

COMISIÓN MINERA DE CHILE
SEMINARIO

«MEJORES PRÁCTICAS EN EXPLORACIÓN
Y ESTIMACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS MINERALES»

**EXPLORACIÓN MINERA EN ÁREAS
CUBIERTAS POR SOBRECARGA
TRANSPORTADA**

TÉCNICAS Y RESULTADOS

SINOPSIS

Con 30% del Cu y 16% del Mo del mundo, enormes recursos de Fe y decenas de millones de Onzas de Au y Ag, Chile posee reservas y recursos minerales enormes en comparación a su superficie: 0,55% de los 5 continentes - 135,8Mkm² -

En Chile, la exploración por depósitos de Cu mayores se efectúa principalmente entre Rancagua y Arica; pero, al Norte de La Serena el 50% del terreno está cubierto por sedimentos trasportados.

Este obstáculo formidable puede salvarse con exploración geoquímica de gases - Hg, Rn²²², gases sulfurados y gases orgánicos - apoyada por la geofísica.

COSTOS RELATIVOS DE LA EXPLORACIÓN MINERA

1. Mínimo: Reconocimiento Geológico y Geoquímico - n x 10KUS\$
2. > Geoquímica: Sistemática - n x 10KUS\$
3. > Geofísica: Gravimetría, Magnetometría, Polarización Inducida/Resistividad - n x 10KUS\$ a n x 100KUS\$
4. > Sondajes de reconocimiento – n x 100KUS\$ - 1MUS\$
5. Máximo: Sondajes de exploración y de detalle para definir inversión - n x 1MUS\$

RESUMEN HISTÓRICO

Desde los 70', a los depósitos clásicos de El Teniente, Los Bronces, Andina, Potrerillos, El Salvador y Chuquicamata, en 47 años se unieron Cerro Colorado, Collahuasi, Sierra Gorda, Tesoro, Centinela, Lomas Bayas, Escondida, Zaldívar y Los Pelambres.

Descubrimientos, usando técnicas tradicionales - mapeo geológico, geoquímica superficial, P. I. /Resistividad, Magnetometría y Gravimetría - han sido exitosos.

Los desafíos actuales de explorar mayor profundidad y en áreas cubiertas necesitarán de nuevas técnicas:

- Geoquímica de gases, apoyada con geofísica en áreas cubiertas.
- Sensores Remotos Especiales, Gravimetría Satelital, Magnetometría de Precisión, Mapeo Topográfico Laser y Levantamientos con Drones.
- Las tecnologías de Extracción y Exploración se influyen mutuamente y el futuro inmediato traerá nuevos métodos de extracción y metalurgia de más bajo costo, que incentivarán la exploración de áreas cubiertas.

EL PANORAMA MINERO ES COMPLEJO, PERO INTERESANTE

LA COMPLEJIDAD DE LA EXPLORACIÓN SEGÚN COCHILCO (JUNIO 2016):



Estudio de exploración y hallazgos mineros, confirmó que *es buen negocio* explorar en zona Centro-Norte de Chile e incluso mejor que en otros países. Depósitos hallados son más pequeños que en los 90' y están a mayor profundidad. Por A. Galleguillos// Gráficos Cochilco//

Entre 2000-2015, **35 nuevos depósitos de Cu** (Codelco 17; AMSA 4) y **3 de Au fueron descubiertos**.

Reservas de Cu aumentaron +209MTons. y recursos de Au 34MOz.

Pero...

- **El 94% de ese Cu fue descubierto antes de 2010 y pese al aumento de inversión en exploración, su éxito no fue proporcional.**
- **Estos resultados se refieren a exploración en áreas expuestas y sub-aflorantes: VERDADERO DESAFÍO será explorar áreas cubiertas.**
- *Se necesita presupuestos estables – no sujetos a oscilaciones del precio del Cu - para explorar.*

COCHILCO: En zona Centro-Norte se agotan yacimientos de Cu superficiales.

