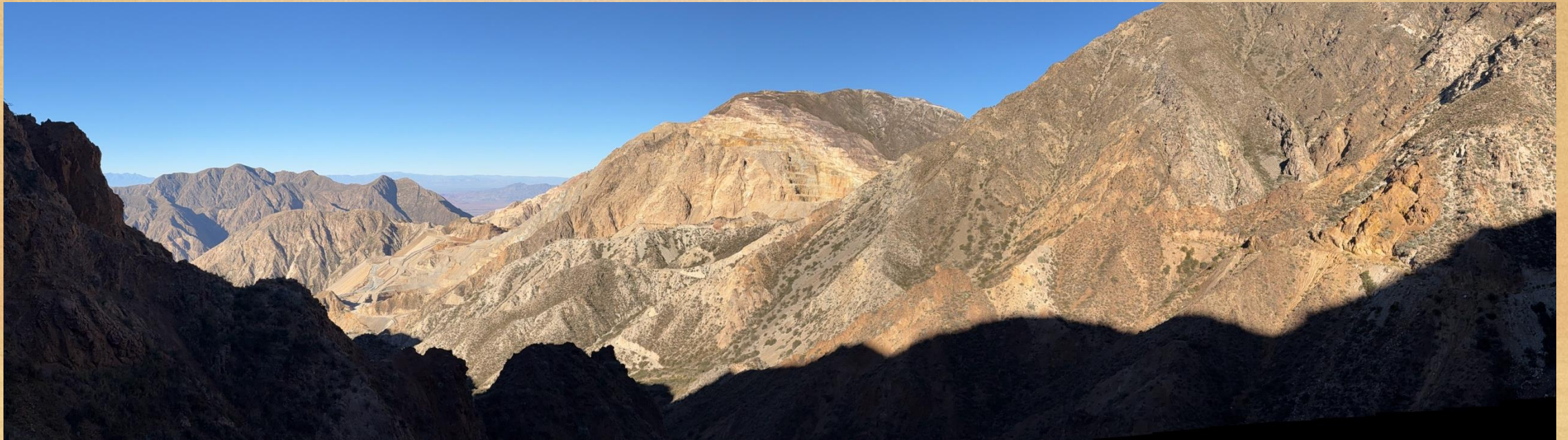


**DEPÓSITOS ESTRATO LIGADOS:  
SU RELACIÓN DE GÉNESIS CON SISTEMAS  
MAGMÁTICOS -HIDROTERMALES**  
*Una Visión de Campo*

**Dr. Mario Alfaro**



XXXVI Convención Internacional de Minería 2025  
Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México ( AIMMGM )

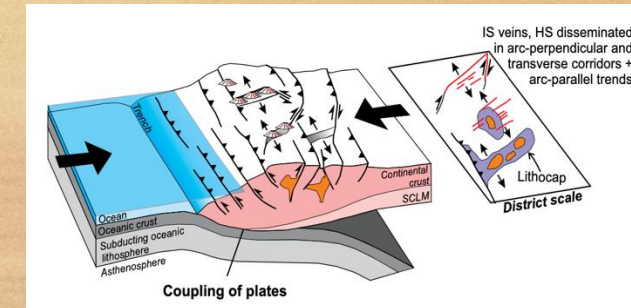
## Metalogénesis Andina; un principio básico...de donde vienen los metales!!!

- ❖ La metalogénesis de la Cordillera de Los Andes está determinada por el marco tectónico que corresponde a un margen continental activo con subducción de corteza oceánica bajo el continente sudamericano.
- ❖ Los Andes Centrales se consideran como un ejemplo clásico de un orógeno “simple” desarrollado en un margen convergente de placas.
- ❖ La característica distintiva de esta cordillera, respecto a otras cadenas montañosas en el mundo, es la existencia de un enorme volumen de rocas ígneas generadas a lo largo de su historia geológica conformando “una cadena montañosa magmática” y/o un “orógeno volcano-plutónico
- ❖ El ambiente tectónico en el que la mineralización ocurre, corresponde a un margen convergente de placas o margen cordillerano, en un ambiente de supra-subducción es decir en un ambiente tectónico muy prolífico para el emplazamiento de depósitos de origen hidrotermal.
- ❖ La mineralización en un ambiente de supra-subducción, está controlada por 3 factores principales:
  - Magmatismo de Suprasubducción
  - Estructuras Mayores y ..
  - Tectónica de Placas



## Magmatismo de suprasubducción

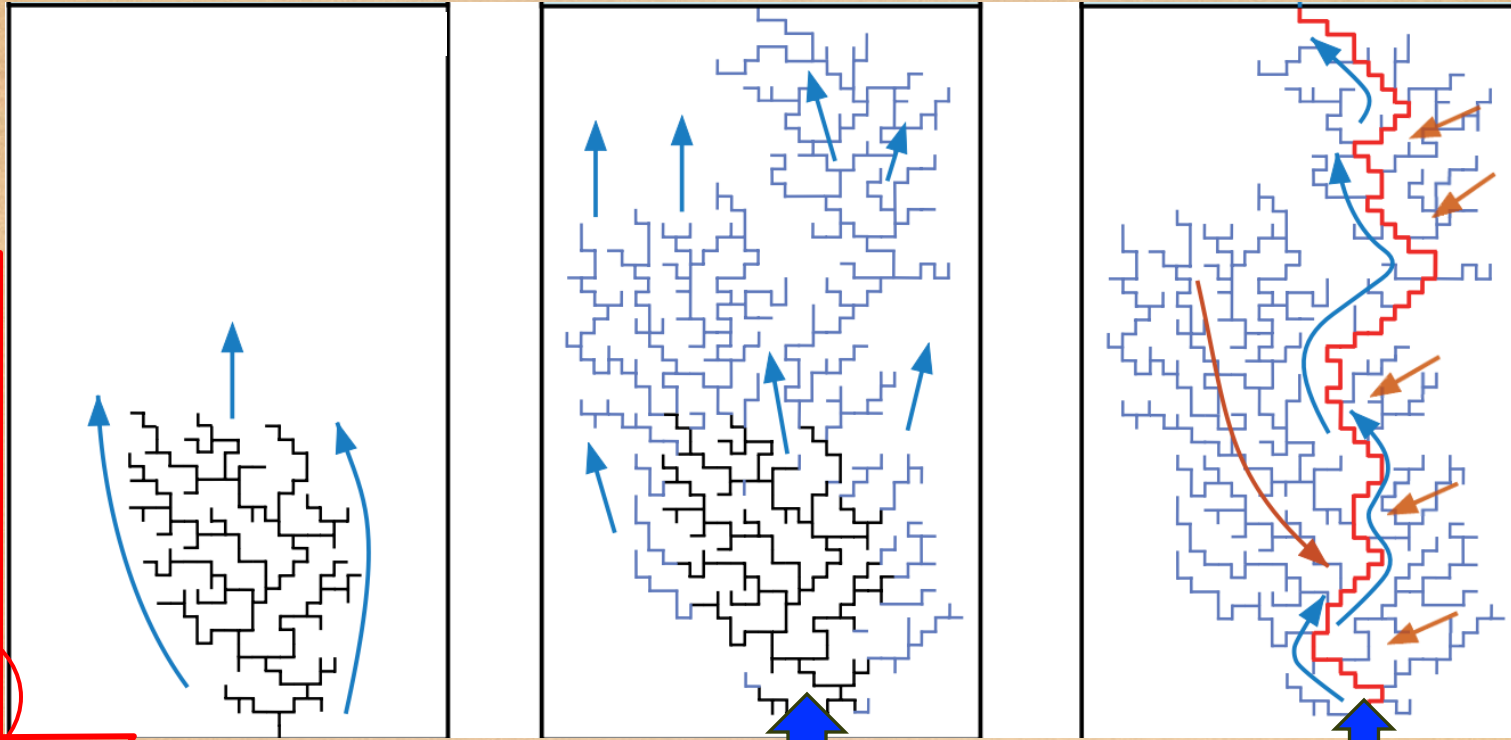
- ❖ El magmatismo asociado a zonas de suprasubducción se presenta en un frente paralelo a la zona de subducción con actividad intrusiva y volcánica conformando un arco magmático .
- ❖ En zonas de suprasubducción la actividad magmática volcano- plutónica es de composición calcoalcalina (arco magmático), siendo progresivamente más alcalinos hacia el interior continental. ( Bolivia, Argentina ).
- ❖ Los magmas involucrados derivan de la fusión parcial del manto astenosférico, inducida esta por los volátiles y una pequeña proporción de magma que son liberados desde la placa oceánica en subducción, cuyas rocas son sometidas progresivamente a condiciones de mayor temperatura y presión al subductarse, sufriendo metamorfismo, formando nuevos minerales anhidros, más estables en condiciones de profundidad y liberando fluidos.
- ❖ La adición de componentes volátiles a rocas del manto astenosférico, sometidas a alta temperatura y presión, resultan en su fusión parcial y los magmas basálticos así generados, ascienden debido a diferencia de densidad con las rocas que los contienen.
- ❖ Procesos subsecuentes de diferenciación (cristalización fraccionada) y asimilación de rocas suprayacentes (contaminación cortical) , dan origen a las rocas volcánicas o intrusivas características de los arcos magmáticos.
- ❖ **Entonces, el magmatismo aporta calor, fluidos y metales.**
- ❖ La fuente de los metales estaría relacionada entonces a la corteza oceánica subductada, a la cuña del manto astenosférico sobre la placa de subducción y a las rocas de caja a lo largo del camino de ascenso del magma y de los fluidos hidrotermales circulantes
- ❖ La mineralización formada en este ambiente es por lo tanto hidrotermal, asociada espacial y temporalmente a la actividad intrusiva o extrusiva de naturaleza calcoalcalina



# El camino inicial, el paso de un sistema magmático a hidrotermal

Baja permeabilidad

> permeabilidad



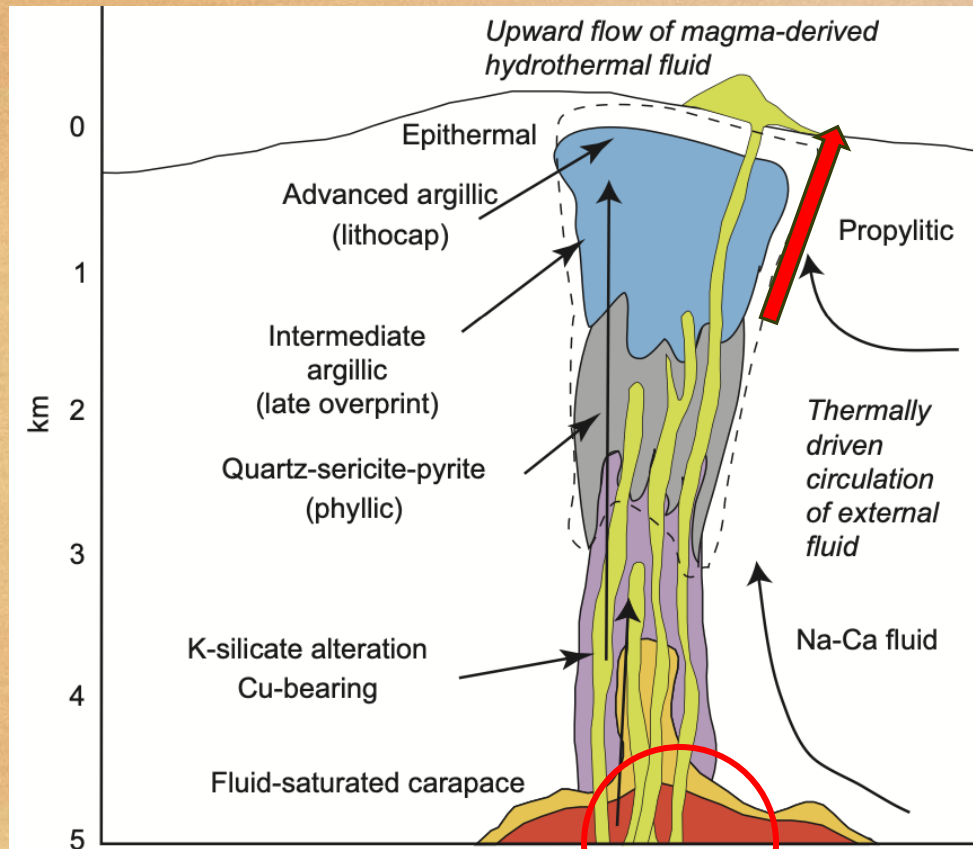
FLUJO



Magmático

MAC 2025

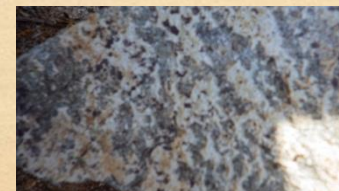
# El Litocap controla el modelo !!!



Fluidos



UST's & Texturas Miariolíticas



Hidrotermal

Magmático

MAC- Mod. R. Tosdal 2009

## Depósitos Estrato - Ligados, una definición morfológica ?? Qué dice el campo !!!

- Los depósitos del tipo estrato - ligados han sido definidos como cuerpos subhorizontales “tipo manto” y por su relación a c

- Estos yacimientos calcoalcalinos

- Esta definición

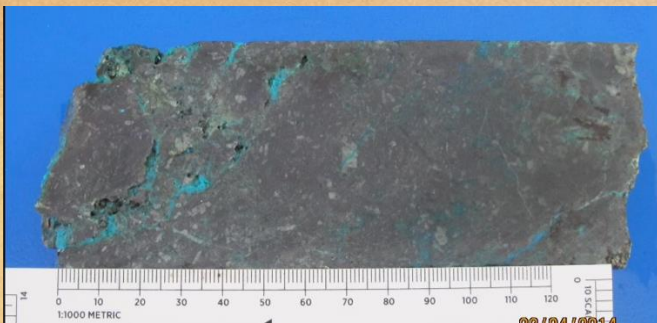
- Históricamente asociados, la roca huésped puede corresponder a tobas carbonatadas, síncitas crásticas y en algunos casos intercaladas dentro de secuencias volcánicas.



- La relación sedimentos carbonatados - mineralización también ha sido descrita en los llamados depósitos tipo Carlin.

## Depósitos Estrato - Ligados, una definición morfológica ?? Qué dice el campo !!!

- Cuando el ambiente geológico es volcánico, la mineralización ocurre principalmente en lavas andesíticas porfiríticas y en cuerpos de brechas ( hidrotermales? ), comúnmente en zonas con texturas amigdaloidales de lavas o rellenando fracturas y también finamente disseminada en la masa fundamental.
- En el caso que las rocas huésped sea carbonática , calcarea y / o areniscas, la mineralización de sulfuros se encuentra disseminada y asociada a eventualmente con material orgánico.
- En los depósitos que se ubican en la franja de yacimientos definidos como del tipo estrato ligados, la presencia de diques, sills de intrusivos subvolcánicos y rocas intrusivas detectadas en profundidad llaman la atención por su posible relación genética con una fuente, magmática hidrotermal.



- **Históricamente se han especulado tres principales formas relacionadas a su génesis?**

- **Caso Chileno**

- Origen metamórfico hidrotermal (Losert, 1973; Sato, 1984; Sillitoe, 1990). Los yacimientos se habrían formado por lixiviación del cobre contenido en la secuencia volcánica, durante los procesos de metamorfismo y se habría concentrado en sitios favorables controlado por estructuras, niveles porosos y/o intrusiones subvolcánicas. De acuerdo a esta postura los fluidos mineralizadores serían aguas metamórficas generadas por procesos de deshidratación durante el metamorfismo.
- b) Origen hidrotermal asociado a intrusivos subvolcánicos (Espinoza, Chavez, 1985; Palacios, 1986). En esta postura los yacimientos estratoligados hidrotermal que las afecta estarían directamente relacionados al emplazamiento de los intrusivos subvolcánicos (cuellos volcánicos (domos ), filones-mantos, diques y conductos del volcanismo Jurásico. El cobre y otros elementos habrían de haberse depositado durante la formación de los intrusivos, pero estos en general no presentan mineralización económica.
- c) Vivallo y Henriquez (1998) plantearon, en base a una comparación química e isotópica, que los depósitos estratoligados de cobre en rocas volcánicas del jurásico tendrían un origen hidrotermal común con vetas mesotermales de cobre del Jurásico Medio a Superior emplazadas en batolitos Jurásicos de la Cordillera de la Costa de Antofagasta Chile



## Y los tipo Carlin ??? ; Estrato Ligados???

En los depósitos tipo Carlin, la mineralización de oro se produce en un complejo sistema estructural en el que dominan convergencias de pliegues, fallas y litologías favorables. Brechas (de disolución ???) hidrotermales, se emplazan a lo largo de fallas normales y fallas inversas reactivadas, a veces descritas como brechas tectónicas. Las Brechas presentan fragmentos de diques del Eoceno, pero también son cortadas por ellos.

Johnston y Ressel (2004), Ressel y Henry (2006) y Johnston et al. (2008) proponen que el tipo Carlin ( ( disseminated gold deposits) que ocurren especialmente en Nevada, están espacialmente asociados con intrusiones ígneas y que los plutones más grandes emplazados a profundidad, “posiblemente”, proporcionaron una fuente de calor prolongada durante un período de >4 Ma durante el Eoceno para mejorar la circulación hidrotermal en los distritos de oro durante la mineralización.

## Y esos fluidos hidrotermales de donde vinieron ??

En esta conferencia discutiremos evidencias de campo que relacionan, desde el punto de vista genético y no morfológico, la existencia de estos yacimientos relacionados a eventos magmáticos - hidrotermales en los cuales el resultado final dependerá principalmente de la composición de la roca de caja huésped, volcánicas, sedimentarias carbonatadas, .....

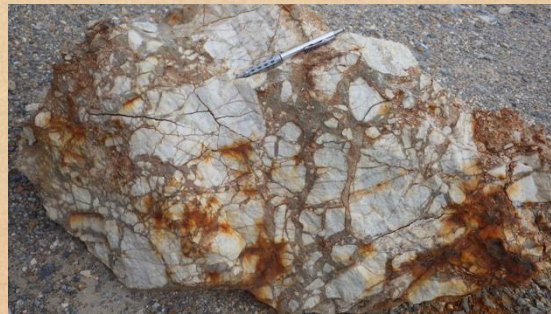
Mineralización en núcleo y charlena, sin –emplazamiento de la mineralización



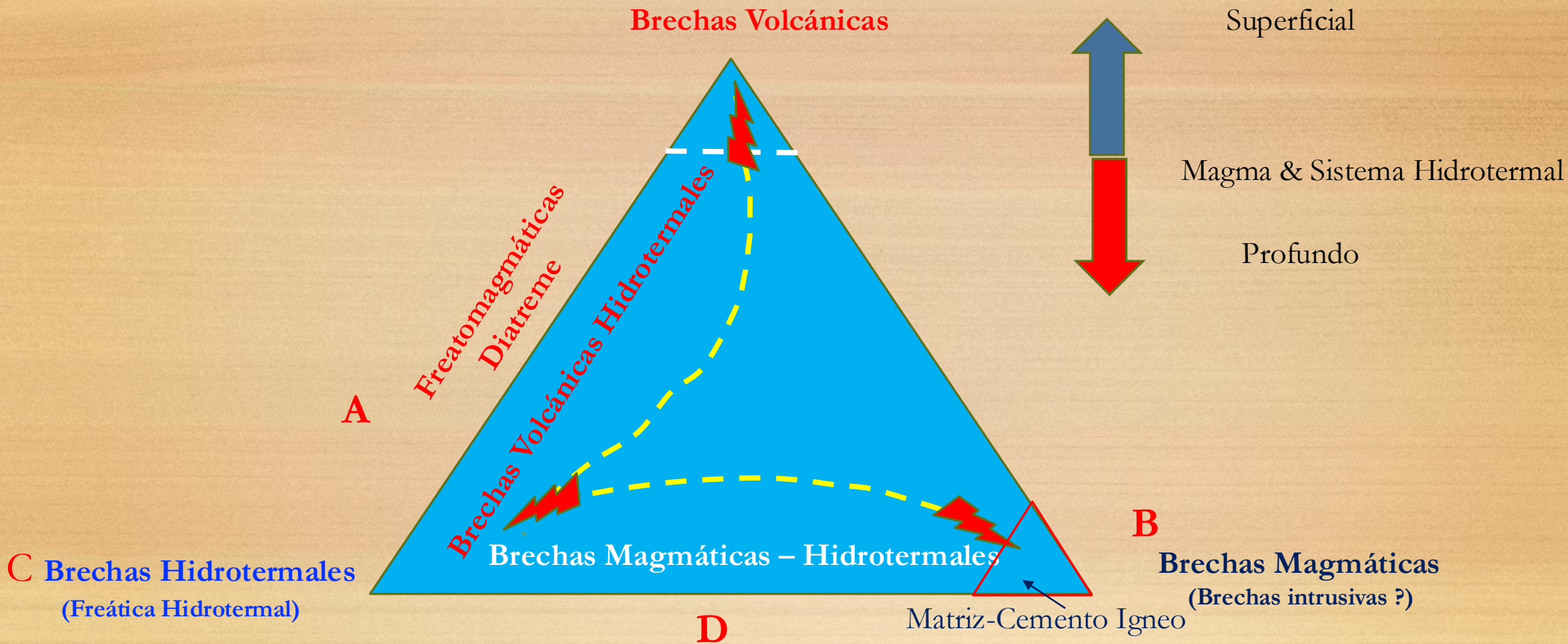
## Permeabilidad un parámetro esencial



Brechas, freato magmáticas, brechas freáticas hidrotermales , en un estrato ligado ??



