

Prospección geoquímica y geológica de la zona de Macará. Análisis del potencial exploratorio de la frontera sur del Ecuador

Geochemical and geological prospecting of the Macará area. Analysis of the exploratory potential of the southern border of Ecuador

Marco Andrés Vásquez Guañuna¹

1 Investigador independiente. Quito – Ecuador. marcovasquezgeo@gmail.com

ISSN: 2661-6998

Fecha de recepción: 10-11-2021

Fecha de aceptación: 08-04-2022

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados de la prospección geoquímica y geológica llevada a cabo en la zona de Macará, sur del Ecuador; así mismo, se analiza el potencial exploratorio de la zona basado en sus características geológicas e indicios de mineralización presentes. Se realizó un análisis geoestadístico global y por ambientes geológicos para los elementos: Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W y Ba a partir de sedimentos fluviales y un análisis multi-elemento a partir de litogeoquímica de rocas mineralizadas. Las anomalías y asociaciones geoquímicas obtenidas fueron correlacionadas con la litología, estructuras, indicios de mineralización y alteraciones hidrotermales, lo que permitió definir 16 áreas con potencial exploratorio para recursos minerales. En la zona occidental se definieron áreas favorables a la ocurrencia de mineralización tipo VMS (Sulfuros Masivos Volcanogénicos) relacionado a rocas volcánicas de afinidad toleítica del Cretácico inferior-tardío, así mismo, áreas prospectivas para mineralización epitermal y pórfido, posiblemente relacionadas a la presencia de cuerpos intrusivos también Cretácicos. En la zona oriental se definieron áreas prospectivas para mineralización epitermal relacionados a secuencias volcánicas de afinidad calco-alcalina de edad Paleoceno-Eoceno. Los resultados obtenidos, estudios previos y por correlación con lo reportado en el norte de Perú, permitieron describir tres épocas metalogénicas en esta zona, mismas que también son analizadas en este estudio.

Palabras clave: Macará, sur del Ecuador, potencial exploratorio, prospección geoquímica, prospección geológica, metalogenia.

ABSTRACT

This study presents the main results of the geochemical and geological prospecting carried out from stream sediments and rock samples over Macará area, south of Ecuador, as well as the assessment of the exploration potential based on geological characteristics and mineralization evidences. A global statistical analysis was carried out first, covering all the data and then by groups, dividing the data according to geological environments for the elements Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W and Ba. Subsequently, a multi-element analysis was performed employing litho-geochemistry results of mineralized rocks. The resulting anomalies were correlated with lithology, structures, mineralization and hydrothermal alterations, which allowed to locate 16 areas with mineral resources potentiality. The western zone exhibits areas with potential for VMS deposits (Volcanogenic Massive Sulfide) related to lower Cretaceous tholeiitic volcanic rocks, in addition prospective zones for epithermal and porphyry mineralization were defined, probably genetically related to intermediate composition intrusions from Cretaceous as well. Within the eastern zone, element associations revealed prospective areas for epithermal mineralization, probably related to calc-alkaline volcanic sequences of Paleocene-Eocene age. The results obtained, previous studies and by correlation with the reported in the north of Perú, allowed to describe at least three metallogenic epochs for the southern zone of the country, which are analyzed in this study.

Keywords: Macará, southern Ecuador, exploratory potential, geochemical prospecting, geological prospecting, metallogeny

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador posee un importante potencial minero, prueba de ello es que en los últimos años se han investigado y consolidado proyectos mineros de mediana y gran escala, por esta razón, es importante incrementar el conocimiento y la investigación geocientífica que permita establecer la existencia de nuevos yacimientos minerales y posibilite la generación de beneficios económicos para el desarrollo del Ecuador. El área de estudio comprende una superficie de 742.6 km² y se localiza en el extremo suroeste de la provincia de Loja (Figura 1a), abarca parte de los cantones Macará, Sozoranga, Calvas y cubre las hojas topográficas de Macará y Río Calvas (escala 1:50 000) que limitan al sur

con el Perú. El área constituye la parte norte de la Cuenca del Río Macará y Río Calvas. Los principales sistemas hidrográficos que atraviesan la zona están conformados por los Ríos Pindo al este, Sabiango al oeste, Macará y Calvas al sur. La zona presenta relieves acolinados bajos al oeste en los sectores de Macará y Sabiango, y montañosos al este en los sectores de La Victoria, Rinconada y Cerro Huachingue (Figura 1b). El objetivo de este estudio es definir áreas con potencial exploratorio a partir de asociaciones geoquímicas obtenidas del análisis geoestadístico de muestras de sedimentos fluviales y del análisis multi-elemento a partir de resultados de litogeoquímica de rocas mineralizadas, así como su correlación con la litología e indicios de mineralización encontrados dentro de la zona de Macará.

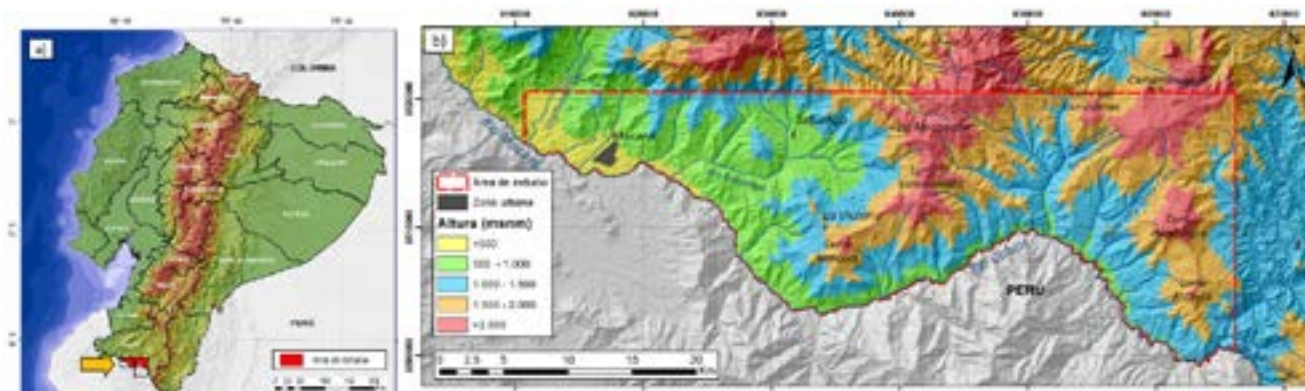


Figura 1: a) Mapa de ubicación del área de estudio. b) Mapa de elevaciones e hidrografía, zona de Macará, frontera sur del Ecuador.

2. GEOLOGÍA

La región fronteriza sur del Ecuador se localiza dentro de la denominada “Deflexión de Huancabamba” comprendida entre las latitudes 3° S en Ecuador a 8° S en Perú y que representa la zona de transición y variación estructural entre los Andes Centrales con una orientación NNO-SSE y los Andes del Norte de orientación NNE-SSO [1].

El área estudiada se localiza en el borde oriental de La Cuenca Lancones-Alamor, ubicada entre el Macizo de Amotape- Tahuín y el Terreno Loja-Olmos, ambos de predominio metamórfico (Figura 2).

