



Fundación
Miguel Lillo
Tucumán
Argentina

doi

Petrografía y geoquímica del granitoide Vicin, Macara, Ecuador

Petrography and geochemistry of the Vicin granitoid, Macara, Ecuador

Christian W. ROMERO-CÓNDOR^{1*}, María E. VELIZ-ZAMBRANO², Marilyn D. C. CASTILLO-JARA², Carla E. CASTILLO-ROSETO¹, Angie N. PINCAY-VELÁZQUEZ³, Leyla L. OÑATE-ACURIO⁴, Fausto C. CARRANCO-ANDINO¹, Daniela D. P. CABASCANGO-LARA¹, Ana B. GRAMAL-AGUILAR¹, Juan G. TORRES-CARTUCHE¹

¹ Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Recursos Minerales en el Territorio Ecuatoriano. Instituto de Investigación Geológico y Energético – IIGE. Quito-Ecuador.

² Facultad de Geología Minas Petróleos y Ambiental. Universidad Central de Ecuador. Quito-Ecuador.

³ Carrera de Ingeniería Geológica, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil – UG- Guayaquil-Ecuador.

⁴ Departamento de Geología. Facultad de Geología y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador.

* <christian.romero@geoenergia.gob.ec>

Resumen

En Ecuador, la historia del magmatismo de la cuenca Alamor – Lancones es un enigma debido a la ausencia de estudios específicos que caractericen cuerpos ígneos. Esta investigación se enfoca en el análisis petrográfico y geoquímico del intrusivo Vicin, en la sección Vicin Viejo, ubicado al suroeste de Macará (Ecuador). El granitoide Vicin se emplacea en secuencias volcanoclásticas de la Formación Ciano e intrusivo Potrerillos, aflora en forma de sills, lacolitos, diques y cúpulas, alineados con la falla inversa Cerro Viejo. Petrográficamente, el intrusivo Vicin es un granitoide rico en cuarzo, su mineralogía es dominada por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, actinolita, moscovita y granate. Presenta texturas faneríticas, inequigranulares y holocristalinas a hipocristalinas de grano medio a grueso, con la presencia de xenolitos dioríticos y gabríticos. Datos geoquímicos indican que el intrusivo Vicin corresponde a granitos de afinidad calco-alcalina, saturados en sílice y con carácter metalumínico a peralumínico. Las concentraciones de elementos traza

► Ref. bibliográfica: Romero-Cóndor, C. W.; Veliz-Zambrano, M. E.; Castillo-Jara, M. D. C.; Castillo-Rosero, C. E.; Pincay-Velázquez, A. N.; Oñate-Acurio, L. L.; Carranco-Andino, F. C.; Cabascango-Lara, D. D. P.; Gramal-Aguilar, A. B.; Torres-Cartuche, J. G. 2025. "Petrografía y geoquímica del granitoide Vicin, Macara, Ecuador". *Acta Geológica Lilloana* 36 (1): 1-28. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/1993>

► Recibido: 21 de agosto 2024 – Aceptado: 13 de diciembre 2024



OPEN ACCESS

► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

y tierras raras sugieren que el magmatismo se vincula a un ambiente de arco volcánico, característico de una margen continental activa en un dominio orogénico compresivo.

Palabras clave: Petrografía, Geoquímica, Ambiente tectónico, Granitoides.

Abstract

In Ecuador, the magmatic history of the Alamor–Lancones basin remains enigmatic due to the lack of specific studies characterizing igneous bodies. This research focuses on the petrographic and geochemical analysis of the Vicin intrusive body in the Vicin Viejo section southwest of Macará, Ecuador. The Vicin granitoid intrudes volcanoclastic sequences of the Ciano Formation and the Potrerillos intrusive body, manifesting as sills, laccoliths, dikes, and domes, aligned with the Cerro Viejo reverse fault. Petrographically, the Vicin intrusive is a quartz-rich granitoid, with mineralogy dominated by quartz, potassium feldspar, plagioclase, actinolite, muscovite, and garnet. It exhibits phaneritic, inequigranular, and holocrystalline to hypocrystalline textures, medium to coarse grain size, and dioritic and gabbroic xenoliths. Geochemical data indicate that the Vicin intrusive corresponds to calc-alkaline affinity granites, saturated in silica and exhibiting metaluminous to peraluminous characteristics. The concentrations of trace elements and rare earth elements suggest that the magmatism is associated with a volcanic arc environment, characteristic of an active continental margin in a compressive orogenic domain.

Keywords: Vicin, Petrography, Geochemistry, Tectonic setting, Granitoids.

INTRODUCCIÓN

La principal característica morfológica de la margen noroccidental de Sudamérica son los Andes del Norte, que en Ecuador incluyen una cuenca de antearco denominada Costa y una cuenca de trasarco llamada cuenca Oriente (Gutiérrez *et al.*, 2019). Los Andes en Ecuador presentan una tendencia noreste-suroeste y se estructuran en dos cordilleras genéticamente distintas (Figura 1A). Al este, la cordillera Real alberga rocas sedimentarias e ígneas del Paleozoico al Cretácico Superior metamorfizadas (Spikings *et al.*, 2021), mientras que, al oeste, la cordillera Occidental presenta un basamento ígneo máfico vinculado a la Gran Provincia Ígnea del Caribe (GPIC), acrecionada a la margen noroccidental de Sudamérica en el Cretácico Superior. Este basamento máfico está cubierto por secuencias turbidíticas del Paleoceno (Vallejo *et al.*, 2019). Ambas cordilleras están separadas por el valle Interandino, que conserva el registro del volcanismo Plio-Cuaternario (Winkler *et*

al., 2005). Al sur de Ecuador, la zona de falla dextral Guayabal representa el límite geográfico entre la cordillera Real y el bloque Amotape-Tahuín (BAT) (Litherland *et al.*, 1994). El BAT corresponde a un alto topográfico de tendencia este-oeste, dominado por rocas metamórficas, que se considera una cuña rotada de la cordillera Real (Riel *et al.*, 2014).

Jaillard *et al.* (1999) afirman que la cuenca Alamor-Lancones y el arco Celica se localizan entre la cordillera Real y el BAT (Figura 1B). El arco Celica incluye múltiples secuencias de rocas volcánicas y volcanoclásticas, que en Perú han sido datadas en el Cretácico Superior (Winter, 2008). Esta secuencia volcánica es afectada por la intrusión del batolito Tangula y por múltiples cuerpos porfiríticos y subvolcánicos, como los pórfidos Linderos y Curiplaya, datados en $87,5 \pm 1,6$ Ma y $92,0 \pm 1,0$ Ma, respectivamente, lo que restringe la edad del magmatismo al Coniaciano (Schutte, 2009).

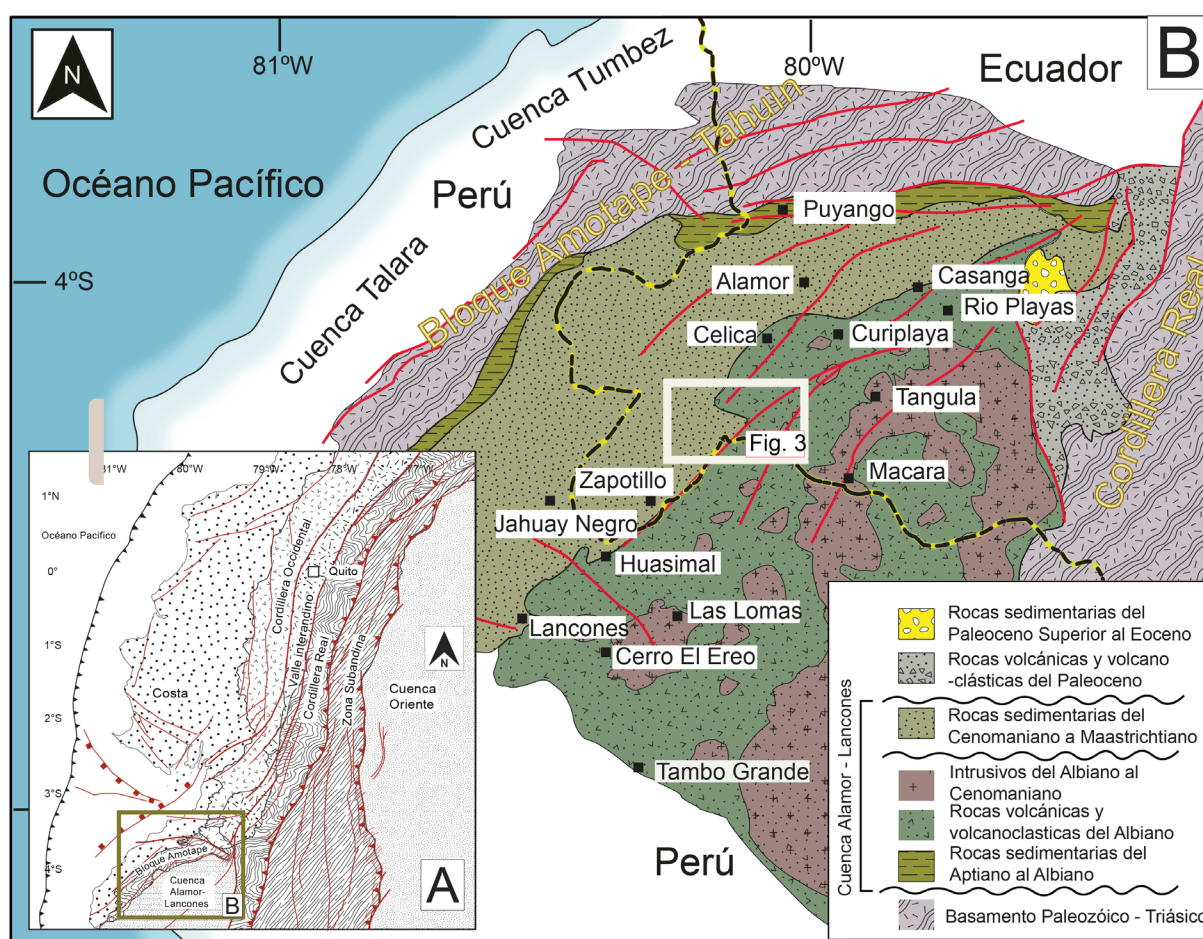


Figura 1. Mapa de ubicación. A. Regiones morfotectónicas del Ecuador. B. Mapa geológico de la cuenca Alamor-Lancones. Modificado de Valarezo *et al.* (2019) y Romero *et al.* (2023).

En Ecuador, la ausencia de investigaciones que caractericen a las formaciones geológicas incluyendo su información petrográfica, geoquímica, edades de cristalización e interpretación del ambiente de tectónico de intrusiones y rocas subvolcánicas provocó un vacío en la interpretación de la historia magmática de esta región. En este contexto, al este del poblado de Macará, en la sección Potrerillos a Vicín, varios cuerpos intrusivos fueron reportados por el INIGEMM (2016); sin embargo, la naturaleza de la roca caja, las relaciones de corte, la petrografía, la geoquímica y la edad del intrusivo no fueron previamente reportadas. La ausencia de esta información imposibilita la interpretación en el contexto geodinámico regional de esta serie magmática. El objetivo de este trabajo es discutir el ambiente de formación del intrusivo Vicín en base a nuevos datos litoestratigráficos, estructurales, petrográficos y geoquímicos recolectados en la sección Potrerillos a Vicín.

Geología regional

Al norte de la deflexión de Huancabamba, el basamento de la cuenca Alamor-Lancones incluye a rocas metamórficas de la cordillera Real y el BAT (Jaillard *et al.*, 1999). Al este de la cuenca Alamor – Lancones, la Formación Celica incluye a secuencias de rocas volcanoclásticas y lavas andesíticas de afinidad calcoalcalina, asignadas al Cretácico Superior. (Kennerley, 1973; Lebrat, 1985; Aguirre, 1992; Carrasco, 2018). Por otro lado, anteriores autores reportaron, la presencia de basaltos y andesitas basálticas de afinidad toleítica en la base de la secuencia volcánica Celica (Figura 2) estas rocas fueron nombradas Unidad Punta de Piedras (Pilatasig *et al.*, 2013; INIGEMM, 2016). Sin embargo, en Ecuador no se ha reportado la litoestratigrafía detallada y formal de la Formación Celica, incrementando la incertidumbre en cuanto a la comprensión de la génesis, evolución y distribución geográfica del arco Celica.

