

DISPOSICION ZONAL DE METAMORFISMO-ALTERACION-MINERALIZACION
EN TIERRA AMARILLA-CHILE

Por José Ponce S. #

Hans Ruge R. #

R E S U M E N

Durante el Mesozoico, rocas intrusivas batolíticas produjeron importante metamorfismo de contacto en rocas encajadoras estratificadas. Además de los fenómenos de metamorfismo, se desarrollaron procesos de alteración hidrotermal y mineralización a las que se relaciona la presencia de menas metálicas productivas de los elementos Cu y Fe.

Metamorfismo-alteración-mineralización se exponen como la evolución de un fenómeno geológico globalizado, pero con una disposición zonal a partir del intrusivo. Para apoyar estas ideas se acompañan antecedentes del quimismo de las unidades litológicas, como también antecedentes micropetrográficos sobre alteración.

I N T R O D U C C I O N

El área de Tierra Amarilla está ubicada en la Tercera Región-Provincia de Copiapó, aproximadamente a 820 kilómetros al norte de Santiago, a 18 kilómetros al sureste de Copiapó, en las vecindades de la Fundición de Paipote de la Empresa Nacional de Minería. El área forma parte del cuadrángulo Copiapó, que es una de las regiones de densidad de distribución extraordinariamente alta de yacimientos metalíferos (Segerstrom y Ruiz, 1962).

El presente trabajo se basa esencialmente de las observaciones en el terreno, sobre la base de una excelente y abundante documentación relacionada con la geología regional del área de Tierra Amarilla (Segerstrom y Ruiz, 1962; Tilling, 1962). Es por ello que en las partes descriptivas de los temas sobre geología solo se dan nociones muy generales a los aspectos que han sido considerados más sobresalientes e importantes para los propósitos de la investigación. Cualquier profundización

Geólogos de la Empresa Nacional de Minería.

o mayor detalle puede obtenerse de las obras especializadas, cuyas referencias bibliográficas aparecen al final del texto.

Las actividades geológico-mineras desarrolladas por la Empresa Nacional de Minería en el distrito minero Punta del Cobre, vecino a la localidad de Tierra Amarilla, se han extendido hacia la investigación para el diseño de esquemas que ayuden a la búsqueda y localización de yacimientos metalíferos.

Una de las etapas culminantes en el proceso y evolución de la investigación ha sido el aprovechamiento racional y lógico de la abundante información sobre geología básica con que se cuenta. De ésta manera, el geólogo económico cuenta en esta región con una herramienta extraordinariamente útil en el campo de la prospección.

La etapa consiguiente ha sido integrar la información, programando exploraciones y reconocimientos con un criterio distrital como unidad importante. Esto ha permitido dimensionar recursos minerales que tratados individualmente en el concepto de mina, diluían esfuerzos y capacidades humanas y desaprovechaba el avance geológico y tecnológico.

Es posible que todavía se esté muy lejos de la meta en el camino que hoy se intenta trazar, pero se considera en todo caso haber tomado una ruta correcta. Máxime si tenemos la convicción que los fenómenos geológicos en que intervienen intrusiones-metamorfismo-alteración-mineralización son causas para un solo efecto. O dicho de otro modo, la evolución de todos ellos, en un solo proceso geológico globalizado hasta la generación de depósitos minerales.