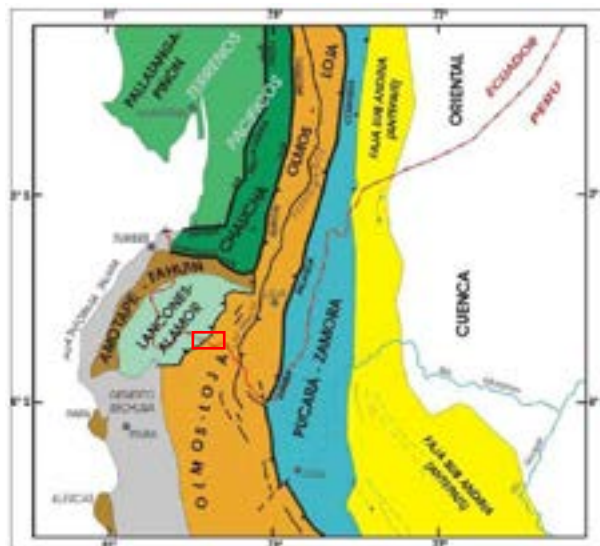


Figura 2: Dominios Litotectónicos del sur de Ecuador y norte de Perú. En rojo se enmarca el área de estudio. Tomado de [2]

La Cuenca Lancones-Alamor se habría formado durante el cretácico inferior, producto de un adelgazamiento de la corteza continental y está constituida por una Región Oriental de origen volcánico y una Occidental de origen netamente sedimentario; el contacto entre ambas regiones es transicional o interdigitado [2].

2.1. LITOESTRATIGRAFÍA

Unidad Punta de Piedra (K_{Pp}): Egúez y Poma [3] redefinen a las rocas volcánicas aflorantes al este y noreste de Macará como Punta de Piedra. La litología típica incluye gabros, basaltos, andesitas y pillow lavas asociadas a un arco volcánico toleítico formado sobre corteza continental adelgazada durante el cretácico inferior tardío, Aptiense-Albiense [2]. Las rocas de esta unidad son interpretadas como procedentes de un arco de islas [4].

Formación Celica (K_C): Secuencia volcanoclástica de tobas y brechas volcánicas intercalados con mantos de lava de composición basáltico-andesítica que sobreyace transicionalmente a la Unidad Punta de Piedra. Dataciones radiométricas realizadas a la Unidad La

Batolito de Tangula: Complejo plutónico que intruye la región oriental de la Cuenca Lancones-Alamor. Regionalmente presenta forma de herradura abierta hacia el sur con prolongaciones irregulares hacia territorio peruano. Se reportan dos edades para el batolito, 111±3Ma [6] y 93±1.1Ma [9] atribuyéndole una edad Cretácico superior. La litología típica incluye dioritas, granodioritas ricas en hornblenda y granitos de afinidad

Bocana en Perú, correlacionable con la Formación Celica, establece una edad Albiense [5]. Esta formación se interpreta como la parte más proximal del arco Punta de Piedra.

Secuencias Volcánicas Continentales: Se agrupa las secuencias volcánicas y volcanosedimentarias de afinidad calco-alcalina que conforman una franja alargada ubicada al este del área, entre la Cuenca Lancones-Alamor y el Terreno Loja-Olmos. Inicialmente definida como Formación Sacapalca por Kennerley [6], se le atribuye una edad Paleoceno-Eoceno 66.9±5.8Ma [7], 44-55Ma [5]. INIGEMM [8] discrimina a estas secuencias volcánicas continentales en las Unidades Chagaimina (PcCh), La Cruz (PcLc), Río Guayucu (PcRg), El Ingenio (O?Ei), Ahuaca (MAh) y El Fundo (PLF) (Ver figura 3).

calco-alcalina emplazados en un arco volcánico continental [4].

Complejo Peribatolítico Una serie de stocks de diorita y filones pórfido-andesíticos rodea la parte norte del batolito [3]. Posiblemente representan la fase final de emplazamiento del batolito y estaría relacionado con mineralizaciones en la zona norte del batolito [4].

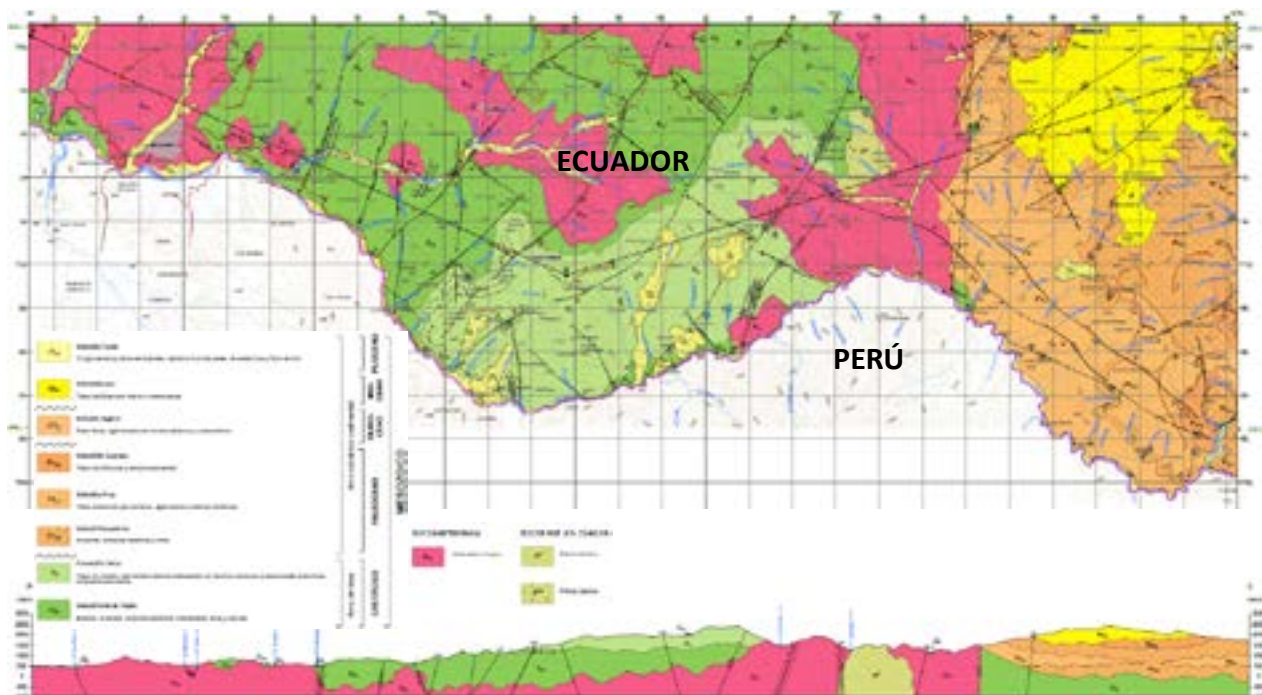


Figura 3: Mapa y sección geológica de Macará, escala 1:100 000. Tomado de [8]

3. METODOLOGÍA

3.1 PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA

Se recolectaron 661 muestras de sedimentos fluviales a partir de drenajes de primer y segundo orden que cubren las hojas topográficas a escala 1:50 000 de Macará y Río Calvas, con una densidad de muestreo de 0.9 por km².