Las Brechas, a menudo aparecen en los depósitos estrato ligados... COMO INTERPRETAR!!! R



MAC; Modificado de Cook

## Depósitos definidos como del tipo Estrato - Ligados descritos en México

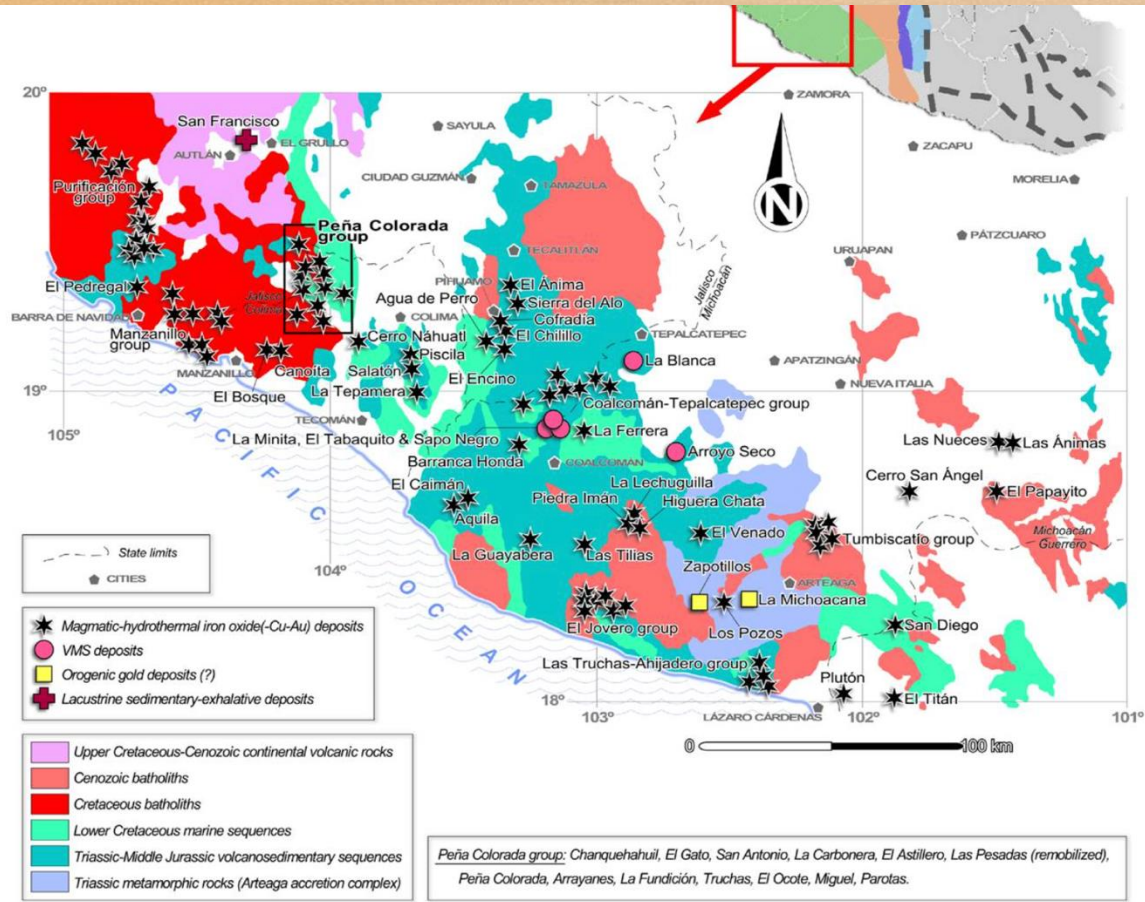
### Una sola referencia

- ❖ En México los depósitos del tipo estrato ligados contienen metales bases, Pb, Zn, Cu y no metálicos de barita, fluorita , emplazados en rocas sedimentarias.
  
- ❖ Se han descrito:
  - **Depósitos de cobre en areniscas rojas :**  
Chihuahua .
  - **Depósitos de tipo Mississippi Valley (MVT):**  
Fluorita y celestita en la región de San Luis Potosí a Coahuila.
  - **Depósitos de sulfuros masivos vulcanogenéticos:**  
San Nicolás (Durango) y Francisco I Madero (Zacatecas).
  - **Depósitos sedimentario-exhalativos:**  
Molango (Hidalgo) y El Boleo (Baja California Sur)
  
  - **Depósitos Tipo IOA ( Iron oxide Apatite ) ??**  
Colima

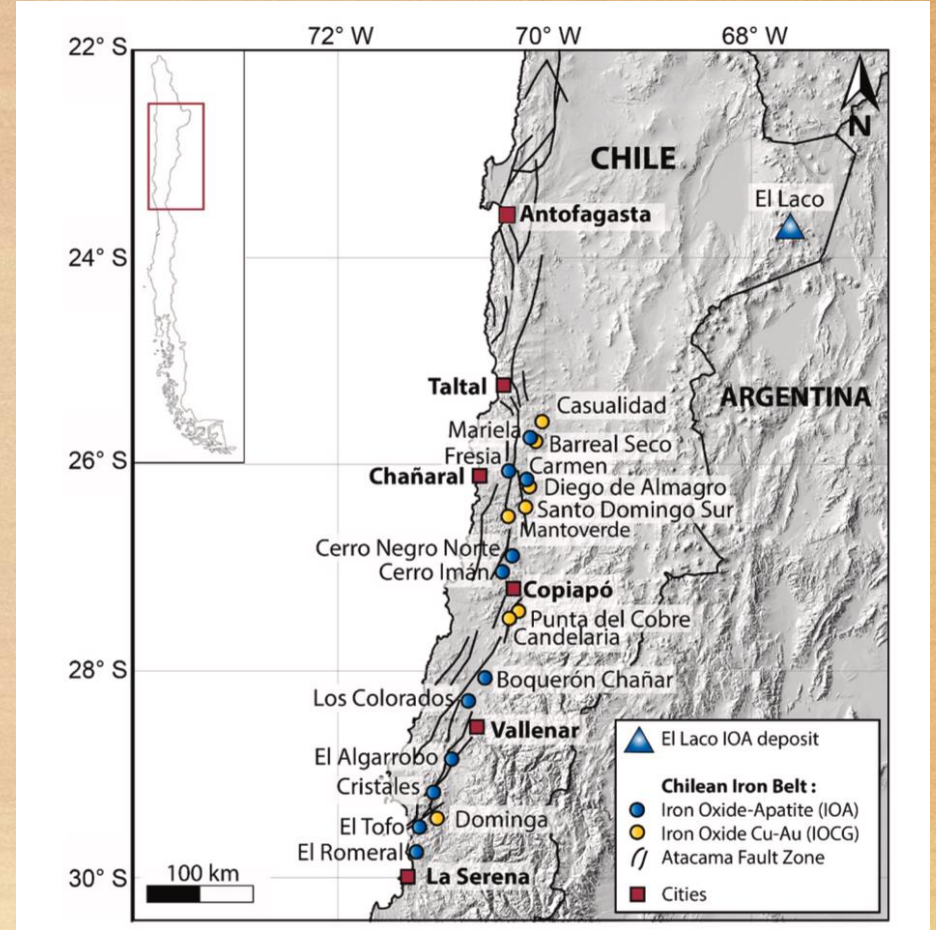
# Depósitos definidos como del tipo IOCG (IOA ?) son en parte Estrato-Ligados ?

## Su relación de génesis con actividad Magmática Hidrotermal

### Mexico - Chile

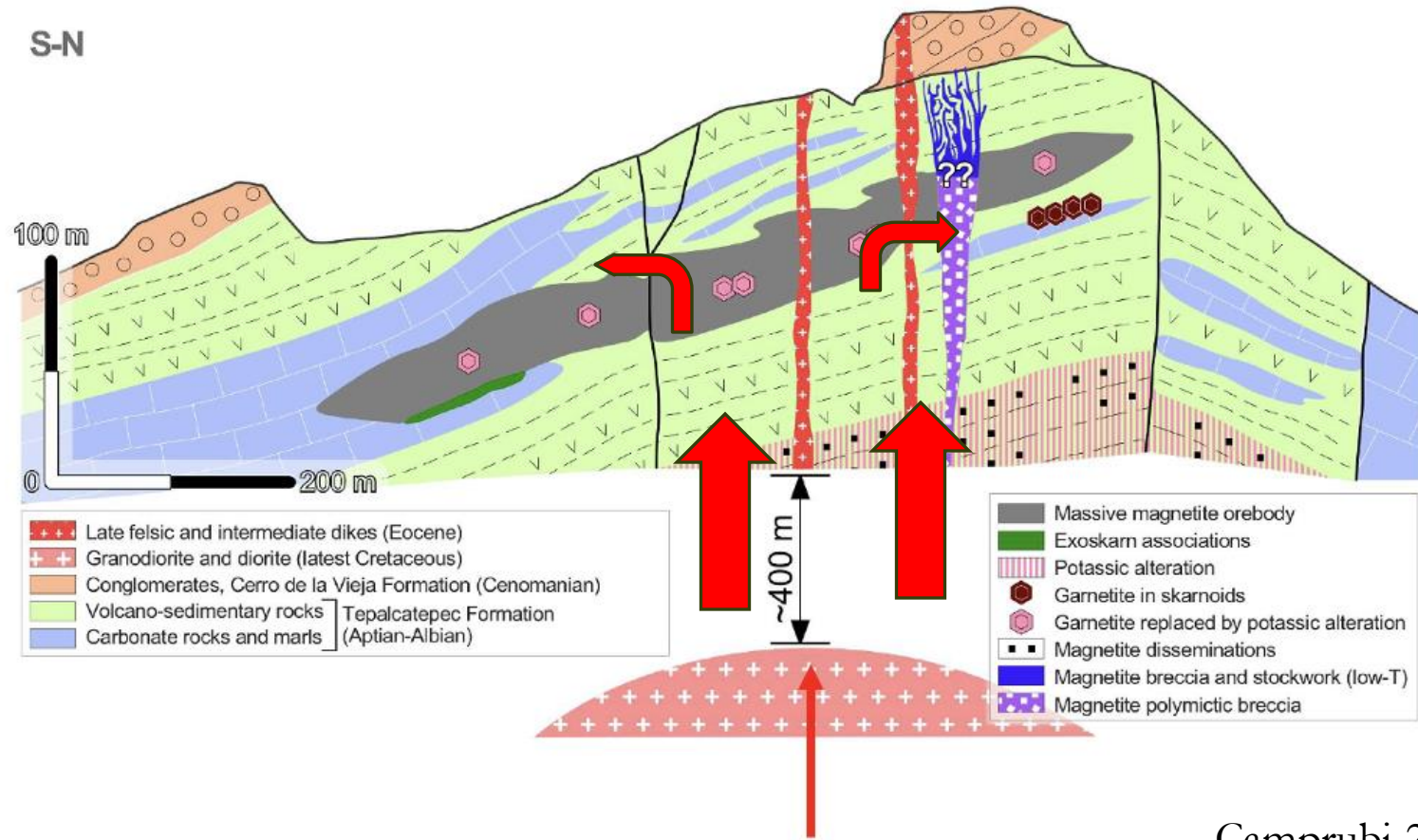


Camprubi 2018



in G.Palma 2020

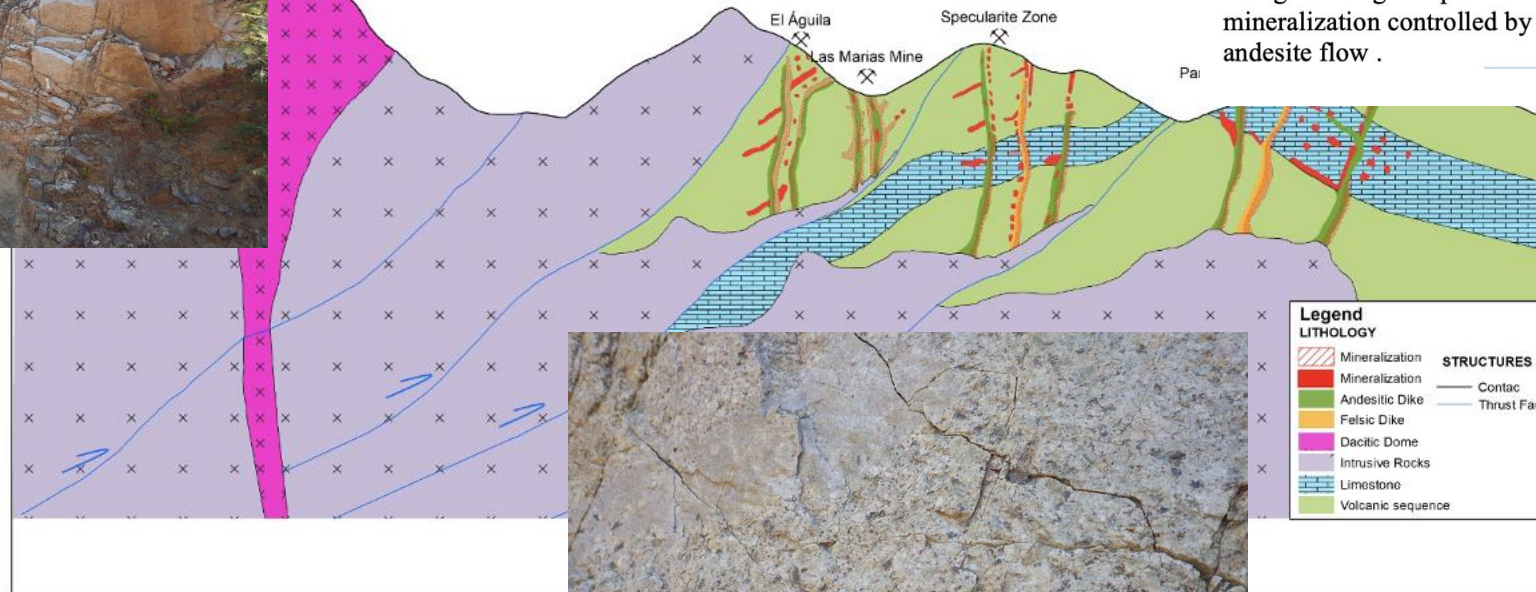
# Estrato Ligados (IOA ) México, su relación genética con actividad Magmática Hidrotermal



# (IOA –IOCG ) México- Su relación de génesis con actividad Magmática Hidrotermal



Conceptual Schematic Geological Model For Exploration  
Looking to Northeast



El Águila Target: Aplite feeder's dike and magnetite- chalcopyrite mineralization controlled by favorable and subhorizontal permeable andesite flow .