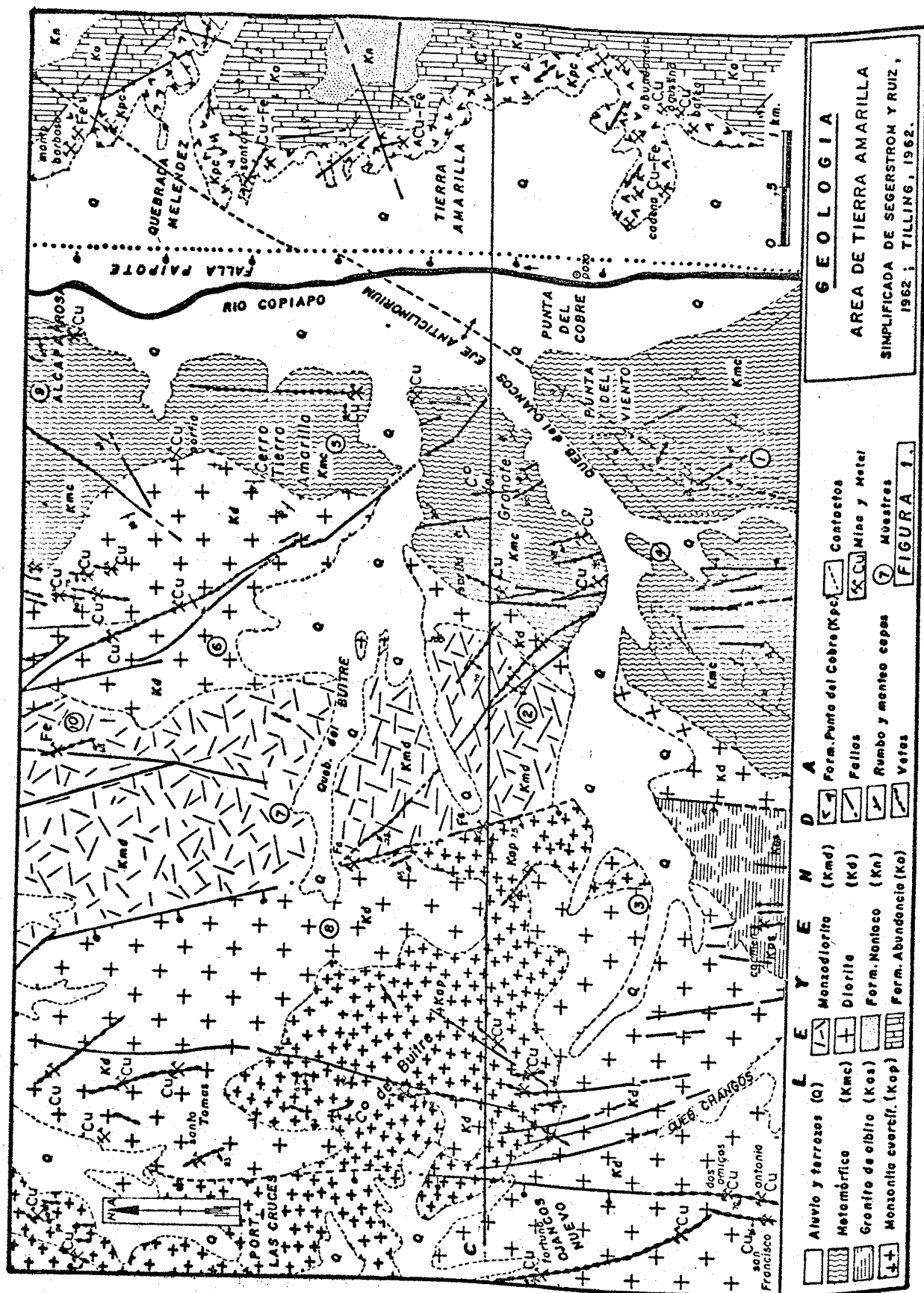
G E O L O G I A

Intrusivos

Tal como se representa en la figura 1 adjunta, practicamente las dos terceras partes de los terrenos en el área de Tierra Amarilla corresponden con afloramientos de rocas batolíticas, y una tercera parte a rocas estratificadas, con sus equivalentes metamórficos en la zona de contacto.

Se considera que las rocas intrusivas forman parte del Batolito Andino (Brüggen, 1950) o plutones graníticos (Zentilli, 1974) y que su edad es del Cretácico Medio (Segerstrom y Ruiz, 1962; Tilling, 1962).

De acuerdo con Tilling (1962), las rocas intrusivas, considerando su asociación espacial y ante la ausencia de evidencias contrarias, son el producto de una época de actividad magmática. Además estableció que una actividad intrusiva que prosigue a otra, en general, de -



crece en basicidad, o dicho de otro modo, las unidades intrusivas más jóvenes, son composicionalmente más ácidas.

En la historia magmática, se considera que, en la geología del área de Tierra Amarilla presentada en el presente trabajo (figura 1), la roca más antigua asociada con el batolito es la diorita (Tilling, 1962). El autor ya mencionado definió y mapeó tres unidades de diorita (diorita de piroxena, diorita indeferenciada y diorita de hornblenda), las que para el propósito actual solo se presentan como diorita. Además existen las unidades intrusivas monzonita cuarcifera, monzodiorita y granito sódico de albita, cuyos contactos gradacionales entre ellos y la diorita, sugieren una diferenciación magmática in situ.

En las investigaciones sobre petrogénesis, los diagramas de variaciones expresan que el contenido de K_2O de la roca es mayoritaria en los miembros intermedios de la serie intrusiva, mientras que en los cuerpos intrusivos de la serie calco-alcalina es notablemente escaso. En todo caso, el fenómeno solo puede ser aplicable en la localidad que se está tratando, ya que es posible que no sea verdaderamente representativo a todo el batolito, que se extiende por muchísimos kilómetros más al norte y oeste del área que abarca la figura 1 (Tilling, 1962).

Metamorfismo de Contacto

El emplazamiento de las rocas plutónicas fue por medio de una intrusión del tipo forzada, que implicó también un régimen de temperatura-presión, generándose una interesante aureola de metamorfismo de contacto (figura 1). La aureola alcanza un ancho promedio de 2,5 kms; zona que se confina al lado oeste del río Copiapó (Tilling, 1962).

En la zona más interior de la aureola, las rocas calcáreas originales han sido metamorfoseadas a skarn, córneas, y rocas calcoalcalinas; también se encuentran rocas metavolcánicas. El grado de metamorfismo decrece bruscamente en la zona más exterior de la aureola y las rocas encajadoras están esencialmente sin metamorfismo.

Rocas estratificadas sin metamorfismo

En el bloque oeste del río Copiapó (figura 1), aflora una secuencia de rocas estratificadas que corresponden principalmente con rocas volcánicas y sedimentarias. Estas rocas estratificadas han sido mapeadas como pertenecientes a las formaciones Punta del Cobre, Abundancia y Nantoco de edad Neocomiana (Segerstrom y Ruiz, 1962). La primera de las formaciones mencionadas está constituida por lavas con intercalaciones de sedimentos clásticos marinos (calizas y areniscas) que presentan horizontes fosilíferos; y la formación Nantoco que consiste principalmente de calizas oscuras con ocasionales arcillolitas calcáreas, arkosas y rocas tobáceas.

