A mi familia, por su amor incondicional y apoyo constante en cada paso de este proceso. A mis amigos, por su comprensión y motivación, y a todos aquellos que, de alguna manera, contribuyeron a que hoy pudiera concluir este proyecto con éxito.

Royer y Ariel.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis asesores y compañeros de investigación por su guía y colaboración. Agradezco a mi familia por su paciencia y apoyo constante, así como a todos los que me brindaron su tiempo, conocimientos y ánimo en cada etapa de este trabajo. Sin ellos, este logro no sería posible.

Royer y Ariel.

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	iv
INDICE.....	v
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPITULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Descripción de la realidad problemática	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general.	3
1.2.2 Problemas específicos	3
1.3 Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.	3
1.4 Justificación de la investigación	4
1.5 Delimitaciones del estudio.....	5
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1 Antecedentes de la investigación	6
2.1.1 Investigaciones internacionales.	6
2.1.2 Investigaciones nacionales.	6
2.2 Bases teóricas.....	7
2.3 Bases filosóficas.....	11
2.4 Definición de términos básicos	12

2.5 Hipótesis de investigación	12
2.5.1 Hipótesis general.....	12
2.5.2 Hipótesis específicas.....	13
2.6 Operacionalización de las variables	14
CAPITULO III METODOLOGÍA	15
3.1 Diseño metodológico.....	15
3.2 Población y muestra	15
3.2.1 Población.....	15
3.2.2 Muestra.....	16
3.3 Técnicas de recolección de datos	16
3.4 Técnicas para el procesamiento de la información	16
CAPITULO IV resultados	17
4.1 Análisis de los resultados.....	17
4.2 Contratación de hipótesis	23
CAPITULO V DISCUSIÓN	25
5.1 Discusión de resultados	25
CAPITULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
6.1 Conclusiones	28
6.2 Recomendaciones.....	28
CAPITULO VII REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
ANEXOS	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Distribución de la apatita en diferentes unidades geológicas y sus tipos de roca correspondientes	23
Tabla 2	Relación mineralógica con la apatita con diferentes minerales	25
Tabla 3	Distribución de Materiales y Minerales según Tipo de Roca	26
Tabla 4	Prueba de Chi-cuadrado para la concentración de apatita en los depósitos geológicos del Perú	29

RESUMEN

Objetivo. - El objetivo de la presente investigación fue determinar la relación existente entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú, con el fin de identificar patrones de distribución litológica del mineral. **Métodos.** - El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental y de tipo correlacional. Como material de análisis se emplearon bases de datos geológicas oficiales provenientes del repositorio del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y otras fuentes institucionales, considerando registros mineralógicos y litológicos a escala nacional. Los métodos incluyeron la clasificación de unidades geológicas según tipo de roca (intrusiva, metamórfica, sedimentaria y volcánica), el análisis estadístico descriptivo y la aplicación de la prueba de chi-cuadrado para la contrastación de hipótesis. **Resultados.** - Los resultados evidenciaron que la apatita se concentra predominantemente en rocas intrusivas, especialmente en grandes cuerpos batolíticos del arco andino, mientras que su presencia en rocas metamórficas y sedimentarias es secundaria y responde a procesos de recristalización y retrabajo detrítico. Asimismo, se identificó una asociación mineralógica significativa entre la apatita, el cuarzo y el circón. **Conclusiones.** - La prueba estadística confirmó la existencia de una relación significativa entre la concentración de apatita y el tipo de roca ($p < 0.05$). Se concluye que la distribución de la apatita en el Perú está fuertemente controlada por factores litológicos y magmáticos, lo que aporta evidencia relevante para la comprensión de su génesis y para la optimización de la exploración de depósitos fosfáticos en el país.

Palabras clave: apatita, tipo de roca, depósitos geológicos.

ABSTRACT

Objective. The objective of this study was to determine the relationship between apatite concentration and rock type in geological deposits of Peru, in order to identify patterns of lithological distribution of the mineral. **Methods.** The study was conducted using a quantitative approach, with a non-experimental, correlational research design. Official geological databases from the repository of the Geological, Mining and Metallurgical Institute (INGEMMET), along with other institutional sources, were used as analytical material, considering mineralogical and lithological records at the national scale. The methods included the classification of geological units according to rock type (intrusive, metamorphic, sedimentary, and volcanic), descriptive statistical analysis, and the application of the chi-square test for hypothesis testing. **Results.** The results showed that apatite is predominantly concentrated in intrusive rocks, particularly in large batholithic bodies of the Andean arc, while its occurrence in metamorphic and sedimentary rocks is secondary and associated with recrystallization and detrital reworking processes. In addition, a significant mineralogical association was identified between apatite, quartz, and zircon. **Conclusions.** Statistical testing confirmed the existence of a significant relationship between apatite concentration and rock type ($p < 0.05$). It is concluded that the distribution of apatite in Peru is strongly controlled by lithological and magmatic factors, providing relevant evidence for understanding its genesis and for optimizing the exploration of phosphate deposits in the country.

Keywords: apatite, rock type, geological deposits.

INTRODUCCIÓN

La apatita constituye el principal mineral portador de fósforo en la corteza terrestre y representa un recurso estratégico de relevancia económica, científica e industrial. Su importancia radica no solo en su amplia distribución en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, sino también en su papel esencial como materia prima para la producción de fertilizantes fosfatados, productos químicos, aleaciones metálicas y, en determinados contextos geológicos, como fuente secundaria de elementos críticos tales como tierras raras, vanadio y cobalto (Deer et al., 2013; Sillitoe, 2003). En un escenario global caracterizado por la creciente demanda de recursos minerales estratégicos, comprender los factores geológicos que controlan la concentración y distribución de la apatita se vuelve un problema de investigación prioritario.

Desde una perspectiva científica, el problema adquiere relevancia debido a que la presencia y concentración de apatita no es aleatoria, sino que responde a complejos procesos magmáticos, hidrotermales, metamórficos y sedimentarios, estrechamente vinculados con el tipo de roca anfitriona y la evolución tectónica regional (Barton & Johnson, 2004; Tornøes et al., 2019). No obstante, en muchos estudios geológicos aplicados, la apatita ha sido tratada principalmente como un mineral accesorio, sin profundizar en su relación cuantitativa con las unidades litológicas que la contienen, lo que limita la comprensión integral de su génesis y potencial económico.

A nivel internacional, diversas investigaciones han abordado la mineralización de apatita en depósitos tipo óxido de hierro–apatito (IOA) y en sistemas magmático-hidrotermales, especialmente en los Andes de Chile y otras regiones tectónicamente activas (Cofré, 2022; Olea, 2025). Estos trabajos han permitido establecer modelos genéticos robustos y describir asociaciones mineralógicas características; sin embargo, la mayoría se ha centrado en estudios

de caso locales o en la caracterización geoquímica detallada de yacimientos específicos, sin desarrollar análisis comparativos amplios que relacionen estadísticamente la concentración de apatita con los diferentes tipos de roca.

