



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Evolución Metalogenética en los Andes Costeros del Dominio Casma

Abraham Arana<sup>1</sup>, Yuliana Boza<sup>1</sup>, Jose Rutti<sup>1</sup>, Gabriela Iparraquirre<sup>1</sup> & Luis Paredes<sup>1</sup><sup>1</sup>Universidad Nacional de Ingeniería

### RESUMEN

En la costa limeña se identifican cuatro ciclos magmáticos, en donde las características petrológicas evolucionan de forma progresiva, esta evolución también se manifiesta en las expresiones hidrotermales desencadenadas. A manera general los IOCG-VMS evolucionan a pórfidos-epitermales, sin embargo, esta evolución metalogenética presenta una mayor complejidad. La productividad magmática desarrolla un importante control en el régimen tectónico, este material magmático generado es el principal causante del engrosamiento cortical. El espesor y composición de la corteza es un regulador fundamental para el desarrollo de la evolución magmática y metalogenética, la recurrencia magmática permite inferir el potencial hidrotermal, mientras que los controles estructurales y estratigráficos definen la ubicación, geometría y estilo del depósito.

**PALABRAS CLAVE:** Evolución metalogenética, productividad magmática, engrosamiento cortical

### ABSTRACT

On the coast of Lima, four magmatic cycles are identified, in which their petrological characteristics evolve progressively, this evolution is also manifested in the triggered hydrothermal expressions. In general, the IOCG-VMS evolve to porphyry-epithermal, however, this metallogenetic evolution presents a greater complexity. Magmatic productivity develops an important control in the tectonic regime, this generating magmatic ma-

terial is the main cause of crustal thickening. The thickness and composition of the crust is a fundamental regulator for the development of magmatic and metallogenetic evolution, the magmatic recurrence allows inferring the hydrothermal potential, while the structural and stratigraphic controls define the location, geometry and style of the deposit.

**KEYWORDS:** Metallogenetic evolution, magmatic productivity, crustal thickening

### INTRODUCCIÓN

El magmatismo presente en los Andes Costeros del Dominio Casma evoluciona de una naturaleza débilmente calco-alcalina (arco primitivo) a una calco-alcalina de arco maduro, al mismo tiempo el engrosamiento cortical aumenta de 25 a 50 km mientras que el arco va desarrollando una continua migración hacia el Este. Estos cambios magmáticos expresan también una evolución en el hidrotermalismo subsecuente, las cuales se aprecian que varían desde el litoral hacia el continente.

En los extremos de la evolución metalogenética tenemos IOCG-VMS y pórfidos-epitermales, los cuales se desarrollan en una corteza delgada y engrosada, respectivamente. Diversos autores (Fontbote (2019), Huamán (2010), Romero (2007), De Haller (2006), Polliand (2006), Injoque (2000a, 2000b), Vidal (1987)) han estudiado las ocurrencias y depósitos hidrotermales presentes en la costa de forma aislada, sin embargo, no hay muchos trabajos con una visión tectono-magmática y al mismo tiempo que contemple una evolución hi-

drotermal manifestada en diversos sectores metalogénicos. La clasificación metalogénica existente (Ingemmet) muestra franjas de orientación andina y clasifica su potencial según las evidencias reconocidas de contenido metalífero, estilo de mineralización y edad, sin embargo se presentan diversas observaciones al respecto, como la extensión del potencial VMS en un terreno con más del 70% de material batolítico o la proyección del potencial IOCG (Aptiano superior) de la cuenca Cañete hacia el norte donde hay más de 1000 metros de cobertura volcánica del Albiano-Cenomaniano, misma que desarrollaría otro potencial. El presente trabajo busca reconsiderar sectores metalogénicos teniendo en cuenta controles fundamentales como el espesor cortical, evolución y distribución magmática, metalotecto, arquitectura estructural, incluido nuevos datos de campo.

## METODOLOGÍA

El trabajo se basa en la interpretación de data pública de geocronología (606), litogeoquímica (217) y ocurrencias minerales, así como en la integración de información de trabajos propios y de otros autores. Se utilizó los softwares ioGAS y ArcGIS para el procesamiento y gráfico de diagramas y mapas.

