



Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa

John Franklin Cerrón-Sarcco

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
jcs12160005@gmail.com

Recibido: 28 abril 2024. Recibido en formato revisado: 19 diciembre 2024. Aceptado: 13 enero 2025.

Resumen

Este estudio analizó los procesos petrogenéticos e implicancias locales de las rocas intrusivas en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima, Perú), pertenecientes a las Super Unidades Patap y Santa Rosa. Se realizó cartografiado geológico, y recolección de 23 muestras de rocas para análisis petrográfico, geoquímico y de Difracción de Rayos X. Los resultados confirmaron características regionales de las rocas ígneas, como alcalinidad, ambiente de subducción y tipo de arco magmático. Además, se interpretaron posibles procesos locales: 1) la Super Unidad Patap, formada por magmatismo oxidado en un ambiente de baja energía, presentó cristalización fraccionada, mezcla magnética y procesos neumatólicos que generaron xenolitos con flogopitas; 2) la Super Unidad Santa Rosa, asociada a magmatismo reducido de alta energía, intensa asimilación cortical, nucleación rápida de cristales y emisión de fluidos hidrotermales, los cuales alteraron las rocas de la Super Unidad Patap, generando actinolita, clorita, epidota y trazas de pirita.

Palabras clave: Batolito de la Costa; difracción de Rayos X; geoquímica; petrografía; procesos petrogenéticos; Super Unidad Patap; Super Unidad Santa Rosa.

Intrusive rocks of San Cristóbal, La Virgen, and Altillo Hills (Lima, Peru): petrogenetic processes and their local implications in the Coastal Batholith

Abstract

This study analyzed the petrogenetic processes and local implications of intrusive rocks in the San Cristóbal, La Virgen, and Altillo hills (Lima, Peru), belonging to the Patap and Santa Rosa Super Units. Geological mapping was conducted, along with the collection of 23 rock samples for petrographic, geochemical, and X-ray diffraction analysis. The results confirmed regional characteristics of igneous rocks, such as alkalinity, subduction environment, and magmatic arc type. Additionally, possible local processes were interpreted: (1) the Patap Super Unit, formed by oxidized magmatism in a low-energy environment, exhibited fractional crystallization, magma mixing, and pneumatolytic processes that produced xenoliths with phlogopite; (2) the Santa Rosa Super Unit, associated with reduced, high-energy magmatism, showed intense crustal assimilation, rapid crystal nucleation, and the release of hydrothermal fluids, which altered the rocks of the Patap Super Unit, forming actinolite, chlorite, epidote, and traces of pyrite.

Keywords: Coastal Batholith; X-ray diffraction; geochemistry; petrography; petrogenetic process; Patap Super Unit; Santa Rosa Super Unit.

1 Introducción

El área de estudio se encuentra en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo, ubicados en el distrito del Rímac, departamento de Lima, Perú (Fig. 1).

La geomorfología observada corresponde a cerros testigos, considerados geoformas positivas, rodeados por depósitos cuaternarios del cono deyectivo del río Rímac.

Las rocas ígneas del área de estudio pertenecen al segmento Lima del Batolito de la Costa [21] y están

How to cite: Cerrón-Sarcco, J.F., (2025). Intrusivos de los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altillo (Lima – Perú): procesos petrogenéticos e implicancias locales en el Batolito de la Costa. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA. 57, pp. 7-21. DOI:<https://doi.org/10.15446/rbct.n57.114144>

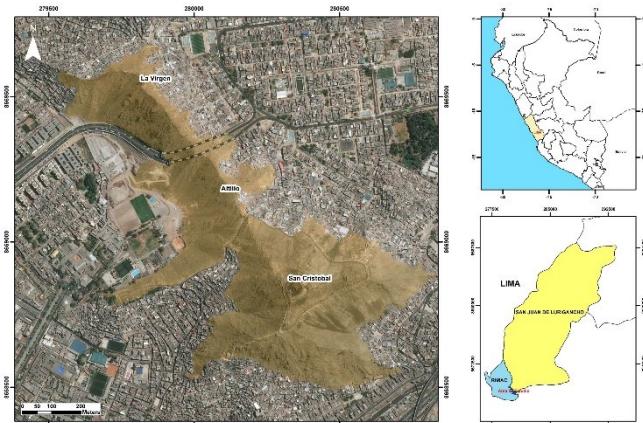


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Fuente: el autor.

catalogados como parte de las Super Unidades Patap y Santa Rosa [10,21,24] del Cretácico. La Super Unidad Patap son las rocas ígneas más antiguas, con edad estimada de ~101.4 Ma según dataciones cercanas de U-Pb por [16-17], y está compuesta por cuerpos ígneos de gabros a dioritas de grano medio a grueso con cristales idiomórficos con ocasionales xenolitos [18]. Por otro lado, la Super Unidad Santa Rosa son rocas más jóvenes e intruyen a Patap, pues presentan una edad estimada entre ~84.4 y 81.7 Ma según dataciones de U-Pb cercanas por [16-17], y está compuesta por dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos de grano medio con cristales subhédrales.

Se llevaron a cabo dos jornadas de cartografiado a escala 1:5000 y muestreo selectivo, recolectando muestras de roca para estudios de química analítica, petrografía y análisis mineralógico por Difracción de Rayos X.

El principal objetivo fue comprender los procesos petrogenéticos y las implicancias locales de los afloramientos intrusivos en los cerros San Cristóbal, La Virgen y Altilllo. Este estudio aportaría información geológica relevante para entender los procesos petrogenéticos que sucedieron localmente en el Segmento Lima del Batolito de la Costa, ya que la mayoría de las investigaciones previas se han centrado en estudios regionales y en sectores más alejados, como los realizados por [2] en los bordes norte y sur del Batolito de la Costa - Segmento Lima, o por [3] entre los paralelos 9° 30' y 10° 30' S.

2 Metodología

2.1 Trabajo de pre-campo y campo

El proceso de investigación comenzó con la recopilación de información bibliográfica, seguida por las jornadas de campo para la obtención de datos geológicos *in situ* usando planos topográficos e imágenes satelitales junto a equipo de geológico de campo para el cartografiado geológico a escala 1:5000. Adicionalmente, se realizó el muestreo de rocas según el tipo de estudio, considerando que no se genere cualquier tipo de contaminación, representativo y homogéneo, haciendo un seguimiento desde el muestreo, embolsado, transporte y obtención de los resultados.

2.2 Petrografía

Se obtuvieron 5 muestras de roca de 15cm de diámetro, marcando un área de 4cm x 6cm que será el área para la lamina delgada. Posteriormente, las muestras fueron enviadas para preparación de lamina delgada en los laboratorios de F.A. Ingenieros y EPCLab.

Los estudios petrográficos fueron realizados en las instalaciones de los laboratorios de F.A. Ingenieros y EPCLab utilizando microscopio óptico binocular de luz polarizada marca Leica y una cámara fotográfica para las capturas de las imágenes.

2.3 Difracción de Rayos X

Se obtuvieron 4 muestras de roca de 10cm de diámetro las cuales fueron preparadas en el laboratorio de F.A. Ingenieros pasando por un proceso de pulverización cristalina en un mortero con el fin de dejar polvo fino, posteriormente colocado en recipientes y luego introducidos en el Difractómetro de Rayos X, siguiendo la metodología de análisis de laboratorio generando los difractogramas de cada muestra con el porcentaje en peso de los minerales constituyentes.

2.4 Análisis químico

Se obtuvieron 14 muestras para análisis químico, utilizando el método de muestreo por esquirlas ($\leq 2\text{cm}$) adquiriendo muestras con un peso de 2 a 3 kgs.

Estas muestras fueron enviadas al laboratorio de química analítica del INGEMMET, sometiéndose al ensayo de roca total mediante ICP-OES (31 elementos) utilizando el método de digestión multiácida, y por ICP-MS (24 elementos) a través del método de fusión con borato de litio.

3 Resultados

3.1 Geología local

Los afloramientos intrusivos presentes en el Cerro San Cristóbal y al nor-oeste del Cerro La Virgen están asociados a la Super Unidad Patap, considerados las rocas más antiguas del área de estudio (Figs. 3 y 4). Macroscópicamente (Fig. 2A) son identificadas como rocas ígneas mesocráticas de textura fanerítica con porcentaje mineralógico de plagioclasa subhedral a euhedral de 55 a 60%, cuarzo anhedral de 5 a 10% y con porcentaje variable de minerales ferromagnesianos anhédrales a subhédrales. La presencia de xenolitos fue variable con tamaños centimétricos a métricos subredondeados. Algunos minerales de plagioclasa y anfíbol se encontraron con leve argilización y cloritización, respectivamente.

Por otro lado, los afloramientos intrusivos en el Cerro Altilllo y parte de la Virgen son considerados parte de la Super Unidad Santa Rosa (Figs. 3 y 4) e intruyen a la Super Unidad Patap (Fig. 5C). Son catalogados, macroscópicamente (Fig. 2B), como rocas ígneas leucocráticas de textura fanerítica con porcentajes mineralógicos de plagioclasa anhedral a subhedral de 15 a 25%, feldespato potásico anhedral a

subhedral de 45 a 60%, y con cuarzo o ferromagnesiano de porcentaje variable. Algunos minerales de plagioclasa y hornblenda se encontraron con leve cloritización y epidotización.

Además, se observa que el material cuaternario perteneciente al cono deyector del río Rímac recubre parcialmente el área, gradando desde gravas hasta arcillas, siendo esta la base sobre la cual se asienta gran parte de la población limeña.