Reconoce **potencial de descubrir depósitos a <100-400m.,** en diversas franjas metalogénicas. **La facilidad actual de realizar perforaciones profundas, favorece este tipo de exploración.**

Mayores yacimientos hallados:

Antofagasta:	Cu Escondida Este y Pampa Escondida.
Atacama:	7 Cu y 2 Au (C° Maricunga y Caspiche)
Coquimbo:	1 Cu.
R. Metropolitana:	1 Cu.
Valparaíso:	7 Cu (incluye Los Sulfatos)
Regiones I y VI:	1 Cu c/u.
Atacama:	2 Au (C° Maricunga y Caspiche)
Coquimbo:	1 Au (Alturas)

Características de descubrimientos 2000 - 2015:

- 50% se halló en exploración avanzada (“*greenfield*”)
- 42% en exploración básica (“*brown-field*”).
- *La totalidad de hallazgos de yacimientos de Au fueron a “campo abierto”.*

De los depósitos evaluados: 21% presenta mineralización económica superficial.

50% está a +100m. de profundidad.

Entre 2000-2008 profundidad de hallazgos no excedía 200m.

Desde 2009, los hallazgos de Cu fueron más profundos:500-600m.

CONCLUSIONES

1. Existe potencial de descubrimiento:

a) En zonas más profundas.

b) *En zonas cubiertas por sobrecarga transportada.*

2. La exploración y la extracción mineras son afectadas por nuevas tecnologías:

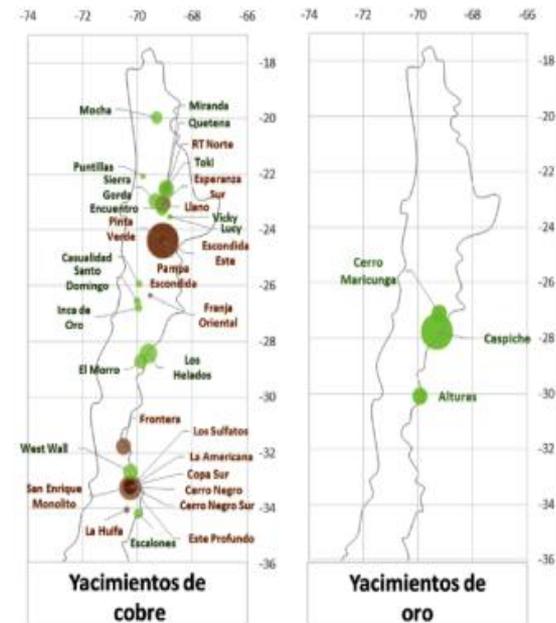
Lixiviación sulfuros en Boca de Minas e “in-situ”
deberán ser investigadas y evaluadas a fondo

3. Factores favorables:

- **Depósitos de Cu a +100m.** ocurren en todas franjas metalogénicas.

- Los más profundos se encuentran en las franjas *Eoceno Tardío-Oligoceno Temprano* y *Mioceno Medio-Plioceno Temprano.*

Ubicación y tamaño de yacimientos de cobre y oro encontrados entre 2000 y 2015 según su tipo de exploración greenfield (en verde) o brownfield (en marrón).



Fuente: Cochilco basado en datos de SNL Metals & Mining.

VISTOS LOS RESULTADOS ANTERIORES

La exploración minera *deberá necesariamente pasar a las áreas cubiertas por sobrecarga*, las que dadas la tectónica y mineralización de Chile probablemente contendrán numerosos yacimientos en:

- Franjas metalogénicas desérticas: < Dificultad de desarrollo.
- Terrenos de baja elevación; sin nieve: > Tiempo operativo a menor costo.
- *Descubrimientos altamente probables por fallas tectónicas favorables:*

Exploración en 50' - 60' descubrió numerosos depósitos en el metalotecto de 17 Km. de longitud Chuquicamata - Radomiro Tomic es solo uno de ellos...!!

Nuevas técnicas de exploración ya están disponibles:

- Geoquímica de gases.
- Extracción de metales desde suelos (“Enzyme leach”, etc.)
- Gravimetría satelital.
- PI/Resistividad moderna
- Magnetometría de precisión.
- Nuevas técnicas metalúrgicas impulsarán exploración.

A - DINÁMICA PRIMARIA

Rocas ígneas Calco-alcaldas crean gradientes:

- **Densidad:** Gravimetría
- **Permeabilidad:** Geoquímica Hidromórfica
- **Conductividad:** Geofísica P. I. / Resistividad
- **Susceptibilidad Magnética:** Magnetometría.