Las muestras fueron procesadas y analizadas por ICP-OES (Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento) para 34 elementos en los laboratorios del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) (antes, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico – INIGEMM). La concentración de Au se determinó mediante ensayo al fuego en el orden de

ppb. Con los resultados obtenidos del laboratorio, se realizó un análisis geoestadístico para 11 elementos indicadores (target elements) y exploradores o guía (pathfinders): Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W, Ba.

Las unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio se agruparon en dos (2) Ambientes Geológicos considerando el criterio litológico, tectónico y geocronológico (Tabla 1): El ambiente Volcánico y Magmático-Cretácico que constituye el 70 % del área y que abarca a las Unidades Punta de Piedra, Celica, y al Batolito de Tangula emplazado en el cretácico. El Ambiente Volcánico Continental Terciario constituye el 30 % del área ubicado hacia el este (Figura 4). El análisis geoestadístico por ambientes geológicos permitió visualizar y entender la variabilidad, distribución y correlación espacial del conjunto de datos geoquímicos en poblaciones para su posterior interpolación mediante el método de Kriging Ordinario.

Tabla 1. Resumen de unidades litoestratigráficas y número de muestras por ambientes geológicos

Ambientes Geológicos	km ²	Unidad/formación	n	Densidad de muestreo
Ambiente Volcánico y Magmático-Cretácico	504.6	Formación Celica Unidad Punta de Piedra Batolito de Tangula	472	0.94
Ambiente Volcánico Continental Terciario	238	Unidad El Fundo Unidad Ahuaca Unidad El Ingenio Unidad Rio Guayucu Unidad La Cruz Unidad Changaimina	189	0.79
Total	742.6		661	0.90

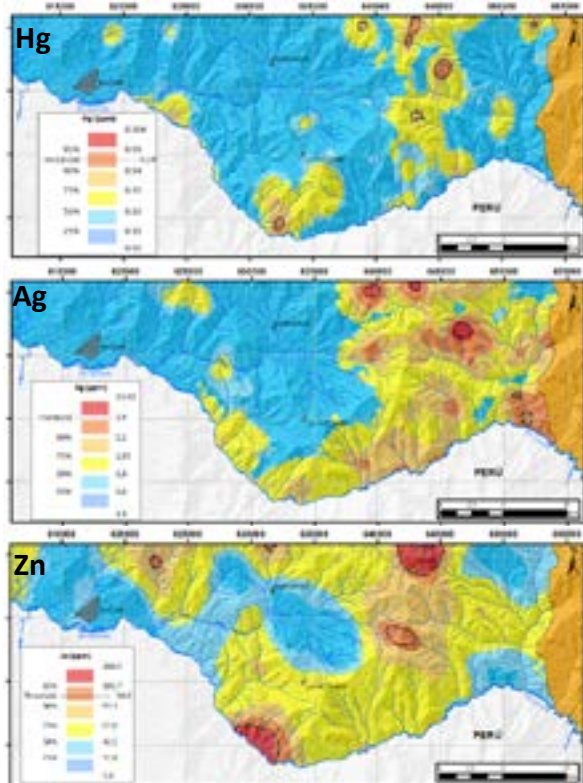


Figura 4. Mapa de ubicación de muestras de sedimentos fluviales por Ambientes Geológicos. En color verde el Ambiente 1 y en color naranja el Ambiente 2

Para la determinación del umbral anómalo (Threshold) y valor de fondo geoquímico (Background) se utilizaron métodos estadísticos analíticos y gráficos. Lepeltier [10], define al valor fondo como los valores inferiores a la media geométrica y al umbral anómalo como la media geométrica más dos veces la desviación estándar (Tabla 2). Las anomalías geoquímicas obtenidas fueron agrupadas por superposición y asociaciones de elementos. Rose, Hawkes and Webb [11] establecen que dichas asociaciones pueden traducirse en la existencia de asociaciones mineralógicas, correlacionables con tipos de mineralización específicos (Figuras 5 y 6).

Tabla 2. Valor de fondo (Background) y umbrales anómalo (Threshold). Análisis General y por Ambientes Geológicos

Elemento	General		Ambiente 1		Ambiente 2	
	Back (ppm)	Thresh (ppm)	Back (ppm)	Thresh (ppm)	Back (ppm)	Thresh (ppm)
Cu	51.1	120,00	59	110,00	43.7	69,50
Pb	13.8	40,00	11.4	27,90	18.2	40,00
Zn	57.5	130,00	42.5	90,00	73.5	115,00
Au (ppb)	15.0	182,30	12	125,60	12	104,10
Ag	2.2	3,20	1.6	3,00	1.61	3,20
Hg	0.13	0,30	0.1	0,18	0.1	0,27
As	4.0	21,20	2.8	10,10	10.3	30,10
Sb	10.7	16,90	10.8	19,00	10.5	14,00
Mo	2.1	4,60	1.9	5,00	2.1	4,80
W	6.2	11,90	6.3	9,80	5.9	9,00
Ba	105.2	250,00	105.2	317,00	108.1	321,00