El contexto estructural del área se caracteriza por fallas con orientaciones NW-SE que son cortadas y desplazadas por fallas dextrales de orientación NE-SW, y al final todas controladas y delimitadas por fallas sinistrales de orientación E-W, todas acompañadas de sistemas de diaclasas que responden a las mismas tendencias de fallas (Fig. 5D).

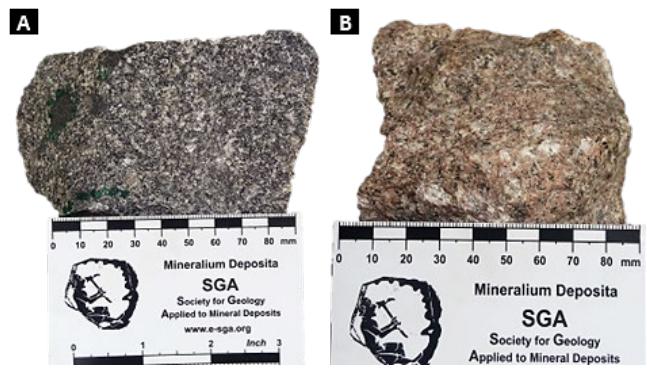


Figura 2. A) Muestra de mano de la Super Unidad Patap, B) Muestra de mano de la Super Unidad Santa Rosa.

Fuente: el autor.

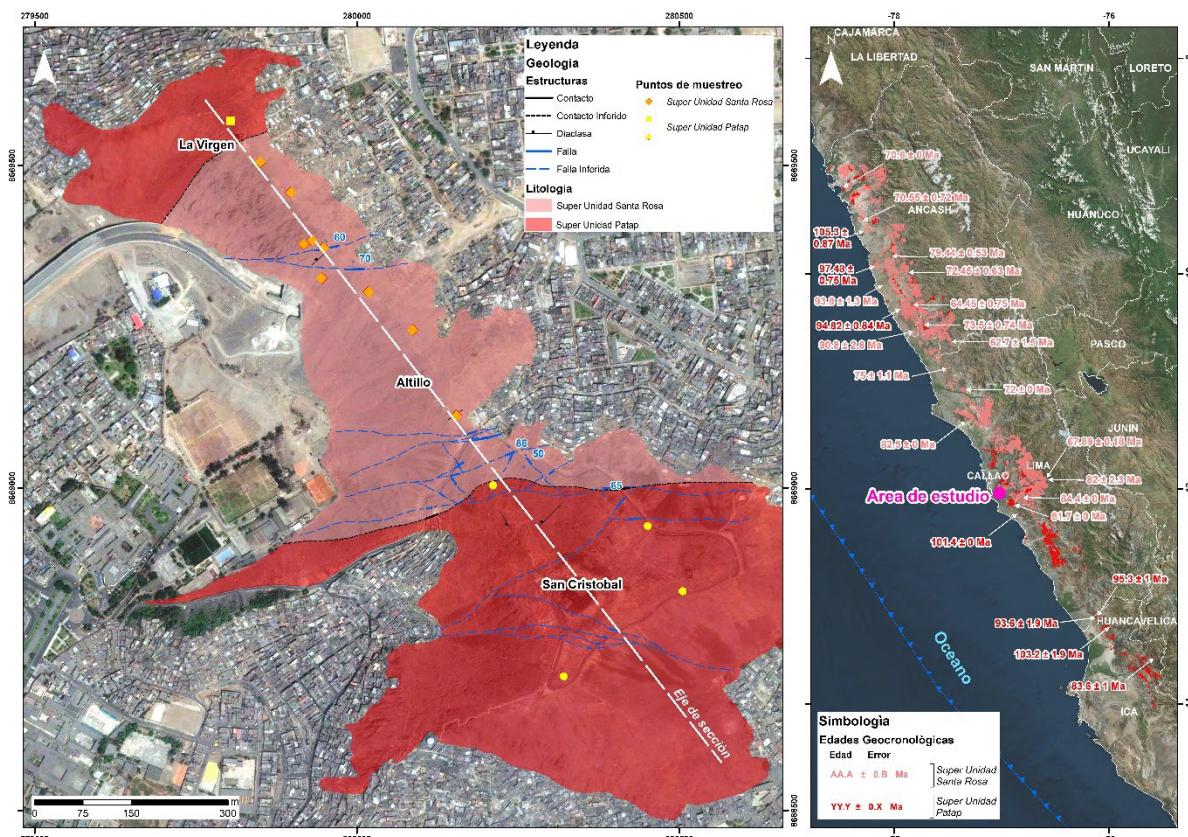


Figura 3. Litologías y estructuras en los Cerros San Cristóbal, La Virgen y Altilllo, y datos geocronológicos regionales del Super Unidad Patap y Santa Rosa.

Fuente: datos geocronológicos [12].



Figura 4. Sección del área de estudio.

Fuente: el autor.

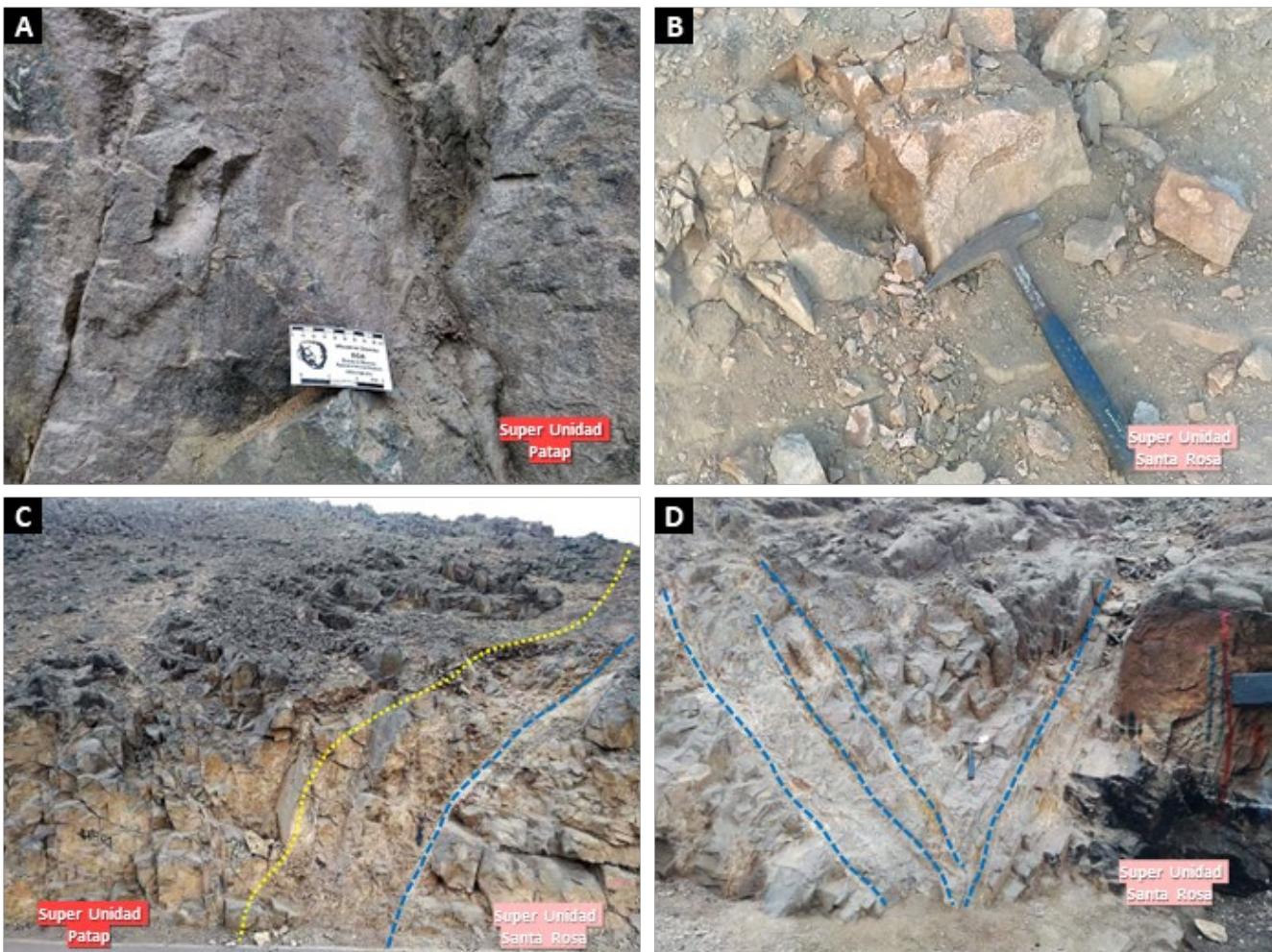


Figura 5. A) Afloramiento de dioritas de la Super Unidad Patap, B) Afloramiento de granitos de la Super Unidad San Rosa, C) Contacto irregular (líneas punteadas amarillas) de la Super Unidad Patap con la Super Unidad Santa Rosa, y evidencias de fallas de orientación E-W (líneas discontinuas azules), y D) Fallas NE-SW cortadas por fallas E-W en afloramiento de la Super Unidad Santa Rosa (líneas discontinuas azules).

Fuente: el autor.

3.2 Petrografía

3.2.1 Super Unidad Patap

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro San Cristóbal y en el extremo nor-oeste del Cerro La Virgen. Petrográficamente catalogadas como a dioritas a tonalitas holocrystalinas de textura fanerítica hipidiomórfica, de grano medio a grueso. Las plagioclasas fueron subhédrales a euhédrales con macla polisintética y zonación concéntrica en ocasiones alterándose a epidotas. Los cuarzos anhédrales se encontraron ocasionalmente intercrescidos con los pocos feldespatos potásicos subhédrales existentes. Los piroxenos fueron anhédrales a subhédrales y los anfiboles, subhédrales con clivaje en 2 direcciones alterándose a cloritas y trazas de actinolita. Las biotitas se encontraron alteradas a cloritas. La presencia de minerales trazas fue de carbonatos, sericitas, zircón, titanitas y minerales opacos, posiblemente pirita por algunas formas pseudo-cúbicas. Presentaron xenolitos de similar composición, de textura fanerítica hipidiomórfica,

equigranular, con contacto de recristalización con la roca caja (Fig. 6A a 6F). Ver resumen de Tabla 1.