A1 - DISPERSIÓN PRIMARIA (900-650°C):

- Presión, T°, Eh, pH, Complejos Cl⁻, S²⁻ y fluidos *favorecen disolución:*
Na, K, Ca, Mg, Al y metales desde *minerales huéspedes.*

A2 - EFECTOS METALOGÉNICOS

- Concentra iones metálicos Fe, Cu, Mo, Au, Ag y forma depósitos minerales.
- Ascenso *magmas boyantes.*
- Magma aporta *fluidos supercríticos*, que liberados originan mineralización Cu, Fe, Au, Ag.
- *Fluidos liberados a presión crean brechas hidrotermales* y mineralización Cu-Mo.

B - DINÁMICA SUPERGÉNICA

Alzamiento tectónico de depósitos minerales ambiente superficial:

Cordillera Andina; +3.500m. de altitud .

Clima Árido de Chile, crea Tasa de Erosión Elevada, formando:

- **Gravas**
- **Arenas y Limos de piedemonte,**
- **Cubriendo el 50% del territorio.**

Este problema impulsó el estudio de técnicas de geoquímica de gases en el I. I. G. sugeridas por Cruzat (1972) y desarrolladas por Arias (1972-1979), por bajo costo de la *exploración geoquímica cuantitativa que sigue al reconocimiento de exploración.*

La exploración por técnicas geofísicas tiene mayores costos, pero:

- Permite evaluación de blancos cubiertos por sedimentos transportados en 3D.
- 1) Gravimetría, 2) Magnetometría, 3) Sondaje eléctrico, 4) Polarización Inducida/ Resistividad.

B1 - DISPERSIÓN SECUNDARIA DE IONES (25°C) en solución.

Factores: Presión, Eh, pH, movimiento de fluidos por calor o gravedad.

B2 - DISPERSIÓN DE GASES (libres; adsorbidos: por etapas)

B3 – PRINCIPALES EFECTOS DE LA INTEMPERIZACIÓN

- *Disolución Minerales Sulfurados*: Cu, Pb, Zn, Mo, Fe.
- Oxidación de minerales de Cu y Fe y **precipitación de Óxidos de Cu de alta ley** en Ambiente Sub-aéreo por condiciones áridas.

La exploración sistemática de áreas completamente cubiertas aprovecha estos fenómenos en la exploración de pórfidos cupríferos enterrados en Chile, para pasar:

- **De la exploración de prospectos aflorantes (1911 en Chuquicamata),**
- **A semi-cubiertos (1973 en Cerro Colorado; 1980 en Escondida y Zaldívar; 1989 en Sierra Gorda)**
- **A áreas cubiertas por sedimentos (2017 en adelante): Exploración profunda.**

Entre 1989-99, Arias trabajó entre Antofagasta e Iquique con Oregon Ltda., en descubrimiento de 5 prospectos de pórfidos de Cu-Mo, además de 37 blancos primarios de exploración.