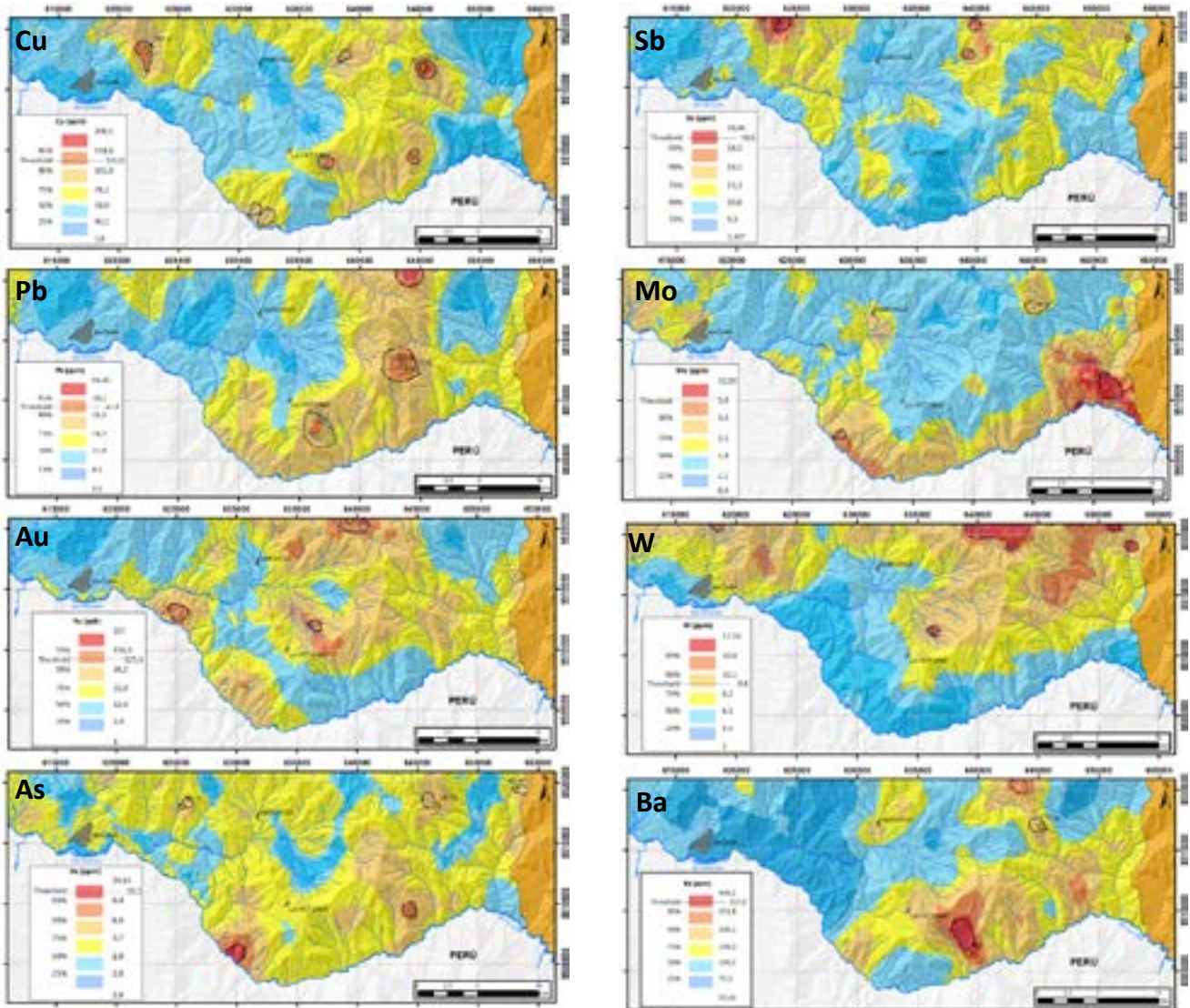
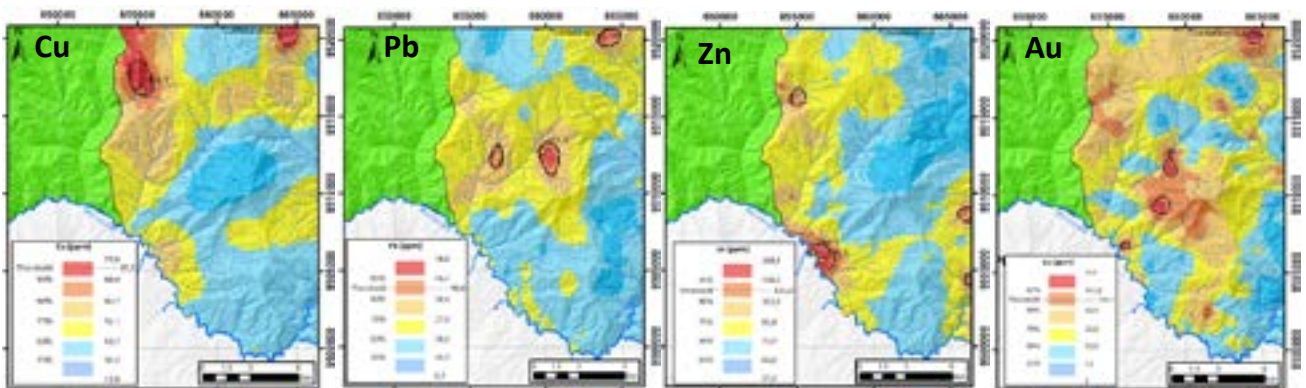


Figura 5: Mapas de estimación de concentración de los elementos Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W y Ba en el Ambiente 1 (Ambiente Volcánico y Magmático Cretácico). Mapas contornos basados en playas de colores según los umbrales relativos a los percentiles 95 %, 90 %, 75 %, 50 % y 25 %. Umbrales anómicos en línea negra entrecortada.



As

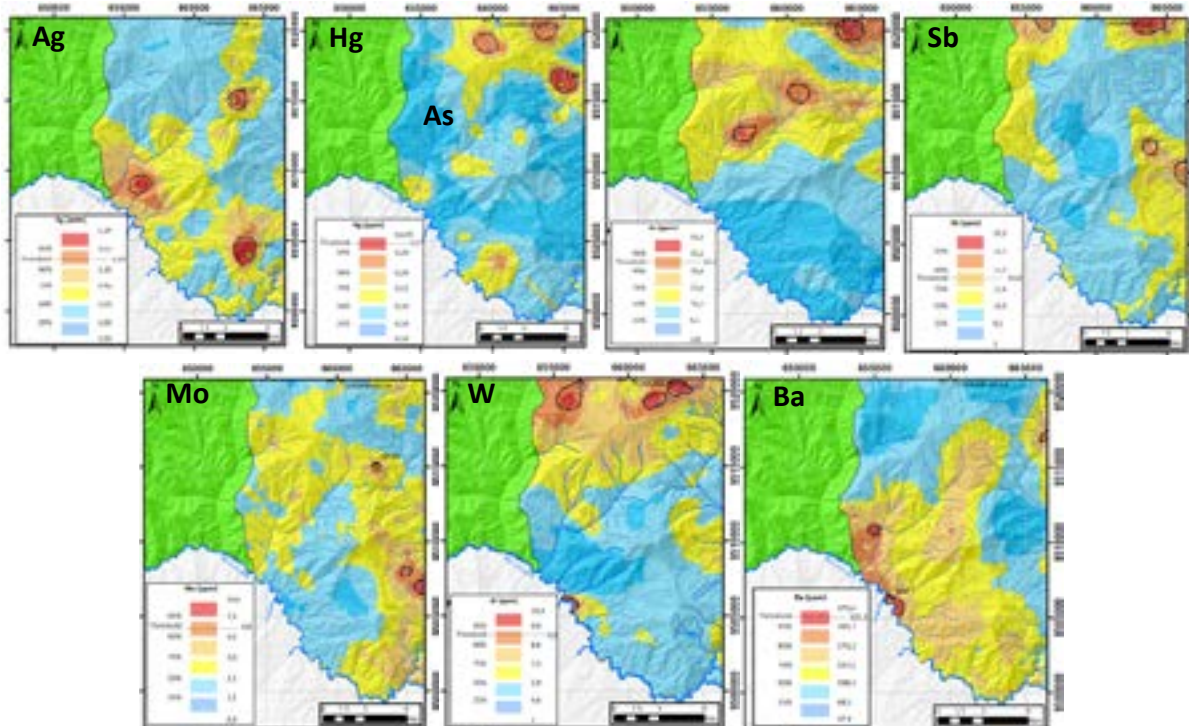


Figura 6: Mapas de estimación de concentración de los elementos Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W y Ba en el Ambiente 2 (Ambiente Volcánico Continental Terciario). Mapas contornos basados en playas de colores según los umbrales relativos a los percentiles 95 %, 90 %, 75 %, 50 % y 25 %. Umbrales anómicos en línea negra entrecortada

3.2 PROSPECCIÓN GEOLÓGICA

Veinte indicios de mineralización fueron reconocidos en el área de Macará, principalmente de tipo epitermal, pórfido y VMS (Sulfuros Masivos Volcanogénicos).