A nivel regional, múltiples series de rocas intrusivas fueron agrupadas en el complejo intrusivo Tangula (Figura 2). Litológicamente, estas series intrusivas varían desde gabros a granitoides ricos en cuarzo y cortan a distintos niveles de la Formación Celica (Kennerley, 1973; Carrasco, 2018; INIGEMM, 2016). Edades K-Ar, Ar-Ar y U-Pb reportadas para estas series intrusivas varían desde 115 Ma a 38 Ma (Winter, 2008; Schutte, 2009; Kennerley, 1973; Ulrich, 2005). Esto implica que diferentes episodios magmáticos fueron cartografiados en el complejo intrusivo Tangula sin pertenecer a este periodo magmático.

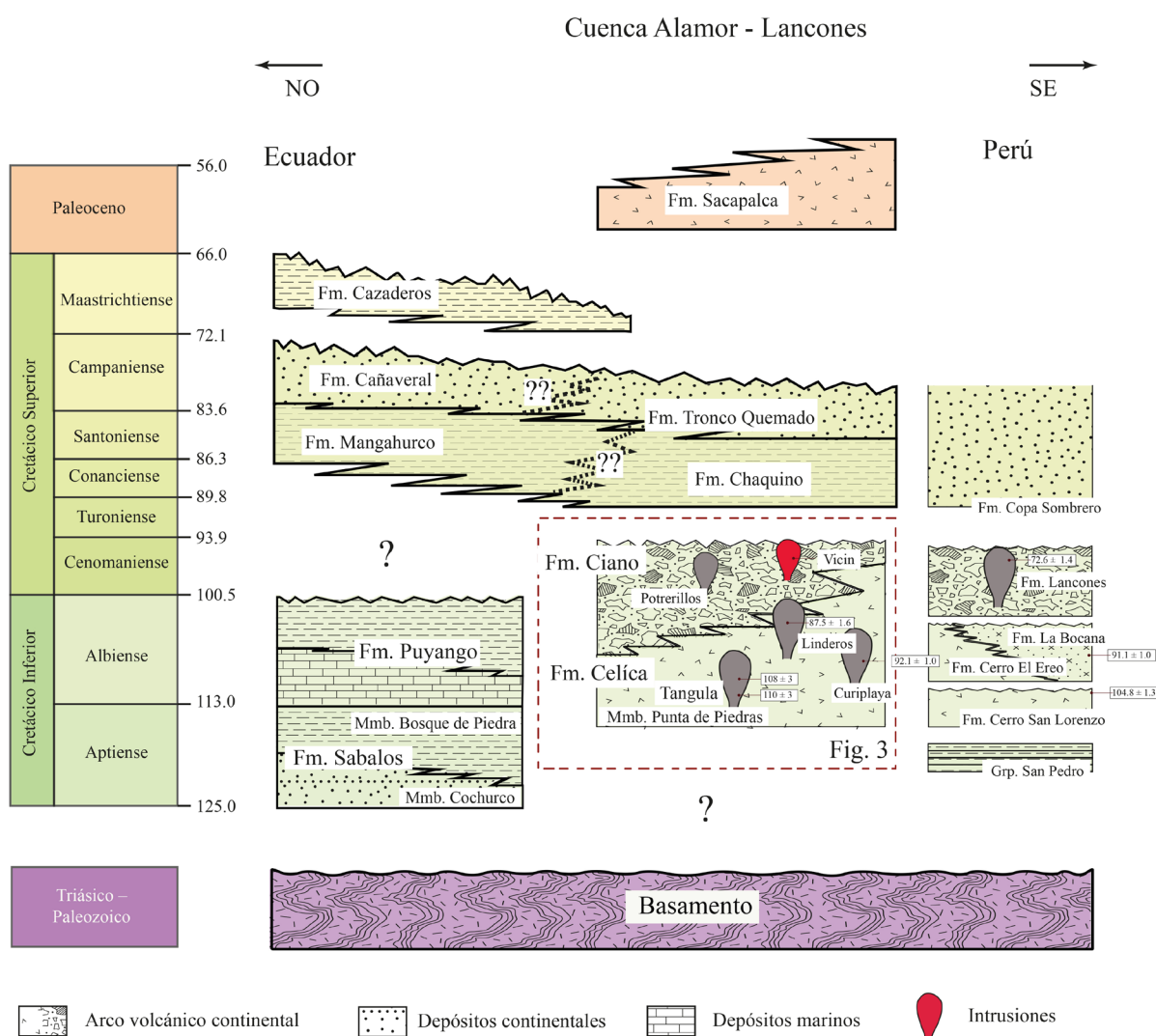


Figura 2. Esquema litoestratigráfico de la cuenca Alamor-Lancones. Modificado de Carrasco (2020) y Romero *et al.* (2023).

En Perú, Winter (2008) discrimina secuencias de rocas volcánicas de la Cuenca Alamor-Lancones en cuatro formaciones: Cerro San Lorenzo, Cerro El Ereó, La Bocana y Lancones. En la Formación Cerro San Lorenzo fueron incluidos basaltos, andesitas basálticas y andesitas de afinidad bimodal, datadas en 105 Ma a 100 Ma; mientras que, las formaciones Cerro El Ereó, La Bocana y Lancones incluyen a secuencias compuestas por intercalaciones de brechas volcánicas, andesitas basálticas, andesitas y dacitas de afinidad bimodal, vinculadas a ambientes marinos someros y datadas entre 99 Ma - 91 Ma.

En el tope de la Formación Celica, intercalaciones de tobas de cristales, tobas de clastos, brechas volcánicas, conglomerados, areniscas y lutitas; fueron cartografiadas en la Formación Ciano (INIGEMM, 2016). El intrusivo Potrerillos agrupa a cuarzomonzonitas, calco-alcalinas, de arco volcánico continental, emplazadas en rocas volcanoclásticas de la Formación

Ciano (Romero *et al.*, 2023). Al oeste de la cuarzomonzonita Potrerillos, el intrusivo Vicin consiste en una serie de granitoides no caracterizados, se desconocen las relaciones de corte, características petrográficas, detalle geoquímico, su edad y su ambiente de formación (INIGEMM, 2016). La Formación Chaquino cubre en discordancia a las formaciones Celica y Ciano, esta secuencia agrupa a lutitas negras intercaladas con finos niveles de areniscas masivas (Carrasco, 2018). Depósitos masivos de areniscas y conglomerados de la Formación Tronco Quemado cubren a la Formación Chaquino (INIGEMM, 2016).

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se analizaron las características tectónicas de antiguos episodios magmáticos, estudiando el registro de rocas ígneas intrusivas en la zona de estudio a través de: 1) estudio de la naturaleza de la roca de caja, 2) relaciones de corte entre los cuerpos intrusivos y su roca de caja, 3) petrografía y 4) geoquímica de las series intrusivas involucradas (Bennison *et al.*, 2011; Cox *et al.*, 2013).

La metodología empleada en este estudio incluye: recopilación de información bibliográfica, identificación y descripción de afloramientos, recolección de muestras para análisis petrográficos y geoquímicos e interpretación de los datos. La recopilación de información bibliográfica consideró: bases de datos topográficas y mapas geológicos históricos a diferentes escalas (1:5.000, 1:25.000, 1:50.000 y 1:100.000). Además, imágenes satelitales (Terra y Aqua MODIS, ASTER, VIIRS, Global basemap), informes técnicos publicados e inéditos y artículos científicos. Del análisis de los datos bibliográficos, se realizó la georreferenciación de afloramientos tipo, en donde se levantaron secciones y columnas estratigráficas. Ciento noventa y dos (192) datos estructurales fueron recolectados y considerados en el análisis de la sección. Estos datos incluyeron estructuras como: estratificación (S0), diaclasas (D), fallas (F), contactos netos (C) y discordancias (D). Además, estos datos fueron analizados en conjunto con imágenes satelitales, lo cual permitió reinterpretar lineamientos en la cartografía geológica regional y local (Bennison *et al.*, 2011).

Para el análisis petrográfico se recolectaron ocho (8) muestras tipo, se elaboraron secciones delgadas, en las cuales, se definieron facies minerales y micro texturas, en cada sección delgada se contaron 300 puntos, normalizando sus proporciones de cuarzo (Q), feldespato (A) y plagioclasa (P), discriminando a su vez las relaciones entre albita y anortita. El análisis semicuantitativo de difracción de rayos X (XRD) de las ocho (8) muestras seleccionadas permitieron definir firmas de espectrometría en ensamblajes de minerales (Bunaciu *et al.*, 2015).

Tabla 1. Coordenadas de muestras analizadas.

Muestra	Litología	UMT-X	UTM-Y
2023IV-01	Granitoide leucocrático	599 799E	9 527 489N
2023IV-02	Granitoide mesocrático	600 087E	9 527 769N
2023IV-03	Granitoide mesocrático	600 220E	9 527 866N
2023IV-04	Granitoide leucocrático	600 271E	9 527 671N
2023IV-05	Granitoide leucocrático	600 385E	9 527 216N
2023IV-06	Granitoide leucocrático	600 980E	9 528 044N
2023IV-07	Granitoide mesocrático	601 223E	9 527 802N
2023IV-08	Granitoide leucocrático	601 433E	9 527 705N

Ocho (8) muestras del intrusivo Vicin fueron consideradas en el análisis geoquímico. La trituración primaria de cada una de las muestras se realizó a mano en un ambiente libre de contaminación. Posteriormente, los fragmentos obtenidos fueron lavados con ácido clorhídrico al 0,1% y agua purificada tipo II (ozonificada). Los fragmentos limpios se secaron y se trituraron con ayuda de molinos de mandíbulas y discos de ágata hasta alcanzar una dimensión menor a 200 micras, luego se pulverizaron en una cámara rotatoria de cilindro. Para elementos mayores y elementos traza, se aplicó espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), realizando la preparación de las muestras mediante digestión total de cuatro (4) ácidos según el procedimiento detallado en Kumar *et al.* (2013). Para tierras raras se utilizó espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, ICP-MS, con digestión por fusión alcalina (Pinto *et al.*, 2012). El error de los análisis XFR se estimó inferior al 1% para los óxidos mayores. El error analítico es inferior al 5 % para elementos con concentraciones >200 ppm y del 5 al 10 % para aquellos <200 ppm. La pérdida por ignición se obtuvo midiendo el peso de la muestra antes y después de calentarla a 950°C durante media hora (Kumar *et al.*, 2013). Las concentraciones de óxidos mayores, elementos traza y tierras raras fueron cuantificados a partir de estándares internacionales (Qi *et al.*, 2000) en el laboratorio de Geoquímica del Institute of Petroleum and Natural Resources (IPR) de Brasil. Los datos obtenidos fueron evaluados, en muestras anhidras y reportados en diagramas de discriminación litológica y tectónica utilizando el software GCDKit 6.0 (Janoušek *et al.*, 2019).

RESULTADOS

Relaciones de campo

El levantamiento de información geológica fue realizado en la antigua vía Macará a Zapotillo, desde el sector Potrerillos (WGS84-17S 597 348E, 9 527 935N) a Vicin (WGS84-17S 602 066E, 9 527 100N), abarcando un área de 21 Km², a escala de trabajo 1: 25.000 (Figura 3).