## METALOGENIA COSTERA

El análisis de la información geocronológica del Dominio Casma, nos permite reconocer cuatro ciclos magmáticos (160-120Ma, 120-80Ma, 80-50Ma y 50-30Ma) y sus respectivas expresiones hidrotermales en la margen costera, adicionalmente se desarrollan dos ciclos magmáticos, que se manifiestan principalmente en la Cordillera Occidental. Los datos espaciales de todo el Perú muestran el inicio de una migración magmática durante el Aptiano, y los datos del área de estudio evidencian grandes inflexiones en la velocidad de migración del arco (82-80 Ma, 52-50 Ma, 30-28 Ma), las cuales coinciden con periodos de mínima o nula productividad magmática, delimitando los ciclos magmáticos reconocidos en la costa peruana. Para toda la zona del dominio costero y Cordillera, se ha reconocido una alta correlación entre la productividad magmática y la velocidad de migración. Como parte de las observaciones se reporta un incremento de la amplitud del arco, variando de 20 a 25 km, 25 a 40 km, 40 a 65 km y 65 a 90 km en los respectivos ciclos magmáticos del Dominio Casma. La evidencia geológica reconocible del Ciclo Magmático del Jurásico superior -

Aptiano inferior (160-120 Ma), está representada por facies volcánicas-volcanoclásticas de naturaleza calco-alcalina con afinidad toleítica, que rellenan una cuenca extensional de un arco primitivo (corteza de 20-25 km de espesor), la cual se conoce como Grupo Puente Piedra del Titoniano-Barremiano, sobre estas secuencias se ha reportado familias de diques gabroicos a diorítico de dirección NNW y ENE, así como estructuras de Pb-Zn (Aleman, 2004). Posteriormente y en discordancia, se desarrolla una sedimentación siliciclástica durante el Valanginiano que transiciona a facies mixtas (Formación Pamplona, Hauteriviano-Barremiano) hasta evolucionar verticalmente a una plataforma carbonatada (Formación Atocongo, Barremiano-Aptiano inferior), estas unidades presentan en algunos sectores vetas estériles de cuarzo masivo prismático y eventualmente muestran contenidos anómalos de Au y Cu. El inicio del Ciclo Magmático del Aptiano superior - Campaniano inferior (120-80Ma), se expresa con un amplio desarrollo de lavas y brechas andesíticas sub acuáticas (Grupo Casma basal) de naturaleza débilmente calco-alcalina, sobreyaciendo las secuencias carbonatadas en un régimen transtensional que transiciona a una transpresión a medida que aumenta la producción magmática, dentro de un contexto de arco sub-maduro ( $Sr/Y < 30$ ,  $Al_2O_3/Y: 0.6-1.25$ ,  $Ba/Nb < 150$ , 30-35 km). Esta alta frecuencia magmática se desarrolla alrededor de 115 Ma, en Raúl Condestable se expresa con el emplazamiento de diques dioríticos porfíricos NE, seguido del desarrollo de la mineralización Cu-Fe-Au, con fluidos (Th: 140-350°C; Sal: 11.7-30 wt% NaCl; De Haller, 2006) que interactúan con niveles de carbonatos generando mineralogía de reemplazamiento, en Hulk se expresa con el emplazamiento de diques basalto-andesíticos NE, seguidos del desarrollo hidrotermal (Th: 170-280°C; Sal: 6-22 wt% NaCl; Arana & Paredes, 2019) que asciende por los mismos conductos desarrollando estructuras Cu-Au-Fe de intermedia sulfuración. Al descender la producción magmática y alcanzar niveles mínimos en el Albiano, se configura una fuerte extensión-transtensión evidenciado en los distritos mencionados como enjambre de diques doleríticos NW, en Cerro Lindo se viene desarrollando un vulcanismo bimodal-félsico sub-acuático de naturaleza débilmente calco-alcalina en una corteza sub-madura delgada ( $Sr/Y < 25$ ,  $Al_2O_3/Y: 0.25-0.7$ ,  $Ba/Nb > 100$ , 25-30 km), esta expresión volcánica conforma flujos - brechas riódacíticas y subsecuentemente domos

