

Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia

Tectonics aspects in the genesis of the La Quinta Formation and its relationship with the copper mineral deposits in the Perija Mountain Range, Colombia

Deyvid Tamara Roncancio ¹, Elías Rojas Martínez ², Luis Quintero López ³, Frank Lascarro Navarro ⁴ y Dino Carmelo Manco Jaraba ⁵

Fecha de Recepción: 3 de mayo de 2023

Fecha de Aceptación: 4 de octubre de 2024

Cómo citar: D. Tamara, E. Rojas, L. Quintero, F. Lascarro, D. Manco. Aspectos tectónicos en la génesis de la Formación La Quinta y su relación con los depósitos minerales de cobre en la serranía del Perijá, Colombia. *Tecnura*, 28(79), 123-139. <https://doi.org/10.14483/22487638.20824>

Resumen

Objetivo: Esta investigación tiene como objetivo determinar la relación genética y tectónica de la Formación La Quinta y las mineralizaciones de cobre que hospeda.

Metodología: Se efectuó un muestreo aleatorio simple probabilístico al segmento volcánico de la Formación La Quinta, del que se seleccionaron 14 especímenes que fueron analizados por la técnica geoquímica ICP-MS.

Resultados: Se evidenció que las rocas de la Formación La Quinta presentan una afinidad calcoalcalina, que varían de metaluminosas a peraluminosas, con enriquecimiento de elementos de tierras raras, característicos de ambiente genético de arco continental.

Conclusiones: Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta contienen tendencias negativas de hierro-titanio y positiva de sodio-potasio al incrementar el SiO₂, lo que sugiere que provienen de un mismo pulso magmático con cristalización fraccionada. Las anomalías negativas de niobio, itrio, titanio, rubidio, lantano, torio y estroncio, indican procesos de fusión parcial de magmas en márgenes convergentes.

Palabras clave: cobre, Formación La Quinta, geoquímica ICP-MS, Serranía del Perijá, volcanismo.

¹Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: 1999deyvid@gmail.com

²Geólogo, M. C. en Geología Económica. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: eliaser@hotmail.com

³Ingeniero agroindustrial, M. C. en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: lquintero34@areandina.edu.co

⁴Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Email: frank.lascarro@unmsm.edu.pe

⁵Ingeniero de minas, M. C. en Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones. Docente ocasional, Universidad de La Guajira. Riohacha, Colombia. . Email: dcmancoj@uniguajira.edu.co

Abstract

Objective: The objective of this research is to determine the genetic and tectonic relationship of the La Quinta Formation and the copper mineralization it hosts.

Methodology: A simple random probabilistic sampling was carried out in the volcanic segment of the La Quinta Formation, selecting 14 specimens that were analyzed by ICP-MS geochemical technique.

Results: It was evidenced that the rocks of the La Quinta Formation present a calcoalkaline affinity, varying from metalluminous to peraluminous, with enrichment of rare earth elements, characteristic of continental arc genetic environment.

Conclusions: The volcanic rocks of the La Quinta Formation contain negative iron-titanium trends, and positive sodium-potassium trends with increasing SiO₂, suggesting that they come from the same magmatic pulse with fractional crystallization, the negative anomalies of niobium, yttrium, titanium, rubidium, lanthanum, thorium and strontium, indicate partial melting processes of magmas in convergent margins.

Keywords: Copper, Geochemistry ICP-MS, La Quinta Formation, Perija Mountain Range, Vulcanism.

Introducción

La Formación La Quinta aflora en el margen occidental y oriental de la Serranía del Perijá, suprayace la Formación Manaure e infrayace la Formación Río Negro y el Grupo Cogollo (Buchely *et al.*, 2010). Se correlaciona estratigráficamente con la Formación Girón en el macizo de Santander, y con la Formación La Quinta en los Andes de Mérida y en la cuenca de Maracaibo (Buchely *et al.*, 2010); por tanto, su edad corresponde al Triásico Tardío y Jurásico medio. Su ambiente de deposición es continental, asociado a la generación de sistemas de grabens al oeste de Gondwana, durante el rompimiento de Pangea (Gallagher y Tauvers, 1992).

La Formación La Quinta se subdivide en dos grandes segmentos: el A, constituido por intercalaciones de rocas volcánicas, piroclásticas y conglomerados, además en algunos sectores, con intrusiones de rocas hipoabisales. Mientras que el tope (segmento B) corresponde a rocas clásticas finas de tonalidades pardas, con intercalaciones esporádicas de tobas volcánicas ácidas (Buchely *et al.*, 2010).

Sus rocas volcánicas se caracterizan por el color violeta de riolitas, riodacita, dacitas y, en menor proporción, basaltos con texturas traquíticas, porfiríticas y ocasionalmente amigdaloides, los fenocristales más recurrentes son fragmentos de olivino y clinopiroxenos. Las riolitas y dacitas presentan texturas generalmente microporfirítica, porfirítica y en serie; los fenocristales son de cuarzo y en menor medida de plagioclasa. Las rocas piroclásticas corresponden a tobas de color pardo, compuestas por fragmentos líticos y vidrio volcánico; los fenocristales presentes son de cuarzo, sanidina, hornblenda y biotita (Rodríguez García y Obando, 2020).

En inmediaciones de la serranía del Perijá, tanto en el lado colombiano como en el venezolano (Rivera, 1994), se han identificado mineralizaciones de cobre restringidas únicamente a la Formación La Quinta. En el lado colombiano se han realizado estudios petrográficos a las

mineralizaciones de cobre ubicadas desde El Molino (La Guajira) hasta Codazzi (Cesar), las mineralizaciones han sido descritas por [Champetier de Ribes et al. \(1963\)](#) como de tipo impregnación, en las que se registran cobre nativo, sulfuros de cobre, carbonatos de cobre y óxidos de cobre, restringidos estrictamente al miembro sedimentario y algunos cuerpos volcánicos de la Formación La Quinta. Además, los mismos autores han definido como las zonas con mayor exposición de manifestaciones cupríferas a las localidades de San José-Quitafrió, El Seno, Zeppelin y El Ovejo (figura 1).