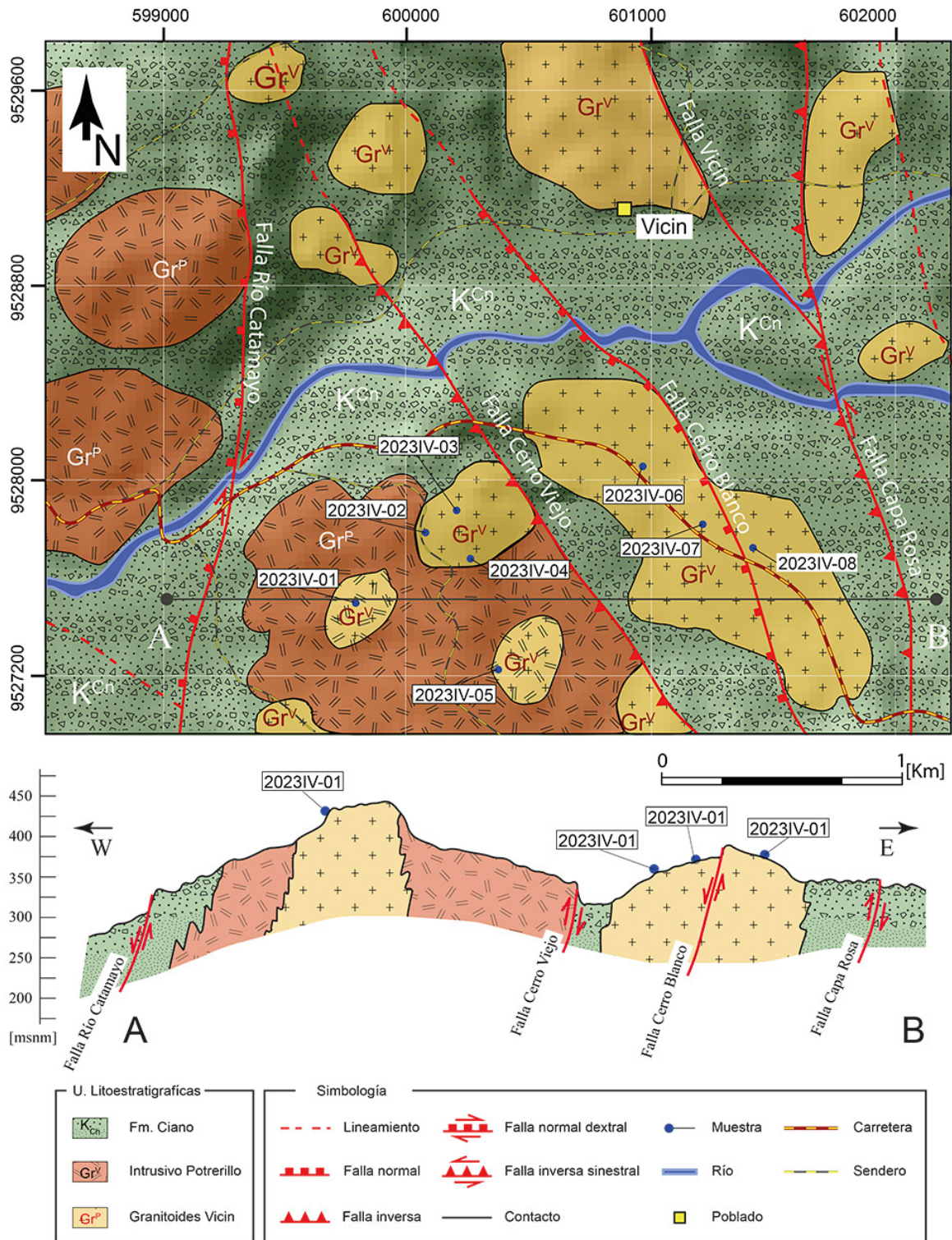


Figura 3. Mapa geológico de Vicin Viejo, escala 1:25.000. Modificado de INIGEMM, (2016) y Romero *et al.* (2023).

El principal accidente geográfico en la zona de estudio es el río Catamayo, el cual, disecta el relieve exponiendo rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Formación Ciano, que es afectada por diversos cuerpos intrusivos, tectónicamente controladas por sistemas de fallas de dirección norte – sur, noroeste – sureste y noreste – suroeste (Figura 3).

En las márgenes del río Catamayo, grandes y continuas exposiciones de la Formación Ciano permiten observar secuencias de tendencia estrato-creciente, de estratos lateralmente discontinuos, de geometría lobular a convexa, compuestos por intercalaciones de brechas volcánicas, matriz soportada, oligomícticas, con fragmentos angulares a subangulares, de andesitas, andesitas basálticas, lutitas, limolitas y calizas, entre niveles tabulares, lateralmente discontinuos, de arcosas de grano fino a medio, de color verde a gris, con laminación paralela y gradación inversa. En el tope de la secuencia se observan grauvacas limosas, de color negro a verde, de grano fino, masivas y esporádicos niveles de andesitas de color gris, de textura porfirítica, con fenocristales de plagioclasa. El espesor de esta secuencia supera los 150 m en superficie, sin embargo, la base de la secuencia no fue observada (Figura 3).

Al este de la zona de estudio, en el sector Potrerillos, el intrusivo Potrerillos aflora en forma de domo, diques, cúpulas y cuerpos irregulares que intruyen a rocas volcanoclásticas de la Formación Ciano. La composición litológica del intrusivo Potrerillos varía de cuarzomonzonítica a cuarzodiorítica, de textura fanerítica de grano fino a medio, alotriomórfica granular, inequigranular, leucocrática a mesocrática, con xenolitos negros de composición andesítica basáltica (Figura 3).

Al oeste de la zona de estudio en las inmediaciones de Vicin, el intrusivo Vicin aflora en forma de sills, lacolitos, diques y cupulas que cortan las rocas volcanoclásticas de la Formación Ciano como en el intrusivo Potrerillos. La composición litológica del intrusivo Vicin incluye a granitos hololeucocráticos a leucocráticos, aplíticos a pegmatíticos, de textura fanerítica a porfirítica, inequigranular, con megacrístales de cuarzo (Figura 4). También se observan xenolitos dioríticos, gabróicos y basálticos. La relación de corte entre los intrusivos Potrerillos y Vicin es oblicua a irregular.

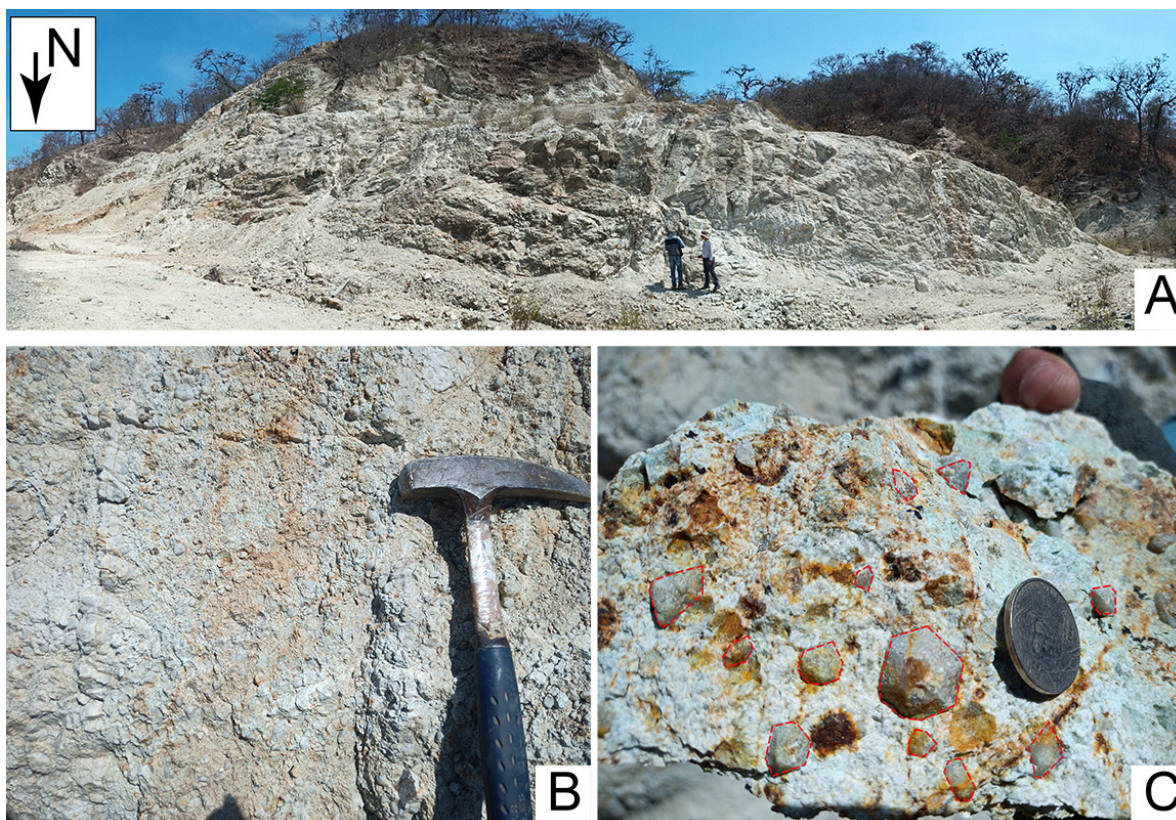


Figura 4. Afloramiento tipo del intrusivo Vicin (WGS84-17S 601 190E, 9 527 433N). A. Intrusiones tipo sill y lacolitos. B. Granitoide hololeucocrático. C. Mega cristales euhe-drales de cuarzo.

Sección geológica Vicin Viejo

La sección geológica Vicin Viejo presentada en la Figura 3 tiene longitud de 6.33 Km y dirección oeste – este, en esta sección se analizaron cincuenta y seis (56) estaciones en donde se recolectaron ciento setenta y tres datos (173). Esta sección incluye a las formaciones Ciano y a los intrusivos Potrerillos y Vicin, además a las estructuras Catamayo, Cerro Viejo, Cerro Blanco y Capa Rosa.

Al oeste de la loma Cerro Viejo, la Formación Ciano agrupa a niveles estratificados de tobas de cristales, arcosas finas a gruesas y grauvacas de color verde a negro, con clastos subredondeados a subangulares de andesitas y lodolitas aplanados se intercalan con niveles de brechas matriz soportados, oligomícticos, polimodales, con fragmentos angulares a subangulares de andesitas y basaltos. Como se observa en la Figura 5A, los planos de estratificación (S0) en estos niveles muestran tendencia promedio NE-S0 ($\sim 49^\circ$), con buzamiento al NO ($\sim 32^\circ$). El contacto entre la cuarzomonzonita Potrerillos y rocas volcanoclásticas de la Formación Ciano es irregular, sin embargo, en la quebrada El Choro, este contacto tiene dirección NO-O ($\sim 288^\circ$) con buzamiento subvertical al NE ($\sim 71^\circ$) (Figura 5B). En la cuarzomonzonita Potrerillos se identificaron cuatro familias de diaclasas, la

relación de corte de la más joven a la más antigua se detalla a continuación (Figura 5C): DIP₁ de dirección N-S ($\sim 0^\circ$) subvertical, de buzamiento al E ($\sim 82^\circ$); DIP₂ de rumbo SO-NE ($\sim 233^\circ$) de buzamiento al SE ($\sim 49^\circ$); DIP₃ de rumbo NE-E ($\sim 75^\circ$) con buzamiento al NO-N de bajo ángulo ($\sim 22^\circ$) y DIP₄ de dirección NO-SE ($\sim 295^\circ$) de alto buzamiento al NE-E ($\sim 70^\circ$).

La relación de corte entre la cuarzomonzonita de Potrerillos y los granitoides de Vicin es irregular. Datos de campo indican tendencia NO-SE ($\sim 311^\circ$), con buzamiento subvertical al SO (78°) (Figura 5D). Tres familias de diaclasas fueron identificadas en los granitoides Vicin, de la más joven a la más antigua estas son: DI_{V1} de tendencia N-S ($\sim 352^\circ$), subverticales con buzamiento al E ($\sim 83^\circ$), DI_{V2} de tendencia N-S ($\sim 13^\circ$), subverticales con buzamiento al E ($\sim 76^\circ$) y DI_{V3} de dirección NE-SO ($\sim 245^\circ$) de alto buzamiento SE ($\sim 69^\circ$) (Figura 5E). La relación de corte entre los granitoides Vicin y la Formación Ciano puede ser observada en el Cerro Blanco, en donde el contacto intrusivo tiene una dirección N-S ($\sim 20^\circ$), con alto buzamiento al NO ($\sim 54^\circ$) (Figura 5F).