3.2.2 Super Unidad Santa Rosa

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro Altillo y Cerro La Virgen. Petrográficamente catalogadas como monzogranitos a sienogranitos holocrystalinos de textura fanerítica hipidiomórfica gráfica simplectítica a granofídica, de grano medio. Las plagioclasas fueron subhédrales con macla polisintética, en ocasiones alterándose a epidotas. Los cuarzos anhédrales se encontraron intercrescidos a manera de cristales esqueléticos (intercrescimiento gráfico a mirmecítico) y en bordes (simplectítico) con los feldespatos potásicos subhédrales de gran tamaño. Las biotitas se encontraron alterándose a cloritas (clinocloro). La presencia de minerales trazas fue de carbonatos, sericitas, titanitas y minerales opacos, posiblemente pirita por algunas formas pseudo-cúbicas ((Fig. 7A a 7F). Ver resumen de Tabla 1.

Tabla 1.
Resumen de las principales características observadas en las láminas delgadas.

Nº	1	2	3	4	5
Código Interno	AL-03	LV-01	LV-05	SC-04	SC-05
Ubicación	Altillo	La Virgen	La Virgen	San Cristobal	San Cristobal
Este	280018	279930	279804	280321	280211
Norte	8669304	8669384	8669569	8668708	8669004
Elevación	286	300	329	390	320
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
Patrón Textural	Holocristalina fannerítica, textura hipidiomórfica granofídica (combinación de textura gráfica y mirmequítica) por intercrecimiento eutéctico de cuarzo y feldespato alcalino, aproximadamente equigranulares y de grano medio a grueso.	Holocristalina fannerítica, textura hipidiomórfica simplectítica (intercrecimiento gráfico de cuarzo-feldespato), con cristales subidiomorfos y xenomorfos, equigranulares y de grano medio.	Holocristalina fannerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso.	Holocristalina fannerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso. Presencia de xenolitos de grano fino.	Holocristalina fannerítica, textura hipidiomórfica, presencia de cristales subidiomorfos y xenomorfos, equigranulares y de grano medio a grueso.
Composición y características mineralógicas	Intercrecimiento gráfico cuarzo-feldespato y plagioclásas con notable macla polisintética. Presencia de hornblendita y biotitas.	Intercrecimiento del cuarzo y el feldespato potásico. Las plagioclásas con macla polisintética y formas euhedrales a subhendrales tabulares. Además, se observa un cristal de titanita.	Intercrecimiento de plagioclasa con macla polisintética o zonada, anfibol, cuarzo y biotita. Contacto recristalizado entre roca caja (derecha) y xenolito (izquierda) con minerales constituyentes como plagioclasa con macla polisintética, cuarzo y biotita.	Intercrecimiento de plagioclasa con macla polisintética o zonada, anfibol, cuarzo y biotita. Contacto recristalizado entre roca caja (derecha) y xenolito (izquierda) con minerales constituyentes como plagioclasa con macla polisintética, cuarzo y biotita.	Intercrecimiento de plagioclásas, cuarzo y feldespato potásico, con minerales de anfibol y biotita, además, presencia de trazas de titanitas y zirconios de gran tamaño. Las plagioclásas presentan macla polisintética
Alteración y mineralización	Reemplazamiento de clinocloro, carbonatos, sericitita y arcillas. Además, presencia de minerales opacos pesudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clinocloro, carbonatos, sericitita y arcillas. Además, presencia de minerales opacos pesudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, actinolita, carbonatos y sericitita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pesudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, actinolita, carbonatos y sericitita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pesudocúbicos, posiblemente pirita.	Reemplazamiento de clorita, epidota, carbonatos y sericitita con arcillas. Además, presencia de minerales opacos pesudocúbicos, posiblemente pirita.
Clasificación Streckeisen	Sienogranito	Monzogranito	Gabro	Tonalita	Tonalita

Fuente: el autor.

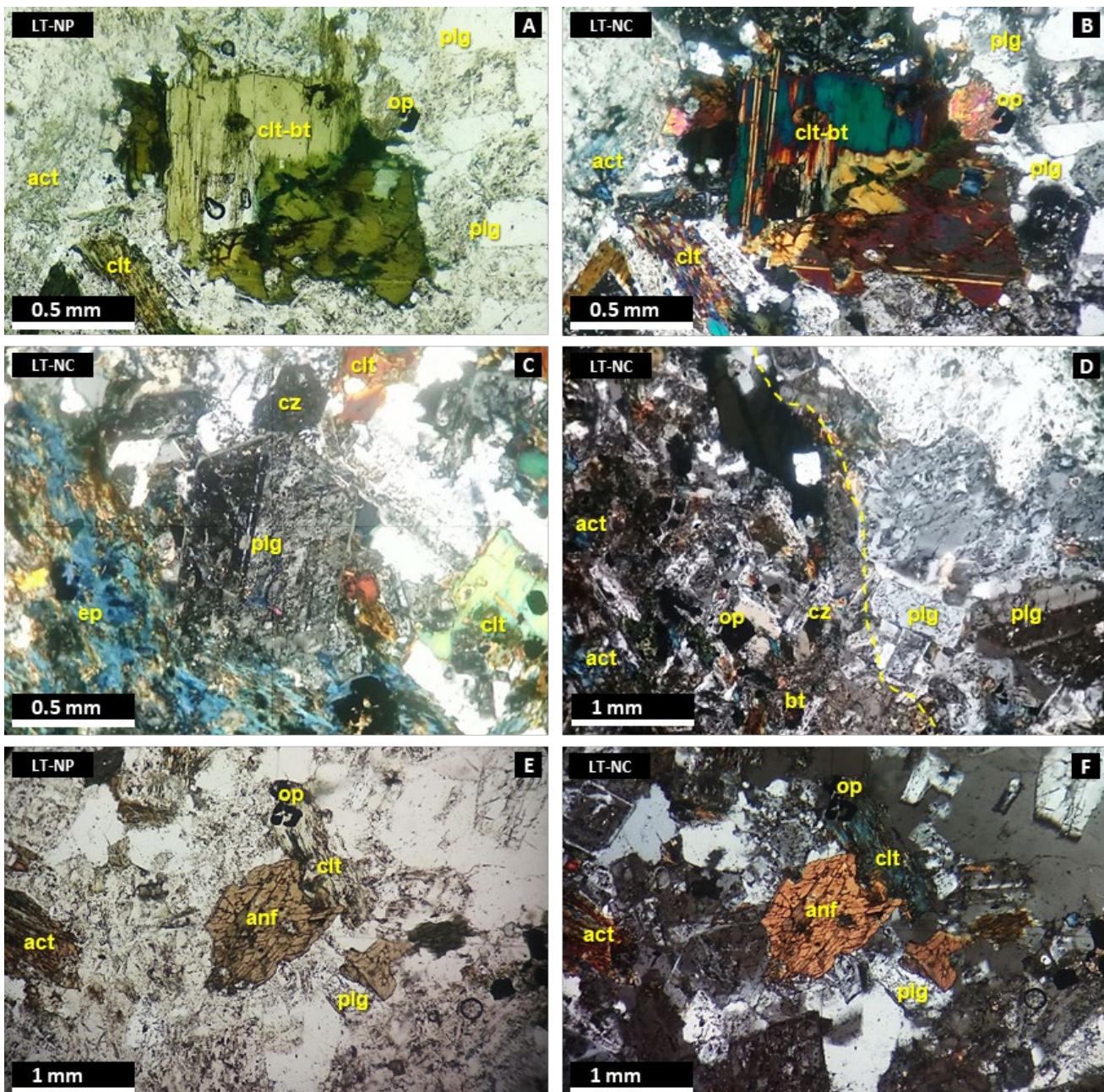


Figura 6. Muestra SC-04 (Super Unidad Patap), fotomicrografías A a F.- Vistas en LT-NP (A) y LT-NC (B) mostrando los principales minerales constituyentes, accesorios y de alteración de la roca. Intercrecimiento de plagioclasa (plg) y biotita (bt), y minerales de alteración hidrotermal como clorita (clt) y actinolita (act). (C) Vista en LT-NC en detalle de los minerales constituyentes como plagioclasa (plg) en macla polisintética y ocasionales de cuarzo (cz), y minerales de alteración hidrotermal como clorita (clt) y epidota (ep). (D) Vista en LT-NC en detalle de contacto recristalizado entre roca caja (derecha) y xenolito (izquierda) con minerales constituyentes como plagioclasa (plg) con macla polisintética, cuarzo (cz) y biotita (bt), con minerales de alteración hidrotermal como actinolita (act). Vistas en LT-NP (E) y LT-NC (F) en detalle de los minerales constituyentes anfibol (anf) y plagioclasa (plg) zonada, y minerales de alteración hidrotermal como actinolita (act) y clorita (clt). LT: Luz Transmitida, NP: Nicoles Paralelos, NC: Nicoles Cruzados.

Fuente: el autor.