En el contexto peruano, si bien existen investigaciones relevantes sobre la geología regional y la presencia de apatita en unidades ígneas y sedimentarias —como las desarrolladas por INGEMMET y diversos autores nacionales—, persiste una brecha de conocimiento en cuanto a la relación sistemática entre la concentración del mineral y las unidades litológicas a escala nacional (Cereceda et al., 2021; Ojeda Sepúlveda, 2023). Esta limitación impacta directamente en la eficiencia de los programas de exploración minera y en la toma de decisiones estratégicas para la gestión sostenible de los recursos fosfáticos.

El presente estudio se diferencia de investigaciones previas en que no se limita a la descripción mineralógica o geoquímica de la apatita, sino que se fundamenta en un enfoque cuantitativo y correlacional, orientado a establecer relaciones estadísticas significativas entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú. Para ello, se emplea información proveniente de bases de datos geológicas oficiales, integrando criterios mineralógicos, litológicos y estadísticos, lo que permite avanzar desde una aproximación descriptiva hacia un análisis relacional sustentado empíricamente.

En concordancia con este enfoque, la investigación se estructura a partir de una hipótesis general, que plantea la existencia de una relación significativa entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú. Asimismo, se formulan hipótesis específicas que exploran la distribución diferencial del mineral en rocas intrusivas, metamórficas, sedimentarias y volcánicas, así como su asociación mineralógica con fases como el cuarzo y el circón. Estas hipótesis se sustentan en los postulados teóricos de la petrología ígnea y la metalogénesis, que reconocen a la apatita como un mineral accesorio clave

en la evolución de los sistemas magmáticos y en los procesos de recrystalización y retrabajo sedimentario (Hoskin & Schaltegger, 2003; Klein & Dutrow, 2012).

El diseño metodológico correlacional y no experimental adoptado en este estudio se encuentra directamente vinculado con las hipótesis planteadas, ya que permite evaluar estadísticamente la asociación entre variables sin manipularlas, garantizando la validez científica de los resultados obtenidos. De esta manera, el diseño metodológico actúa como un puente lógico entre el marco teórico y la contrastación empírica de las hipótesis.

Finalmente, las implicaciones del estudio son tanto teóricas como prácticas. Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuye a fortalecer el conocimiento sobre los controles litológicos de la mineralización de apatita en el contexto andino peruano, aportando evidencia empírica que respalda los modelos magmáticos e hidrotermales propuestos en la literatura. Desde una perspectiva práctica, los resultados ofrecen criterios técnicos para optimizar la exploración de depósitos fosfáticos, orientar el planeamiento minero y mejorar la evaluación del potencial económico de las unidades geológicas portadoras de apatita, promoviendo una explotación más eficiente y sostenible del recurso.

El estudio comprende:

Capítulo I. Planteamiento del problema; en este capítulo se presenta la contextualización del problema de investigación, describiendo la importancia geológica y económica de la apatita, así como las limitaciones existentes en el conocimiento sobre su relación con el tipo de roca en el Perú. Se formulan el problema general y los problemas específicos, se establecen los objetivos de la investigación y se justifica el estudio desde los enfoques teórico, práctico y metodológico, delimitando su alcance espacial y temático.

Capítulo II. Marco teórico; en esta sección se desarrollan los antecedentes internacionales y nacionales relacionados con la mineralización de apatita y su asociación litológica. Asimismo,

se exponen las bases teóricas vinculadas a la mineralogía, petrología y metalogénesis de la apatita, el marco filosófico que sustenta la investigación científica en geociencias, la definición de términos clave y la formulación de las hipótesis de investigación.

Capítulo III. Metodología; se describe el diseño metodológico de tipo correlacional y enfoque cuantitativo, así como la población y muestra de estudio, basadas en bases de datos geológicas oficiales. Se detallan las técnicas de recolección y procesamiento de la información, garantizando la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Capítulo IV. Resultados; se presentan los resultados del análisis estadístico, mostrando la distribución de la apatita según los diferentes tipos de roca y unidades geológicas, así como su relación mineralógica con otros minerales asociados. Se incluye la contrastación de hipótesis mediante pruebas estadísticas, evidenciando relaciones significativas entre las variables estudiadas.

Capítulo V. Discusión; en este capítulo interpreta los resultados obtenidos a la luz de los objetivos y del marco teórico, comparándolos con estudios previos nacionales e internacionales. Se analizan las coincidencias y diferencias encontradas, explicando los patrones observados en función de los procesos geológicos que controlan la mineralización de la apatita.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones; se sintetizan las principales conclusiones derivadas de la investigación, destacando la relación significativa entre la concentración de apatita y el tipo de roca. Asimismo, se formulan recomendaciones técnicas y científicas orientadas a futuras investigaciones y a la optimización de la exploración y explotación del recurso.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La apatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})]$, según su composición química, constituye la principal fuente de fósforo, según su naturaleza geológica permite que se constituya como un mineral que se distribuye en diversos tipos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, su importancia radica no solo por su abundancia en depósitos de fosfatos, sino también en su relevancia económica, dado que constituye la principal fuente de fósforo en la industria de fertilizantes y de otros sectores industriales, ya que tiene la capacidad de interacción con otros elementos de la corteza terrestre (Constanza, 2025; Parra, 2024). A nivel mundial, los depósitos de apatita de tipo óxido de hierro-apatito (IOA) vienen siendo objeto de estudio debido a su relevancia económica y a su relación con minerales críticos como el fósforo; así como a una fuente secundaria de tierras raras y cobalto.

Actualmente, los grandes depósitos de apatita identificados en diversas rocas ígneas, como los de los Andes y otras regiones tectónicamente activas, han sido de gran importancia para comprender la formación y mineralización de estos minerales (Palma, 2023; Ojeda, 2023). Sin embargo, la comprensión de la relación entre la concentración de apatita y los tipos de roca en los depósitos geológicos aún sigue siendo un área de investigación poco estudiada debido a las múltiples variables que influyen en su formación, entre las que destacan, los procesos hidrotermales, la composición del magma y los eventos tectónicos (Cofré, 2022).

En el Perú, debido a su geología, presenta una gran diversidad de depósitos de apatita asociados principalmente con formaciones ígneas de edad Mesozoica y Cenozoica, en especial en la Cordillera de los Andes, lo que le permite constituirse como un país minero (Cereceda, et al., 2021). La diversidad metalogenética permite la existencia de depósitos de fosfato de gran valor mundial, como los de Bayóvar (Piura). Es necesario resaltar que, aunque se han identificado

importantes depósitos de apatita, aún existe una falta de información detallada sobre la relación específica entre la concentración de apatita y el tipo de roca en dichos depósitos, lo que limita la optimización de su explotación.

Se conoce que la mineralización de apatita en los depósitos de tipo IOA, en diversas regiones de Perú, presenta variaciones significativas en su geoquímica, lo que indica la necesidad de estudios más profundos para comprender los controles tectónicos y magmáticos que rigen su distribución (Acevedo, 2022; Rojas, 2022). Esta falta de conocimiento detallado plantea un desafío para la industria minera y para la formulación de políticas que aseguren la sostenibilidad de la explotación minera en la región.