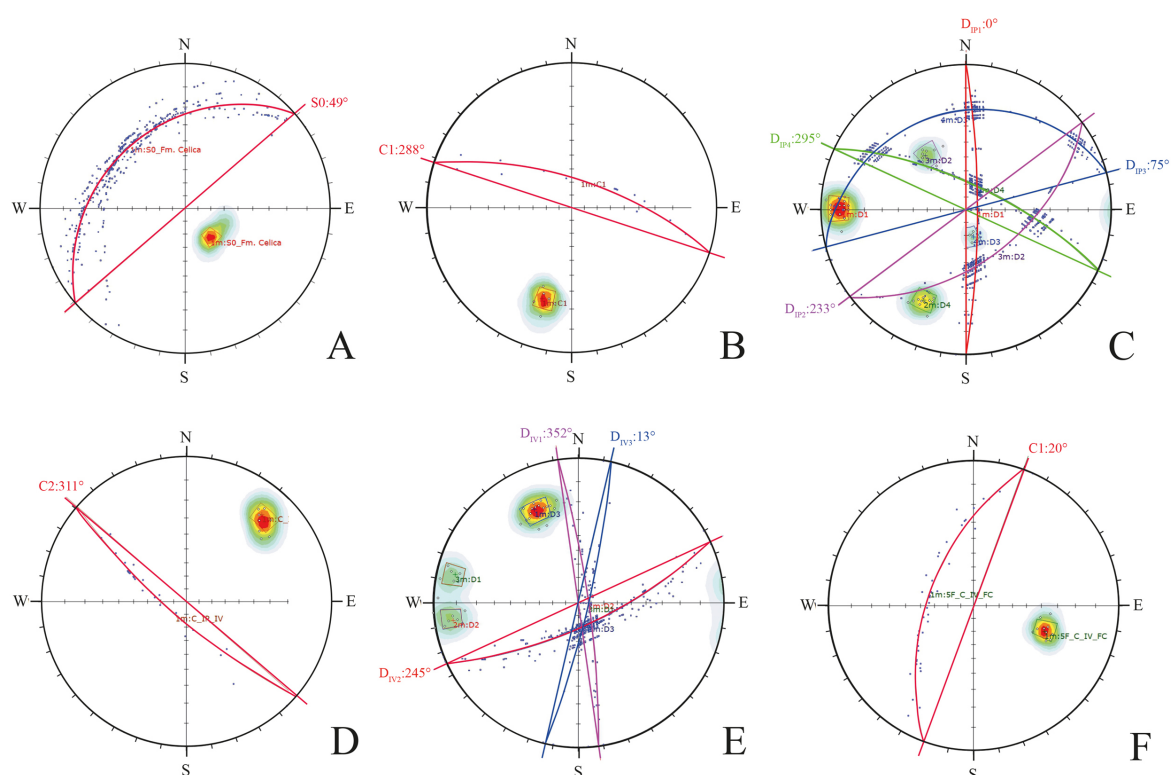


Figura 5. Diagramas estructurales de la sección Vicin Viejo. A. Datos de estratificación (S0) en la Fm. Celica; B. Contacto entre el Intrusivo Potrerillos y la Fm. Ciano; C. Familias de diaclasas en el Intrusivo Potrerillos; D. Relación de corte entre los intrusivos Potrerillos y Vicin; E. Familias de diaclasas en el Intrusivo Vicin; F. Contacto entre el Intrusivo Vicin y la Fm. Ciano.

La estructura Río Catamayo consiste en una falla normal dextral de dirección N-S (19°) y alto buzamiento NO ($\sim 61^\circ$), que en superficie afecta a rocas volcanoclásticas de la Formación Ciano (Figuras 3 y 6A). Mientras que, la estructura Cerro Viejo es considerada una falla inversa de dirección NON-SEE ($\sim 112^\circ$), subvertical de buzamiento al SO ($\sim 79^\circ$), que en superficie pone en contacto a cuarzomonzonitas Potrerillos y a rocas volcanoclasticas de la Formación Ciano (Figuras 3 y 6B). Por otro lado, la estructura Cerro Blanco, consiste en una falla normal, de dirección NO-SE ($\sim 304^\circ$), de alto buzamiento SO ($\sim 67^\circ$), que en superficie afecta al granitoide Vicin (Figuras 3 y 6C). La estructura Capa Rosa corresponde a una falla inversa sinistral de dirección N-S ($\sim 5^\circ$), subvertical de buzamiento O ($\sim 80^\circ$) (Figuras 3 y 6D).

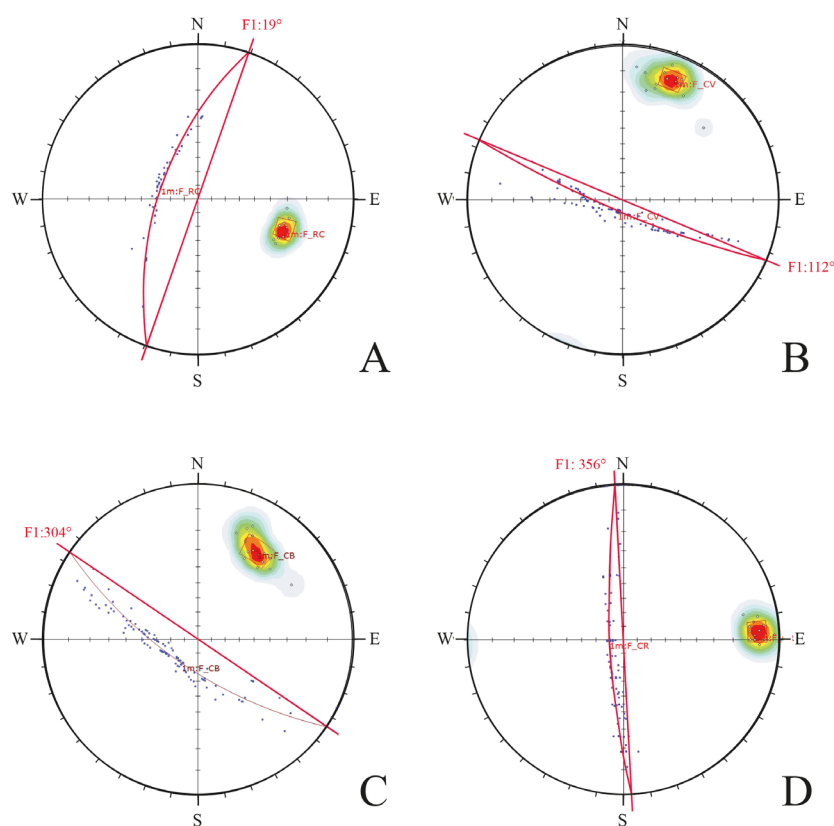


Figura 6. Diagramas estructurales de la sección Vicin Viejo. A. Falla del Río Catamayo; B. Falla Cerro Viejo; C. Falla Cerro Blanco; D. Falla Capa Rosa.

Petrografía

En la sección geológica Vicin Viejo se recolectaron ocho (8) muestras de afloramientos tipo del intrusivo Vicin (Tabla 2). La composición mineralógica promedio de las muestras recolectadas incluye: cuarzo (70%-82%), feldespato de potasio (7%-11%), plagioclasa (11%-19%), actinolita (<8%), moscovita (<5%). Granate, turmalina, circón, apatito y minerales opacos ocurren como minerales accesorios, mientras que sericita y clorita aparecen como minerales secundarios. Las muestras presentan textura fanerítica, inequigranular, holocristalina a hipocristalina, de grano medio a grueso (Figura 7A-7B). Adicionalmente se observan xenolitos irregulares de dioritas y gabros. También es frecuente encontrar facies pegmatíticas.

Tabla 2. Resultados del conteo modal de facies minerales en secciones delgadas del intrusivo Vicin.

Muestra	Q	A	P	Total	Q [%]	A [%]	P [%]
2023IV-01	210	33	57	300	70	11	19
2023IV-02	219	24	57	300	73	8	19
2023IV-03	237	30	33	300	79	10	11
2023IV-04	222	30	48	300	74	10	16
2023IV-05	210	45	45	300	70	15	15
2023IV-06	219	36	45	300	73	12	15
2023IV-07	216	27	57	300	72	9	19
2023IV-08	246	21	33	300	82	7	11

El cuarzo ocurre como cristales subhedrales prismáticos con extinción ondulítica, es común observar granos recrystalizados de sílice, ocasionalmente se puede observar textura milonítica. También se observan cristales alargados que eventualmente forman textura *ribbon* o en forma de cintas irregulares de cuarzo. El cuarzo también se presenta como cristales intersticiales de forma irregular entre feldespato de potasio y moscovita. Además, los cristales con formas vermiformes también ocurren entre los límites de los cristales de feldespato, definiendo una textura de mirmekita.

El feldespato de potasio se presenta como cristales prismáticos (> 5 mm), que generalmente exhiben maclas tipo *chessboard* o tablero de ajedrez y/o pertitas de morfología variables. También se observan cristales euhedrales a subhedrales (2 – 4 mm) que muestran contactos netos bordeados por finos cristales de cuarzo y moscovita. Localmente, se producen inclusiones de circón y apatito en el feldespato potásico.

La plagioclasa ocurre como cristales subhedrales (0.5-1.8 mm), exhibe macla polisintética y puede ser sustituida por sericita. Eventualmente, los fenocristales de plagioclasa exhiben microfracturas donde tienden a formar nuevos granos de cuarzo y feldespato. En los bordes, los fenocristales revelan una textura similar a la de un núcleo (*core-like texture*) y localmente muestran inclusiones de cuarzo y plagioclasa.

La tabla 2 presenta los resultados del conteo modal de cuarzo (Q), feldespato alcalino (A) y plagioclasa (P), normalizados y evaluados en el diagrama triangular de discriminación litológica de Le Maitre *et al.* (2002). Estas proporciones minerales indican que el conjunto de muestras analizadas corresponde a granitos ricos en cuarzo (Figura 7C).

Las concentraciones semicuantitativas (XRF) de las facies minerales: albita, anortita y ortoclasa fueron ploteadas en el campo de granitos en el diagrama de feldespato normativo de O'Connor (1965) (Figura 7D).