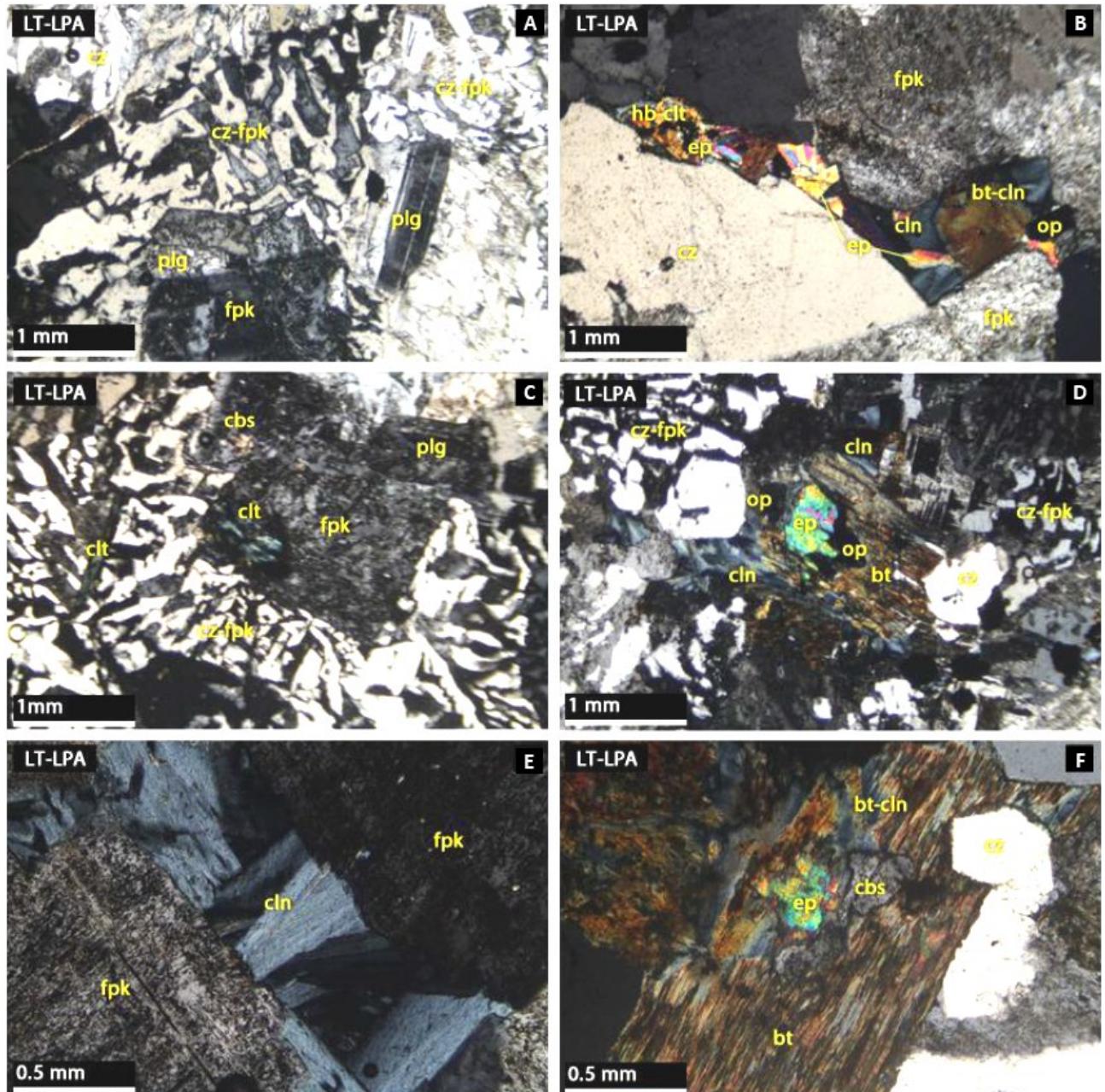


Figura 7. Muestra AL-03 (Super Unidad Santa Rosa), fotomicrografías A a F.- A) Vista en LPA de los principales constituyentes de la roca: intercrecimiento gráfico cuarzo-feldespato (cz-fpk) y plagioclásas (plg) con notable macula polisintética. B) Vista en LPA de los principales minerales accesorios alterados: hornblenda (hb) con alteración a clorita (clt), y biotitas con alteración propilítica en ensamble clinocloro (cln), epidota (ep), pirita (op). Los feldespatos potásicos (fpk) presentan fuerte reemplazamiento a arcillas, mientras que el cuarzo (cz) se exhibe limpio. C) Vista en LPA mostrando la textura granofelsica típica de la roca estudiada; combinación de intercrecimiento gráfico con textura simplectítica del tipo mirmecítico rodeado un cristal de feldespato potásico (fpk). La clorita magnésica (clt) se diferencia aquí del clinocloro (cln) por su notable diferencia en birrefringencia. D, F) Detalles de la alteración de una biotita (bt) mostrando el ensamble mineralógico típico de una alteración propilítica. E) Detalle de una zona reemplazada por clinocloro (cln), se observa su típico hábito laminar y su interferencia anómala en color azul Berlín, aproximando su composición a la de una penninita. LT: Luz Transmitida, LPA: Luz Polarizada Analizada. LPNA: Luz Polarizada No Analizada.

Fuente: [20].

3.3 Litogegeoquímica

Los resultados geoquímicos de los análisis de laboratorio son presentados en la Tabla 2 y Tabla 3 en el capítulo Anexos.

Los diagramas R1 ($4\text{Si}+11(\text{Na}+\text{K})-2(\text{Fe}+\text{Ti})$) vs R2 ($6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$) según [6] en Fig. 8, y Zr/Ti vs Nb/Y modificado según [19] en Fig. 9, para clasificación de rocas ígneas por

elementos mayores y traza inmóviles, determinaron que las muestras de roca de la Super Unidad Patap de composición máfica a intermedia en el campo petrográfico de gabros (parte del Cerro La Virgen) gradando a tonalitas (Cerro San Cristóbal), mientras que las muestras de roca de la Super Unidad Santa Rosa de composición felsica estuvieron en el campo petrográfico de granodioritas a granitos (Cerro Altillo y parte del Cerro La Virgen).

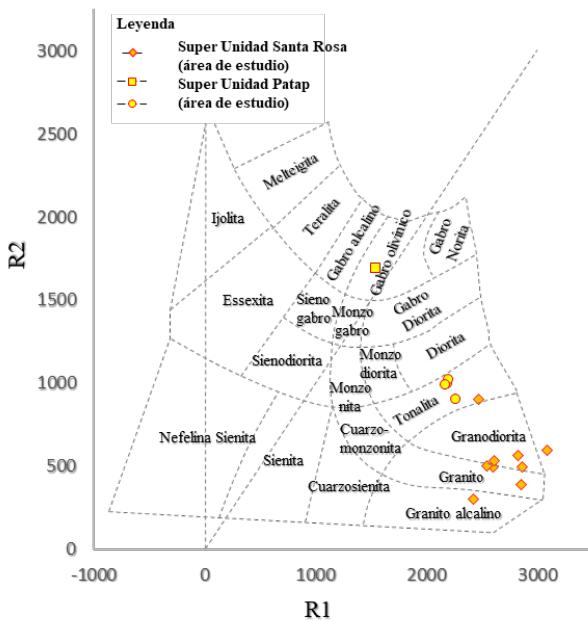


Figura 8. Diagrama R1 vs R2,
Fuente: modificado de [6].

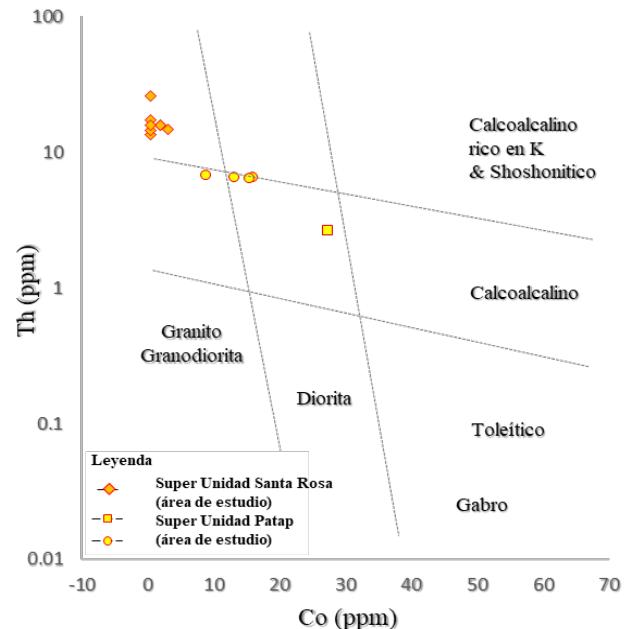


Figura 10. Diagrama Co vs Th,
Fuente: modificado de [8].

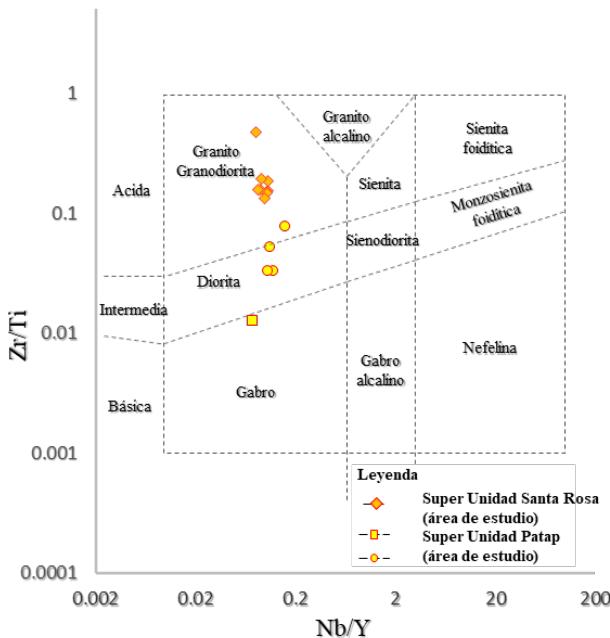


Figura 9. Diagrama Nb/Y vs Zr/Ti,
Fuente: modificado de [19].