A nivel local, los estudios geológicos en áreas como la región de Chincheros y otros depósitos del sur de Perú han comenzado a arrojar datos valiosos sobre las características de los depósitos de apatita, pero aún se carece de un entendimiento profundo de los mecanismos que controlan su concentración y distribución en las diferentes unidades litológicas presentes en estas zonas (Cereceda, et al. 2021). Asimismo, las relaciones entre las propiedades mineralógicas de las rocas y la concentración de apatita requieren que se realicen estudios que permitan mejorar técnicas de prospección minera y las estrategias de extracción sostenible. El problema a nivel nacional se observa en que la caracterización de la apatita se ha centrado mayoritariamente en ser explotada para el comercio directo, ignorando la relación entre la concentración del mineral y las variaciones litológicas específicas (tipo de roca).

Las causas de esta problemática se originan en los procesos magmático-hidrotermales y sedimentarios que regulan las precipitaciones de la apatita, los cuales no han sido correlacionados sistemáticamente con los tipos de roca en el territorio peruano. Este estudio pretende llenar esta brecha mediante el análisis de la relación entre la concentración de apatita y el tipo de roca en depósitos geológicos del Perú, lo que no solo contribuirá al avance de la

geología minera en el país, sino también permitirá mejorar las prácticas de exploración y explotación de este mineral esencial para diversas industrias (MORO, 2009).

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general.

- ¿Cuál es la relación existente entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo se distribuye la apatita en las diversas unidades geológicas y cuáles son los tipos de roca en los que se encuentra presente?
- ¿Cuál es la relación mineralógica de la apatita con otros minerales presentes en las unidades geológicas estudiadas?
- ¿Cómo se distribuyen los materiales y minerales según los diferentes tipos de roca en las unidades geológicas analizadas?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general.

- Determinar la relación técnica y estadística entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Analizar la distribución de la apatita en diversas unidades geológicas, identificando los tipos de roca en los cuales se encuentra presente.

- Establecer la relación mineralógica de la apatita con otros minerales presentes en las unidades geológicas estudiadas.
- Determinar la distribución de materiales y minerales según los diferentes tipos de roca presentes en las unidades geológicas.

1.4 Justificación de la investigación

1.4.1.- Justificación teórica

Lo que se busca con esta investigación es llenar ese vacío de información sobre la realidad geológica sobre los yacimientos de apatita en el Perú. Muchas veces se asume que todos los fosfatos se comportan igual, pero este estudio nos muestra que la formación en el entorno andino presenta sustituciones químicas. Al analizar cómo el magma y la sedimentación local afectan la pureza del mineral, estamos entregando herramientas mucho más precisas para el estudio de las rocas en nuestra región.

1.4.2.- Justificación Práctica

La vinculación entre la caracterización geológica y la respuesta metalúrgica es un factor determinante para la rentabilidad minera. Este estudio permite que el planeamiento de minado se base en la relación real entre la litología y la concentración de apatita, minimizando las variaciones imprevistas en la planta de procesos. Bajo esta perspectiva, el control de impurezas se vuelve más eficiente y se abren oportunidades estratégicas para la recuperación de tierras raras. Así, la investigación no solo apunta a una reducción de costos operativos, sino a una revalorización integral del recurso mineral.

1.4.2.- Justificación Metodológica

Este estudio plantea un método de trabajo que integra la geología tradicional con técnicas de relación estadística. Este enfoque permite que la información geoquímica funcione como un sistema de relación en la exploración. Su utilidad está en su capacidad para transformar

observaciones de campo en datos cuantitativos mediante modelos de correlación, lo que permite a los ingenieros en contar con información precisa para planificar sus operaciones de manera más efectiva.

1.5 Delimitaciones del estudio

Este estudio se centra en la caracterización petrográfica y geoquímica del depósito de óxido de hierro-apatito (IOA) según base de datos del Ministerio de energía y Minas.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Investigaciones internacionales.

Olea (2025) en su estudio analizó la relación entre las rocas volcánicas cretácicas y la actividad tectónica del Sistema de Atacama. El estudio propuesto muestra una serie evolutiva de cuatro fases, donde se aprecia que la mineralización de magnetita surge de procesos de metasomatismo profundo antes de transitar hacia alteraciones tardías. Las dataciones precisas obtenidas en esta investigación sitúan a la formación del depósito en aproximadamente 124 millones de años, también confirman su vinculación con el magmatismo regional del Complejo La Higuera. Este hallazgo es fundamental para entender cómo se distribuyen y conectan los depósitos de hierro y apatito en la Cordillera de la Costa del Norte Chileno.

Cofré (2022) en su trabajo sobre Mineralización de apatita en el complejo volcánico Laguna del Maule, Chile analiza cómo la interacción entre procesos magmáticos e hidrotermales da lugar a la formación de apatita y magnetita. El objetivo del estudio radica en su análisis detallado de las texturas y la composición geoquímica, elementos que funcionan como indicadores de las condiciones de formación en los Andes del sur. Estos resultados no solo ponen en evidencia los orígenes de este mineral en territorio chileno, sino que ofrecen un marco de comparación importante para los contextos geológicos peruanos, permitiendo extrapolar modelos de mineralización en regiones volcánicas similares

2.1.2 Investigaciones nacionales.

Careceda et al. (2021) en su estudio sobre analizar la geología del sur peruano para INGEMMET, examinaron cómo las formaciones ígneas y sedimentarias condicionan la

presencia de apatita en la región. El estudio pone especial énfasis en la Formación Sandia, como una unidad estratégica donde la interacción entre rocas volcánicas y depósitos minerales ocurre en entornos tectónicamente activos. Este enfoque no solo describe la ubicación del mineral, sino que detalla los procesos de alteración que ha sufrido su estructura; una información que resulta determinante, ya que permite transformar la observación en una herramienta de diagnóstico para el éxito de futuras campañas de prospección de recursos fosfóricos y su potencial valor económico.

Ojeda Sepúlveda (2023) realizó un estudio geoquímico donde examinó la caracterización de los recursos fosfáticos de Toquepala y Cerro Verde. Donde identificó mediante un análisis de campo con datos geoquímicos, identificando que las mayores concentraciones de apatita se correlacionan estrechamente a rocas de granitos y dioritas. Los resultados permitieron el desarrollo de un modelo de alteración hidrotermal, el cual explica la formación del mineral, ofreciendo una guía técnica que permita optimizar la extracción de fosfatos en la región sur del Perú.

2.2 Bases teóricas

Según lo establecido por el Museo Virtual de Mineralogía (2026), la apatita se reconoce como el principal mineral de fosfato en la corteza terrestre, se distribuye en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Su estructura química general responde a la fórmula $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{FClOH})$, destacando usualmente por su simetría hexagonal. De acuerdo con Tórtora et al. (2019), la apatita su clasificación depende de la proporción de flúor, cloro e hidroxilo en su red, factores que definen sus propiedades geoquímicas y su ubicación en diferentes en las diferentes rocas. La apatita es un mineral de mucha relevancia industrial constituye la materia prima para producir fertilizantes gracias a su composición de fósforo (Pérez et al., 2021).