riolíticos (106.9 – 105.7 Ma) hasta alcanzar una pausa volcánica la cual se da coetáneamente con la mineralización Zn-Cu-Pb (Imaña et al, 2019), esta se posiciona en conductos estructurales y limita en niveles de domos félsicos, donde se evidencia zonas verticales de reemplazamiento. El ciclo culmina con el desarrollo múltiples pulsos magmáticos de stocks y diques Turoniano-Campaniano, que afectan el distrito y mineralización Cerro Lindo, desencadenando metamorfismo de contacto expresado por andalucita-cordierita-biotita, al mismo tiempo la granulometría mineral se torna gruesa por recristalización de la mena (Flores et al, 2019, Imaña et al, 2019). Estos mismos pulsos de composición cuarzo diorítica a tonalítica son emplazados por diques andesíticos y subsecuentemente estructuras Au-Cu. El Ciclo Magmático del Campaniano superior – Eoceno inferior (80 – 50 Ma), inicia con una fuerte actividad magmática de naturaleza calco-alcalina en un contexto de arco sub-maduro a maduro ((Sr/Y:25-40, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y: 1-1.5, Ba/Nb:50-200, 38-42 km), estos pulsos presentan una sutil signatura adakítica. En el distrito de Quilca-Huaral estas unidades ígneas hospedan evidencias de tipo pórfido Cu-Au, donde se reconoce alteración potásica, filica y propilítica, vetillas qz-FdK con inclusiones fluidas hipersalinas de alto contenido de cristales hijos de calcopirita (Th: 300-360°C; Sal: 32-38 wt% NaCl; Arana, 2015). Newmont ha confirmado el importante potencial para pórfidos Cretácicos de Cu-Au en la costa Limeña, con su descubrimiento del depósito Illari de edades entre 79 – 78 Ma (Flores et al, 2021). Posteriormente se desarrolla un decremento en la frecuencia magmática hasta alcanzar condiciones máximas de extensión regional durante el Maastrichtiano (69-67 Ma), llegando a estructuraste sistemas graben regionales NW y cuencas distritales pull apart, donde un vulcanismo sub-acuático de naturaleza débilmente calco-alcalina en una corteza sub-madura gruesa (Sr/Y<30, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y: 0.3-1.2, Ba/Nb>100, 28-32 km) rellenaron la cuenca graben con material volcanoclástico andesítico mostrando estructuras slumps (Maria Teresa, Palma), en sectores intermedios de la cuenca llegaron aportes finos y se presento condiciones para desarrollar carbonatos (Palma), en zonas estables y profundas de la cuenca el material andesítico se intercaló de forma horizontal con facies clástico-calcáreas, hospedando eventualmente subvolcánicos dacíticos (Perubar). El evento máximo de extensión se relaciona un fuerte decremento en la producción magmática regional, donde se