Los diagramas de Co vs Th [8] en Fig. 10, y Zr/Y vs Th/Yb [22] en Fig. 11, permitieron clasificar la serie magmática de las rocas determinando que las muestras de la Super Unidad Patap son de serie transicional a calcoalcalina. Las muestras de la Super Unidad Santa Rosa fueron clasificadas en la serie calcoalcalina a calcoalcalina rica en K⁺.

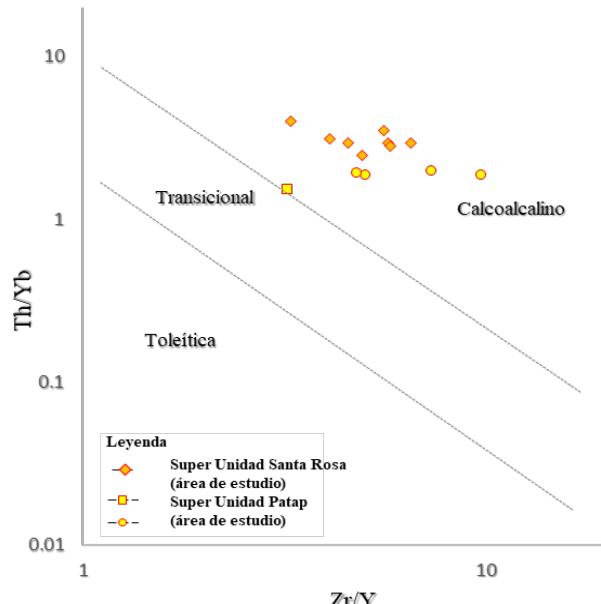


Figura 11. Diagrama Zr/Y vs Th/Yb,
Fuente: modificado de [22].

El diagrama de Al₂O₃/Na₂O+K₂O+CaO (mol) vs CaO/Na₂O+K₂O+CaO (mol) según [1] para determinar la saturación de alúmina, determinando que las muestras de la Super Unidad Patap fueron mayormente metaluminosos, mientras que para la Super Unidad Santa Rosa fueron metaluminosos a peraluminosos, y ocasionalmente peralcalino (cerca al contacto a la Super Unidad Patap en el Cerro La Virgen). Ver Fig. 12.

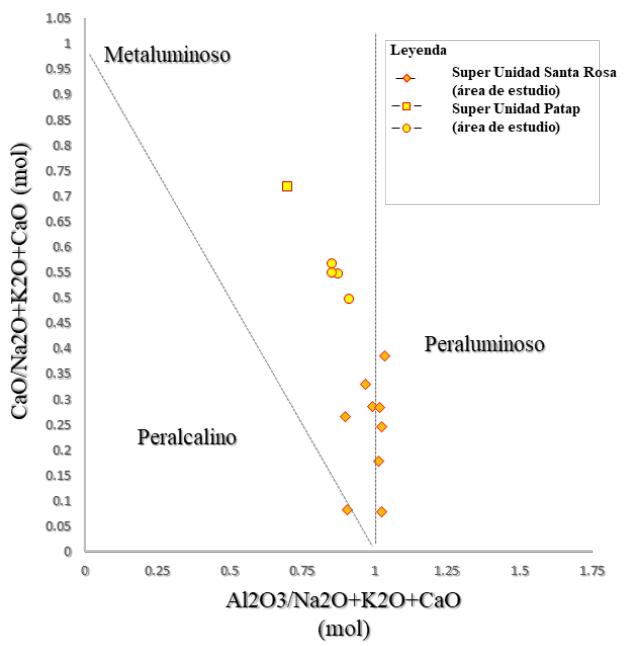


Figura 12. Diagrama spider de tierras raras de muestras de la Super Unidad Patap, normalizados [14].
Fuente: modificado de [1].

El diagrama spider de tierras raras normalizados al condrito según [14] fue estudiado independiente para cada super unidad. Las muestras de roca de la Super Unidad Patap presentaron un patrón sub-horizontal de las MREE a HREE entre 10 a 30 veces el valor del condrito, mientras que las LREE presentaron un patrón de pendiente negativa ligera en el rango de 30 a 70 veces, incluso llegando a 150 veces el valor del condrito (para el La), ver Fig. 13. Por otra parte, las muestras de roca de la Super Unidad Santa Rosa presentaron un patrón de pendiente negativa ligera de las LREE – MREE (25 a 50 veces el valor del condrito) a HREE (65 a 175 veces el valor del condrito), mientras que independientemente el Eu presento anomalía negativa moderadamente pronunciada, ver Fig. 14.

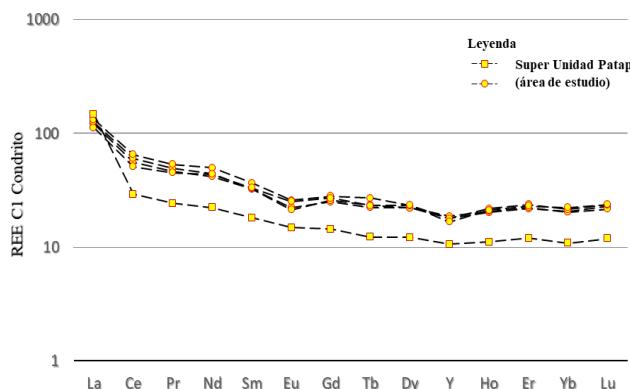


Figura 13. Diagrama spider de tierras raras de muestras de la Super Unidad Patap, normalizados [14].
Fuente: modificado de [14] con datos del autor.

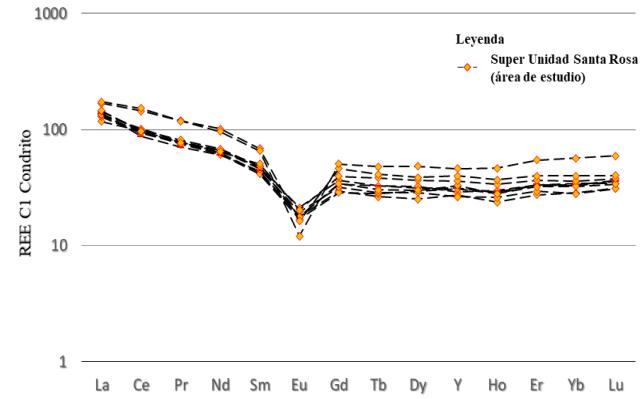


Figura 14. Diagrama spider de tierras raras de muestras de la Super Unidad Santa Rosa, normalizados [14].
Fuente: modificado de [14] con datos del autor.

El diagrama spider multielemental normalizado según [25] también fue estudiado independiente para cada super unidad. Las muestras de la Super Unidad Patap evidenciaron al Cs y Rb con valores enriquecidos sobre las 100 veces del valor del manto, Ba, Th, U y K fueron muy variables, W con valores promedio y ocasionalmente algunos valores con anomalía moderadamente negativa, Nb y Ta presentaron anomalías negativas fuertes cerca de los valores promedio del manto, Sr no presentó anomalía, P presentó una ligera anomalía negativa, Zr y Hf presentaron mucha variabilidad, y el Ti presentó una débil a moderada anomalía negativa, ver Fig. 15. Las muestras de la Super Unidad Santa Rosa evidenciaron al Cs, Rb, Ba y K con mucha variabilidad en sus valores, Th y U presentó anomalías positivas superiores a 150 veces el valor promedio del manto, W no presentaron valores anómalos salvo una muestra con anomalía negativa, Nb y Ta presentaron anomalías moderadas por debajo de las 10 veces el valor promedio del manto, Sr y P presentaron anomalías negativas fuertes a muy fuertes hasta debajo de los valores promedio del manto, Zr y Hf no presentaron variabilidad de los valores, y el Ti presentó anomalía negativa muy por debajo del valor promedio de manto, ver Fig. 16.

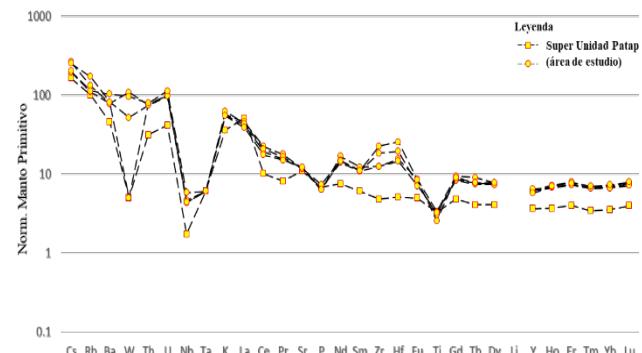


Figura 15. Diagrama spider multielemental de muestras de la Super Unidad Patap, normalizados [25].
Fuente: modificado de [25] con datos del autor.

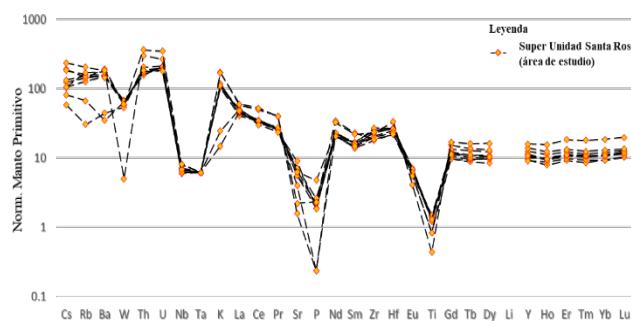


Figura 16. Diagrama spider multielemental de muestras de la Super Unidad Santa Rosa, normalizados [25].