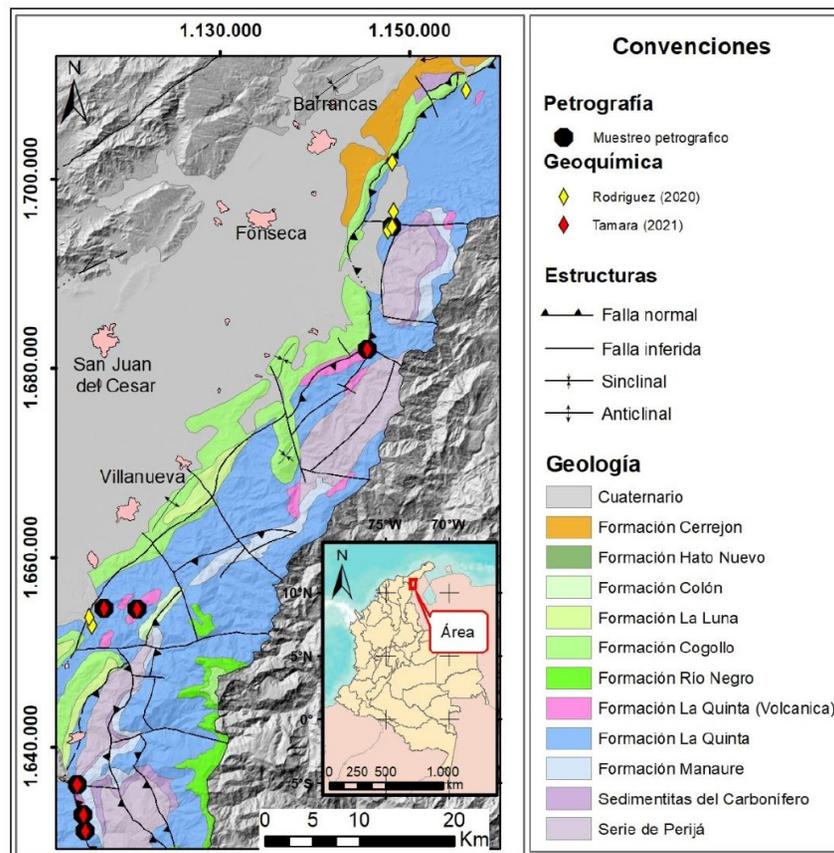


Figura 1. Localización del área de estudio

Metodología

Se realizó un seguimiento litoestratigráfico al segmento volcánico de la Formación La Quinta, del que se seleccionaron 14 muestras, 6 derivadas de la fase de campo y 8 correspondientes a la investigación de [Rodríguez García y Obando \(2020\)](#), expuestas en la superficie con un bajo a moderado grado de meteorización, con alteración y alejadas de zonas mineralizadas, siguiendo la metodología de [Jackson y Knaebel \(1934\)](#). Las muestras fueron sometidas a ensayos geoquí-

Tabla 1. Muestras recolectadas y su clasificación. Sistema de coordenadas Magna Colombia Bogotá

ID-Muestra	Coordenadas	
	Norte	Este
DMT-001	1654616	1117738
DMT-002	1654531	1121294
DMT-003	1635974	1114921
DMT-004	1632720	1115596
DMT-005	1631042	1115791
GR-6820	1682027	1145643
GR-6821	1681005	1144105
GOE-1045a	1701812	1148285
GOE-1045B	1701812	1148285
GR-6849	1694625	1147831
GR-6851	1709417	1156113
GR-6854	1652853	1116457
GOE-1048	1696644	1148433
GOE-1058	1653658	1116236

micos de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), realizados en el laboratorio Actlabs en Vancouver (Canadá), con el equipo Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 o 9000 ICP/MS, ajustado mediante 10 calibradores sintéticos estándares antes y después de cada paquete de muestras.

Las muestras se ubican en dos sectores: el primero corresponde a la zona superior de la serranía del Perijá, específicamente desde la zona rural del municipio de Villanueva, hasta la zona rural del municipio de Barrancas, en La Guajira. El segundo corresponde a la zona inferior de la serranía del Perijá, que comprende el área desde la zona rural del municipio de Villanueva, departamento de La Guajira, hasta el corregimiento de San José de Oriente, municipio de La Paz en el departamento del Cesar. La recolección se efectuó mediante un muestreo probabilístico aleatorio simple ([Sampieri Hernández et al., 2014](#)).

Resultados

Series magmáticas

La serie magmática a la que pertenecen las rocas volcánicas de la Formación La Quinta, según el diagrama AFM de [Irvine y Baragar \(1971\)](#), corresponde a calcoalcalina, con un enriquecimiento progresivo de álcalis y sin enriquecimiento de Fe y Ti, posiblemente por la temprana

generación de óxidos de Fe y Ti (figura 2a). Así mismo, en el diagrama de Ewart (1982) se grafican las muestras en los campos calcoalcalino y calcoalcalino de alto K (figura 2b), que registran un incremento de K_2O gradual al aumento de SiO_2 . Además, se aplica el diagrama de [Hastie et al. \(2007\)](#), donde la cantidad de Th al comportarse como un elemento inmóvil, indica altos contenidos de álcalis en las rocas, característica de serie calcoalcalina; sin embargo, los ejemplares GR-6820 y GR-6821 registran un contenido de Th mayor, lo cual indica una serie calcoalcalina rica en K o serie shoshonítica. Por su parte, el Co al tener afinidad a magmas básicos y una alta compatibilidad en olivinos y óxidos de Fe-Ti durante la cristalización fraccionada, refleja un empobrecimiento gradual, a medida que las rocas se van acidificando (figura 2c).

