# TÍTULO

# METALOGENIA DEL BATOLITO ANDAHUAYLAS – YAURI Y SUS IMPLICANCIAS EN LA EXPLORACIÓN DE PÓRFIDOS Cu – Au

# METALLOGENY OF ANDAHUAYLAS - YAURI BATHOLITH AND THEIR IMPLICATIONS IN THE EXPLORATION OF Cu – Au PORPHYRY SYSTEMS

COMITÉ DE GEOLOGÍA

AUTORES

MSc. RIVERA, Raymond; MSc. ACOSTA, Jorge; PhD. Chul – Ho Heo; PhD. Ryoo Chung – Ryul; MSc. BUSTAMANTE, Alberto; Bach. VIILLARREAL, Eder; Ing. SANTISTEBAN, Alexander
rrivera@ingemmet.gob.pe; jacosta@ingemmet.gob.pe; chheo@kigam.re.kr; ryoocr@kigam.re.kr; albustaro@gmail.com; evillarreal@ingemmet.gob.pe; asantisteban@ingemmet.gob.pe

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
(INGEMMET)
Dirección de Recursos Minerales y Energéticos
Programa de Metalogenia
Av. Canadá 1470 San Borja – Lima
Teléfono (51 – 1) 6189800, anexo 145
Fax (51 – 1) 2254540

**LIMA – 2011**

**RESUMEN**

*INGEMMET a través de la Dirección de Recursos Minerales y Energético – Programa de Metalogenia firmó un convenio de cooperación internacional con el Servicio Geológico de Corea (KIGAM), con el propósito de evaluar el potencial de los depósitos minerales en el Batolito Andahuaylas – Yauri. Esta investigación se llevó a cabo durante el año 2010 e incluye interpretaciones metalogenéticas usando algunas herramientas geológicas como geocronología, isótopos radiogénicos, geoquímica de rocas y sedimentos, petromineralogía y geología estructural.*

*La importancia de esta zona ha ido incrementado con el pasar de los años, durante los cuales algunos trabajos de exploración se han llevado a cabo y en consecuencia se han descubierto varios depósitos minerales. Considerada además como una posible extensión de algunas de las franjas cupríferas de Chile el batolito Andahuaylas – Yauri ha demostrado tener potencial en una serie de tipos de depósitos entre los cuales destacan los pórfido de Cu – Au y Cu – Mo, skarn y vetas de Au. Cerca del 70% del área que cubre este batolito actualmente se encuentra concesionada por diferentes compañías mineras. Inicialmente fue considerada como una zona rica en Fe, pero luego con varios estudios regionales se llegó a la conclusión que esta zona tiene un gran potencial para hospedar depósitos relacionados a sistemas profiríticos.*

*La reinterpretación de los estudios regionales de "stream sediments" realizados por INGEMMET (Franja 2 y 3) ha permitido elaborar mapas isovalóricos de tendencia geoquímica (Geosoft – Módulo Chimera). Estos mapas muestran una clara tendencia con sentido NO de los Cluster de Tintaya, Las Bambas, Cotabambas donde se ha reconocido un corredor geoquímico con alto potencial para explorar depósitos minerales.*

*Los estudios de geoquímica de rocas (elementos mayores y traza) y su comparación con otros batolitos mineralizados en el Perú ha permitido interpretar que el batolito Andahuaylas – Yauri pertenece a los granitoides tipo I o de la serie Ilmenita con una fuerte tendencia para la mineralización de Cu – Au – Mo. Las tendencias geoquímicas en los gráficos catiónicos muestran una clara evolución geoquímica.*

*Los estudios petromineralógicos han permitido mejorar más las interpretaciones geoquímicas, permitiendo conocer con mucho más detalle las facies intrusivas que afloran en el batolito Andahuaylas – Yauri. Los estudios de difracción de rayos X confirmaron la presencia de sólo calcita en las vetas con calcopirita lo que ha permitido inferir la proximidad al sistema porfirítico.*

*Las interpretaciones estructurales de gabinete como de campo han delineado zonas potenciales para hospedar sistemas porfiríticos. Estas zonas generalmente se encuentran asociadas a fallas regionales con movimiento de rumbo (strike slip). En el curso de estas fallas se han podido reconocer "jogs" estructurales que podrían fácilmente alojar a un sistema porfirítico como es el caso de los pórfidos miocénicos (Minas Conga – El Galeno) en el norte del Perú – Región Cajamarca (Rivera, 2008).*

*Los estudios geocronológicos (Ar – Ar) realizados sobre el cluster de Cotabambas han permitido interpretar que estos depósitos porfiríticos (Au – Cu) se encuentran en el tiempo estrechamente relacionados (Ccalla: 35.9 $\pm$ 0.4; Azulccacca: 35.3 $\pm$ 0.7). Estos nuevos datos geocronológicos permiten inferir que todos estos pórfidos pertenecen a un mismo sistema porfirítico.*

*Los estudios isotópicos Pb – Pb y Rb – Sr han permitido interpretar que los pórfidos se encuentran dentro del campo orogénico con una clara influencia de la corteza superior. La comparación isotópica (estroncio inicial – $Sr_i$) con los pórfidos de Chile han permitido inferir las expectativas de que el cluster de Cotabambas pertenezca a un sistema porfirítico con tonelaje moderado (700, 000 Tn de Cu).*

*El producto Final de esta investigación metalogenética fue el reconocimiento de algunas zonas con potencial para hospedar depósitos porfiríticos, como es el caso de Colca y Jalaoca, actualmente en trámite para convertirse en ANAP (Área de No Admisión de Petitorios) a favor de INGEMMET. La zona de Colca ha mostrado estilos de mineralización relacionada a los sistemas porfiríticos en facies intermedias a próximales con el reconocimiento de venillas tipo M, A y B y mineralización diseminada de calcopririta en facies porfiríticas. La presencia de venillas de calcita con grandes cantidades de calcopirita + especularita infiere la parte intermedia a proximal de algún sistema porfirítico. Es muy importante indicar que el prospecto Huallpachaca (ANAP colca) se encuentra dentro del corredor estructural que controla los pórfidos de Au – Cu del cluster de Cotabambas ubicados aproximadamente a 5.8 kilómetros en dirección SW.*

*Actualmente estas zonas vienen siendo evaluadas por INGEMMET para luego ser transferidas a Pro – Inversión.*

## 1 INTRODUCCIÓN

El origen y la evolución de los depósitos minerales en el Perú están relacionados a una serie de eventos magmáticos asociados a los procesos de subducción que tienen su origen en la fosa peruano chilena. Un importante pulso de esta actividad magmática está representado por el batolito Andahuaylas – Yauri. Mas de una docena de distritos mineros se encuentran localizados hacia el oeste, sur y suroeste de la ciudad de Cusco, resaltando una alongada provincia que se extiende por aproximadamente 300 km, desde Andahuaylas por el NW hacia Yauri por el SE. Un número importante de ocurrencias ha sido nombrado en esta zona, pero para su mejor entendimiento ellas han sido nombradas en cluster, las cuales contienen más de un depósito mineral y más de un estilo de mineralización con características geológicas que indican que ellos se encuentran relacionados entre sí. Por ejemplo: El cluster de Tintaya, Las Bambas, Katanga, Cotabambas, Morosayhuas (Perelló et al., 2003). Todos los depósitos arriba mencionados están localizados en la parte oriental de la zona de estudio, sin embargo la presencia de muchas ocurrencias es también conocida en la parte occidental de la zona de estudio, tales como: Angostura, trapiche, Utupara, Santa Rosa de Virundo, Lahuani, Antilla, San Diego, Yuringa, Jara – Jara, Leonor, Los Chancas, Haquira, cristo de los Andes, etc.
Desde el punto de vista geocronológico este belt (Batolito Andahuaylas – Yauri) es actualmente considerado como del Eoceno – Oligoceno, donde importantes depósitos pueden ser encontrados.
La contribución de esta investigación se basa en la presentación e interpretación de nuevos datos geoquímicos, geocronológicos, isotópicos, estructurales y petromineralógicos que ayudan a entender la metalogenia del batolito Andahuaylas – Yauri, sirviendo como guía para la prospección y exploración de depósitos minerales.

### 1.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Cordillera Occidental de los andes peruanos, específicamente entre los departamentos de Cusco y Apurimac. El área incluye doce cuadrángulos a escala 1: 100,000 y se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas:

13° 00’ 00’’ – 15° 00’ 00’’ latitud sur
74° 00’ 00’’ – 71° 00’ 00’’ longitud oeste

La franja Andahuaylas – Yauri cubre un área aproximada de 25,000 kilómetros cuadrados y está localizada a una distancia aproximada de 300 kilómetros desde la fosa peruano – chilena. Regionalmente se localiza al sureste de la deflexión de Abancay (Marocco, 1978). Metalogenéticamente el batolito Andahuaylas -. Yauri se encuentra dentro del dominio del arco principal (Clark et al., 1990), específicamente dentro de la franja XV conocida como: Pórfidos – skarn Cu – Mo (Au) y depósitos de Au – Cu – Fe relacionado a intrusivos del Eoceno – Oligoceno (Quispe et al., 2008).