emplazan múltiples diques máficos (early stage) y subsecuentemente los fluidos ascienden por estos mismos conductos interactuando con las litologías adyacentes. Se reconocen stockworks y reemplazamientos (Farfan et al, 2019; Pichardo et al, 2019) desarrollados en niveles de estructuras slumping y brechificación volcanoclásticas (Farfan et al, 2019) que funcionan como trampas hidrotermales (Maria Teresa, Palma), así mismo en niveles calcáreos los fluidos ascendentes desarrollan niveles de sulfuros masivos por reemplazamiento (Palma, Farfan et al, 2019). En las zonas mas profundas, se reconoce interacción de los fluidos hidrotermales con las aguas de cuenca, dejando como evidencia mineralización masiva concordante acompañada de pirita y/o baritina (Perubar). Posteriormente, a nivel de cuenca, se desarrollan flujos andesíticos acompañados localmente por desarrollo de carbonatos evaporíticos (Palma) o niveles riolíticos (late stage), finalmente estas secuencias son cortadas por algunos diques dacíticos a riódacíticos (post min). Posteriormente al desarrollo de los epitermales sub-acuáticos, la producción magmática aumenta desarrollando un importante engrosamiento cortical (38-40 km), estos intrusivos de composición granodiorítica a monzogranítica son emplazados por diques andesíticos y posteriormente por estructuras Au-Cu-Ag. El ciclo termina con un evento de cizallamiento regional hacia el sistema Conchao-Cocrachacra, reportando al Norte con craquelamientos frágiles de intrusivos, diques y mineralización, al Centro con amplios sistemas de rumbo y zonas de cizalla, y a Sur con deformación de cizalla ductil adyacente a bloques batolíticos. El Ciclo Eoceno medio – Oligoceno inferior se desarrolla en la parte más oriental del belt costero, donde se emplazan intrusiones monzograníticas y tonalíticas que conforman los últimos pulsos de batolito costero, sobre este material magmático se han reportado estructuras sub-epitermales conformado por ensambles cpy-mo-qz-bt, mo-cpy-mt-qz, cpy-qz-ser y py-ep-clo (Th: 200-350°C; Sal: 15-25 wt% NaCl; Arana, 2019), en el mismo sector Minsur cuenta con proyectos descritos como pórfidos Cu-Mo (Sumac Wayra y Suyana, Minsur, 2020) que termina definiendo el potencial metalogénico. Hacia el Este se presenta un vulcanismo sub-aereo de naturaleza calco-alcalina en un contexto de corteza madura, en estos niveles volcánicos circundantes al batolito se reportan epitermales de alteración ácida, siendo el más representativo el epitermal Au-Ag-Cu Invicta con

características de un sistema de intermedia a alta sulfuración (Th: 150-450°C; Sal: 2-21 wt% NaCl; Huaman, 2010). Este magmatismo Eoceno-Oligoceno presenta signatura favorable para desarrollar sistemas porfíricos y epitermales dentro de la región costera ( $Sr/Y > 30$ ,  $Al_2O_3/Y: 1.3-2.3$ ,  $Ba/Nb: 30-300$ , 45-50 km).

## DISCUSIÓN

El magmatismo durante los últimos 200 millones de años ha experimentado una evolución progresiva manifestada en la posición respecto la fosa, signatura química y expresión hidrotermal. La producción magmática ha variado también, desarrollando momentos alta y baja frecuencia, los cuales permiten reconocer diferentes ciclos magmáticos. La correlación directa existente entre la productividad magmática y la velocidad de migración podría sugerir que en el decremento del ángulo del Slab además de presentar una composición menos densa presenta más minerales con la posibilidad de deshidratarse y desencadenar una alta tasa de material fundido. La relación entre momentos ampliamente extensionales y la baja productividad magmática como durante el Albiano y Maastrichtiano, puede explicarse debido a un flujo de calor convectivo con escasos de material magmático como para compensar el continuo adelgazamiento cortical, y la aparente relación de episodios llamados compresivos con momentos de alta productividad magmática se explicaría por efecto contrario, donde el material magmático compensaría el adelgazamiento continuo y más bien podría desencadenar engrosamiento cortical, donde se tendría ausencia de procesos extensionales, y más bien la corteza superior estaría caracterizada por compresión de vinculación intrusiva debido al ascenso y deformación por parte de los magmas. Un factor crucial para la evolución magmática es el espesor cortical, que para cortezas gruesas la naturaleza magmática presenta características calco-alcálicas a fuertemente calco-alcálicas debido a la retención de Fe por anfíboles y/o granates fraccionados en la base cortical, y para cortezas delgadas (plagioclasa) el fraccionamiento de magnetita o espinela retendría Fe oxidado o reducido, respectivamente, permitiendo una naturaleza débilmente calco-alcálica. Cuando la velocidad de productividad magmática es relativamente mayor al rate de adelgazamiento cortical continuo, la corteza se engrosa ligeramente, y la base se compone de plagioclasa pero evita formación de magnetita, haciendo una corteza inferior reducida que retiene