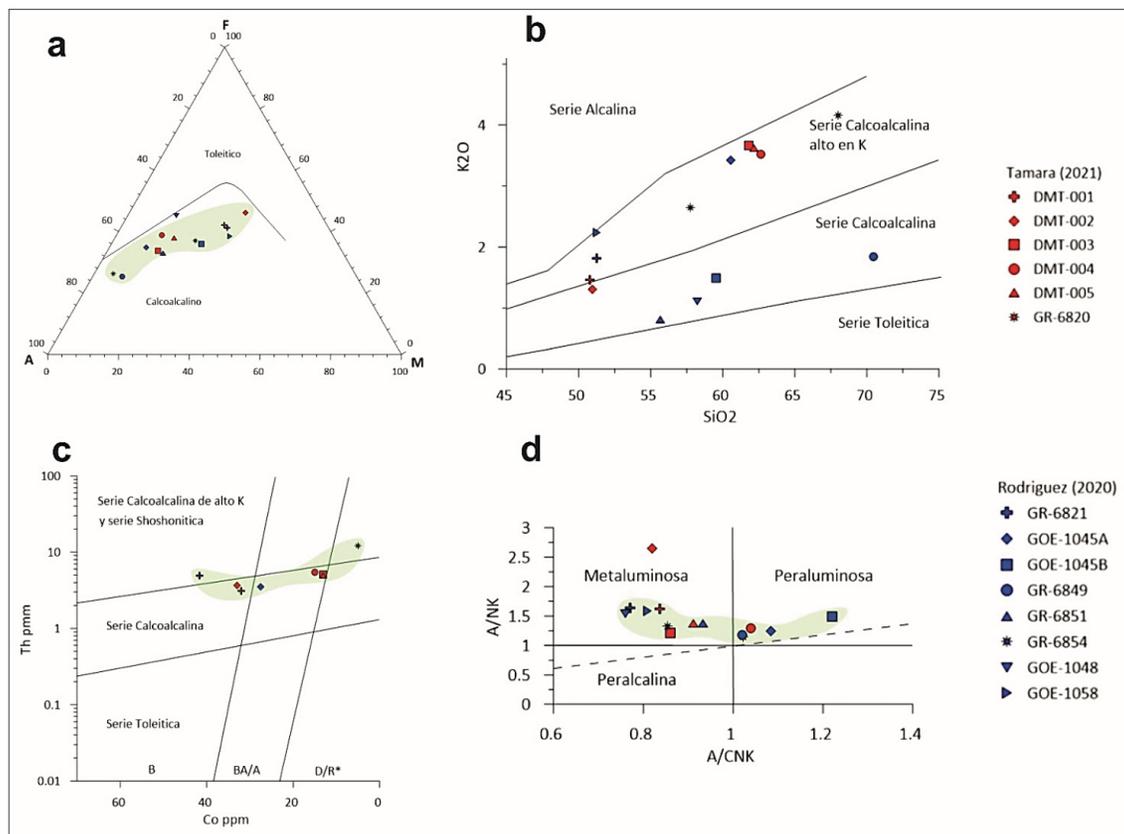


Figura 2. Diagramas de series magmáticas y alúmina

Nota: a) Diagrama de discriminación de series toleítica y calcoalcalina ([Irvine y Baragar, 1971](#)). b) Diagrama de discriminación geoquímica. c) Diagrama de discriminación Th-Co; B: basalto; BA/A: andesita basáltica y andesita; D/R*: dacita y riolita (*indica que las latitas y las traquitas también caen en este campo) ([Hastie et al., 2007](#)). d) Diagrama de clasificación Shand. Tomada de [Shand \(1927\)](#) y [Ewart \(1982\)](#).

Saturación de alúmina

El 64 % de las muestras son clasificadas como metaluminosas, cuyo contenido de Al_2O_3 es mayor a $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, pero menor a $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, de manera que, normalmente, predominan plagioclasas con un alto contenido cálcico, así como la notable presencia de hornblenda y biotita. A su vez, el 36 % de las muestras se clasifican como peraluminosas, cuyo contenido de Al_2O_3 es mayor a $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, generando corindón como mineral accesorio, además de micas y almandino (Shand, 1927) (figura 2d).

Diagramas de discriminación tectónica

Los datos geoquímicos sugieren una configuración tectónica de arcos volcánicos, debido a que las rocas de afinidad calcoalcalina se caracterizan por sus anomalías negativas de Nb, Y, Ti, y alto contenido de alúmina. En la figura 3a se observa un empobrecimiento en Nb e Y, exponiendo un declive continuo de Nb e Y, conforme las rocas se acidifican; estas anomalías negativas son características de arcos volcánicos y ambientes sincolicionales (Pearce y Cann, 1973).

Por otro lado, el diagrama Rb vs. Nb+Y de Pearce (1982) sugiere que el ambiente genético es de un arco volcánico (figura 3b), tomando como criterios principales la anomalía negativa general de Y+Nb y la presencia de altos contenidos de Rb, que es un elemento característico de zonas de subducción, debido a la contaminación cortical de los magmas procedentes de la fusión parcial de la corteza oceánica. Cabe resaltar que el Rb tiene un incremento conforme las rocas se acidifican, siendo las rocas pertenecientes a las serie calcoalcalina de alto K las que mayor contenido de Rb registran. Además, se confirma la configuración tectónica por medio del diagrama $(\text{La}/\text{Yb})_n$ vs. Sr/Y (figura 3c), y el diagrama Th/Yb vs. Nb/Yb (figura 3d) de Pearce y Peate (1995).

Diagramas de elementos tierras raras (REE) normalizadas

El diagrama de REE indica un enriquecimiento en elementos de las tierras raras livianas (LREE) y un empobrecimiento continuo en elementos de las tierras raras pesadas (HREE); además, algunos ejemplares presentan anomalías negativas de Nd características de magmas derivados de zonas de subducción. De igual manera, se observa un predominante enriquecimiento de La y empobrecimiento en Nb, conforme las rocas se acidifican (Sun y McDonough, 1989) (figura 4a).

El diagrama de los HFSE, REE y metales de transición evidencian en la totalidad de ejemplares volcánicos de la Formación La Quinta, anomalías negativas de Ta, Nb, Sr, V, Sc y Ti, mientras que muestran anomalías positivas de La y Nd (a excepción de GOE-1058). McDonough y Sun