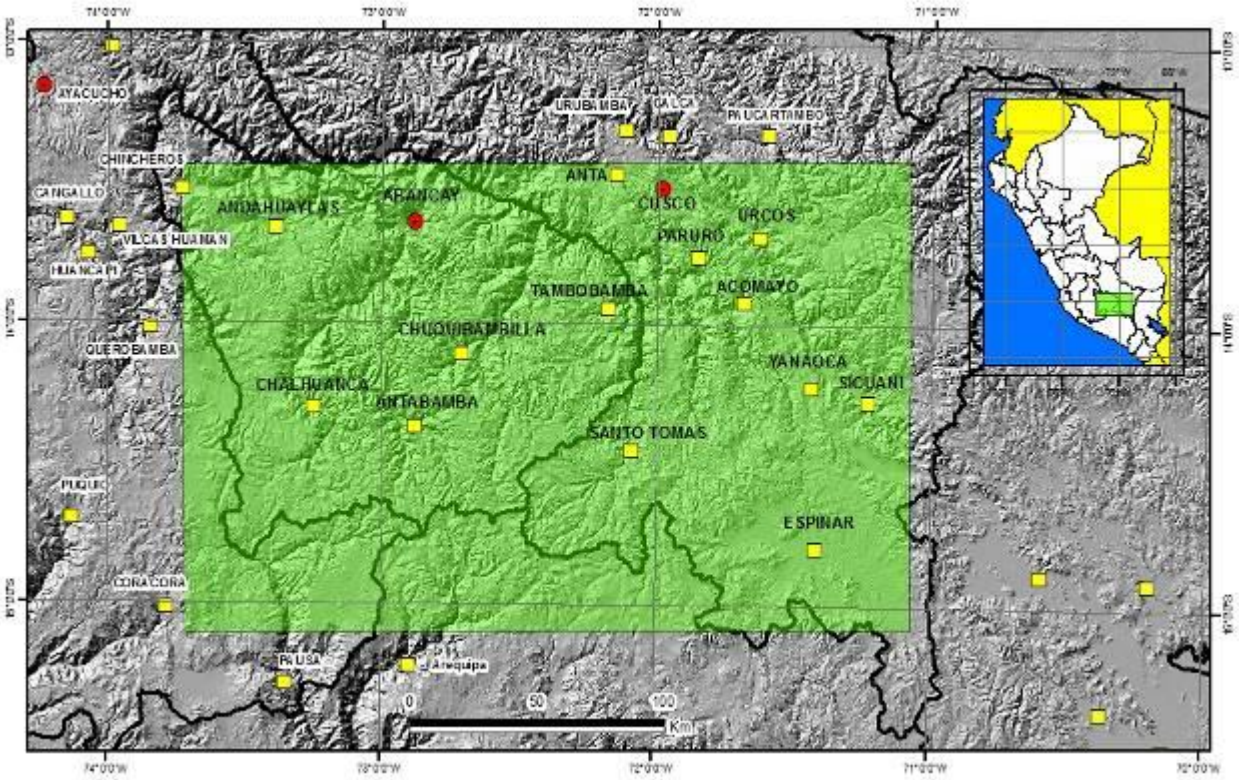


Fig. 01.- Mapa de ubicación de la zona de estudio.

## 1.2 OBJETIVOS

La siguiente investigación lleva como objetivo principal conocer el origen y distribución de los depósitos minerales en el batolito Andahuaylas – Yauri (Metalogenia), así como de evaluar el potencial de algunas zonas que presenten característica geo - económicas muy interesantes (Geología Económica).

## 1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

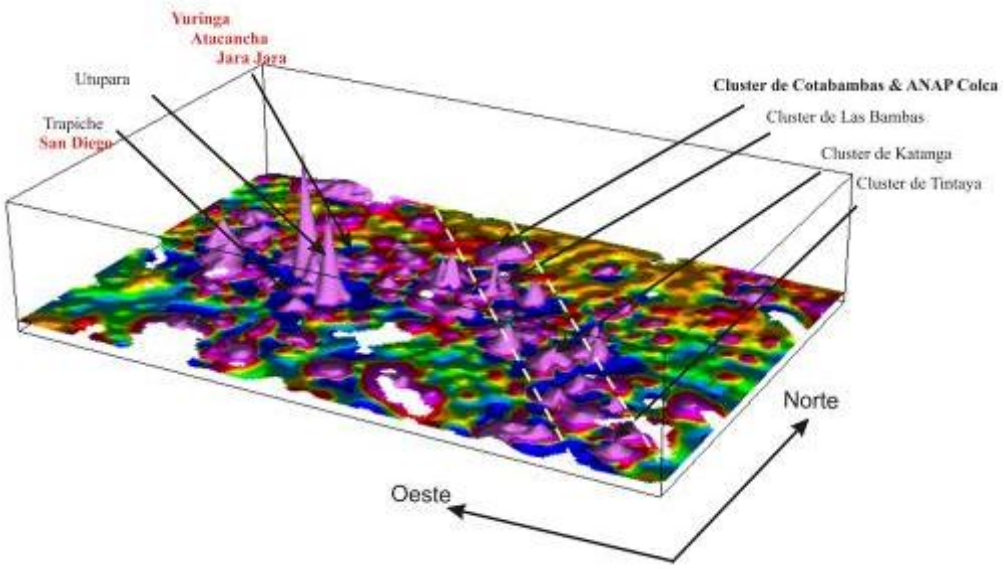
La investigación de esta zona comenzó con una intensa recopilación de información geológica la cual luego fue sintetizada en diferentes folios, entre los que destacan: geología regional, ubicación de depósitos minerales, geología estructural, geocronología, rocas intrusivas - volcánicas, concesiones mineras, geoquímica de sedimentos y topográfico. Toda esta información fue reinterpretada a la luz de los nuevos conceptos de exploración en sistemas porfiríticos (Sillitoe 2010). El resultado de la interpretación de los folios regionales fue la selección de algunas zonas interesantes entre las que destaca el cluster de Cotabambas y sus alrededores. Entonces fue sobre el cluster de Cotabambas que se decidió hacer análisis isotópicos (Pb – Pb y Rb – Sr) además de análisis geocronológicos (Ar – Ar).
Los trabajos de isótopos de Pb se realizaron sobre los principales estadíos de mineralización de los pórfidos de Ccalla, Huaclle y Azullccaca (Cluster de Cotabambas), muestreando para esto solamente los sulfuros de las venillas tipo “B”, para luego en gabinete separar exclusivamente la pirita. El propósito de este análisis fue de conocer la fuente de la mineralización de los pórfidos de Cu – Au del cluster de Cotabambas.
Los trabajos de Rb – Sr se realizaron sobre la tenue alteración fílica que presentaban estos pórfidos. Para este tipo de análisis se tomaron dos tipos de muestras, la primera con mucho sericita y la segunda con mucha clorita. El objetivo fue ajustar la curva isocrónica con el propósito de tener la edad de los pórfidos y además conocer los valores de Sr inicial para correlacionarlos con los valores de Sr inicial de su franja proyectada en Chile y estimar tonelajes.

Finalmente los trabajos de geocronología Ar – Ar fueron realizados solamente en los pórfidos de Ccalla y Azullccaca debido a la falta de biotita secundaria en los otros sistemas. Todos estos análisis fueron realizados por el Servicio Geológico de Corea del Sur (KIGAM) en el Korea Basic Sciences Institute – Division of Earth and Environmental Science.
La conjugación de toda esta información nos permitió definir una zona con alto potencial conocida como Colca, la cual colinda con los denuncios relacionados al cluster de Cotabambas. Esta zona fue evaluada en una segunda oportunidad realizándose trabajos de stream sediment local, muestreo de rocas y mapeo de litologías con el propósito de verificar su potencial geológico. Finalmente los resultados prospectivos de esta zona son muy interesantes.

## 2 RECOLECCIÓN DE DATOS

### 2.1 Stream Sediment Regional

Fue una de las principales herramientas geológicas que se utilizó para la interpretación de blancos de exploración. En esta oportunidad se utilizaron los datos geoquímicos de las Franjas 2 y 3 (INGEMMET). Estos datos (2,020 muestras de sedimentos de quebradas) fueron interpretados mediante mapas isovalóricos realizados por el sofware Geosoft (módulo Chimera). Los mapas isovalóricos también fueron proyectados en 3D con el propósito de observar mejor las tendencias geoquímicas. Una de las principales interpretaciones de estos mapas (Au) fue una tendencia geoquímica de orientación NW. Dentro de este corredor podemos observar importantes cluster como el Tintaya, Katanga, las Bambas y Cotabambas.




co del Au en 3D obsérvese como los cluster coinciden espacialmente con la tendencia
ivera et al., 2010).

## 2.2 Geoquímica de Rocas

Actualmente es muy conocido el papel que desempeña la geoquímica de rocas en la exploración minera. Con el pasar de los años esta herramienta geológica se ha ido fortaleciendo, tanto desde el punto de vista de las técnicas analíticas, como también desde el punto de vista interpretativo. Es muy importante recordar que una buena interpretación geoquímica siempre va de la mano con estudios petromineralógicos.

El estudio del magmatismo del batolito Andahuaylas – Yauri requiere un profundo conocimiento de la geoquímica y la petromineralogía de las diferentes rocas intrusivas que afloran en la zona. Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron los sofwares GCDkit e IGEPET, como el estudio de más de 60 secciones delgadas.

En resumen el magmatismo del Batolito Andahuaylas – Yauri es del tipo subalcalino (Fig. 03A) específicamente dentro del rango Calco – alcalino, con medio a alto cometido de potasio (Fig. 03B). La amplia correlación positiva entre $SiO_2$ (eje x) vs $Na_2O$ + $K_2O$ (eje y) en los diferentes grupos de rocas (Fig. 3A y 3C) indican una profunda diferenciación magmática, encontrándose desde rocas básica a félsicas.

Perelló et al., (2003) interpretó estos dos grupos de rocas como diferentes pulsos magmáticos desarrollados durante el Eoceno a Oligiceno (48 a 42 Ma y 42 a 30 Ma, respectivamente). Se interpreta que los diferentes contenidos de potasio se debe quizás a diferentes grados de contaminación cortical. También es muy claro que el contenido de sílice tiene un amplio rango que va desde 51% a 68%. El gráfico TAS (Fig. 3C) muestra que el Batolito Andahuaylas – Yauri tiene las muestras de más amplio rango de contenido de sílice que van desde gabros, dioritas, cuarzo dioritas y granodioritas. Por otro lado las muestras tomadas en el cluster de Cotabambas presentan un rango de contenido de sílice mucho más restringido (dioritas, monzonitas, cuarzo dioritas y granodioritas, encontrándose la mineralización relacionada a monzonitas cuarcíferas. Por otro lado los gráficos de clasificación catiónica (Debon y Lefort, 1988), permiten comparar el batolito Andahuaylas – yauri con otros batolitos del Perú. En primer lugar se puede observar claramente que el batolito Andahuaylas – Yauri presenta un amplio rango geoquímico ubicado en el limite del campo IV y V del campo metaluminoso, como también en el campo II del ambiente peraluminoso.