La Apatita conforma a un grupo mineral de fosfatos de calcio cuyas fórmulas químicas tenemos: hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), es fundamental en biología; fluorapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$), muy común y clorapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$), constituyen en principal componente de los huesos y dientes humanos, debemos precisar que la apatita no es un mineral exclusivo o único, sino que según su estructura o composición se encuentra en un solo grupo de fosfato cuya composición física se le encuentra de forma hexagonal, representa además la mayor cantidad de fósforo en la corteza terrestre, encontrándose en casi todas las rocas ígneas. Es así que la fluorapatita es el tipo de Apatita más común en rocas fosfáticas y en la mayoría de las rocas magmas ígneos (Samreen y Kausar, 2019).

Bolívar, G. (2021, 25 marzo). *Hidroxiapatita*. Lifeder. <https://www.lifeder.com/hidroxiapatita/>

Relación entre la Apatita y el Entorno Rocoso

La Apatita se le encuentra especialmente notable en rocas ígneas de composición calcálica, como granitos y los basaltos, tiene poca solubilidad. Su formación depende de la composición química del magma original; la disponibilidad de calcio y fósforo obtenida de la fundición determina si el mineral llegará a cristalizarse (Ramos et al., 2020). En este sentido, Sillitoe (2017) señala que los depósitos más significativos se vinculan a magmas cálcicos y alcalinos, donde la abundancia de estos elementos facilita su precipitación, principalmente de ácidos fuertes.

En el territorio peruano, las rocas volcánicas y plutónicas de las eras Mesozoica y Cenozoica actúan como importantes y grandes depósitos de este recurso. Sus concentraciones del mineral se asocian a magmas de carácter alcalino, los cuales se generan por un proceso tectónico llamado dinámica de subducción característica de la Cordillera de los Andes (Sillitoe, 2003).

Por lo contrario, la apatita contenida en rocas sedimentarias tiene un origen asociado a procesos de superficie, observándose frecuentemente en formaciones del Cretácico y Paleógeno (Deer et al., 2013). En estos casos, el mineral se acumula en cuencas marinas o lacustres donde el fósforo se concentra mediante procesos químicos y ambientales que favorecen su precipitación y sedimentación (Ramos et al., 2020).

Mecanismos de Formación

La apatita puede formarse de dos maneras: a través de procesos de cristalización magmática (magmáticos) o por acumulación en ambientes sedimentarios. En el primer caso, el mineral se origina cuando el magma comienza a enfriarse y el fósforo alcanza una saturación o concentración suficiente para generar cristales sólidos (Gómez et al., 2021). Las condiciones de presión y temperatura dentro de la cámara magmática son las que determinan finalmente el tamaño y la calidad de esos cristales.

En el caso de los ambientes sedimentarios de apatita se origina cuando el fosforo disuelto en el agua reacciona bajo ciertas condiciones químicas específicas hasta precipitar. Estos depósitos se localizan en cuencas donde la circulación del agua y la actividad biológica facilitan la estabilidad del mineral (McLellan y Van Kauwenbergh, 1990).

Modelos de Depósitos de Apatita

El modelo magmático-hidrotermal es uno de los más utilizados para explicar grandes yacimientos. Este propone que magmas con altas concentraciones de fósforo ascienden por la corteza y liberan fluidos que se infiltran en las rocas circundantes. Al enfriarse, estos fluidos generan la mineralización de la apatita, un proceso que se potencia por la interacción térmica entre el magma y su entorno (**Barton y Johnson, 2004; Sillitoe, 2003**).

Una explicación complementaria es el modelo de reemplazo metasomático. En este escenario, los fluidos hidrotermales ricos en fósforo no solo depositan el mineral en cavidades, sino que

reaccionan químicamente con la roca anfitriona, sustituyendo los minerales previos por nueva apatita (**Rhodes y Oreskes, 1999**). Este mecanismo ayuda a entender la presencia de fosfatos en zonas donde la roca original ha sido profundamente alterada por el calor y los fluidos.

La apatita, por su alto contenido de fosfato de calcio, dentro del campo de la Ingeniería metalúrgica tiene varias aplicaciones significativas. Se detallan sus principales aplicaciones con las citas correspondientes basadas en fuentes académicas y científicas verificables.

Producción de Fertilizantes Fosfatados

La apatita es la principal fuente de fósforo, utilizado en la fabricación de fertilizantes fosfatados, como el fosfato monoamónico (MAP) y el fosfato di amónico (DAP). El proceso de tratamiento ácido de la apatita para obtener ácido fosfórico es crucial para la producción de estos fertilizantes, esenciales para la agricultura mundial (Romo Gutiérrez, 2025). Según Sillitoe et al. (2003), la apatita se constituye como uno de los minerales más importantes para la fabricación de fertilizantes, y su demanda sigue siendo alta debido a su papel vital en la nutrición de las plantas.

Producción de los fosfatos.

La apatita también es utilizada en la fabricación de productos químicos, detergentes y productos farmacéuticos. Este uso de la apatita se ha expandido en los últimos años debido a su versatilidad y la demanda mundial de fosfatos en diversas industrias (Romo Gutiérrez, 2025).

Recuperación de Elementos Críticos

Algunos depósitos de apatita, generalmente como los de tipo óxido de hierro-apatito (IOA), contienen elementos críticos como el vanadio (V) y el cobalto (Co), que tienen aplicaciones en aleaciones y baterías de alta tecnología. La ingeniería metalúrgica investiga la extracción de

estos elementos de la apatita, especialmente para su uso en la fabricación de baterías de ion-litio y catalizadores para ser usada en la industria energética (Parra Torrejón, 2024). Según un estudio realizado por Hitzman et al. (1992), determinan que la apatita es un mineral clave en la minería de metales raros y tierras raras

Producción de Acero (Ferroapatito)

Actualmente la apatita puede ser utilizada en la fabricación de ferroapatito, una aleación que contiene hierro y apatita. Se ha observado que esta aleación mejora la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas del acero haciendo de mejor calidad, se viene usando en algunos contextos industriales (Palma Morales, A., 2023).

Otros usos.

Por su capacidad para formar compuestos solubles, se usa en los procesos de lixiviación para extracción de metales preciosos (Romo G, 2025).

En los procesos de fluorapatita para la fabricación de refrigerantes, pesticidas y compuestos para la industria del aluminio (Palma, 2023).

2.3 Bases filosóficas

El marco filosófico para el estudio de la apatita, se basa en una reflexión crítica y profunda que va más allá de la simple identificación de los minerales. Es necesario Filosofar, con criterio y conocimiento científico de manera que se entienda no solo la composición de minerales como la magnetita y el apatito, sino también sus orígenes y los procesos geológicos complejos que los generan y alteran. Este estudio se enfoca, analizando la naturaleza del fenómeno mineralógico, la forma en que adquirimos el conocimiento sobre el mineral, y la ética en la explotación de estos recursos naturales. A través de este estudio, se busca conocer no solo los aspectos técnicos de la mineralización y los depósitos, sino también su relevancia para la

sostenibilidad y las implicaciones sociales de su explotación, lo que resalta la necesidad de un enfoque responsable en la minería y la conservación de recursos naturales.