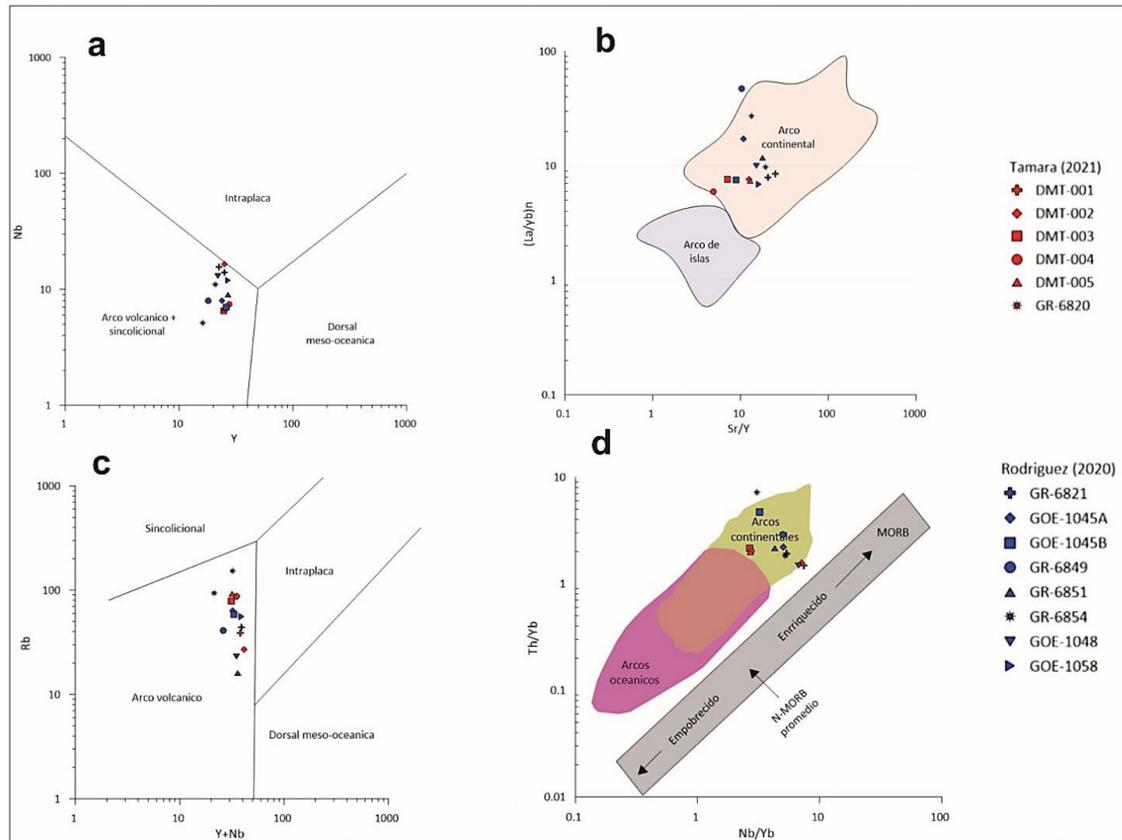


Figura 3. Diagramas de discriminación tectónica

Nota: a) y b) Diagrama de discriminación tectónica. c) Diagrama de configuraciones tectónicas (La/Yb)_n vs. Sr/Y (Condie y Kröner, 2013). d) Diagrama de la forma Th/Yb vs. Nb/Yb. Tomadas de Pearce *et al.* (1984), y Pearce y Peate (1995).

(1995) sugieren que la subducción de la corteza oceánica y su fusión puede producir anomalías negativas en los HFSE, en elementos como Ti, Nb y Ta en los magmas que se generan en los arcos volcánicos (figura 4b). Por su parte, Condie y Kröner (2013) señalan que las rocas volcánicas originadas en arcos continentales y en arcos oceánicos difieren por el enriquecimiento de los elementos de tierras raras ligeras en los arcos continentales, que se comportan en afinidades calcoalcalinas como elementos incompatibles.

En la figura 4b se observa que los elementos del La(n), Ce(n) y Sm(n) tienen concentraciones de entre 10 ppm y 100 ppm. Además, las rocas derivadas de arcos continentales se caracterizan por las anomalías negativas de Nb, Ta y Sr (figura 4b); así mismo, presentan un enriquecimiento positivo en la serie de elementos incompatibles desde Hf hasta Nb (figura 4b), características que sugieren que el ambiente de formación para las rocas volcánicas de la Formación La Quinta es un arco continental.

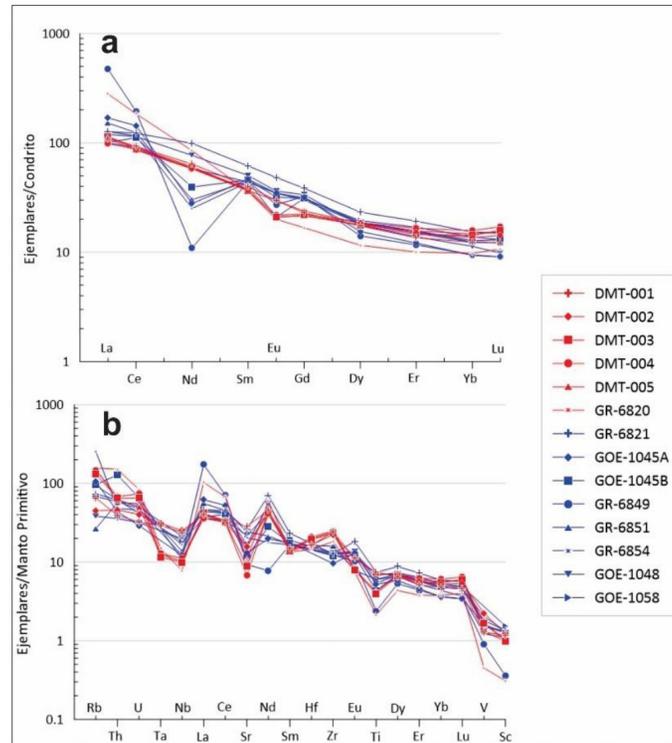


Figura 4. Diagramas tierras raras (REE) normalizadas

Nota: a) Diagrama de REE normalizado a condrito. b) Diagrama de REE normalizado a manto primitivo. Tomada de [McDonough y Sun \(1995\)](#) y [Sun y McDonough \(1989\)](#).