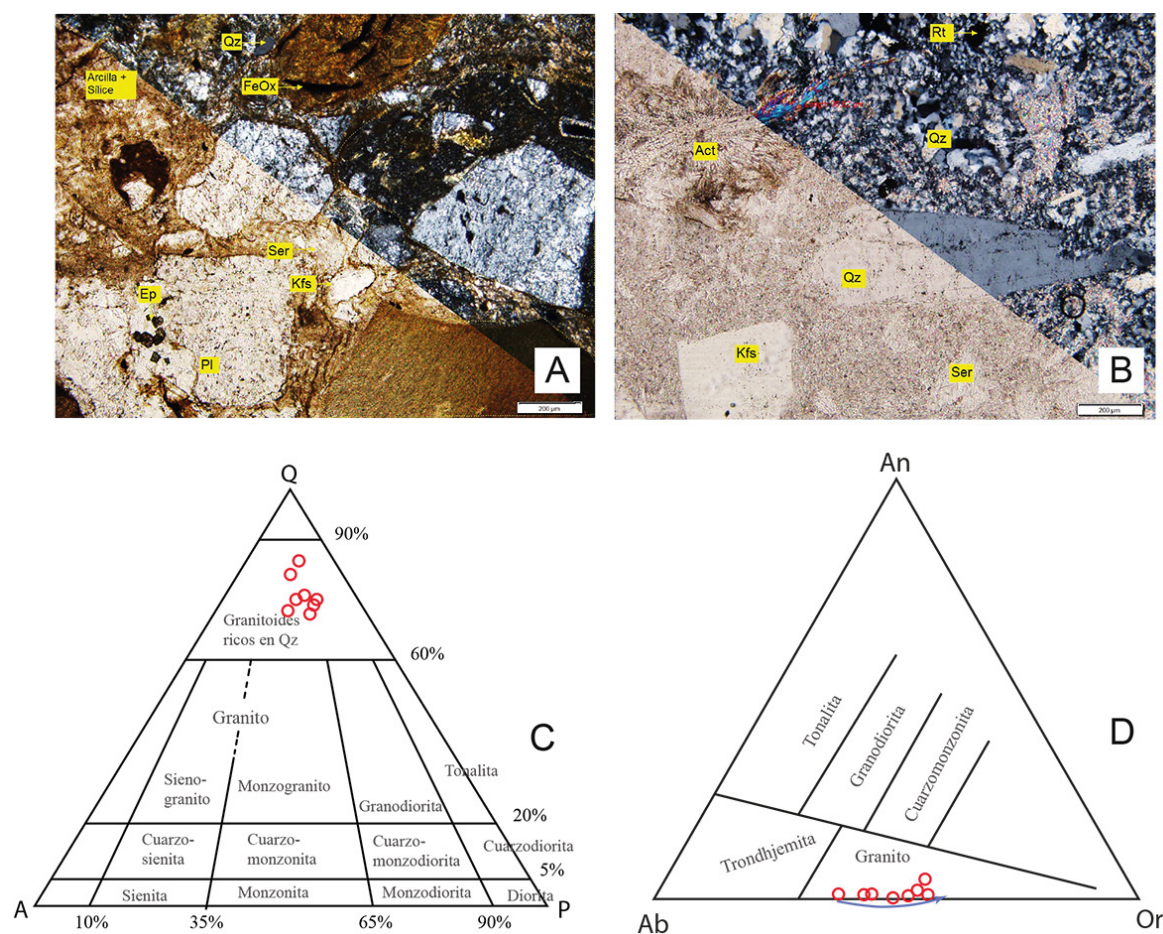


Figura 7. Secciones delgadas y análisis petrográfico del intrusivo Vicin. A. Sección delgada 2023IV-01. B. Sección delgada 2023IV-07. C. Diagrama ternario de clasificación litológica de Le Maitre *et al.* (2002) considerando a Stanley (2017). D. Diagrama ternario de clasificación litológica de O'Connor (1965).

Geoquímica

La tabla 3 presenta los resultados de óxidos mayores, elementos traza y tierras raras de 8 muestras tipo del granitoide Vicin, recolectadas en la sección Vicin Viejo. Los valores de pérdida por ignición (LOI) del conjunto de muestras varían desde 0,40 a 0,63. El set de muestras analizado presenta enriquecimiento de sílice y aluminio, ($78,50\% < \text{SiO}_2 < 80,48\%$;

13,75% < Al_2O_3 < 14,55%), se observan también contenidos moderados en álcali (2,84% < $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ < 3,73%) además bajas concentraciones de TiO_2 (0,10% – 0,13%), Fe_2O_3 (0,47% – 0,54%), MgO (0,13% – 0,16%), MnO (0,13% – 0,23%), CaO (0,32% – 0,62%) y P_2O_5 (0,26% – 0,37%).

El comportamiento de óxidos mayores, elementos traza y tierras raras fue analizado en función del contenido de SiO_2 . La Figura 8 muestra que las concentraciones de TiO_2 , MgO , Na_2O crecen con el enriquecimiento en SiO_2 , mientras que, las concentraciones de Al_2O_3 , CaO , K_2O , P_2O_5 , Fe_2O_3 , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ disminuyen con el incremento de SiO_2 . Elementos traza y REE varían de manera proporcional al incremento de SiO_2 , con excepción del Sr que presenta un comportamiento inverso al enriquecimiento de SiO_2 (Figura 9).

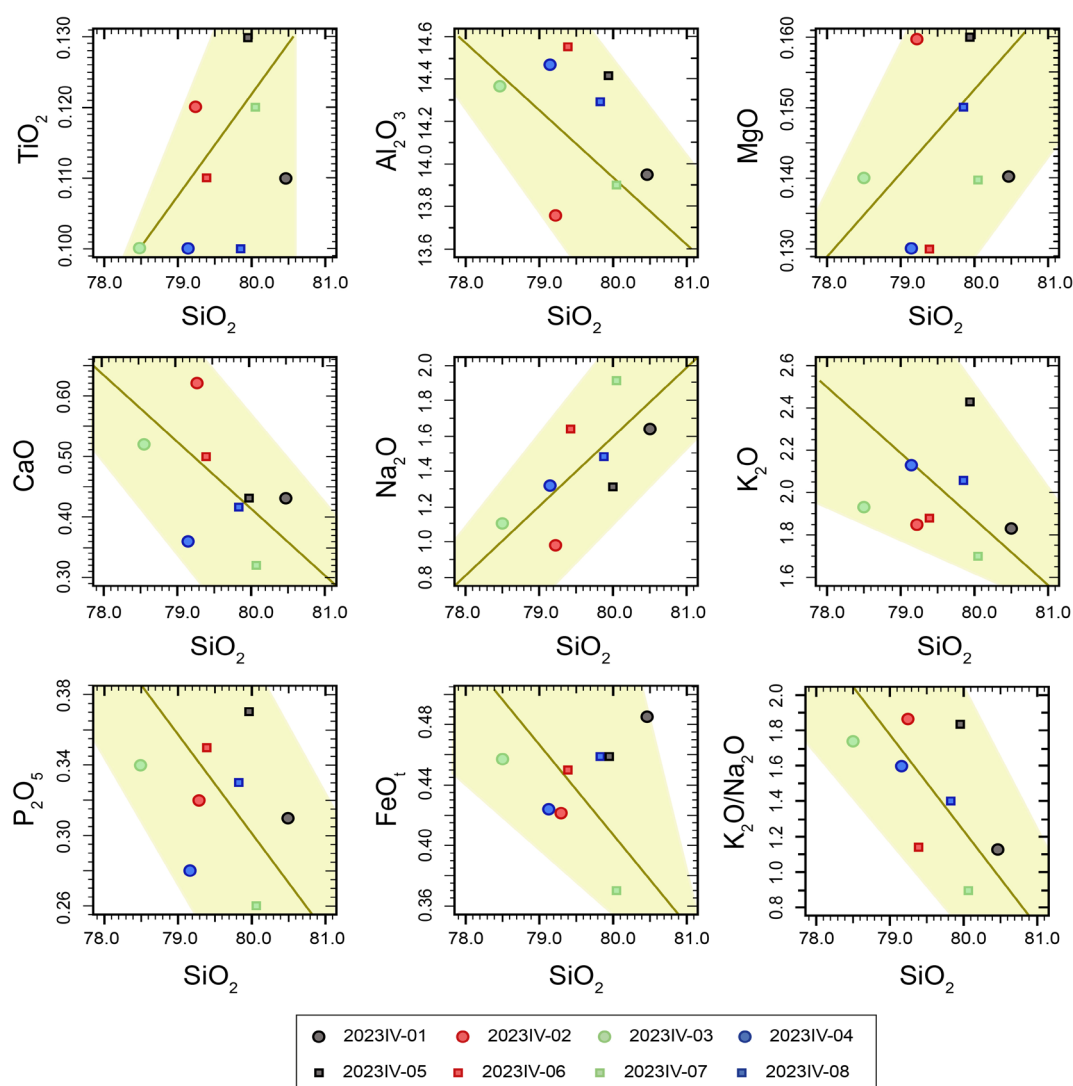


Figura 8. Diagrama tipo Harker, variación de Óxidos vs SiO_2 para el intrusivo Vicin.

Tabla 3. Resultados de análisis geoquímico del intrusivo Vicin.

Muestras	IV-01	IV-02	IV-03	IV-04	IV-05	IV-06	IV-07	IV-08
Elementos mayores [%]								
SiO ₂	79,95	79,39	80,06	79,85	80,48	79,26	78,50	79,16
TiO ₂	0,13	0,11	0,12	0,10	0,11	0,12	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	14,42	14,55	13,89	14,29	13,95	13,75	14,36	14,48
Fe ₂ O ₃	0,51	0,50	0,41	0,51	0,54	0,47	0,51	0,47
MgO	0,16	0,13	0,14	0,15	0,14	0,16	0,14	0,13
MnO	0,13	0,16	0,23	0,13	0,18	0,16	0,15	0,21
CaO	0,43	0,50	0,32	0,42	0,43	0,62	0,52	0,36
Na ₂ O	1,31	1,64	1,92	1,47	1,63	0,99	1,11	1,33
K ₂ O	2,42	1,88	1,70	2,06	1,83	1,85	1,93	2,13
P ₂ O ₅	0,37	0,35	0,26	0,33	0,31	0,32	0,34	0,28
Total	99,83	99,21	99,05	99,31	99,6	97,7	97,66	98,65
LOI	0,63	0,44	0,49	0,40	0,52	0,58	0,43	0,60
Elementos traza y REE [ppm]								
Sc	3,44	2,77	3,05	4,03	2,71	3,25	2,63	6,52
V	6	7	6	15	6	8	8	6
Cr	8	6	7	8	10	5	6	4
Co	7,68	8,31	8,69	9,6	8,37	8,6	8,57	9,87
Ni	1,85	1,06	3,13	2,24	2,45	2,84	2,09	2,29
Cu	20,46	18,46	24,66	27,26	26,06	22,86	27,16	20,86
Zn	56	50	48	39	36	38	42	40
Ga	23	20	22	22	26	20	21	20
Rb	96	78	82	81	79	92	92	109
Sr	477	540	509	645	506	581	586	510
Y	10,1	9,3	9,7	8,3	9,1	9,25	8,9	9,3
Zr	156	127	142	146	139	130	115	126
Nb	6,7	6	6,35	6,3	6	5,8	6,15	6,21
Ba	855	796	825	824	877	796	823	820
La	31,3	47,5	39,4	25,6	38,9	35,7	28,7	32,2
Ce	58,8	60,5	69,6	46,4	68,6	57,9	54,5	56,9
Pr	6,51	7,5	6,5	5,23	6,42	7	5,88	6,6
Nd	23,9	28,3	26,1	22,7	26,2	27,7	22,5	23,3
Sm	3,77	3,8	3,78	3,18	3,82	4,18	3,97	3,7
Eu	0,52	0,6	0,56	0,67	0,68	0,89	0,64	0,69
Gd	2,78	2,41	2,59	2,18	2,5	3,25	2,1	2,5
Tb	0,39	0,34	0,36	0,29	0,34	0,47	0,28	0,41
Dy	2,03	1,6	1,81	1,63	1,62	2,1	1,35	1,68
Ho	0,38	0,3	0,34	0,27	0,33	0,46	0,24	0,3
Er	0,99	0,89	0,94	0,73	1	1,37	0,76	1
Tm	0,15	0,14	0,14	0,12	0,15	0,2	0,11	0,2
Yb	0,97	0,79	0,88	0,75	1,01	1,08	0,78	0,9
Lu	0,14	0,14	0,14	0,11	0,15	0,17	0,09	0,1
Hf	8,22	7,16	6,69	6,92	8,14	8,11	7,96	6,35
Ta	1,9	1,78	1,6	1,85	1,81	1,85	1,69	1,91
Pb	17,83	21,35	20,27	44,15	23,31	19,19	24,38	21,64
Th	15	13	19	10	18	10	11	16
U	120	99	88	60	55	71	78	80
Ti	779,35	659,45	719,4	599,5	659,45	719,4	599,5	599,5
Relaciones isotópicas								
Ta/Yb	15.46	16.45	21.59	13.33	17.82	9.26	14.1	17.78
Ta/Yb	1.95	2.25	1.82	2.46	1.79	1.71	2.17	2.12
Th/Hf	1.82	1.81	2.84	1.44	2.21	1.23	1.38	2.52
Ta/Hf	0.23	0.25	0.24	0.27	0.22	0.23	0.21	0.3

Las relaciones entre álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) y sílice (SiO_2) evaluadas en el diagrama de discriminación litológico TAS (Middlemost, 1994) indican que el conjunto de muestras analizado corresponde a granitos ploteados en el límite con el campo cuarzolitas (Figura 10A); las proporciones entre K_2O y SiO_2 (Peccerillo y Taylor, 1976) del set de muestras analizadas son ploteadas en el campo de series calco-alcálicas (Figura 10B), esto concuerda con las proporciones Fe_2O_3 , MgO y SiO_2 (Miyashiro, 1974) que también indican carácter calco-alcálico (Figura 10C). Por otro lado, el diagrama de Frost y Frost (2008) que evalúa las proporciones molares de Al_2O_3 , K_2O y Na_2O indica carácter metalumínico y peralumínico saturado en sílice (Figura 10D).

