



## Caracterización de fluidos hidrotermales y su aplicación en exploraciones para la vectorización de (Au-Cu) en el proyecto Calamaca – (La Libertad, norte del Perú)

Victor J. Torres<sup>1,2</sup>, Miguel A. Feijoo<sup>1</sup>, Marco A. Tapia<sup>2</sup>, Alex E. Aquino<sup>2</sup>, Brian K. Townley<sup>3</sup>, Juan C. Molano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> E.A.P Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>2</sup> IAMGOLD, Lima, PERÚ

<sup>3</sup> Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile

<sup>4</sup> Departamento Geociencias, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Colombia

### RESUMEN

El Proyecto Calamaca está ubicado en el distrito minero de Huamachuco, región que alberga varios yacimientos y proyectos significativos con recursos de oro mayores de 30 millones de onzas. Geomorfológicamente, se localiza en la parte oriental de la cordillera occidental, los principales tipos de rocas presentes son: (1) lutitas y limolitas jurásicas de la Formación Chicama; (2) Areniscas cretácicas con intercalaciones de limolitas de la Formación Chimú y (3) Pórfidos dioríticos del mioceno que intruyen estas secuencias sedimentarias. Estructuralmente, se encuentra dentro del eje de un anticlinal regional de rumbo NW, en el que las rocas dominantes son las secuencias jurásicas e intrusiones de pórfidos dioríticos, mientras que las areniscas cretácicas se encuentran en los flancos.

El área de estudio comprende 5 km<sup>2</sup> y está situado en el eje del anticlinal, donde ocurren vetas y venillas con orientación NW y NE, estas estructuras mineralizadas están alojadas dentro de los pórfidos dioríticos y rocas sedimentarias, se reconocieron dos etapas de mineralización: (1) Pirita + Arsenopirita con altas leyes de oro, los cuales pertenecen a un ambiente de baja sulfuración; (2) Una etapa con Calcopirita + Esfalerita + Galena + Molibdenita + Tenantita, indicando un ambiente epitermal de sulfuración intermedia con menor

oro. Ambos eventos con una alteración hidrotermal de Cuarzo, micas blancas (muscovita, paragonita, illita) + Arcillas (Caolinita, Esmectita y Dickita).

Análisis petrográficos y SEM demostraron que el oro en este depósito está relacionado con Arsenopirita en la etapa de baja sulfuración. Sin embargo, la tendencia tectónica y metalogenética en la región está dominada por ambientes epitermales de intermedia hacia alta sulfuración y pórfidos. Por lo tanto, para una mejor comprensión de este sistema hemos llevado a cabo un estudio de inclusiones fluidas, que indicaron temperaturas de 220 ° C a 300 ° C y salinidades de 2.5% a 5.6% de NaCl. La fase de vapor analizada con la microsonda raman muestra la presencia de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, lo que sugiere un efecto reductor como producto de la interacción de los fluidos hidrotermales con la roca caja de la Formación Chicama.

En cuanto a los impactos en exploración, se determinaron tres targets y uno con alto potencial de estar vinculado con un sistema de pórfido, esto basado en: (1) Espectroscopía Sistemática, donde se muestra la zonación de un halo de alteración argílico a filico, con cambios de absorción en los 2200 nm Al-OH, sobreimpuesto por alteración filica del sistema epitermal de baja a intermedia sulfuración; (2) Esta interpretación es corroborada por la geoquímica, en la que se observa la zon-

ación de Mn-Pb-Zn distal a Cu-Mo-Au en el objetivo principal; (3) El estudio de inclusiones fluidas se realizó en muestras a elevaciones similares (3500 +/- 50 msnm) y dentro del mismo evento de mineralización, mostrando un gradiente de temperatura de 230 ° C en el borde exterior a 290 ° C en el potencial ambiente de pórfido; (4) Los estudios de magnetometría también sugieren un zona de contraste que es consistente con la interpretación y muestra la continuidad de un posible cuerpo en profundidad con más de 1 km<sup>2</sup> de área.