Estructura

Uno de los rasgos estructurales más sobresalientes del área lo constituye el anticlinorium Tierra Amarilla (Segerstrom, 1960). Además, existen numerosos pliegues secundarios o flexuras locales, características de las rocas estratificadas de esta región. Las inclinaciones generales de las alas del anticlinorium son de pequeño ángulo, aproximadamente 25° , pero algunas veces es posible observar posiciones casi verticales de los estratos (figura 1).

Fallas de gran ángulo han sido mapeadas en el área de Tierra Amarilla. Las más notables son las correspondientes al sistema de la falla Paipote, que se encuentra cubierta en parte por los depósitos cuaternarios. Hacia el oeste del río Copiapó existen varias fallas de este sistema, que afectan tanto a las rocas metamórficas, como a las intrusivas. En estas fallas generalmente el bloque este ha subido con respecto al bloque oeste (figuras 1 y 3).

Una de las observaciones generalizadas más importantes es la que se desprende del hecho que regionalmente el batolito es elongado paralelamente con el modelo estructural dominante (Mapa Geológico de Chile, 1960), lo que sugiere que las estructuras pre-batolíticas ofrecieron un ligero control en el emplazamiento del batolito (Tilling, 1962). Curiosamente, las diferenciaciones intrusivas en el área de Tierra Amarilla (figura 1) muestran cierta tendencia a esa elongación, con la evidencia de que en parte ese control es post-intrusivo.

Yacimientos Metalíferos

El área de Tierra Amarilla forma parte de una de las regiones de nuestro país que reúne un mayor número de yacimientos. El cuadrángulo Copiapó por ejemplo (Segerstrom, 1962) tiene una densidad de 42 por cada 100 kilómetros cuadrados, lo que es extraordinariamente alto.

En el área de Tierra Amarilla, los principales minerales metálicos presentes son cobre y fierro. El oro generalmente ocurre junto con el cobre, en cantidades variables, pero a veces en valores muy representativos que le dan carácter de sub-producto importante.

En general, los yacimientos minerales del área tienen las siguientes características estructurales: 1° la mayor parte de los yacimientos se emplazan en estructuras verticales a subverticales (vetas) y en menor grado en estructuras horizontales a subhorizontales interestratificadas (mantos); 2° casi la totalidad de las vetas corresponden a la mineralización de fallas (otras características importantes relacionadas con los yacimientos minerales se describen en la tabla N° 1).

TABLA N° 1

CARACTERISTICAS MINERALOGICAS Y DE ALTERACION DE LAS ROCAS ENCAJADORAS

Roca Caja	Principales Caracterís- ticas	Minerales de Alteración	Mineral de Mena Prin- cipal	Minerales de Mena Asocia- dos	Minerales de Ganga	Cuñas Mineralizadas
Monzonita- Cuarcifera y Diorita	Roca fresca Cuarzo Piroxena Hornblenda	Clorita Cuarzo Epidota (Sericitita) (Calcita)	Calcopirita	Especularita Magnetita Pirita (Actinolita)	Epidota Cuarzo Calcita Lazulita Clorita	
Monzodio- rita	Roca fresca	Actinolita Clorita (Sericitita)	Hematita Magnetita	Especularita (Calcopirita) (Pirita)	Cuarzo Turmalina Clorita	Cuarzo Turmalina Especularita
Diorita	Roca fresca	Clorita Sericitita Cuarzo	Calcopirita	Especularita Pirita	Granate Cuarzo Actinolita Calcita Epidota	Cuarzo Sericitita

Continúa

CONTINUACION TABLA N° 1

Roca Caja	Principales Caracterís- ticas	Minerales de Alteración	Mineral de Mena Prin- cipal	Minerales de Mena Asocia- dos	Minerales de Ganga	Cuñas Mineralizadas
Córneas Skarn	Granates Cuarzo	Clorita Actinolita Albita Epidota Calcita (Sericita) (Andalucita)	Calcopirita	Especcularita Magnetita Pirita	Granates Epidota Cuarzo Calcita	Cuarzo
Córneas Metandes- tas	Actinolita Clorita Albita	Cuarzo Calcita Clorita Sericita Epidota Albita	Magnetita Calcopirita	Especcularita Pirita Marcasita	Cuarzo Calcita Epidota	Cuarzo Calcita Clorita
Calizas Andesitas	Clorita	Clorita Cuarzo Calcita (Sericita) (Albita) (Epidota)	Calcopirita Pirita	Magnetita Especcularita Enargita	Calcita Cuarzo Apatita Titanita Baritina	Cuarzo Calcita Óxido de Fe Sulfuros de Cu y Fe

Los minerales entre paréntesis ocurren en cantidades subordinadas.