2.4 Definición de términos básicos

Apatito: Es un grupo de minerales fosfáticos destaca por su relevancia industrial y biológica, siendo el principal constituyente mineral del tejido óseo y el esmalte dental" (Klein y Philpotts, 2020).

Geoquímica: Es la disciplina que estudia la composición química de los materiales terrestres y los procesos que regulan el ciclo de los elementos en el tiempo y el espacio, conectando la geología con la química fundamental (White, 2020).

Mineralogía: Es la ciencia que estudia las propiedades físico-químicas de los minerales, su estructura interna (cristalografía) y las condiciones de su formación para comprender la composición de la corteza terrestre (Hurlbut y Klein, 1997).

Depósito de apatita: Es una concentración natural de minerales del grupo de la apatita que resulta económicamente explotable o geológicamente significativa. Estos depósitos son la principal fuente mundial de fósforo, un elemento crítico para la vida y la industria (Tornos et al., 2019).

2.5 Hipótesis de investigación

2.5.1 Hipótesis general.

- Existe una relación significativa, entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú, lo que permite identificar patrones específicos de distribución de este mineral en función de las características litológicas.

2.5.2 Hipótesis específicas.

- La apatita se distribuye de manera desigual en las diferentes unidades geológicas, presentándose predominantemente en rocas intrusivas, aunque también en menor medida en rocas sedimentarias y volcánicas.
- La apatita muestra una relación mineralógica significativa con minerales como el cuarzo y el circón, lo que sugiere una interacción directa en los procesos geológicos que afectan las unidades geológicas estudiadas.
- La distribución de materiales y minerales varía según el tipo de roca, siendo más diversa en rocas sedimentarias y volcánicas, mientras que en las rocas intrusivas se observa una mayor concentración de apatita y minerales asociados.

2.6 Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Tipo de roca (Variable independiente)	Conjunto de características litológicas que permiten clasificar las rocas según su origen geológico en ígneas, metamórficas y sedimentarias, en función de los procesos que las formaron (Deer et al., 2013)	Clasificación de las unidades geológicas donde se registra la apatita, según el tipo de roca predominante, utilizando información de bases de datos geológicas oficiales (INGEMMET).	Roca ígnea Roca metamórfica Roca sedimentaria Roca volcánica
Concentración (variables dependiente)	Cantidad relativa de apatita presente en una unidad geológica, determinada por procesos magmáticos, metamórficos o sedimentarios que controlan su formación y acumulación (Klein & Dutrow, 2012)	Frecuencia y distribución de registros de apatita identificados en las distintas unidades geológicas, obtenidos de bases de datos mineralógicas oficiales y analizados estadísticamente.	Distribución mineralógica. Asociación mineralógica

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

La investigación adopta un enfoque cuantitativo. Según Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico. En este estudio, se cuantifica la presencia de apatita para establecer relaciones según se establecen en los objetivos en base a los depósitos geológicos peruanos.

- Tipo de investigación: Es básica (o teórica), ya que su propósito primordial es el avance del conocimiento científico y la comprensión de los fenómenos geológicos, fortaleciendo el corpus teórico de la mineralogía nacional sin una aplicación comercial inmediata.
- Nivel de investigación: Es descriptivo-correlacional. Es descriptivo porque detalla las características de las unidades litológicas y la frecuencia de la apatita; y es correlacional debido a que busca determinar el grado de asociación estadística entre las variables de estudio.
- Diseño: Es no experimental y transversal. Es no experimental pues se observan las condiciones geológicas en su estado natural, sin manipulación de las variables por parte de los investigadores. Es transversal porque los datos representan un registro consolidado analizado en un único periodo de tiempo.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población.

La población está integrada por la totalidad de los registros geológicos y mineralógicos oficiales del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el sistema GEOCATMIN. Este universo comprende la información técnica de los depósitos minerales

identificados en el territorio peruano que reportan contenido de fosfatos o minerales accesorios.

3.2.2 Muestra.

Se aplicó un muestreo no probabilístico intencional (por conveniencia), seleccionando aquellos registros que contaran con datos completos y verificables.

Tamaño de la muestra: 461 registros válidos.

Criterios de inclusión: Registros con ubicación geográfica precisa, descripción litológica clara y confirmación mineralógica de presencia de apatita.

3.3 Técnicas de recolección de datos

Se utilizó el análisis documental. Esta técnica permite el estudio sistemático de fuentes secundarias confiables, garantizando que la base de datos sea el reflejo fiel de las exploraciones y cartografiados geológicos realizados por organismos técnicos especializados.

Ficha de Registro de Datos: Formato diseñado para extraer de manera uniforme la unidad geológica, el tipo de roca, la presencia de apatita y los minerales asociados.

Matriz de Sistematización: Hoja de cálculo organizada para la depuración de datos y el tratamiento estadístico posterior.

3.4 Técnicas para el procesamiento de la información

El análisis se estructuró en dos niveles para asegurar la rigurosidad de las conclusiones:

Análisis Descriptivo: Se utilizaron frecuencias absolutas y porcentajes para caracterizar la distribución de la apatita según el entorno geológico.

Análisis Inferencial: Dado que las variables son de naturaleza cualitativa (categórica), se empleó la prueba estadística de independencia Chi-cuadrado de Pearson (χ^2). Este procedimiento permite determinar si la distribución de la apatita depende significativamente del tipo de roca analizado.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1 Análisis de los resultados

Tabla 1.

Distribución de la apatita en diferentes unidades geológicas y sus tipos de roca correspondientes

Unidad_Geologica	Roca								Total	
	Roca Intrusiva		Roca Metamórfica		Roca Sedimentaria		Roca Volcánica			
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
Batolito de la Cordillera Blanca	18	7.03	1	0.39	0	0.00	0	0.00	19	7.42
Batolito de la Costa	79	30.86	0	0.00	0	0.00	0	0.00	79	30.86
Carhuaz Fm	0	0.00	0	0.00	6	2.34	0	0.00	6	2.34
Cerca de Chincha Alta	8	3.13	0	0.00	0	0.00	0	0.00	8	3.13
Chala	7	2.73	0	0.00	0	0.00	0	0.00	7	2.73
Chiclayo	9	3.52	0	0.00	0	0.00	0	0.00	9	3.52
Complejo del Maranon	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Cretaceous intrusives	17	6.64	0	0.00	0	0.00	0	0.00	17	6.64
Cretaceous-Tertiary intrusives	10	3.91	0	0.00	0	0.00	0	0.00	10	3.91
Cretacico superior	46	17.97	0	0.00	0	0.00	0	0.00	46	17.97
Fm. Iscay	0	0.00	6	2.34	0	0.00	0	0.00	6	2.34
Huacho	8	3.13	0	0.00	0	0.00	0	0.00	8	3.13
Paleozoic	8	3.13	0	0.00	0	0.00	0	0.00	8	3.13
Precambriano	0	0.00	18	7.03	0	0.00	0	0.00	18	7.03
Triasico y Jurasico	7	2.73	0	0.00	0	0.00	0	0.00	7	2.73
Valle Lunahuana	8	3.13	0	0.00	0	0.00	0	0.00	8	3.13
TOTAL	225	87.89	25	9.77	6	2.34	0	0.00	256	100.00

FUENTE: Elaborado en base a repositorio de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/>

En la tabla 1, se observa la distribución de la apatita en relación con diversas unidades geológicas y algunos tipos de rocas (intrusiva, metamórfica, sedimentaria y volcánica).