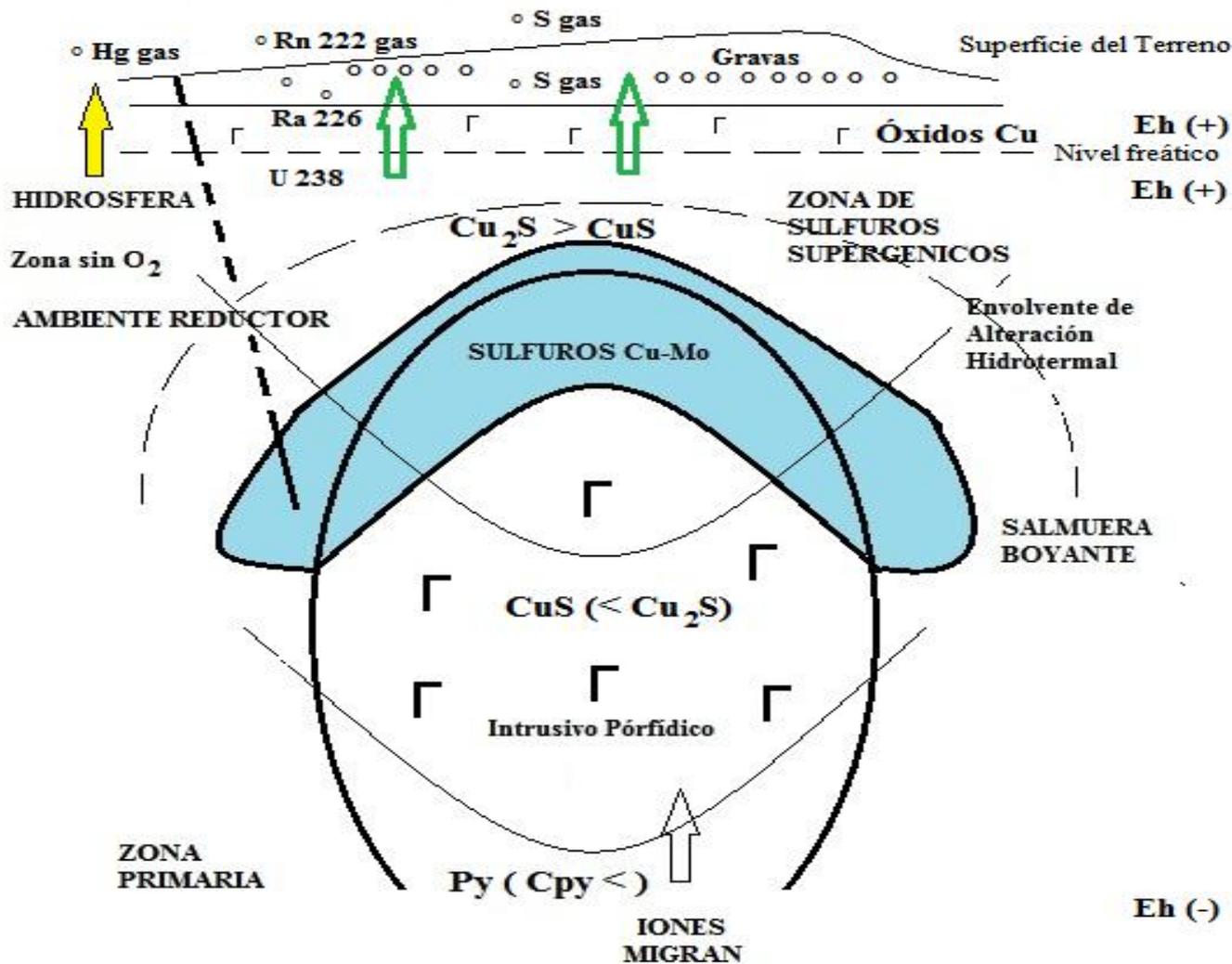
AMBIENTE OXIDANTE $O_2 + N_2 + CO_2$

Eh (-)

Precipitaciones



ATMOSFERA



SISTEMA PÓRFIDO Cu-Mo y GENERACIÓN DE GASES

EJEMPLOS DE EXPLORACIÓN : **ÓXIDOS EN SUPERFICIE**

SIERRA GORDA

- Factores del descubrimiento:

- Gordo y Cía. (80's) **explotó óxidos en rajos de Mina Catalina < 70m.**
- Oregon Ltda. (1995) **por geoquímica y sondajes, halló 65MTons. de óxidos** de 0,4%Cu al Sur de la Mina Catalina.
- Outokumpu, por sondajes, halló 176MTons. de **sulfuros de Cu en Mina Catalina.**
- Exploración intensiva de Quadra Mining demostró **2.000MTons. Cu-Mo de 1,5%Cu en pórfidos.**

CERRO COLORADO

- Factores del descubrimiento:

- Indicios: Thomas, A. (1970) **levantó afloramientos laterales menores con alteración hidrotermal y efectuó muestreo geoquímico de rocas.**
- **I. I. G. sondeó 37MTons. de óxidos y sulfuros de Cu (1,5%), +100m. al SW** del Socavón Lucsa (túnel con Pirita), con **geoquímica, geofísica IP-Resistividad y sondajes.**
- **Nippon Mining sondeó 80MTons. de sulfuros de Cu,** en el sector SW, completamente cubierto por gravas.
- Río Algom finalmente, **sondeó +150MTons. menas de Cu-Mo de 1,5%Cu.** Reservas sondeadas por **BHPBilliton llegaron a 500MTons. en los años 2000'.**