Sr-Al-Ba (PGLs), bajas concentraciones de Fe +2 (spn) y rechaza Y-HREE-Nb-Na (PGLs-Ca), esto desencadena magmas residuales con ratios  $Sr/Y < 30$ ,  $Al_2O_3/Y < 1.3$ ,  $Nb/Y > 0.3$  y  $Ba/Nb < 150$  (Gpo. Casma Aptiano, S.U Raúl Condestable), lo cuales caracterizan IOCG andinos. Por otro lado, cuando la velocidad de productividad desciende en gran manera, el adelgazamiento convectivo por flujo de calor toma dominio de la corteza, haciéndola la base cortical compuesta principalmente por plagioclasa y magnetita, esta corteza inferior oxidada retiene Sr-Al (PGLs), Ti-Nb-Fe +3 (mt) y rechazan principalmente Y-HREE (PGLs) y Ba (mt), lo cual desarrolla magmas residuales con ratios  $Sr/Y < 30$ ,  $Al_2O_3/Y < 1.3$ ,  $Nb/Y < 0.3$  y  $Ba/Nb > 150$  (Gpo. Casma Albiano, Volcánicos KsP), esta signatura caracteriza a los VMS peruanos.

El magmatismo de los arcos sub-maduros de serie débilmente calco-alcálica ( $\Delta FMQ = 0$  a +2) se presenta mayormente bajo una cubierta de nivel marino, y desarrolla un hidrotermalismo que puede interactuar con aguas marinas fácilmente. Para las cortezas inferiores reducidas, el hidrotermalismo katatermal-mesotermal desarrolla típicos IOCG andinos Cu-Fe-Au ( $pH > 4$  y  $\Delta FMQ = +3$  a +4) mientras que el hidrotermalismo epitermal describe estructuras de intermedia sulfuración Cu-Au-Fe ( $pH > 3$  y  $\Delta FMQ = +4$  a +5), y para las cortezas inferiores oxidadas, el hidrotermalismo katatermal-mesotermal desarrolla IOCG barren (o proto-pórfidos) y los epitermales muestran una mayor interacción con las aguas marinas debido a la mayores cuencas consolidadas, algunas veces el fluido interactúa directamente con las aguas marinas formando un típico VMS andino con sulfuros masivos concordantes acompañado de mantos de baritina (Perubar), y otras veces solo se reconoce infiltración y mezcla con agua de mar desarrollando únicamente mineralización epigenética, debido a la ubicación en zonas altas de la estructuración graben. El magmatismo del Cretácico superior-Paleogeno desarrollo un importante aporte para el engrosamiento cortical, sin embargo un evento transpresivo cizallante habrían configurado estructuras de flor positiva que permitieron una definitiva regresión forzada producto de un dominio continental, este evento expuso superficie y erosionó gran parte de la cubierta batolítica, así mismo el vulcanismo instalado desencadenó flujos sub-aéreos ya con una corteza madura con la capacidad de generar pórfidos y epitermales. En la costa existen diversas expresiones epitermales (Au-Cu-Fe, Au-

Cu, Au-Cu-Ag, Au-Ag-Cu-As) que se ubican en diferentes sectores de los arcos magmáticos, estas estructuras aún no se han estudiado del todo, y es posible que puedan tener conexión con algún sistema magmático-hidrotermal mineralizado, el estudio y comprensión del control tectono-mag-

mático sobre el hidrotermalismo, así como el entendimiento estratigráfico y de la arquitectura estructural, permitirá predecir posibles zonas con potencial para diferentes metales y así definir nuevos conceptos de exploración en sectores específicos de la costa peruana.