**Palabras clave:** Sistema epitermal, pórfido, reducido, zonación, targets

## ABSTRACT

Calamaca Project is located in the mineral district of Huamachuco, region which hosts several significant ore deposits and projects with Au resources over 30 Moz. Geomorphologically is located in the eastern part of the western cordillera, the main rock types present being (1) Jurassic shales and siltstones from the Chicama Formation; (2) Cretaceous sandstones with some intercalations of siltstones; (3) intruded by dioritic stocks of Miocene age. The district is structurally oriented on NW trend, along the Peruvian Andes, within the axis of a regional anticline in which the dominating rocks are those of the jurassic sequences, the cretaceous rocks present along fold flanks.

The study area encompasses 5km<sup>2</sup> and lies on the axis of the anticline, axis along which dioritic porphyries occur. Within these host rocks NW and NE oriented veins occur, these mostly composed by quartz, sulfides and oxides, the last commonly pseudomorphs after sulfides. These veins are hosted within the dioritic porphyries and sedimentary rocks, and are associated with an extensive quartz + clay (Kaolinite, Smectite and Dickite) + white mica (sericite and illite) hydrothermal alteration. At Calamaca two stages of mineralization are recognized, the first: Pyrite + Arsenopyrite ± Fe – rich Sphalerite with high gold grades, indicating a low sulfidation epithermal environment, and a second stage with Chalcopyrite + Fe – rich Sphalerite + Galena + Molibdenite + Tennantite, indicating a intermediate sulfidation epithermal environment with minor gold.

Petrographic and SEM analysis demonstrate that Au in this deposit is related with Arsenopyrite in the low sulfidation stage. Nevertheless, the tectonic and metallogenic trend in the region is domi-

nated by high sulfidation epithermal and porphyry type environments. Thus, for a better understanding of this system we have carried out a fluid inclusions study, which indicates temperatures from 220°C to 300°C and salinities of 2.5 to 5.6 % NaCl. The vapor phase analyzed with Raman shows occurrence of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, suggesting the interaction of the fluids with the host rocks, process which likely had a strong reduction effect.

In terms of Exploration impacts, we determine three targets and one with high potential to be linked with a porphyry system, based on (1) Systematic Spectroscopy measurements that show zoning from a extensive argillic to phyllic alteration halo, with shifts in the 2200 nm Al-OH absorptions, superimposed by the low to intermediate sulfidation epithermal system; (2) This interpretation is corroborated by geochemistry, in which zoning from distal Mn-Pb-Zn to Cu-Mo in the main target is observed; (3) the fluid inclusion study was done on samples at similar elevations, 3500 +/- 50 m.a.s.l and within the same mineralization event, showing a potential temperature gradient from 230°C in the outer border to 290°C in the potential porphyry proximal environment; (4) magnetometry studies also suggest a contrast anomaly which is consistent with interpretation and shows the continuity of a possible body at depth with more than 1km<sup>2</sup> in area.

**Keywords:** Epithermal System, Porphyry, Reduced, Zoning, Targets.

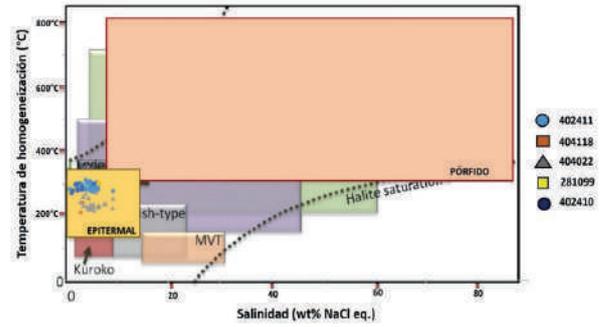
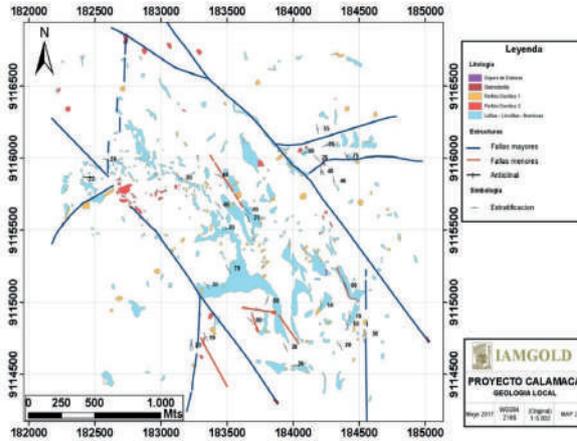
## DESARROLLO DEL RESUMEN