ANTECEDENTES PARA UNA ZONACION

Los estudios realizados en el área de Tierra Amarilla y particularmente en el distrito minero Punta del Cobre evolucionaron hacia consideraciones más areales. El trabajo ha resultado interesante y muy factible gracias a la abundante información geológica existente y a las etapas más avanzadas de prospección que se han realizado (geofísica y sondeos con coronas de diamantes).

La geofísica (magnetometría y perfiles eléctricos por sondeos) permitió definir áreas de alta susceptibilidad magnética, con interesantes anomalías magnéticas en el sector del valle del río Copiapó inmediato a Tierra Amarilla. La revisión mediante sondeos de las anomalías antes mencionadas confirmó la presencia de minerales cupríferos sulfurados asociados con cantidades importantes de óxidos de hierro.

Los sondeos realizados en sectores de los afloramientos inmediatamente al este del río Copiapó han indicado la presencia de importantes yacimientos cupríferos con cantidades muy subordinadas de óxidos de hierro, los que tienen un incremento, en desmedro de los sulfuros de cobre, conforme se profundiza en la columna geológica.

Hacia el oeste de la aureola de metamorfismo, en rocas intrusivas, intermitente han estado en actividad minas de fierro y cobre.

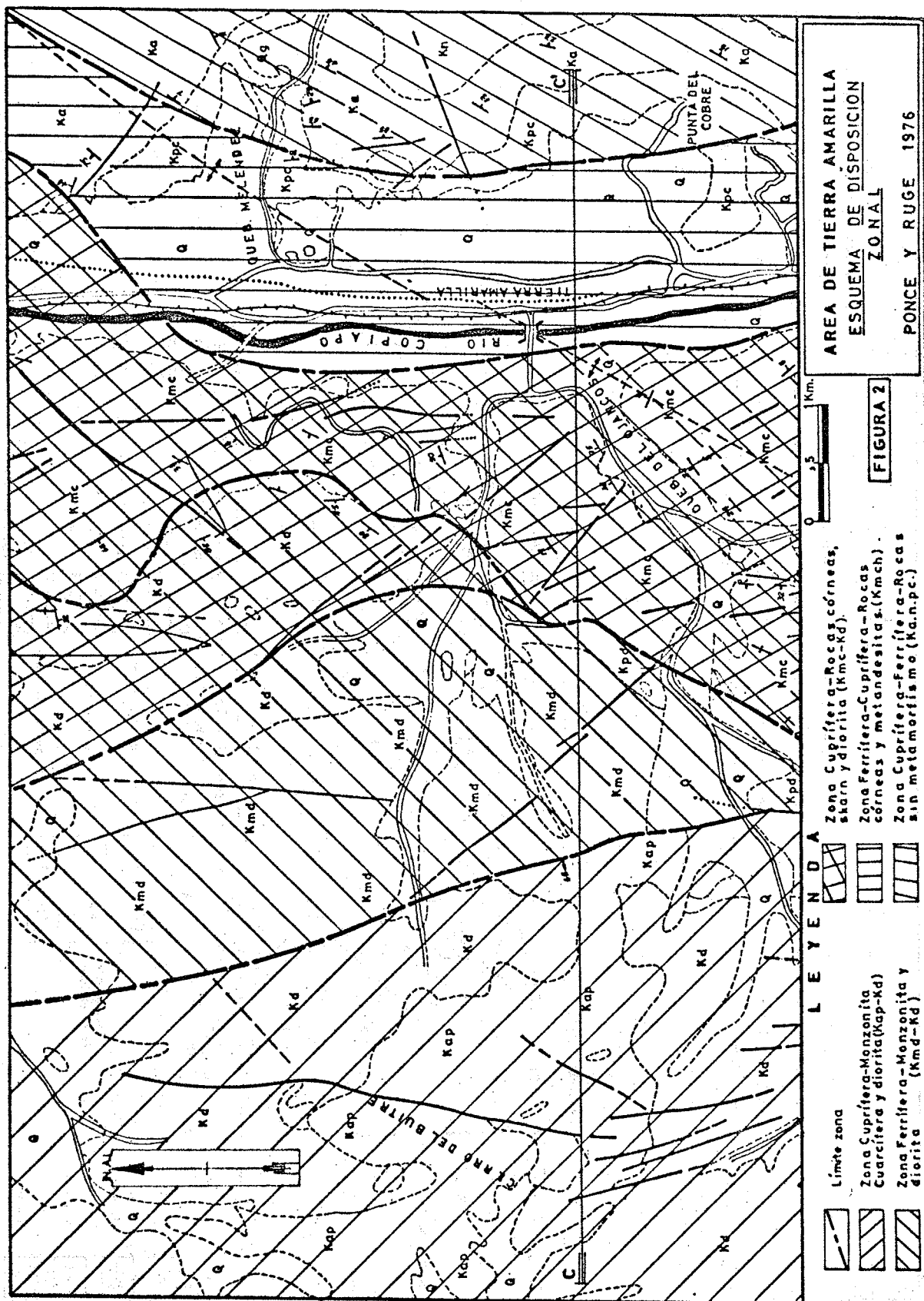
La ocurrencia de minas de cobre, de fierro y de cobre-fierro; su relación espacial con ciertos tipos litológicos; su asociación a otros minerales; la existencia de controles estructurales importantes de la mineralización; la presencia de rocas intrusivas, metamórficas y sin metamorfismo, el emplazamiento de yacimientos metalíferos en todas ellas, son evidencias que se han considerado relacionadas a la evolución de un solo fenómeno geológico y posiblemente conformado en una disposición zonal a partir de un plutón granítico.