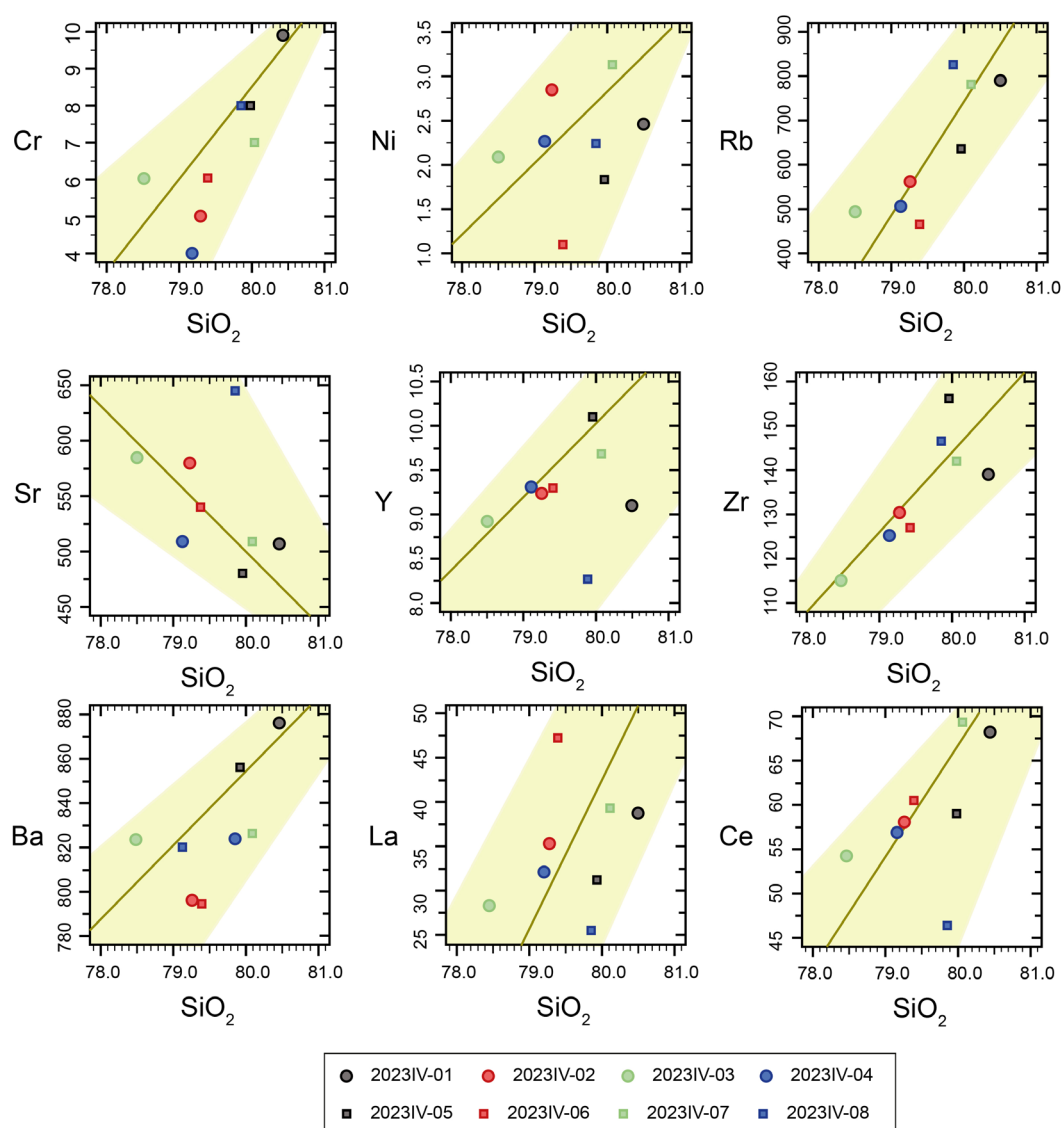


Figura 9. Diagrama tipo Harker, variación de Elementos traza y REE vs SiO_2 para el intrusivo Vicin.

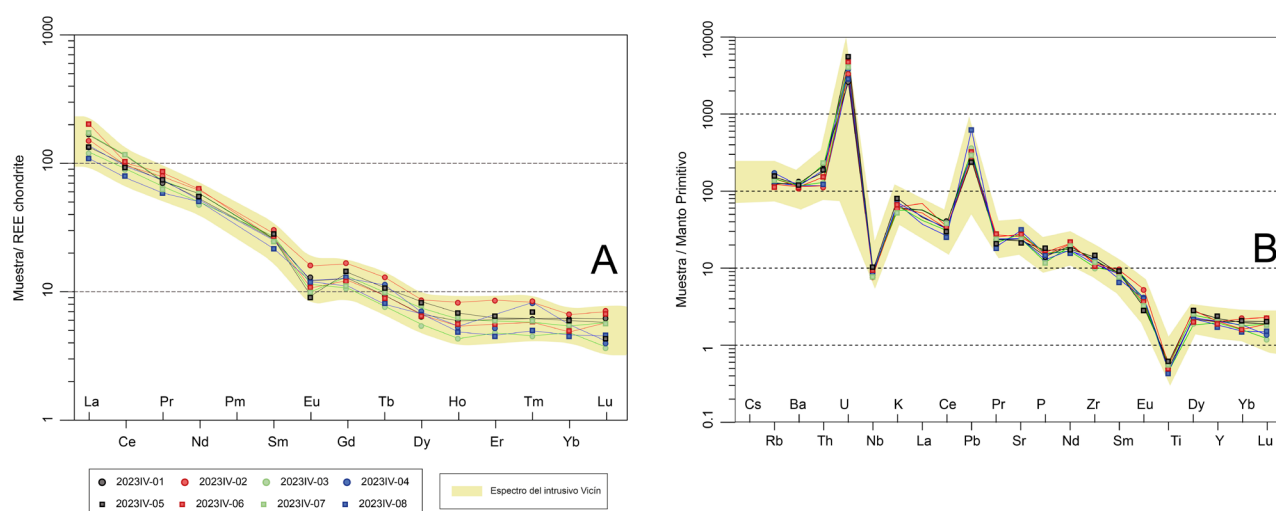


Figura 11. Diagramas de normalización de REE del intrusivo Vicin. A. Diagrama de normalización de REE a condrita (Anders y Grevesse, 1989). B. Diagrama de normalización de REE a manto primitivo (Sun y McDonough, 1989).

DISCUSIÓN

Relaciones de corte del intrusivo Vicin

Anteriores investigaciones documentaron una compleja historia geológica de ciclos magmáticos en la cuenca Alamor-Lancones y sus relaciones de corte con diferentes secuencias de rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias. Kenerley (1973) describió múltiples intrusiones dioríticas para el batolito de Tangula, el cual se emplaza en rocas volcanoclásticas del Cretácico Inferior. Además, indicó que estas intrusiones son cortadas por posteriores eventos intrusivos de composición granítica y gabroica del Terciario. Pilatásig *et al.* (2013) confirmaron estas observaciones, reportando el batolito de Tangula como una serie de cuerpos intrusivos de origen de arco continental compuestos principalmente por granitos y dioritas, que afectan rocas volcánicas andesíticas y basálticas de la Formación Celica. Asimismo, estudios en la antigua vía Macara a Zapotillo realizados por CODIGEM (1996) e INIGEMM (2016) identificaron múltiples intrusiones graníticas, que cortan rocas volcanoclásticas de la Formación Ciano. Por otro lado, Jaillard *et al.* (1999) discutieron la presencia de series de brechas volcánicas y grauvacas afectadas por cuerpos irregulares de granitoides no datados, sugiriendo una edad post-Cretácica para estas intrusiones basándose en las relaciones de corte observadas. En el sur del área de estudio, en la cuenca de Lancones, Winter *et al.* (2010) reportaron relaciones de corte entre dioritas y gabros del Cretácico Superior y granitos del Terciario, apoyando la hipótesis de eventos intrusivos múltiples y de distinta cronología para ciclos magmáticos.

En la sección Vicin Viejo, se observan claramente las relaciones de corte entre múltiples cuerpos intrusivos y la Formación Ciano. Específicamente, la cuarzomonzonita Potrerillos corta y se emplaza en la Formación Ciano,

mientras que el granito Vicin intruye tanto el intrusivo Potrerillos como la Formación Ciano. Estas relaciones indican una secuencia de edades relativa entre la roca de caja (Formación Ciano) y los cuerpos intrusivos (Potrerillos y Vicin). Estas intrusiones son influenciadas por sistemas estructurales de primer orden, dominados por estructuras de rumbo (movimiento dextral inverso en Figuras 3 y 6). La alineación de cuerpos intrusivos a sistemas de fallas sugiere que estas estructuras geológicas desempeñaron un papel crucial para facilitar la intrusión de diferentes cuerpos en la zona de estudio, posiblemente en periodos de extensión y compresión.

Implicaciones petrográficas del intrusivo Vicin

Esta investigación define al Intrusivo Vicin como un granito rico en cuarzo, su composición mineralógica incluye principalmente cuarzo, con proporciones menores de feldespato de potasio, plagioclasa (albita-ortoclasa), actinolita, moscovita y granate. Este intrusivo presenta textura fanerítica, inequigranular, holocristalina a hipocristalina, de grano medio. Las texturas *ribbon-quartz*, *chessboard-plagioclase* y *core-like texture* son comunes en cámaras magmáticas de alta temperatura y magmas de rápido enfriamiento (Faure, 2013). Durante el ascenso de magma los cristales pueden agruparse o formar crústers debido a procesos de colisión o a la disminución de la turbulencia en el flujo magmático (Jerram *et al.*, 2018). En este proceso, los cristales pueden mostrar texturas de interferencia, como bordes corroídos o reabsorbidos, que indican que han sido parcialmente disueltos y recrystalizados mientras eran transportados por flujos magmáticos con diferentes composiciones o temperaturas (Jerram y Higgins, 2007). La presencia de xenolitos de composición diorítica y gabroica indican altas tasas de contaminación cortical y asimilación magmática (Jerram y Kent, 2006).

Implicaciones geoquímicas del intrusivo Vicin

Las altas concentraciones de Th (10 ppm – 19 ppm) y las bajas concentraciones de Yb (0,75 ppm – 1,08 ppm) y Ta (1,6 ppm – 1,91 ppm), junto con las relaciones de Th/Yb (9,26 – 21,59), Ta/Yb (1,71-2,47), Th/Hf (1,23 – 2,84) y Ta/Hf (0,21 – 0,30), indican que el intrusivo Vicin se formó en una margen continental activa, con una tendencia hacia el desarrollo de magmatismo intraplaca (Schandl y Gorton, 2002). Las bajas concentraciones de Ta reportadas para el intrusivo Vicin son notablemente diferentes a las reportadas para el batolito Tangula y el intrusivo Potrerillos (Figura 12). Esta baja concentración de Ta en el magma puede explicarse por el fraccionamiento de rutilo en magmas de alta temperatura (Ballouard *et al.*, 2020). La extracción de Ta en fases minerales como el rutilo y la titanita, junto con la posible depleción del manto fuente, también contribuyen a la baja concentración de Ta en magmas diferenciados (Briqueu *et al.*, 1984).

Otro factor relevante es la inyección de magmas primitivos, que podría diluir la concentración de Ta en el magma evolucionado (Tang *et al.*, 2019).