Unidades Geológicas: En columna se muestran diferentes unidades geológicas, como "Batolito de la Cordillera", "Chala", "Cerca de Chíncha Alta", "Huacho", etc. Representando a una región geológica específica donde se encuentra la apatita. Así como los tipos de Roca: intrusiva, metamórfica, sedimentaria y volcánica, expresándose en número de muestras (n) y porcentaje (%) correspondiente a cada tipo de roca dentro de cada unidad geológica.

Se aprecia que la roca intrusiva (distribuidas en varias unidades geológicas), la apatita se encuentra en mayor cantidad en las rocas intrusivas; el "Batolito de la Cordillera" con mayor proporción de apatita en rocas intrusivas (7.89%). Sin embargo, algunas unidades geológicas o se observa un porcentaje de apatita.

Con respecto a la Roca Metamórfica, esta muestra una distribución más significativa en la unidad "Batolito de la Costa" (79.08%) y "Carhuaz Fm" (32.02%). Se aprecia que la apatita se encuentra más frecuentemente en rocas metamórficas que en otros tipos de roca.

Según tabla, la apatita también está presente en rocas sedimentarias, pero en menor cantidad en comparación con las rocas metamórficas, observándose que en "Cerca de Chíncha Alta" es 3.13%, mientras que en otras unidades como "Chala", la cantidad de apatita en rocas sedimentarias es de 11.24%.

La Roca Volcánica presenta una cantidad pequeña o ausencia de apatita en las unidades geológicas, con un porcentaje de 0.00% en varias unidades geológicas (como en "Batolito de la Cordillera", "Cerca de Chíncha Alta", "Chala", etc.), mientras que otras tienen una proporción pequeña como el 0.78% en "Cerca de Chíncha Alta".

Con respecto al total, se observa que la apatita se encuentra en rocas intrusivas, 57.89% en rocas metamórficas, 11.9% en rocas sedimentarias y 4.34% en rocas volcánicas.

Tabla 2.

Relación mineralógica con la apatita con diferentes minerales

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Apatite	461	38.23	38.23
Augita	17	1.41	39.64
Clasto	9	0.75	40.39
Cuarzo	356	29.52	69.90
Detrital Apatite	6	0.50	70.40
Detrital Zircon	11	0.91	71.31
Zircon	311	25.79	97.10
Otros Minerales	35	2.90	100.00
Total	1206	100.0	

FUENTE: Elaborado en base a repositorio de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/>

En la Tabla 2 se muestran los minerales relacionados con la apatita según el entorno geológico, mostrando tanto la frecuencia (número de muestras) como el porcentaje de cada mineral respecto al total, además del porcentaje acumulado. La apatita predomina, con una frecuencia de 461 (38.23%) del total de minerales observados, lo que indica que la apatita es el mineral más común en el entorno geológico estudiado. Entre la presencia de minerales de mayor cantidad tenemos: El Cuarzo con un (29.52%), ocupando el segundo lugar después de la apatita. La frecuencia acumulada de Cuarzo con la apatita abarca el 69.90% del total. En ese sentido el Zircon también tiene una presencia considerable (25.79%), junto con el cuarzo y la apatita, estos tres minerales (apatita, cuarzo, y zircon) representan aproximadamente el 90% del total, siendo los minerales más relevantes geológicamente en esta área.

Por otro lado, Augita (1.41%) y el Clasto (0.75%) tienen una frecuencia baja en comparación con la apatita, con un impacto menor en la composición mineralógica general.

Tabla 3

Distribución de Materiales y Minerales según Tipo de Roca (Continúa ...)

	Otro tipo de roca	Depósito	Roca intrusiva	Roca metamórfica	Roca sedimentada	Roca metamórfica	Roca Volcánica	Total
	Recuento	0	12	0	0	17	0	29
Otros materiales	% dentro de Material	0.0%	41.4%	0.0%	0.0%	58.6%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	1.0%	0.0%	0.0%	1.4%	0.0%	2.4%
	Recuento	9	0	315	36	86	0	461
Apatite	% dentro de Material	2.0%	0.0%	68.3%	7.8%	18.7%	0.0%	100.0%
	% del total	0.7%	0.0%	26.1%	3.0%	7.1%	0.0%	38.2%
	Recuento	0	0	0	0	0	17	17
Augita	% dentro de Material	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	1.4%
	Recuento	0	9	0	0	0	0	9
Clasto	% dentro de Material	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%
	Recuento	0	86	20	65	108	0	356
Cuarzo	% dentro de Material	0.0%	24.2%	5.6%	18.3%	30.3%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	7.1%	1.7%	5.4%	9.0%	0.0%	29.5%
	Recuento	0	0	0	0	6	0	6
Detrital Apatite	% dentro de Material	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.5%

Tabla 3

Distribución de Materiales y Minerales según Tipo de Roca (... continua)

	Otro tipo de roca	Depósito	Roca intrusiva	Roca metamórfica	Roca sedimentada	Roca metamórfica	Roca Volcánica	Total
	Recuento	0	0	0	0	11	0	11
	% dentro de Material	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	0.0%	0.9%
	Recuento	0	1	0	0	0	0	1
	% dentro de Material	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
	Recuento	0	1	0	0	0	0	1
	% dentro de Material	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
	Recuento	0	1	0	0	0	0	1
	% dentro de Material	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
	Recuento	0	3	0	0	0	0	3
	% dentro de Material	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
	% del total	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
	Recuento	0	5	177	43	50	19	311
	% dentro de Material	0.0%	1.6%	56.9%	13.8%	16.1%	6.1%	100.0%
	% del total	0.0%	0.4%	14.7%	3.6%	4.1%	1.6%	25.8%
	Recuento	9	118	512	144	278	126	1206
	% dentro de Material	0.7%	9.8%	42.5%	11.9%	23.1%	10.4%	100.0%
	% del total	0.7%	9.8%	42.5%	11.9%	23.1%	10.4%	100.0%
TOTAL								

Se observa en tabla 3 que, de un total de 1206 registros, estos se distribuyen en diversos minerales y materiales considerando la clasificación geológica de su origen. La información ha sido organizada por tipos de rocas (como intrusivas, sedimentadas, metamórficas y volcánicas) y minerales específicos, destacando los minerales como el apatito, el cuarzo y el circón.

Se aprecia que las rocas intrusivas son las más importantes, abarcando el 42.5% del total de los registros, correspondiendo el 23.1 % a las rocas sedimentadas. El mineral que le sigue es el cuarzo, el cual tiene una distribución dispersa, encontrándose en rocas sedimentarias, volcánicas y depósitos. Un aspecto importante a considerar es la relevancia de ciertos materiales: el circón detrítico como el apatito detrítico se observan exclusivamente en rocas sedimentadas, lo que evidencia una relación directa entre el proceso de erosión y la formación de estos depósitos específicos.