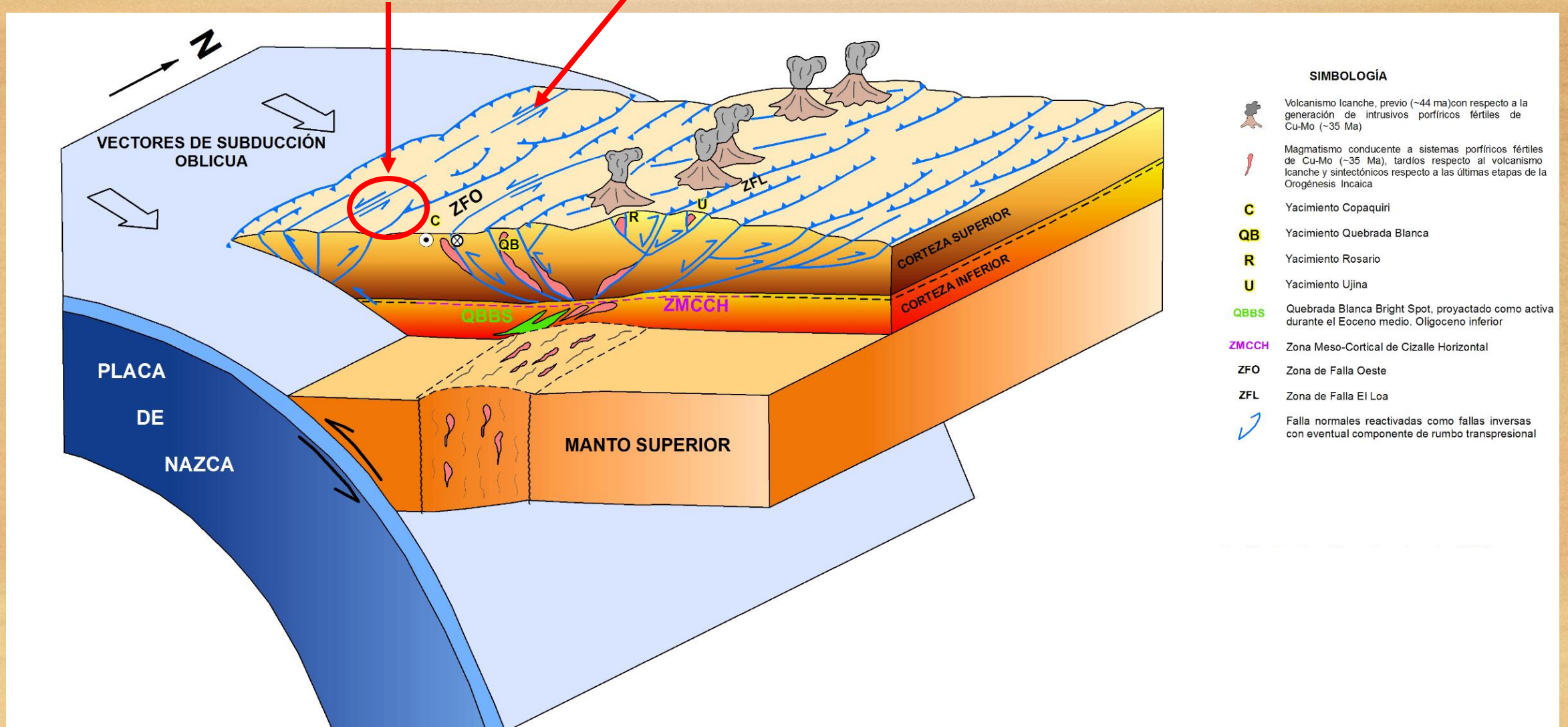


# (IOA –IOCG) - Su relación de génesis con actividad Magmática Hidrotermal

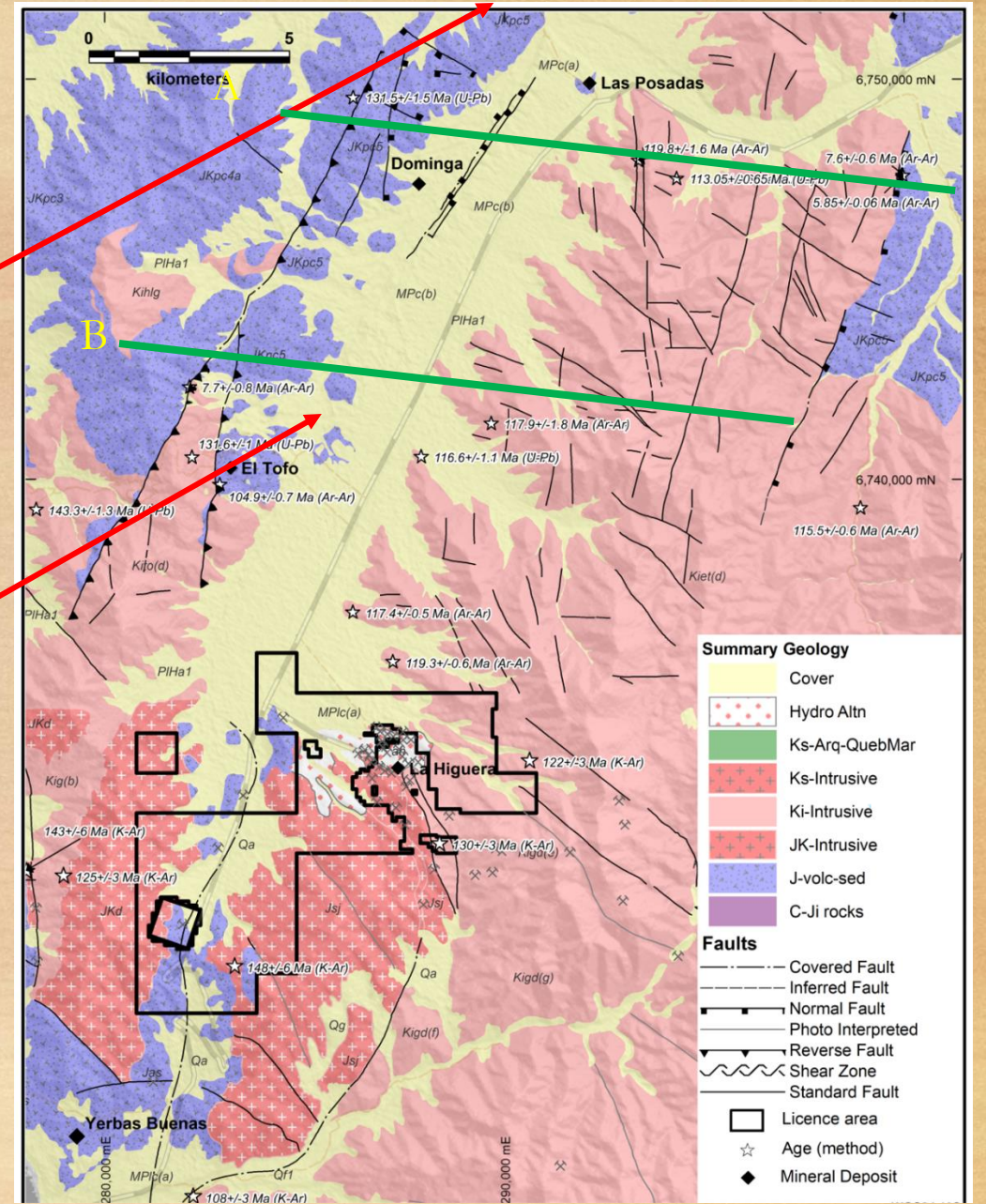
## Referencia a Chile

Si lo vemos regionalmente este sería el estilo estructural en el proyecto

Falla de Atacama



# Depósitos definidos como del tipo IOCG (IOA ?) son Estrato-Ligados ?

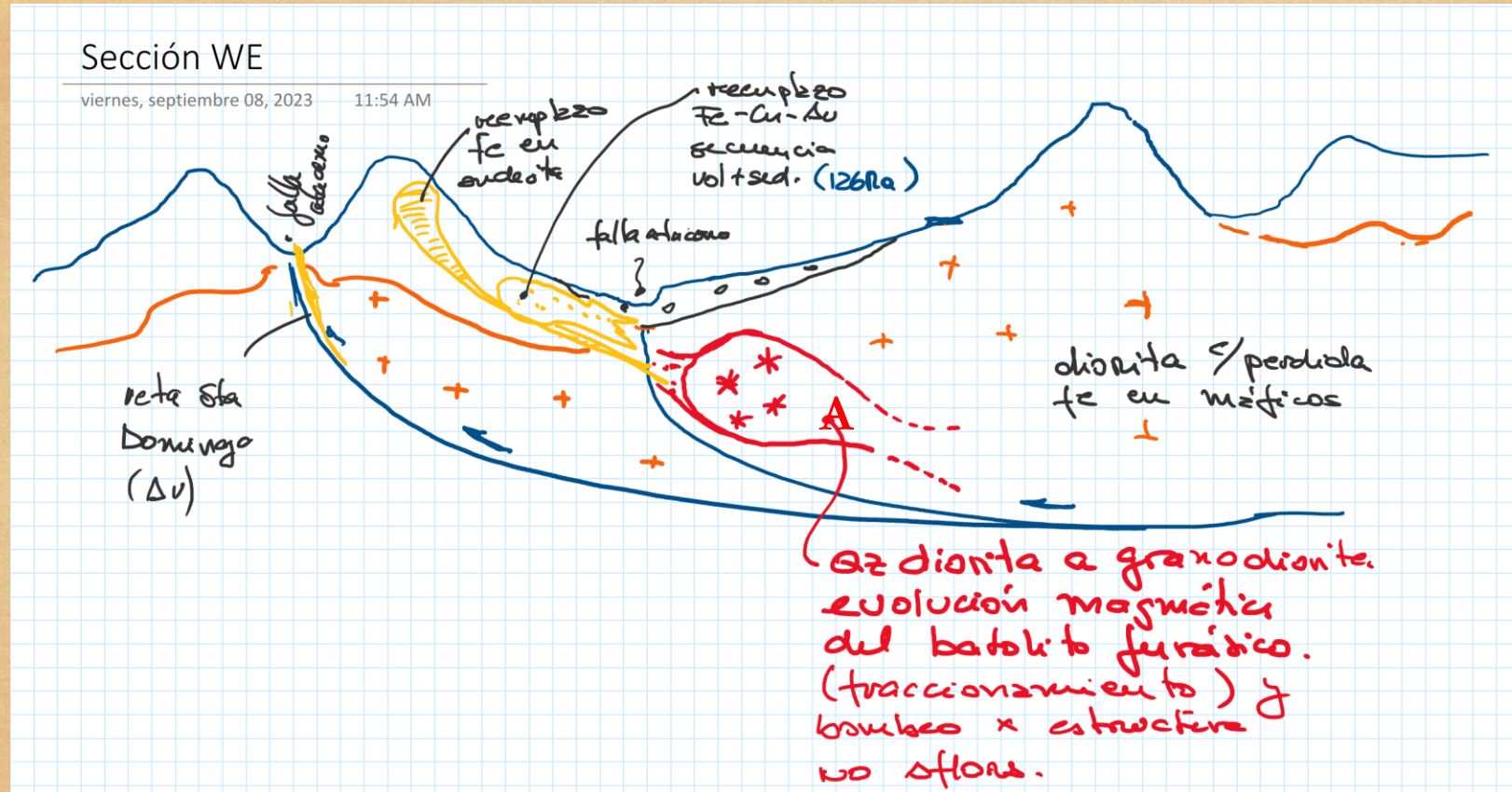


# Depósitos definidos como del tipo IOCG (IOA ?) son Estrato-Ligados ?



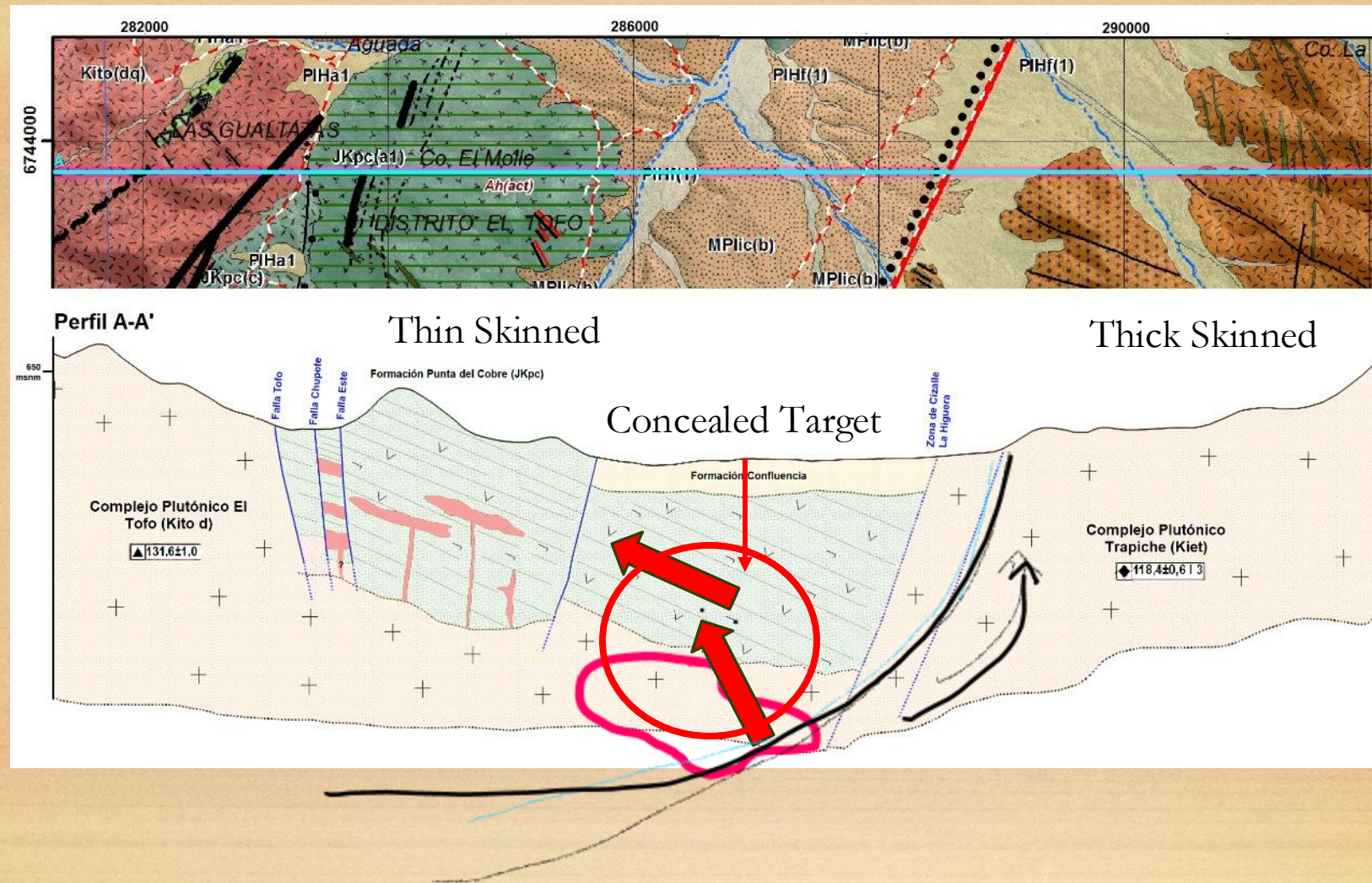
# Depósitos definidos como del tipo IOCG (IOA ?) Estrato-Ligados ? y los fluidos de donde vienen!!!!

A



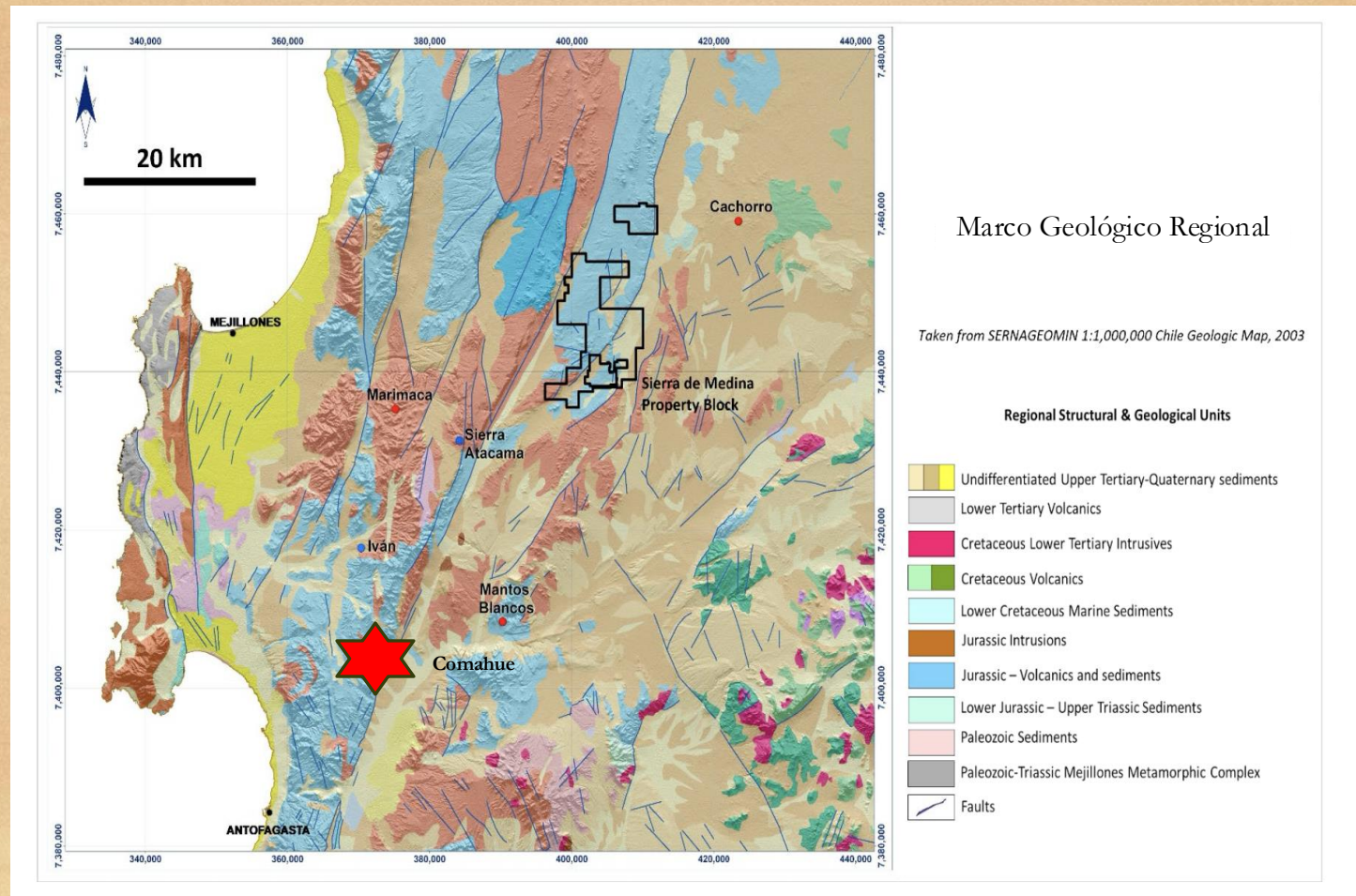
# Depósitos definidos como del tipo IOCG (IOA ?) Estrato-Ligados ?

B

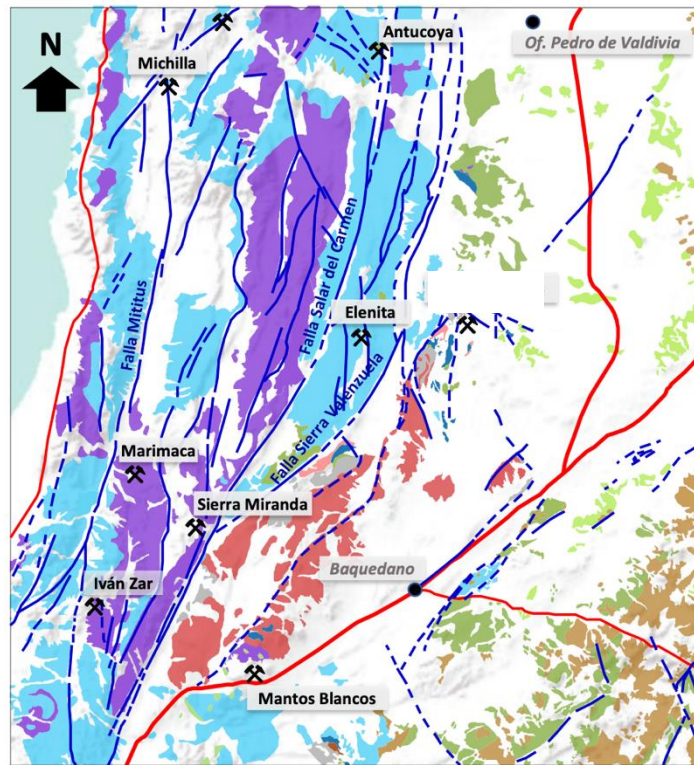


# Depósitos Estrato Ligados, norte de Chile

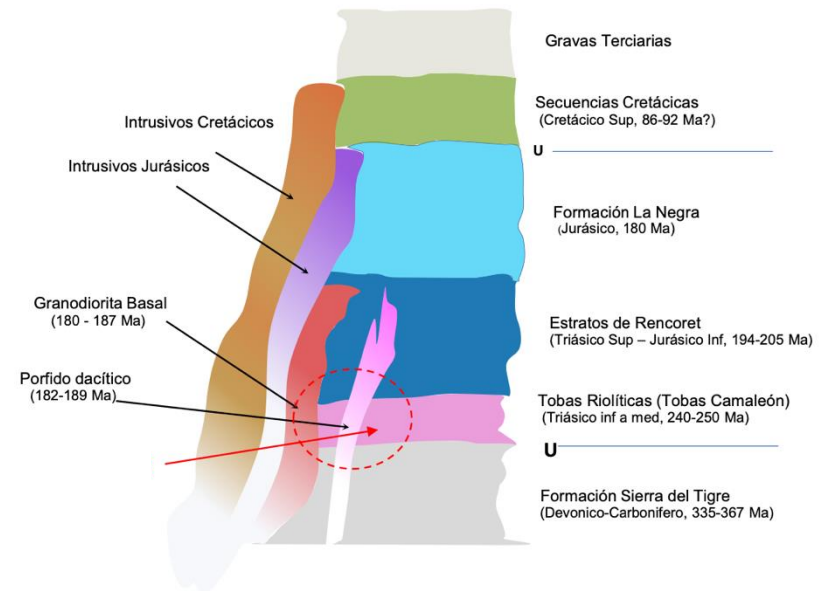
## Casos de Estudio



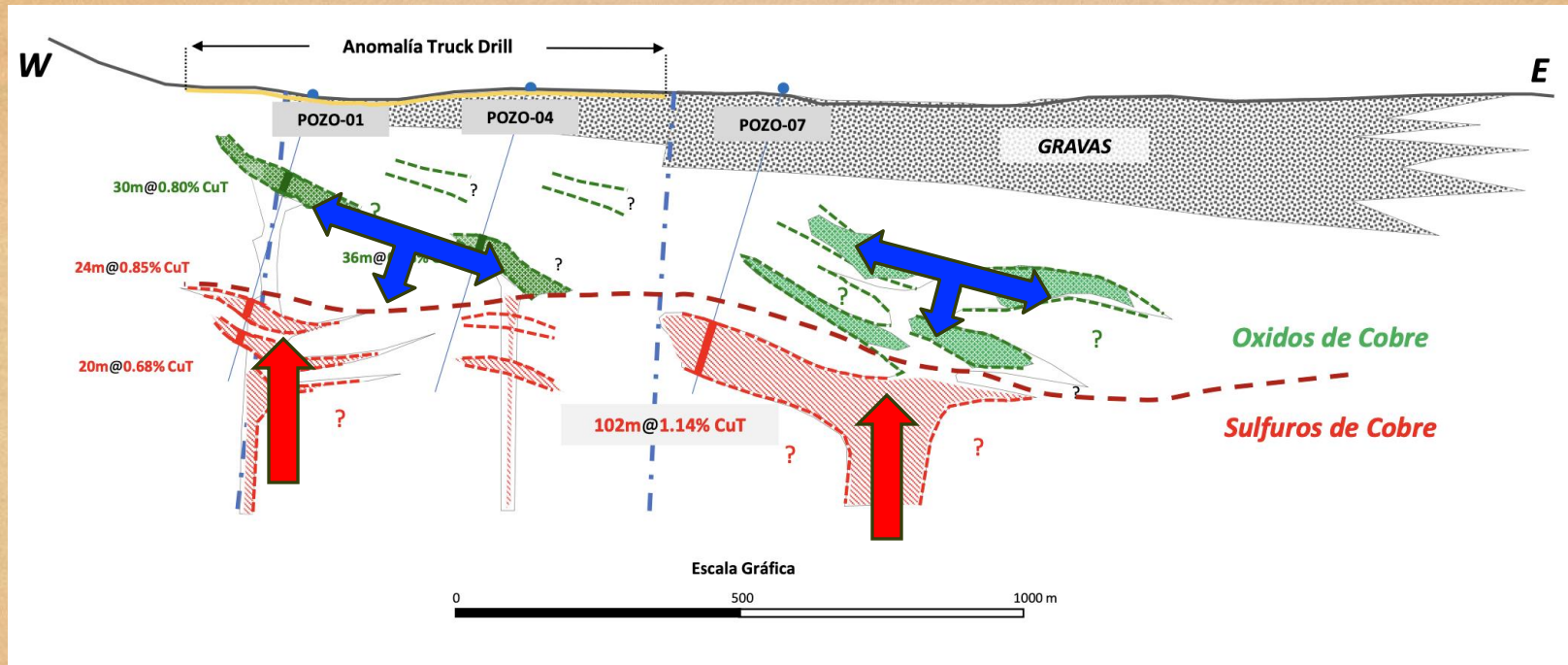
## Depósitos Estrato Ligados, norte de Chile- control estructural - litológico



20 km

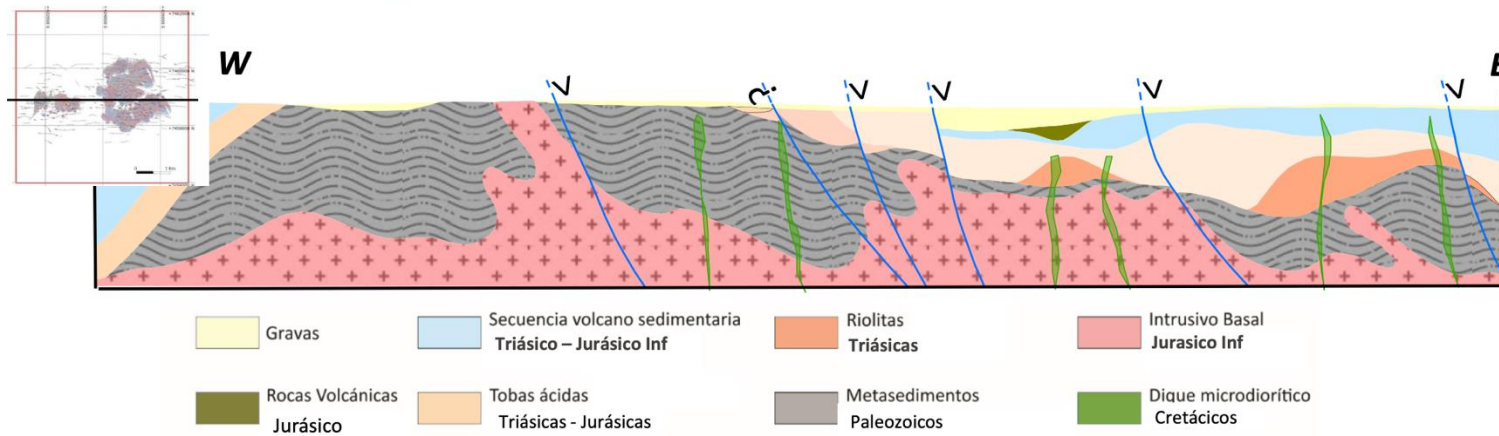


# Depósitos Estrato Ligados, Control estructural, Fuente de los metales ??

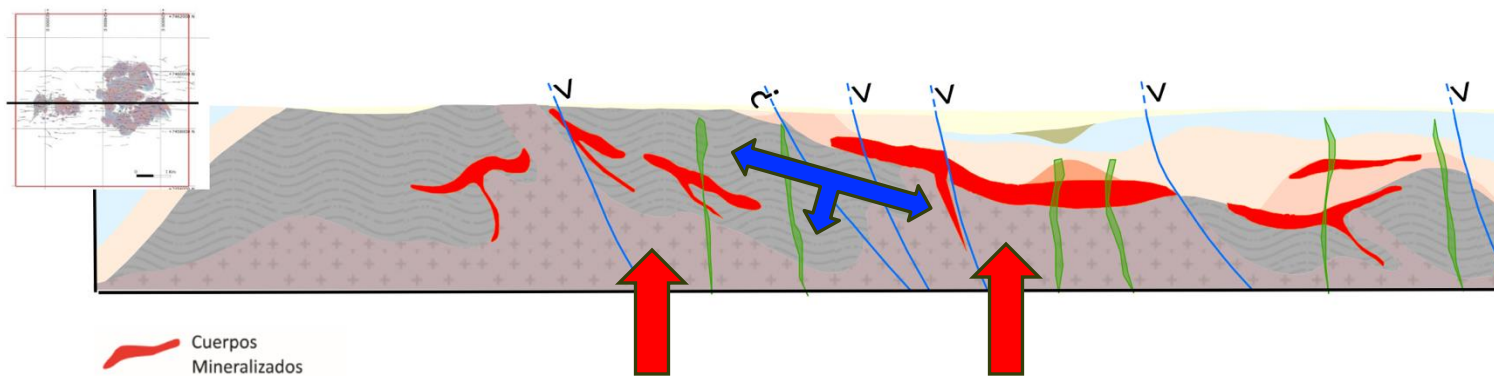


# Depósitos Estrato Ligados, norte de Chile, control litológico, fuente intrusiva

## Perfil esquemático – Litología

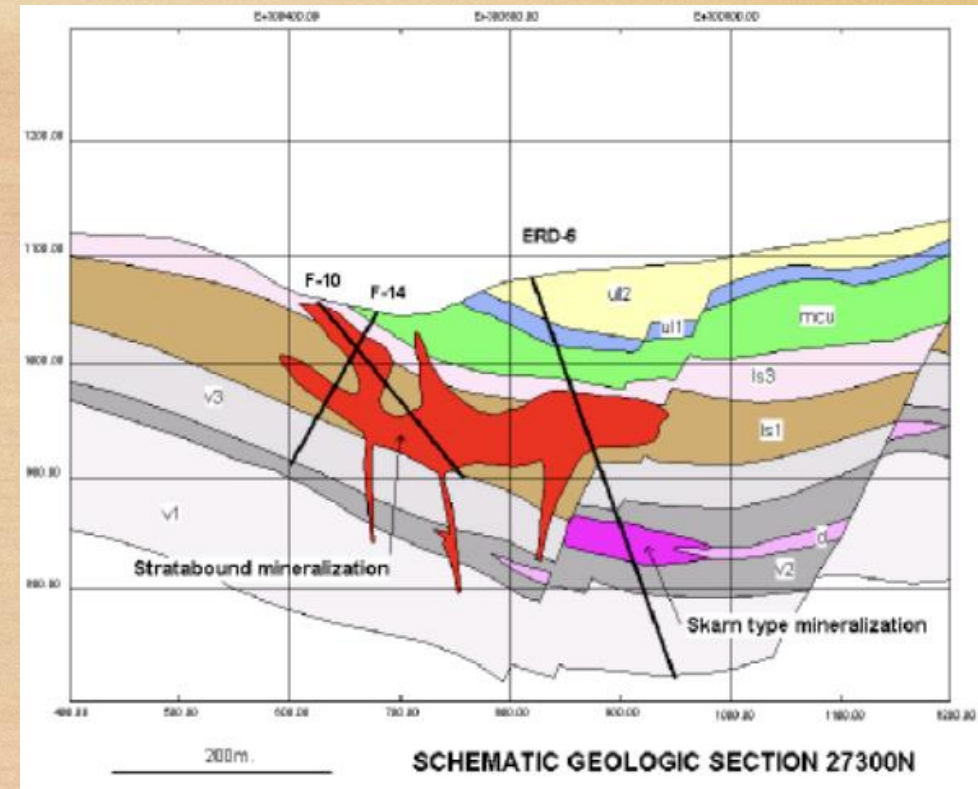
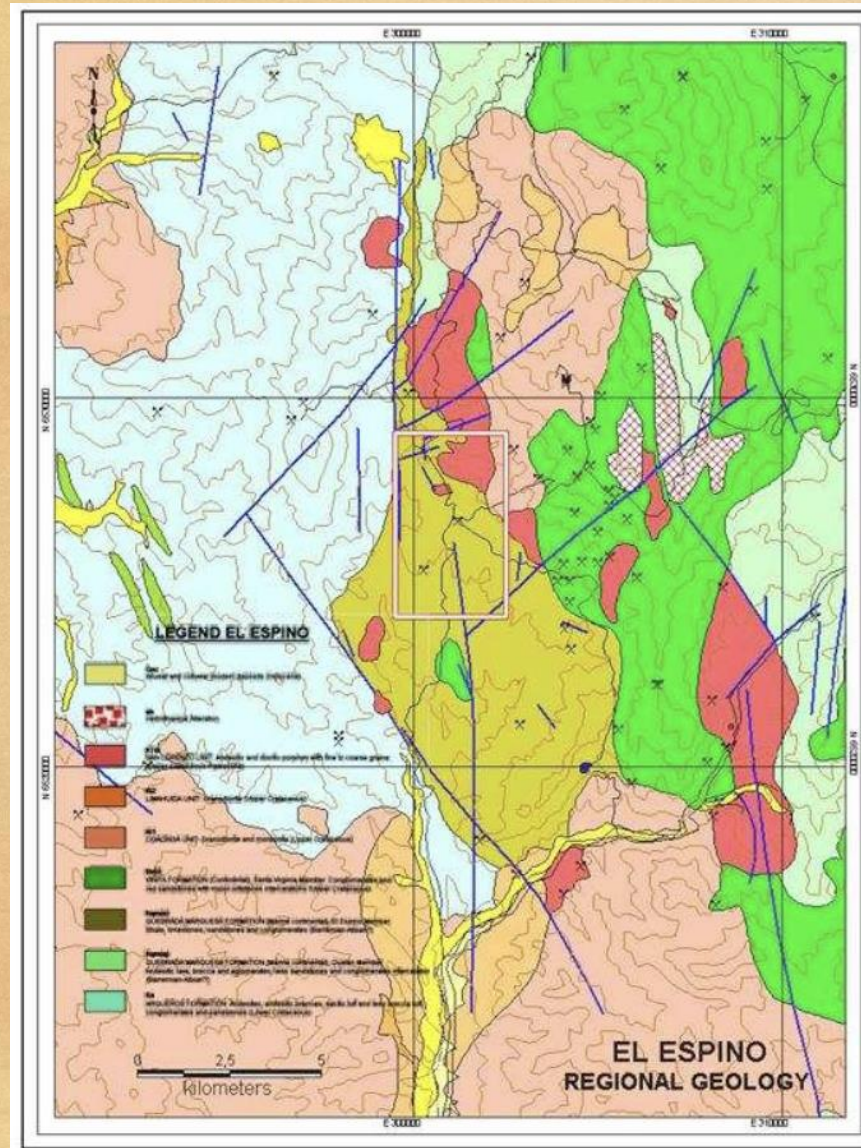