El Th puede ser movilizado durante la fusión parcial del manto, y las altas concentraciones de Th en ambientes de subducción reflejan la contribución de materiales de la corteza superior en los procesos de subducción y diferenciación magmática (Zaraisky *et al.*, 2009). Las bajas concentraciones de Yb pueden asociarse con una cámara magmática somera y un alto grado de fusión parcial (Brown *et al.*, 1984). Las altas concentraciones de Zr (115 ppm – 156 ppm) y Hf (6,35 ppm – 8,22 ppm) indican fraccionamiento de circón y procesos de contaminación cortical (Zaraisky *et al.*, 2009).

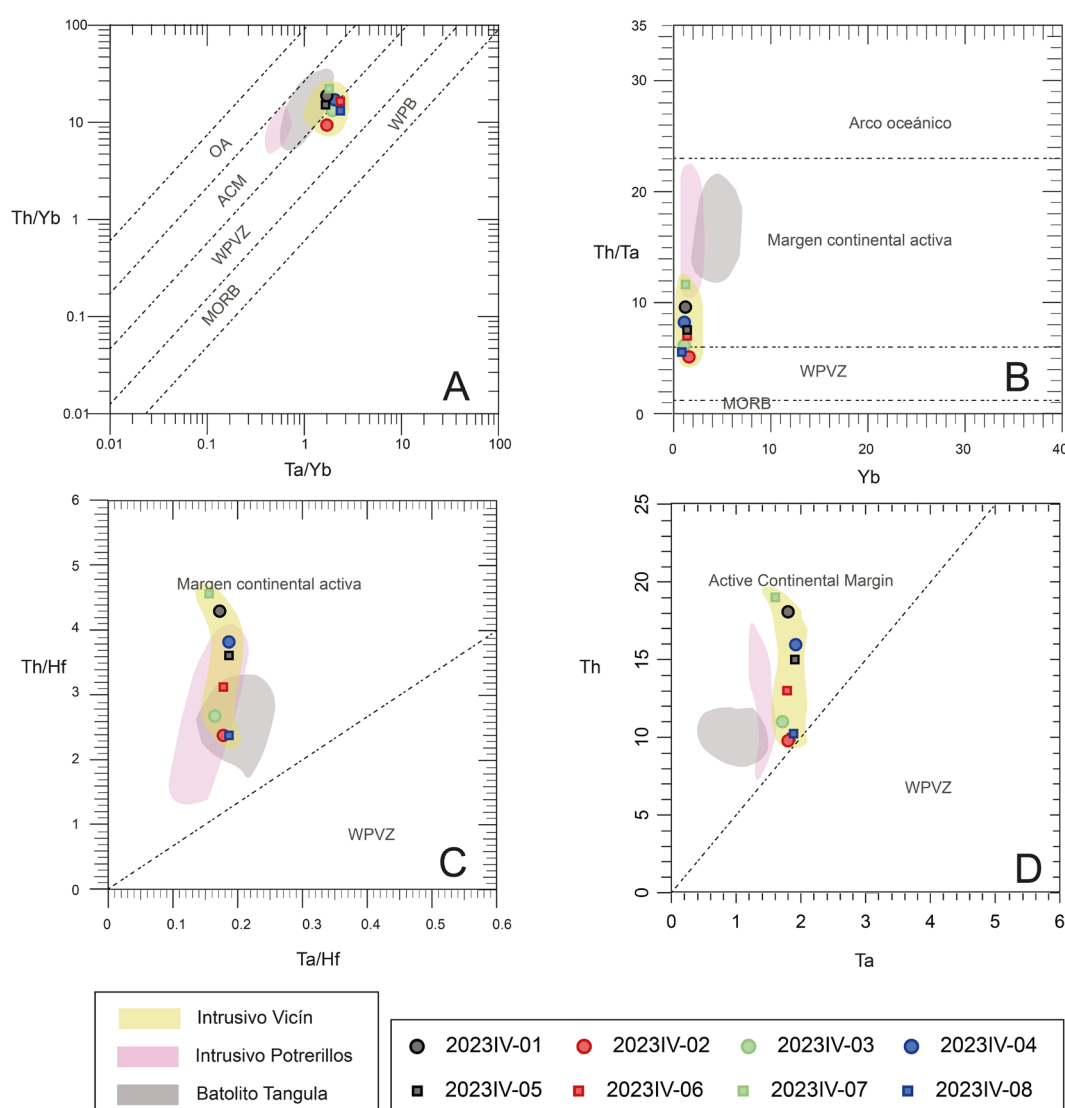


Figura 12. Diagramas de discriminación tectónica del Intrusivo de Vicin según Schandl y Gorton (2002). A. Diagrama binario Th/Yb vs. Ta/Yb; B. Diagrama binario Th/Ta vs. Yb; C. Th/Hf vs. Ta/Hf; D. Th vs. Ta

El sistema de Nb (5,8 ppm – 6,7 ppm), Y (8,3 ppm – 10,1 ppm) y Rb (78 ppm – 109 ppm) se plotó en los diagramas de Pearce *et al.* (1984) y Schandl y Gorton (2002), ubicando al intrusivo Vicin en el campo de granitoides de arco volcánico (Figuras 13A y 13B). Esto es coherente con las concentraciones de Hf y Ta (Harris *et al.*, 1986). En el sistema Hf, Ta y Rb, el enriquecimiento de Rb es una característica particular del intrusivo Vicin, en comparación con el intrusivo Potrerillos y el batolito Tangula (Figura 13C). Este enriquecimiento en Rb está vinculado a altas tasas de fraccionamiento en magmas potásicos, graníticos y pegmatíticos (Ślaby *et al.*, 2011), y también se asocia con altas tasas de hidratación del slab en procesos de subducción entre placas continentales de gran espesor, como se observa en magmas haplograníticos (Borchert *et al.*, 2010). El sistema Y, Nb y La (25,6 ppm – 47,5 ppm) vincula al intrusivo Vicin a magmas calco-alcalinos, típicos de un dominio orogénico compresivo (Figura 13D).

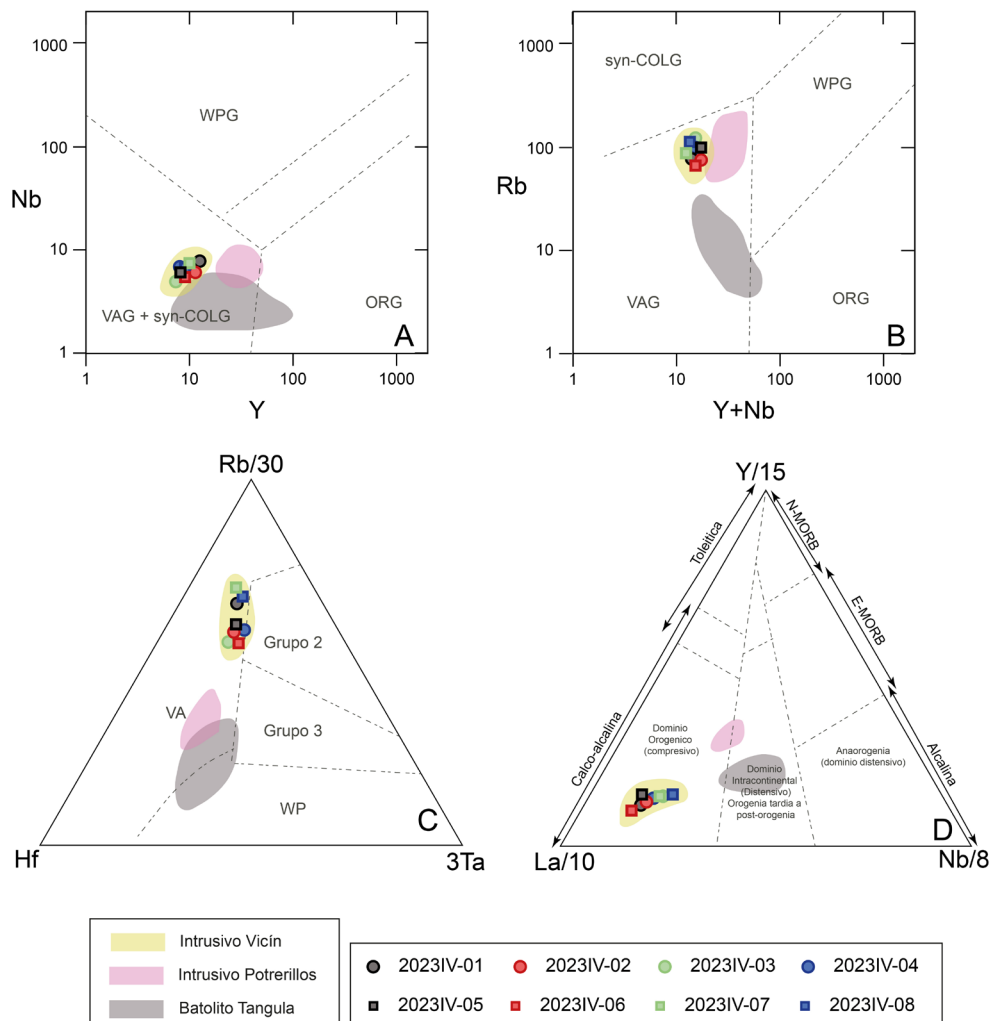


Figura 13. Discriminación tectónica del intrusivo Vicin. A. Diagrama binario Nb vs. Y (Pearce *et al.*, 1984); B. Diagrama binario Rb vs. Y + Nb (Schandl y Gorton, 2002); C. Diagrama ternario Rb-Hf-Ta (Harris *et al.*, 1986), Grupo 2: Syn-colG, Grupo 3: Post-colg; D. Diagrama terciario Y/15, La/10 y Nb/8 (Cabanis y Lecolle, 1989).

CONCLUSIONES

Al suroeste de Macará, la sección de Vicín Viejo permite el estudio de afloramientos de cuerpos intrusivos emplazados en secuencias de rocas volcánoclasticas de la Formación Ciano. Las relaciones de campo observadas indican que el intrusivo Vicín corta tanto a la Formación Ciano como al intrusivo Potrerillos, presentándose en forma de sills, lacolitos, diques y cúpulas. Estos cuerpos intrusivos están alineados con la falla inversa Cerro Viejo.

El intrusivo Vicín se define como un granitoide con un alto contenido de cuarzo. Su mineralogía incluye cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, actinolita, moscovita, granate, turmalina, circón, apatito y minerales opacos. La textura del intrusivo es fanerítica, inequigranular, holocristalina a hipocristalina, y de grano medio a grueso.