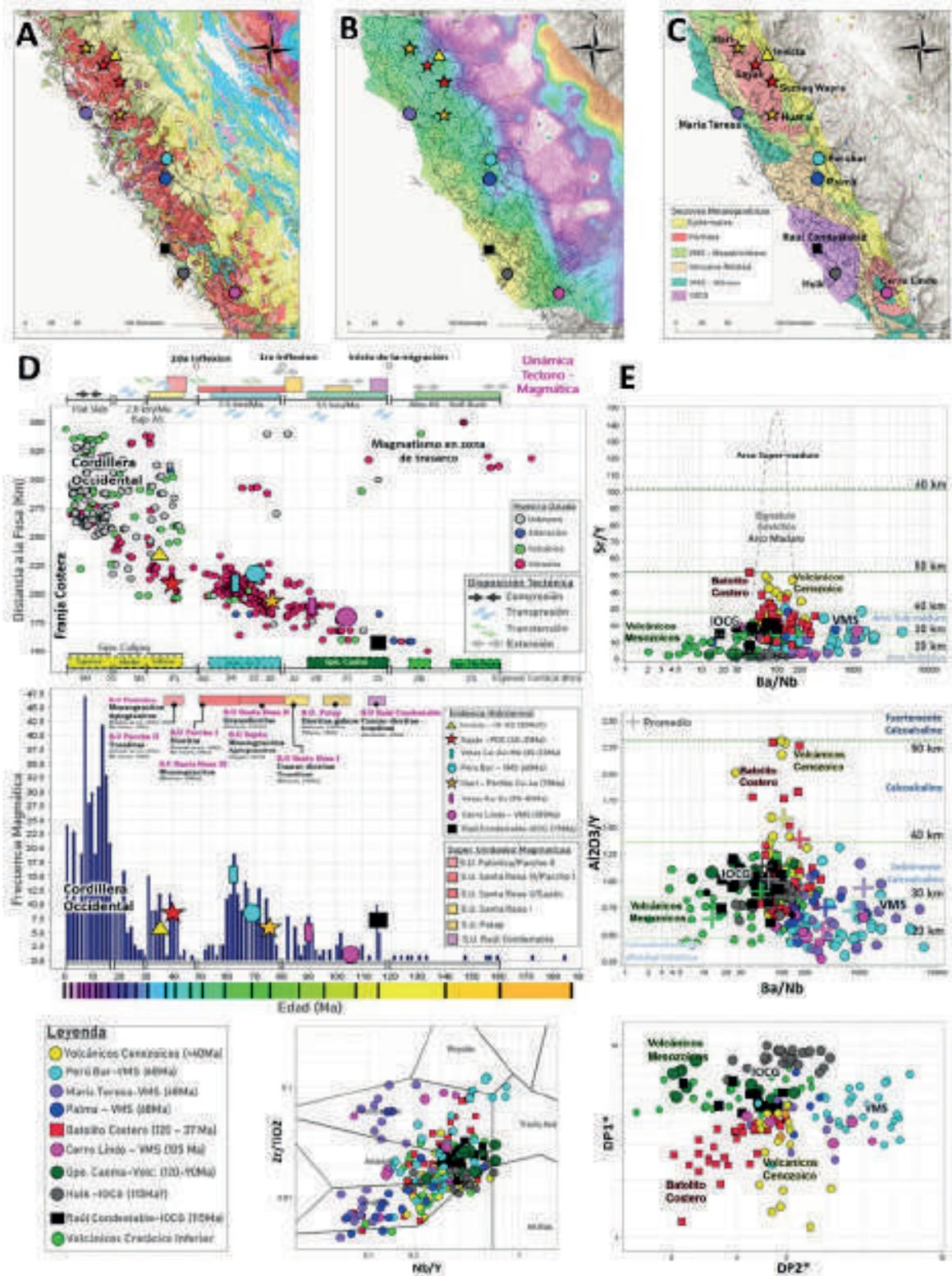


Figura 1. (A): Mapa geológico y arquitectura estructural, (B): Mapa geocronológico, (C): Sectores metalogenéticos, (D): Diagrama de migración y productividad magmática, (E): Plots Litogeoquímicos.