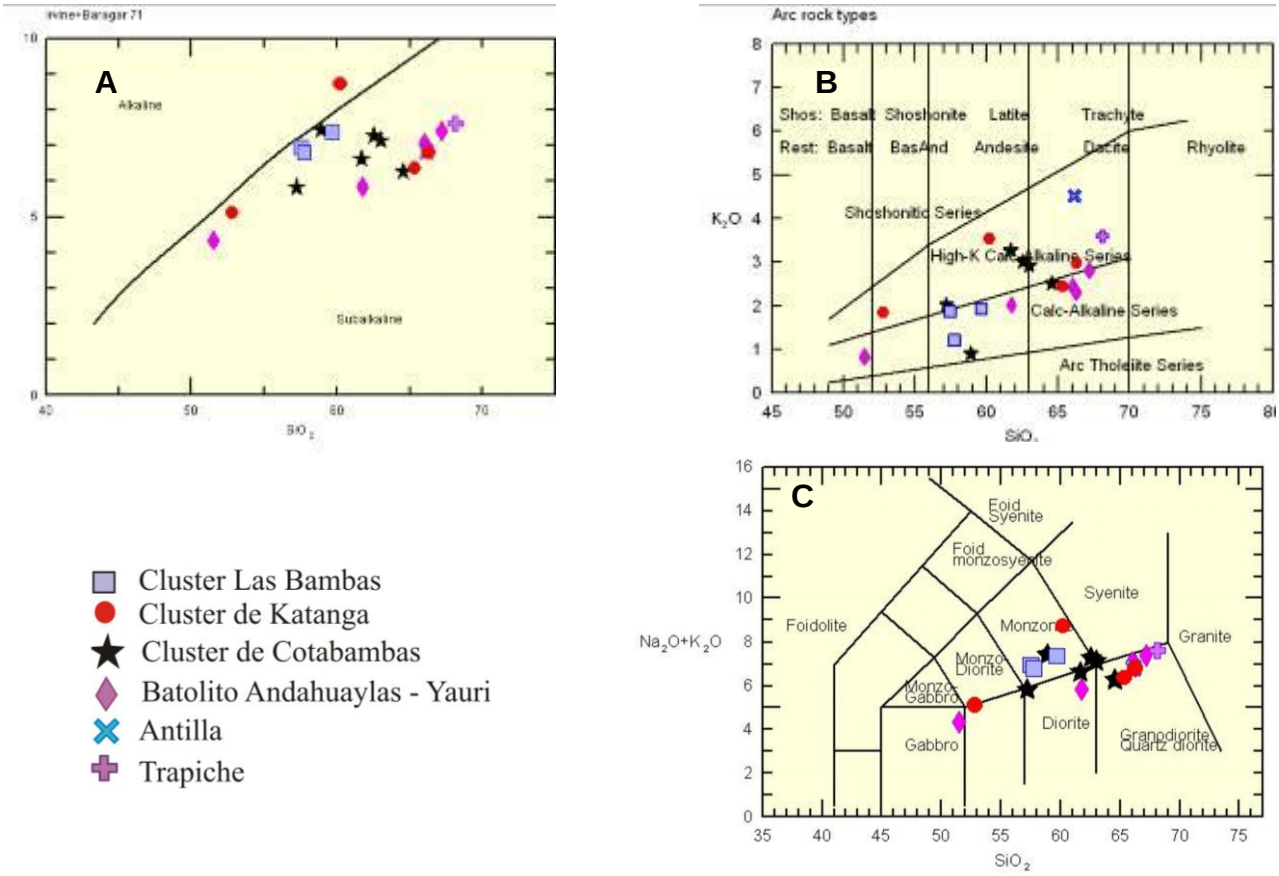



Fig.03.- A) Gráfico de Alcalinidad (Irvine & Baragar, 1971). B) Gráfico $SiO_2$ vs $K_2O$ (Pecerillo & Taylor, 1976) C) Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986)

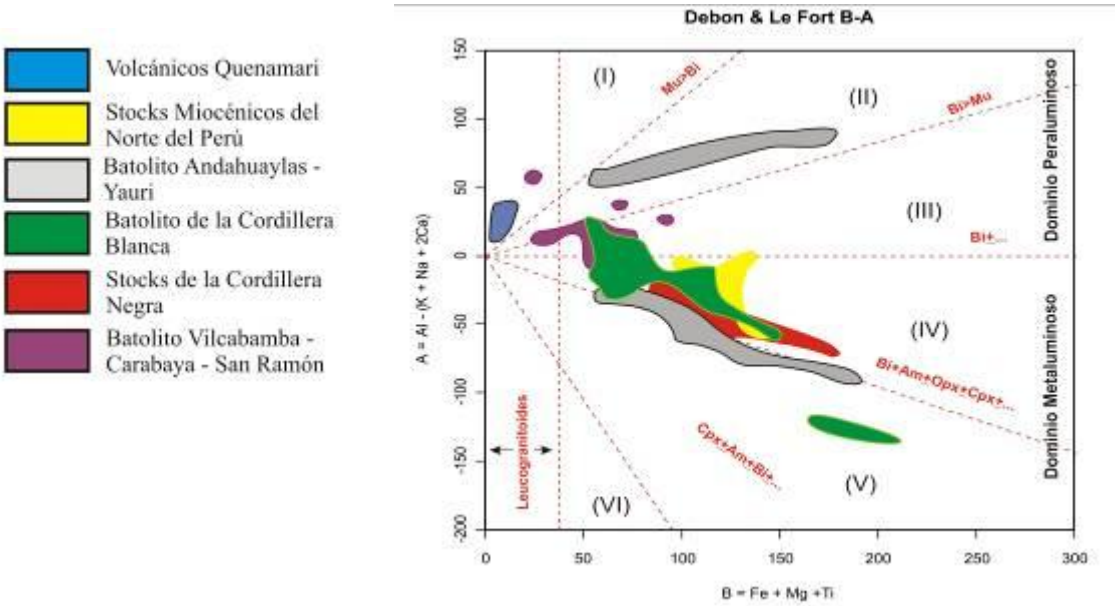



Fig. 04.- Diagrama Catiónico de Lebon & Lefort (1988).

**2.3 Petromineralogía**

Los estudios petromineralógicos permitieron definir mucho mejor los diferentes tipos de rocas intrusivas que afloran en el batolito Andahuaylas – Yauri. Aunque la composición dominante en el batolito es diorita (Fig. 5A), las variaciones locales en su mineralogía, permiten inferir la presencia de monzodioritas (Fig. 5D), tonalitas (Fig. 5C), dioritas cuarcíferas (Fig. 5B). Algunas rocas intrusivas que inicialmente fueron interpretadas mediante análisis geoquímicos (TAS) como dioritas cuarcíferas, fueron reinterpretadas mediante los estudios petromineralógicos, el resultado fue que el exceso de sílice se debía a venillas hidrotermales milimétricas que afectaban la composición original de la roca intrusiva, siendo posteriormente confirmada esta roca como una diorita. Otro caso es el cluster de Cotabambas las granodioritas regionales pueden tener facies tonalíticas, como por ejemplo, en el diagrama TAS no existe un campo tonalítico, siendo ploteadas estas rocas dentro del campo granodiorítico. Sin embargo como las tonalitas y granodioritas tienen el mismo contenido de cuarzo, la única diferencia la puede marcar el contenido de feldespato potásico cristalizado. Entonces al observar al microscopio las secciones delgadas se aprecia que no existe más del 5% de feldespato potásico cristalizado, por lo tanto según el diagrama de Streckeisen estas roca pertenece al campo tonalítico. Se interpreta que el exceso de potasio en los análisis geoquímicos se debe quizás a la biotita que se presenta como cúmulos de minerales ferromagnesianos (Biotita).

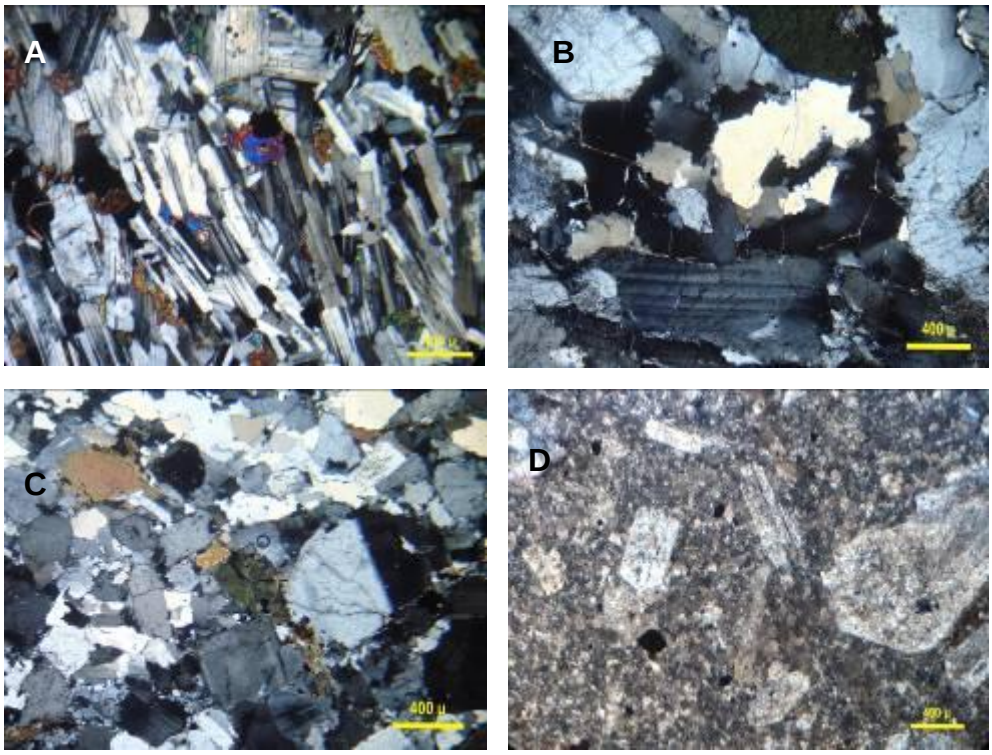



Fig. 05.- Microfotografías de secciones delgadas en el Batolito Andahuylas - Yauri

## 2.4 Interpretaciones Estructurales

El batolito Andahuaylas – Yauri está dominado por un conjunto de fallas regionales y lineamientos de rumbo NW. Localmente algunos de estos sistemas se encuentran cortados al parecer por un segundo conjunto de fallas de rumbo NE. Estas fallas por lo general truncan y desplazan a la fallas regionales de rumbo andino, como es el caso de la fallas Huaclle – San José y la falla Azulccacca, este sistema de fallas forma un corredor estructural que domina por completo la disposición espacial del cluster de Cotabambas (pórfidos de Cu – Au). Es muy importante también reconocer que estas fallas regionales en el curso de su longitud forman algunas estructuras o flexiones estructurales conocidas como "*jogs*".