Modelo geotectónico

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta iniciaron su actividad volcánica en el Sine-muriense, durante el Jurásico inferior (196 Ma), finalizando en el Calloviense, Jurásico medio ([González Iregui et al., 2015](#); [Rodríguez García y Obando, 2020](#)) (164 Ma), por lo que la actividad volcánica es contemporánea con los cinturones ígneos jurásicos generados en Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, como consecuencia de procesos de subducción de la placa Farallón ([Bayona et al., 2020](#)). En este sentido, todos los análisis geoquímicos realizados a las rocas ígneas de la Formación La Quinta presentados por [Rodríguez García y Obando \(2020\)](#) y esta investigación concluyen que el magmatismo generado es derivado de un arco continental. Sin embargo, la intercalación entre rocas volcánicas, piroclásticas y potentes litologías sedimentarias compuestas por clastos volcánicos procedentes de la misma formación, que decrece y cesa hacia el techo de La Quinta, indica procesos erosionales de consideración en la zona norte del bloque suramericano. Estos miembros de la Formación La Quinta suprayacen las rocas meta-sedimentarias de La Virgen, lo cual indica un ambiente de formación relativamente tranquilo

de llanuras intermareales, en cuencas limitadas por fallas normales, en las que predomina la configuración distensiva del protocaribe. Además, [Spikings *et al.* \(2015\)](#) consideran que la generación de cuencas intracontinentales son producto del retroceso de la zona de subducción y la apertura del protocaribe.

En este sentido, se plantea un modelo hipotético de subducción para la generación de magmas en la Serranía del Perijá durante el Jurásico, y su respectivo emplazamiento de las rocas volcánicas de la Formación La Quinta. En la figura 5a se observa el inicio del magmatismo en el Jurásico inferior, que es generado por la convergencia ortogonal de la placa Farallón. Como derivación de este proceso se extiende la cuenca retroarco y permite la depositación y cristalización de las rocas volcánicas y piroclásticas en la Formación La Quinta, intercaladas con estratos sedimentarios. En la figura 5b se ilustra la disminución del magmatismo hasta el punto de generar pequeñas cantidades de material piroclástico durante el Jurásico medio al superior, evidenciado por las finas intercalaciones de piroclásticos con potentes estratos sedimentarios en la parte superior de la Formación La Quinta; adicionalmente, las altas tasas de erosión facilitan el aporte de fragmentos volcánicos derivados del arco en las cuencas sedimentarias con una tasa de colmatación continua, lo que indica una pasividad tectónica durante este periodo en la Formación La Quinta.

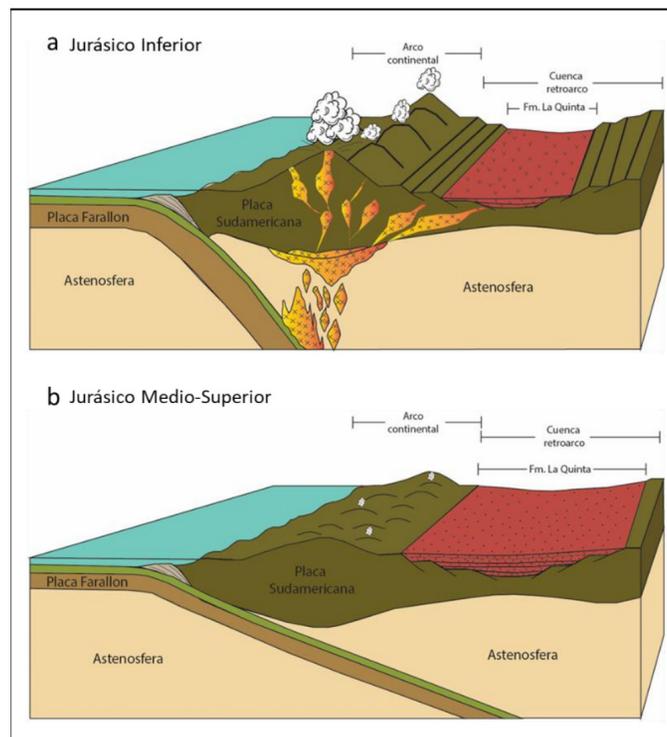


Figura 5. Esquema geotectónico de la Formación La Quinta

Fertilidad de magmas

La fertilidad de magmas en rocas volcánicas de arcos continentales y su relación con depósitos minerales se ha asociado con firmas geoquímicas adakíticas, que son producto de la hibridación de fusión parcial de basaltos metamorfoseados en la litosfera durante la subducción de la corteza oceánica relativamente joven (≤ 25 Ma), con la cuña mantélica peridotítica durante el ascenso del magma a superficie (Richards y Kerrich, 2007).

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta se caracterizan por tener en promedio un 58 wt % de SiO_2 , 15 wt % de Al_2O_3 ; 3,7 wt % de MgO , 328 ppm de Sr, 23 ppm de Y; 2,1 ppm de Yb; las rocas más básicas cuentan en promedio con 140 ppm de Ni, mientras que en las rocas intermedias y félsicas el promedio de Ni es de 30 ppm. Caso similar sucede para el Cr, donde las rocas básicas tienen un promedio de 185 ppm, mientras que para las rocas intermedias a ácidas cuentan con un promedio de 52 ppm, por su parte, los ratios de Sr/Y y La/Yb en promedio son de 14 y 19 respectivamente. Dadas las características anteriores, las rocas volcánicas de la Formación La Quinta no cumplen con todos los criterios geoquímicos de las firmas adakíticas; sin embargo, sus propiedades geoquímicas se relacionan con el cinturón magmático del Triásico tardío-Jurásico en Colombia (Richards y Kerrich, 2007), por tanto, presentan características geoquímicas que sugieren procesos notables de cristalización fraccionada.

En la figura 6a, se observa un empobrecimiento del ratio Sr/Y a medida que incrementa el Y, lo que sugiere fusión parcial de las peridotitas en la cuña mantélica y asimilación de agregados sedimentarios en la fuente magmática con ausencia notable de fusión parcial de la corteza oceánica y su transición a eclogitas en la zona de subducción. En consecuencia, se presenta una cristalización de plagioclasa temprana, enriqueciendo en "Y" los magmas intermedios y ácidos; por tanto, la plagioclasa cristalizada junto con hornblenda y piroxenos generan bajos ratios de Sr/Y (Defant y Drummond, 1990). En la figura 6b se ilustra un proceso de cristalización fraccionada típica de los arcos continentales normales, con un descenso continuo del ratio Sr/Y a medida que se acidifica la roca; así mismo, se observa que el Y permanece constante en rocas básicas a intermedias y presentan un fuerte empobrecimiento en rocas ácidas con valores menores a 18 ppm (figura 6c).