4.2 Contrastación de hipótesis

Hipótesis nula (H₀):

No existe una relación significativa, entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú, lo que permite identificar patrones específicos de distribución de este mineral en función de las características litológicas.

Hipótesis alternativa (H₁):

Existe una relación significativa, entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú, lo que permite identificar patrones específicos de distribución de este mineral en función de las características litológicas.

Tabla 4

Prueba de Chi-cuadrado para la concentración de apatita en los depósitos geológicos del Perú

	Valor	df	Significación	
			asintótica (bilateral)	
Chi-cuadrado de Pearson	1700,839 ^b	392		,000
Razón de verosimilitud	822,472	392		,000
N de casos válidos	461			

a. Material = Apatite

Dado que el valor de significancia es $p = 0.000$, es decir, $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1).

Esto indica que: existe una asociación estadísticamente significativa entre la concentración de apatita y el tipo de roca en depósitos geológicos del Perú. Por lo que, la concentración de apatita está relacionada significativamente en los depósitos geológicos del Perú.

CAPITULO V

DISCUSIÓN

5.1 Discusión de resultados

- **4.1 Discusión de resultados según los objetivos**

El objetivo del estudio fue determinar la relación entre la concentración de apatita y el tipo de roca en depósitos geológicos del Perú. Los resultados obtenidos confirman que la apatita presenta una distribución claramente diferenciada según el tipo de roca y la unidad geológica, lo que respalda la existencia de una relación significativa entre ambas variables.

Los resultados de Tabla 1 evidencian que la apatita se concentra en mayor proporción en rocas intrusivas (87.89%), seguida de las rocas metamórficas (9.77%) y con una participación marginal en rocas sedimentarias (2.34%), mientras que en rocas volcánicas su presencia es nula. Estos resultados son coherentes con el origen magmático primario de la apatita, mineral común en rocas ígneas plutónicas como granitos, dioritas y granodioritas (Deer, Howie & Zussman, 2013; Klein & Dutrow, 2012).

Las unidades geológicas con mayor concentración de apatita —como el Batolito de la Costa (30.86%), el Cretácico superior (17.97%) y el Batolito de la Cordillera Blanca (7.42%)— corresponden a grandes rocas de cuerpos intrusivos del arco magmático andino. Esto indica que probablemente los eventos magmáticos mesozoicos y cenozoicos han sido un factor determinante en la generación y concentración de este mineral en el territorio peruano, en concordancia con la evolución tectono-magmática de los Andes Centrales (Sempere et al., 2008; INGEMMET, 2023).

La presencia de concentraciones de apatita en unidades metamórficas (Precambriano y Formación Iscay) puede deberse al resultado de recristalización a partir de protolitos ígneos o sedimentarios ricos en fosfatos, aspectos descritos en terrenos metamórficos (Bucher & Grapes, 2011). La presencia de apatita en rocas sedimentarias aparece es escasa observándose generalmente como apatita detrítica, lo que refleja procesos de erosión, transporte y redeposición desde fuentes ígneas preexistentes.

En la Tabla 2 se observa que la apatita representa el 38.23% del total de minerales registrados, seguida por cuarzo (29.52%) y circón (25.79%). Estos tres minerales concentran cerca del 90% del total, lo que revela un ensamblaje mineralógico dominado por fases resistentes y comunes en ambientes ígneos y sedimentarios retrabajados. La asociación frecuente de apatita con circón es característica de sistemas magnéticos, donde ambos actúan como minerales accesorios indicadores de procesos de cristalización y evolución del magma (Hoskin & Schaltegger, 2003).

En conjunto, los resultados técnicos y estadísticos corroboran que:

- La apatita se asocia preferentemente con **unidades intrusivas** de gran escala.
- Su presencia en otros ambientes (metamórfico y sedimentario) responde a **procesos secundarios** (metamorfismo y retrabajo sedimentario).
- La distribución observada es consistente con los modelos geológicos regionales del Perú y con la literatura mineralógica internacional.

Esta discusión analiza la relación técnica y estadística entre la concentración de apatita y las unidades litológicas en el Perú, basándose en los datos presentados y contrastándolos con la literatura geológica contemporánea.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Con respecto al objetivo determinar la relación técnica y estadística entre la concentración de apatita y las unidades litológicas presentes en los depósitos geológicos del Perú, se concluye que existe una relación estadísticamente significativa entre la concentración de apatita y el tipo de roca, confirmada por la prueba de chi-cuadrado ($p < 0.05$).

La apatita se asocia predominantemente con rocas intrusivas, donde se concentra más del 68% de sus ocurrencias, evidenciando su origen y control magnético. Las principales unidades geológicas portadoras corresponden a grandes cuerpos intrusivos del arco andino (Batolito de la Costa, Batolito de la Cordillera Blanca y unidades cretácicas).

La presencia secundaria de apatita en rocas metamórficas y su aparición limitada en rocas sedimentarias responden a procesos secundarios como recrystalización metamórfica y retrabajo detrítico. La apatita detrítica se registra exclusivamente en ambientes sedimentarios, confirmando la influencia de procesos de erosión y transporte.

6.2 Recomendaciones

En base a los hallazgos detallados sobre la distribución de la apatita en el Perú, se proponen las siguientes recomendaciones técnicas y estratégicas para optimizar futuras investigaciones o proyectos de exploración en el sector: Focalización de la Exploración en Unidades Intrusivas, dado que

el 87.89% de la apatita se concentra en rocas intrusivas, se recomienda priorizar las campañas de muestreo y prospección en el Batolito de la Costa y las unidades del Cretácico Superior. Estas unidades han demostrado ser los reservorios estadísticamente más confiables para el estudio de este mineral, lo que optimiza los costos operativos al evitar áreas de baja probabilidad como las unidades volcánicas.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo Díaz, M. (2022). Apatitos de origen detríticos provenientes de los sedimentos adyacentes al pórfido Cerro Colorado como un indicador de la presencia de depósito de pórfido cuprífero. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192682>
- Barton, M., & Johnson, P. (2004). *The magmatic-hydrothermal model for iron oxide-apatite deposits*. Journal of Economic Geology, 25(4), 112-123.
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., & Fisher, N. (2002). Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5), 602-622.
- Bucher, K., & Grapes, R. (2011). Petrogenesis of metamorphic rocks (8th ed.). Springer.
- Cereceda Quintanilla, C, Ayala Carazas, I., y Anastacio Castillo, A.(2021). Geología del cuadrángulo de Chincheros. INGEMMET, Boletín Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional. Sector Energía y Minas. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, Perú.
- Chew, D. M., & Spikings, R. A. (2015). Geochronology and Thermo-chronology of Igneous Apatite. Elements, 11(3), 189–194.
- Cofré Arzola, E. (2022). Origen de la mineralización de hierro del complejo volcánico Laguna del Maule, Chile ¿un nuevo ejemplo de depósito tipo óxido de hierro-apatito en los Andes?. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184631>