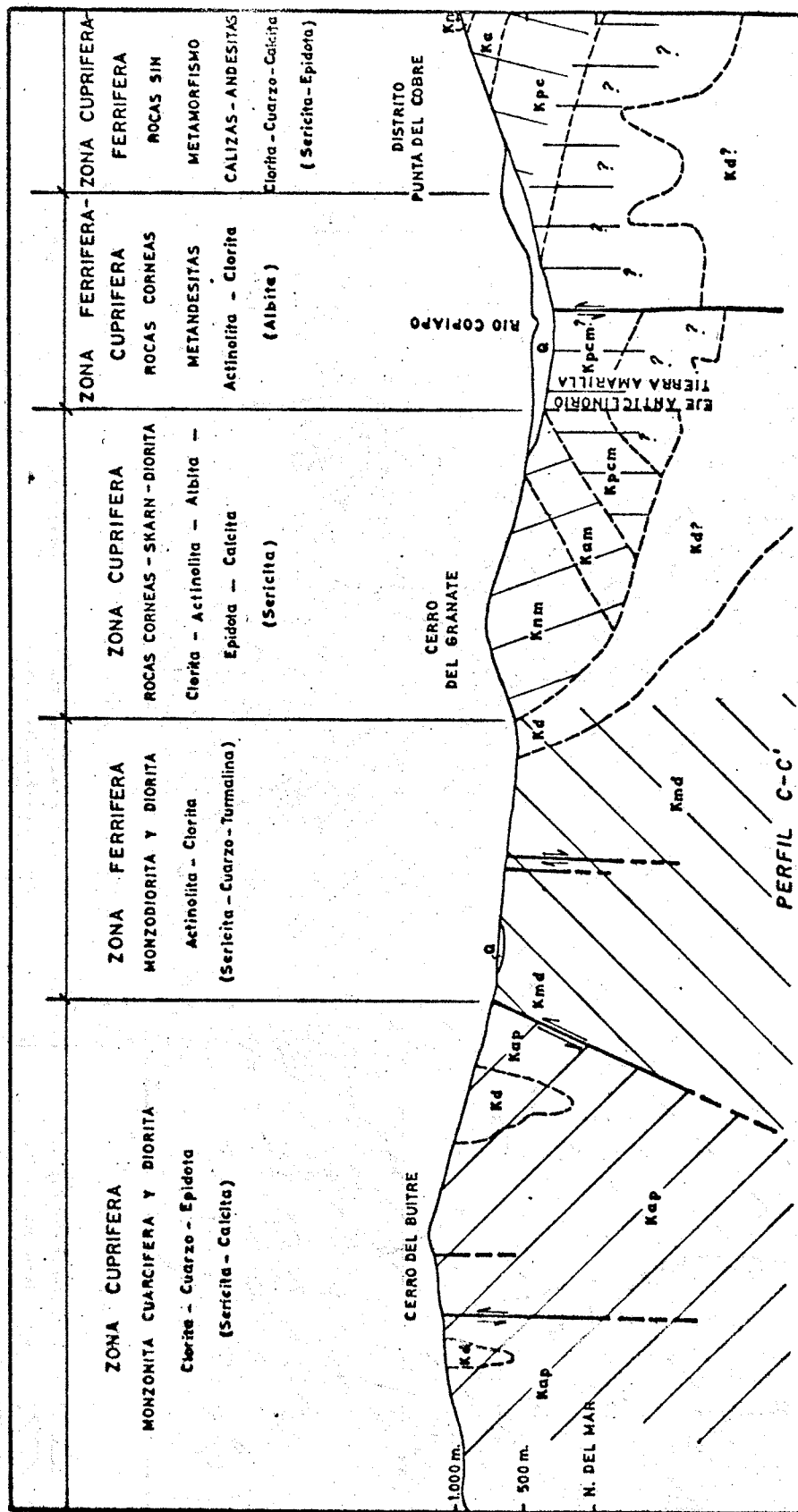
Las bases de los antecedentes más generales en que se apoya la teoría de una disposición zonal en el área de Tierra Amarilla son las siguientes:

1.- Geología regional, ubicación geográfica y distribución de yacimientos metalíferos.

Los antecedentes sobre geología regional han permitido definir cinco agrupaciones de rocas, en los que se emplazan yacimientos metalíferos. Estos yacimientos se distribuyen según ciertas afinidades por determinadas litologías, que resultan representativas para los elementos metálicos Cu y Fe (figuras 1, 2 y 3).