Quipisca

Tquinca

Mamiña

Macaya

5.76 km

Image © 2016 DigitalGlobe
© 2016 Google

Google Earth

Fechas de imágenes: 11/17/2014 19 K 474987.79 m E 7778253.42 m S elevación 2610 m alt. ojo 26.53 km

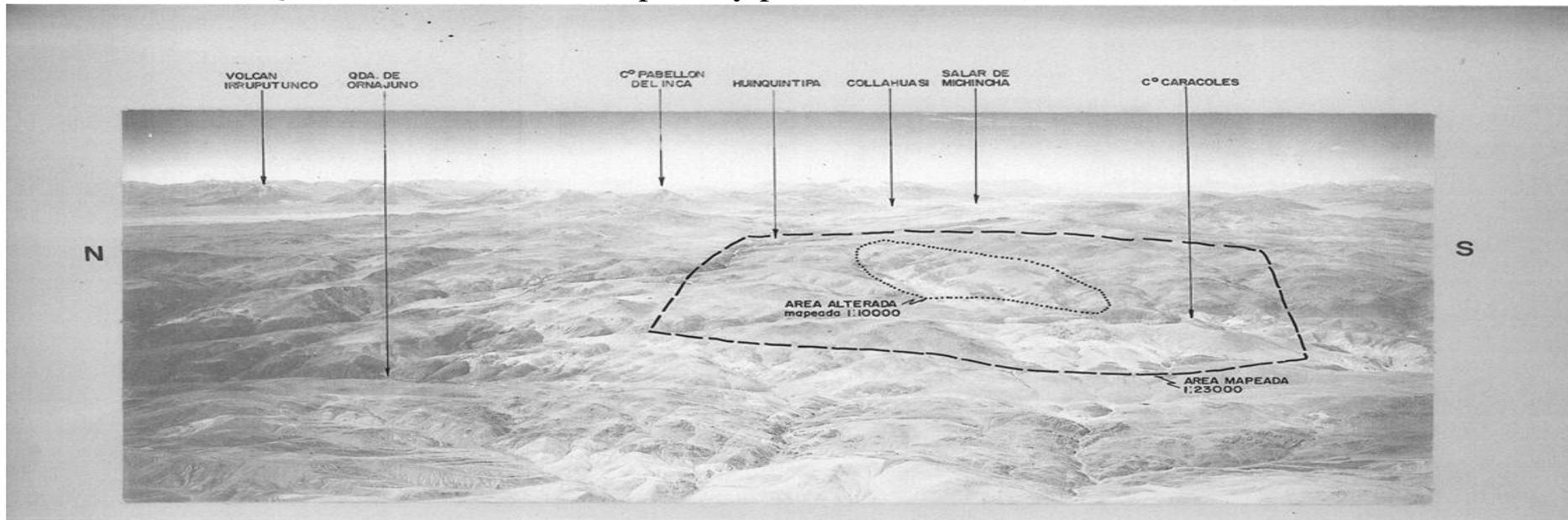
QUEBRADA BLANCA

Factores del descubrimiento:

Afloramientos laterales menores con alteración hidrotermal; levantamiento geológico; muestreo de óxidos (Fam, R.; I. I. G. 1974)

Hallazgo de yacimiento: A -100 a -150m. profundidad con mapeo geológico, muestreo geoquímico, geofísica IP-Resistividad, de blancos de óxidos y sulfuros, bajo cubierta de suelos residuales y rocas alteradas e intemperizadas.