Fuente: modificado de [25] con datos del autor.

3.4 Difracción de Rayos X

Los resultados del análisis de difracción de Rayos X son presentados en la Tabla 4 en el capítulo Anexos.

3.4.1 Super Unidad Patap

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro San Cristóbal y en el extremo nor-oeste del Cerro La Virgen. Los estudios reflejaron rocas intrusivas con valores mineralógicos porcentuales de actinolita (12.81 a 61.18%), albita (20.59 a 22.46%), andesina (6.62 a 14.42%), clinocloro (1.25 a 3.525%), ortosa (22.85%), epidota (8.42%) y cuarzo (0.29 a 26.28%). El análisis de mineralógico de xenolitos presentó valores porcentuales dentro del rango de la matriz para actinolita, cuarzo y clinocloro, mientras que para albita llega a 34.17% y flogopita (21.42%), ver Fig. 17.

3.4.2 Super Unidad Santa Rosa

Las muestras fueron adquiridas en el Cerro Altillo y Cerro La Virgen. Los estudios reflejaron rocas intrusivas con valores mineralógicos porcentuales de albita (42.14%), cuarzo (34.52%), ortosa (20.58%), actinolita (1.71%) y clinocloro (1.04%), ver Fig. 18.

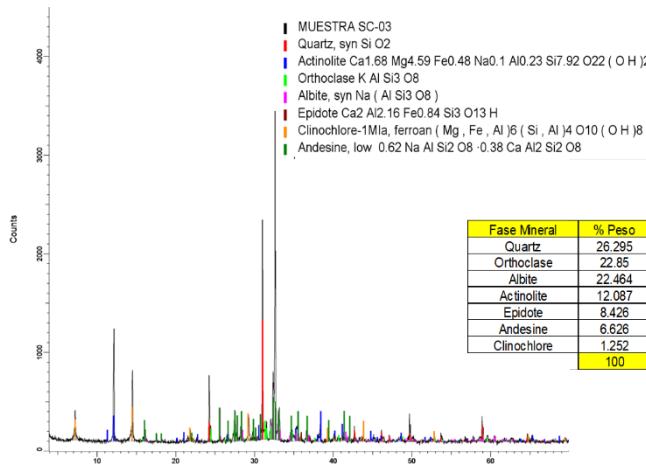


Figura 17. Difractograma de la muestra SC-03.

Fuente: el autor.

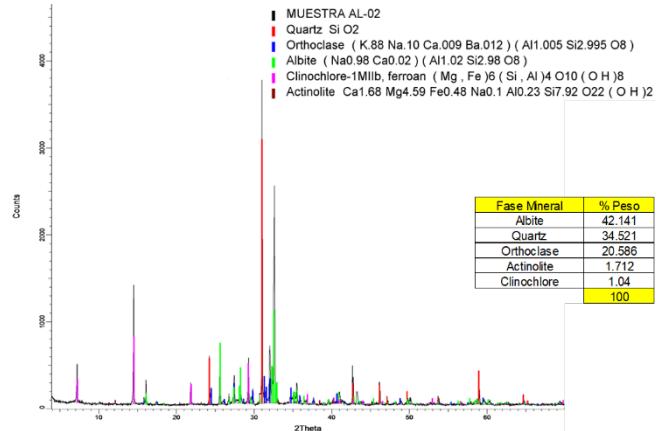


Figura 18. Difractograma de la muestra AL-02.

Fuente: el autor.

4 Discusión

Procederemos a discutir usando los resultados de campo y laboratorio de las muestras del Cerro San Cristóbal, Altillo y La Virgen.

Las muestras que correspondieron a la Super Unidad Patap fueron rocas intrusivas metaluminosas del tipo gabro (con conexión a la serie transicional toleítica-calcoalcalina) a diorita-tonalita (serie calcoalcalina) originadas en un ambiente de subducción. Estas se relacionaron a un magmatismo de arco primitivo, evidenciado por anomalías negativas moderadas de Nb, Ta, P y Ti, emplazado posiblemente a una edad cercana a ~104 Ma, datación cercana según [16]. Las condiciones de la cámara magmática presentaron variación rítmica en la temperatura y presión, evidenciado por la zonación oscilatoria de la plagioclasa, como propone [11]. Este magma moderadamente oxidado (0.6 <Eu/Eu*< 1) (Fig. 19), presentó asimilación medianamente somera y fusión probablemente de clinopiroxeno (evidenciado por patrón plano a ligeramente lístrico de los REE, con MREE-HREE sub-horizontal) originados a un espesor cortical menor a 34 km (Fig. 20), sin contaminación cortical con baja energía (no existió enriquecimiento de Th y U, menor ratio de U/Th) (Fig. 21). Además, predominaron procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada (evidenciado por poco fraccionamiento de titanita, zircon, y feldespato ocasional) y mezcla de magmas por presencia de xenolitos de composición tonalítica con bordes de recristalización, relacionados a posibles procesos neumatólicos que generaron cristales de flogopita.

Estas fueron intruidas por rocas de la Super Unidad Santa Rosa, donde las muestras fueron rocas metaluminosas y peraluminosas (occasionalmente peralcalinas) del tipo granodiorita a granito (calcoalcalina a calcoalcalina rica en K+) originadas en un ambiente de subducción. Estas se relacionaron a un magmatismo de arco más evolucionado, evidenciado por anomalías negativas de Nb, Ta, P y Ti, siendo emplazado posiblemente a una edad cercana de ~84.4 a 81.7 Ma, dataciones cercanas según [16]. El magma reducido (Eu/Eu*< 0.6) (Fig. 19), se originó por fusión de clinopiroxeno, evidenciado por el patrón plano a débilmente

lístrico REE, con MREE-HREE sub-horizontal, en un espesor cortical menor a 34 km (Fig. 20). Dicho magma cristalizó mediante el predominio de procesos de diferenciación magmática por asimilación cortical presentando alta energía (enriquecimiento de Th y U, también influyendo en la tendencia a rocas peralcalinas) (Fig. 21), y por cristalización fraccionada (fraccionamiento de plagioclasas por anomalía negativa de Sr-Eu y feldespato

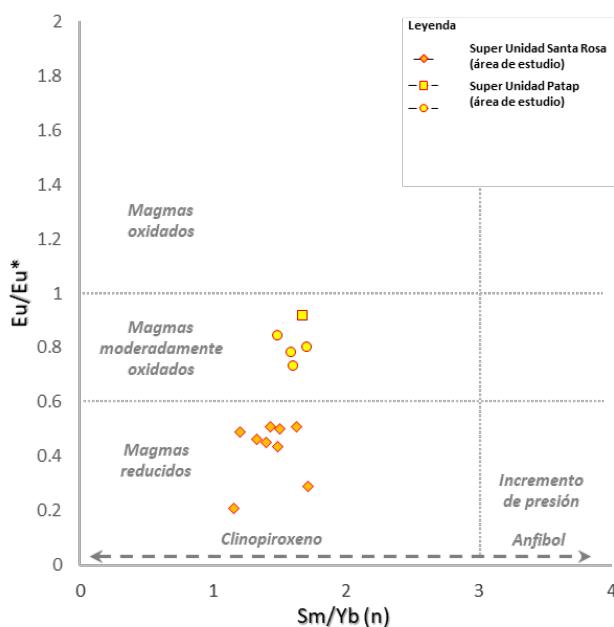


Figura 19. Diagrama Sm/Yb (n) vs Eu/Eu*, Fuente: modificado de [15].

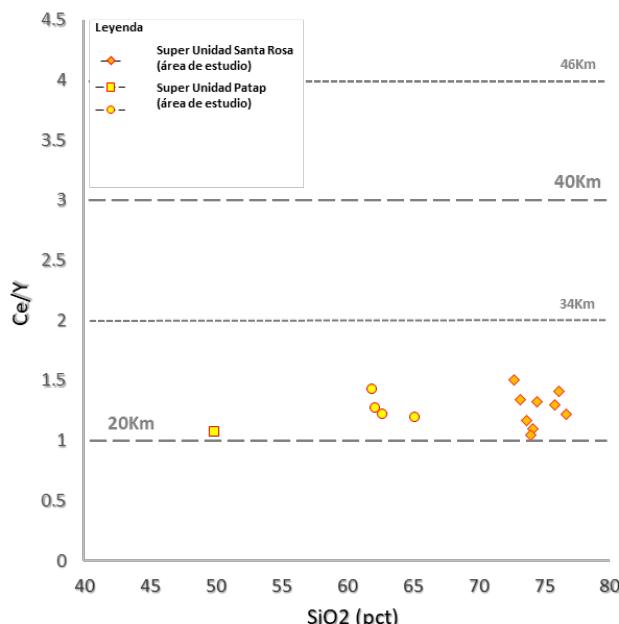


Figura 20. Diagrama SiO2 (pct) vs Ce/Y, Fuente: modificado de [13].