Los datos geoquímicos indican que el intrusivo Vicín corresponde a granitos de afinidad calco-alcalina, saturados en sílice, con carácter metalumínico y peralumínico. Los elementos trazas y tierras raras sugieren que estos magmas están vinculados a un ambiente de arco volcánico, característico de una margen continental activa y de un dominio orogénico compresivo

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación Geológica y Disponibilidad de Ocurrencias Minerales en el Territorio Ecuatoriano, realizado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético, adscrito al Ministerio de Energía y Minas del Ecuador. Agradecemos la colaboración directa de la Universidad Central del Ecuador, la Escuela Politécnica Nacional, la Universidad de Guayaquil, el Proyecto NR322 de la Universidad de São Paulo, y GEORESEARCH S.A. Este trabajo es producto del levantamiento de información geológica en las hojas geológicas de Macará, Alamor y Zapotillo, a escala 1:100.000, durante el periodo 2016-2023.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, L. 1992. Metamorphic pattern of the Cretaceous Celica Formation, SW Ecuador, and its geodynamic implications *Tectonophysics* 205(1-3): 223-237. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90428-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90428-9) (Accessed: 21-August 2024)
- Anders, E. and Grevesse, N. 1989. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53(1): 197-214. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X) (Accessed: 21-August 2024)
- Ballouard, C., Massuyeau, M., Elburg, M. A., Tappe, S., Viljoen, F. and Brandenburg, J. T. 2020. The magmatic and magmatic-hydrothermal evolution of felsic igneous rocks as seen through Nb-Ta geochemical

- fractionation, with implications for the origins of rare-metal mineralizations. *Earth-Science Reviews* 203: 103115. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103115> (Accessed: 21-August 2024)
- Bennison, G. M., Olver, P. A. and Moseley, K. A. 2011. *An introduction to geological structures and maps*. (8th. ed.). London: Routledge. Available at: <https://doi.org/10.4324/9780203783795> (Accessed: 20 August 2024).
- Borchert, M., Wilke, M., Schmidt, C. and Rickers, K. 2010. Rb and Sr partitioning between haplogranitic melts and aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(3):1057-1076. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.10.033> (Accessed: 20 August 2024).
- Briqueu, L., Bougault, H. and Joron, J. L. 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V anomalies in magmas associated with subduction zones: petrogenetic implications. *Earth and Planetary Science Letters* 68(2): 297-308. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90161-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90161-4) (Accessed: 20 August 2024).
- Brown, G. C., Thorpe, R. S. and Webb, P. C. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society* 141(3): 413-426. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.141.3.0413> (Accessed: 20 August 2024).
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. G. and Aboul-Enein, H. Y. 2015. X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 45(4): 289-299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616> (Accessed: 20 August 2024).
- Cabanis, B. and Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10–Y/15–Nb/8; un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale. The La/10–Y/15–Nb/8 diagram; a tool for distinguishing volcanic series and discovering crustal mixing and/or contamination. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie 2, Mecanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre* 309(20): 2023-2029. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570854176404988416> (Accessed: 20 August 2024).
- Carrasco, H. F. 2018. *Análisis litoestratigráfico y de procedencia de los depósitos sedimentarios cretácicos de la Cuenca Alamor-Lancones*. Tesis de Ingeniería Geológica. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Geología y Petróleos. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19568> (Accessed: 20 August 2024).
- Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero Metalúrgica – CODIGEM. 1996. *Mapa geológico de la Provincia de Loja, Escala 1:250.000*. Ministerio de Minas y Petróleo del Ecuador. Unpublished.
- Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. 2013. *The interpretation of igneous rocks*. Springer Science & Business Media. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1> (Accessed: 20 August 2024).
- Faure, G. 2013. *Origin of igneous rocks: the isotopic evidence*. Springer. Available at: <https://books.google.gm/books?id=VKfvCAAQBAJ&printsec=copyright> (Accessed: 17 January 2023).

- Frost, B. R. and Frost, C. D. 2008. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49(11): 1955-1969. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn054> (Accessed: 20 August 2024).
- Gutiérrez, E. G., Horton, B. K., Vallejo, C., Jackson, L. J. and George, S. W. 2019. Provenance and geochronological insights into Late Cretaceous-Cenozoic foreland basin development in the Subandean Zone and Oriente Basin of Ecuador. In: Horton, B. K. and Folguera, A. (eds.) *Andean Tectonics* 237-268. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00011-3> (Accessed: 20 August 2024).
- Harris, N. B., Pearce, J. A. and Tindle, A. G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geological Society, London, Special Publications* 19(1): 67-81. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.04> (Accessed: 20 August 2024).
- Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero, Metalúrgico – INI-GEMM. 2016. *Mapa geológico de Macará, escala 1:100.000*. Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables. Unpublished.
- Jaillard, E., Laubacher, G., Bengtson, P., Dhondt, A. V. and Bulot, L. G. 1999. Stratigraphy and evolution of the Cretaceous forearc Celica-Lancones basin of southwestern Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 12(1): 51-68. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00006-1) (Accessed: 20 August 2024).
- Janoušek, V., Moyen, J. F., Erban, V. and Hora, J. 2019. *GCD kit goes platform independent!* Goldschmidt 2019. Barcelona: European Association of Geochemistry, Geochemical Society.
- Jerram, D. A. and Higgins, M. D. 2007. 3D analysis of rock textures: quantifying igneous microstructures. *Elements* 3(4): 239-245. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.4.239> (Accessed: 20 August 2024).
- Jerram, D. A. and Kent, A. J. 2006. An overview of modern trends in petrography: Textural and microanalysis of igneous rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 154(1-2): vii-ix. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.09.026> (Accessed: 20 August 2024).
- Jerram, D. A., Dobson, K. J., Morgan, D. J. and Pankhurst, M. J. 2018. The petrogenesis of magmatic systems: Using igneous textures to understand magmatic processes. In: *Volcanic and igneous plumbing systems* 191-229. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809749-6.00008-X> (Accessed: 20 August 2024).
- Kennerley, J.B. 1973. Geology of the Loja Province, Southern Ecuador. *London Institute of Geological Sciences Report* 23, 34 p.
- Kumar, V., Kumar, S., Kumar, N. and Bangroo, P. N. 2013. Separation and pre-concentration of rare earth elements in geological materials using used green tea leaves and their determination by ICP-OES. *Journal of the Indian Chemical Society* 90(11): 2147-2151.
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., Dudek, A., Efremova, S., Keller, J., Lameyre, J., Sabine, P. A., Schmid R., Sorensen, H. and Woolley, A. R. 2002.

- Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581.001> (Accessed: 20 August 2024).
- Lebrat, M. 1985. *Caracterisation géochimique du volcanisme anté-orogénique de l'Occident équatorien: implications géodynamiques*. Doctoral Thesis. Université des sciences et Techniques du Languedoc, France. <https://theses.hal.science/tel-00833369/> (Accessed: 20 August 2024).
- Litherland, M., Aspden, J.A. and Jemielita, R.A. 1994. The metamorphic belts of Ecuador. *Overseas Geology and Mineral Resources*, 11, 2 map enclosures at 1:500.000 scale. British Geological Survey, Nottingham.
- Middlemost, E. A. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews* 37(3-4): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9) (Accessed: 20 August 2024).
- Miyashiro, A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science* 274(4): 321-355. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1574231873970603392> (Accessed: 20 August 2024).
- O'Connor, J. T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Paper B 525*: 79-84.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. and Tindle, A. G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology* 25(4): 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58(1): 63-81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745> (Accessed: 20 August 2024).
- Pilatasig, L., Ibadango, E. y Torres, C. 2013. *Síntesis litoestratigráfica, estructural, geoquímica y evolución de Cuenca Alamor-Punta de Piedra, sector Zaruma-Cariamanga*. INIGEMM-SENESCYT, Quito, Ecuador.
- Pinto, F. G., Junior, R. E. and Saint'Pierre, T. D. 2012. Sample preparation for determination of rare earth elements in geological samples by ICP-MS: a critical review. *Analytical Letters* 45(12): 1537-1556. <https://doi.org/10.1080/00032719.2012.677778> (Accessed: 20 August 2024).
- Qi, L., Hu, J. and Gregoire, D.C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta* 51: 507-513. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00318-5](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00318-5) (Accessed: 20 August 2024).
- Riel, N., Martelat, J. E., Guillot, S., Jaillard, E., Monie, P., Yuquilema, J., Duclaux, J. and Mercier, J. 2014. Fore arc tectonothermal evolution of the El Oro metamorphic province (Ecuador) during the Mesozoic. *Tectonics* 33(10): 1989-2012. <https://doi.org/10.1002/2014TC003618> (Accessed: 20 August 2024).
- Romero Cóndor, C. W., Castillo Jara, M. D. C., Oñate Acurio, L. L., Carranco Andino, F. R., Vélez Suquilanda, T. S., Torres Cartuche, J. G.,

- Gómez Estevez, D. M., Freire Cabrera, H. G., Escobar Duche, V. L., Gramal Aguiar, A. B., Condoy Guairacocha, D. P., Pulupa Vela, A. R. and Barona Diaz, D. 2023. El origen del intrusivo Potrerillos (Macará, Ecuador). *Acta Geológica Lilloana* 34(1): 1-26. Available at: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2023.34.1/2023-02-24> (Accessed: 20 August 2024).
- Schandl, E. S. and Gorton, M. P. 2002. Application of high field strength elements to discriminate tectonic settings in VMS environments. *Economic Geology* 97(3): 629-642. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.629> (Accessed: 20 August 2024).
- Schutte, P. 2009. *Geochronology, geochemistry, and isotopic composition (Sr, Nd, Pb) of Tertiary porphyry systems in Ecuador*. Doctoral Thesis. University of Geneva, Switzerland. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:636710.13097/archive-ouverte/unige:6367> (Accessed: 20 August 2024).
- Słaby, E., Śmigielski, M., Śmigielski, T., Domonik, A., Simon, K. and Kronz, A. 2011. Chaotic three-dimensional distribution of Ba, Rb, and Sr in feldspar megacrysts grown in an open magmatic system. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 162: 909-927. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0631-6> (Accessed: 20 August 2024).
- Spikings, R., Paul, A., Vallejo, C. and Reyes, P. 2021. Constraints on the ages of the crystalline basement and Palaeozoic cover exposed in the Cordillera Real, Ecuador: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analyses and detrital zircon U/Pb geochronology. *Gondwana Research* 90: 77-101. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.10.009> (Accessed: 20 August 2024).
- Stanley, C. (2017). Lithogeochemical classification of igneous rocks using Streckisen ternary diagrams. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 17(2), 63-91. <https://doi.org/10.1144/geochem2016-463>
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications* 42(1): 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19> (Accessed: 20 August 2024).
- Tang, M., Lee, C. T. A., Chen, K., Erdman, M., Costin, G. and Jiang, H. 2019. Nb/Ta systematics in arc magma differentiation and the role of arclogites in continent formation. *Nature Communications* 10(1): 235. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08198-3> (Accessed: 20 August 2024).
- Ulrich, T. D. 2005. *Summary Report on Ar/Ar Dating for MAP: GAC*. Activity PE – 05 Peru. Laboratory Pacific Centre for Isotopic and Geochemical Research Earth & Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Valarezo, M. E., Vallejo, C., Horton, B. K., Gaibor, J., Esteban, J., Jackson, L. J., Carrasco, H. and Beate, B. 2019. Sedimentological and provenance analysis of the Río Playas stratigraphic section: Implications for the evolution of the Alamor-Lancones Basin of southern Ecuador and northern Peru. *Journal of South American Earth Sciences* 94: 102239 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102239> (Accessed: 20 August 2024).

- Vallejo, C., Spikings, R. A., Horton, B. K., Luzieux, L., Romero, C., Winkler, W. and Thomsen, T. B. 2019. Late Cretaceous to Miocene stratigraphy and provenance of the coastal forearc and Western Cordillera of Ecuador: Evidence for accretion of a single oceanic plateau fragment. In: Horton, B. K. and Folguera, A. (eds.) *Andean Tectonics* 209-236. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816009-1.00010-1> (Accessed: 20 August 2024).
- Winkler, W., Villagómez, D., Spikings, R., Abegglen, P. and Egüez, A. 2005. The Chota basin and its significance for the inception and tectonic setting of the inter-Andean depression in Ecuador. *Journal of South American Earth Sciences* 19(1): 5-19. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.006> (Accessed: 20 August 2024).
- Winter, L. S. 2008. *The genesis of "giant" copper-zinc-gold-silver volcanogenic massive sulphide deposits at Tambogrande, Peru: Age, tectonic setting, paleomorphology, lithogeochemistry and radiogenic isotopes*. Doctoral Thesis. University of British Columbia, Vancouver, Canada. <http://hdl.handle.net/2429/773> (Accessed: 20 August 2024).
- Winter, L. S., Tosdal, R. M., Mortensen, J. K. and Franklin, J. M. 2010. Volcanic stratigraphy and geochronology of the Cretaceous Lancones basin, northwestern Peru: Position and timing of giant VMS deposits. *Economic Geology* 105(4): 713-742. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.4.713> (Accessed: 20 August 2024).
- Zaraisky, G. P., Aksyuk, A. M., Devyatova, V. N., Udoratina, O. V. and Chevychelov, V. Y. 2009. The Zr/Hf ratio as a fractionation indicator of rare-metal granites. *Petrology* 17: 25-45. <https://doi.org/10.1134/S0869591109010020> (Accessed: 20 August 2024).