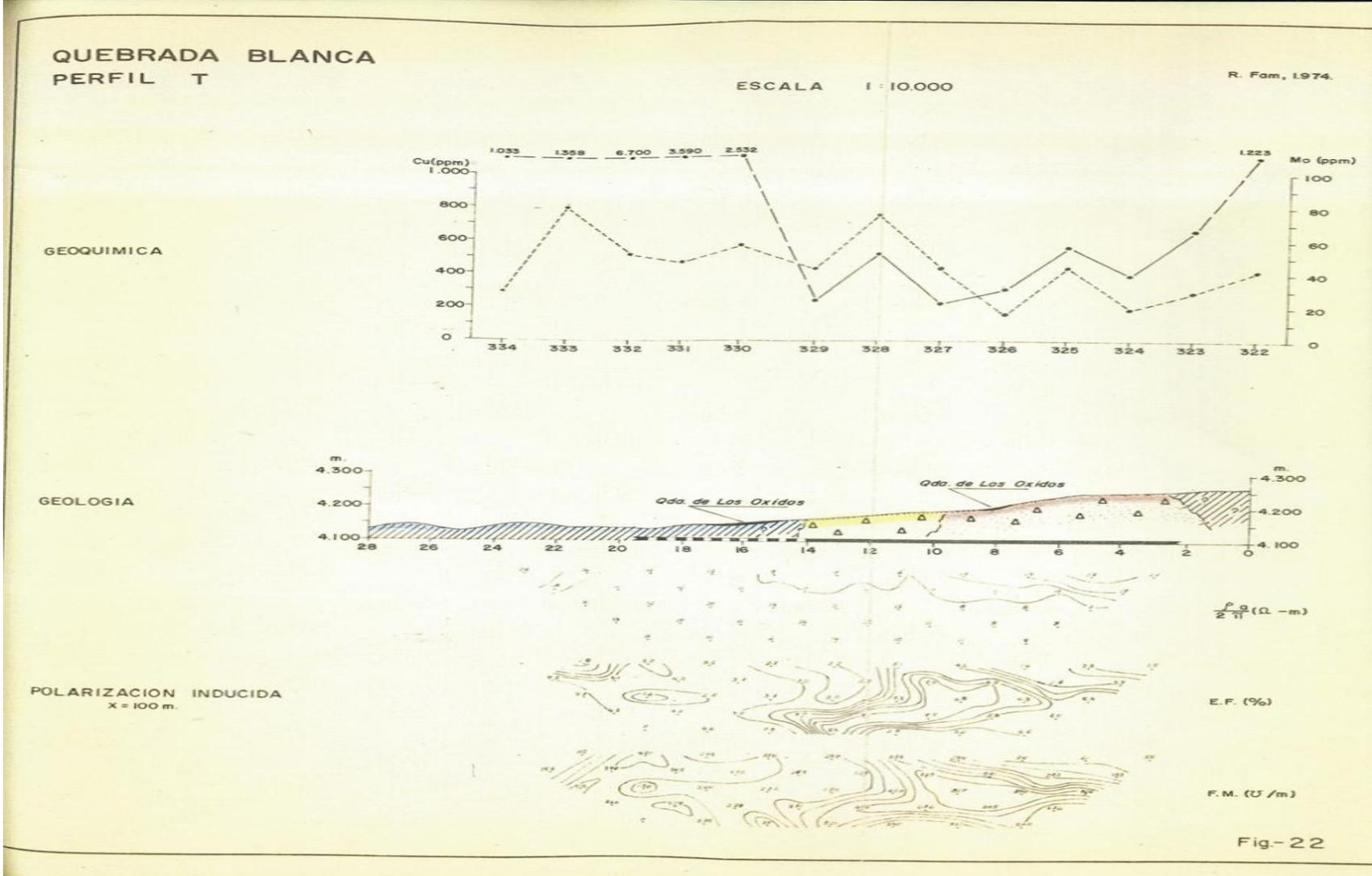
Vista aérea lateral Quebrada Blanca, área mapeada y puntos de interés (Fam. R.; 1974)