## Perfil esquemático – Mineralización

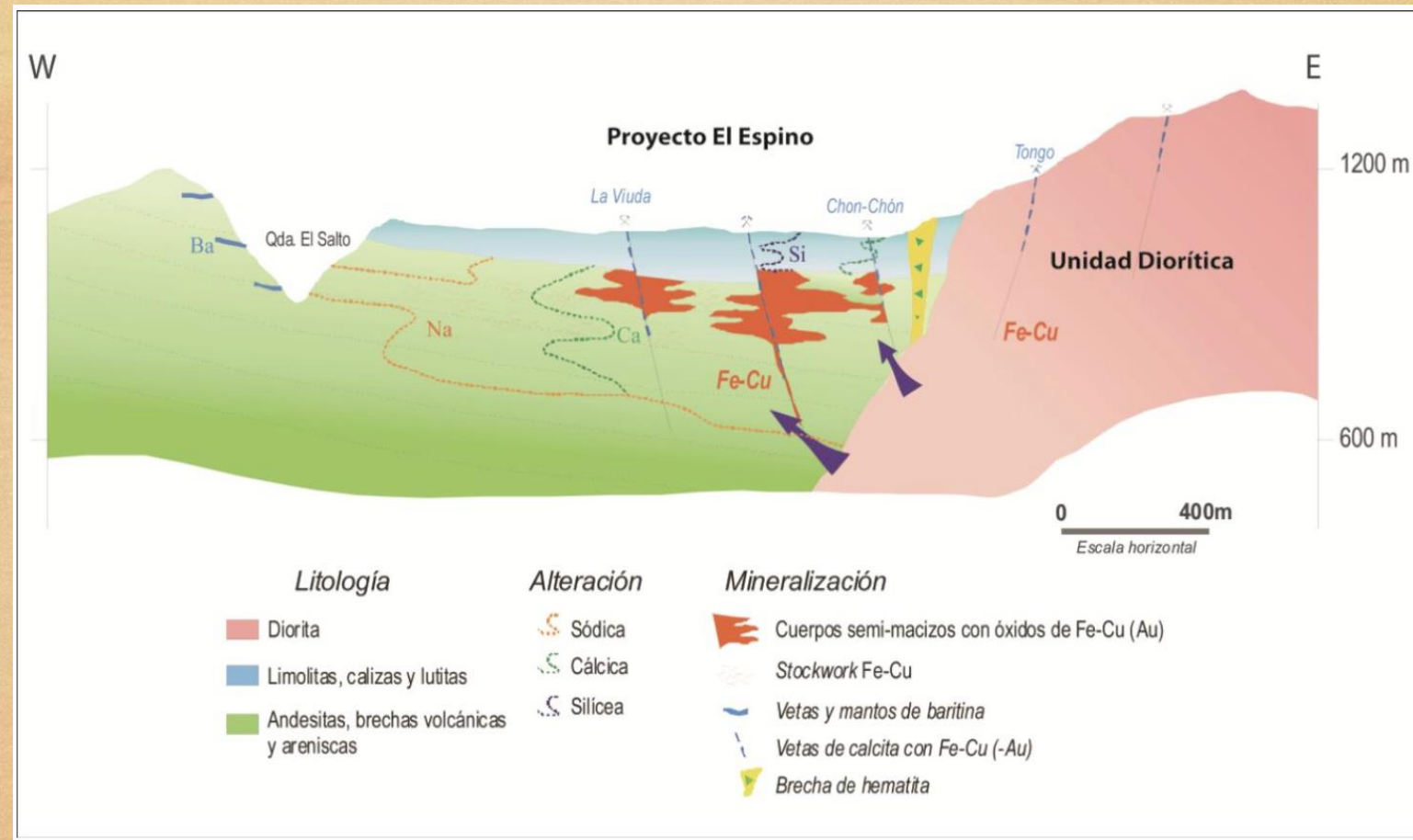




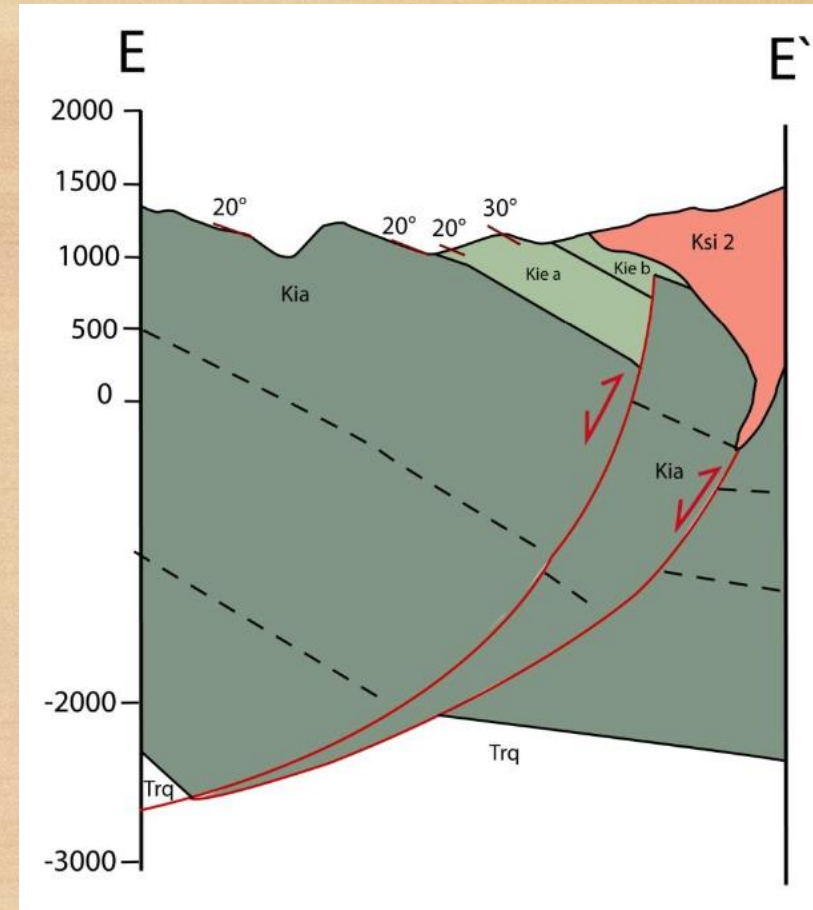
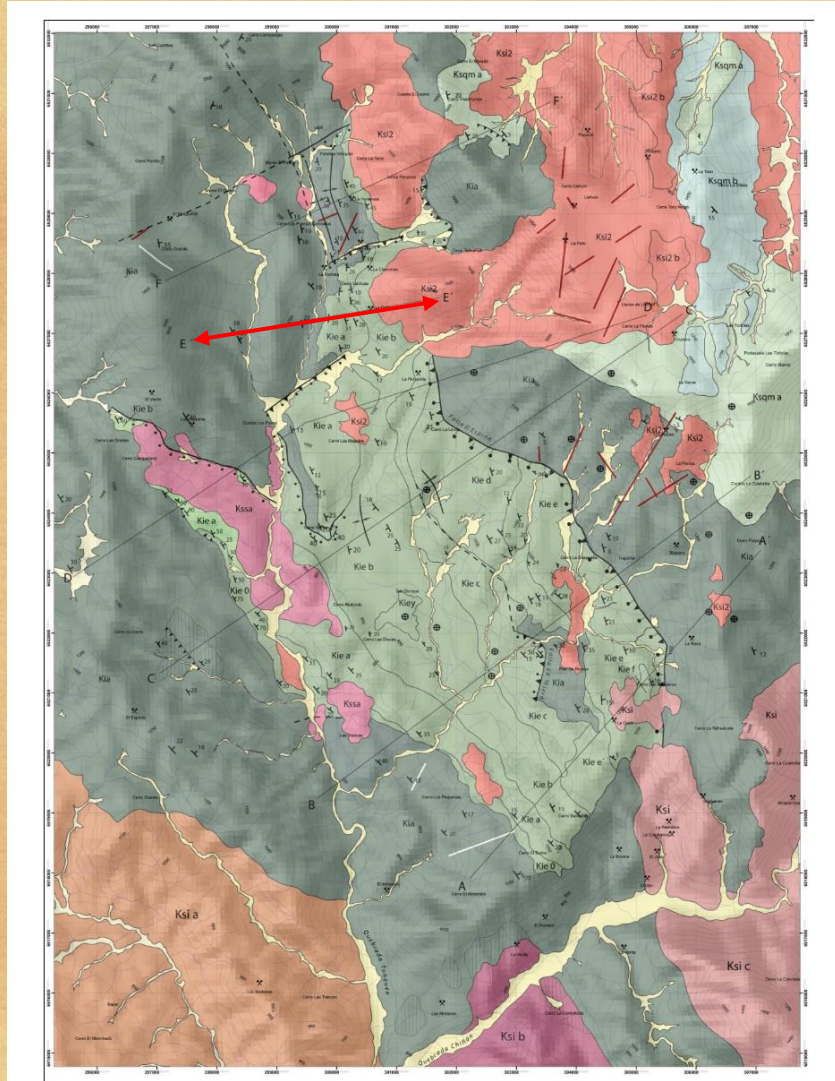
## Control litológico y la fuente ??



## Depósitos Estrato Ligados, norte de Chile, intrusivos cercanos !!! , pórfidos , una relación ??



## Falla inversa, vergente al este, fase compressiva, y los pórfidos??



# Depósito tipo IOCG – Link ??? – Pórfido de Cu-Mo-Au

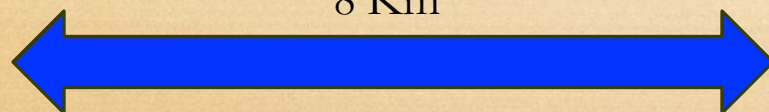


Pórfido Llahuin

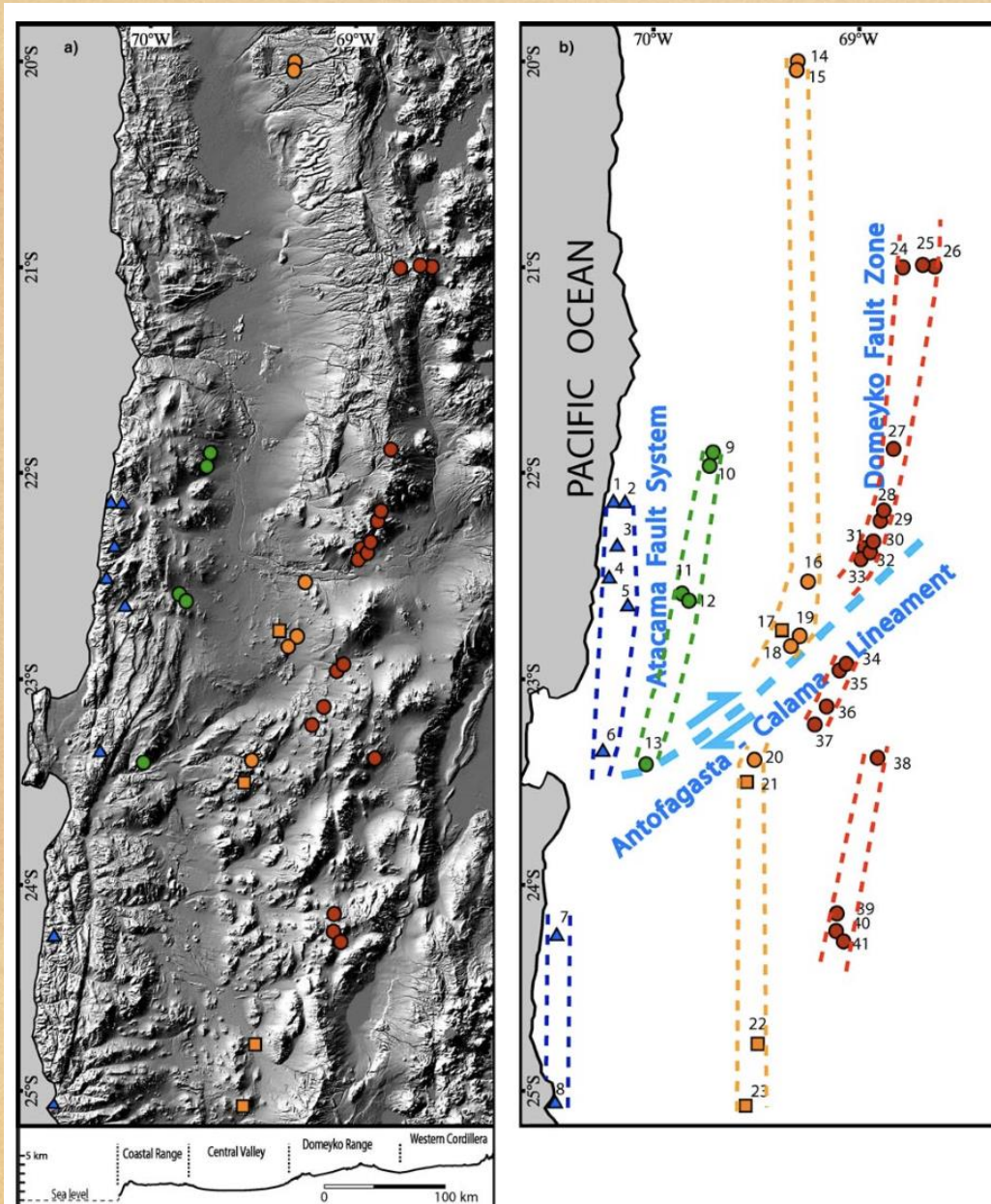
???

El Espino IOCG

8 Km

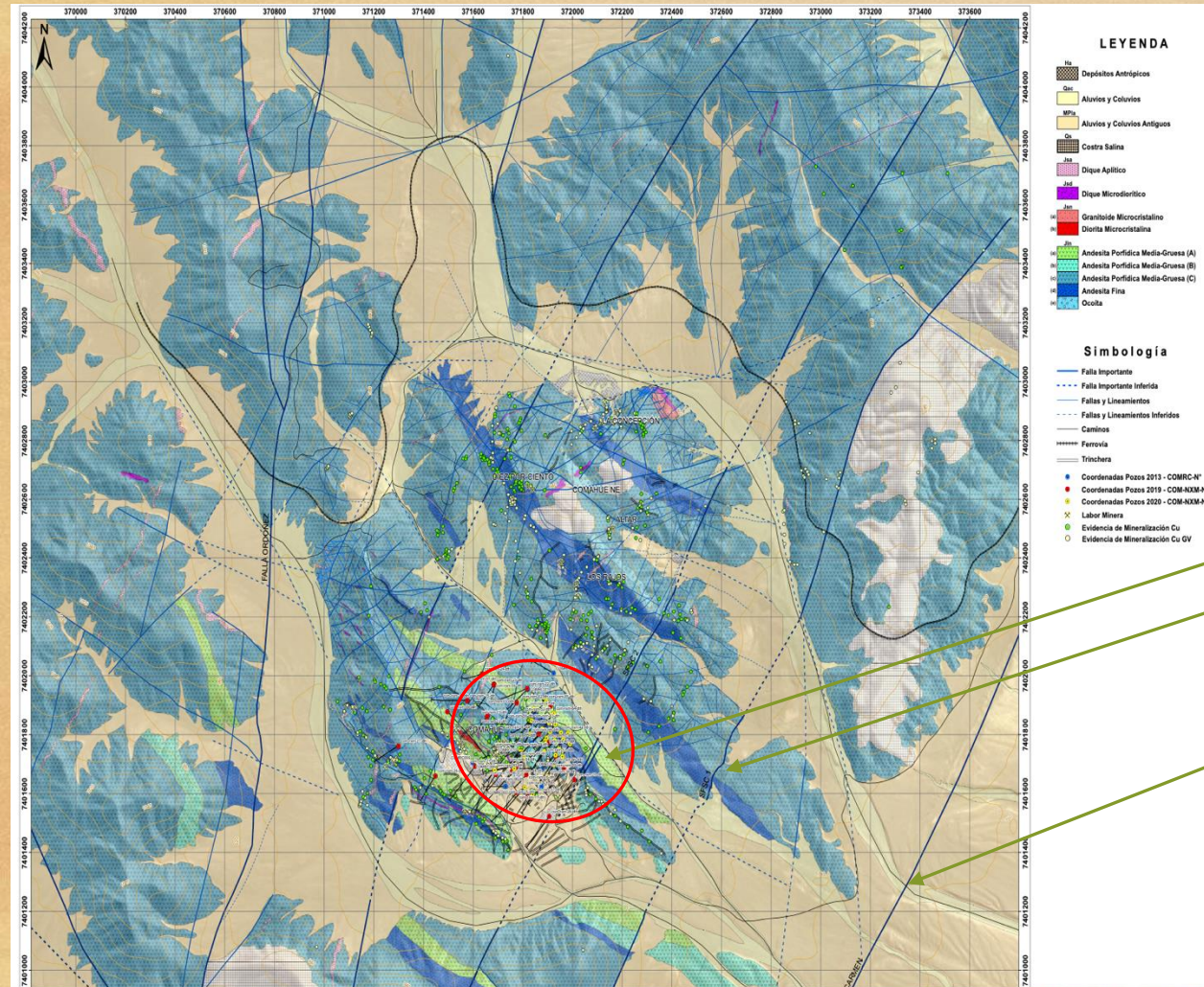


# Marco Tectónico



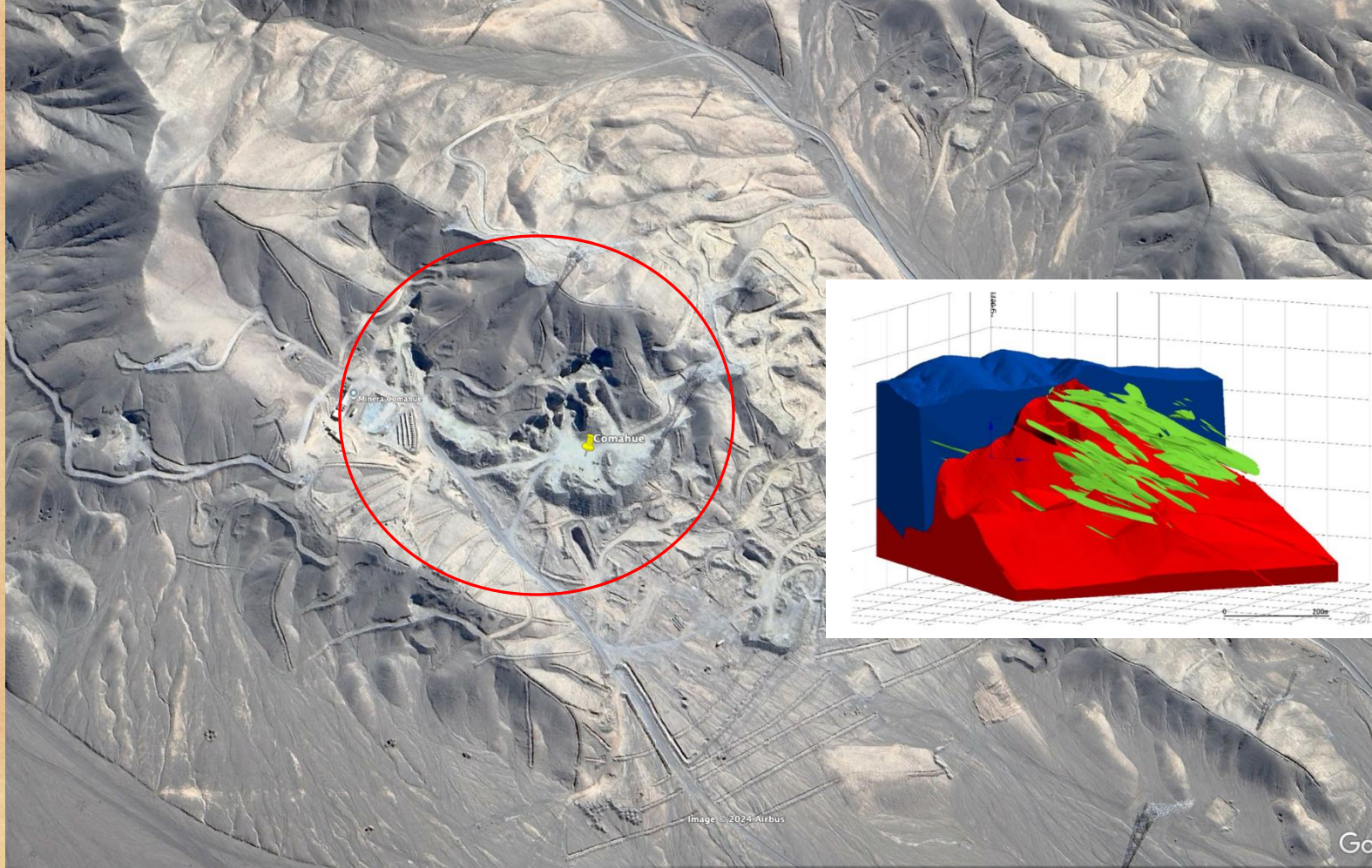
Ramirez 2006

# Estructuras mayores en facies compresivas permiten emplazamiento de cuerpos intrusivos



Comahue  
Marco Geológico Distrital

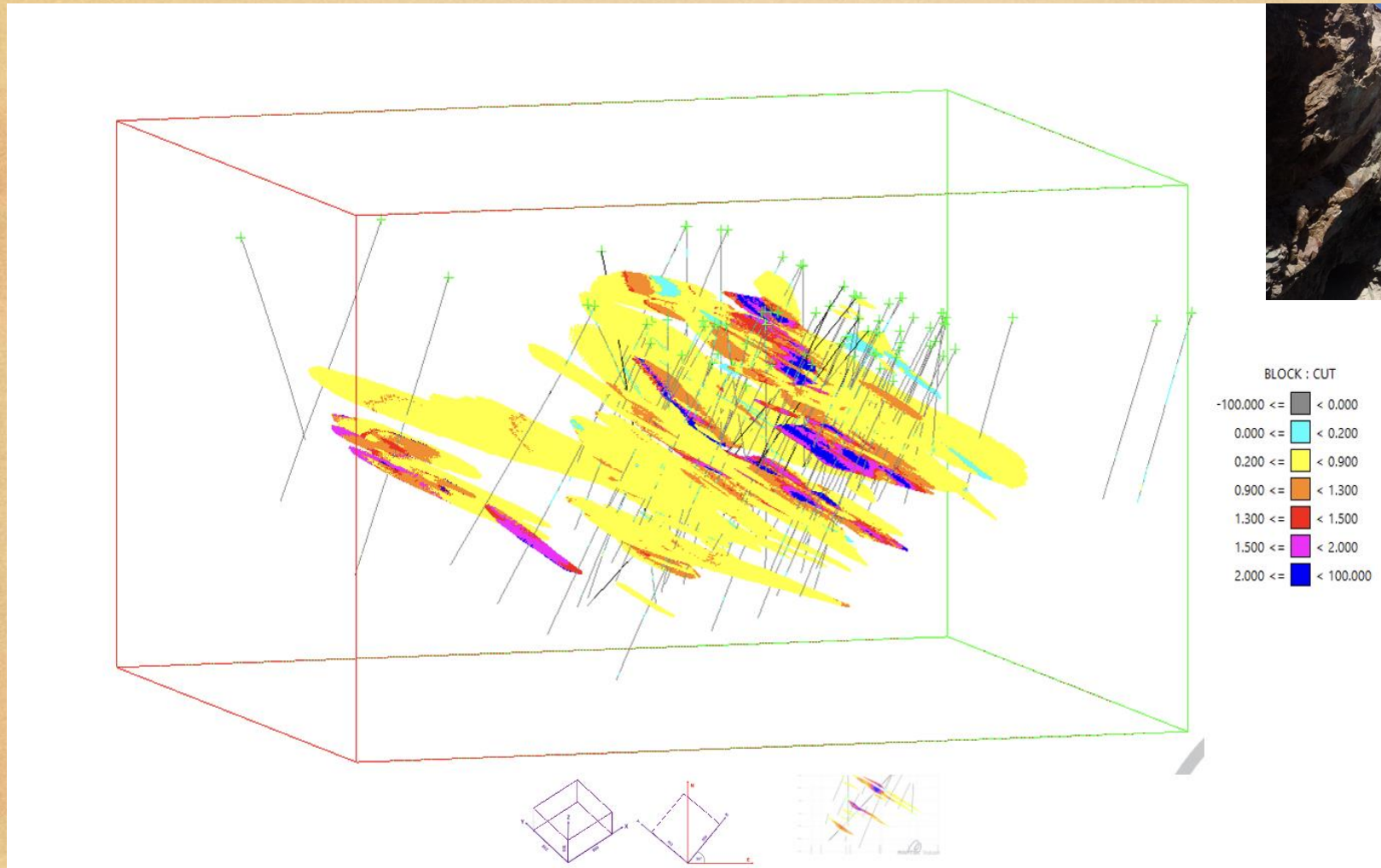




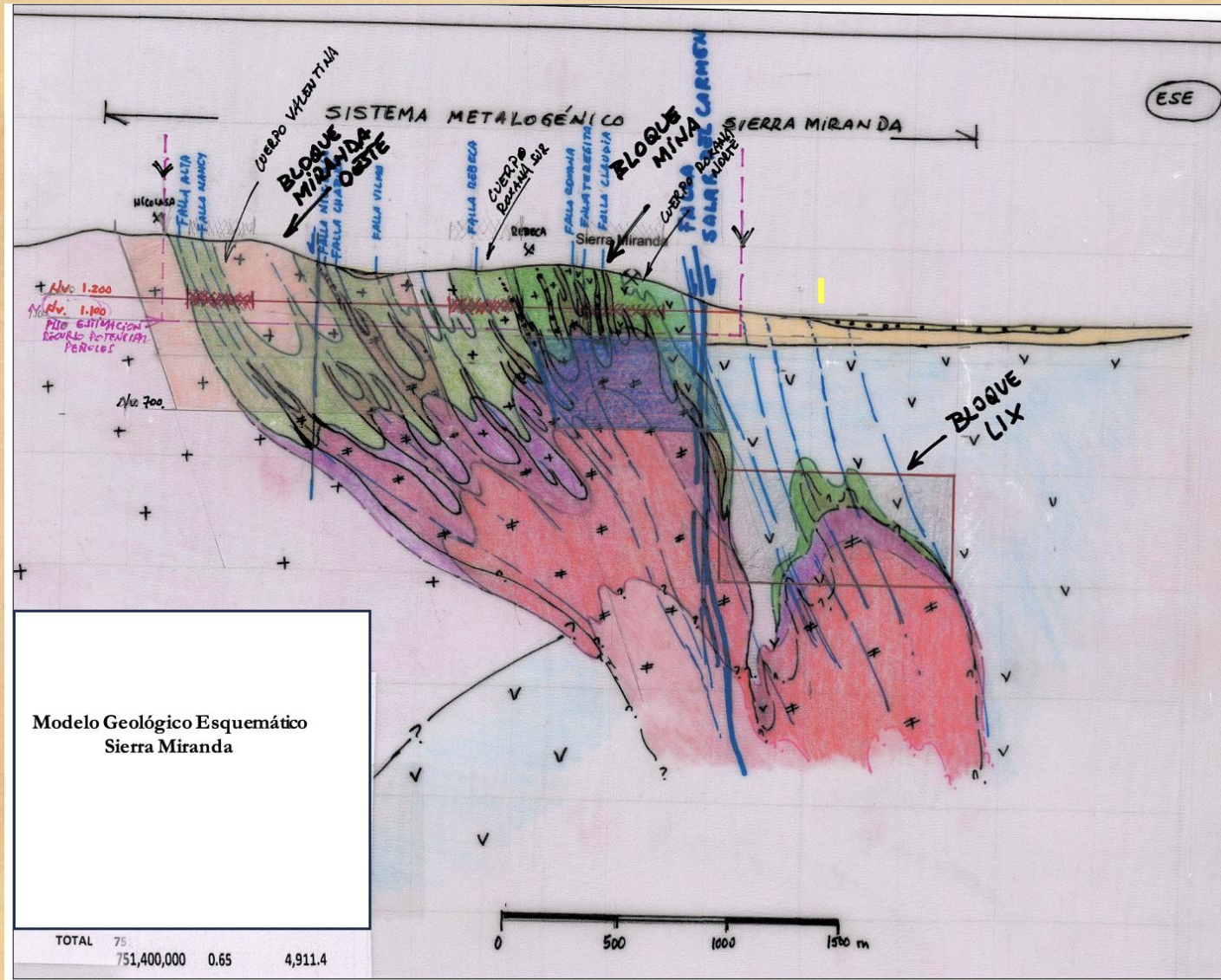
CuOx productos de alteración supérgena , controlados por niveles permeables- volcánicas



# Mineralización controlada por niveles permeables

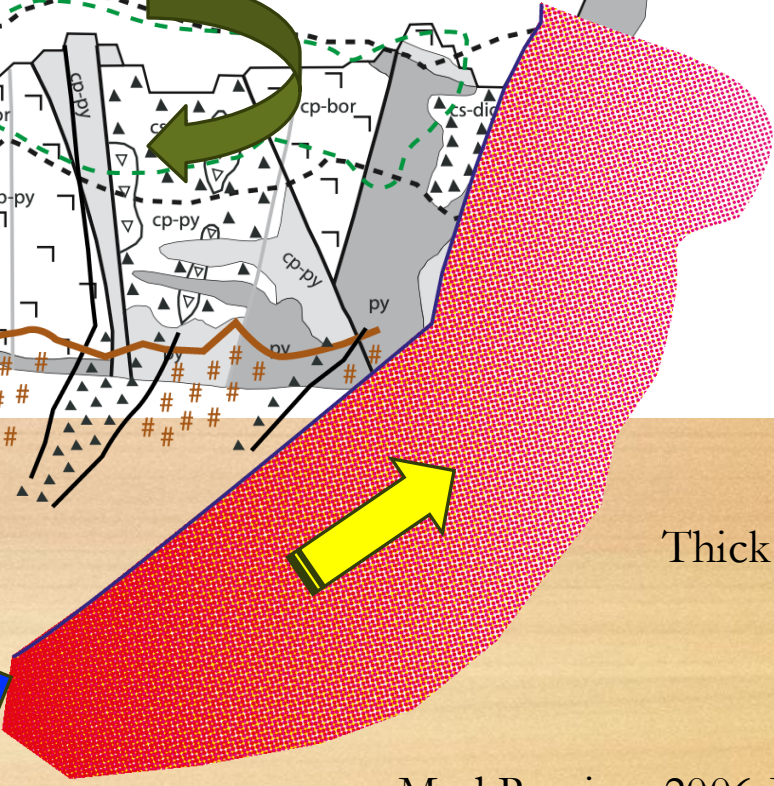
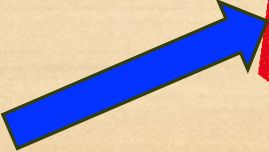
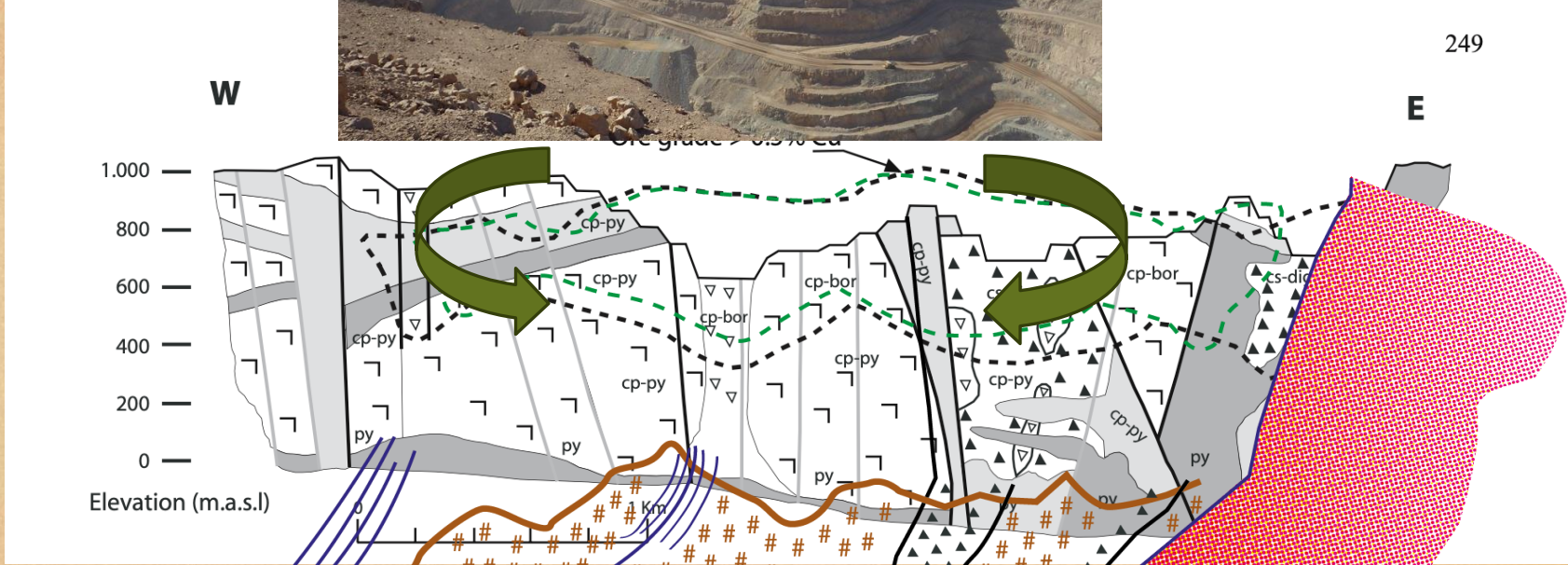


# Modelo geológico sección esquemática, control estructural en el emplazamiento de cuerpos intrusivos

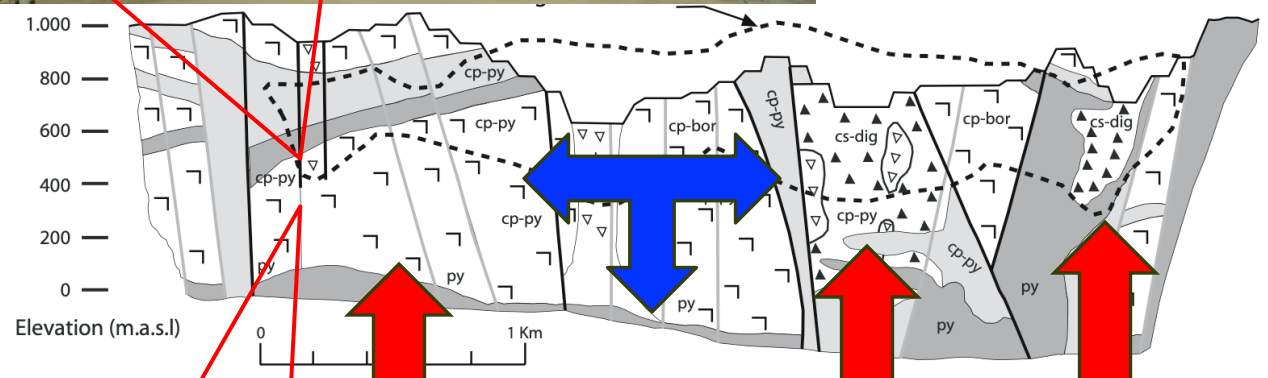
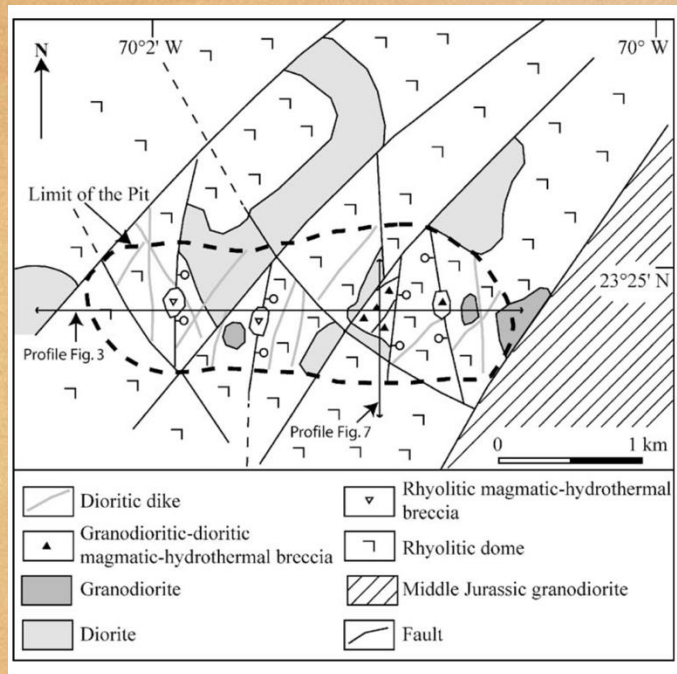


## Histórico Yacimiento definido como Estrato - Ligado





Thick Skinned

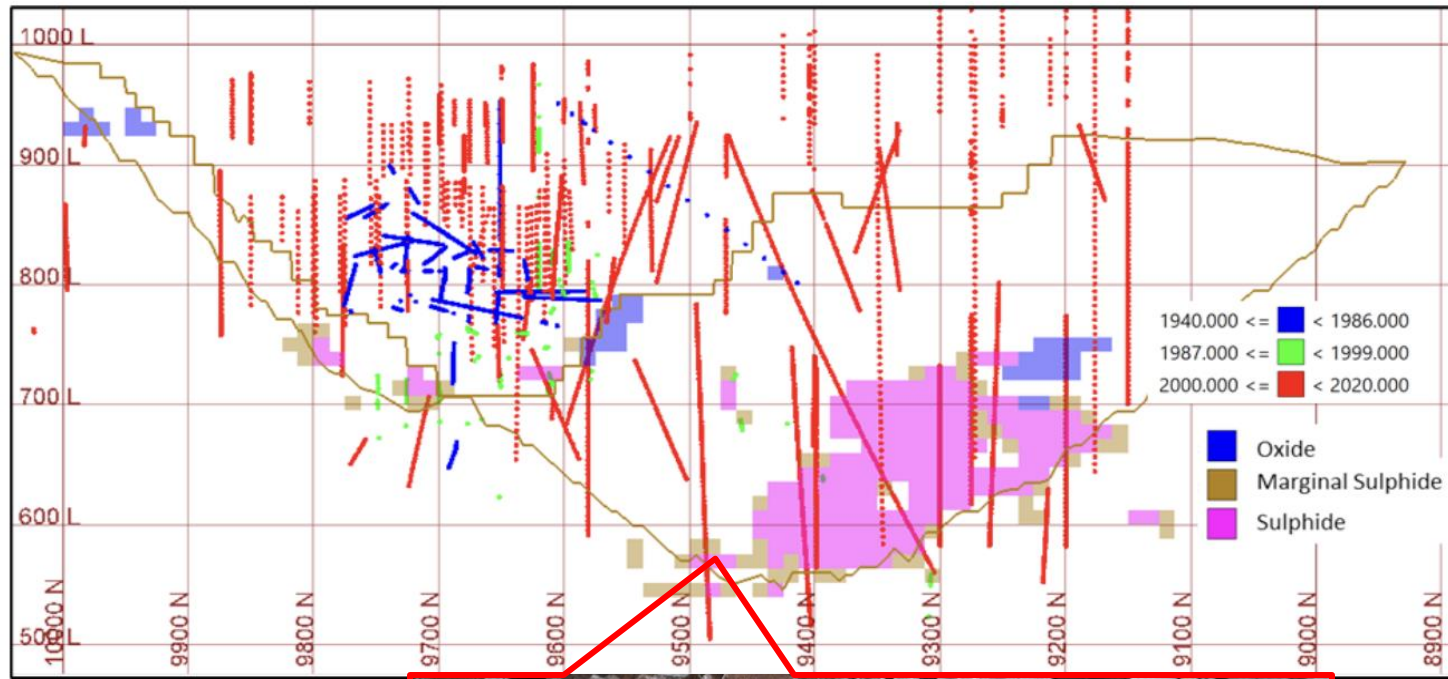


**Fig. 3** E-W profile of the Mantos Blancos deposit. For symbols, and location of profile see Fig. 2

Bimodal stock and sill system

they were not observed and described in the earlier study

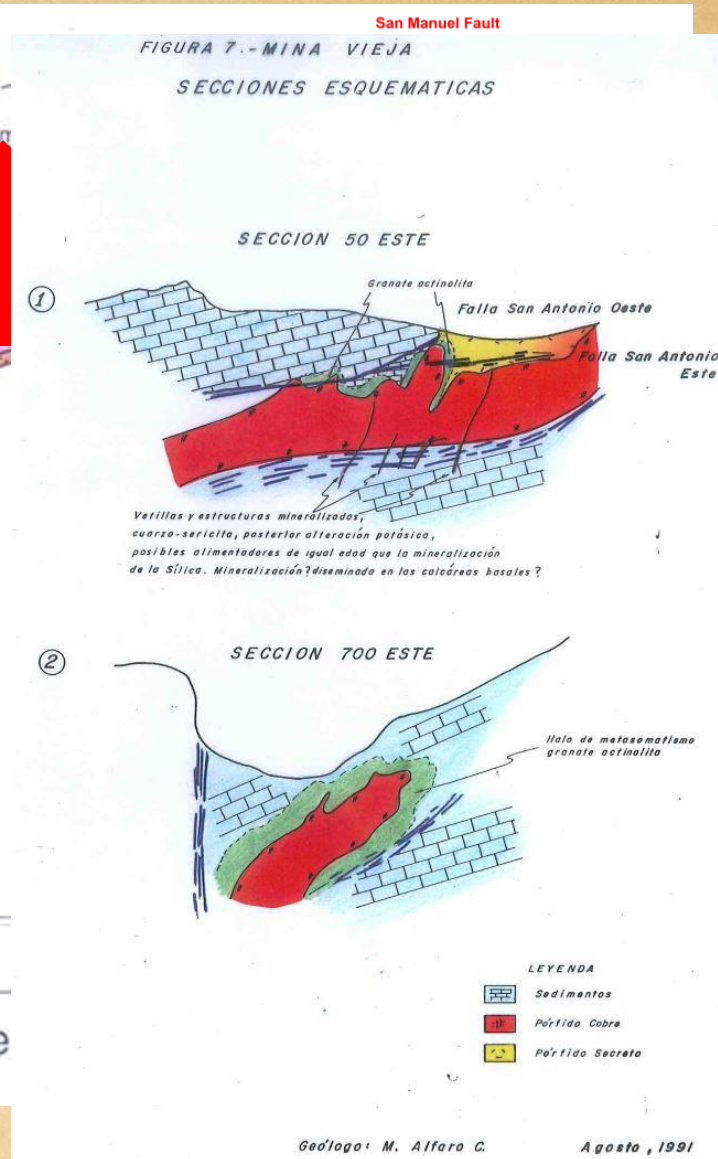
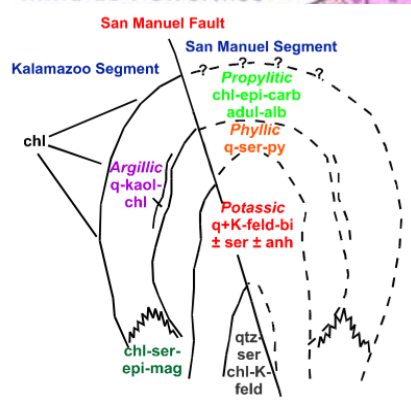
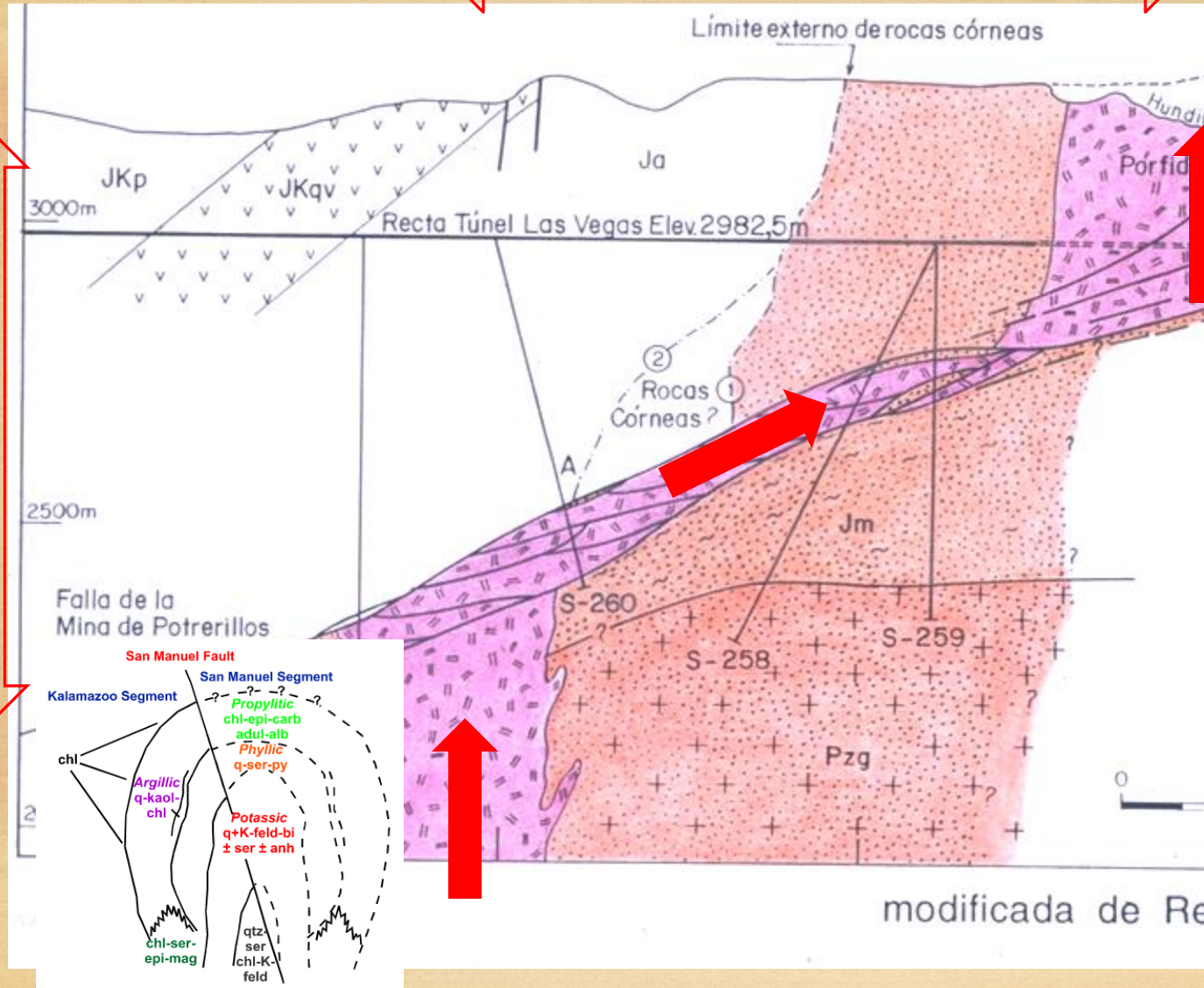




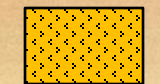
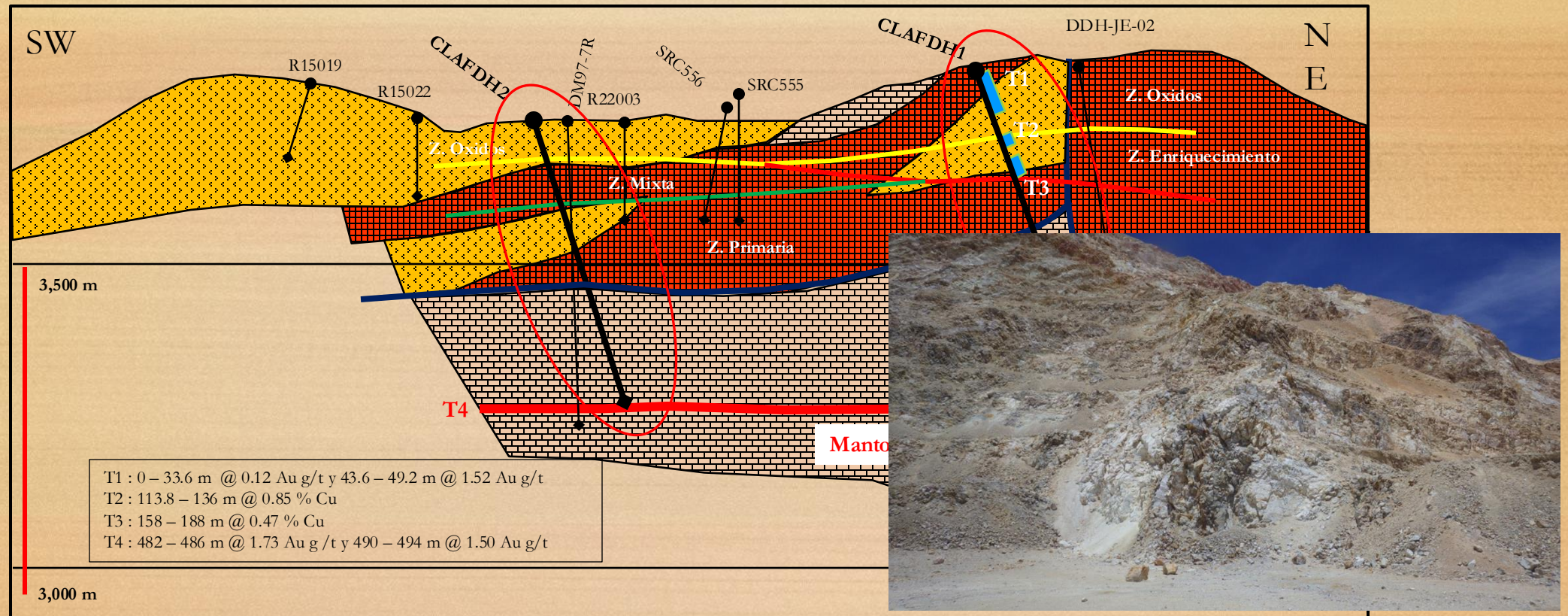
# Mina Vieja - Potrerillos

1300 m

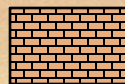
900 m



## Modelo Carlin ? ; volcánicas piroclásticas sobreyaciendo a unidades carbonatadas



Volcanismo terciario (tobas)



Jurásico sedimentario marino (calizas)



Intrusivos terciarios (Pórfidos)



Fallas inversas y normales

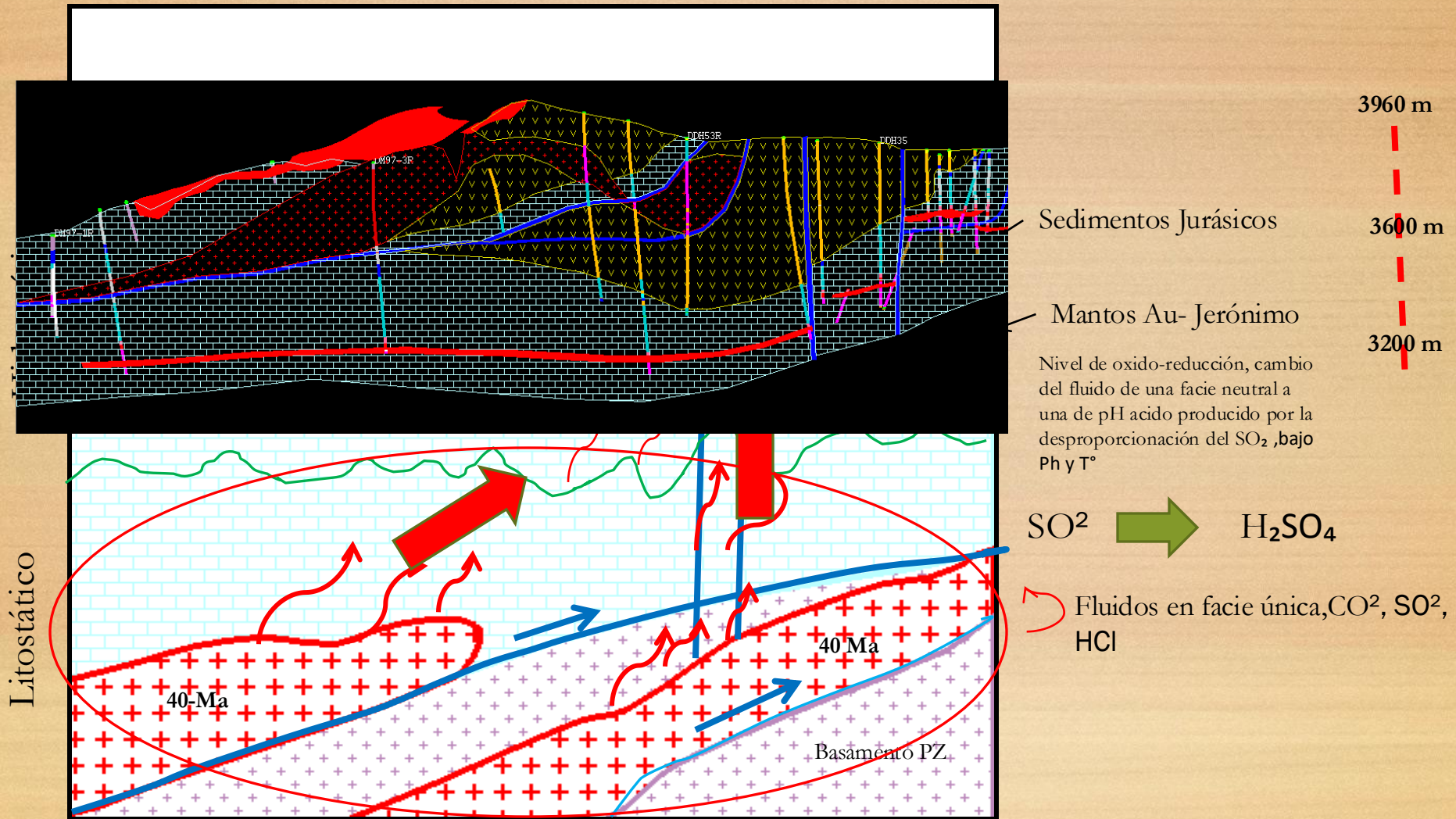


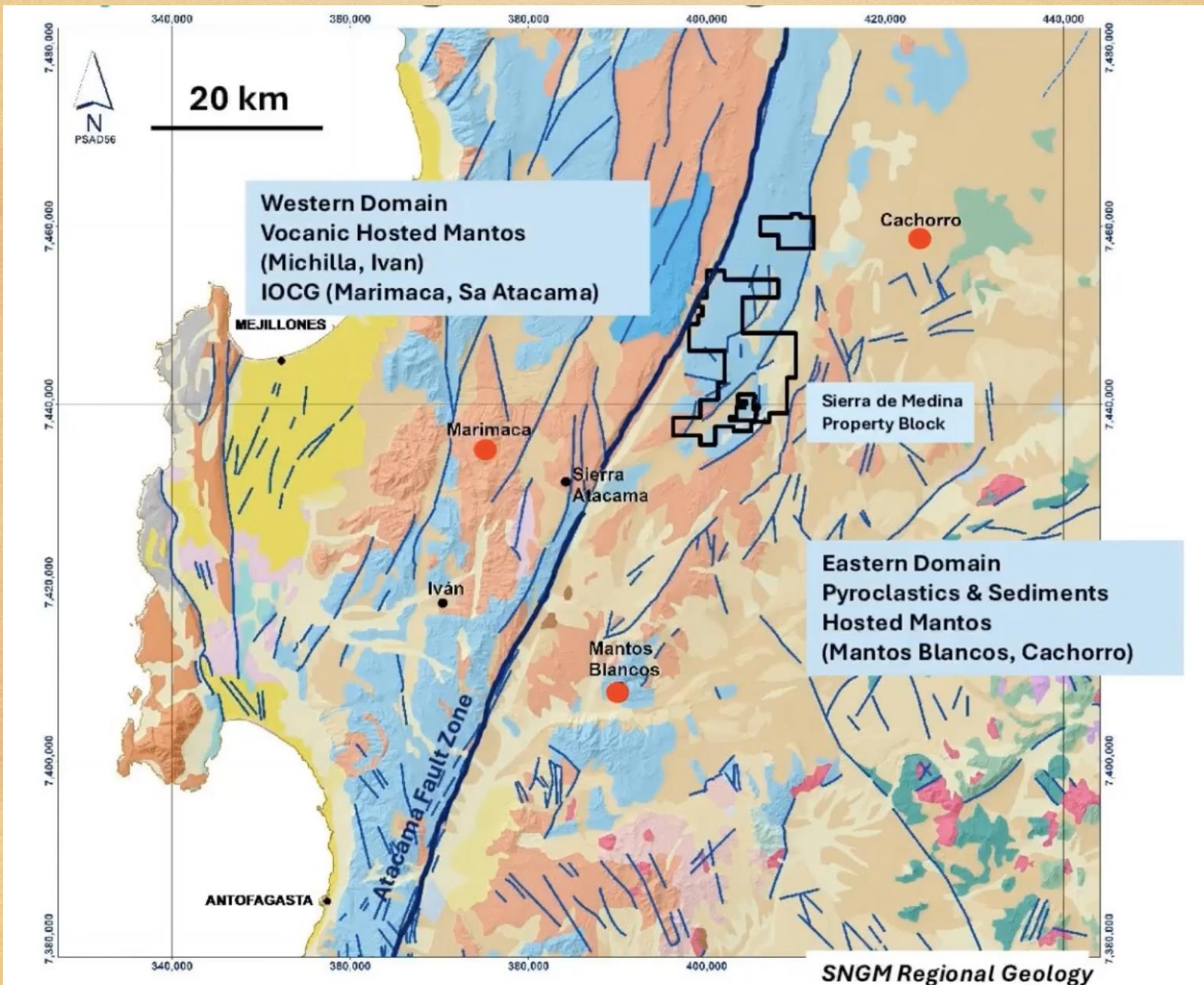
Límites de zonas minerales

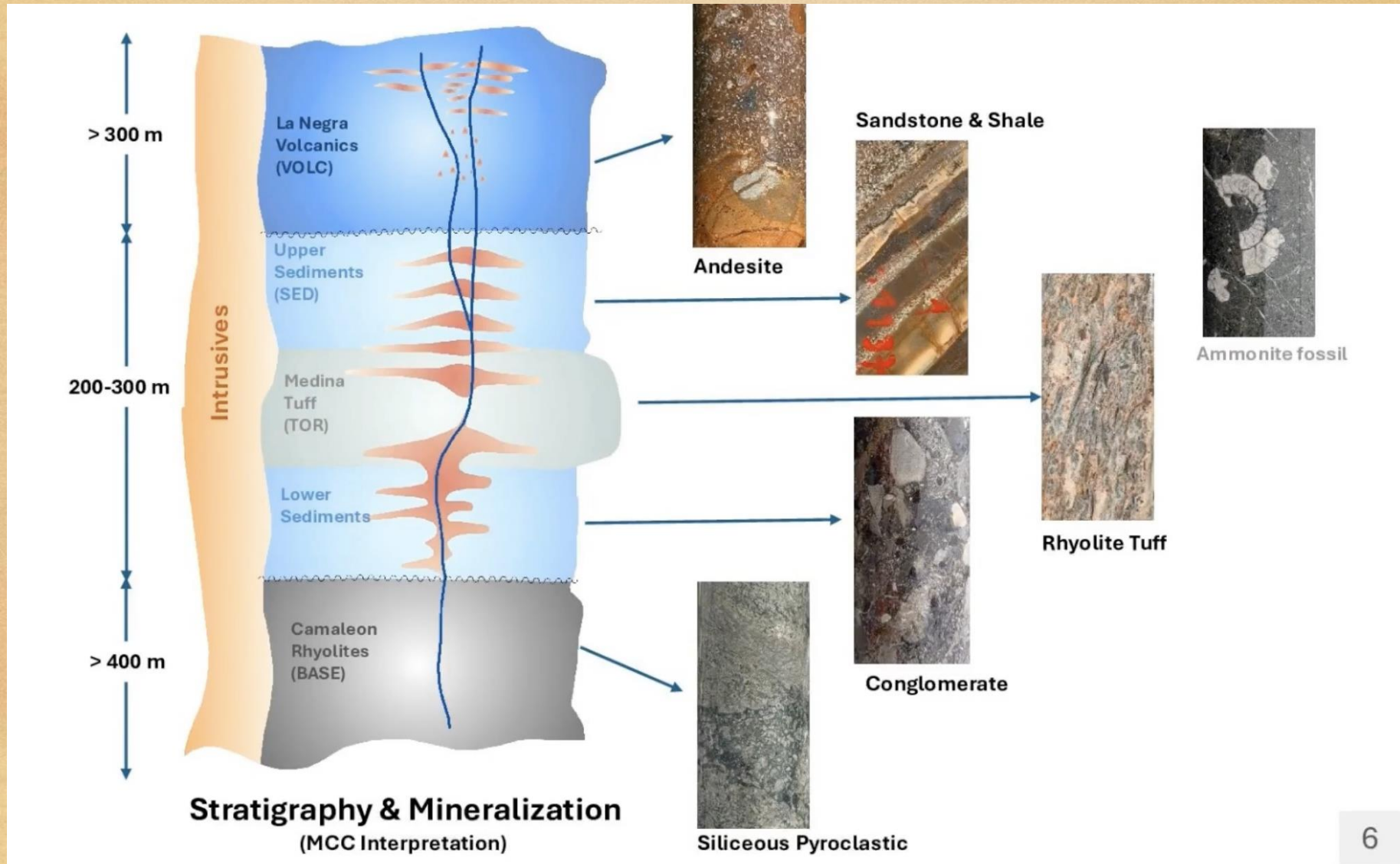


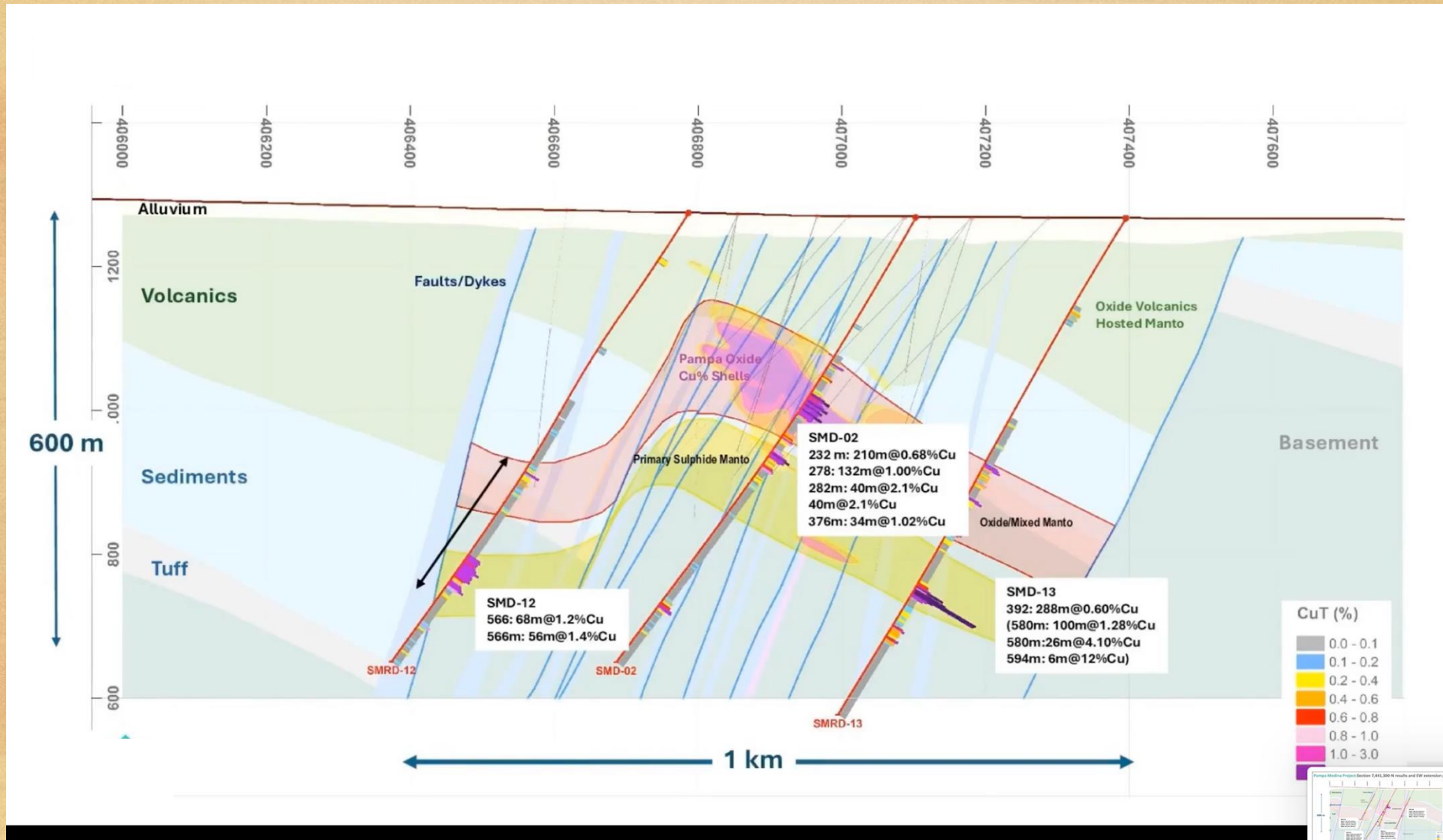
Manto aurífero Jerónimo

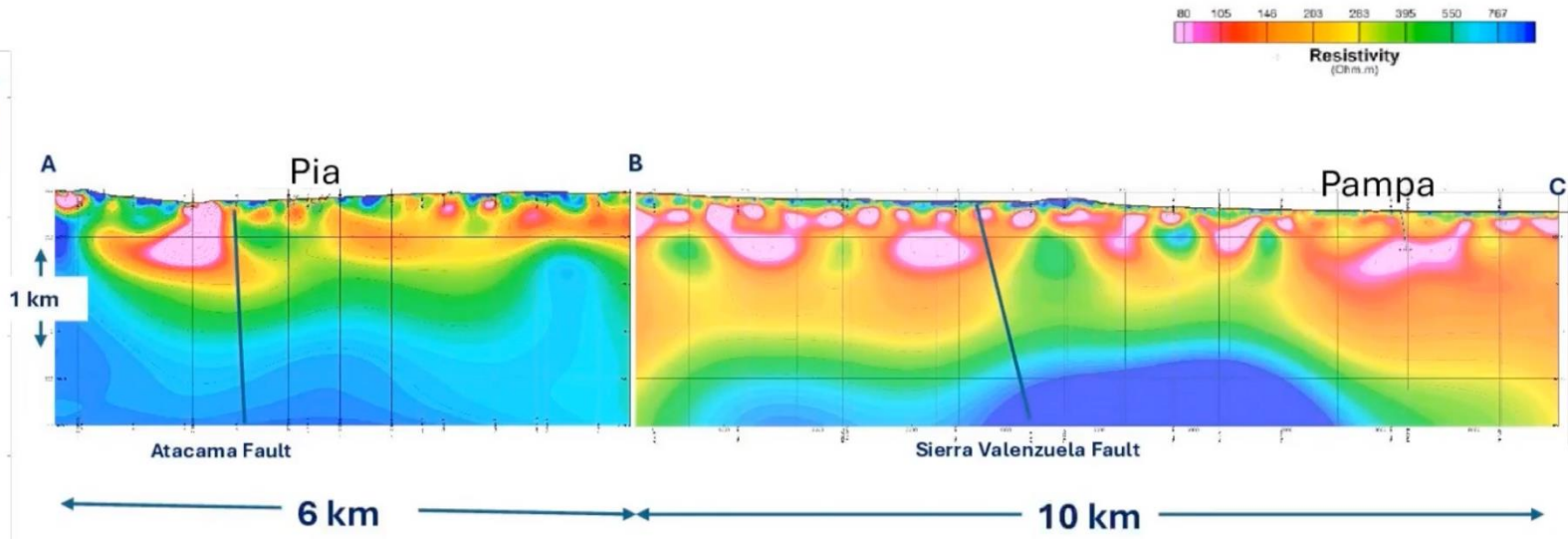
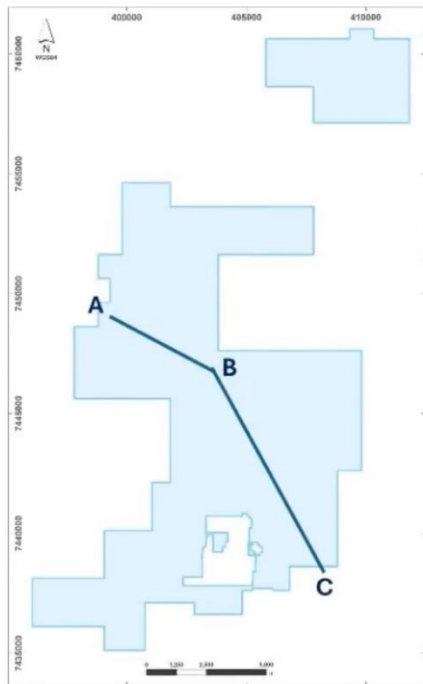
# Modelo Carlin ?? - pórfido link!! ) un modelo que contrasta con la evidencia de campo



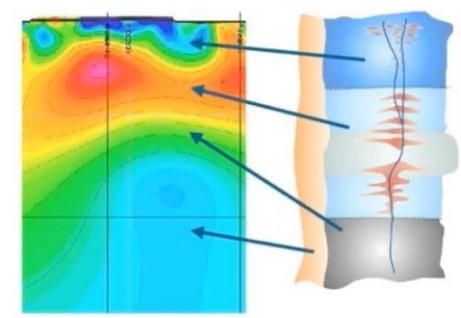




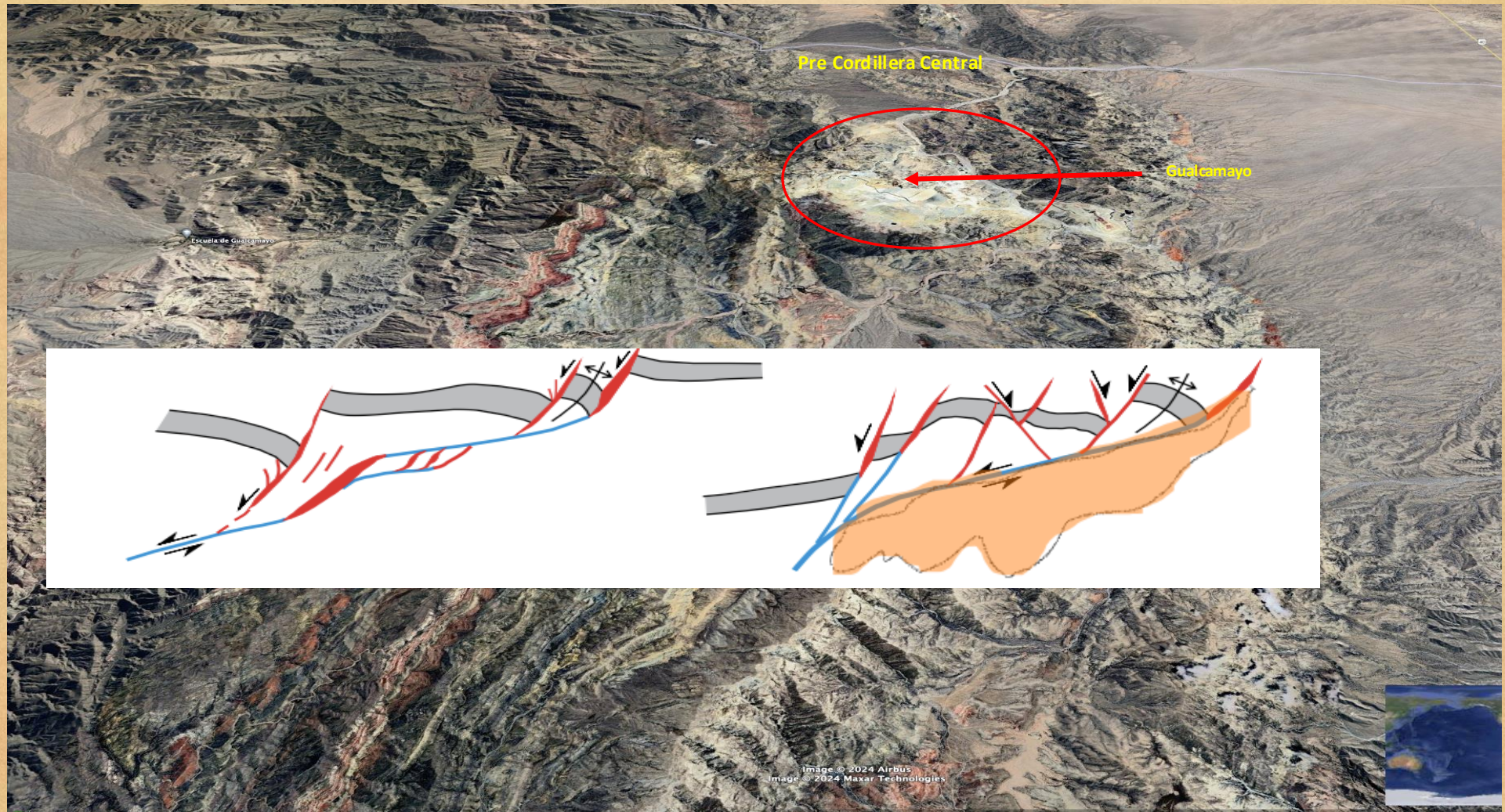




District AMT line NW-SE, 16 km long  
 100 m dipole, 2D modeled,  
 looking north



Tentative Stratigraphy v/s Resistivity correlation

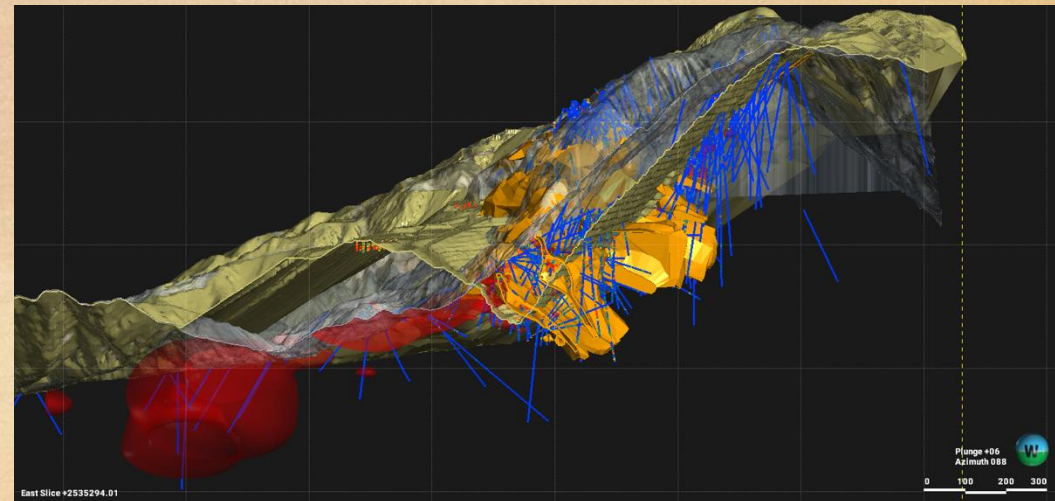
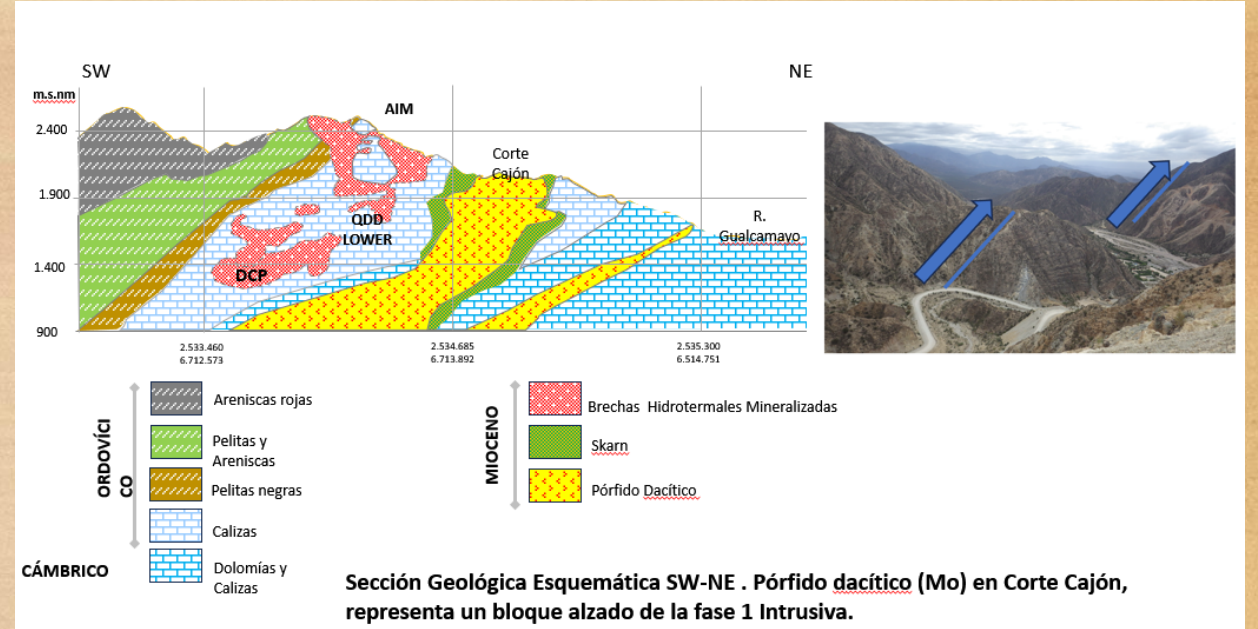
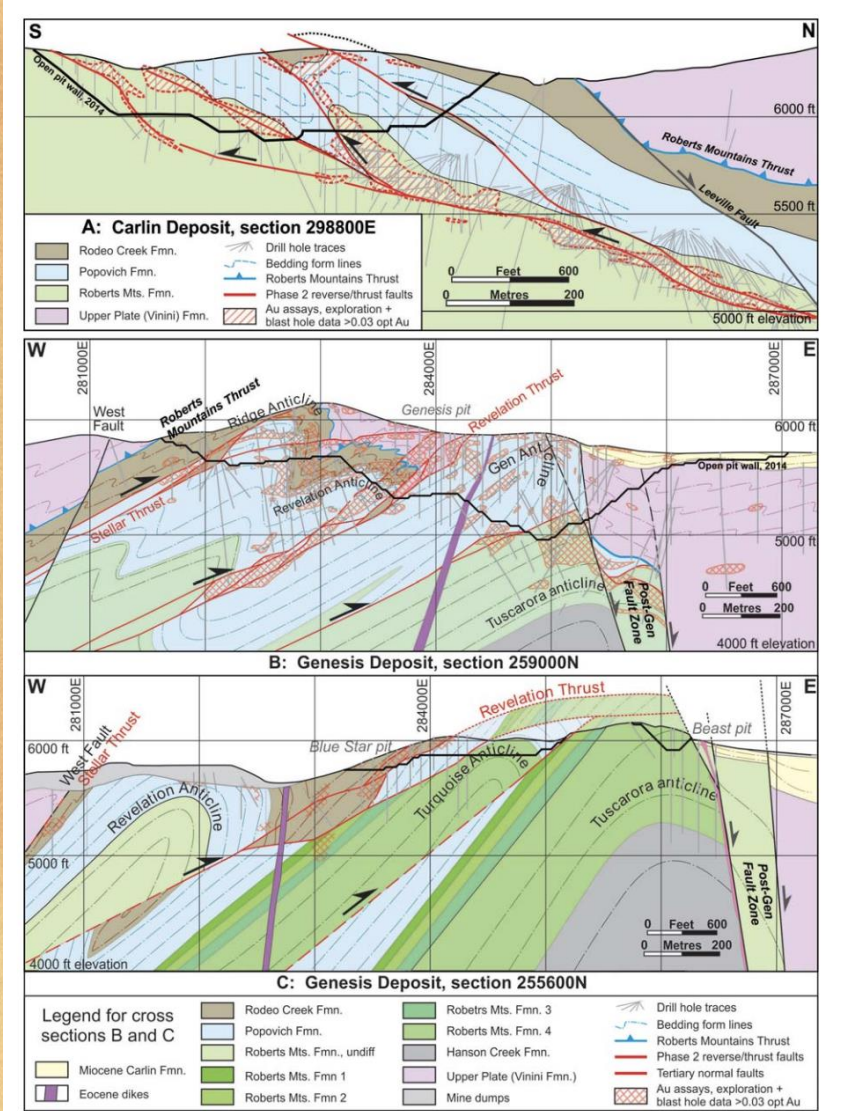


Vista al norte; Marco geológico estructural con vergencia al este indicando proceso de alzamiento, control estructural y emplazamiento de intrusivos en una facie estructural compresiva

# Similitudes estructurales

## Carlin

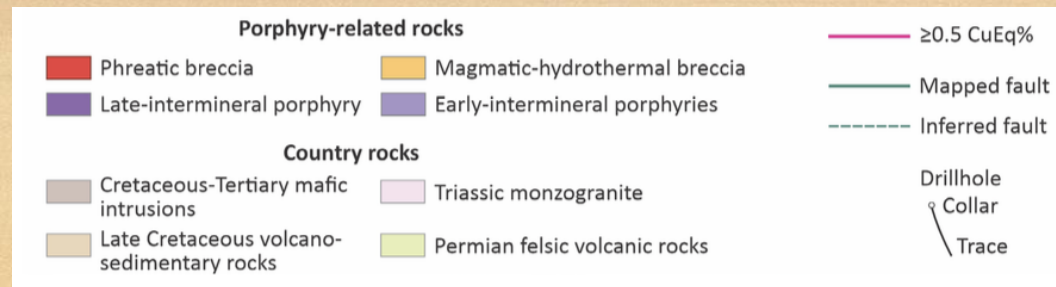
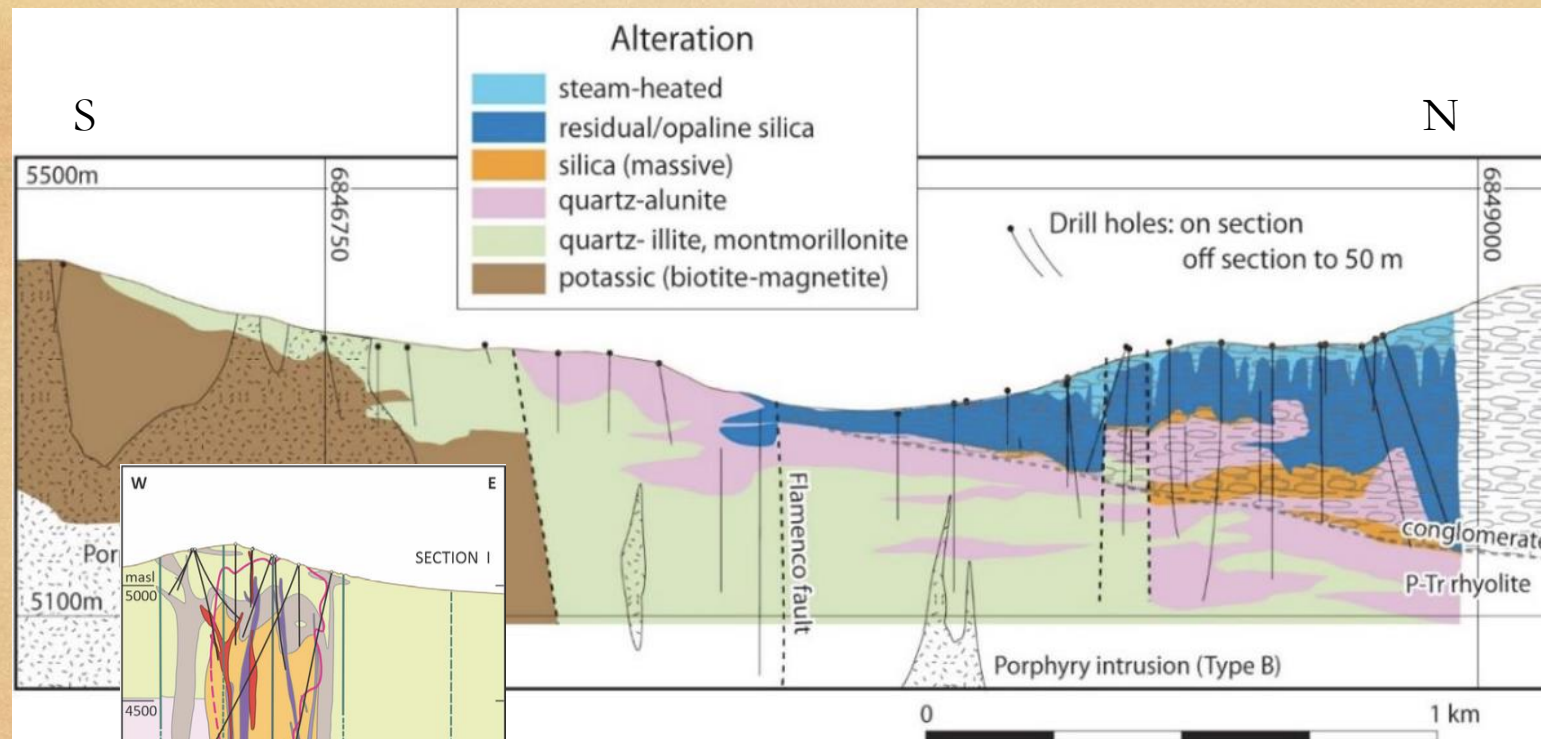
XX