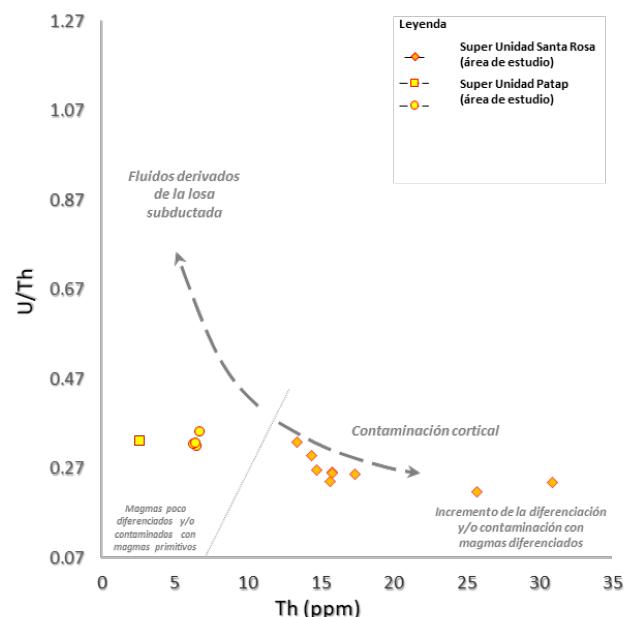


Figura 21. Diagrama Th vs U/Th, Fuente: modificado de [9].

potásico por variabilidad de Ba-K-Rb, fraccionamiento de Ti evidenciado por trazas de titanita). Además, esto permitió que se evidencien características de nucleación rápida de cristales en el magma con baja velocidad de enfriamiento y alta presión sobresaturando al magma en SiO₂, enriqueciéndolo de H₂O (evidenciado por intercercimiento gráfico y textura simpletecítica-mirmequítica, como detallan estudios de [14]), posteriormente escapando como fluido inmiscible. Lo último, podría explicar la presencia de algunos minerales generados por hidrotermalismo, pero sin carácter económico, como el caso de actinolita (con mayor reemplazamiento de los anfíboles de las muestras de roca correspondientes a la Super Unidad Patap, que en la Super Unidad Santa Rosa), carbonatos, clorita (clinocloro, por alteración de anfíboles y biotitas), epidota (alteración de plagioclasas) y pirita.

5 Conclusiones

Los estudios realizados corroboran las características composicionales, geoquímicas y tectono-magmáticas de las Super Unidades Patap (rocas metaluminosas del tipo gabro a diorita-tonalita, ambiente de subducción, serie toleítica a calcoalcalina y arco primitivo) y Santa Rosa (rocas metaluminosas-peraluminosas a peralcalinas, del tipo granodiorita a granito, ambiente de subducción, calcoalcalina a calcoalcalina rica en K+ y arco evolucionado) expuestos en trabajos previos, pero no ciertos procesos locales que pudieron suceder.

En el área de estudio, las rocas de la Super Unidad Patap (~104 Ma) se originaron por magmas moderadamente oxidados a un espesor cortical menor a 34 km, sufriendo condiciones de asimilación somera, fusión de clinopiroxeno, baja energía, cristalización fraccionada y mezcla de magmas con un desbalance en las condiciones de la cámara magmática originando rocas ígneas que engloban xenolitos

de la misma composición, pero que sufrirían procesos neumatolíticos con evidencias de flogopitas. Por otro lado, la intrusión de rocas de la Super Unidad Santa Rosa (~84.4 a 81.7 Ma) que se originaron por magmas reducidos a un espesor cortical menor a 34 km, evidenciaron procesos de asimilación cortical con alta energía, fusión de clinopiroxeno y cristalización fraccionada con nucleación rápida de cristales con baja velocidad de enfriamiento y alta presión dando un exceso de SiO₂ y expulsando posiblemente H₂O como fluido hidrotermal inmiscible de alta temperatura, alterando mayormente a los minerales de la Super Unidad Patap generando actinolita, clorita, epidota y trazas de pirita.

References

- [1] Barton, M., and Young, S., Non-pegmatitic deposits of beryllium; mineralogy, geology, phase equilibria and origin: Beryllium; mineralogy, petrology, and geochemistry. Edited by Grew, E.S., Reviews in Mineralogy and Geochemistry 50, pp. 591-691., 2002. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.50.14>.
- [2] Ccallo, W., López, Y., Weimin, G., Junan, L., Shizhong, Ch. y Zheng, D., Características litogeocímicas y petrográficas en los bordes norte y sur del segmento Lima - batolito de la costa, comparada con el sureste de China. INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales, 35, 1 mapa, 2021, 69 P.
- [3] Ccallo, W., Mamani, Y., Guo, W., Junan, L., Shizhong, C., Zheng, D. y Choquehuanca, S., Geocronología y geoquímica del Batolito de la Costa entre 9° 30' y 10° 30' S. INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales, 39, 1 mapa, 2023, 125 P.
- [4] Cerrón, J., Romero, S., Quintana, P., Gutiérrez, Y. y Hernández, E., Caracterización litogeocímica, petrográfica y análisis mineralógico por difracción de Rayos X de los afloramientos intrusivos en los Cerros San Cristóbal, Alto y La Virgen, Lima-Perú. Primer Encuentro Nacional de Capítulo de Estudiantes de la SGA- Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), 2019.
- [5] Cobbing, E., The Coastal Batholith and other aspects of Andean Magmatism in Peru. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, pp. 5-20, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107298>.
- [6] De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., and Marchal, M., A Classification of Volcanic and Plutonic Rocks using R1-R2 diagrams and major element analyses—Its relationships with current nomenclature. Chemical Geology, 29, pp. 183-210, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0).
- [7] Jacay, J., and Sempere, T., Emplacement levels of the Coastal Batholith in Central Peru. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts, 2005, pp. 397-399.
- [8] Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., and Mitchell, S.F., Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using immobile trace elements: development of the Th-Co discrimination diagram, Journal of Petrology, 48(12), pp. 2341-2357, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>.
- [9] Keppler, H., and Wyllie, P.J., Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes. Nature, 348, pp. 531-533, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1038/348531a0>.
- [10] León, W. y De La Cruz, O. Memoria descriptiva de la revisión y actualización de los cuadrángulos de Mala (26-j), Lurín (25-j) y Lima (25-l), Escala 1:10000: INGEMMET, Memoria descriptiva, 2003, 15 P.
- [11] López, J.P. y Bellos, L.I., Texturas y estructuras de las rocas ígneas: significado petrológico e implicancias en las condiciones de formación de las rocas. INSUGE, Miscelánea 15, pp. 7-57, 2006. ISSN 1514-4836 - ISSN 1668-3242.
- [12] Mamani, M., Carlotto, V., Rodríguez, J., Giraldo, E., Santos, A., Cueva, E., Aguilar, R., Peña, D., Rodríguez, F., Chávez, L., Cereceda, I., Flores, R. y Choquehuanca, S., Base de datos nacional de geocronología del Perú. XV Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Pub. Esp. (9), Cusco pp. 934-936, 2010.
- [13] Mantle, G.W., and Collins, W.J., Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. Geology, 36, pp. 87-90, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1130/G24095A.1>.
- [14] McDonough, W.F., and Sun, S., The composition of the Earth: Chemical Geology, 120(3-4), pp. 223-253, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- [15] Montano, H., Caracterización geoquímica de magmas y su relación con la formación de yacimientos en el norte del Perú. Informe de suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2010.
- [16] Mukasa, S.B., and Tilton, G.R., Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru, In: Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J., and Beckinsale, R.D., eds., Magmatism at a plate, 1985. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5820-4_17.
- [17] Mukasa, S.B., Zircon U-Pb ages of super-units in the Coastal Batholith, Peru: implication and tectonic processes. Geological Society of America Bulletin, 97, pp. 241-254, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<241:ZUAOSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<241:ZUAOSI>2.0.CO;2).
- [18] Palacios, O., Caldas, J. y Vela, C., Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica. INGEMMET. Boletín N°43, Serie A: Carta Geológica del Perú, 1992.
- [19] Pearce, J.A., A User's guide to basalt discrimination diagrams. In: Wyman, D.A., Ed., Trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration, Geological Association of Canada, Short Course Notes, 12, pp. 79-113, 1996.
- [20] Pedemonte, G., Informe de Laboratorio: estudio petrográfico de 3 muestras. Documento IL-005-1217-M. EPC Lab - Investigaciones en Petrografía y Mineralogía, 2017.
- [21] Pitcher, W., Anatomía de un Batolito. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Tomo 60, 1977.
- [22] Ross, P.S., and Bedard, J.H., Magmatic affinity of modern and ancient subalkaline volcanic rocks determined from trace-element discriminant diagrams. Canadian Journal of Earth Sciences, 46(11), pp. 823-839, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1139/E09-054>.
- [23] Sempere, T., and Jacay, J., Anatomy of the Central Andes: distinguishing between western magmatic Andes and Eastern, tectonic Andes. 7th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2008, Nice), Extended Abstracts, 2008, pp. 504-507.
- [24] Soler, P., Cronología y distribución espacial del Magmatismo en el Perú central durante el Cretáceo Superior y el Cenozoico - Relaciones con las modalidades de subducción de la Placa de Nazca (Farallón) debajo del Continente Sud-americano. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, v. 81, pp. 81-86, 1990.

J.F. Cerrón-Sarco, recibió su título en Ing. Geológica en 2017 en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. De 2017 hasta la actualidad ha trabajado en diversas empresas mineras privadas ligadas a exploración y explotación de Au, Ag, Pb, Zn, Cu y Mo en Perú, Ecuador y Colombia, y también desarrollando investigaciones independientes en geociencias expuestas en congresos y revistas de Perú, Ecuador, Chile y Argentina. Actualmente, es Jefe de Exploraciones *Brownfield* de una empresa minera privada en Ecuador. Sus intereses de investigación incluyen: geoquímica, geofísica, exploración minera y cálculo de recursos minerales ORCID: 0000-0003-1640-3800.

ANEXOS

Tabla 2.

Resultados geoquímicos del análisis de laboratorio por ICP-OES e ICP-MS.