La relación entre La y Yb (figuras 6d-6f) registra generalmente dos tendencias: en el diagrama La/Yb vs. Yb (figura 6d), la mayoría de los datos presentan empobrecimiento continuo de Yb, a medida que incrementa el ratio de La/Yb; sin embargo, tres ejemplares (GOE-1045A, GR-6829 y GR-6849) registran un enriquecimiento considerablemente pronunciado del ratio La/Yb superior a las demás muestras. Estos tres ejemplares se caracterizan por ser rocas de composiciones químicas extremadamente evolucionadas, debido a su alto contenido de SiO_2 (figuras 6e, 6f), a pesar de tener ratios de La/Yb altos, no presentan los ratios Sr/Y requeridos para ser definidas como adakitas. Richards y Kerrich (2007) sugieren que las rocas con estas características indican procesos de contaminación cortical, lo que facilita la cristalización de pi-

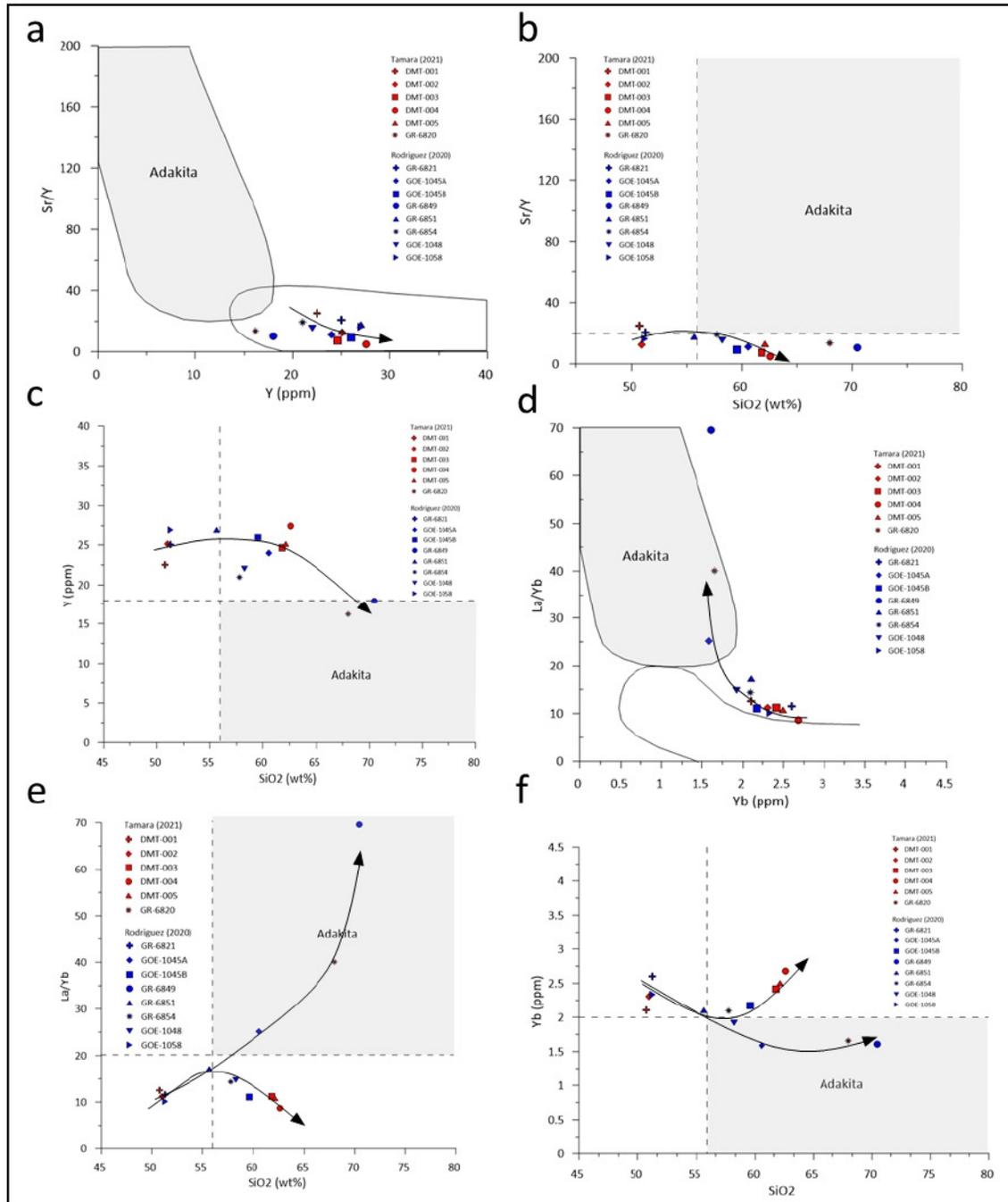


Figura 6. Diagramas de fertilidad magmática

Nota: a) Diagrama Sr/Y vs. Y. b) y c) Diagrama de variación de Sr/Y y Y respecto a SiO₂. d) Diagramas La/Yb vs. Yb. d-e) Diagramas de variación de La/Yb y Yb respecto a SiO₂. Tomada de Richards y Kerrich (2007), y modificado de Defant y Drummond (1990).

roxeno y hornblenda en vez de plagioclasa, derivando en el enriquecimiento de La (figura 6e) y empobrecimiento de Yb en composiciones ácidas (figura 6f).

Otro factor fundamental para la generación de magmas fértiles y su asociación con sistemas porfiríticos y epitermales es el contenido de agua en el fundido. A través del radio Ba/Ta en rocas intermedias (SiO_2 $61,8 \pm 5,5$ wt), es posible definir si el fundido registra altos o bajos contenidos de agua: si el radio Ba/Ta es mayor a 428, el fundido registra altos contenidos de agua y es indicador de condiciones altamente oxidantes, por lo que permite la cristalización de titanita y óxidos de hierro; en consecuencia, posteriormente cristalizan anfíboles y biotitas. Adicionalmente, Davidson *et al.* (2007) relacionan la tendencia negativa de (Dy/Yb)_{NC} vs. SiO_2 , con la cristalización de anfíboles y biotitas en rocas de composiciones intermedias. Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta tienen en promedio radios de Ba/Ta de 1590 en composiciones intermedias, y una tendencia negativa de (Dy/Yb)_{NC} vs. SiO_2 ; por tanto, las rocas volcánicas de La Quinta presentan altos contenidos de agua en el fundido.