### GEOLOGÍA DISTRITAL Y LOCAL

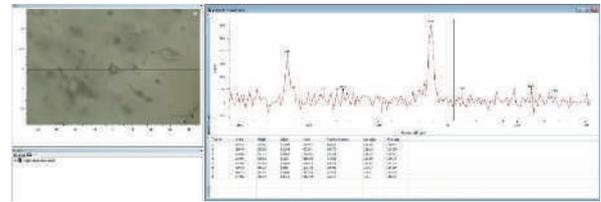
El proyecto Calamaca está ubicado en un corredor estructural, limitado por las fallas regionales Pallasca al Oeste y Marañón al Este, dentro de este corredor estructural se distribuyen rocas sedimentarias de la Formación Chicama y el Grupo Goyllarisquizga que se depositaron entre el Jurásico Superior (Titoniano) y Cretáceo Inferior (Albiano-Aptiano). La formación Chicama es la principal roca caja presente en el área de estudio.

Geoquímicamente, ya que es una roca con material orgánico como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), etc. Esto tendrá una influencia reductora en el fluido hidrotermal que este expuesto a esta roca caja. Generando así un cambio en el estado de oxidación del azufre de S<sup>4+</sup> en forma de SO<sub>2</sub> (oxidado) hacia S<sup>-2</sup> en forma de H<sub>2</sub>S (reducido),

provocando la precipitación de sulfuros, conteniendo los metales de interés.



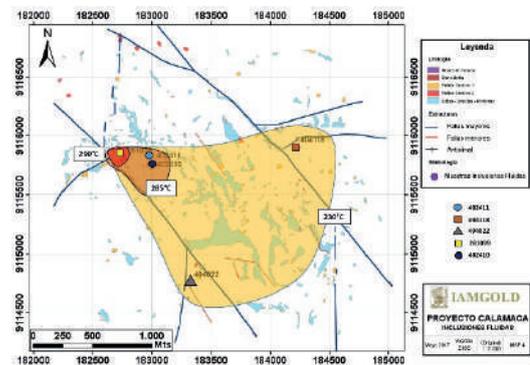
**Composición Inclusiones Fluidas:**  
 Como resultado del estudio Raman puntual, nos indicaron contenidos de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Indicándonos la influencia reductora de la roca caja, Formación Chicama. (Comparación de espectros raman en Frezzotti et al. 2012)



**Alteraciones Hidrotermales y Mineralización:**

En Calamarca, se observan dos tipos de sistemas: (1) La mineralización de tipo pórfido, donde se observa venillas de tipo stockwork y diseminado de sulfuros, que en superficie mayormente son óxidos, mediante la geoquímica de superficie se determinó valores anómalos de oro y cobre en dicho pórfido Diorítico. (2) Mineralización epitermal sobrepuestas al pórfido, estructuras donde se observaron mayores valores de oro y cobre. Por ello, nos enfocaremos en el segundo evento relacionado al sistema epitermal.

**Vectorización:**



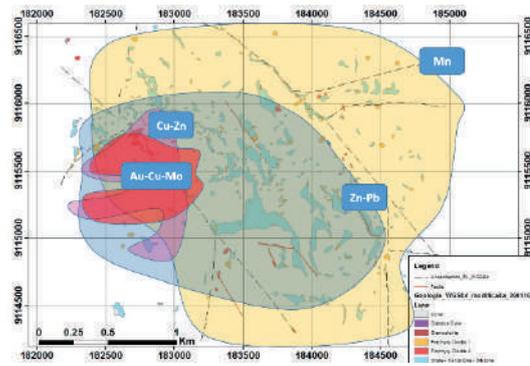
Anomalia de Temperatura

	Pre-mineral	Mineral	Post-mineral	Supergeno
Minerales de Mena	Pirita	Abundante	Local	Trazas
	Asenopirita	Abundante	Local	Trazas
	Calcopirita	Abundante	Local	Trazas
	Tetraedrita	Abundante	Local	Trazas
	Molibdenita	Abundante	Local	Trazas
	Galena	Abundante	Local	Trazas
Minerales de Alteración	Edalerita	Abundante	Local	Trazas
	Cuarzo 1	Abundante	Local	Trazas
	Cuarzo 2	Abundante	Local	Trazas
	Sericita/illita	Abundante	Local	Trazas
	Clorita	Abundante	Local	Trazas
Mineralización	Kaol-Sm-Dk	Abundante	Local	Trazas
	Fe-Ox (Go-Hm-Ja)	Abundante	Local	Trazas
	Au	Abundante	Local	Trazas
				Cobre