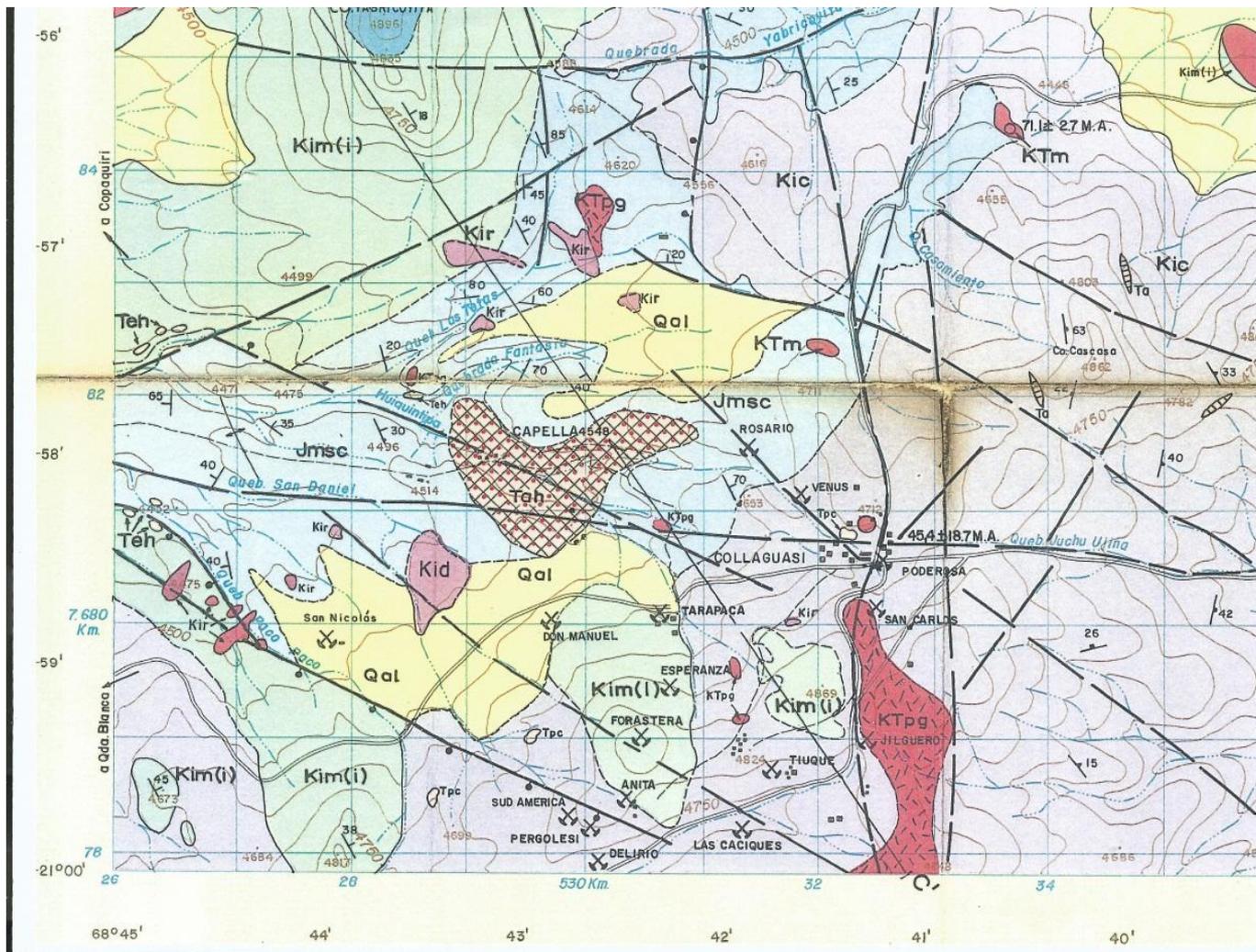


FOTOGRAFIA 1.- Foto Trimetrogón de Quebrada Blanca (315-R-91)

En la vista aérea inclinada, tomada desde el W, se puede apreciar las características morfológicas y geológicas del área del presente estudio. El cordón cordillerano (primer plano), constituido por formaciones mesozoicas principalmente, pasa hacia el E a un cordón volcánico (horizonte) de edad cuaternaria que constituye al mismo tiempo el límite entre Chile y Bolivia. Entre ambos cordones se observan algunas depresiones donde se forman los salares andinos (comparar con Figura 2).

Quebrada Blanca: Geología, Geoquímica de Suelos Residuales y Polarización Inducida (Fam, R.; 1974) de descubrimiento. Nótese alta concentración de Cu en Quebrada de Los Óxidos Oeste (1.033 a 6.700ppm.) y valores altos de Mo en brechas.





Sección del Cuadrángulo Ujina (Vergara, H.; 1978): Muestra Veta Rosario, a 300m. de zona de alteración hidrotermal de Capella y Quebrada Huinquentipa que hospedó depósito de “óxidos “exóticos” de 14MTons.

Minera Doña Inés de Collahuasi por sondajes, llegó a 350MTons. de sulfuros de Cu de 1,5%Cu, en el sector cubierto en 1985. Exploración del Proyecto Hipógeno (Teck Corp. – ENAMI; 2017) de mostró reservas de **4.000MTons. menas de Cu-Mo de 0,5-0,6%Cu.**

Imagen actual del rajo abierto de Quebrada Blanca (Foto Teck Corp.)



SOLUCIONES CON COBRE MIGRANDO LATERALMENTE

Originan “depósitos exóticos de Cu” :

ROSARIO DE COLLAHUASI

- Factores del **descubrimiento del depósito madre (760MTons. menas de Cu-Mo iniciales; 1983-84):**
 - Depósito de óxidos Huinquentipa (14M.Tons. de óxidos; Tulcanaza, 1972)
 - Estudio detallado geológico y petrográfico microscópico de la Veta Rosario (Cu, Au, Ag) de Collahuasi (220m. desarrollo vertical; por Héctor Flores Williams; 1957)
 - La zona de alteración de Capella (2km. E-W por 1km.N-S)
 - Estos factores anómalos condujeron al autor en (1980) a **estimar el potencial de +100MTons. de menas de Cu-Mo** y a **recomendar explorarlo** a **Chevron Minera de Chile Inc.**
 - La exploración posterior del Distrito de Collahuasi demostró **reservas de 25.900MTons. Cu-Mo de 1,5%Cu.**

Foto : Mina rajo abierto de Collahuasi.



SOLUCIONES CON COBRE MIGRANDO VERTICALMENTE

FORMAN DEPÓSITOS MAYORES DE SULFUROS SUPERGÉNICOS

- Cu se reduce sobre sulfuros primarios (*bajo el nivel freático*)

Ejemplos: Chuquicamata, Escondida, Los Bronces, Andina.

- Clásico es Chuquicamata **750m. de enriquecimiento supergénico: 1.700MTons de menas Cu-Mo**, bajo zona de óxidos explotados desde 1915.
- Otro caso notable: **Escondida, con 440m. de enriquecimiento >2%Cu.**
- Brechas hidrotermales de alta ley de Cu en Los Bronces (Donoso y otras) fueron importantes factores de exploración para las reservas actuales de Disputada: 11MTons. métricas de Cu contenido.

MIGRACIÓN VERTICAL DE GASES

- Gases libres tales como Hg, gases sulfurados y gases orgánicos:
- Detectados en Cachinal (Ag), Guanaco (Au) y Chuqui Norte (actual RT).
- Uranio²³⁸ y Ra²²⁶ migran hidromórficamente originando Rn²²² en superficie.
- Anomalías Rn²²² en Chuqui Norte desde óxidos bajo 180m. de gravas.
- Anomalías sub-superficiales Rn²²² asociaron Uranio²³⁸ en menas de óxidos Cu profundos en Chuqui Norte y definieron forma y posición espacial de cuerpos de óxidos situados bajo 180m. de gravas.

CONCLUSIONES

1. El panorama de la exploración minera en Chile es atractivo económicamente por la posibilidad de hallar nuevos depósitos de Cu, Cu-Mo y Au.
2. La exploración tiene mejores posibilidades de éxito en áreas desérticas, debido al potencial de franjas metalogénicas cubiertas por gravas de contener depósitos.
3. Asimismo, **el ambiente árido favorece ambos, la formación de cuerpos de óxidos de Cu en la parte superior de los depósitos y de sulfuros supergénicos de alta ley:**
Modelos son Chuquicamata con 750m. y Escondida con 400m. de enriquecimiento, con altas leyes de Cu: +2-2,5% Cu.
4. Las técnicas de **exploración geoquímica con gases ya desarrolladas** y **las técnicas geofísicas modernas** pueden combinarse para descubrir nuevos depósitos bajo cubiertas de gravas potentes

Seminario de Exploración Minera
COMISIÓN MINERA DE CHILE
20 de Abril – 2017

Muchas gracias por su atención.

Jaime Arias Farías, Geólogo, U. de Chile
Ph. D. Exploración Minera, U. de Londres
Santiago, Chile