La importancia de estas estructuras recae en el hecho que se encuentran asociadas a fallas de rumbo o strike slip, formando de esta manera otras estructuras secundarias sujetos a regímenes de transpresión y trasntensión muy importante para el emplazamiento de depósitos porfiríticos. ejemplo: los pórfidos miocénicos del norte del Perú (Rivera, 2009).

Interpretaciones estructurales han permitido inferir que el corredor estructural del cluster de Cotabamabas quizás se encuentre relacionado asociado a un sistema strike slip con movimento destral. La continuidad de este corredor estructural es una zona con alto potencial geológico.

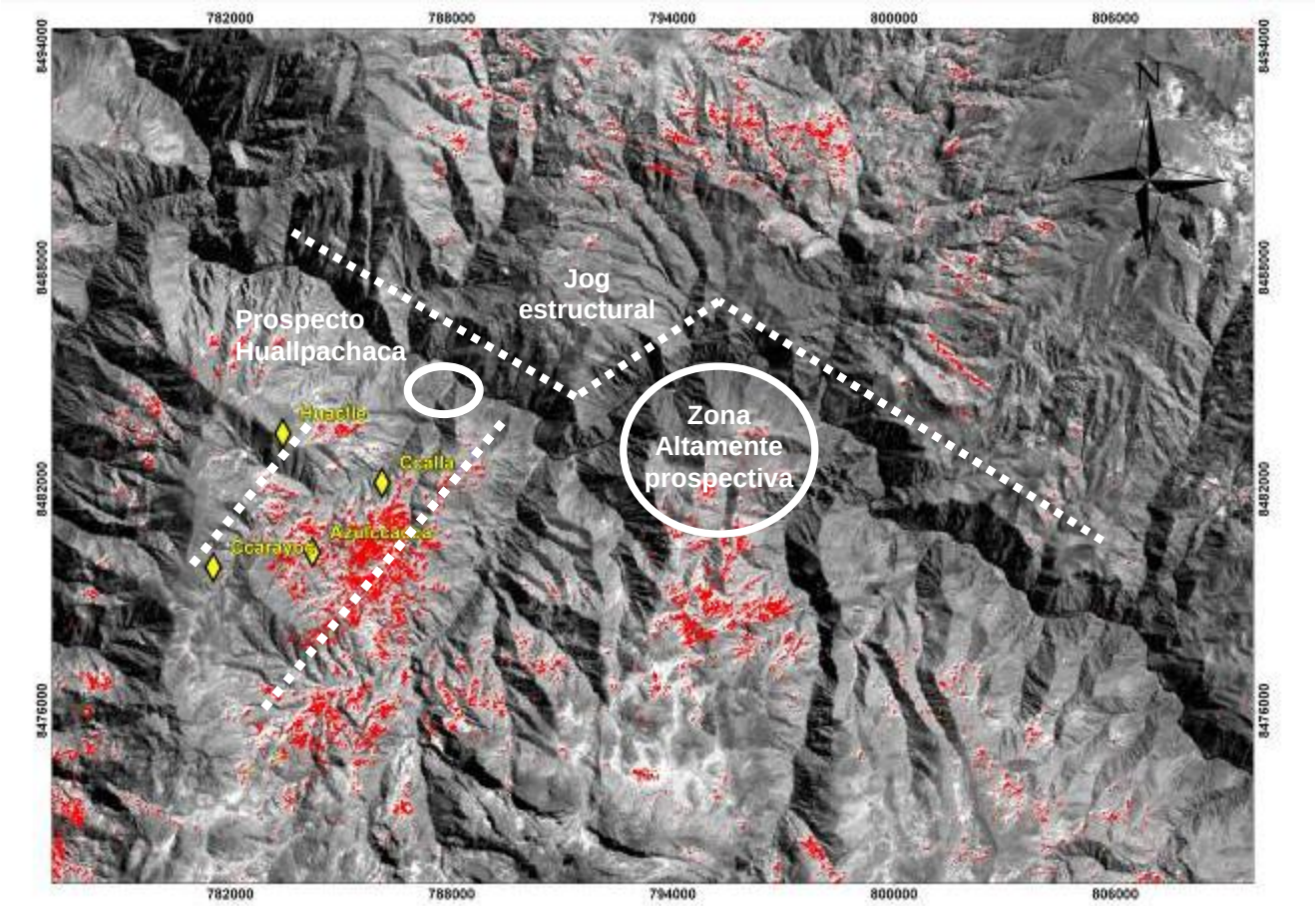



Fig. 06.- Controles estructurales regionales en el batolito Andahuaylas – Yauri. Nótese el corredor estructuras del cluster de Cotabambas en dirección NE y el jog estructural en la continuidad de río Apurimac probablemente asociado a la falla Cotabambas.

## 2.5 Interpretaciones Regionales

Todos estos trabajos y sus respectivas interpretaciones regionales (*stream sediment*, geoquímica, petromineralogía y estructural), acompañados con evaluación de campo (presencia de mineralización) nos permitieron separar algunas zonas que aparentan tener un buen potencial geológico. Entre las principales zonas tenemos el cluster de Cotabambas (pórfidos de Cu – Au) y sus alrededores, en especial la zona del *jog* estructural y la continuidad del corredor estructural (Fig. 06).

Entonces es así que se decidió evaluar el cluster de Cotabambas y sus alrededores con estudios geológicos más al detalle (*stream sediment*, geoquímica de rocas, estructural), acompañado por otros tipos de estudios especiales como son: geocronología (Ar – Ar), geoquímica isotópica (Rb – Sr, Pb – Pb). Esta zona inmediatamente fue separada por INGEMMET como un ANAP (área de no admisión de petitorios), encontrándose actualmente en evaluación geológica.

**2.6 Estudios Geocronológicos**

Mediante estudios geocronológicos mucho más exactos (Ar – Ar) se decidió probar la hipótesis de que los pórfidos que conforman el cluster de Cotabambas pertenecen a un mismo pulso magmático. Para este tipo de estudio se decidió muestrear biotita secundaria o hidrotermal presente en la alteración potásica del pulso mineralizante de cada pórfido (main porphyry) (Tabla 01). Los resultados geocronológicos demostraron que la hipótesis era la correcta, encontrándose la edad de 35.9 $\pm$ 0.4 para el pórfido de Ccalla y 35.3 $\pm$ 0.7 para el pórfido de Azullccacca. Las edades plateau (Fig. 07 y 08) demostraron ser muy homogéneas y representativas, por lo que los datos se consideran muy exactos.

El error geocronológico en cada uno de los análisis superponen la edad de la muestras y tampoco se puede descartar la hipótesis de que ambos pórfidos sean uno sólo, el cual fue desplazado por una fallas de rumbo (Falla Azullccacca) (Perelló, 2001).

Tabla 01.- Muestras para estudios geocronológicos Ar – Ar.

| Muestra | Depósito | Cluster | Mineral Estudiado | Ubicación de la muestra | Método |
|---|---|---|---|---|---|
| Kigam-2010-020 | Ccalla Porphyry (Au - Cu) | Cotabambas | Biotita | 206.8 – 210 m. / CB 25 (drill) | Ar - Ar |
| Kigam-2010-010 | Azullccaca Porphyry (Au-Cu) | Cotabambas | Biotita | 200 – 203 m. / CB 20 (drill) | Ar - Ar |