Nº	1	2	3	4	5	6	7
Código Interno	AL-01	AL-02	AL-03	AL-04	LV-01	LV-02	LV-03
Ubicación	Altillo	Altillo	Altillo	Altillo	La Virgen	La Virgen	La Virgen
Este	279945	279948	280018	280086	279930	279917	279897
Norte	8669325	8669372	8669304	8669245	8669384	8660384	8669458
Elevación	290	293	286	293	300	298	313
Litología	Cuarzomonzonita	Monzogranito	Cuarzomonzonita	Cuarzosienita	Granodiorita	Granodiorita	Tonalita
Edad Geológica	Cretácico superior						
Unidad	Super Unidad Santa Rosa						
SiO₂ (%)	74.45	73.19	76.72	72.72	74.03	73.67	74.15
TiO₂ (%)	0.28	0.31	0.18	0.26	0.30	0.32	0.28
Al₂O₃ (%)	12.94	13.74	12.59	14.11	13.48	12.93	13.61
Fe₂O₃ (%)	2.96	3.00	1.63	2.96	3.09	2.73	3.41
MgO (%)	0.49	0.59	0.23	0.57	0.54	0.53	0.62
MnO (%)	0.05	0.05	0.02	0.04	0.04	0.04	0.03
CaO (%)	2.05	1.81	1.21	2.16	2.53	2.10	2.79
Na₂O (%)	3.61	4.01	3.87	3.91	5.19	4.21	4.63
K₂O (%)	3.11	3.27	3.55	3.23	0.74	3.36	0.45
P₂O₅ (%)	0.05	0.04	0.01	0.05	0.06	0.10	0.04
LOI* (%)	1.58	1.24	1.00	1.72	1.12	1.04	1.24
Rb (ppm)	80.58	90.87	90.28	100.94	42.61	96.22	19.40
Sr (ppm)	117.62	117.81	84.51	137.80	149.92	131.14	189.62
Y (ppm)	45.29	42.72	48.59	41.35	56.54	51.86	48.89
Zr (ppm)	259.13	278.88	199.25	230.62	278.86	301.05	223.31
Nb (ppm)	4.77	4.46	5.10	4.26	4.98	4.40	4.79
Cs (ppm)	0.82	1.51	0.97	1.45	0.64	1.06	0.46
Ba (ppm)	1037.11	1099.54	1357.94	1094.79	242.51	1016.36	308.85
Hf (ppm)	8.19	7.96	6.80	7.58	8.35	8.15	7.24
Ta (ppm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Pb (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Th (ppm)	15.82	13.42	17.37	15.82	14.41	14.74	15.70
U (ppm)	4.14	4.42	4.45	4.10	4.31	3.94	3.78
Cs (ppm)	0.82	1.51	0.97	1.45	0.64	1.06	0.46
V (ppm)	17.86	20.29	<10	20.27	17.93	19.07	15.07
Cr (ppm)	10.40	10.17	4.54	9.84	10.67	9.86	11.66
Ni (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Cu (ppm)	2.70	11.93	<2	6.88	50.27	8.39	2.57
Zn (ppm)	22.31	28.21	11.40	23.17	20.19	24.64	16.48
La (ppm)	27.79	30.52	31.45	31.90	34.59	33.90	32.60
Ce (ppm)	59.96	57.18	59.24	62.15	59.18	60.60	53.40

Nd (ppm)	30.37	29.04	27.91	30.30	29.49	31.27	27.51
Pr (ppm)	7.15	7.06	6.95	7.26	7.16	7.58	6.51
Sm (ppm)	7.06	6.35	6.13	6.77	7.52	7.17	6.51
Gd (ppm)	7.33	5.87	5.73	6.35	7.90	6.84	6.78
Tb (ppm)	1.19	0.95	1.02	1.04	1.39	1.10	1.18
Dy (ppm)	7.97	6.18	7.26	7.09	9.01	7.39	7.68
Ho (ppm)	1.62	1.29	1.54	1.42	1.84	1.53	1.59
Er (ppm)	5.30	4.40	5.34	4.69	5.87	5.16	5.35
Tm (ppm)	0.75	0.63	0.78	0.69	0.85	0.78	0.80
Yb (ppm)	5.37	4.59	5.55	4.52	5.83	5.24	5.31
Lu (ppm)	0.89	0.77	0.84	0.76	0.93	0.84	0.88

Fuente: el autor.

Tabla 3.
Continuación de la Tabla 2.

Nº	8	9	10	11	12	13	14
Código Interno	LV-04	LV-05	SC-01	SC-02	SC-03	SC-04	SC-05
Ubicación	La Virgen	La Virgen	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal	San Cristobal
Este	279850	279804	280154	280451	280505	280321	280211
Norte	8669505	8669569	8669112	8668941	8668840	8668708	8669004
Elevación	323	329	290	308	343	390	320
Litología	Granito	Gabro	Sienogranito	Diorita/gabro	Diorita/gabro	Tonalita	Tonalita
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
SiO₂ (%)	76.12	49.95	75.81	62.68	61.94	62.20	65.21
TiO₂ (%)	0.18	0.71	0.09	0.67	0.72	0.71	0.56
Al₂O₃ (%)	11.84	17.02	13.21	15.80	15.34	15.23	16.11
Fe₂O₃ (%)	1.98	11.25	1.25	7.52	8.38	8.40	5.74
MgO (%)	0.14	6.58	0.08	2.08	2.42	2.28	1.39
MnO (%)	0.03	0.18	0.03	0.11	0.11	0.10	0.07
CaO (%)	0.59	9.61	0.56	5.43	5.60	5.38	4.82
Na₂O (%)	3.87	3.46	3.86	3.88	3.63	3.65	4.31
K₂O (%)	5.19	1.09	5.10	1.68	1.72	1.89	1.65
P₂O₅ (%)	0.05	0.15	0.01	0.14	0.14	0.16	0.14
LOI* (%)	1.05	1.40	0.47	1.19	1.37	1.80	1.45
Rb (ppm)	107.93	63.78	130.30	69.58	83.79	108.82	71.65
Sr (ppm)	46.40	231.37	32.96	248.40	248.29	247.95	258.64
Y (ppm)	62.69	16.65	72.34	28.18	27.93	29.32	26.14
Zr (ppm)	206.12	53.68	261.68	207.00	140.78	139.96	254.63
Nb (ppm)	5.74	1.24	5.79	3.11	3.34	3.14	4.14
Cs (ppm)	0.83	1.30	1.87	1.55	2.07	2.00	1.61
Ba (ppm)	1214.89	319.46	1283.66	555.64	545.39	571.74	720.25
Hf (ppm)	6.73	1.57	10.32	6.01	4.79	4.51	7.91
Ta (ppm)	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

Pb (ppm)	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Th (ppm)	25.76	2.66	30.90	6.52	6.48	6.34	6.74
U (ppm)	5.62	0.88	7.35	2.08	2.12	2.05	2.37
Cs (ppm)	0.83	1.30	1.87	1.55	2.07	2.00	1.61
V (ppm)	<10	271.93	<10	120.25	156.67	141.19	72.30
Cr (ppm)	5.32	94.64	3.75	30.99	34.94	35.39	24.14
Ni (ppm)	<5	21.13	<5	<5	<5	<5	<5
Cu (ppm)	5.89	6.13	3.70	47.62	53.97	87.74	10.65
Zn (ppm)	12.49	66.45	10.55	49.09	62.81	55.42	33.77
La (ppm)	39.85	35.11	41.08	28.79	31.53	29.81	26.60
Ce (ppm)	88.32	17.88	93.43	34.25	39.79	37.12	31.16
Nd (ppm)	46.30	10.17	43.97	19.05	22.70	20.11	19.95
Pr (ppm)	11.06	2.26	11.01	4.30	4.94	4.56	4.17
Sm (ppm)	10.15	2.69	9.72	4.81	5.44	4.84	4.92
Gd (ppm)	9.15	2.87	10.05	4.98	5.59	5.12	5.37
Tb (ppm)	1.48	0.44	1.74	0.80	0.98	0.84	0.84
Dy (ppm)	9.52	3.00	11.87	5.46	5.68	5.45	5.75
Ho (ppm)	2.02	0.61	2.55	1.10	1.19	1.13	1.16
Er (ppm)	6.39	1.91	8.76	3.50	3.80	3.56	3.69
Tm (ppm)	0.92	0.26	1.33	0.49	0.51	0.49	0.52
Yb (ppm)	6.42	1.74	9.12	3.30	3.46	3.28	3.60
Lu (ppm)	0.99	0.29	1.46	0.56	0.58	0.53	0.58

Fuente: el autor.

Tabla 4.
Resultados del análisis de difracción de Rayos X.

Nº	1	2	3	4
Código Interno	AL-02	LV-05	SC-02 (Xenocristal)	SC-03
Ubicación	Altillo	La virgen	San Cristobal	San Cristobal
Este	279948	279804	280451	280505
Norte	8669372	8669569	8668941	8668840
Elevación	293	329	308	343
Litología	Monzogranito	Gabro	Diorita	Diorita/gabro
Edad Geológica	Cretácico superior	Cretácico inferior	Cretácico inferior	Cretácico inferior
Unidad	Super Unidad Santa Rosa	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap	Super Unidad Patap
Actinolita (Wt%)	1.71	61.18	31.18	12.09
Albita (Wt%)	42.14	20.59	34.18	22.46
Andesina (Wt%)	-	14.42	-	6.63
Clinocloro (Wt%)	1.04	3.53	1.84	1.25
Cuarzo (Wt%)	34.52	0.29	11.39	26.3
Ortoclasa (Wt%)	20.59	-	-	22.85
Flogopita (Wt%)	-	-	21.42	-
Epidota (Wt%)	-	-	-	8.43

Fuente: el autor.