Correlación con mineralizaciones de Cu

En los flancos occidentales de la serranía del Perijá, se han identificado diversas mineralizaciones de cobre asociadas a rocas sedimentarias y volcánicas de La Quinta, donde suprayace e infrayace estratos con importantes contenidos de carbonatos, como la Formación Manaure, Grupo Cogollo y Formación Río Negro (Buchely *et al.*, 2010). Las mineralizaciones se relacionan con cuerpos intrusivos máficos y diques de composición cuarzo-epidota que únicamente cortan estratos volcánicos y sedimentarios de La Quinta (Ortega Montero *et al.*, 2012). Por consiguiente, los minerales con enriquecimiento de cobre se presentan en configuraciones diferentes dependiendo de la roca encajante, para las rocas volcánicas más básicas suelen presentarse óxidos y carbonatos de cobre, con una ausencia notable de sulfuros y los minerales que se encuentran generalmente son azurita, malaquita, cuprita y tenorita, mientras que para las rocas volcánicas intermedias a ácidas cercanas a las zonas de mineralización, no se encuentra en general mineralizaciones de cobre, posiblemente por su alta lixiviabilidad, sin embargo, es notable la presencia de hidróxidos de hierro, como goethita y limonita (Champetier de Ribes *et al.*, 1963).

Por otra parte, las rocas volcánicas que están alejadas de zonas de mineralización de Cu presentan óxidos de hierro, como magnetita y hematita. De igual manera, las mineralizaciones que se encuentran en las rocas sedimentarias de la Formación La Quinta, registran dos configuraciones distintas: (a) la primera se identifica por su constante intercalación de rocas clásticas con miembro volcánico y esporádicamente diques cuarzo-epidotíticos presentes en la misma formación, y suelen tener una configuración mineral conformada principalmente por: malaquita, azurita, cobre nativo y crisocola (Ortega Montero *et al.*, 2012); (b) la segunda se reconoce porque la mayoría de mineralizaciones de cobre, presentes en las rocas sedimentarias de La Quinta, se caracterizan por la ausencia de intercalación con complejos volcánicos y los

minerales enriquecidos en cobre son en su mayoría carbonatos, sulfuros y óxidos, que forman parte de depósitos estrato-confinados; no obstante, se sugiere que la concentración de estos minerales es producto de fluidos hidrotermales por la presencia de silificación en los paquetes sedimentarios (Manco-Jaraba *et al.*, 2019).

Las características geoquímicas que sugieren contenidos de fluidos en el magma capaces de movilizar elementos como cobre y hierro, además de la limitada área de mineralización de cobre (restringida solamente a la Formación La Quinta), permiten relacionar las concentraciones de cobre en diques y en estratos sedimentarios. El volcanismo posiblemente produjo fluidos hidrotermales que se movilizaron a través de las grietas formadas por el rápido enfriamiento de las rocas volcánicas, hospedándose en rocas porosas, como las sedimentarias de La Quinta; allí las rocas mineralizadas son afectadas por procesos supérgenos responsables de las diferentes segmentaciones minerales. De igual manera, las rocas volcánicas presentan un fuerte empobrecimiento de Cu conforme las rocas se acidifican; para Sun *et al.* (2003), se debe a la fluctuación de fugacidad de oxígeno inducida por la cristalización de óxidos de Fe-Ti y la subsiguiente reducción de sulfato que atrapa el cobre en los fluidos magmáticos. Este proceso puede explicar la oxidación y la presencia de carbonatos de cobre y hierro en las rocas basálticas que han sido moderadamente alteradas y la casi nula presencia de cobre en rocas ácidas.

Las características geoquímicas de las rocas volcánicas de La Quinta anteriormente mencionadas pueden estar relacionadas a depósitos epitermales y pequeños pórfido-cupríferos (Sun *et al.*, 2003), derivados del magma mantélico con asimilación de material sedimentario de la corteza subducida, condiciones oxidantes y una considerable cristalización fraccionada dominada principalmente por plagioclasa (Chiaradia *et al.*, 2004). Además, la cristalización de minerales en rocas volcánicas a bajas condiciones de temperatura facilita la concentración y el transporte de cobre en fluidos residuales derivados de la cristalización magmática con altos contenidos de H₂O, posiblemente por el enriquecimiento en radio Cl/H₂O (Schroeder-Cline y Bodnar, 1991).

Conclusiones

Las rocas volcánicas de la Formación La Quinta contienen tendencias negativas de hierro y titanio al incrementar el SiO₂, como consecuencia de la cristalización temprana de ilmenita y magnetita en magmas con alto contenido de H₂O; por su parte, el sodio y el potasio presentan una tendencia positiva al incrementar el SiO₂, comportamiento de alcalinotérreos y álcalis que permite identificar que el conjunto de rocas presenta una cristalización fraccionada. Con respecto a los elementos traza, los ejemplares registran un enriquecimiento de elementos de las tierras raras livianas, y un empobrecimiento continuo en elementos de las tierras raras pesadas, lo que son características de magmas derivados de zonas de subducción. Por otra parte, los análisis multielementales de óxidos mayores y de elementos traza indican composiciones habituales de potasio y sodio, así como tendencias ascendentes del radio Zr/Ti a medida que

la roca se acidifica, producto de la cristalización de minerales máficos ricos en titanio. Además de lo anterior, los ejemplares se caracterizan por su alto contenido de aluminio en comparación con el sodio y el potasio, lo que sugiere generación de minerales hidratados; igualmente, se caracterizan por pertenecer a la serie calcoalcalina, indicio, primero, de altos contenidos de álcalis y cristalización temprana de óxidos de hierro y titanio, y segundo, de configuraciones tectónicas de arcos volcánicos, caracterizados por las anomalías negativas de niobio, itrio, titanio y altos contenidos de alúmina, rubidio, lantano, torio y estroncio, sugieren procesos de fusión parcial de magmas relativamente profundos en márgenes convergentes e interacción con fluidos provenientes del manto.