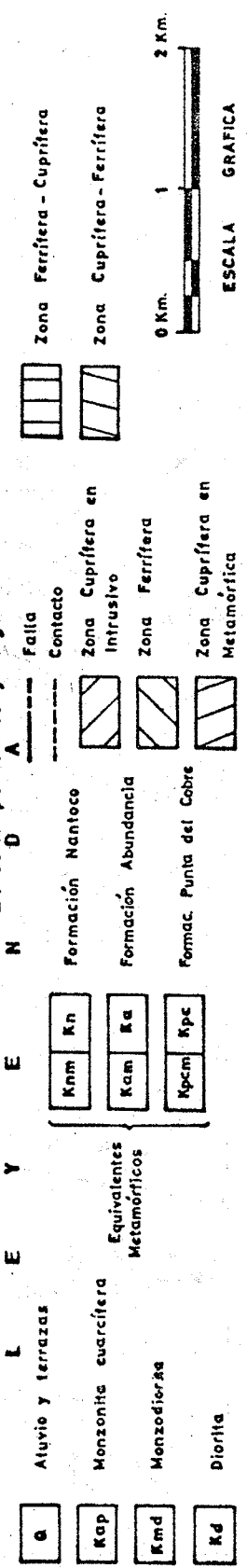
Los límites o contactos de las zonas laterales que se presentan en la figura 2 fueron configurados por rasgos estructurales





Geología Simplificada de Segerstrom y Ruiz, 1962 ; Tilling, 1962
Zonación por Ponca y Ruge 1976

FIGURA 3



mayores o cambios litológicos importantes, además del tipo de metalización. Las dos zonas definidas para el intrusivo están marcadas, la más occidental, por una importante falla de rumbo general norte-sur y subvertical, que pone en contacto (en su parte central) a la unidad monzodiorita con la unidad monzonita cuarcífera (adamelita). La zona oriental en el intrusivo está delimitada por la falla antes mencionada y aproximadamente el contacto con las rocas metamórficas. Se incluye un bloque de la unidad diorita por las características de metalización. La zona de las rocas metamórficas, corresponden con la aureola de metamorfismo definida por Tilling (1962) en la que se incluye parte de las unidades estratificadas sin metamorfismo por sus características de metalización. La zona correspondiente a la del valle del río Copiapó se ha delimitado en base a los antecedentes geofísicos y de sondajes, ya que está cubierta casi en su totalidad por sedimentos modernos (aluvio y terrazas). La zona más oriental de la figura 2 es la que corresponde con las rocas estratificadas sin metamorfismo y se ubican hacia el flanco este del río Copiapó.

Las zonas en su interpretación vertical se representan en la figura 3. Se asume una posición de las rocas plutónicas afectando a los niveles más inferiores de las rocas estratificadas de manera que una de las zonas de las rocas metamórficas debe extenderse hacia el bloque oriental de la falla Paipote.

2.- Análisis químicos, geoquímicos y microscópicos de rocas

La revisión y análisis de los antecedentes de aproximadamente setenta minas del Área de Tierra Amarilla, más el reconocimiento en el terreno de sus características más relevantes para el propósito de la presente investigación, han permitido definir características de litología, de alteración hidrotermal y mineralización, que se presentan en la tabla N° 1.

Los resultados de los análisis químicos[#], geoquímicos[#] y microscópicos de diez muestras tipo de rocas se representan en la figura 4 y en las tablas N° 1 y 2. Los datos obtenidos de todos esos análisis han servido para confirmar la ubicación en el espacio de las unidades litológicas y la presencia de minerales que permitieran diagnosticar la existencia de algún grado de alteración hidrotermal. Los análisis por elementos trazas de Rb y Sr se utilizaron para tener otro diagnóstico sobre grado de alteración hidrotermal y su tendencia o posibles características anómalas dentro de las diferentes zonas metalíferas.

El análisis químico se hizo por los elementos Ca, Na, K y Mg solamente, pensando en que el origen de las alteraciones y minera-

[#] Estos análisis se realizaron por medio de espectrofotometría de absorción atómica (Perkin - Elmer).