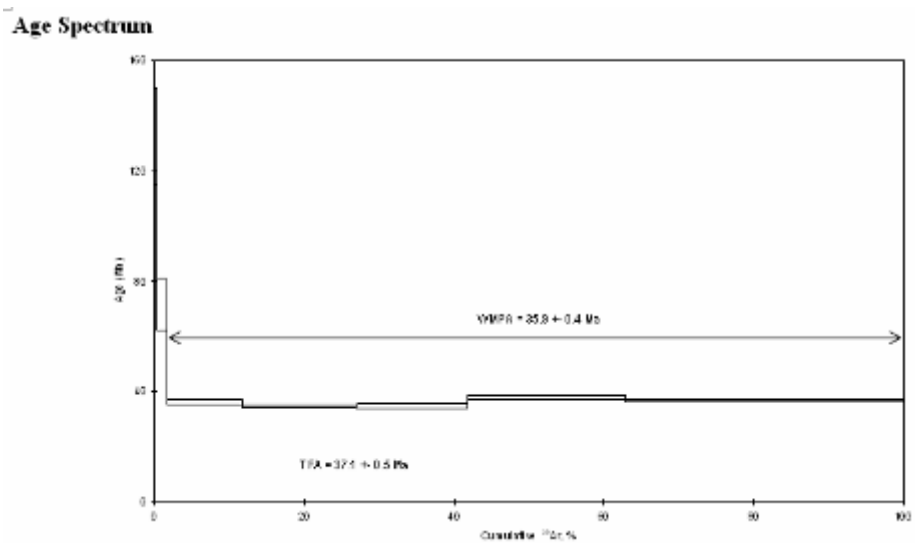



Fig. 07.- Edad Plateau para el pórfido de Ccalla

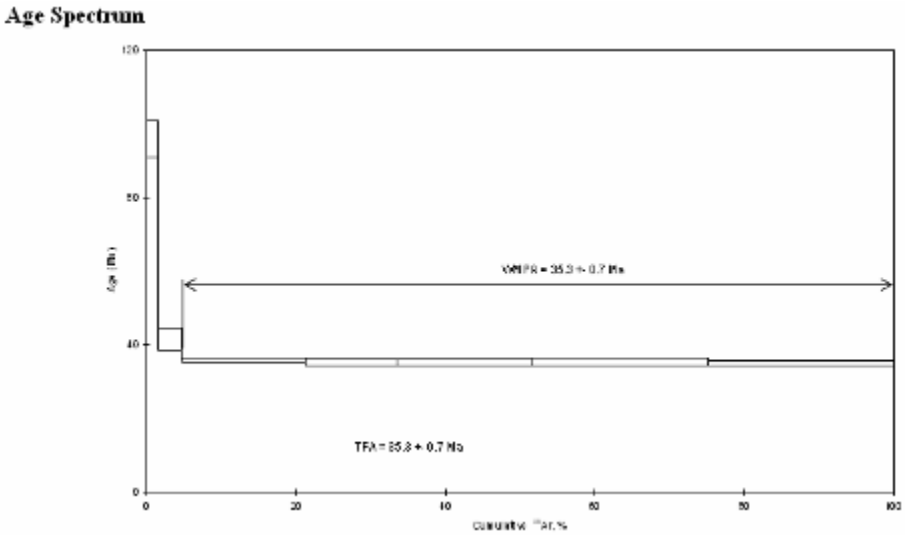



Fig. 08- Edad Plateau para el pórfido de Azullccacca

**2.7 Estudios Isotópicos Pb – Pb**

Este tipo de estudios nos permitió conocer el origen o la fuente de la mineralización. Para este tipo de investigaciones se muestrearon las venillas tipo "B" de la alteración potásica del principal pulso mineralizante en cada pórfido. El mineral elegido para el análisis fue la pirita, el cual se encontraba físicamente asociado con la calcopirita. La pirita fue separada en los laboratorios de INGEMMET y analizada en los laboratios geocronológicos de KIGAM. Los resultados isotópicos demuestran que los pórfidos del cluster de Cotabambas se ubican exactamente en la curva isotópica del orógeno siendo inclusive mucho menos radiogénico que las menas de otros depósitos minerales del batolito Andahuylas – Yauri e inclusive menos radiogénico que el pórfido de Cu – Mo de Utupara (Bustamante, 2008).

Tabla 02.- Muestras para estudios isotópicos Pb – Pb.

| Muestra | Depósito | Cluster | Mineral Estudiado | Ubicación de la muestra | Método |
|---|---|---|---|---|---|
| Kigam-2010-023 | Ccalla Porphyry (Au - Cu) | Cotabambas | pirita | 43 – 50 m / CE - 6 | Pb – Pb |
| Kigam-2010-004 | Huaclle Porphyry (Au -.Cu) | Cotabambas | pirita | 78.50 - 79.35 m/CB-33 | Pb – Pb |

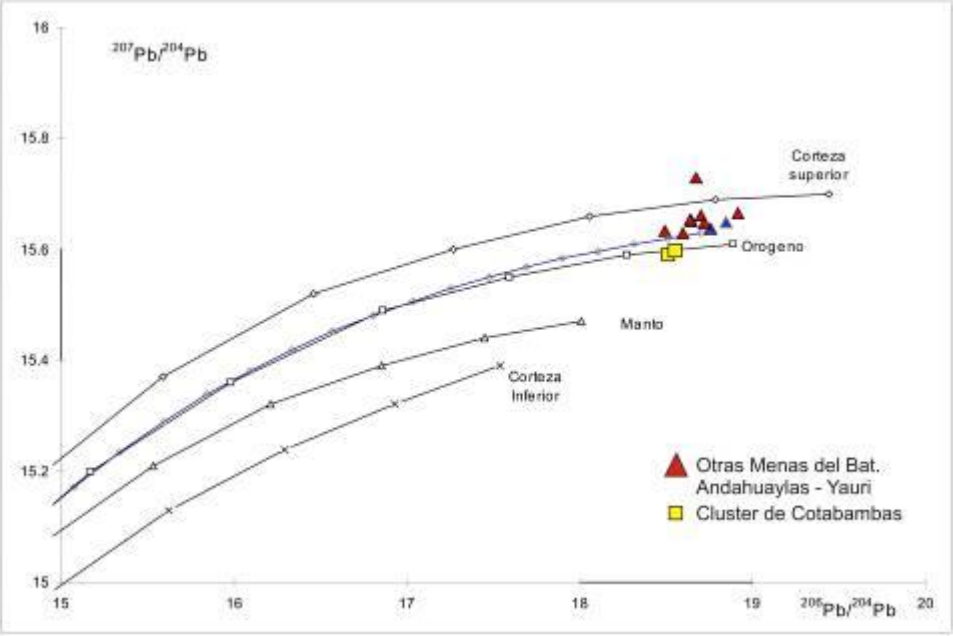



Fig. 09.- Diagrama de composiciones isotópicas de 207Pb/204Pb vs 206Pb/204Pb para las muestras de mena y roca fresca del área NW del Batolito de Andahuaylas-Yauri. Se usó como referencia las curvas de evolución isotópica de Pb establecidas para el modelo Plumbotectónico Uranogénico de Zartman & Doe (1981)

## 2.8 Estudios Isotópicos de Estroncio inicial ($^{87}Sr/^{86}Sr$)i

La relación de isótopos de estroncio $^{87}Sr/^{86}Sr$, conocida como estroncio inicial (Sri), se ha utilizado anteriormente para conocer el origen de las rocas y los procesos geológicos a la que estuvieron involucradas. Sin embargo, en la exploración ha venido siendo aplicada para estudiar el potencial de los pórfidos de cobre (Munizaga en Tassinari, 2005).

En la Tabla 02 podemos notar que existe una relación inversa entre la relación $^{87}Sr/^{86}Sr$ y el tonelaje de cobre fino en de los pórfidos de cobre. Se puede ver que Chuquicamata y la Escondida, clasificados como depósitos supergigantes e hipergigantes, tienen los mayores contenidos de cobre (> 20 millones de toneladas finas) y menores cocientes de $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7044-0.7040). Lo contrario sucede con los yacimientos pequeños como Ataspaca, Copaquire y Queen Elizabeth, los cuales tienen los mayores cocientes de $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7082-0.7061).

Los estudios de los isotopos de estroncio inicial en el Cluster de Cotabambas nos han dado como resultado $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0.7050, el cual es menor que aquellos encontrados en los pórfidos pequeños (0.7082-0.7061). Por lo tanto, a pesar que Cotabambas se clasifica como un depósito grande, se puede estimar que tiene potencial para convertirse en un depósito gigante (3 – 10 millones de toneladas finas de cobre).

| Nombre | Edad de mineralización | ($^{87}Sr/^{86}Sr$)i | Toneladas finas de cobre | Tamaño (Clark, 1993) |
|---|---|---|---|---|
| Chuquicamata [1] | 32 | 0.7044 | +43,000,000 | Hipergigante |
| La Escondida[1] | 34 | 0.7040 | 22,500,000 | Supergigante |
| El Abra[1] | 37 | 0.7043 | 10,000,000 | Gigante |
| El Salvador[1] | 41 | 0.7040 | 5,700,000 | Gigante |
| **Cotabambas[2]** | **36** | **0.7050** | **698,900** | **Grande** |
| Ticnamar[1] | 41 | 0.7064 | <200,000 | Mediano |
| Queen Elizabeth[1] | 37 | 0.7061 | <100,000 | Pequeño |
| Copaquire [1] | 36 | 0.7058 | <100,000 | Pequeño |
| Ataspaca[1] | 42 | 0.7082 | <50,000 | Pequeño |

Tabla 02.- Relaciones de isótopos de estroncio inicial con el contenido de cobre (toneladas finas) y edad de mineralización. 1: (Tassinari, 2005).

## 2.9 PRODUCCIÓN RESERVAS Y RECURSOS DE COBRE Y ORO EN EL BATOLITO ANDAHUAYLAS YAURI

De las 23 franjas metalogenéticas que cuenta el Perú, el batolito Andahuaylas-Yauri pertenece a la Franja metalogenética XV de pórfidos-skarns de Cu-Mo (Au, Zn) y depósitos de Cu-Au-Fe relacionados con intrusivos del Eoceno-Oligoceno (Quispe et al., 2007, 2008).

Esta franja metalogenética es una de las más importantes del país por su gran potencial económico, ya que ocupa el tercer lugar en la producción de cobre. De ella se ha extraído desde 1986, cuando entró en operaciones la Mina Tintaya, cerca de 2 Mt de cobre (Acosta et al. 2009) de los 23 Mt que se ha producido en el Perú (Acosta et al., 2010b,c). En primer y segundo lugar se encuentran las franjas XIII del Paleoceno-Eoceno (Cuajone, Toquepala, Cerro verde y Chapi) y XX del Mioceno respectivamente (Fig. 10).