Concentraciones de partículas de oro se encuentran difundidas en drenajes de la parte central y oriental. Resaltan las concentraciones en los afluentes de la Quebrada Paltos al oeste de La Victoria, Quebrada San Fernando al norte de Sabiango, Quebradas San Lapo y Pedregal en la parte central; y al este, en las Quebradas La Paccha, San Vicente y Quisanga, afluentes del Río Pindo (Figura 7).

Lito-geoquímica: El objetivo del análisis multi-elemento a partir de resultados de litogeoquímica es reducir la dimensión del gran número de variables (elementos) a un número más reducido (grupos de elementos).

Se utilizó el método de factores de correlación de Pearson con el objetivo de establecer el grado de asociación entre variables analizadas. (Tabla 3). Las relaciones obtenidas se correlacionaron con tipos de mineralización específico y pueden ser usadas como guías de exploración. En la tabla 4 se detallan las asociaciones geoquímicas obtenidas para cada indicio de mineralización.

Tabla 3. Ejemplo de matriz de correlación de elementos, sector Sabiango. Asociación: Ba-As (Cu-Pb-Zn)

	Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Pb	Sb	Zn
Ag	1								
As	-0,32	1							
Au	-0,71	0,57	1						
Ba	-0,21	0,98	0,48	1					
Cu	-0,47	0,97	0,71	0,92	1				
Mo	-0,38	0,95	0,56	0,96	0,92	1			
Pb	-0,25	0,99	0,51	0,98	0,93	0,97	1		
Sb	-0,53	0,22	0,88	0,16	0,35	0,25	0,17	1	
Zn	-0,35	0,89	0,49	0,82	0,91	0,76	0,85	0,06	1

Tabla 4. Indicios minerales en la zona de Macará. Coordenada UTM WGS-84 zona 17S. Modificado de [12]

Sector	ESTE	NORTE	Tipo de ocurrencia	Asociación	Posible sistema de mineralización
El Papayal	633837	9503798	Indicio	Au-Cu-Ag	Epitermal
Las Vigas	631274	9507127	Indicio	Au-Ag-Cu (As-Sb-Ba); Cu-Au	Epitermal
Porotillo	637315	9511595	Indicio	Au-Cu (Pb-Zn)	Epitermal
Paltos	630875	9509602	Indicio	Au, Cu	Epitermal
El Coco	626117	9512110	Indicio	Au, Cu	Epitermal
El Carmen	621950	9515372	Indicio	Au	Epitermal
Q. Mandalá	620603	9520731	Indicio	As (Ag-Pb-Au)	Epitermal
Sauce	637659	9507136	Indicio	Ba (Pb-Cu-Zn)	VMS
Delicia Sur	636916	9513803	Indicio	Ag (Cu-Mo-Sb)	Pórfido
Llanitos	640699	9513316	Indicio	Au-Ag; Zn (Ag-Cu-As)	Epitermal

Punta De Piedra	645363	9516535	Indicio	Ag-Au-Cu (Pb-Zn-As-Sb)	Epitermal
San Vicente	645149	9517067	Indicio	Mo (Ag-Pb-As); Zn-Pb	Pórfido/Epitermal
Trapiche	656230	9506852	Indicio	Au-Cu-Pb; Ag-Au (As-Pb-Zn)	Epitermal
Nongora	658552	9512019	Indicio	Ag-Au-As (Pb-As)	Epitermal
Naypungo	665223	9515284	Indicio	Au	Mineralización
Artón	650408	9515792	Indicio	Au	Mineralización
Taparuca	656560	9515498	Indicio	Au	Mineralización
Q. Los Paltones	662707	9505314	Indicio	Au-Ag-Mo-Sb	Mineralización
Curichanga	626393	9521124	Indicio	Au	Pórfido
Sabiango	632733	9520332	Indicio	Ba-As (Cu-Pb-Zn)	VMS

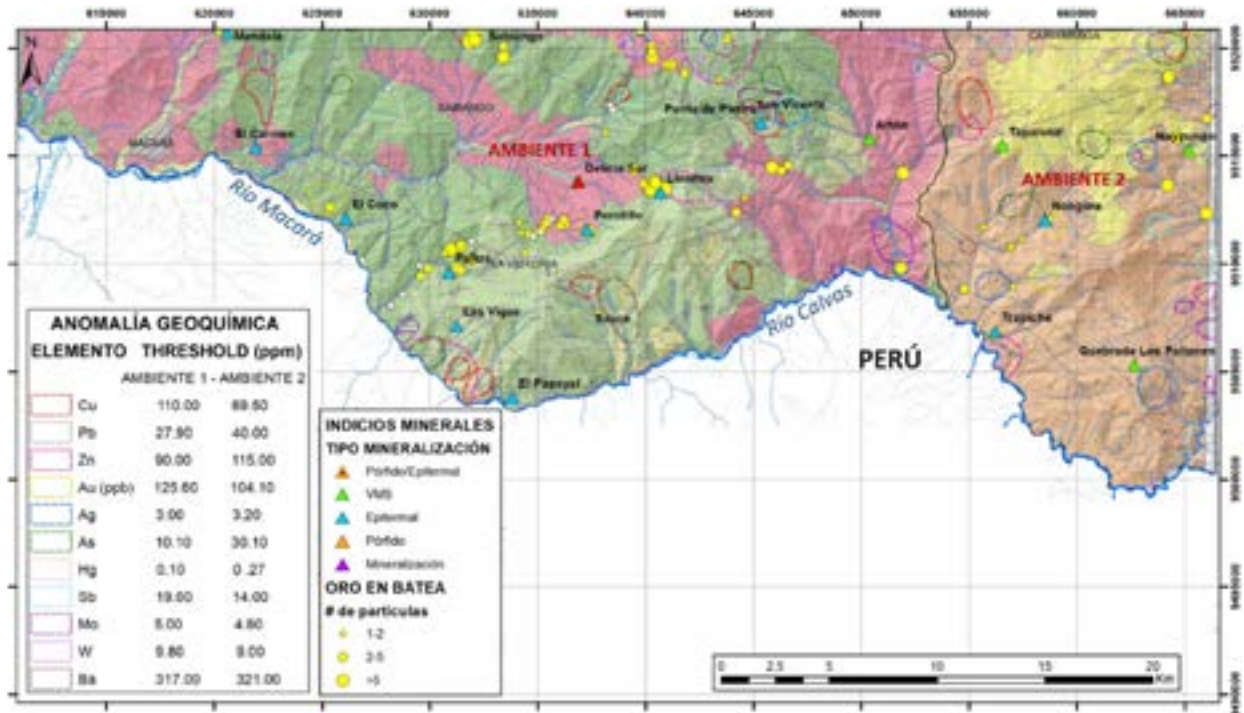


Figura 7. Anomalías geoquímicas e indicios de mineralización. Compilado de INEMIN [13], INIGEMM [12], INIGEMM [8]

4. RESULTADOS

La zona de estudio se divide en dos ambientes geológicos, el Ambiente Volcánico y Magmático Cretácico ubicado al oeste y, el Ambiente Volcánico Continental Terciario ubicado al este. Si bien dentro del primer ambiente coexisten unidades volcánicas toleíticas asociadas a un arco de islas e intrusivos calco-alcalinos asociados a procesos de subducción [4], estos no fueron separados en ambientes distintos debido a su similitud en cuanto a edad, extensión irregular y a que los drenajes cortan indistintamente a ambas litologías, haciendo difícil definir la procedencia del sedimento fluvial al dividir las muestras en poblaciones.