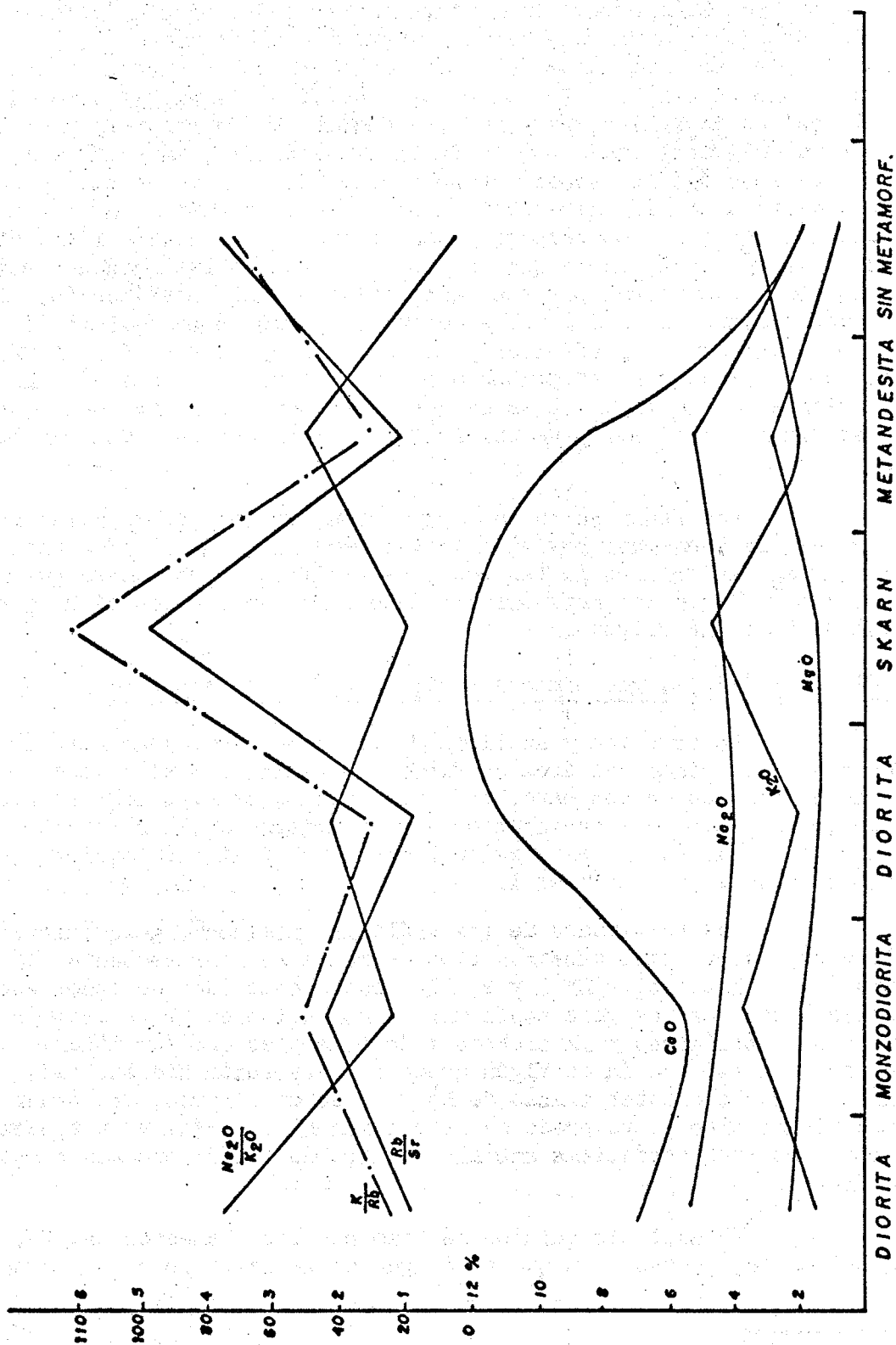


FIGURA 4

PONCE Y RUGE, 1976.

TABLA N° 2

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS

Muestras	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cu	Pb	Zn	Sr	Rb
	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	8,45	2,85	5,18	2,12	60	45	87	590	610
2	3,81	2,12	4,26	4,15	201	25	36	260	720
3	6,83	1,92	6,09	1,25	59	25	31	620	360
4	9,23	2,52	4,96	3,48	45	200	33	230	200
5	25,97	0,53	0,54	0,77	98	15	50	40	1420
6	10,86	1,92	4,10	1,73	106	20	48	860	490
7	9,07	1,92	4,64	3,23	90	105	44	390	580
8	6,94	2,79	4,69	1,83	131	20	65	590	710
9	0,28	1,33	3,67	6,07	50	30	42	60	520
10	3,75	1,13	4,58	2,46	140	10	48	350	370
11	15,26	1,79	4,42	3,37	44	20	53	370	540
12	3,25	1,06	1,73	0,29	86	—	143	50	140
13	22,33	1,86	1,40	2,17	237	45	180	160	620
14	2,29	1,86	3,07	3,23	410	20	55	30	890
15	0,11	1,06	0,32	3,28	90	15	92	50	230

UBICACION DE MUESTRAS ANALIZADAS

- 1 Metandesita de formación Punta del Cobre
- 2, 7 y 10 Monzodiorita
- 3, 6 y 8 Diorita
- 4 y 9 Roca cornea (skarn) sedimentos metamorfoseados de formación Abundancia o Nantoco
- 5 Granatita (cerca del Cerro de Granate)
- 11 Granodiorita (mina Quijos Blancos, fuera del área)
- 12 Lavas superiores de formación Punta del Cobre (Sondaje 27 a 110 m de profundidad)
- 13 Lutitas calcáreas de formación Punta del Cobre (Sondaje 27 a 120 m de profundidad)
- 14 Albitófiro (Sondaje 27 a 270 m de profundidad)
- 15 Traquiandesitas de formación Punta del Cobre (Sondaje 27 a 350 m de profundidad)

lizaciones está más relacionada a una actividad volcánica calco-alcalina. El análisis por Fe no se consideró representativo por la abundancia de este elemento en la región.

Los resultados considerados más definitivos marcan las siguientes tendencias:

- 1.- Valores cercanamente normales de Ca, Na, K y Mg con respecto a la composición química de las rocas.
- 2.- Incremento de K y Mg en rocas metamórficas como indicadores de minerales de alteración (sericita, anfíbola).
- 3.- El contenido de rubidio aumenta coincidiendo con un incremento de potasio.
- 4.- Escasa a incipiente alteración hidrotermal de las rocas intrusivas.
- 5.- Importante alteración hidrotermal superimpuesta al metamorfismo de contacto.
- 6.- Razón Rb/Sr buen indicador de rocas metamórficas y estratificadas con mineralización cuprífera importante.