También ocupa el tercer en alojar reservas y recursos de cobre y oro, las cuales llegan a 24 millones de toneladas de cobre (Fig. 11) y 325 toneladas de oro (Fig. 12) que representan el 13% y 7% respectivamente (Acosta 2010a, b, c). Estos recursos están distribuidos principalmente en proyectos mineros como Las Bambas, Antapacay, Los Chancas, Quechua, Trapiche, Antilla, Haquira y Cotabambas principalmente. No obstante, a la fecha las reservas y recursos de oro y cobre casi se han duplicado en esta franja, alcanzando 500 t Au y 40 Mt Cu (com. per. Acosta, 2011)

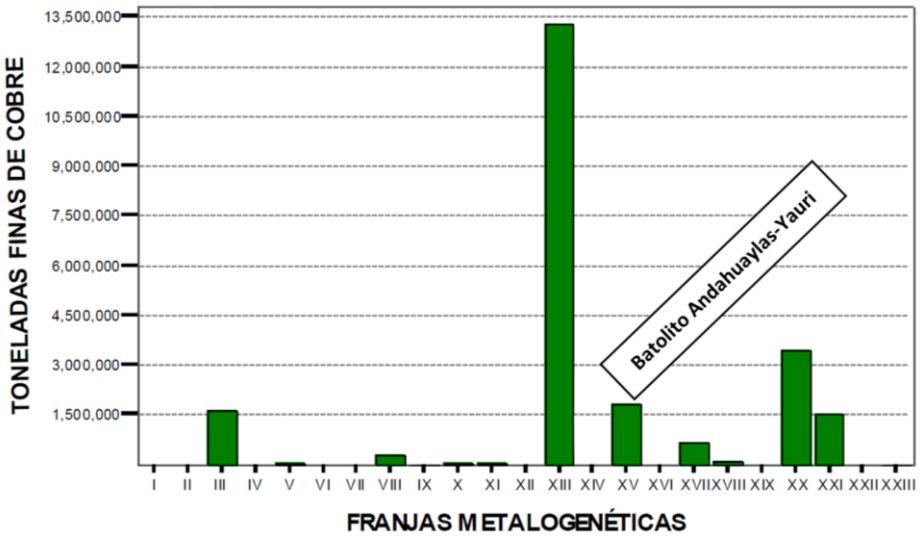



Fig. 10.- Producción de cobre por franjas metalogenéticas (Acosta et al., 2009)

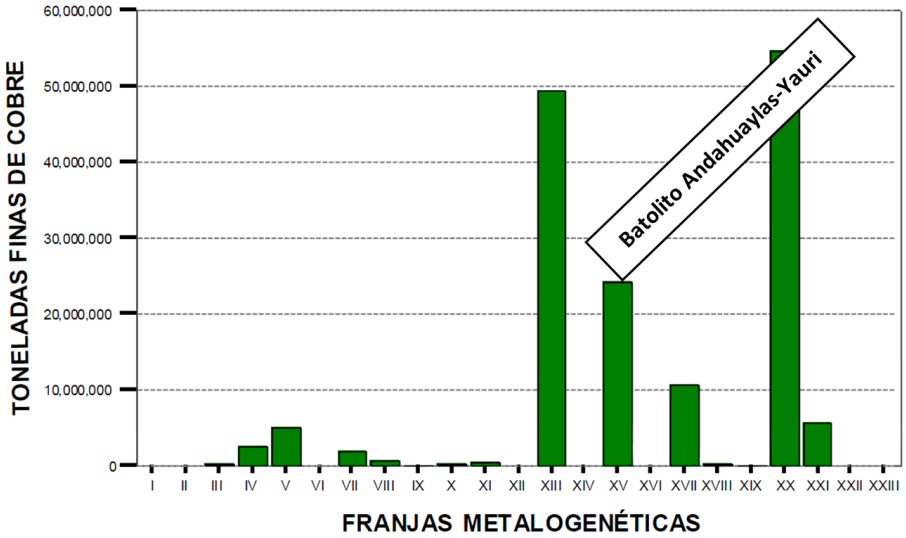



Fig. 11.- Reservas y recursos de cobre por franjas metalogenéticas (Acosta et al., 2010)

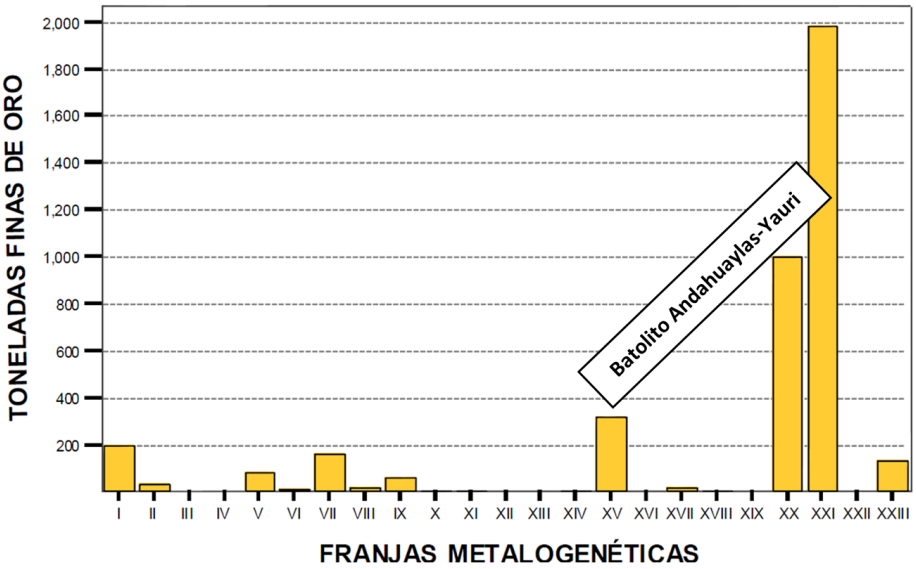



Fig. 12.- Reservas y recursos de oro por franjas metalogenéticas (Acosta et al., 2010)

**3 Prospección Geológica en el ANAP de Colca.-**
Desde el punto de vista regional el ANAP se encuentra ubicado en una falla regional de orientación WNW – ESE que atraviesa el ANAP formando un ***jog*** estructural en la zona central (Fig. 06). Este tipo de estructuras han demostrado a nivel mundial ser favorables para el emplazamiento de depósitos porfiríticos, ejemplo: los pórfidos miocénicos del norte del Perú **(Rivera, 2008).** Observaciones de estrías en la continuidad de la falla han permitido reconocer desplazamientos de rumbo (strike slip) del tipo dextral.
Las observaciones de campo han permitido separar dentro de este ANAP un prospecto conocido como HUALLPACHACA, en el cual se encuentra ubicado dentro del corredor estructural del cluster de Cotabambas (Fig.06 y Foto 06). En este prospecto se puede observar claramente mineralización de sulfuros y óxidos (calcopirita, pirita y especularita) en forma diseminada y rellenando venillas. La presencia de óxidos, carbonates y sulfatos de cobre es abundante (malaquita, azurita y calcantita). La presencia de venillas de cuarzo con una sutura de sulfuros en su parte central (venillas tipo B), como también la presencia de venillas de cuarzo con sulfuros diseminados (venillas tipo A) indican la posible existencia de un pórfido. A las venillas de cuarzo se le suma la presencia de venillas de magnetita (venillas tipo M). También se observan venillas de calcita cristalizada con sulfuros de cobre (calcopirita) y óxidos de Hierro (especularita)
La mineralización suele también presentarse en fracturas dentro de una roca intrusiva de grano fino (diorita porfirítica) muy cerca del contacto con facies porfiríticas mucho más diferenciadas (cuarzo – diorita a monzonita). Interpretaciones preliminares indican que se podría tratar de manifestaciones distales del cluster de Cotabmaba, como también manifestaciones proximales de un pórfido aún no descubierto colindante al cluster de Cotabambas.

**3.1 ESTILOS DE MINERALIZACIÓN**

En el prospecto de Huallpachaca se han podido reconocer varios tipos de estilo de mineralización, entre los principlaes tenemos: mineralización en venillas de calcita, mineralización en venillas de cuarzo, mineralización en brechas, mineralización en fracturas y mineralización diseminada en rocas intrusivas

**3.1.1 Mineralización en Venillas de Calcita (calcopirita – pirita - especularita)**
Muy cerca del puente de Huallpachaca (lado izquierdo) se han podido observar mineralización de calcopirita (cpy), pirita (py) y especularita (spc) en venillas centimétricas de calcita cristalizada. Este tipo de mineralización aflora en gran cantidad en una serie de bloques rodados de un desprendimiento de la parte superior del cerro. La mineralización se presenta ya sea en pátinas o en forma diseminada. En este sector no se ha podido observar mineralización de galena o esfalerita en venillas de calcita. Las venillas (2 cm) cortan una roca intrusiva diorítica a microdiorítica. Algunas venillas de calcita pasan los 5 cm de espesor y pueden ser considerados como vetas de aclcita con sulfuros y óxidos de hierro. La calcopirita oxidada presenta halos de malaquita y azurita fácil de reconocer en el campo. Se ha podido reconocer clorita asociada a las venillas de calcita.

**3.1.2 Mineralización en Venillas de Cuarzo (calcopirita – pirita - magnetita)**
Venillas de cuarzo con mineralización de calcopirita y pirita se han podido encontrar en los afloramientos insitu en el fondo del cañón del río Apurimac. Las venillas son por lo general milimétricas y sinuosas. La intesidad de este tipo de venillas es débil y han sido observadas en una roca intrusiva dioritica moderadamente magnética muy cerca del contacto con facies porfiríticas. La mineralización se presenta en una sutura central dentro de la venilla de cuarzo.
Por otro lado al lado derecho del puente Huallpachaca se han podido observar venillas de cuarzo con magnetita sinuosas en una roca diorítica a microdiorítica en el fondo del cañón del río Apurimac. Estas venillas son milimétricas y afloran aisaldamente en baja intensidad.
Segú los modelos de tipos de venillas en un sistema porifirítico las venillas de cuarzo con una sutura central de sulfuros estarían relacionadas a las venillas tipo “B”, mientras que las venillas de cuarzo con magnetita estarían relacionadas a las venillas tipo “A”. Ambas relacionadas a la alteración potásica de un sistema porfirítico.

**3.1.3 Venillas de magnetita**
Este tipo de venillas aflora tanto a la mergen derecha como a la margen izquierda del río Apurimac en el fondo del cañón. Son venillas milimétricas hospedadas en rocas intrusivas dioriíticas con facies porfiríticas a facies muy finas.

**3.1.4 Brechas Mineralizadas**
Las brechas las podemos igualmente encontrar a ambos lados del margen del río Apurimac en el fondo del Cañón . Generealmente son brechas matriz soposrtada, con clastos angulosos y monolíticos. La matriz presenta una fuerte oxidación (hematita, limnonita). Se observa sulfuros diseminados como también sulfuros lixiviados, tienen pequelas cantidades de malaquita y azurita.