Dentro de la zona occidental, se definieron asociaciones geoquímicas de Pb-Zn-Ag-Ba-Hg (Área 2), Zn (Área 4) y Cu-Pb-Ba (Área 9) presentes en los sectores de Sabiango y Sauce, relacionadas a rocas basálticas de la Unidad Punta de Piedra y Formación Celica, correlacionables con mineralización de tipo VMS, como ocurre en el norte de Perú, donde se reporta la presencia de depósitos VMS de Cu-Zn-Au hospedados en rocas volcánicas submarinas de la Formación Ereo, correlacionable con la Unidad Punta de Piedra, siendo el más importante el depósito de Tambogrande, particularmente caracterizado por una cobertura extensa (550mx200m) de gossan [14]. En Ecuador, niveles de gossan han sido reportados en el sector de Sabiango [12]. En la figura 8 y tabla 5 se detallan las asociaciones geoquímicas definidas para cada área prospectiva planteada.

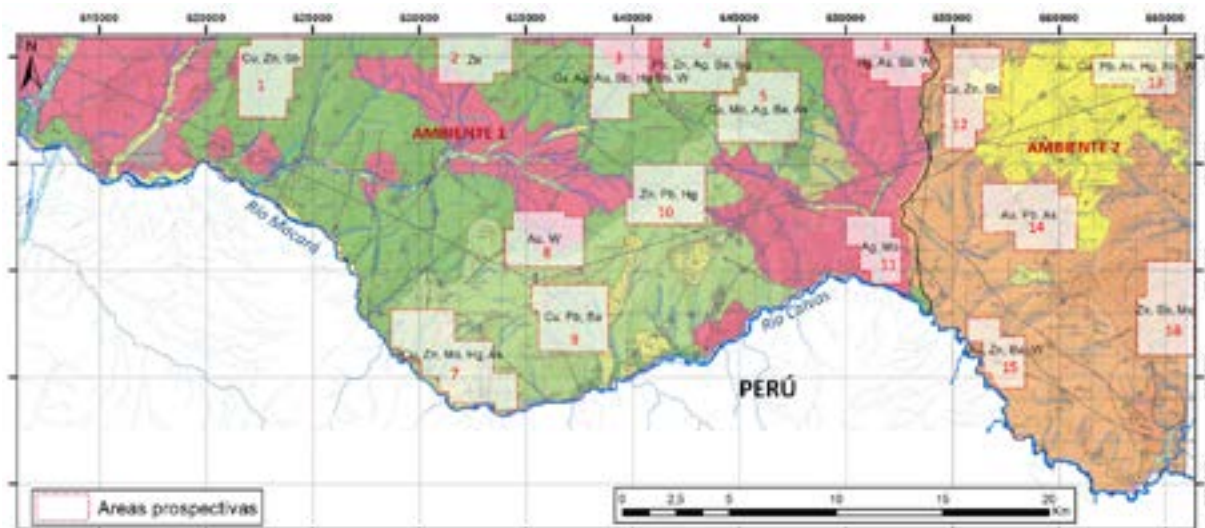


Figura 8. Mapa de áreas con potencial exploratorio de Macará. Base geológica tomada de [8].

Tabla 5. Áreas prospectivas de Macará y sus asociaciones elementales

Ambiente geológico	Áreas prospectivas	Superficie (km ²)	Elementos	Posible mineralización asociada
Ambiente Volcánico y Magmático Cretácico	Área 1	9.96	Cu, Zn, Sb	Epitermal
	Área 2	11.36	Zn	VMS
	Área 3	9.50	Cu, Ag, Au, Hg, Sb, W	Epitermal
	Área 4	9.50	Pb, Zn, Ag, Ba, Hg	VMS/Epitermal
	Área 5	11.50	Cu, Mo, Ag, Ba, As	Epitermal/ Pórfido
	Área 6	6.82	Hg, As, Sb, W	Epitermal
	Área 7	16.00	Cu, Zn, Mo, Hg, As	Epitermal
	Área 8	9.00	Au, W	Pórfido
	Área 9	10.80	Cu, Pb, Ba	VMS
	Área 10	10.10	Zn, Pb, Hg	Epitermal
	Área 11	6.54	Ag, Mo	Pórfido
Ambiente Volcánico Continental Terciario	Área 12	10.30	Cu, Zn, Sb	Epitermal
	Área 13	8.82	Au, Cu, Pb, As, Hg, Sb	Epitermal
	Área 14	12.42	Au, Pb, As	Epitermal
	Área 15	6.16	Au, Zn, Ba, W	Epitermal
	Área 16	11.16	Zn, Sb, Mo	Epitermal/ Pórfido

Dentro de esta misma zona, se definen tres áreas favorables para la ocurrencia de depósitos tipo pórfido de Cu y Cu-Mo por las asociaciones geoquímicas de Cu-Mo-Ag-Ba-As (Área 5), W-Au (Área 8) y Mo-Ag (Área 11) ubicados en los límites del Batolito de Tangula. Esto concuerda con lo establecido por INIGEMM [12], que plantea la presencia de stocks porfiríticos dioríticos y andesíticos cortados por vetillas mineralizadas con piritita, calcopirita, magnetita; además de diseminados, comúnmente con alteración propilitica de bajo grado y argílica. Asimismo, se definieron cinco áreas prospectivas para mineralización epitermal caracterizadas por los típicos indicadores As-Sb-Hg acompañados de Au, Ag, Cu, Pb y Zn (Áreas 1, 3, 6, 7 y 10) dispuestos de forma dispersa, lo que concuerda con lo establecido por INIGEMM [12], que plantea la presencia de vetas y vetillas con cuarzo, óxidos de hierro, sulfuros de hierro y cobre, cortando mayormente a las rocas de la U. Punta de Piedra. El contexto geológico indica que depósitos tipo pórfido y epitermal en el área, podrían asociarse a la actividad magmática del Batolito

de Tangula, sin embargo, DINAGE [15] plantea que aparentemente este intrusivo sería estéril y no generaría mineralización. Más bien la mineralización estaría relacionada al emplazamiento de cuerpos menores y filones dioríticos y pórfido-andesíticos [4] como ocurre en el sector de Cariamanga (fuera del área) donde un complejo peribatolítico de composición similar rodea la parte norte y oeste del Batolito [3], el mismo que sería el responsable de la mineralización en las zonas de Río Playas y El Huato, de manera similar a lo que ocurre en Perú, donde depósitos tipo pórfido de Cu-Mo y epitermales de Au-Ag están relacionados a múltiples intrusiones del Complejo Plutónico Las Lomas del cretácico, correlacionable con el Batolito de Tangula, también caracterizado por un borde gabro-diorítico que rodea a cuerpos intrusivos ácidos e intermedios [14] (figura 9).

La zona oriental está constituida por rocas volcánicas y volcanoclásticas asociadas al arco continental del paleógeno. De acuerdo a los modelos planteados por Corbett [16] y Sillitoe [17], este arco, representa un ambiente propicio para la generación de mineralización epitermal y pórfido, lo que concuerda con la asociaciones de Cu-Zn-Sb, Au-Cu-Pb-As-Hg-Sb, Au-Pb-As, Au-Zn-Ba-W definidas; además, de indicios minerales reconocidos por INIGEMM [12], con lo que se establece cinco áreas prospectivas con predisposición a la ocurrencia de depósitos de tipo epitermal (Áreas 12, 13, 14 y 15) y una para pórfido (Área 16). De acuerdo a CODIGEM [18], dentro de esta franja se registra mineralización polimetálica desarrollada en el paleógeno y neógeno en los sectores de Changaimina, Cariamanga y Los Colorados; similar a lo que se encuentra en Perú donde se reporta un sub-cinturón mioceno medio-plioceno inferior caracterizado por mineralización de pórfidos de Cu-Mo (Ag-Pb), skarns de Pb-Zn-Cu-Ag y depósitos polimetálicos relacionados a intrusivos miocénicos [14].

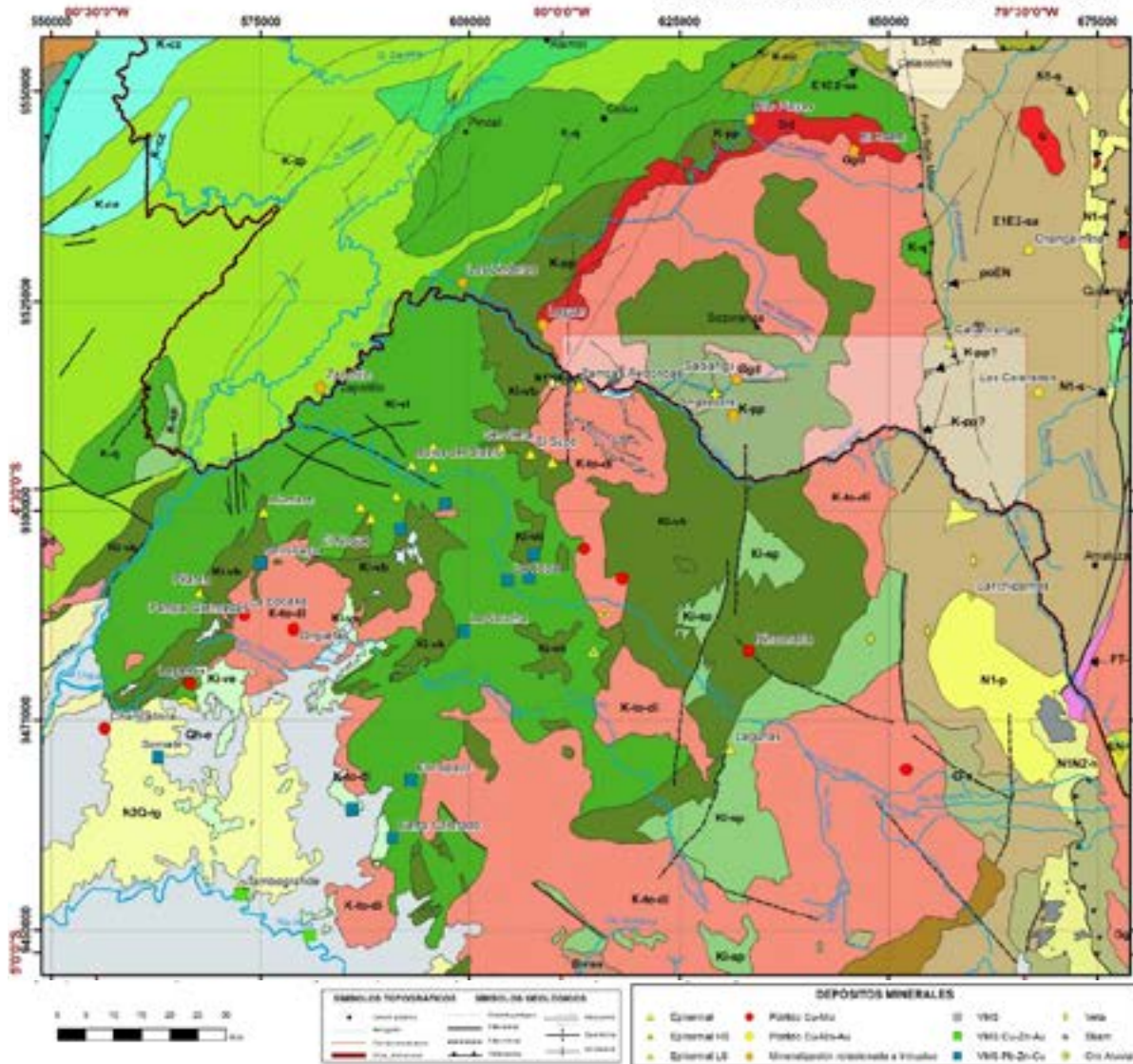


Figura 9: Geología Regional y Ocurrencias Minerales del sur del Ecuador y norte de Perú. Compilado de: CODIGEM [18], Egúez y Poma [3], INGENMET [14], INGEMM [4], INIGEMM [12], DINAGE-INGEMMET [19]

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El análisis estadístico por ambientes geológicos indicó variaciones representativas en el valor de fondo y umbral anómalo para los elementos Cu, Pb, Zn, Hg, As, Sb, y Ba, esto como resultado de las diferentes concentraciones normales de los tipos litológicos que constituyen cada ambiente. Estas variaciones revelaron zonas anómalas que no son apreciadas al considerar un umbral anómalo único para toda el área en el análisis estadístico global.

El método de factores de correlación de Pearson permitió establecer el grado de asociación entre elementos. Con ello fue posible reducir las variables (Cu, Pb, Zn, Au, Ag, Hg, As, Sb, Mo, W) a un número mas reducido (grupos de elementos). Las relaciones obtenidas para cada ambiente geológico fueron correlacionadas con tipos de mineralización específicos y podrán ser usadas como guías de exploración.

Basado en las anomalías y asociaciones de elementos obtenidas en el análisis estadístico, indicios de mineralización, estudios previos y por correlación con lo reportado en el norte de Perú, se interpreta al menos tres épocas metalogénicas para esta zona. La primera época, del cretácico inferior-tardío caracterizado por un volcanismo toleítico y que habría generado mineralización tipo VMS de Cu-Pb-Zn y Cu-Zn-Au genéticamente relacionada a la Unidad Punta de Piedra y posiblemente Formación Celica. La segunda con una diferencia de edad corta, del cretácico superior-temprano, relacionada a la última fase de la actividad magmática de Tangua asociado a mineralización tipo epitermal de metales preciosos Au, Ag y metales base Cu, Zn, Pb y Mo; y mineralización tipo pórfido de Cu y Cu-Mo (Au). La tercera época del paleoceno al mioceno, relacionada al volcanismo continental de Sacapalca y que habría originado mineralización tipo epitermal de Cu-Zn, Au principalmente.

5.2 RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico por ambientes geológicos han sido favorables. Se recomienda la utilización de esta metodología de tratamiento de los datos por poblaciones en futuras campañas de exploración geoquímica. En campañas de exploración geoquímica a detalle es factible incluso el tratamiento de los datos según unidades litoestratigráficas. Así mismo, el método de estadística multi-variante de factores de correlación de Pearson puede ser utilizada tanto para resultados de lito-geoquímica, así como, para sedimentos fluviales y suelos.
- Considerando las asociaciones geoquímicas e indicios minerales presentes en las zonas de Sabiango y Sauce (Áreas 2, 4 y 9) que sugieren la posible presencia de mineralización tipo VMS, se recomienda realizar una campaña de follow-up de las anomalías geoquímicas aumentando la densidad de muestreo de sedimentos fluviales y suelos. Además de una campaña de geofísica con el método cargabilidad-resistividad y gravimetría, mismos que presentan una buena respuesta a este tipo de depósitos. Estos métodos han sido empleados con éxito en la exploración de VMS en el norte peruano. En estas áreas es poco recomendable el método electromagnético puesto que el carácter basáltico de la Unidad Punta de Piedra podría enmascarar la presencia de minerales magnéticos en el subsuelo.
- Considerando las asociaciones geoquímicas e indicios minerales presentes en las zonas de Quebrada Jorupe, Villa Nueva, Quebrada Chingulle, El Papayal y La Victoria al oeste y Quebrada San Juan, Quebrada Mariposa, Quebrada Nongora y Loma Trapiche al este (Áreas 1, 3, 6, 7, 10, 12, 13, 14 y 15) que sugieren la posible presencia de sistemas epitermales, se recomienda realizar campañas de geoquímica en suelos y muestreo y análisis químico de rocas para la determinación de elementos pathfinders (Sb, Hg, As) y análisis espectrales para la determinación de minerales arcillosos indicadores de alteración hidrotermal. Asimismo, es recomendable realizar estudios geofísicos terrestres de polarización inducida y resistividad.
- De acuerdo a las asociaciones geoquímicas e indicios minerales presentes en las zonas de San Vicente, Quebrada Limón y Quebrada Samanamaca ubicados al oeste y Llano Grande al este (Áreas 5, 8, 11 y 16) que sugieren la posible presencia de mineralización tipo pórfido, se recomienda realizar una campaña de muestreo y análisis químico de rocas para la determinación de elementos pathfinders (Cu, Mo, W, Sn) y análisis espectrales para la determinación de minerales arcillosos asociados a los distintos halos de alteración característicos de estos depósitos.

6. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Central del Ecuador y al IIGE (ex INIGEMM), institución donde desempeñé mi primera experiencia profesional y que a través de sus autoridades y técnicos brindaron las facilidades y permitieron el uso de datos obtenidos y trabajo de campo para la realización de este estudio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mourier, T., Laj, C., Roperch, P., Mitourd, P., Farfán Medrano, A., (1988). An accreted continental terrene in northwestern Peru. *Earth and Planetary Science Letters*, 88, pp. 182-192., Amsterdam, Netherlands.
- [2] DINAGE-INGEMMET. (2005). Pilatasig L, Gordón D, Palacios O y Sánchez J. Geología del Ecuador y Perú entre 3°S y 6°S. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas. Ecuador-Canadá- Perú.
- [3] Egüez A. y Poma O. (2001). La Cuenca Alamor-Lancones en el contexto geodinámico de los Andes de Huancabamba, SW Ecuador. Cuartas Jornadas en Ciencias de la Tierra, Memorias, Escuela Politécnica Nacional. pp 19-22.
- [4] INIGEMM. (2013). Ibadango, E., Torres, C., Chiriboga, V., Vélez, T. Memoria técnica hoja geológica de Cariamanga. Proyecto “Modelo piloto para la determinación del potencial geológico-mineralógico de las zonas Zaruma y Cariamanga a escala 1:100.000. Quito-Ecuador.
- [5] Jaillard E, Ordóñez M, Berrones G, Bengstone P, Bonhomme M, Jiménez N, Zambrano I. (1996). Sedimentary and tectonic evolution of the arc zone of Southwestern Ecuador during Late Cretaceous and Early Tertiary times. *Journal of South American Earth Sciences* 9, pp 131-140.
- [6] Kennerley J. (1973). Geology of Loja Province Southern Ecuador. Institute of Geological Sciences-Overseas Division-Photogeological Unit. London-United Kingdom.
- [7] Hungerbuhler, D. (1997). Neogene basin in the Andes of southern Ecuador: Evolution, deformation and regional tectonic implications. Diss. ETHZ No. 12371. Swiss Federal Institute of Technology Zurich.
- [8] INIGEMM. (2018). Burbano, D., Carranco, A., Vásquez, M., Andrade, L., Gramal, A. Mapa geológico de Macará, escala 1:100.000. Quito-Ecuador.

- [9] Ullrich T. D. (2004). Summary Report on 40ar/39ar Dating for MAP: GAC Activity Ec-50 Ecuador. Samples Dg-56 And Ga-019. Argon Geochronology Laboratory. Pacific Centre for Isotopic and Geochemical Research Earth & Ocean Sciences, University of British Columbia.
- [10] Lepeltier, C. (1969). A Simplified Statistical Treatment of Geochemical Data by Graphical Representation. *Economic Geology*. Vol. 64. pp.538-550.
- [11] Rose A, Hawkes H, Webb J. (1979). *Geochemistry in Mineral Exploration*. Second Edition. Academic Press. London.
- [12] INIGEMM. (2016b). Lomas, W., Pinzón, F., Quiñónez, K. Memoria técnica de ocurrencias de recursos minerales Bloque 6 (4°S-5°S). Hojas topográficas escala 1:100 000. (Cariamanga, Gonzanamá, Alamor, Zapotillo, Macará, Las Aradas y Zumba). Informe no publicado.
- [13] INEMIN. (1988). Sub-proyecto Macará. Informe inédito.
- [14] INGEMMET. (2012). Rodríguez, I., Villareal, E., Valencia, M., y Sánchez, V. Metalogenia, Geología Económica y Potencial Minero de la Deflexión de Huancabamba: Noroeste del Perú. Boletín N° 29-Serie B: Geología Económica. Lima- Perú.
- [15] DINAGE. (2007). Pilatasig, L., Gordón, P. Mapa Geológico del Ecuador, Escala 1:100 000, Hoja 40 Macará.
- [16] Corbett, G. (2013). World Gold Pacific Rim Epithermal Au-Ag. Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- [17] Sillitoe R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Society of economic Geologist. Economic Geology*. V. 105. Pp, 3-41.
- [18] CODIGEM-BGS. (1993). Mapa Tectono metalogénico del Ecuador escala 1:1000000.
- [19] DINAGE-INGEMMET. (2007). Pilatasig. L., Gordón. D, Palacios. O y Sánchez. J. Mapa geológico binacional región sur del Ecuador y norte del Perú. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades Andinas. Ecuador-Canadá- Perú.