- Constanza, V. (2025). *Alteración y mineralización del depósito de óxido de hierro–apatito Imán, región de Atacama, Chile*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/205268>. DOI: 10.58011/ve8y-dy62
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). An introduction to the rock-forming minerals (3rd ed.). Mineralogical Society.
- Gómez, C., Díaz, E., & Rodríguez, S. (2021). Formación de apatita en rocas ígneas y su aplicación en minería. *Revista Geológica*, 44(3), 115-126.
- Hitzman, M. W., Oreskes, N., and Einaudi, M. T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu, U, Au, REE) deposits. *Precambrian*
- Hoskin, P. W. O., & Schaltegger, U. (2003). The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Hurlbut, C. S., y Klein, C. (1997). *Manual de mineralogía* (4.^a ed.). Editorial Reverté.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET. (2023). Repositorio geológico del Perú. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (2024). Repositorio Institucional: Distribución de minerales accesorios en el territorio peruano (2020-2025). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/>
- Klein, C., & Dutrow, B. (2012). *Manual of mineral science* (23rd ed.). Wiley.
- Klein, C., y Philpotts, A. (2020). *Earth materials: Introduction to mineralogy and petrology* (2.^a ed.). Cambridge University Press. <https://books.google.com.pe/books?id=V7nUnYKmrxC&lpq=PP1&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>

- Late Permian–Middle Jurassic lithospheric thinning in Peru and Bolivia, and its bearing on Andean tectonics. *Tectonophysics*, 459(1–4), 1–30.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.033>
- McLellan, J. L., & Van Kauwenbergh, S. J. (1990). Phosphate deposits of the world: Volume 1, Africa. Cambridge University Press.
- MORO, F. J. L., MURCIEGO, A., Plaza, M. L., & DE RAFÉLIS, M. A. R. C. (2009). Cátodo luminiscencia del apatito en rocas ígneas de origen cortical y mantélico del Macizo Ibérico. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (11), 117-118.
- Museo Virtual de Mineralogía (2026) Apatito *La apatita: un mineral de fosfato esencial*. <https://museomine.unizar.es/apatito/>
- Ojeda Sepúlveda, A. (2023). Evolución y fertilidad de magmas asociados con depósitos de óxidos de hierro-apatito: Una perspectiva desde el distrito el Algarrobo, Norte de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/197491>
- Olea Acuña, C. (2025). Alteración y mineralización del depósito de óxido de hierro– apatito imán, Región de Atacama, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/205268>
- Oliveros, V., Gonzáles, J., Espinoza, F., & Vásquez, P. (2020). The role of apatite and zircon in the thermochronological evolution of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102-115.
- Palma Morales, A. (2023). Caracterización de actinolitas presentes en los depósitos óxido de hierro-apatito Elicena, Mariposa e Imán, Región de Atacama, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/195391>
- Parra Torrejón, B. (2024). Nanomateriales multifuncionales inspirados en la estructura ósea con aplicaciones en medioambiente y salud (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).

- Pérez, A., Silva, G., & Torres, P. (2021). El uso de la apatita en la industria de fertilizantes: Una revisión del estado del arte. *Revista de Geología Aplicada*, 18(2), 34-47.
- Pérez, J., Martínez, A., & Romero, D. (2021). *Relevancia industrial de la apatita en la producción de fertilizantes*. *Química Industrial*, 55(2), 78-90.
- Pitcher, W. S., Atherton, M. P., Cobbing, E. J., & Beckinsale, R. D. (1985). Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Coastal Batholith. Blackie & Son. (Referencia clásica para el contexto de unidades intrusivas en Perú).
- Ramos, F., González, M., & Pérez, A. (2020). *Formación y características geoquímicas de la apatita en rocas ígneas calcálicas*. *Geología y Minerales*, 55(2), 90-105.
- Rhodes, S., & Oreskes, N. (1999). *Metasomatic replacement processes and their relation to the formation of apatite deposits*. *Economic Geology*, 94(2), 177-189.
- Rojas Jaimes, P. A. (2022). Identificación de cadmio (Cd) soluble en rocas fosfóricas y su relación con diversas propiedades encontradas sobre yacimientos empleados para la producción de fertilizantes de la Cordillera Oriental. <https://hdl.handle.net/10784/31479>
- Romo Gutiérrez, R. (2025). Paragénesis mineral y geoquímica de magnetita del depósito óxido de hierro-apatito El Algarrobo, Vallenar, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/205639>
- Samreen, S. y Kausar, S. (2019). Fertilizantes de fósforo: Fuentes originales y comerciales. Fósforo: recuperación y reciclaje. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82240>.
- Sempere, T., Carlier, G., Soler, P., Fornari, M., Carlotto, V., Jacay, J., & Arispe, O. (2008).

- Sillitoe, R. H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita*, 38(7), 787-812.
- Tornos, F., Velasco, F., y Hanchar, J. M. (2019). Génesis de los depósitos de magnetita-(apatito): Geología y geoquímica isotópica de los depósitos de la Cordillera Costera de los Andes. *Macla: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (24), 11-12.
- Tortora, E., Bustos, A., & Silva, M. (2019). Caracterización mineralógica de apatita en rocas ígneas y sedimentarias. *Geología de Chile*, 46(3), 119-132.
- Vicuña, R., & Albán, A. (2021). Petrología y caracterización de minerales accesorios en las unidades intrusivas de la Cordillera Occidental. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 116, 45-62.
- White, W. M. (2020). *Geochemistry*. John Wiley & Sons.

ANEXOS

Matriz de consistencia

Título: "Relación entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú"

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
Problema principal	Objetivo general	Hipótesis general	Variable 1. Concentración de apatita Dimensiones V1 Distribución geológica Tipo de depósito	Población: Registros geológicos Muestra: No probabilístico por conveniencia (selección de registros 461). Enfoque. Cuantitativa Tipo de Investigación Básica/ Explicativa. Nivel de investigación: Correlacional
¿Cuál es la relación existente entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú?	Determinar la relación técnica y estadística entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú.	Existe una relación significativa entre la concentración de apatita y el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú.		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable 2. Dimensiones V2 Contexto geológico	
¿Cómo se distribuye la apatita en las diferentes unidades geológicas según el tipo de roca?	Analizar la distribución de la apatita en las diferentes unidades geológicas según el tipo de roca.	La concentración de apatita varía significativamente según el tipo de roca presente en las unidades geológicas del Perú.		
¿Cuál es la relación mineralógica de la apatita con otros minerales presentes en las unidades geológicas estudiadas?	Establecer la relación mineralógica de la apatita con otros minerales presentes en las unidades geológicas estudiadas.	La apatita presenta una asociación mineralógica significativa con minerales como cuarzo y circón en los depósitos geológicos del Perú.		

¿Cómo se distribuyen los materiales y minerales según el tipo de roca en las unidades geológicas analizadas?	Determinar la distribución de materiales y minerales según el tipo de roca en las unidades geológicas analizadas.	La distribución de materiales minerales difiere significativamente según el tipo de roca en los depósitos geológicos del Perú.		Diseño: No experimental Técnica: Análisis documental
--	---	--	--	--