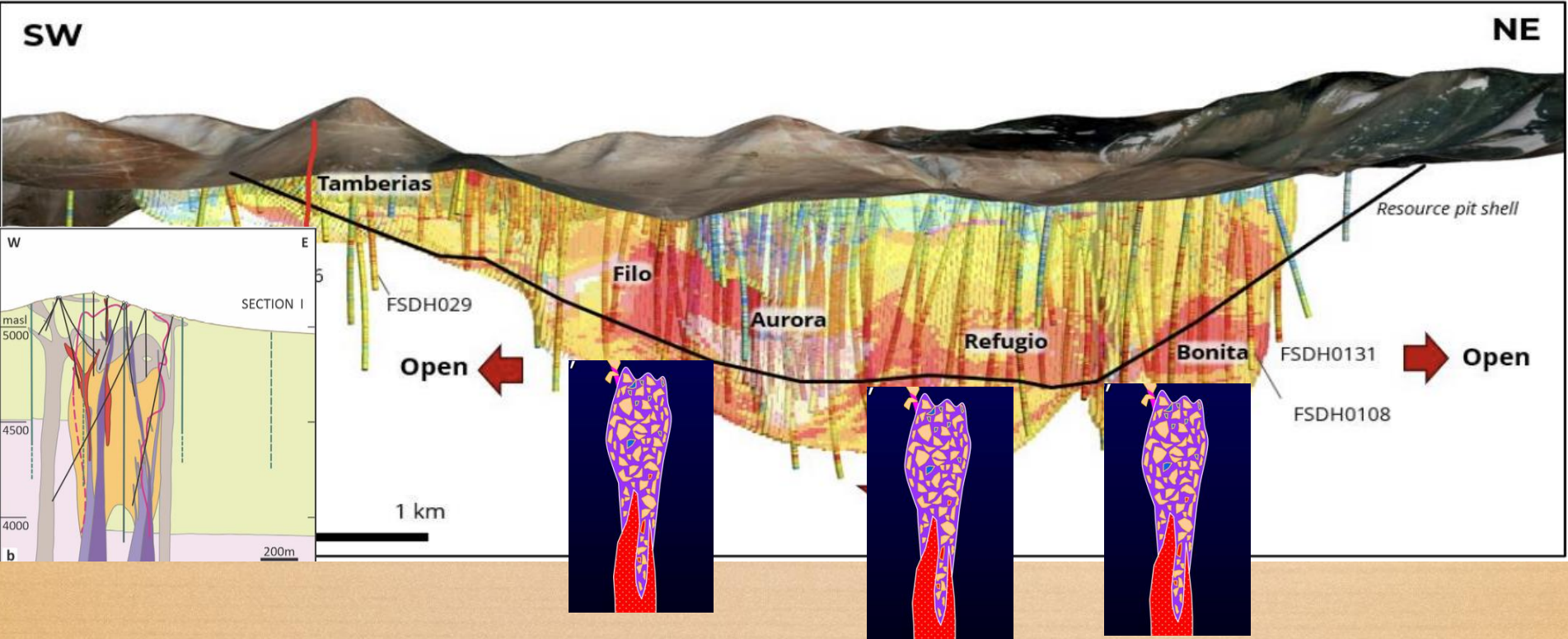
# Filo del Sol

## Vista al noroeste

### Litología & Alteración

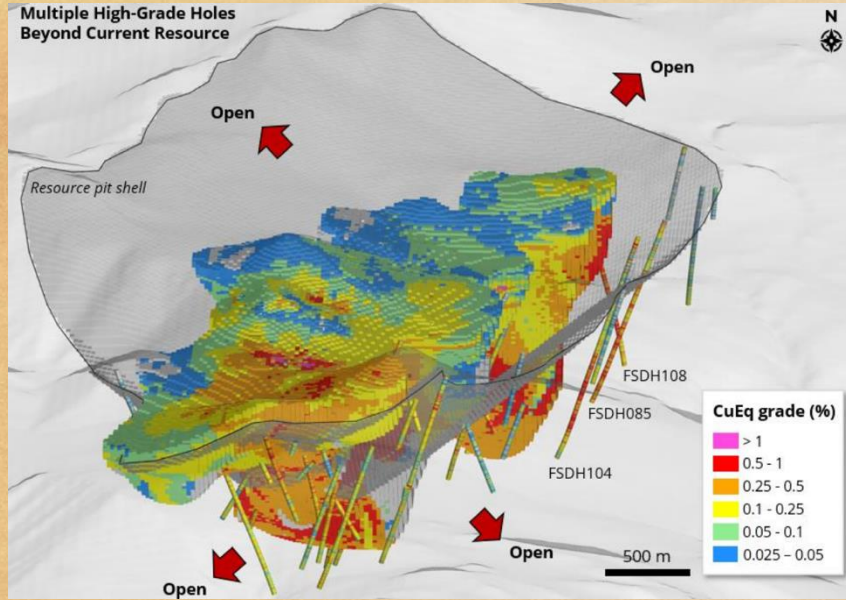


# Modelo; Filo del Sol

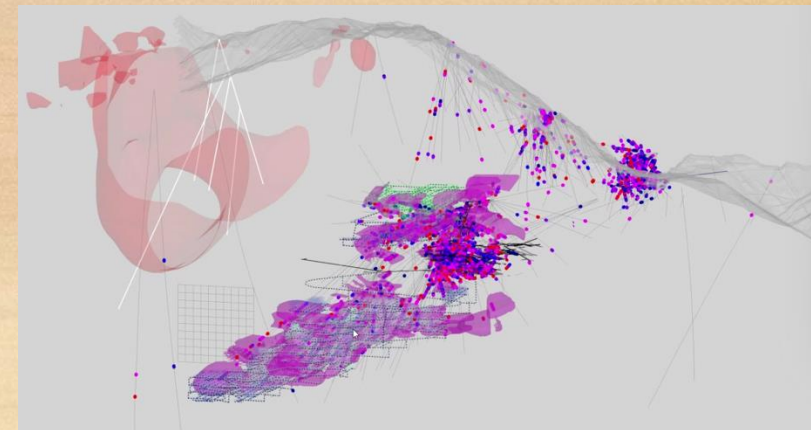
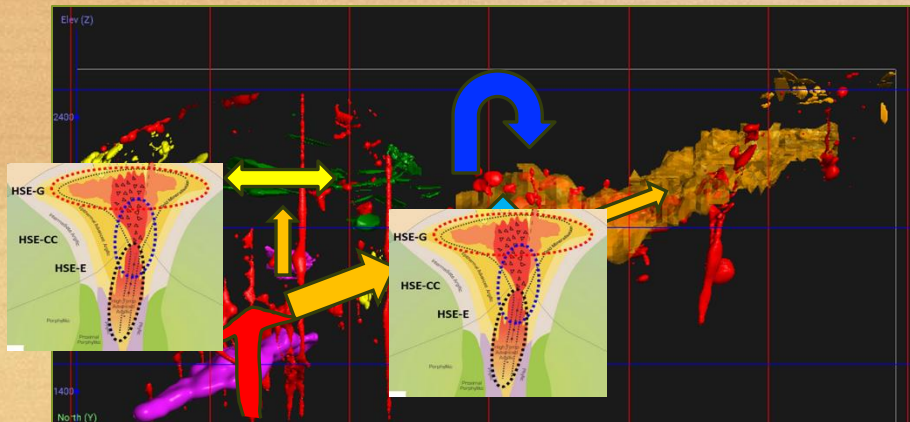
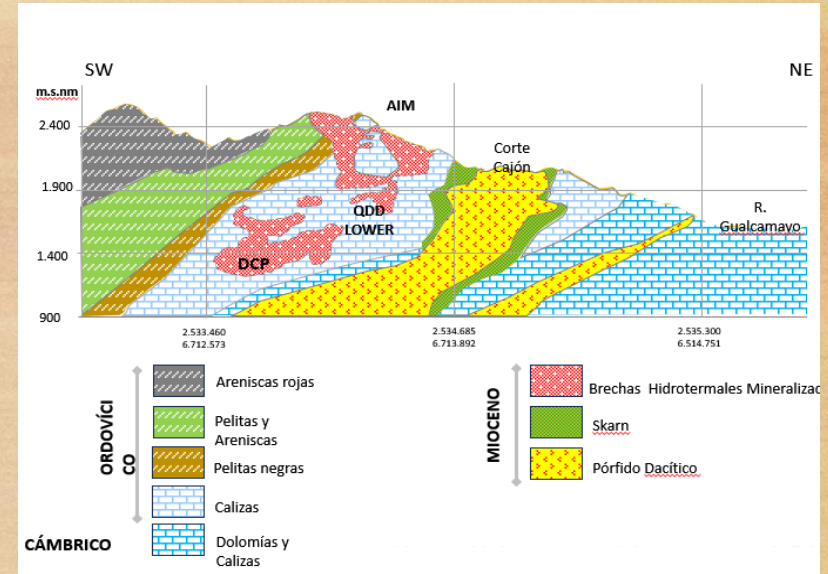


# Modelo; Filo del Sol – Carlin ? Litocap distinto

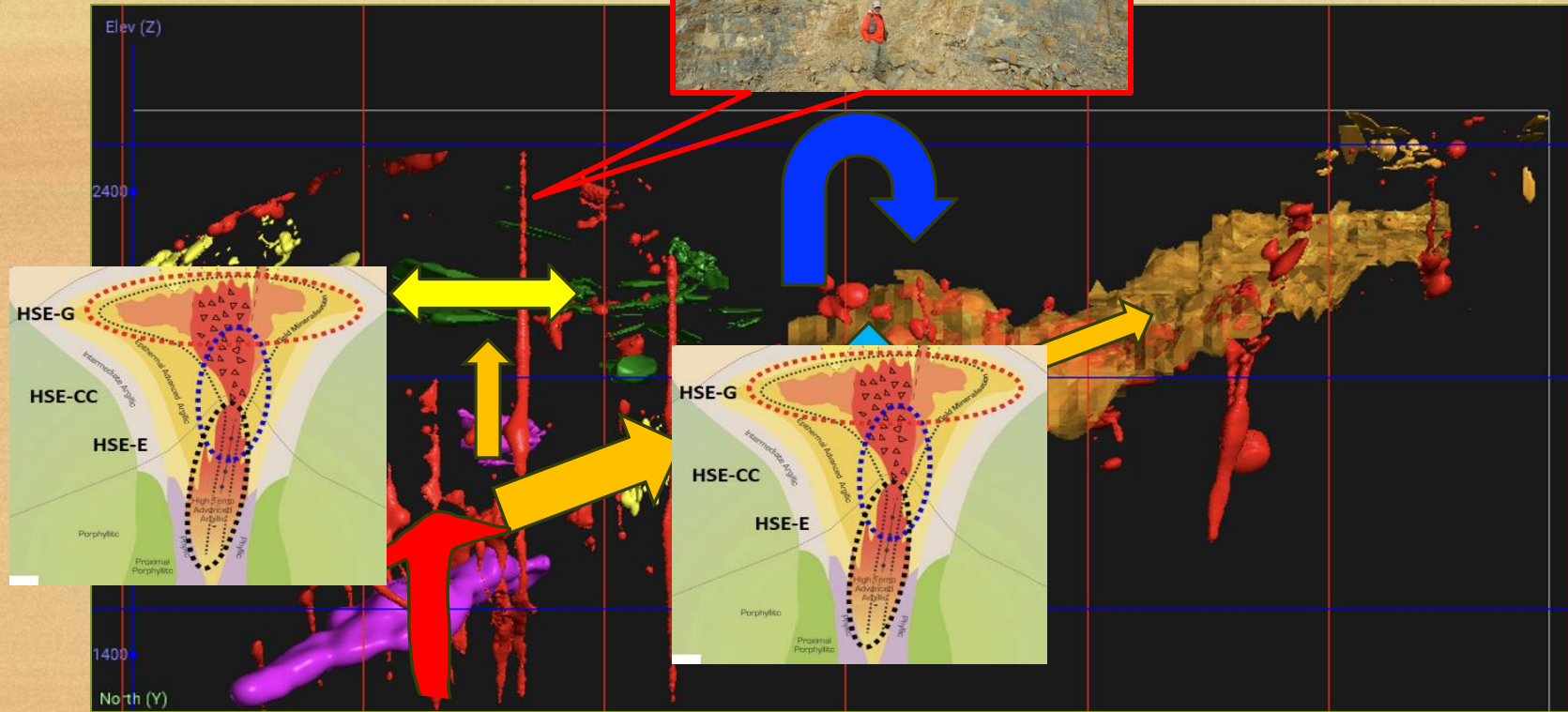
Filo del Sol



otro



# Mirando al Noreste



Fuente magmática-hidrotermal profunda.  
Pórfido akimentadorl

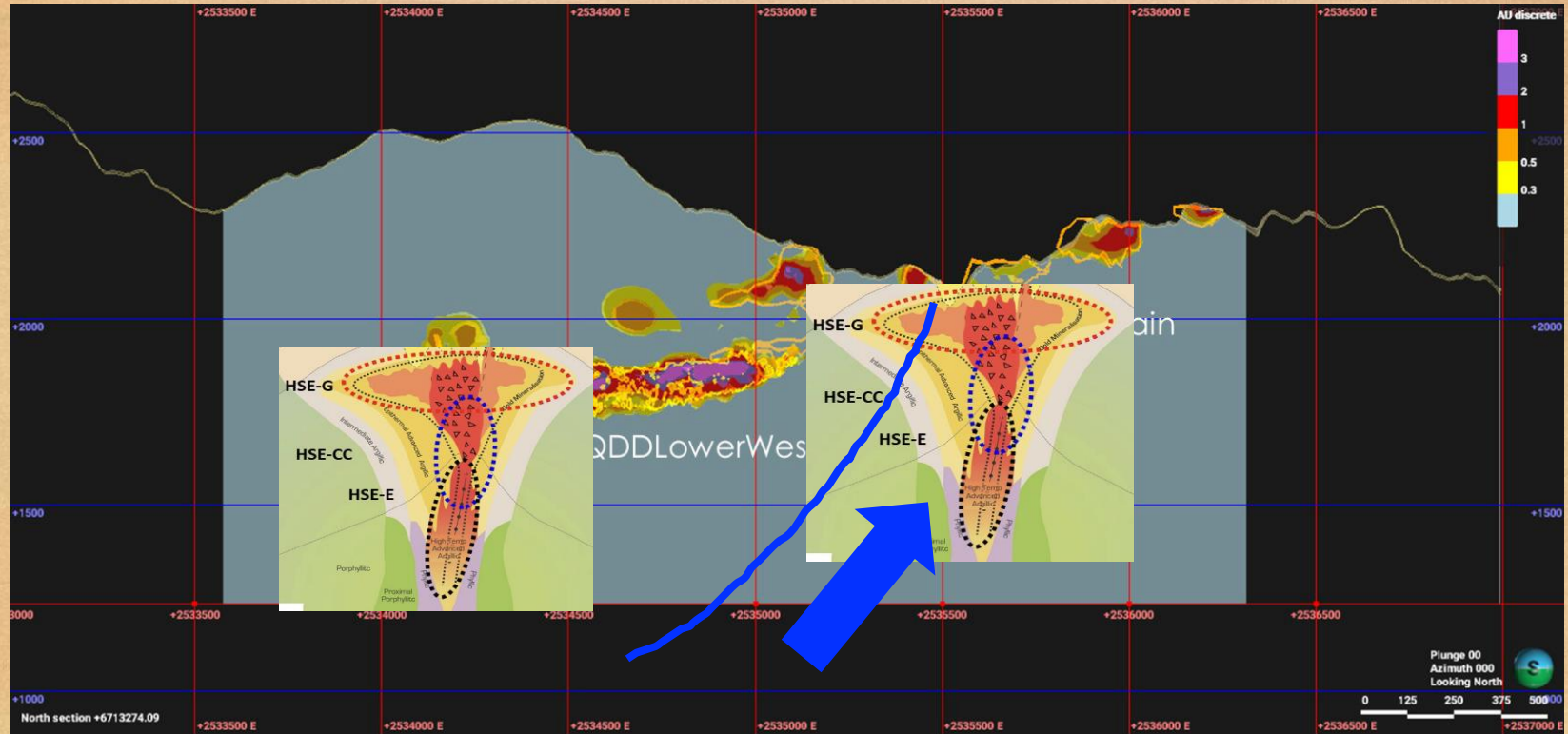


Fluidos con Au a través de niveles favorables,  
roca amiga

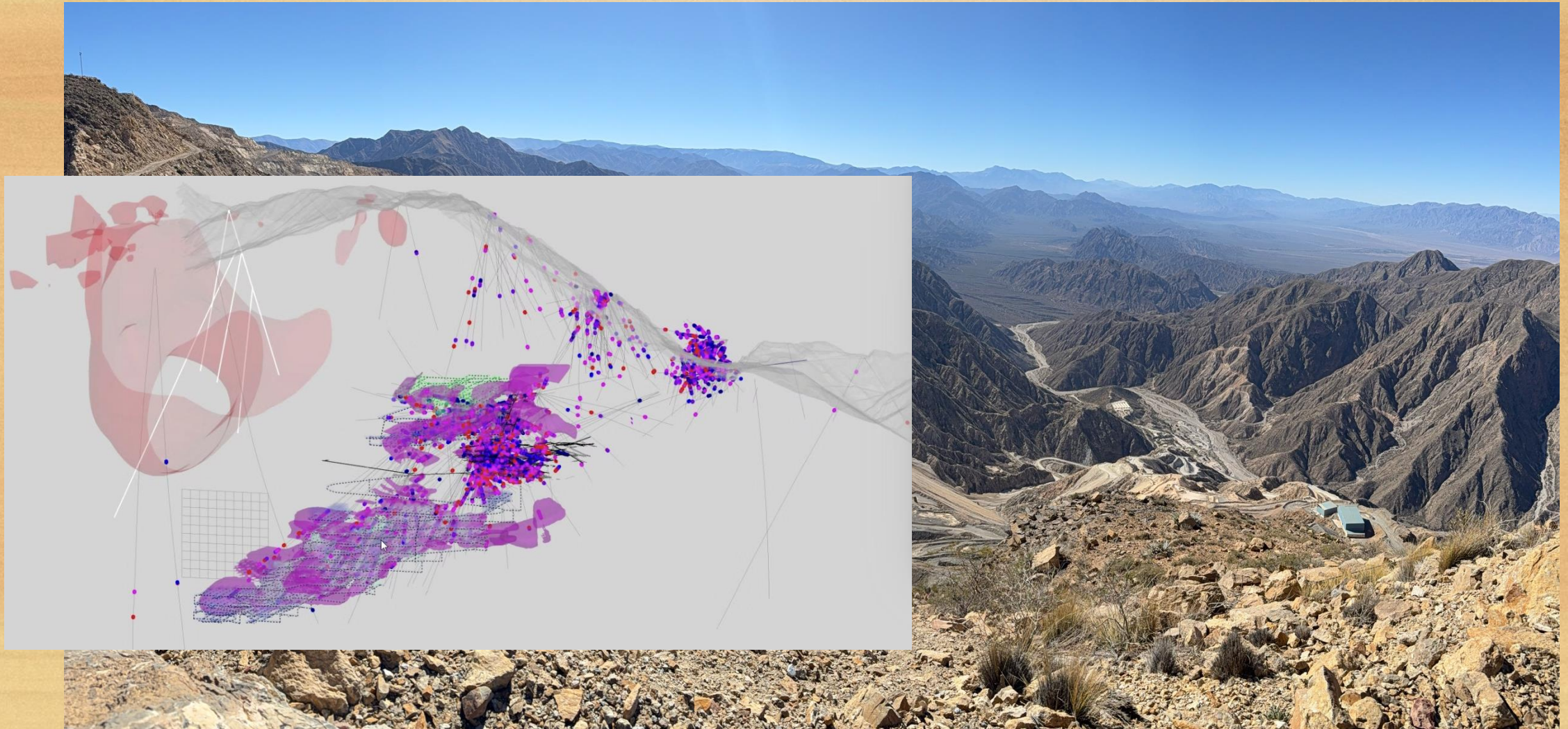


Colapso Hidrotermal- Bx

# Mirando al Noreste



## Mirando al noreste



Crystal Mush – diques alimentadores



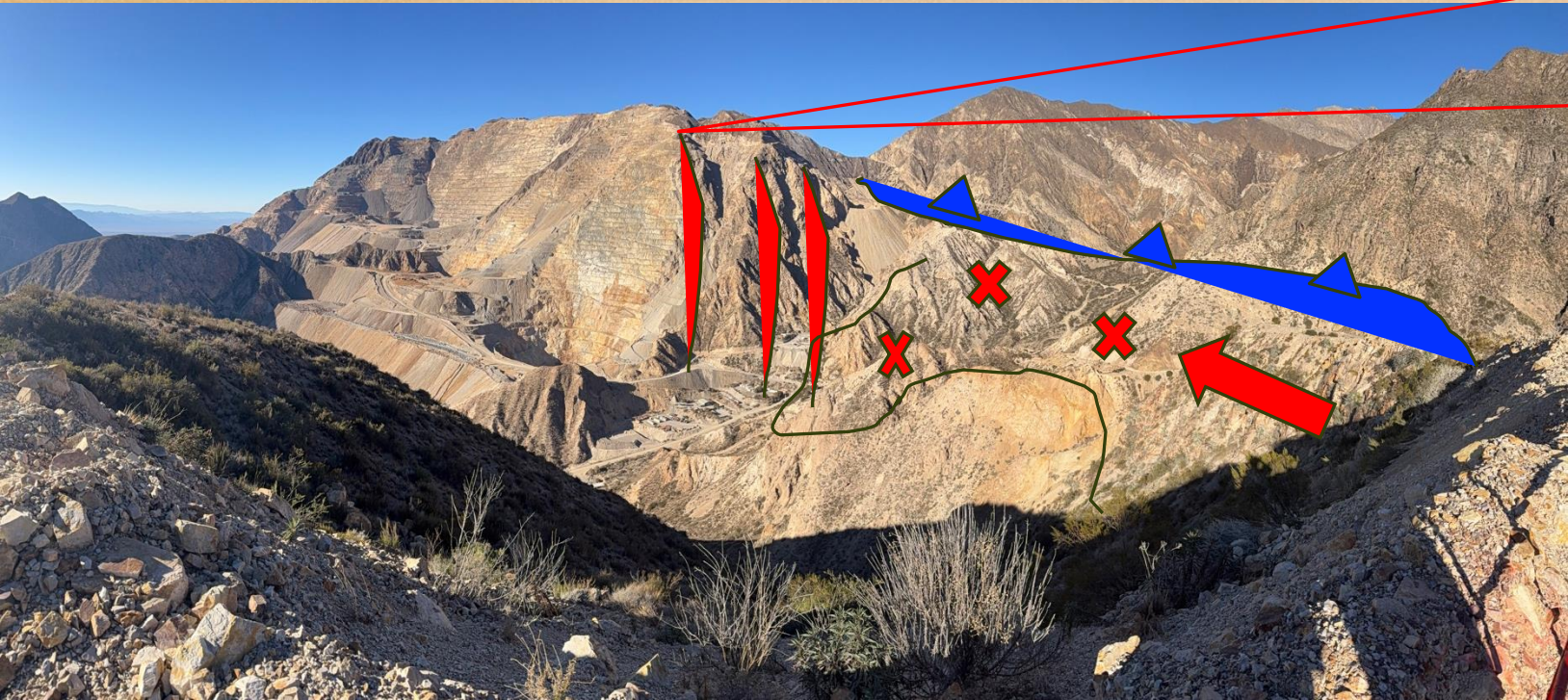
Estrato Ligado ?



## Mirando al sureste



Mirando al Sureste



## Conclusiones

- ❖ Las evidencias de campo son cada vez más concluyentes para señalar que es la eficiencia de los procesos mineralizadores ligados al magmatismo y no el contenido metálico de las rocas fuentes o rocas de caja los que determinan las características metalogénicas de los arcos cordilleranos.
- ❖ La existencia de épocas discretas de mineralización, en algunos casos caracterizadas por la generación de depósitos gigantes de cobre-molibdeno , como en el caso de Los Andes , reflejan períodos de tiempo geológicos en los que se generaron magmas capaces de alcanzar niveles poco profundos de la corteza y con composiciones adecuadas como para generar sistemas hidrotermales mayores.
- ❖ Además, probablemente existían condiciones geológicas favorables muy específicas en la corteza durante el mismo período., condiciones dinámicas y siempre cambiantes de la tectónica de placas
- ❖ Volvamos al campo, habrán sorpresas
- ❖ Hasta la próxima, si el tiempo lo permite