**3.1.5 Mineralización en Fracturas**
Este tipo de mineralización se observa por lo general en gran parte de la zona de ANAP. Hacia el lado izquierso del puente Huallpachaca, se puede observar py y cpy en fracturas, mientras que hacia el lado derecha del puente subiendo la carretrera a Cotabambas se observa gran cantidad de pirita en fracturas asociada a un vetilleo de calcita en rocas dioríticas de grano fino.

**3.1.6 Mineralización Diseminada**
Hacia el lado izquierdo del puente Huallpachaca muy cerca del derrumbe con bloques mineralizados se observa mineralización diseminada de cpy y py en una roca diorítica y a unos cuantos mentros esta roca se presenta fuertemente alterada

(argilizada) y los sulfuroos se encuentran la mayor parte lixiviados. Muy cerca existe un contacto con una roca de facies porfiríticas mucho más diferenciada.

Los estudios de difracción de rayos X realizados en INGEMMET demostraron que el relleno de las venillas es 100% calcita, no existiendo yeso o algún otro carbonato (siderita, ankerita, dolomita**)**

Foto 01.- Venillas de calcita con calcopirita diseminada formando halos de malaquita y azurita. Prospecto Huallpachaca.

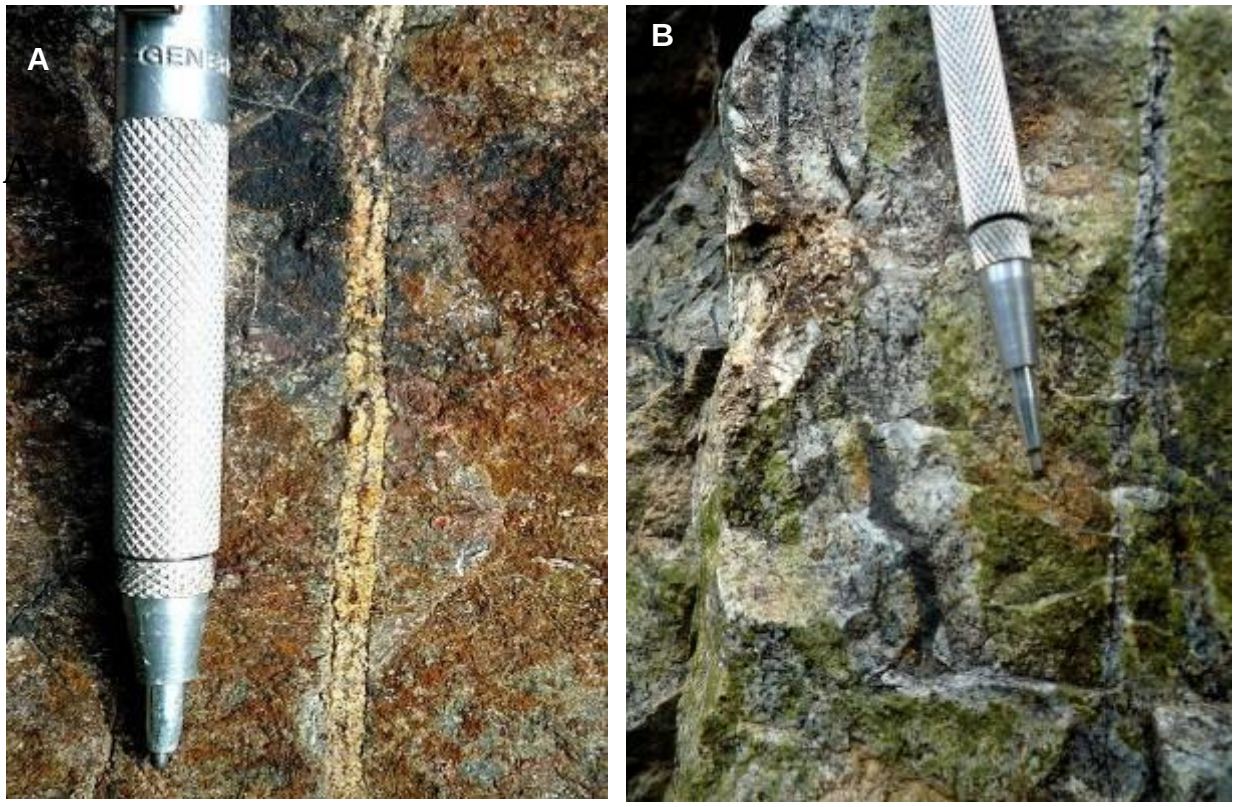



Foto 02.- A) Venillas de cuarzo con una sutura central de sulfuros. B) Venillas de cuarzo con magnetita. Prospecto Huallpachaca.

Foto 03.- Venillas de magnetita. Prospecto Huallpachaca.

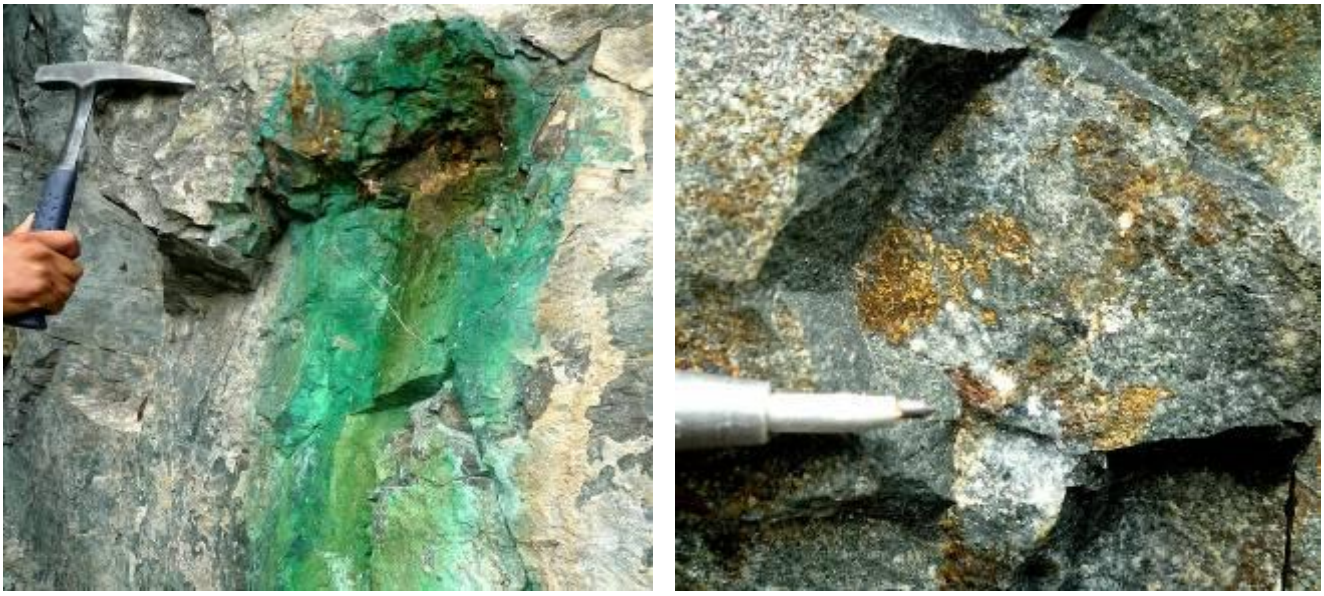


Foto 04.- Mineralización de malaquita y calcopirita en fracturas de una roca diorítica con facies porfiríticas. Prospecto Huallpachaca

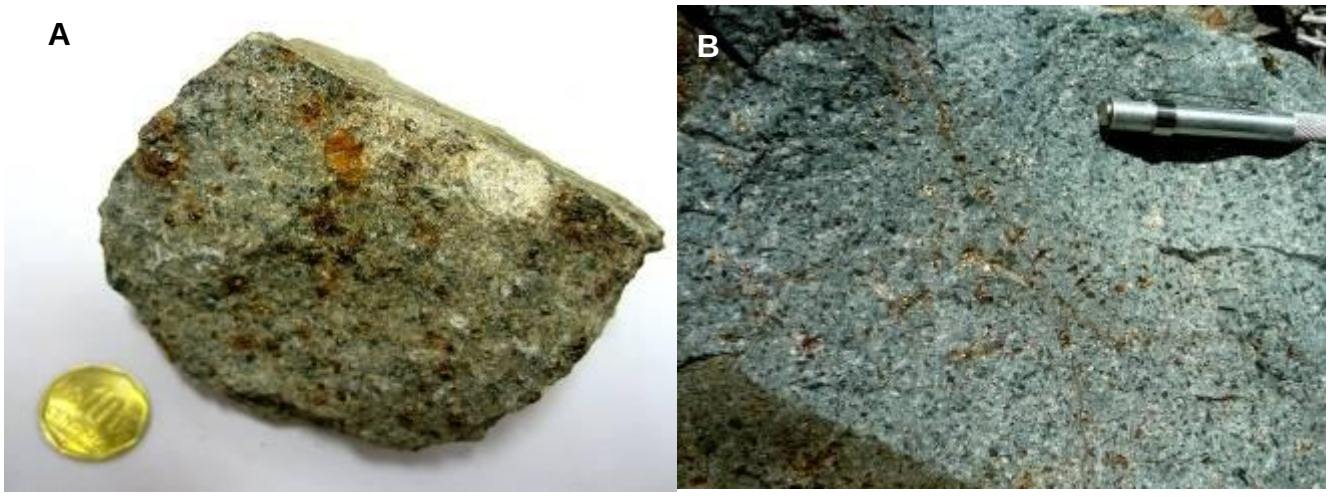



Foto 05.- A) Mineralización diseminada de Pirita y calcopirita en roca alterada (argilización moderada). Prospecto Huallpachaca. B) Mineralización diseminada de calcopirita en roca porfirítica (Prospecto Huallpachaca)