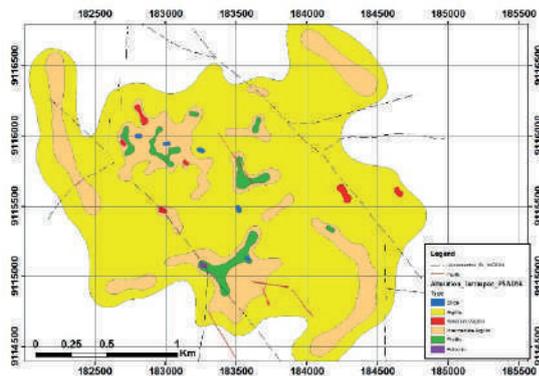
Legend: — Abundante — Local - - - - Trazas

**Inclusiones Fluidas: Microtermometría:**

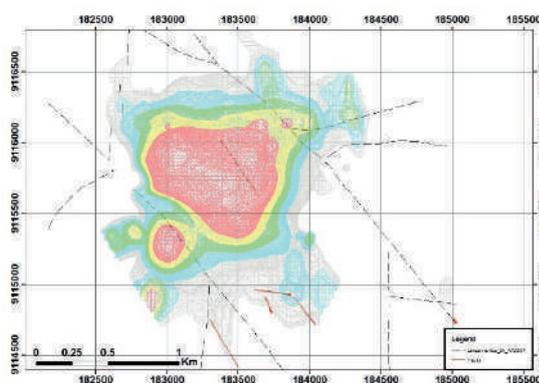
A continuación, se muestra un cuadro que resume las variables obtenidas mediante el estudio microtermométrico, donde la temperatura se encuentra entre (220°C - 300°C) y salinidad (2.5% - 5.6 %). Cuadro modificado de Wilkinson, 2001.



Zonación Geoquímica



Espectroscopía



Anomalia de Geofísica-Magnetometría

- En términos de exploración, se determinó 3 targets y uno con alto potencial debido a tener las mayores temperaturas (gradiente de temperatura de 230 ° C en el borde exterior a 290 ° C), anomalías geoquímicas (de Mn-Pb-Zn distal a Cu-Mo-Au en el objetivo principal), zonación en espectroscopía (halo de alteración argílica a filico, con cambios de absorción en los 2200 nm Al-OH, sobreimpuesto por alteración filica del sistema epitermal de baja a intermedia sulfuración) y anomalía magnetométrica, que sugiere un cuerpo a profundidad.

## REFERENCIAS

**WILKINSON, J.J. 2001.** Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. LITHOS 55 (2001) 229-272.

**Frezzotti et al. 2012.** Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis.

## CONCLUSIONES

- La mineralización de oro y cobre en Calama, están relacionados a las estructuras correspondientes a un sistema epitermal de baja a intermedia sulfuración, sobreimpuesto a un sistema pórfido diorítico. Donde, el Sistema Epitermal muestra (3) etapas claras de mineralización, la etapa mineral temprana relacionado a los minerales de baja sulfuración como arsenopirita y pirrotita en trazas, son los que mejor correlacionan con el oro. Mientras, en la etapa mineral tardía se ve un aumento de la sulfuración del sistema, evidenciado por los minerales calcopirita, tenantita y esfalerita, los cuales se correlacionan con el aumento del contenido de cobre y azufre en el sistema.
- Los estudios de microtermometría muestran que los fluidos hidrotermales responsables de la mineralización de oro y cobre, tuvieron temperaturas de 220°C a 300°C y salinidades de 2.5% a 5.6 %, correspondiente a un sistema epitermal. El análisis raman en la fase vapor de las inclusiones fluidas, corroboran condiciones reductoras en el fluido por influencia de la roca caja, Formación Chicama.