El magma que originó las rocas volcánicas de la Formación La Quinta se caracteriza geoquímicamente por un enriquecimiento en elementos LILE (Ba, Th, Sr, K) y LILE/HFSE (Ba/Nb, K/Ti), además de un enriquecimiento notable de Pb debido a la asimilación de sedimentos en el magma ubicado en la cuña mantélica y empobrecimiento de Nd, como consecuencia de la preferencia del elemento para cristalizar en ortopiroxenos a altas profundidades. Estas características son producto de la hibridización de peridotitas mezcladas con material sedimentario proveniente de la corteza oceánica subducida en la cuña mantélica.

A pesar de que las rocas volcánicas de la Formación La Quinta no cumplen con todos los criterios geoquímicos para ser consideradas adakitas, geoquímicamente, reflejan grandes procesos de diferenciación magmática y procesos de interacción cortical, que son algunos procesos indispensables para la formación de fluidos hidrotermales metalíferos en etapas avanzadas de la evolución magmática y que es posible asociarlos con las mineralizaciones de cobre presentes en la unidad litológica.

Financiamiento

La investigación asociada se titula “Análisis de las rocas volcánicas de la Formación La Quinta y su relación con contextos geotectónicos favorables para la génesis de depósitos minerales en la Serranía del Perijá”, de la cual se deriva este artículo. La Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos de la Energía (ACGGP) avaló y financió la investigación.

Referencias

Bayona, G., Bustamante, C., Nova, G. y Salazar, A. M. (2020). Jurassic evolution of the northwestern corner of Gondwana: Present knowledge and future challenges in studying Colombian Jurassic rocks. En J. Gómez y A. O. Pinilla Pachón (eds.), *The geology of Colombia* (vol. 2. Mesozoic) (pp. 171-207). Servicio Geológico Colombiano.

- Buchely, F., Gómez, L. A., Lancheros, J., Gómez, C. D., López, C., Romero, Ó. E., González, F., Fuquen Molano, J. A. y Navas, O. (2010). *Cartografía geológica y muestreo geoquímico de la parte norte de la serranía del Perijá*. Planchas 21, 22, 27, 28, 34 y 35. Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).
- Champetier de Ribes, G., Pagnacco, P. F., Radelli, L. y Weecksteen, G. (1963). Geología y mineralizaciones cupríferas de la Serranía de Perijá, entre Becerril y Villanueva (departamento del Magdalena, Intendencia de La Guajira). *Boletín Geológico*, 11(1-3 SE-artículos), 133-188. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol11.1-3.1963.188>
- Chiaradia, M., Fontboté, L. y Beate, B. (2004). Cenozoic continental arc magmatism and associated mineralization in Ecuador. *Mineralium Deposita*, 39(2), 204-222. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0397-5>
- Condie, K. C. y Kröner, A. (2013). The building blocks of continental crust: Evidence for a major change in the tectonic setting of continental growth at the end of the Archean. *Gondwana Research*, 23(2), 394-402. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.011>
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. y Dosseto, A. (2007). Amphibole “sponge” in arc crust? *Geology*, 35(9), 787-790. <https://doi.org/10.1130/G23637A.1>
- Defant, M. J. y Drummond, M. S. (1990). Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294), 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Ewart, A. (1982). The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: With special reference to the andesitic-basaltic compositional range. En R. S. Thorpe (ed.), *Andesites: Orogenic andesites and related rocks* (pp. 25-95). Wiley.
- Gallagher, J. y Tauvers, P. (1992). Tectonic evolution of northwestern South America. En R. Mason (ed.), *Basement Tectonics* 7 (pp. 123-137). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0833-3_10
- González Iregui, H., Salinas Echeverri, R., Cárdenas, J. I., Muñoz, C. y Vélez Giraldo, W. (2015). *Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100 000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano*. Servicio Geológico Colombiano. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B16/23008010028475/Documento/Pdf/2105284751101000.pdf>
- Hastie, A. R., Kerr, A. C., Pearce, J. A. y Mitchell, S. F. (2007). Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: Development of the Th-Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12), 2341-2357. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm062>

- Irvine, T. N. y Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5), 523-548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
- Jackson, C. y Knaebel, J. (1934). *Sampling and estimation of ore deposits*. United States Department of Commerce. <https://dggs.alaska.gov/webpubs/usbm/b/text/b356.pdf>
- Manco Jaraba, D., Ariño Díaz, K. y Rojas Martínez, E. (2019). Prospección y caracterización del yacimiento de cobre, en la vereda Los Cueros, Villanueva, departamento de La Guajira-Colombia. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(2), 288-294. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052019000200288>
- McDonough, W. F. y Sun, S.-S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3-4), 223-253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Ortega Montero, C., Rojas Martínez, E. y Manco Jaraba, D. (2012). Mineralización de cobre en el sector de San Diego, serranía del Perijá. *Geología Colombiana*, 37, 51-62. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/22409>
- Pearce, J. (1982). Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. En R. S. Thorpe (ed.), *Orogenic andesites and related rocks* (pp. 528-548). John Wiley and Sons.
- Pearce, J. A. y Cann, J. R. (1973). Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2), 290-300. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90129-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90129-5)
- Pearce, J. A. y Peate, D. W. (1995). Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1), 251-285. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.23.050195.001343>
- Richards, J. y Kerrich, R. (2007). Special paper. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102(4), 537-576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.4.537>
- Rivera, A. (1994). Types of copper mineralization in Venezuela. En *Memorias VII Congreso Geológico Chileno* (pp. 1614-1615) Universidad de Concepción.
- Rodríguez García, G. y Obando, G. (2020). Volcanism of the La Quinta Formation in the Perijá mountain range. *Boletín Geológico*, 46, 51-94. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.46.2020.535>
- Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6.ª ed.). McGraw-Hill.

- Schroeder-Cline, J. y Bodnar, R. (1991). Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5), 8113-8126. <https://doi.org/10.1029/91JB00053>
- Shand, S. J. (1927). On the relations between silica, alumina, and the bases in eruptive rocks, considered as a means of classification. *Geological Magazine*, 64(10), 446-449.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W. y Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean large igneous province (290-75Ma). *Gondwana Research*, 27(1), 95-139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Sun, S.-S. y McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, Special Publications*, 42(1), 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Sun, W., Arculus, R. J., Bennett, V. C., Eggins, S. M. y Binns, R. A. (2003). Evidence for rhenium enrichment in the mantle wedge from submarine arc-like volcanic glasses (Papua New Guinea). *Geology*, 31(10), 845-848. <https://doi.org/10.1130/G19832.1>