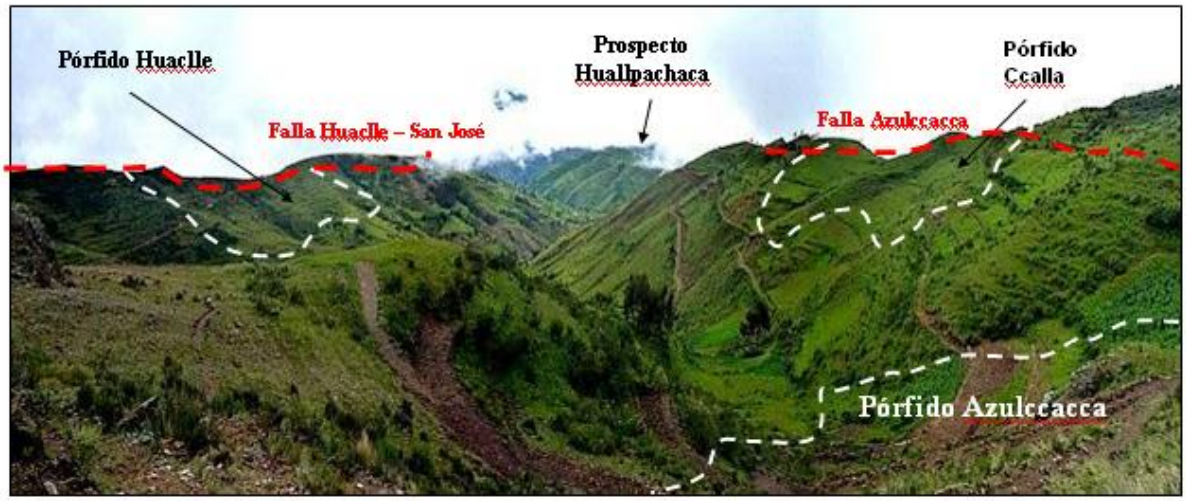



Foto 06.- Vista panorámica del cluster de Cotabambas (Mirando hacia el NE), limitado por las fallas Huaclle – San José y Azullccacca. Nótese al fondo la ubicación del prospecto Huallpachaca incluido dentro del corredor estructural.

## 4 CONCLUSIONES

Los estudios metalogenéticos regionales (*stream sediment*, geoquímica de rocas, geología estructural, geocronología, geoquímica isotópica), nos permitieron conocer mejor el origen y la distribución de los depósitos minerales en el batolito Andahuaylas – yauri, específicamente en el cluster de Cotabambas. La interpretación de todas estas herramientas geológicas nos permitieron definir zonas interesantes para la exploración, como es el caso del ANAP Colca.

Los estudios geocronológicos e isotópicos han definido que el cluster de Cotabambas pertenece a un mismo sistema porfirítico con edades geocronoloógicas Ar – Ar muy cercanas entre sí.

Los estudios isotópicos de Pb – Pb en el cluster de Cotabambas han reconocido depósitos minerales bien marcados (menos radiogénico) con menor contribución de la corteza superior con respecto a otros depósitos del batolito Andahuylas – Yauri.

A partir de los resultados isotópicos de estroncio inicial (0.7050) calculado para el cluster de Cotabambas (0.7 Mt Cu) en la franja Eocénica – Oligocénica, se puede estimar que tiene potencial para convertirse en un depósito gigante (3 – 10 Mt Cu), lo que implica que es muy importante seguir con los trabajos de exploración, como lo demuestran las reservas y recursos calculadas a la fecha en 40 Mt Cu y 500 t Au (com. per. Acosta 2011) .

Interpretaciones estructurales sobre el cluster de Cotabambas permiten inferir que este corredor estrcutural es producto de una falla de rumbo (strike slip) con movimiento dextral. Este movimiento dextral puede haber originado el desplazamiento de la falla Asnoccacca y posiblemente el desplazamiento dextral de los pórfidos de Ccalla y Azullccacca interpretados por Perelló (2001) como uno sólo.

La proyección del corredor estructural del cluster de Cotabambas, permitió separar el prospecto Huallpachaca dentro del ANAP de Colca. El prospecto Huallpacha se encuenra ubicado más o menos a 5.8 Km en linea recta del punto central del cluster de Cotabambas, una distancia muy parecida a la que existe entre el pórfido El Galeno (Cu – Mo) y Minas Conga ( Cu – Au) en el norte de Perú ( 6.0 km).

En el cluster de Cotabambas, específicamente en el pórfido de Ccalla se han podido reconocer venillas de calcita con galena y esfalerita (Pb > Zn > Cu), lo cual ha sido interpretado como la fase terminal y distal del sistema porfirítico (Perelló, 2001). Por otro lado en el propecto de Huallpachaca se han encontrado venillas de calcita con calcopirita con ausencia de galena y esfalerita. Estos es interpretado como una fase intermedia a proximal a un sistema porfirítico (Cu > Pb > Zn).

Es conocido que las diferentes facies de los carbonatos pueden indicar la fase distal o proximal a un sistema pórfirítico. Siendo la siderita la fase distal, la ankerita la fase intermedia y la calcita la fase proximal al sistema porfirítico. Los estudios de difracción de rayos X realizados sobre las venillas de carbonatos con calcopirita demostraron que estas están compuestas en un 100% de calcita. Estas estructuras pueden ser tipificadas como venillas y vetas de baja sulfuración.

Los diferentes tipos de venillas de cuarzo, encontradas en el prospecto Huallpachaca indican relaciones con un sistema porfirítico. Venillas tipo “B” y “A” han sido reconocidas mediante trabajos prospectivos con una densidad débil. Venillas de magnetita también han sido reconocidas en el prospecto Huallpachaca, asociadas a rocas intrusivas con facies porfiríticas.

Mineralización de calcopirita en fracturas y diseminado en rocas con textura porfirítica ha sido también reconocido en el prospecto Huallpachaca.

La zona delimitada por el prospecto Huallpacha representa el 30% del área que corresponde al ANAP de Colca. Diferentes campañas de evaluación de campo se están llevando actualmente en lo que resta del ANAP.

## BIBLIOGRAFÍA


Acosta, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodriguez, I., Villarreal, E., Estrada, D. & Santisteban, A. (2009). Memoria del Mapa Metalogenético del Perú 2009. INGEMMET. 17 pg. http://www.ingemmet.gob.pe/

Acosta, J., Quispe, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Rodriguez, I., Villarreal, E., Estrada, D. & Santisteban, A. (2010a). Memoria del Mapa Metalogenético del Oro en Perú 2010. INGEMMET. 15 pg. http://www.ingemmet.gob.pe/

Acosta, J., Quispe, J., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Chirif, H., Rivera, R. & Valencia, M., Paico, D., & Santisteban, A. (2010b). Producción y recursos de oro, plata y cobre en el Perú. Implicancias en la exploración. CD Resúmenes VIII Congreso Nacional de Minería Trujillo**.** Colegio de Ingenieros del Perú http://www.congresominas.com

Acosta, J., Quispe, J., Huanacuni, D., Rodríguez, I., Villarreal, E., Chirif, H., Rivera, R. & Valencia, M., Paico, D., & Santisteban, A. (2010c). Distribución espacial y temporal de la producción y recursos de Oro, plata y cobre en el Perú. XV Congreso peruano de Geología. Resúmenes extendidos. Sociedad geológica del Perú. Esp No. 09 (2010), Cusco p 488-491.

Bustamante, A. (2008) Geocronología, petrografía, alteraciones e isótopos de Pb y Sr del complejo porfirítico de (Cu – Au) Utupara, Aplicaciones a la exploración minera, Antabamba – Apurimac – Perú. Tesis de maestria, 126 pag.

Clark, A.H., 1993, Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? Society of Economic Geologists Special Publication 2, p. 213–282.

Clark, A. H., Farrar, E., Kontak, D. J., Langridge, R. J., Arena, M. J. (1990). Geologic and Geocrhonology Contraints on the Metallogenic Evolution of the Andes of Southeastrn Peru. In: Economic Geology, vol. 85, pag. 1520 – 1583.

Debon, Francois & Le Fort, Patrick (1988) A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic association: principles, method, applications. Bulletin Mineral n° 11, pag. 493 – 510.

Marocco, R. (1978) Un segment EW de la cordillère des Andes Péruviennes: La déflexion d´Abancay. Etude géologique de la Cordillère Orientale et des Hauts-plateaux entre Cuzco et San Miguel (Sud du Pérou): Paris, France, Travaux et Documents de l´ORSTOM, no. 94, 195 pag.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: Journal of Petrology, 27, 745-750.

Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., Caballero, A. (2003) Porphyry-Style alteration and mineralization of the middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas – Yauri Belt, Cuzco región, Peru. In: Economic Geology, V. 98, Pag. 1575 – 1605.

Perelló, J. (2001).- Geología y Recursos Geológicos del Proyecto Cotabambas, Deparatamento de Apurimac, Perú. En: Reporte Interno para Antofagasta Minerals S. A. Gerencia de exploraciones. 70 pag.

Quispe, J., Carlotto, V., Acosta, J., Macharé, J., Chirif, H., Rivera, R., Romero, D., Huanacuni, D. & Rodríguez, R. 2008. Mapa Metalogenético del Perú 2008. CD Resúmenes del XIV Congreso peruano de Geología. Código C-27.

Rivera, R. (2008).- Alcances metalogenéticos de los pórfidos de Cu – Au – Mo y sus relaciones en la exploración Minera (Región Cajamarca). En Perumin 2009. 10 pag.

Rivera, R. (2010).- El uso de la geoquímica regional para la caracterización de provincias metalogenéticas. En XV congreso peruano de geología. Cusco.

Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. Economic Geology; January 2010; v. 105; no. 1; p. 3-41

Tassinari, C. 2005. Presentación: Geología Isotópica Aplicada a la Exploración de Recursos Minerales. Método Rb-Sr. Pp. 54. Máster Internacional Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales Programa ALFA / UE y Red DESIR.

Zartman R. E. & Doe, B. R. (1981) Plumbotectonic - the model. Tectonophysics, vol. 75, pag. 135 - 162.