## REFERENCIAS

- Aleman, A., León, W., Rossel, W. & De La Cruz, O. (2004). Estratigrafía, ambiente deposicional e implicancia tectónica del Grupo Puente Piedra en el Área de Lima. XII Congreso Peruano de Geología. p. 17.
- Arana, A. (2019). Estructuras de Cu-Mo asociadas a un sistema porfirítico emplazadas en el Batolito Costero con fracturas por cizallamiento frail en el distrito de Sayán-Lima, Peru. Abstract submitted to SEG Conference.
- Arana, A. & Paredes, L. (2019). Zonamiento químico-mineralógico en vetas de Cu-Au asociadas a un sistema IOCG en el arco Aptiano de la costa peruana, Cañete-Lima. Abstract submitted to SEG Conference.
- Arana, A., Quintana, M. & Casiano, J. (2015). Geoquímica y alteración hidrotermal de las Super Unidades Paraíso y Santa Rosa, Quilca-Huaral (Lima). Reporte geológico – Universidad Nacional de Ingeniería. p. 15.
- De Haller., (2006), The Raúl-Condestable iron oxide copper-gold deposit, central coast of Peru: Published Ph.D. thesis, Switzerland, University of Geneva, Terre et Environnement, v. 58, p. 123.
- Farfán, C., Monge, R. & Fontboté, L. (2019). Palma, yacimiento de Zn-Pb tipo VMS en una Cuenca intra-arco del Cretácico Superior en Perú Central: nuevos avances en exploración para un gran potencial. Resúmenes extendidos ProExplo 2019, Lima-Perú.
- Flores, E., Palomino, O. & Pilco, J. (2021). Illari Cu-Au-Mo Porphyry, a New Discovery in the North Extension of Peru's Cretaceous Copper Belt. ProEXPLO - Oral presentation- Newmont Peru S.R.L.
- Fontboté, L. (2019). Volcanogenic Zn-Pb±Cu massive sulfide deposits in the upper cretaceous pluto-novolcanic arc in central Peru. Resúmenes extendidos ProExplo 2019, Lima-Perú.
- Huaman, A. (2010). Génesis y controles litoestructurales del yacimiento polimetálico Invicta distrito Huaura-Lima. Tesis para optar al grado de Maestro. Universidad Nacional de Ingeniería, p. 116.
- Imaña, M., Aspajo, H., Bueno, J. & Mota, J. (2019). The Cerro Lindo VMS Deposit: Volcanic architecture, stratigraphy and hydrothermal alteration of a world class sulphide deposit, Central Peru. Resúmenes extendidos ProExplo 2019, Lima-Perú.
- Injoque, J., Ríos, A., Torres, J. & Vargas, J. (2000). Palma, yacimiento de tipo VMS distal formado en un ambiente sedimentario intravolcánico del Grupo Casma, Cretáceo Medio, Cuenca Huarmey, Lima. Resúmenes Extendidos del Congreso Peruano de Geología 13 p.
- Injoque J. (2000). Distribución de yacimientos de sulfuros masivos (VMS) y de cobre tipo manto (CuTM) en el arco volcánico Cretáceo de los Andes Peruanos y Sudamericanos. Sociedad Geológica del Perú, Vol. 90. p. 19-34.
- Minsur (2020). Reporte de Sostenibilidad. p. 94.
- Pichardo, E., Fontboté, L., Mena, T., Chirinos, O., & Halter, W. (2019). El yacimiento de Zn-Pb-Cu-Ag tipo VMS María Teresa, Perú: geología y exploración. Resúmenes extendidos ProExplo 2019, Lima-Perú.
- Polliand, M. (2006). Genesis, evolution, and tectonic setting of the Upper Cretaceous Perubar Ba-Pb-Zn volcanic-hosted massive sulfide deposit, central Peru. Ph.D. Thesis University of Geneva, Terre and Environement, v.60, p.141.
- Romero, D. (2007). La cuenca Cretácico superior- Paleoceno del Perú central: un metalotecto para la exploración de SMV, Ejemplo mina Maria Teresa. Tesis de maestría Programa ALFA, p. 100.
- Vidal, C. (1987). Kuroko-type deposits in the middle Cretaceous marginal basin of central Peru: Economic Geology, v. 82, p. 1409–1430.