CONCLUSIONES

- 1.- Se considera una disposición o arreglo zonal de intrusión-metamorfismo-alteración-mineralización, con la ocurrencia preferencial de menas de Cu y Fe.
- 2.- Se definen las siguientes zonas, considerando la relación espacial metalización, tipos litológicos y alteración hidrotermal principal:
 - a) ZONA CUPRIFERA
Monzonita Cuarzifera-Diorita
Clorita-Cuarzo-Epidota
 - b) ZONA FERRIFERA
Monzodiorita-Diorita
Actinolita-Clorita
 - c) ZONA CUPRIFERA
Rocas córneas-Skarn-Diorita
Clorita-Actinolita-Albita-Epidota-Calcita
 - d) ZONA FERRIFERA-CUARCIFERA
Rocas córneas-Metandesitas
Actinolita-Clorita
 - e) ZONA CUPRIFERA-FERRIFERA
Calizas-Andesitas
Clorita-Cuarzo-Calcita
- 3.- El contenido de los elementos Ca, Na, K, Mg es el normal para las rocas consideradas. Algunos incrementos de estos elementos por sobre sus valores normales se han interpretado como productos de minerales de alteración hidrotermal, ya que va acompañado también de un incremento de Rb.

- 4.- La razón Rb/Sr está directamente relacionada al grado de alteración de las rocas y a su contenido de cobre.

La tendencia es de poca representación de la razón Rb/Sr en los intrusivos alejados del contacto por la escasa alteración hidrotermal, la que se confina a las fracturas mineralizadas. En cambio el cobre (principalmente en la forma de sales y oxisales de cobre) es más difundido en las rocas estratificadas.

En la zona ferrífera-cuprífera la razón Rb/Sr está en relación inversa con el contenido de cobre, ya que este elemento se encuentra más bien subordinado con respecto al fierro. Además, el grado de alteración hidrotermal de las rocas es más bien bajo en la zona ya mencionada.

- 5.- La razón K/Rb muestra la misma tendencia que la razón Rb/Sr. La tendencia anómala alta de la razón K/Rb en las rocas sin metamorfismo se debe posiblemente a que los análisis de roca corresponden a trauquandesita. El Rb, como ya se dijo, tiene representatividad por tratarse de la zona cuprífera-ferrífera, con preponderancia de los minerales de cobre por sobre los de fierro.
- 6.- Los criterios y conceptos geológicos de zonación han resultado de mucha utilidad en la exploración realizada en el área de Tierra Amarilla y en particular en el distrito Punta del Cobre. Se considera si que las posibilidades de la zona ferrífera-cuprífera deben ser investigadas preferencialmente para localizar yacimientos de fierro, ya que sus características geológicas apuntan en esa dirección.

AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Nacional de Minería por las facilidades y apoyo dados para la presentación de este trabajo.

A los colegas de la Superintendencia de Geología de la División Salvador la cooperación prestada en el estudio de cortes transparentes y por la realización de los análisis químicos y geoquímicos.

BIBLIOGRAFIA

BLAS, L., 1963

BRUGGEN, J., 1950

CORVALAN, J., 1974

La agenda del químico. Editorial Aguilar.

Fundamentos de la geología de Chile. Santiago, Instituto Geográfico Militar.

Estratigrafía del Neocomiano marino al sur de Copiapó, Prov. de Atacama. Revista Geológica de Chile, N° 1 Santiago.

LLAUMETT, C., y VITERI, E., 1964

ORTIZ, F., ARAYA, R., FRANQUEZA, F.,
MORAGA, A., y ZENTILLI, M., 1966

PONCE, J., 1975

ROSLER, M. J., y LANGE, M., 1972
RUGE, H., 1976

RUIZ, C., CORVALAN, S., KLOHN, C.,
KLOHN, E., y LEVI, B., 1965

SEGERSTROM, K., y RUIZ, C., 1962

SILVA, L., 1974

TILLING, R., 1962

ZENTILLI, M., 1974

Zonación de los elementos y minerales en el distrito minero El Volcán. Publicación 36. Depto. de Geología Universidad de Chile.

Informe geológico del distrito minero de Punta del Cobre. Instituto de Investigaciones Geológicas, 4 Tomos, Copiapó.

Relaciones entre estructura y mineralización masiva en el distrito cuprífero Punta del Cobre, Chile.

Geochemical tables. Elsevier.

Evaluación geológica del yacimiento Punta del Cobre. ENAMI. Copiapó.

Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.

Cuadrángulo Copiapó. Provincia de Atacama. Carta Geológica de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago.

Criterios usados en la selección de los métodos geofísicos de prospección. Revista Geológica de Chile, N° 1, Santiago.

Batholith emplacement and contact metamorphism in the Paipote. Tierra Amarilla Area, Chile. Tesis de doctorado, Universidad de Yale, Yale. Geological evolution and metallogenetic relationships in the Andes of Northern Chile. Between 26° and 29° South. Tesis de doctorado. Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá.