

1
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PORFIDOS CUPRIFEROS PROSPECCION
GEOLOGICA-MINERA DEL PROYECTO
MARIQUITA, MUNICIPIO DE
CANANEA, SON.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A N ,

OSCAR GERARDO BOJORQUEZ ORTIZ

ANTONIO CARRILLO PEREZ

ALEJANDRO RAMOS DAVALOS

FERNANDO RAMIREZ CHAVEZ



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-009

SR. OSCAR GERARDO BOJORQUEZ ORTIZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Germán Arriaga García, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

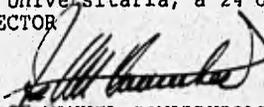
PORFIDOS CUPRIFEROS. PROSPECCION GEOLOGICA-MINERA DEL PROYECTO MARIQUITA, MUNICIPIO DE CANANEA, SON.

I	INTRODUCCION
II	PORFIDOS CUPRIFEROS
III	PROSPECCION MINERA
IV	METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS
V	GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA
VI	GEOLOGIA DEL AREA MARIQUITA
VII	EVALUACION
VIII	METODOS DE EXPLOTACION
IX	BENEFICIO Y METALURGIA
X	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA
	MAPAS E ILUSTRACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 24 de enero de 1995
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-007

SR. ANTONIO CARRILLO PEREZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Germán Arriaga García, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

PORFIDOS CUPRIFEROS. PROSPECCION GEOLOGICA-MINERA DEL PROYECTO MARIQUITA, MUNICIPIO DE CANANEA, SON.

I	INTRODUCCION
II	PORFIDOS CUPRIFEROS
III	PROSPECCION MINERA
IV	METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS
V	GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA
VI	GEOLOGIA DEL AREA MARIQUITA
VII	EVALUACION
VIII	METODOS DE EXPLOTACION
IX	BENEFICIO Y METALURGIA
X	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA
	MAPAS E ILUSTRACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 24 de enero de 1995
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLÍS

CMCS*EGLM*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-010

SR. ALEJANDRO RAMOS DAVALOS
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Germán Arriaga García, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

PORFIDOS CUPRIFEROS. PROSPECCION GEOLOGICA-MINERA DEL PROYECTO MARIQUITA, MUNICIPIO DE CANANEA, SON.

- I INTRODUCCION
- II PORFIDOS CUPRIFEROS
- III PROSPECCION MINERA
- IV METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS
- V GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA
- VI GEOLOGIA DEL AREA MARIQUITA
- VII EVALUACION
- VIII METODOS DE EXPLOTACION
- IX BENEFICIO Y METALURGIA
- X CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFIA
MAPAS E ILUSTRACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 24 de enero de 1995
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-008

SR. FERNANDO RAMIREZ CHAVEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Germán Arriaga García, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

PORFIDOS CUPRIFEROS. PROSPECCION GEOLOGICA-MINERA DEL PROYECTO MARIQUITA, MUNICIPIO DE CANANEA, SON.

I	INTRODUCCION
II	PORFIDOS CUPRIFEROS
III	PROSPECCION MINERA
IV	METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS
V	GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA
VI	GEOLOGIA DEL AREA MARIQUITA
VII	EVALUACION
VIII	METODOS DE EXPLOTACION
IX	BENEFICIO Y METALURGIA
X	CONCLUSIONES
	BIBLIOGRAFIA
	MAPAS E ILUSTRACIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 24 de enero de 1955
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGLM*gtg

A G R A D E C I M I E N T O S

CON ESPECIAL AGRADECIMIENTO A NUESTRO
DIRECTOR DE TESIS:

ING. GERMAN ARRIAGA GARCIA

POR LA APORTACION DE SUS VALIOSOS CONOCIMIENTOS
Y SU AYUDA EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

A LOS INGENIEROS:

ALEJANDRO GUZMAN AGUIRRE

MIGUEL VERA OCAMPO

CARLOS E. GARZA GONZALEZ-VELEZ

JOSE LUIS JIMENEZ MENDOZA

POR SUS VALIOSAS CRITICAS Y SUGERENCIAS EN
LA REVISION DE ESTE ESTUDIO.

A LOS INGENIEROS:

JOSE M. TISCAREÑO PIÑA

GABRIEL MORENO PECERO

POR LAS FACILIDADES QUE NOS OTORGARON PARA
LA REALIZACION DEL PRESENTE TRABAJO.

I N D I C E

	Página
CAPITULO I.	5
I.- INTRODUCCION	6
1.1. PRESENTACION	8
1.2. HISTORIA DE LOS PORFIDOS CUPRIFEROS	11
1.3. CONSIDERACIONES QUIMICAS Y FISICOQUIMICAS	13
CAPITULO II.	16
2.- PORFIDOS CUPRIFEROS	17
2.1. PARAGENESIS HIPOGENICA	18
2.2. OXIDACION Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGENICO	19
2.3. LEYES	22
2.4. TONELAJE	22
2.5. ROCAS Y ALTERACIONES HIPOGENICAS	24
2.6. ESTRUCTURAS	29
2.7. RECAPITULACIONES DE LA HISTORIA GEOLOGICA	36
2.8. TEORIAS GENETICAS	39
CAPITULO III.	45
3.- PROSPECCION MINERA	46
3.1. CRITERIOS FISIOGRAFICOS	48
3.2. CRITERIOS MINERALOGICOS	50
3.3. CRITERIOS LITOLOGICOS	55
3.4. CRITERIOS ESTRUCTURALES	59

CAPITULO IV.	62
4.- METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS	63
4.1 METODOS GEOFISICOS	63
4.1.1 INTRODUCCION	63
4.1.2 METODO GRAVIMETRICO	64
4.1.3 METODO DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA	65
4.1.4 METODO SISMICO	67
4.1.5 METODOS ELECTRICOS	68
4.1.5.1 RESISTIVIDAD	68
4.1.5.2 POLARIZACION INDUCIDA	69
4.1.6 OTROS METODOS	71
4.2 METODOS GEOQUIMICOS	74
4.2.1 INTRODUCCION	74
4.2.2 MUESTREO DE ROCAS	75
4.2.3 MUESTRAS DE SUELOS	76
4.2.4 MUESTRAS DE SEDIMENTOS DE ARROYO	77
4.2.5 CONCENTRADOS DE BATEA	79
4.2.6 MUESTREO DE VEGETACION	80
4.2.7 MUESTRAS DE AGUAS DE POZOS	82
4.2.8 MUESTRAS DE GASES EN SUELOS	82
 CAPITULO V.	 84
5.- GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA	85
5.1. LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO	85
5.2. FISIOGRAFIA	86

CAPITULO VI.	89
6.- GEOLOGIA DEL PROYECTO MARIQUITA	90
6.1. GEOLOGIA REGIONAL (DISTRITO DE CANANEA)	90
6.1.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA	90
6.2. GEOLOGIA DE DETALLE (PROYECTO MARIQUITA).....	95
6.2.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA	95
6.2.2. ESTRUCTURAS	97
6.2.3. ALTERACION	98
6.2.4. MINERALIZACION	100
6.2.5. HISTORIA GEOLOGICA	103
 CAPITULO VII.	 106
7.- EVALUACION	107
 CAPITULO VIII.	 110
8.- METODOS DE EXPLOTACION	111
8.1. METODOS DE EXPLOTACION SUBTERRANEOS	111
8.2. METODOS DE EXPLOTACION SUPERFICIALES	112
 CAPITULO IX.	 119
9.- BENEFICIO Y METALURGIA	118
9.1. METODO DE FLOTACION	118
9.2. METODOS DE LIXIVIACION	120
9.2.1. METODO DE LIXIVIACION INSITU	121
9.2.2. METODO DE LIXIVIACION POR LOTES	122
9.2.3. METODO DE LIXIVIACION POR PERCOLACION	122
9.2.4. METODO DE LIXIVIACION POR AGITACION	123

CAPITULO X.	124
10.- CONCLUSIONES	125
BIBLIOGRAFIA	128
MAPAS E ILUSTRACIONES	133

C A P I T U L O I

1.- INTRODUCCION

1.1. PRESENTACION

1.2. HISTORIA DE LOS PORFIDOS CUPRIFEROS

1.3. CONSIDERACIONES QUIMICAS Y FISICOQUIMICAS

1.- INTRODUCCION

¿Hasta que punto las materias del reino mineral constituyen la médula de la vida industrial y del desarrollo económico de las naciones?. Las abundantes existencias antiguas presentan ahora una importante merma, y los países de todo el mundo buscan cada vez más lejos aquellos productos minerales necesarios para su subsistencia.

El aumento de población y la intensificación de la mecanización, tanto en el hogar como en la industria, exigen recursos minerales cada vez mayores, y se necesitan métodos de exploración más científicos para encontrar nuevos depósitos que sustituyan a los que están en vías de agotamiento.

El cobre es el más importante de los metales no ferrosos por sus características físicas y químicas como son su alta conductividad térmica y eléctrica, resistencia a la corrosión, buena maleabilidad y resistencia a los distintos esfuerzos, estas propiedades hacen de él un metal estratégico.

En la segunda mitad del siglo XX el cobre ha tenido gran demanda en el mercado mundial y se ha constituido como uno de los metales básicos en el desarrollo de las diferentes industrias de transformación. De ahí la importancia que han adquirido los yacimientos del tipo "pórfido cuprífero", puesto que forman las mayores fuentes de minerales de cobre y contienen las mayores reservas explotables que se han estimado a nivel mundial.

Una de las principales características de estos yacimientos es su baja ley y gran tonelaje. Actualmente la mayoría de los pórfidos cupríferos en explotación, trabajan con leyes tan bajas como 0.5% de cobre, y se consideran las leyes mínimas de 0.4% y 0.35% de cobre para cuantificar reservas.

La exploración geológica es la herramienta principal para localizar yacimientos de rendimiento económico, es por esto que el presente trabajo tiene como objetivo hablar de los yacimientos tipo "pórfido cuprífero" a nivel mundial, mencionando sus principales características, su forma de emplazamiento, génesis, guías fisiográficas, mineralógicas, litológicas y estructurales, así como los métodos indirectos (geofísicos y geoquímicos) útiles en su localización, también se habla acerca de los métodos de explotación y beneficio; coronando este trabajo con el estudio detallado del yacimiento Mariquita, ubicado en el estado de Sonora, México, que si bien no es un yacimiento típico de pórfidos cupríferos, si se asemeja en muchas de sus características a estos (este proyecto a la fecha está en evaluación).

Se espera que este trabajo sea de gran ayuda a todas aquellas personas que directa o indirectamente estén vinculadas con la exploración de los pórfidos cupríferos, que las ideas y las teorías recopiladas de diferentes autores puedan enmarcar en un contexto geológico más preciso las áreas de interés.

Por último se puede decir que a nivel internacional, México en el año de 1994, mantuvo un destacado lugar en la producción de este metal, ocupando el 10º lugar en la producción minera mundial con 305,487 toneladas de cobre, lo cual representa el 3.1% de la producción mundial de mineral de cobre (Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 1995); el mineral que aportan los yacimientos de tipo pórfido cuprífero localizados en el estado de Sonora constituye el 88% de la producción nacional de cobre, siendo los más importantes Cananea y Nacozari.

1.1 PRESENTACION

El descubrimiento de la mayor parte de los yacimientos de pórfidos cupríferos en el mundo ha sido por medio de levantamientos geológicos detallados de áreas promisorias, seguido de la ejecución de programas de barrenación; en parte ha sido de ayuda la aplicación de investigaciones geoquímicas y geofísicas. Se piensa que en el futuro inmediato seguirá siendo la investigación geológica la herramienta principal en la exploración, pero a medida que aumenta la exploración de áreas cubiertas por rocas postminerales, ella deberá guiarse por la extrapolación de marcos geológicos favorables presentes en las rocas preminerales o por la existencia de anomalías geofísicas y geoquímicas. Como en este caso, siempre será necesario recurrir a la perforación de barrenos de exploración; será cada vez más

importante disminuir los costos y aumentar los rendimientos, utilizando mejores equipos de perforación.

En la exploración geológica, en una primera fase de carácter regional, es de evidente utilidad la aplicación de criterios metalogénicos que señalen en términos generales, áreas favorables para la exploración de yacimientos de este tipo.

La segunda fase corresponde al estudio geológico detallado de áreas promisorias descubiertas y que se distinguen generalmente por la existencia de zonas afectadas por alteración hidrotermal, decoloradas y/o teñidas por óxidos de hierro de colores pardo, rojo o amarillo. La exploración geológica detallada incluye: la delimitación de los diversos tipos litológicos presentes, con énfasis en los cuerpos de pórfidos intrusivos, delimitación de los diversos tipos de alteración relacionados con la mineralización tipo pórfido cuprífero, los que como se ha dicho, permiten determinar las zonas más favorables para la mineralización, y por último, si se trata de afloramientos lixiviados, estudio sistemático de los tipos de limonitas, combinado con análisis geoquímico de las muestras correspondientes, lo cual permite diagnosticar, con cierto grado de probabilidad las especies cupríferas sulfuradas que se encuentran a profundidad y la intensidad de esta mineralización.

Los estudios geofísicos aun cuando han sido una ayuda valiosa para el descubrimiento de yacimientos metalíferos de variados tipos, en el caso de los yacimientos tipo pórfidos cupríferos su aplicación ha sido muy limitada.

La geoquímica ha sido poco aplicada a la exploración de estos yacimientos, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas desempeñando papeles importantes en la exploración de yacimientos porfídicos.

1.2 HISTORIA

Los depósitos llamados "pórfidos cupríferos" son típicos del siglo XX; históricamente la minería de los pórfidos cupríferos se descubrió a principios de 1906, cuando Daniel Jackling introdujo el primer molino para tratar minerales o menas de bajo grado. Anterior a esta explotación del núcleo mineralizado de los pórfidos cupríferos, una extensa minería de alto grado explotó las vetas periféricas de muchos distritos, los cuales más tarde llegaron a ser famosos por sus depósitos de pórfido cuprífero. Recordando un poco, se puede aludir al siglo XIX y mencionar los distritos mineros de Copper Queen y Morenci en Arizona y antes las minas de Chuquicamata y el Teniente en Chile. Después de los avances históricos de Jackling la explotación del núcleo mineralizado de los pórfidos cupríferos fue iniciada. Esta fue subterránea y mostró concentraciones mayores en la zona de enriquecimiento secundario, la cual contiene más del 2% de cobre. Esto fue el origen de las famosas explotaciones de las minas Ray, Inspiración, New Cornelia, Miami y otras en Arizona; McGill en Nevada; Chino en Nuevo México; Bingham en Utah; Andes y Braden en Chile.

La primera generación de las explotaciones de los pórfidos cupríferos fue incipiente pero reunió suficientes fondos para desarrollar una nueva y evolucionada tecnología, la cual permitiría tratar comercialmente menas de bajo grado encontradas en el casquete oxidado y en la zona primaria. Esto dió crecimiento para una segunda generación de plantas, las cuales,

dependen de la minería a cielo abierto o subterránea. Representaciones típicas de esta generación son Bagdag, Castle Dome, Cooper Queen y Cooper Cities en Arizona, Consolidated Cooper Mines en Nevada, Potrerillos en Chile y Kounrad en Kazakhstan.

Finalmente, después de la Segunda Guerra Mundial y particularmente a fines de los cincuentas y principios de los sesentas, aparece una nueva generación de explotaciones modernas, las cuales manejan u operan prácticamente cualquier mena de bajo grado por encima del 0.5% de cobre. Por ejemplo San Manuel, Silver Bell, Morenci y Ray en Arizona, Yerinton en Nevada, Almalyk en Uzbekistan, Toquepala en Perú, Cananea en México, Atlas en las Filipinas y Majdanpek en Yugoslavia.

En el presente ha surgido una nueva explotación de pórfidos, donde en muchos casos el contenido de cobre no es suficiente para justificar las operaciones en conjunto, pero con productos que se pueden recuperar conjuntamente como molibdeno, oro y plata, la explotación es costeable económicamente. Estos son los casos de Brenda, Lornex, Gibraltar e Island Cooper en Columbia Británica; Biga, Toledo y Santo Tomás en las Filipinas; Bougainville en Nueva Guinea; Medet en Bulgaria y algunas otras en proceso de desarrollo.

La distribución de los pórfidos cupríferos a nivel mundial se encuentra a lo largo de fajas orogénicas muy bien definidas. La primera de ellas es la franja de las Américas, que comprende desde Alaska hasta Chile, pasando por México. La segunda es la correspondiente al suroeste del Cinturón Pacífico. Una tercera es

la parte oriental del Mediterráneo, que incluye países como Turquía, Rumania, etc. (fig.I.2.1)

1.3. CONSIDERACIONES QUIMICAS Y FISICOQUIMICAS

Conocido desde la prehistoria, el cobre es uno de los pocos metales que pueden hallarse en la naturaleza en estado puro o en forma de sulfatos, sulfuros, arseniuros, cloruros, carbonatos, etc.

Sin alear, el cobre presenta un característico color rojizo, y un brillo metálico cuya intensidad depende del grado de pulido. Es el metal que mejor conduce la electricidad si se exceptúa a la plata. Destaca también por su elevada conductividad térmica y tenacidad, por lo que, dada su resistencia a la deformación y a la rotura, es materia prima en la fabricación de cables, alambres y láminas. Es también dúctil, por lo que puede deformarse por estiramiento, y maleable, por lo que puede batirse y extenderse en láminas. No es muy activo químicamente, y resiste bien la oxidación, siempre que no haya humedad ni anhídrido carbónico, en cuya presencia forma una película verdosa de carbonato básico, que recibe el nombre de verdín.

Las menas de cobre se distribuyen en todo el planeta. Los minerales de cobre explotados para la extracción del metal se clasifican en tres categorías:

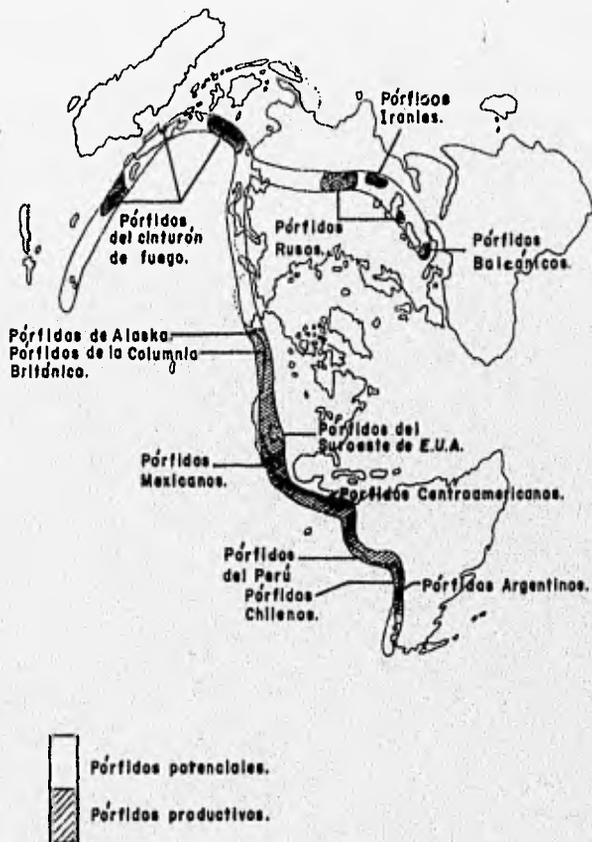


FIG. 1.2.1. VISTA POLAR DE LA DISTRIBUCION DE LOS PORFIDOS CUPRIFEROS.
 (TOMADO DE SUTULOV, 1978. BASADO EN SILLITOE)

- a). **Minerales de cobre nativo.**- sus principales yacimientos actualmente explotados se hayan situados en E.U.A, cerca del Lago Superior (cobre de los lagos), y contiene aproximadamente un 1% de cobre puro. En Bolivia se encuentra también un cobre nativo (el Corocoro) rico en cobre puro.
- b). **Minerales oxidados.**- son los menos extendidos. Los principales son cuprita (óxido rojo), melaconita (óxido negro), malaquita (carbonato verde hidratado), azurita (carbonato azul hidratado), crisocola (silicato hidratado) y atacamita (oxiclورو hidratado), se explotan en E.U.A., Chile, Rhodesia y extremo Oriente.
- c). **Minerales sulfurados.**- son los más difundidos. Siendo el más importante la calcopirita o pirita cuprosa (sulfuro doble de cobre y de hierro, Cu_2S , Fe_2S_3), cuyo contenido de cobre llega por lo general al 34%; los restantes minerales sulfurados explotados son la calcocita (sulfuro Cu_2S), la tetraedrita (o cobre gris), la bornita (cobre abigarrado) y la enargita (sulfuros complejos), así como las piritas de hierro cuprosas; tales minerales sulfurados se explotan principalmente en E.U.A., Chile, Rusia, México, Japón y a escala más limitada en Alemania y España.

PROPIEDADES FISICAS DEL COBRE

Símbolo	Cu
Color	rojo
Masa atómica	63.546
Número atómico	29
Peso específico a 20°C	8.92
Valencia	1, 2
Isótopos del cobre	63 y 65
Configuración electrónica	2-8-18-1 o (Ar) $3d^{10}4s^1$
Volúmen atómico	7.11
Sistema cristalográfico	cúbico
Crucero	no presenta
Dureza (escala de Mohs)	2.5 - 3
Lustre	metálico
Raya	metálica - brillante
Densidad	8.7 - 8.9
Temperatura de fusión	1083°C
Temperatura de ebullición	2595°C
Conductividad térmica a 20°C	0.910 cal x seg x cm ²
Conductividad eléctrica a 20°C	$0.594 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1} \times \text{ohm}^{-1}$
Calor de fusión	50.6 cal x gr.
Ductibilidad	muy dúctil (6º lugar c/r a los demás metales).
Maleabilidad	muy maleable (4º lugar c/r a los demás metales).
Tenacidad	muy tenaz (5º lugar c/r a los demás metales).

C A P I T U L O I I

2.- PORFIDOS CUPRIFEROS

2.1. PARAGENESIS HIPOGENICA

2.2. OXIDACION Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGENICO

2.3. LEYES

2.4. TONELAJE

2.5. ROCAS Y ALTERACIONES HIPOGENICAS

2.6. ESTRUCTURAS

2.7. RECAPITULACIONES DE LA HISTORIA GEOLOGICA

2.8. TEORIAS GENETICAS

2.- PORFIDOS CUPRIFEROS.

Un pórfido cuprífero se considera como una roca con cobre diseminado de baja ley y gran tonelaje, que permite su explotación a cielo abierto (aunque esto no es una regla).

La definición del término "pórfido cuprífero" o "depósito de cobre diseminado", ha cambiado en los últimos cuarenta años de una explicación geológica a la de una ingeniería de minas. Parson (1933), consideró como importantes las siguientes características:

- a).- El depósito posee una forma y magnitud tales, que puede ser explotado ventajosamente por un método a gran escala y bajo costo por tonelada, ya sea mediante un minado subterráneo por hundimiento o a cielo abierto.
- b).- La mineralización de cobre se halla tan uniformemente distribuida en los grandes bloques o secciones del depósito, que resulta más económica la explotación masiva que la de métodos selectivos aplicados a minas de vetas o mantos.
- c).- Una intrusión de pórfido u otra roca ígnea relacionada ha jugado una parte vital en la génesis del yacimiento, aun cuando el pórfido puede no constituir la mayor parte del depósito.
- d).- Al producirse el proceso geológico conocido como "enriquecimiento secundario" se enriquecen los yacimientos en cobre. El resultado es una roca

lixiviada y una zona inferior que conforma la parte principal del yacimiento, la que se presenta típicamente enriquecida con calcocita.

e).- La zona de enriquecimiento secundario se presenta arriba de otra zona de mena primaria.

H. A. Schmitt (1966), en su definición, tiene en cuenta básicamente consideraciones de economía minera y define el término "pórfido de cobre" como: "Un tipo de depósito de cobre masivo, de baja ley y sin tener en cuenta su génesis o el tipo de roca encajonante, siempre que dicho depósito tenga reservas mayores de 5,000,000 de toneladas de mineral con menos del 2% de cobre".

2.1 PARAGENESIS HIPOGENICA

La mineralogía en los pórfidos cupríferos es sencilla. Los sulfuros primarios consisten en pirita, calcopirita y bornita, con cantidades menores de blenda y molibdenita. En el casquete, estos sulfuros están eliminados total o parcialmente, dejando huecos ocupados por limonita de colores y formas típicos. Debajo del casquete, los sulfuros amarillos están revestidos o substituidos parcial o totalmente por calcocita y covelita. La mólíbdenita no está afectada.

La alteración propilítica incluye esencialmente la paragénesis epidota-clorita-calcita-pirita, comúnmente observada en los bordes de las zonas de los pórfidos cupríferos.

En los pórfidos cupríferos es bastante uniforme y circunscrita la paragénesis cobre-molibdeno asociada con hierro, plomo y minerales de zinc, tanto de origen primario como secundario.

El conjunto mineralógico primario consiste, en orden decreciente de cantidades en pirita, pirrotita, calcopirita, molibdenita, magnetita, hematita, arsenopirita, galena, esfalerita, tetraedrita, matildita, ilmenita, rutilo, mackinawita y cubanita.

2.2 OXIDACION Y ENRIQUECIMIENTO SUPERGENICO

Oxidación y lixiviación.- Son importantes requisitos para la formación de enriquecimiento secundario. En el caso de los pórfidos cupríferos, los sulfuros primarios, especialmente pirita y calcopirita, al estar expuestos a las condiciones atmosféricas son oxidados y posteriormente disueltos por aguas de superficie y circulantes cerca de ellos. De esta manera se forman ácido sulfúrico, y sulfatos de hierro y cobre. Dependiendo de la relación calcopirita-pirita (la producción óptima de calcopirita-pirita para una lixiviación total es 1:2-3), el tipo de clima y la presencia de agentes neutralizantes (iones de carbonato y

silicato) el cobre puede ser lixiviado o retenido en la superficie como carbonato, silicato o sulfato, de los cuales el último es solamente estable bajo condiciones de extrema aridez. Mucho del fierro derivado de la destrucción química de la pirita y calcopirita, queda en el afloramiento lixiviado, formando los distintos tipos de "limonita".

Enriquecimiento secundario.- se debe a la migración (hacia abajo y lateral) de sulfato cúprico en soluciones de ácido sulfúrico y que conduce a la precipitación de compuestos de cobre, tales como calcocita y, en menor cantidad covelita. Ambos minerales poseen un mayor contenido de cobre que la calcopirita y representan un notable enriquecimiento. La cementación tiene lugar en un ambiente de reducción, en presencia de sulfuros primarios y ausencia de oxígeno por soluciones circulantes. Generalmente, estos sulfuros secundarios reemplazan primeramente a la calcopirita y luego a la pirita. El reemplazamiento puede variar desde una completa transformación a la formación de pequeñas películas en la superficie de los sulfuros. El enriquecimiento se produce en el nivel freático existente o cerca de él.

Sin embargo, la oxidación no conduce necesariamente al enriquecimiento, pero es un requisito para su formación. Los principales factores que controlan la oxidación y el enriquecimiento secundario son cambios del nivel freático, modelado superficial suave, clima, tiempo, litología y estabilidad cortical.

El más importante de todos estos factores parece ser el nivel freático en relación con el levantamiento y velocidad de la erosión. Las condiciones óptimas para la formación de un potente horizonte de enriquecimiento son una moderada velocidad de erosión subsecuentemente acompañada de graduales descensos del nivel freático. El caso adverso estaría dado por un descenso rápido del nivel freático, provocaría la oxidación y destrucción de la zona de enriquecimiento existente, pero si todavía hay presente una cantidad suficiente de pirita y calcopirita para formar ácido sulfúrico, comenzará un nuevo proceso de lixiviación. Sin embargo, si el primer enriquecimiento fue completo, es decir, sin dejar sulfuros primarios, solamente tendrá lugar una oxidación con la formación de cuprita, tenorita, y posiblemente cobre nativo y carbonatos. Otra posibilidad es la de una elevación del nivel freático provocada por una sedimentación posterior a la oxidación, una espesa cubierta glacial, etc. En este caso una zona de oxidación "sumergida" puede presentarse lejos y por debajo del nivel freático.

2.3 LEYES

A fin de sistematizar la relación entre ley-tonelaje de los pórfidos cupríferos, la figura II.3.1. indica que los pórfidos cupríferos son yacimientos que se están explotando con contenidos mínimos de cobre de alrededor de 0.3% y un promedio máximo el cual generalmente no excede del 1.7%. Casos como Brenda con sólo el 0.2% de contenido de cobre y el de Ertsberg con más del 2% de cobre analizado, son reales excepciones. Muchos pórfidos cupríferos están siendo explotados con valores de cobre de entre el 0.5% al 1.0%, siendo la relación promedio de aproximadamente el 0.8% de cobre (ver tabla II.3.2).

2.4 TONELAJE

Con respecto al tonelaje, muchos de los pórfidos cupríferos están entre 50 millones a 500 millones de toneladas de mineral. Existen pórfidos más pequeños con sólo 20 millones de toneladas, como Mantos Blancos en Chile o Beatle Mountain en Arizona, pero, en muchos casos, el tonelaje sobrepasa los 100 millones de toneladas y el contenido de cobre en estos cuerpos se aproxima o es superior a 1,000,000 de toneladas de cobre metálico. Los casos típicos dentro del diagrama de la figura II.3.1 se encuentran localizados en la zona clara. Minas como Bougainville, Morenci, San Manuel, Cerro Colorado, Sanford y particularmente Bighman y Chuquicamata son casos extraordinarios por su inmenso potencial.

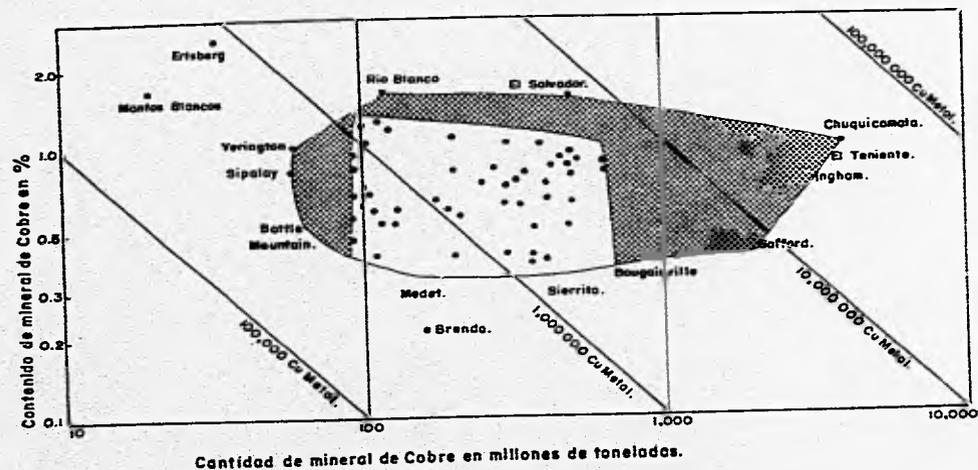


FIG. II.3.1 RELACION ENTRE LEY-TONELAJE DE LOS PORFIDOS CUPRIFEROS.
(TOMADO DE SUTULOV, 1975)

TABLA II.3.2 LEYES Y TONELAJES DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS CUPRIFEROS Y PORFIDOS DE COBRE-MOLIBDENO EN LA CUENCA DEL PACIFICO.

Nº DE DEPOSITOS	REGIONES O PAISES	TON. CORTAS X 10 ⁶ MENA DE Cu	LEY DE Cu ‰	TON. CORTAS X 10 ⁶ Cu - Mo	LEY MOLIBDENO ‰
13 (7)	CHILE	24876	0.66	(7440)	(0.041)
13 (4)	PERU	4372	0.83	(2052)	(0.027)
8 (4)	CENTRO Y SUDAMERICA	5065	0.56	(3365)	(0.017)
6	MEXICO	3191	0.68		
45 (14)	ESTADOS UNIDOS	15852	0.68	(7903)	(0.385)
36 (17)	COLUMBIA BRITANICA Y YUKON	5602	0.43	(3598)	(0.028)
8 (5)	SUROESTE DEL PACIFICO	3220	0.52	(3538)	(0.007)
12	FILIPINAS	851	0.48		
TOTAL 141 (51)		63029	0.605	(27896)	(0.026)

LAS TONELADAS MOSTRADAS EN LA TABLA INCLUYEN LAS EXPLOTADAS Y LAS RESERVAS.

LA CANTIDAD QUE APARECE ENTRE PARENTESIS INDICA LOS DEPOSITOS QUE CONTIENEN Cu y Mo.

(RESUMIDO DE GILMOUR, EN PRENSA).

Es importante hacer hincapié que los cálculos considerados para el diagrama de la figura II.3.1 son cálculos promedio y que en el mismo cuerpo mineral de muy bajo grado en promedio a los de alto grado, pueden ser susceptibles de explotación en diferentes tiempos y con diferentes tecnologías. Sin embargo, lo que hace a un pórfido cuprífero económicamente importante es su grado promedio y su valor potencial como producto, lo cual se justifica a lo largo de las investigaciones.

Con lo que respecta a México, en la tabla II.3.3., se observan la relación de tonelajes y leyes de los principales yacimientos de pórfidos de cobre.

DEPOSITO	PRODUCCION/ RESERVAS	TONELAJE (s.t.x10 ⁶)	LEYES EN ‰				FUEENTES
			Cu ‰	Mo ‰	Au oz/s.t.	Ag oz/s.t.	
BAJA CALIFORNIA El Arco	Reservas, 1976	600	0.6	-	-	-	Sillitoe, 1976, p. B175
SINALOA Santo Tomás	Reservas, 1976	80+	0.55	-	-	-	Sillitoe, 1976, p. B175
SONORA La Caridad	Reservas iniciales	660	0.8 eCu		-	-	Saegart, et al., 1974, p.1061 E&MJ, Oct. 1979 p. 72-88
	Reservas, 1976	750	0.67	0.02	-	-	
Cananea	Reservas, 1991	2000	0.7	-	-	-	Wodzicki, 1992, p.2
La Florida-Barricón	Reservas, 1976	90	0.3	-	-	-	Sillitoe, 1976 p.B174
Nacozari Santa Rosa y Pilares	Reservas, 1974	+ 130	0.80	-	-	-	Min. Mag., Dic. 1974, p.431
	Producción anterior Reservas, 1976	19 44	2.06 0.8	- -	- -	- -	Sillitoe, 1976, p.B176
MICHOACAN Inguarán	Reservas, 1976	6.6	1.2-1.5	-	-	-	Sillitoe, 1976, p.B176
La Verde	Reservas iniciales	81.3	0.699	-	0.0026	0.075	E&MJ, Mar. 1973, p. 207

TABLA II.3.3. PRODUCCION Y RESERVAS DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS CUPRIFEROS EN MEXICO.

2.5 ROCAS Y ALTERACIONES HIPOGENICAS.

Los pórfidos cupríferos pueden estar asociados a rocas intrusivas; su emplazamiento se encuentra determinado por dos ambientes geológicos:

- a).- Los depósitos cupríferos generalmente asociados a granodioritas y cuarzomonzonitas formadas en un ambiente cratónico o dentro de la corteza continental, característicamente representados por los "stocks" mineralizados del SW de los Estados Unidos y del norte de Sonora. La composición de estos cuerpos ígneos varía de granodioritas a cuarzomonzonitas, con el predominio de las últimas y mayor abundancia de molibdeno en comparación con otros metales asociados al cobre.
- b).- Los pórfidos cupríferos asociados a dioritas y cuarzodioritas con presencia de mineralización aurífera y formados en ambientes de arcos insulares actualmente inactivos. Ejemplos representativos se han encontrado en Chemei, Taiwan; en Atlas, Filipinas; Birmania; Islas Salomón y Puerto Rico.

Generalmente las rocas encajonantes en los pórfidos cupríferos no derivan ningún factor fundamental en el emplazamiento de la mineralización; estas rocas pueden ser de cualquier tipo, incluso variando en edad desde el Precámbrico hasta el Paleoceno (Pacífico).

Por lo regular, los plutones cupríferos formados en los dos ambientes mencionados, se emplazaron entre gruesos espesores de lava y piroclásticos un poco más antiguos que las rocas intrusivas mineralizadas. Los tipos de rocas encajonantes más comunes están representadas por: corrientes andesíticas, riolitas, traquíitas, dacitas, lahares y rocas volcanoclásticas.

Alteración Hidrotermal.- la alteración hidrotermal en las rocas está generalmente asociada con todos los depósitos minerales hipogénicos, y de manera especial con los pórfidos de cobre. Este proceso es tan común que se aplica, ampliamente, como una guía en la exploración minera. El término "alteración" define una transformación mineralógica de los minerales que componen las rocas, en particular los silicatos ferromagnesianos y las plagioclasas. Esto es provocado por la introducción de soluciones químicas de composición básica y/o ácida, principalmente compuesta de H_2O , H_2S , CO_2 , K_2O , Na_2O , SiO_2 y HCl . La alteración precede y acompaña y aun sucede a la mineralización, aunque en muchos casos se produce de manera aislada sin tener una mineralización metalífera. Ambos procesos son paralelos y tienen su origen común en soluciones residuales de un cuerpo magmático en enfriamiento.

Aunque las características de la alteración varían de un depósito a otro, tienen mucho en común. Kents (1963), intentó establecer un tipo de patrón genético de alteración; el cual se describe a continuación en orden cronológico:

- a).- Etapa de transformación.- se halla caracterizada generalmente por cloritización y epidotización. Los silicatos no están completamente separados en sus componentes químicos, pero los minerales preexistentes se transforman en otros por pequeñas adiciones y subtracciones. Normalmente, este tipo de alteración es fácilmente visible en el campo, debido al color verde predominante y presente en el borde exterior de la zona de alteración.
- b).- Etapa de reorganización.- esta etapa representa la destrucción de los minerales que forman las rocas con la creación de otros nuevos, pero de acuerdo a Kents, sin introducción de nuevos elementos. A esta etapa pertenecen típicamente, la sericitización, argilización y alunitización, las que causan un blanqueamiento de las rocas. Esta zona está junto al halo formado por la epidotización-cloritización precedentes.
- c).- Etapa de reemplazamiento.- muestra una introducción de sílice, que sustituye a minerales preexistentes, y es usualmente denominada silicificación. Esta fase se superpone con la zona sericitizada.
- d).- Etapa magmática tardía.- se caracteriza por la inyección de fluidos magmáticos posteriores, altamente silíceos, en la roca alterada. En general, se forman tapones (Plug) afaníticos de cuarzo (por ejemplo, tapón de cuarzo de Infiernillo, Chile).

Como se indicó anteriormente, estas etapas forman distintas zonas de alteración, las que pueden tener forma de anillos concéntricos. Sin embargo, algunas de estas fases pueden estar incompletas o ausentes (fig.II.5.1). Las etapas descritas indican varias oleadas independientes de soluciones como causantes de las distintas etapas de alteración, en lugar de una sola ola o avance a partir de un foco central y por diferenciación forman los sucesivos anillos.

Además de la clasificación genética de Kents, existe el sistema establecido por Creasey (1966) que enfatiza las características de las diferentes etapas de alteración (ver fig. II.5.2). Con base en sus principales constituyentes mineralógicos, Creasey establece una diferenciación en alteraciones propilítica, argilítica y potásica.

Alteración propilítica.- aparece en los bordes externos de las áreas alteradas, donde es claramente visible debido a su coloración verdosa. Es equivalente de la etapa de transformación de Kents, y es causada principalmente por soluciones básicas que producen la asociación clorita-epidota-calcita, y que pueden contener asimismo talco, algo de caolinita y piritita. Todos estos minerales secundarios son producto de alteración de minerales máficos y plagioclasas cálcicas debido a la introducción de H_2O , C_2O , H_2S , etc.

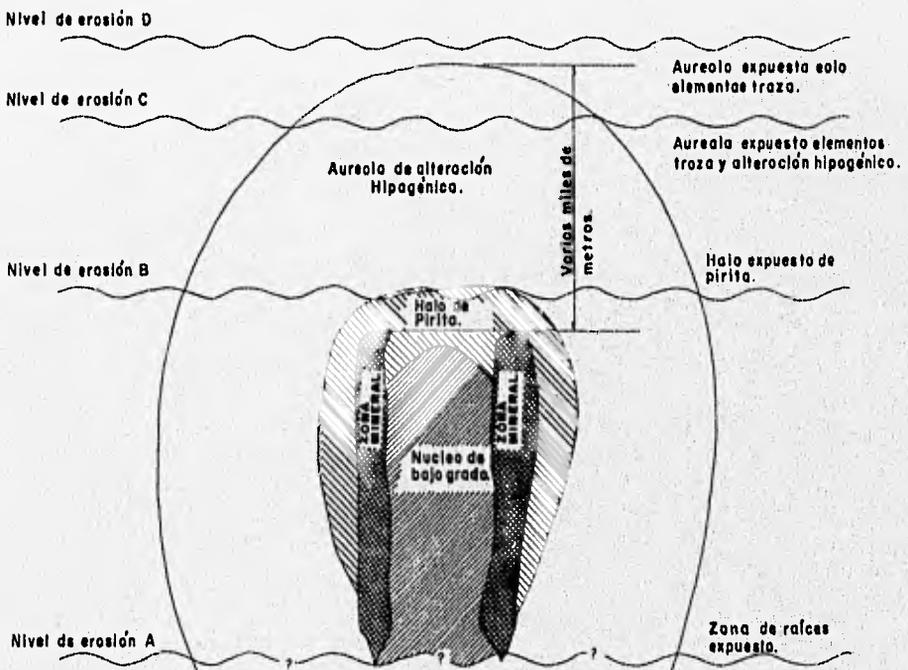


FIG. II.5.1. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE PORFIDO CUPRIFERO, EN ESTE SE MUESTRAN LOS NIVELES DE EROSION HIPOTETICOS.
(MODIFICADO POR LOWELL Y GUILBERT, 1970)

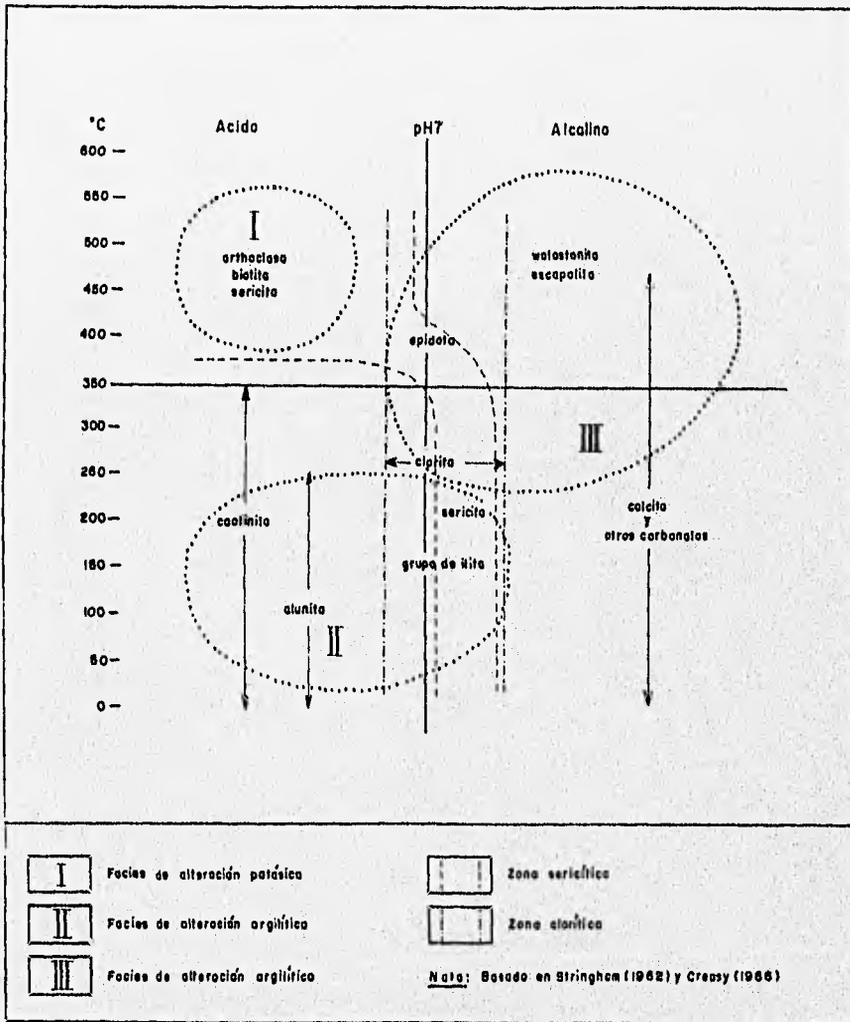


FIG. II.5.2. ESCALA DE ESTABILIDAD DE ALGUNOS MINERALES DE ALTERACION SEGUN LA TEMPERATURA Y LA ACIDEZ.

Alteración argilítica.- está caracterizada por la formación de minerales de arcilla asociada a la lixiviación de calcio. Esto sugiere un tipo de alteración ácida con temperaturas máximas de 400°-500°C (máxima temperatura a la que es estable la caolinita). La asociación mineralógica típica es caolinita-montmorillonita-illita, con algo de sericita y pirita. Los minerales preexistentes en la roca, afectados, han sido las plagioclasas. Esta facies corresponde con la etapa de reorganización de Kents.

Alteración potásica.- es la más fuerte y está representada por la paragénesis sericita-biotita-feldespato potásico, debido a la introducción de potasio, a temperaturas superiores a los 480°C.

Una asociación especial es la paragénesis de cuarzo-sericita, no incluida en los dos tipos descritos anteriormente. Representa el resultado de la introducción de potasio, la destrucción de la plagioclasa y la precipitación de la sílice que no entró en los nuevos minerales formados.

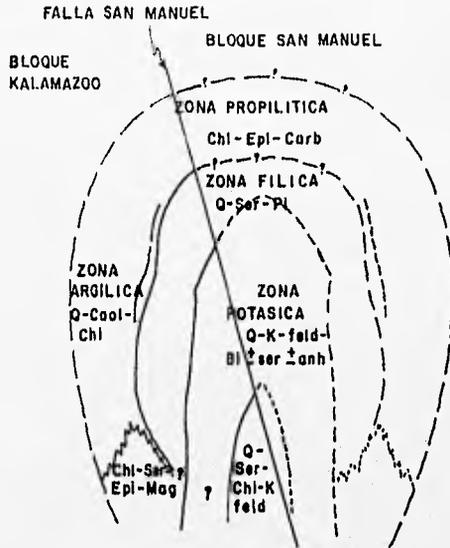
De los tipos de alteración precedentes descritos, solamente la argilítica, la potásica y la cuarzo-sericítica están relacionadas con la mineralización económica. Sin embargo, en muchos casos, parece que una mineralización hipogénica de cobre tiende a poseer mayor ley en aquellas partes del depósito afectadas por alteración potásica (fig. II.5.3).

Alteración argilítica.- está caracterizada por la formación de minerales de arcilla asociada a la lixiviación de calcio. Esto sugiere un tipo de alteración ácida con temperaturas máximas de 400°-500°C (máxima temperatura a la que es estable la caolinita). La asociación mineralógica típica es caolinita-montmorillonita-illita, con algo de sericita y pirlita. Los minerales preexistentes en la roca, afectados, han sido las plagioclasas. Esta facies corresponde con la etapa de reorganización de Kents.

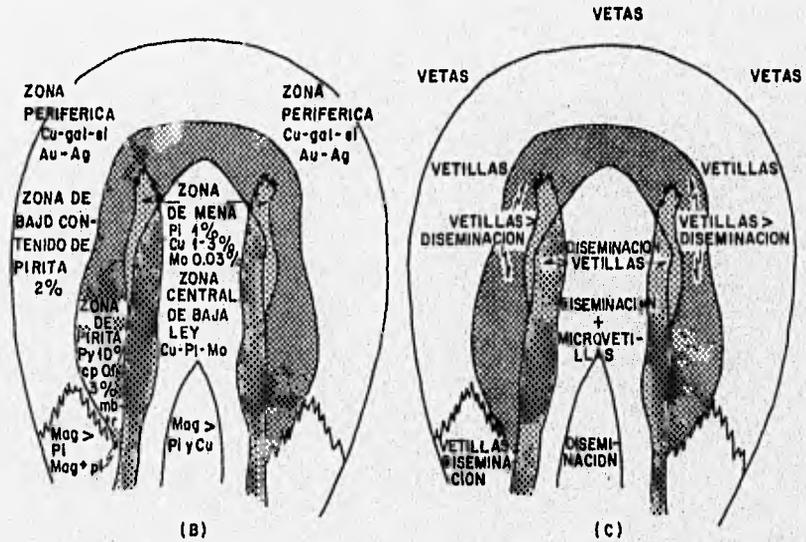
Alteración potásica.- es la más fuerte y está representada por la paragénesis sericita-biotita-feldespato potásico, debido a la introducción de potasio, a temperaturas superiores a los 480°C.

Una asociación especial es la paragénesis de cuarzo-sericita, no incluida en los dos tipos descritos anteriormente. Representa el resultado de la introducción de potasio, la destrucción de la plagioclasa y la precipitación de la sílice que no entró en los nuevos minerales formados.

De los tipos de alteración precedentes descritos, solamente la argilítica, la potásica y la cuarzo-sericítica están relacionadas con la mineralización económica. Sin embargo, en muchos casos, parece que una mineralización hipogénica de cobre tiende a poseer mayor ley en aquellas partes del depósito afectadas por alteración potásica (fig. II.5.3).



(A)



(B)

(C)

- (A) ESQUEMA DE ZONAS DE ALTERACION
- (B) ESQUEMA DE ZONAS DE MINERALIZACION
- (C) ESQUEMA DE DISTRIBUCION DE SULFUROS

(TOMADO DE LOWELL Y GUILBERT, 1970)

FIG. II.5.3. ZONAS CONCENTRICAS DE ALTERACION Y MINERALIZACION EN SAN MANUEL KALAMAZDO.

2.6 ESTRUCTURAS

Probablemente el aspecto más específico es el estructural-morfológico y se refiere a que todos los yacimientos corresponden a macizos mineralizados o stockworks, o sea, cuerpos de gran extensión en tres dimensiones, variables entre centenares de metros y varios kilómetros y en que la mineralización se distribuye en vetillas, en muchos casos reticuladas, y también como disseminación en la roca huésped.

La forma y dimensiones de los cuerpos intrusivos en los que se localizan los pórfidos cupríferos son muy variables. Dependen de factores, tales como combinaciones de efectos de orden interno, del tipo de la intrusión en sí y de orden externo, influidos por las propiedades físicas y químicas de la roca encajonante. Sin embargo, las estructuras pre-intrusión son las que controlan el emplazamiento de las rocas intrusivas, siendo comunes los alargamientos siguiendo la orientación principal de estas estructuras. Una de las principales características de los pórfidos cupríferos es el fracturamiento del intrusivo, donde existe intensa alteración hidrotermal comunmente acompañada de mineralización. Por tanto, es de importancia entender su estructura, ya que la mayor parte del cobre hipogénico ocurre en fracturas como mineral de relleno. Así mismo, es necesario conocer la estructura de las masas porfídicas, diques, pegmatitas, aplitas, brechas y vetillas en general, para buscar su relación estructural con las fracturas o vetillas con

mineralización económica. Son típicas las estructuras brechadas mineralizadas que a veces gradúan a zonas de "stockwork".

Es importante conocer con más detalle las estructuras de los pórfidos cupríferos, ya que al entender sus relaciones entre si, así como con otras, le permitirá al geólogo abrir más perspectivas al orientar la exploración en forma local o regional.

Brechas hidrotermales.- en estudios realizados en diferentes yacimientos de pórfidos cupríferos, se ha observado que existen dos tipos de brechas hidrotermales asociados a ellos: a) brechas hidrotermales de colapso y b) brechas hidrotermales de intrusión. Estos tipos de brechas son importantes porque son en muchos casos excelentes receptáculos para la mineralización.

a).- Brechas hidrotermales de colapso.- Este tipo de brechas se puede definir en términos generales como una columna de roca brechada con un desarrollo vertical mucho más grande que sus dimensiones horizontales. Sus características más sobresalientes son las siguientes:

- 1.- Se originan por gravedad y presentan una sección elíptica o circular.
- 2.- Sus contactos con la roca encajonante están bien marcados con presencia de fracturas verticales.
- 3.- Pueden o no alcanzar la superficie.
- 4.- Se encuentran en grupos y ocasionalmente presentan un alineamiento bien definido.

- 5.- Su tamaño es variable y pueden alcanzar gran profundidad (del orden de cientos de metros y a veces más de un kilómetro).
- 6.- Los fragmentos de roca que la constituyen presentan la misma composición que la roca encajonante, o localmente presentan fragmentos de rocas de niveles superiores.
- 7.- Los fragmentos de roca son generalmente angulosos, tabulares y en ocasiones se presentan bloques exfoliados dando formas redondeadas. El tamaño de los fragmentos es variable (de unos cuantos centímetros hasta varios metros), dependiendo de la composición de la roca encajonante y de la actividad subsecuente del cuerpo. Se considera que los fragmentos tabulares son originados por "descascaramiento" de las paredes de las chimeneas y por exfoliación de los bloques redondos.
- 8.- Generalmente el brechamiento va graduando hasta constituir un stockwork.
- 9.- Contiene gran cantidad de espacios vacíos como evidencia de la remoción de grandes volúmenes de la roca original.
- 10.- Fluidos hidrotermales inyectados posteriormente dentro de la brecha, pueden formar canales para una segunda época de mineralización.

11.- Cuando están mineralizadas, el mineral de mena puede cubrir toda la brecha o formar solo una pequeña parte de la estructura.

12.- Generalmente la matriz no contiene polvo de roca.

El significado de las brechas hidrotermales de colapso mineralizadas, es que presentan un tipo estructural con una variedad de cambios que incluyen subsidencias, chimeneas fracturadas y zonas de stockwork. Estas estructuras, aunque separadas están íntimamente relacionadas y pueden proporcionar una respuesta para tratar de explicar el origen de muchos depósitos minerales.

Existen varias teorías que tratan de explicar el origen de este tipo de brechas, entre las más aceptadas se pueden mencionar las siguientes:

Teoría de Lucke (1926).

Esta teoría explica que la brecha se origina debido a una subsidencia causada por la remoción de roca en la base de la chimenea. La remoción es causada por la acción corrosiva de soluciones tempranas, que dan paso después a un depósito mineral y reemplazamiento dentro de la columna de fragmentos de roca. Esta teoría goza de bastante aceptación, sin embargo, requiere una combinación de rocas relativamente solubles que faciliten la corrosión, soluciones reactivadas y un sistema de circulación abierto.

Teoría de Perry (1961).

Esta supone la presencia de un cuerpo intrusivo donde hay una serie de pulsaciones que van dejando huecos en su techo, estos huecos van favoreciendo el colapso por hundimiento de la roca encajonante.

Teoría de Norton (1973).

Norton supone que se tiene una intrusión con una concentración tan alta de volátiles en la parte superior que al acumularse origina una burbuja, la cual va aumentando de tamaño gradualmente hasta que la presión del vapor obliga a la ruptura, y el espacio desocupado es rellenado por fragmentos de la roca encajonante.

b.- Brechas hidrotermales de intrusión.- Estas estructuras están ampliamente desarrolladas en muchos distritos mineros importantes y siempre están asociadas a depósitos de tipo "pórfido cuprífero", siendo parte integral de ellos. Sus características más importantes son las siguientes:

- 1.- Se presentan como cuerpos irregulares, mantos, diques, y raras veces chimeneas.
- 2.- La forma de los fragmentos varia de subangulosa a redondeada, el tamaño de estos fragmentos varia de guijas hasta grandes cantos y consiste generalmente de varios tipos de roca. Estas características

resultan porque los fragmentos han sido transportados.

3.- La matriz de estas brechas generalmente consiste de polvo de fragmentos pequeños de la misma roca.

4.- Es común la presencia de huecos o cavidades dentro de la brecha.

5.- En ocasiones varían gradacionalmente a un fracturamiento en stockwork.

6.- Por lo general los fragmentos de la brecha han sido girados, pero los desplazamientos son pequeños.

7.- La matriz de estas brechas puede o no estar mineralizada según sea que estas estructuras se hayan formado antes o después de este evento.

En Sonora existen varios depósitos con brechas mineralizadas de este tipo (Cananea, La Caridad, Cuatro Hermanos y Transval).

8.- En la mayoría de los casos se presentan a partir de la zona de alteración sericitica por razones de presión de fluidos.

Las cavidades de las brechas de intrusión representan los huecos donde los fragmentos fueron desplazados uno con respecto a los otros a lo largo de las zonas de debilidad.

La predominancia de las brechas de intrusión en la zona sericitica es atribuida a la producción de fluidos de alta presión en la zona de mezcla de soluciones hidrotermales

magmáticas y meteóricas, un proceso muy importante en la producción de alteración sericitica (Sillitoe, 1975).

Por lo que respecta al origen de este tipo de brechas existen diversas teorías, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

Por fracturamiento hidráulico

Esta teoría explica que el tipo básico de brechas características de procesos hidrotermales es la brecha de ruptura, formada por el fracturamiento hidráulico causado por pulsaciones magmáticas que proporcionan la presión necesaria para introducir soluciones hidrotermales dentro de las rocas sobreyacentes a lo largo de fracturas incipientes. Las pulsaciones magmáticas pueden levantar las rocas o causar subsidencias, de acuerdo a la dirección, frecuencia y magnitud de tales movimientos oscilatorios (Kents, 1964).

Por brechación química

Esta teoría trata de explicar porqué el origen de ciertas brechas está relacionado con depósitos de mena. Se considera que el brechamiento es el resultado de fuerzas generadas durante el asentamiento de bloques que son acompañados de soluciones debilitantes de las unidades subyacentes a estos bloques, debido al fracturamiento expansivo a lo largo de fracturas incipientes. No se ha probado que tal proceso esté relacionado solamente a un colapso debido a la textura extremadamente granular fina de algunas brechas. La presencia de materiales silíceos o

carbonatados en los espacios entre los fragmentos de la brecha, así como el movimiento de estos fragmentos son factores comunes en este tipo de brechas (Sawkings, 1969).

2.7 RECAPITULACIONES DE LA HISTORIA GEOLOGICA

En la tabla II.7.1 se presenta una compilación de la edad de los pórfidos cupríferos, los intervalos de las edades de los depósitos de pórfidos cupríferos va de menos de 5 m.a. a más de 200 m.a., es decir, a lo largo del Cenozoico y Mesozoico y del Plioceno al Triásico.

Los pórfidos cupríferos más antiguos son de edad Triásico y Jurásico como los de la Columbia Británica, formados durante la convergencia de placas, cuando la placa de Norteamérica se desplazó hacia el oeste sobre la placa Pacífica. El desarrollo de estructuras de tensión en la corteza continental y la elevación de la placa Pacífica del este sobre la Americana produjo posteriormente una nueva actividad magmática la cual elevó los depósitos Cretácicos y Terciarios. Estos depósitos, cuando son desarrollados en la parte gruesa de la corteza continental, están generalmente asociados con cuarzomonzonitas, mientras aquellos formados en las partes delgadas de la corteza, están generalmente asociados con cuarzo dioritas. Este es el caso de los depósitos antiguos desarrollados en arcos de islas, tales como Highland Valley, Cooper Mountain, Bougainville y los depósitos de las Filipinas.

La mayoría de los depósitos de pórfidos cupríferos conocidos son de edad Paleoceno según Lowell (1973). En tiempos del Cretácico Tardío la pulsación principal de la Orogenia Laramide dio inicio a la actividad intrusiva y al comienzo de la mineralización, la cual, continuó alrededor de 30 m.a. plegándose por un segundo pulso más débil a mediados del Terciario. El mismo autor observa un decrecimiento progresivo en la edad de los cuerpos de pórfidos desde el noroeste al suroeste de los depósitos Laramídicos en Arizona. Esto indica en términos generales que el lugar geométrico de la mineralización de los pórfidos se trasladó primero desde la parte sur de la Columbia Británica a Sonora y después se trasladó hacia el este para depositarse a mediados del Terciario.

Field y colaboradores reportan que los pórfidos del noroeste del pacífico se desarrollaron en una región muy compleja. Múltiples episodios orogénicos son registrados en varias deformaciones litológicas, las cuales en algunas regiones son acompañadas de metamorfismo regional. Los depósitos de tipo pórfido se encuentran generalmente localizados al oeste de la faja montañosa Rocky, y el rango de las unidades de roca va desde el Precámbrico hasta el Cenozoico. Los volcanes jóvenes se extienden desde el norte de California a lo largo del sur de Alaska y son de edad Plioceno o más jóvenes. El autor hace una subdivisión en la edad de la mineralización tipo pórfido en seis intervalos de tiempo, iniciando desde 210 m.a. y finalizando en 15 m.a. Ellos concluyen que por lo menos se sucedieron dos episodios distintos de plutonismo y mineralización: uno entre los

210 y 90 m.a. el cual resultó en la depositación de cuerpos importantes de cobre-molibdeno como Bethlehem, Lornex y Ingerbelle-Cooper Mountain; el otro evento más joven se desarrolló entre los 45 y 70 m.a. y fue confinado a la costa oeste, fueron numerosos los cuerpos de stockwork de molibdenita, tales como B. C. Molybdenum, Bell Cooper y Granisle (Tabla II.7.2) .

Hollister en un artículo, hace hincapié que los depósitos de pórfidos cupríferos desarrollados en la orogenia Andina, pueden haber sido formados en el Pérmico, el desarrollo de los depósitos comerciales no son más antiguos que el Cenozoico. Las generalizaciones son sin embargo difíciles, porque los depósitos Andinos no están también descritos como sus contrapartes en la orogenia Cordillerana en Norteamérica. Esto se refiere también a muchos pórfidos del Cinturón Alpino. Sar Chesmeh en Irán se estima de una edad que va de 12 a 15 m.a., y el depósito Bougainville en Nueva Guinea sólo tiene 2 m.a. de antigüedad.

Wolfe, interpreta el origen de los depósitos de pórfidos en Filipinas con el concepto de expansión del piso oceánico y placas tectónicas. El considera que los pórfidos fueron formados como resultado de la colisión de placas y subducción de la placa oceánica, produciendo el emplazamiento de una serpentina ultrabásica diapíritica, la formación de magma diorítico a profundidades de 300 a 500 Km, el crecimiento del magma por encima de la corteza a una cámara dentro de la corteza, la erupción de volcanes andesíticos, el emplazamiento de dioritas o la diferenciación de magmas dentro de los productos más ácidos,

NOMBRE DE LOS DEPOSITOS PORFIDICOS O REGIONES	EDAD ² DE LOS DEPOSITOS PORFIDICOS	FUENTE
COLUMBIA BRITANICA		
LA MAYORIA DE LOS DEPOSITOS PORFIDICOS DE COBRE Y MOLIBDENO	TRIASICO SUPERIOR-JURASICO MEDIO JURASICO SUPERIOR CRETACICO TARDIO	WHITE, HAKAL Y CARTER (1966); BROWN (1969)
ISLA DE VANCOUVER	PALEOCENO SUPERIOR-EOCENO SUPERIOR EOCENO INFERIOR-OLIGOCENO INFERIOR	CARSON (1969)
OESTE DE ESTADOS UNIDOS Y SOMORA		
LA MAYORIA DE LOS DEPOSITOS DE COBRE PORFIDICO	CRETACICO SUPERIOR-PALEOCENO	CREASEY Y KISTLER (1962);
BISBEE, ARIZONA	JURASICO MEDIO	MCDOWELL Y KULP (1967);
ELY Y YERINGTON, NEVADA	CRETACICO INFERIOR	MOORBATH, HURLEY Y
BIGMAN, UTAH	OLIGOCENO INFERIOR	FAIRBAIRN (1967). LIVINGSTON, MAUGER Y DAMON (1968)
RANGO FRONTAL DE LOS DEPOSITOS PORFIDICOS DE COBRE-MOLIBDENO	OLIGOCENO SUPERIOR-MIOCENO INFERIOR	MOORE, LANPHERE Y ORRADOVICH (1968); WALLACE et. al. (1968); LAUGHLIN, REHRIG Y MAUGER (1969)
PANAMA		
BOTIJA	OLIGOCENO INFERIOR	PERENCIC (1970)
ECUADOR		
CHAUCHA	MIOCENO SUPERIOR	MULLER-KAHLE Y DAMON, 1970
PERU		
SOUTHERN PERU	PALEOCENO	LAUGHLIN, DAMON Y WATSON (1968); STEWART Y SNEELLING
NICHQUILLAY	? MIOCENO INFERIOR	NACIONES UNIDAS (1970)
ARGENTINA	TERCIARIO (S)	LLAMBINAS (1970)
FARELLON NEGRO, CATAMARCA	MIOCENO SUPERIOR-PLIOCENO (S)	
CHILE		
	CRETACICO SUPERIOR	SILLITOE, QUIRT, CLARK,
	PALEOCENO	FARRAR Y NEUMANN (en prep)
	EOCENO SUPERIOR-OLIGOCENO	
ISLA BOUGAINVILLE		
PANGUNA	? PLIOCENO (S)	WACHAMARA (1968)
TAIWAN		
CHEMEI	MIOCENO TARDIO	PO Y LEE (1970)
FILIPINAS	TERCIARIO (S)	BRYMER (1969)
ATLAS	PALEOCENO SUPERIOR	
OESTE DE PAKISTAN		
DISTRITO DE CHAGAI	? POST-OLIGOCENO (S)	SCHMIDT (1968)
IRAN		
REGION NERMAN	OLIGOCENO SUPERIOR-MIOCENO (S)	BAZIN Y HUBNER (1969)
ARMENIA		
	EOCENO SUPERIOR	BAGDASARYAN, GUKASYAN Y
	OLIGOCENO INFERIOR	KRANIAM (1969)
	MIOCENO INFERIOR	

² ESCALA DE TIEMPO SEGUN HARLAND, SMITH Y WILCOCK (1964).
(S) EDAD ESTIMADA.

TABLA II.7.2 EDADES DE LOS YACIMIENTOS DE PORFIDOS DE COBRE MOLIBDENO

múltiples intrusiones de rocas hipabisales y la alteración hidrotermal de fluidos que acarrean metales y otros iones. El también creyó que los pórfidos filipinos tenían algunas similitudes con los pórfidos de Arizona aunque algunos acusan diferencias entre ellos, la mayoría de los pórfidos filipinos son recientes (cerca de 15 m.a.).

2.8 TEORIAS GENETICAS

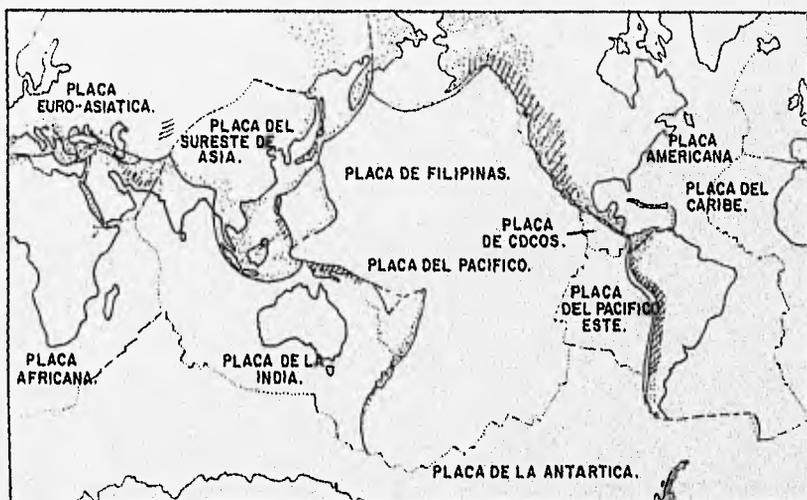
En este apartado se tratará en forma general la génesis de los depósitos de cobre y en particular de los pórfidos cupríferos. Esto es debido a la aparición de nuevas teorías, las cuales hablan sobre posibles zonas de concentración de pórfidos cupríferos en el mundo.

De acuerdo con Cox y sus colaboradores (U.S. Geological Survey, Professional Paper 820), el cobre es introducido en las partes accesibles de la corteza terrestre desde profundas fuentes desconocidas por intrusiones ígneas y fluidos descendentes. La concentración económica de este metal puede resultar directamente de estos procesos y por efectos secundarios tales como intemperismo, erosión y sedimentación. En un pórfido cuprífero las vetas más ricas y los depósitos por reemplazamiento, están genéticamente asociados con intrusiones de rocas ígneas félsicas.

Así es como Cox y colaboradores describe este proceso:

"Una parte del cobre es atrapado en granos diseminados por la rápida cristalización del magma, lo cual da una característica de crecimiento a la textura porfídica de intrusión. Otra parte del cobre es movilizado por el agua y otros volátiles que escapan de zonas calientes hacia las masas de roca congeladas y se depositan en las fracturas y en las paredes del intrusivo. Una tercera parte puede escapar completamente de la intrusión o de la veta y reemplazarse en depósitos en la cercanía de la roca huésped. Estos depósitos de cobre porfídico comúnmente ocupan la parte central de grandes y pequeños distritos conteniendo vetas y depósitos de reemplazamiento de cobre, plomo, zinc, plata, oro, hierro y manganeso.

La teoría de la tectónica de placas ha introducido nuevos conceptos relativos a la metalogénesis de los yacimientos de cobre diseminado. Varios autores (Wise, 1963; Heirtzler, 1968; Maxwell, Plafker, 1970; Mitchell y Garson, Sillitoe, 1972), han estudiado la asociación petrogenética, geográfico-tectónica y temporal de los cinturones cupríferos (figura II.8.1), de donde concluyen que su origen puede explicarse satisfactoriamente con apoyo en los conceptos de la tectónica global. Los procesos claves en la teoría de la tectónica de placas son: la acreción y la separación del piso oceánico en las dorsales, las fallas transformantes y el empuje hacia abajo de la placa oceánica en las márgenes continentales y arcos insulares.



- | | |
|--|---|
| --- MARGENES DE PLACAS DIVERGENTES. | - - - FALLAS DE TRANSFORMACION ACTIVAS. |
| — MARGENES DE PLACAS CONVERGENTES. | - - - MARGENES DE PLACAS DE NATURALEZA INDETERMINADA. |
| ▨ CINTURONES MONTAÑOSOS MEZOZOICOS-CENOZOICOS. | ▨ REGIONES CON DEPOSITOS PORFIDICOS DE Cu y Mo. |

(LIMITES DE PLACAS TOMADOS DE DEWAY Y BIRD, 1970)

FIG. II. B.1. CINTURONES DE PORFIDOS CUPRIFEROS EN RELACION A CINTURONES OROGENICOS Y LIMITE DE PLACAS.
(SILLITOE, ECON. GEOL. V. 67, 1972)

Para la formación de un depósito de cobre, el fenómeno crítico es la subducción de la placa o corteza oceánica debajo de los continentes. En la parte superior de esta placa en hundimiento se generan, por fusión parcial, los magmas calcoalcalinos que forman las andesitas de arco insular, las continentales y las intrusiones plutónicas congénitas. Se considera que la fusión parcial comienza a operar a partir de los 100 km de profundidad dentro de la corteza, porque la placa fría produce una variación en las isotermas del interior de la tierra (fig.II.8.2). Sillitoe (1972), propone que los metales que van a llegar a los depósitos porfídicos fueron derivados desde el manto e incorporados a la corteza oceánica en la unión de placas divergentes, y sugiere que la distribución espacial y temporal de los depósitos porfídicos depende de los siguientes factores: el nivel de erosión de una cadena volcánico-intrusiva, el tiempo, la localización de la generación del magma y la disponibilidad de metales sobre una subducción subyacente.

El factor de erosión se propone con el fin de explicar la escasez de depósitos porfídicos en cinturones orogénicos premesozoicos y la relativa abundancia de depósitos porfídicos expuestos de edad Cretácico Superior-Paleoceno en orogénias postpaleozoicas. Provincias con alta concentración de depósitos se interpretan como regiones debajo de las cuales la corteza oceánica anómalamente rica en cobre fue consumida en las zonas de subducción o de Benioff (Sillitoe, 1972). Los depósitos porfídicos se formaron durante una serie de pulsaciones imperceptibles, relativamente cortas. Al parecer el emplazamiento



DISTRIBUCION DE LAS MAYORES PROVINCIAS DE PORFIDOS CUPRIFEROS
(S.R. TITLEY Y R.E. BEANE 1972).

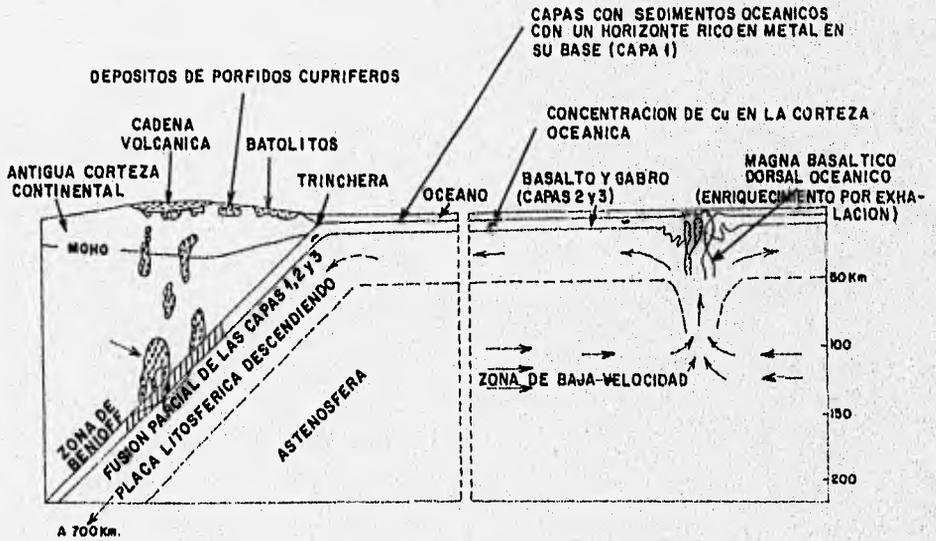


FIG. II. B. 2. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA GENESIS DE LOS DEPOSITOS DE PORFIDOS CUPRIFEROS EN EL CONTEXTO DE PLACAS TECTONICAS.
(SILLITOE, ECON. GEOL., P. 188, 1972)

de cobres porfídicos en cinturones lineales, es independiente del control por lineamientos tectónicos y los depósitos porfídicos pueden ser formados sobre zonas de subducción activas en períodos de convergencia de placas litosféricas.

La carencia de sedimentos a lo largo de la costa del Pacífico con respecto a la del Atlántico, sugiere un consumo de corteza oceánica en las zonas de subducción. El consumo y fusión parcial de la corteza oceánica conteniendo horizontes metalíferos en las capas exteriores de sedimentos sobreyacentes, explican la procedencia y asociación de plutones calcoalcalinos y depósitos minerales relacionados. Según Demant (1975), por debajo de la secuencia de rocas ácidas que cubren la parte superior de la Sierra Madre Occidental, se observan rocas andesíticas de edad Oligoceno, las cuales están afectadas por numerosas intrusiones granodioríticas y gabrómicas (50 a 60 millones de años). Explica la génesis del magma suponiendo que durante el Oligoceno-Mioceno existía en la margen del Pacífico de México una zona de subducción ligada a una placa que desapareció debajo del continente americano (placa Farallón). La compresión que existe en estas zonas se manifiesta de hecho al nivel del Plano de Benioff, pero en superficie se llevan a cabo fenómenos de distensión que favorecen la creación de un graben y la subida del material magmático.

Como se puede observar, la tectónica de placas explica razonablemente la coincidencia espacial y temporal del magmatismo calcoalcalino con los cinturones orogénicos; sin embargo, las contribuciones relativas de manto contra corteza oceánica, magmas desarrollados por fusión parcial a lo largo de las zonas de subducción, y de posible contaminación tardía por corteza continental durante el ascenso de los magmas es incierta (fig.II.8.3).

Aun cuando esta teoría tiene bastante aceptación, existen algunos investigadores que expresan ciertas dudas. Lowell (1974), argumenta que la asociación espacial de cinturones porfídicos con las trincheras oceánicas y posibles zonas de subducción no son satisfactoriamente aplicables a la provincia cuprífera del SW de los Estados Unidos de Norteamérica, por su distancia desde la margen continental y la evidencia fija inconclusa de una trinchera oceánica conocida al tiempo de la mineralización porfídica. Otros problemas son la gran persistencia de los depósitos a través de fisuras maestras, las cuales actuaron como controles de la mineralización de varios puntos bastante separados en tiempo, y también lo no lineal sino lo elíptico de la provincia. Así mismo, le parecen demasiado complejos los procesos implicados en el origen de los pórfidos cupríferos por tectónica de placas, como son los siguientes:

- 1º. Los fluidos ricos en metal, fueron derivados de centros de propagación en el medio oceánico.

ARCO DE ISLA Filipinas Salomón, Nueva Britania	MARGEN CONTINENTAL Columbia Británica Australia	AREAS CONTINENTALES COMPLEJAS SW de Estados Unidos
ROCA ENCAJONANTE Andesitas y sedimentarias	Cuenca marginal y eugeosinclinal	Sedimentarias y (localmente) volcanoclásticas
EDAD Terciario Superior	Ordovícico-Triásico	Pre-cámbrico-Cretácico
INTRUSIONES Diorita y cuarzo diorita	Cuarzodiorita-cuarzomonzonita	Cuarzomonzonita
EDAD Mioceno-Pleistoceno	Silúrico-Cretácico	Terciario medio
TAMAÑO Grandes stocks (4-5-km. largo) Intrusivos menores Diques de andecitas-dacitas	Largos stocks y batolitos Pórfido de granodiorita y diques porfídicos de dacita / cuarzo-feldespática	Pequeños stocks (1-2 km. largo) Diques y tapones de pórfido de cuarzo
ALTERACION Potásica-propilitica-filica Clorítica sobrepuesta a los depósitos.	Potásica-propilitica-filica	Potásica-filica-propilitica

Fuente: G. Ballantyne.

FIG. II.8.3 CARACTERISTICAS DE LOS DEPOSITOS DE COBRE DISEMINADO EN VARIOS AMBIENTES
(TOMADO DE JENSEN & BATEMAN, 1979, p.321).

- 2º. El metal fue concentrado en cierto modo en la corteza oceánica.
- 3º. Fue subducida bajo la placa continental y fundida.
- 4º. El metal fue concentrado por diferenciación en el plutón, formado y depositado arriba como un depósito porfídico.

Por estas razones Lowell (1974), considera más simple y más lógico derivar el metal desde un origen en la base de la corteza, o sobre el manto a partir de un plutón migrando hacia arriba, a lo largo de una zona de debilidad de la corteza.

CAPITULO III.

3.- PROSPECCION MINERA

3.1. CRITERIOS FISIOGRAFICOS

3.2. CRITERIOS MINERALOGICOS

3.3. CRITERIOS LITOLOGICOS

3.4. CRITERIOS ESTRUCTURALES

3. PROSPECCION MINERA

La prospección de yacimientos minerales es la técnica que consiste en la búsqueda sistemática de materiales específicos que llevan al descubrimiento de un depósito por medio de observaciones y métodos científicos, el prospector trata de localizar nuevos yacimientos minerales e incrementar las reservas de los ya conocidos.

El término prospección abarca el trabajo de campo geológico, geoquímico y geofísico, más los estudios de laboratorio complementarios dirigidos al descubrimiento de concentraciones minerales explotables.

Depende de factores naturales locales, del aspecto del trabajo y del propósito de la prospección, el empleo de diferentes métodos de campo y laboratorio para descubrir indicaciones directas de mineralización.

Una parte muy importante es el estudio de depósitos conocidos para hacer reconstrucciones de estructuras minerales y poder aplicar experiencias y conocimientos en nuevas zonas; también es importante observar marcos geológicos característicos y la búsqueda de criterios para asumir modelos .

Las indicaciones directas de mineralización son seguidas por trabajos exploratorios y posteriormente por la prospección detallada del depósito.

En la búsqueda de depósitos minerales es imposible examinar en detalle cada Km² de área o campo (por ejemplo perforando).

Esto sería demasiado costoso, llevaría mucho tiempo y en la mayoría de los casos sin resultados positivos.

En un área en donde el requerimiento de recursos minerales es importante, se les puede encontrar usando el criterio de prospección minera debido a que las formas geológicas en ese lugar pueden sugerir directa o indirectamente la presencia de depósitos.

Bajo el criterio de prospección minera son resumidas prácticas conclusiones en estratigrafía, petrografía de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias; tectónica, geología estructural, el concepto de facies, geoquímica, geomorfología, hidrogeología, geofísica, historia y geología minera.

El criterio de prospección se relaciona con las guías de mineralización que se subdividen, de acuerdo a las distintas ramas científicas en: fisiográficas, paleogeográficas, mineralógicas, litológicas, estratigráficas, estructurales, geoquímicas y geofísicas.

Los criterios o guías de prospección geológica minera para la búsqueda de pórfidos cupríferos que serán analizados en este capítulo son los siguientes:

- a) Criterios fisiográficos.
- b) Criterios mineralógicos.
- c) Criterios estructurales.
- d) Criterios litológicos.

3.1. CRITERIOS FISIOGRAFICOS

Son los rasgos en el relieve superficial que sirven como ayuda para encontrar un yacimiento mineral como: lomas, escarpes, depresiones, etc.

Los criterios fisiográficos estarán en relación directa con las formas topográficas de la región estudiada. Se debe tener presente que cualquier forma de la superficie de la corteza terrestre puede estar directamente conectada con un cuerpo mineralizado.

Los accidentes topográficos pueden ser no sólo el resultado directo de la presencia de vetas o masas mineralizadas, sino que, de un modo más amplio, pueden reflejar condiciones favorables a la presencia de la mena. Estas condiciones varían de forma muy amplia, dependiendo del tipo de yacimiento y de las rocas asociadas, y se expresan en una variedad de formas las cuales estarán en función del clima y de la historia geomorfológica.

Para la búsqueda de depósitos minerales se usan criterios de prospección basados en factores naturales como son las condiciones estructurales y geológicas que directa o indirectamente sugieren su presencia.

Como evidencia directa en los criterios fisiográficos se tienen afloramientos de depósitos que son topográficamente notables, como vetas resistentes elevadas y largas, de las cuales algunas son lixiviadas apareciendo en el relieve como depresiones.

Como evidencias indirectas se pueden mencionar, escalones tectónicos, lomas, cuestras y depresiones; las cuales pueden reflejar condiciones favorables de zonas mineralizadas aunadas con el tipo de yacimiento, rocas asociadas, clima e historia geomorfológica.

La combinación de rasgos prominentes con depresiones en forma de hondonadas es típica en los yacimientos de pórfidos cupríferos.

En lo que se refiere a las prominencias, se debe tener en cuenta, que con frecuencia las zonas mineralizadas suelen tener abundante cuarzo y por tanto, ser más resistentes al intemperismo que las rocas encajonantes. Tal es el caso de algunos yacimientos en Norteamérica como los de Arizona, Nuevo México y Nevada, así como en México en la Sierra Madre Occidental, en ellos se observa una marcada diferencia en el relieve.

Se puede usar como criterio fisiográfico la coloración característica de los sombreros de hierro con una depresión en el terreno.

Fisiografía de algunos de los principales yacimientos de cobre diseminado.

- 1.- Cananea, Sonora. En conjunto son una serie de montañas desconectadas que vienen a ser parte de la Sierra Madre Occidental, su orientación es norte-sur a noroeste-sureste. Estas cordilleras están separadas por valles aluviales del Terciario y Cuaternario. Se

les denomina Montañas Cananea y sobresalen entre ellas el cerro de la Mariquita y el de la Elenita.

2.- Inguarán, Michoacán. Queda comprendida dentro de la provincia fisiográfica llamada Sierra Madre del Sur. En general las crestas de las sierras componentes de este sistema son uniformes, excepto en algunos casos en que picos o cumbres aisladas se levantan sobre el nivel general de la cresta montañosa.

3.- La Verde, Michoacán. La mina La Verde se encuentra situada en la sierra del Marqués, tiene aproximadamente 6 Km de longitud y entre 700-1200 m de anchura y está formada fundamentalmente por 7 cerros.
Esta sierra está delimitada al oeste por el río del Marqués, al sur se observan sierras más altas que corresponden a una parte de la Sierra Madre del Sur.

3.2. CRITERIOS MINERALOGICOS

Están basados en la asociación de minerales que indican un depósito.

Dentro de las características físicas que presentan los depósitos de cobre porfídico, los criterios mineralógicos son de suma importancia en su prospección, ya que presentan asociaciones

típicas debido a los productos de un enriquecimiento secundario y a la asociación de minerales de alteración que se producen en las rocas preexistentes por las soluciones hidrotermales que acompañan a una etapa mineralizante.

La observación de ciertos minerales en la superficie (sombreros de hierro) puede constituir una evidencia de la presencia de yacimientos minerales en el subsuelo.

En este tipo de criterios es muy importante tomar en cuenta las condiciones climáticas, así como el grado de erosión. Si se consideran condiciones áridas y un drenaje moderado de erosión, el nivel freático desciende y los procesos de solución y depositación de cobre son retenidos hasta una cubierta sub-horizontal de sulfuros de cobre secundarios, que normalmente presentan una gradación ascendente de material primario; por ello se crea una zona de enriquecimiento secundario que depende de varios factores: clima, mineralización, fisiografía, etc.

Con respecto a los diferentes tipos de alteración hidrotermal que ayudan en el criterio mineralógico de prospección para la localización de pórfidos cupríferos y de acuerdo con el modelo generalizado de J.D. Lowell y J.M. Guilbert (1970), se presentan cuatro zonas de alteración: potásica, filica, argílica y propilítica.

La zona de alteración potásica incluye reemplazo por difusión y a través de vetillas de los minerales primarios de la roca, por biotita secundaria, feldespato potásico, cuarzo, sericita y anhidrita; corresponde probablemente a un ambiente de actividad deutérica de las últimas fases de magmatismo. Dados los

tipos predominantes de minerales de alteración el resultado es una roca de apariencia fresca. El feldespato potásico junto con cuarzo se presenta como relleno de microvetillas y también reemplazando a los feldespatos originales. La biotita se presenta en microvetillas acompañadas de calcopirita y anhidrita, reemplazando fenocristales de plagioclasa, como cristales idiomorfos negro-brillantes y reemplazando los feldespatos de la masa fundamental. La anhidrita generalmente rellena vetillas junto con cuarzo y feldespato potásico o acompañando calcopirita y bornita.

Rodeando y en parte traslapando a la zona de alteración potásica se presenta la capa de alteración filica en donde los minerales de alteración incluyen cuarzo, sericita, pirita, y algo de clorita ; esta zona incluye parte del cuerpo mineralizado y especialmente a la mineralización fuerte de pirita. La característica más distintiva es una sericitización de todos los silicatos, de lo que resulta la formación de un mosaico cuarzo-sericita que destruye la textura original de la roca.

En la zona argílica los minerales dominantes son : cuarzo, caolinita, montmorillonita y sericita; la pirita es común pero menos abundante que en la zona filica; el mineral más afectado por la alteración es la plagioclasa que se transforma en caolinita y montmorillonita.

La zona exterior propílitica se caracteriza por el conjunto de minerales de alteración clorita-epidota-calcita, que reemplazan principalmente a anfíbola, biotita y plagioclasa; este tipo de alteración afecta en forma preponderante al mayor volumen

de roca. Otros minerales presentes son magnetita, turmalina, pirita.

Las zonas de mineralización de sulfuros son también concéntricas y coaxiales con las zonas de alteración (ver fig.II.5.3). La pirita es el mineral sulfurado más abundante, seguido en mucho menor proporción por calcopirita, bornita, enargita y molibdenita.

Desde el centro del yacimiento, hacia el exterior, la secuencia típica de mineralización es como sigue: 1). calcopirita, pirita, bornita y molibdenita; 2). pirita, calcopirita, molibdenita, bornita; 3). pirita, calcopirita; 4). blenda, galena, plata, oro.

Como ejemplo de alteración secundaria están los minerales que se encuentran en los sombreros de hierro que son una mezcla de limonitas jarosíticas, goethíticas y hematíticas, se observan también cobre y otros minerales en su forma nativa. Estos minerales son susceptibles de informar sobre la naturaleza de la mineralización de los sulfuros.

La identificación de las asociaciones mineralógicas contenidas en las limonitas, puede dar una idea de la mineralización subyacente. La limonita indígena indica presencia anterior de cobre y la limonita transportada indica una cantidad de cobre inferior al hierro (tabla III.2.1)

Dentro de este criterio son tomadas en cuenta las coloraciones de las rocas, como guías para ciertos minerales y zonas. Por ejemplo, la lixiviación de la cubierta puede mostrar

Proporción ascendente de pirita	Mineral de cobre		
	Calcosita (o covelita)	Bornita (o calcopirita)	Calcopirita (o bornita)
1	a. Limonita en relieve		
2	↑ g r a d a c i ó n ↓	a. Pez de limonita	
3		b. Limonita de retículo fino	
4			c. Limonita de retículo basto
5		b. Tapizados nodulares de huecos	

TABLA III.2.1. TIPOS DE LIMONITAS EN CRIADEROS DE COBRE DE TIPO PORFIDO CUPRIFERO (McKINSTRY, 1977).

un color azul o verde, con parches pardos y manchas de minerales secundarios y óxidos de hierro.

A continuación se dan los ejemplos de mineralización siguientes en pórfidos cupríferos:

- a). Area Cananea, Sonora. La mineralización de pirita y su distribución está regida por el tipo de alteración hidrotermal. En la zona de alteración cuarzo-sericita-alunita-caolín la mineralización de pirita es de una variación del 3 al 10%. En la zona de alteración moderada, caracterizada por clorita-cuarzo-sericita la mineralización de pirita es de menos del 3%.

La limonita presente en esta área es producto de la lixiviación de la calcopirita.

- b). Inguarán, Michoacán. La mineralización en toda su extensión en el distrito es hipogénica. El único sulfuro presente es la calcopirita, la mineralización de sulfuros de cobre se encuentra limitada a las brechas preminerales, donde es encontrado como concentraciones y diseminado en la materia intersticial asociado con una ganga de calcita y epidota y en proporción directa a la mayor o menor cantidad de matriz presente.

c). La Verde, Michoacán. La mineralización en la mina La Verde se encuentra en forma de vetillas o lentes de sulfuros de cobre, principalmente como calcopirita y de fierro como piritita, pirrotita, arsenopirita y en fracturas o minifracturas con una orientación E-W las cuales pueden formar cuerpos alargados en formas lenticulares. Dentro de los sulfuros hipogénicos se observa calcopirita que es un mineral de mena predominante y generalmente se encuentra asociado con bornita y algo de molibdenita. Además dentro de los sulfuros supergénicos se pueden observar calcocita y covelita.

3.3. CRITERIOS LITOLÓGICOS

Estos criterios se refieren a las rocas o conjuntos de rocas (formaciones) que auxilian directa o indirectamente en la búsqueda de yacimientos minerales.

Para considerar un criterio litológico como tal, se tienen que reconocer los lugares dentro de las diferentes rocas con mayor posibilidad de contener la mineralización; esto dependerá de una amplia serie de metalotectones (se entiende por metalotectón cualquier factor que contribuya a la edificación de una mineralización).

Un yacimiento mineral queda enmarcado dentro de un cuadro geológico definido con rocas encajonantes de una composición

definida, esto permite establecer criterios de prospección con el apoyo de estas guías.

Las rocas favorables a la mineralización pueden ser de origen sedimentario, volcánicas con pseudoestratificación o intrusivos de cualquier forma como diques o stocks. Las rocas encajonantes relacionadas con los pórfidos cupríferos no son en su mayoría un factor determinante (excepto las calizas) puesto que pueden ser de cualquier tipo, ya sea ígneas, sedimentarias o metamórficas.

La edad de estas rocas varía desde precámbricas hasta terciarias y aún pleistocenas en el pacífico. Complejos gneísicos, calizas, dolomías, pizarras, cuarcitas, areniscas y rocas ígneas extrusivas han sido intrusionadas.

Sin embargo, se puede decir que los tipos de rocas más comunes asociadas a pórfidos cupríferos son: corrientes andesíticas, rocas piroclásticas, lahares, rocas volcanoclásticas, dacitas y cuarzomonzonitas.

La razón por la que una roca es más receptiva al yacimiento mineral que otra no es siempre evidente. En teoría, se puede esperar que por lo menos dos propiedades de las rocas sean favorables para la mineralización:

- a). Permeabilidad.- La cual permite el paso de soluciones, ésta puede ser una propiedad primaria de la roca como en areniscas, conglomerados o brechas vesiculares de lavas, o puede ser impuesta por fracturación o fisuramiento.

- b). Reactividad química.- Para inducir la precipitación de los minerales del yacimiento como una reacción con soluciones hidrotermales.

Con relación a las rocas encajonantes que predominan en la mineralización se tienen las siguientes:

- a.- Carbonatos (calizas, margas y dolomías), en ocasiones lutitas, areniscas y probablemente rocas calcáreas volcánicas, las cuales son intrusionadas por cuerpos de composición cuarzomonzonítica, granodiorítica o sienítica; produce así en el área de contacto un metamorfismo que transforma la roca encajonante en roca silicatada (tactitas y skarns).

La presencia de rocas carbonatadas (encajonantes) alrededor de los emplazamientos graníticos son favorables para la generación de yacimientos de cobre y molibdeno.

- b.- Rocas volcánicas de composición intermedia y ácida, así como pórfidos cuarzomonzoníticos y monzoníticos, algunos yacimientos (Morenci) presentan modelos en cuyo caso se apega más al modelo de la granodiorita.

La mayor parte de los yacimientos de pórfidos cupríferos localizados están relacionados con rocas ígneas, entre las que se tienen las siguientes:

- 1.- Rocas silíceas: granito-riolita
- 2.- Rocas máficas: diorita-andesita.

3.- Rocas intermedias: cuarzomonzonita-cuarzolatita,
granodiorita-riodacita,
cuarzodiorita-dacita,
monzonita-latita.

En el distrito minero de Cananea, Son. tanto las rocas sedimentarias como las volcánicas han sido intrusionadas por rocas plutónicas e hipabisales que van desde una composición granítica hasta diabásica.

Por la litología de las unidades rocosas, y por la posición del cuerpo mineralizado con respecto a las mismas, el área de Cananea coincide, en muchos aspectos con el yacimiento de San Manuel en Pinal County Arizona, E.U.A. Las rocas en ese distrito minero son: cuarzomonzonita, pórfido monzonítico, diabasa y pórfido andesítico; la Formación Clodburst que consiste de flujos basálticos, flujos brechoides y conglomerados; una riolita y el conglomerado Gila.

A continuación se darán algunas descripciones petrográficas de las rocas preponderantes en el área de Cananea.

Andesitas.- Estas rocas, están totalmente alteradas y consisten de hematita con texturas de reliquia.

Dacitas y Latitas.- Estas rocas están compuestas de feldespatos, hornblenda y fenocristales ocasionales de cuarzo, en una matriz granular densa de cuarzo y ortoclasa.

Riolitas.- Estas rocas consisten de fenocristales de cuarzo en una matriz de microclina (sanidino) y cuarzo.

Areniscas y grauvacas.- Están compuestas de granos de cuarzo, feldespatos, y rocas volcánicas embebidas en una matriz arcillosa de tamaño fino.

Unidad Diabasa Mariquita.- Está constituida de labradorita, hornblenda y magnetita.

Granodioroita Cuitaca.- Está compuesta de plagioclasa, cuarzo, ortoclasa y pequeñas cantidades de ferromagnesianos (hornblenda).

Unidad Cuarzomonzonita.- Consiste de plagioclasas, ortoclasa, cuarzo, hornblenda, biotita, titanita, apatita y minerales opacos.

3.4. CRITERIOS ESTRUCTURALES

Son los rasgos estructurales tales como plegamientos, fracturamientos, fallamiento que pueden ayudar a localizar una mineralización.

La estructura de la corteza terrestre es frecuentemente un factor de control en la formación de depósitos minerales.

Numerosos tipos de yacimientos metálicos y no metálicos que son de origen endogenético por ejemplo, son confinados a áreas plegadas o más precisamente a los cuerpos magmáticos introducidos dentro de ellas. En contraste, los yacimientos de carbón, aceite, carbonatos, manganeso, bauxita y fosfatos se localizan en áreas de transición caracterizadas por plegamientos leves.

El origen de las zonas metalogénicas se puede explicar en parte con el criterio de los nuevos conceptos de la tectónica de placas; las áreas mineralizadas se presentan a lo largo de las márgenes de las placas que pueden ser por acreción, transformación y subducción, por lo cual el estudio de la tectónica global es de suma importancia para determinar el criterio estructural principal que afecta la prospección.

Las zonas metalogénicas son fajas de mineralizaciones que gradualmente pasan hacia las rocas encajonantes.

Las estructuras que generalmente se presentan en los pórfidos cupríferos son chimeneas brechadas y stockworks o macizos mineralizados dentro de los intrusivos.

Los macizos mineralizados o stockworks son cuerpos de gran extensión en tres dimensiones variables entre centenares de metros y varios kilómetros, generalmente la mineralización se distribuye en vetillas en muchos casos reticuladas y también como disseminación en la roca huésped. Las formas de estos macizos mineralizados son muy variadas. Los procesos de lixiviación y enriquecimiento secundario modifican, en algunos casos, la forma del yacimiento primario al superponérsele un cuerpo enriquecido aproximadamente subhorizontal, que puede alcanzar mayores dimensiones laterales que el cuerpo primario original.

Los elementos estructurales considerados como guías o criterios en el distrito minero de Cananea en Sonora, están representados por una serie de pequeños cuerpos intrusivos a manera de "stocks" con textura esencialmente porfídica y composición ácida a intermedia, rodeados por lo general de zonas

brechadas. La mineralización extensa e intensa alteración que se encuentra en este distrito, está muy relacionada con estos elementos estructurales.

Las brechas mineralizadas, que con suma frecuencia se localizan en el área y que generalmente están asociadas con los pórfidos, constituyen buenas guías para la prospección de estos tipos de depósitos.

En el distrito de Cananea se distinguen tres tipos de brechas:

Las brechas tipo Capote que son chimeneas con formas burdamente tabulares, verticales y/o de sección circular.

Las brechas tipo Cananea-Duluth tienen una forma ovalada vertical.

La brecha tipo Colorada, está íntimamente relacionada a un apófisis de "pórfido de cuarzo" el cual se abre a profundidad.

C A P I T U L O I V .

4.- METODOS GEOFISICOS Y GEOQUIMICOS.

4.1 METODOS GEOFISICOS.

4.1.1 INTRODUCCION

4.1.2 METODO GRAVIMETRICO

4.1.3 METODO DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA

4.1.4 METODO SISMICO

4.1.5 METODOS ELECTRICOS

4.1.5.1 RESISTIVIDAD

4.1.5.2 POLARIZACION INDUCIDA

4.1.6 OTROS METODOS

4.2 METODOS GEOQUIMICOS

4.2.1 INTRODUCCION

4.2.2 MUESTREO DE ROCAS

4.2.3 MUESTRAS DE SUELOS

4.2.4 MUESTRAS DE SEDIMENTOS DE ARROYO

4.2.5 CONCENTRADOS DE BATEA

4.2.6 MUESTREO DE VEGETACION

4.2.7 MUESTRAS DE AGUAS DE POZOS

4.2.8 MUESTRAS DE GASES EN SUELOS

4.1. METODOS GEOFISICOS

4.1.1 INTRODUCCION

A pesar de que, por su naturaleza, los depósitos de pórfidos de cobre tienen una amplia variación, todos ellos comparten ciertas características que se basan principalmente en la similitud de sus rasgos geológicos.

Por definición, un depósito de pórfido cuprífero tiene grandes dimensiones, su contenido metálico es bajo y está usualmente distribuido en forma más o menos regular en todo el depósito. Además, aún cuando no se indica en la definición, generalmente está asociado a rocas de tipo ácido a intermedio; hay una fuerte alteración y lixiviación con la consecuencia de que una parte somera del cuerpo, se encuentra despojada de los minerales metálicos y los óxidos superyacen a los sulfuros metálicos secundarios y, a su vez, están sobrepuestos al cuerpo primario.

De esta manera, las propiedades relacionadas con la exploración geofísica aplicada a pórfidos de cobre corresponden al material intrusivo mismo, a la zona de lixiviación y al horizonte de enriquecimiento. Debido a que muchos métodos geofísicos dependen para su éxito de parámetros físicos contrastantes, es justamente el contraste entre estas unidades y sus vecinas lo que debe ser considerado, la litología de las rocas huéspedes es importante en esta relación.

Las técnicas geofísicas de prospección son aplicables a la búsqueda de pórfidos de cobre en tres distintas etapas: regional

(tipo general en regiones apropiadas para determinar su distribución), la de semidetalle (áreas concretas de pequeñas dimensiones), y la etapa de detalle (definición del cuerpo mineral).

Los métodos geofísicos se pueden considerar como indirectos ya que facilitan datos a partir de los cuales se puede inferir el objetivo.

La tabla IV.1.1.1. muestra la escala de valores para los seis parámetros físicos más importantes utilizados en la prospección geofísica, con base en una selección de tipos de roca asociados a los depósitos de cobre, estos valores se basan principalmente en publicaciones de datos de laboratorio.

A continuación se hace una breve exposición de cada uno de los métodos geofísicos para la prospección de depósitos de pórfidos de cobre.

4.1.2 METODO GRAVIMETRICO

La densidad media de las rocas intrusivas intermedias es ligeramente superior a 2.56 que es el promedio que tiene la corteza terrestre. La presencia de mineralización, alteración o silicificación no afecta significativamente la densidad. La que si puede ser apreciablemente reducida por procesos de lixiviación. Sin embargo, para las profundidades a las que llega este fenómeno, normalmente no significa una diferencia sustancial de masa que pueda ser detectada fácilmente. De esta manera, no es

TIPO DE ROCA	DENSIDAD	SUSCEPTIBILIDAD (cgsx10 ⁻⁶)	VELOCIDAD (Km/h)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	POLARIZACION (F.M.)	RADIOACTIVIDAD (eU. ppm)
<u>INTRUSIVO MINERALIZADO</u>						
NO MINERALIZADO	2.6-2.8	25- 500	4.0-5.8	10 ² -10 ⁵	0 -10	
MINERALIZADO	2.7-2.9	25-1000	4.0-5.8	10 -10 ⁴	10 ² -10 ⁵	
LIXIVIADO	2.0-2.6	0- 250	2.5-4.0	10 ² -10 ⁶	0 -10 ³	20-50
ALTERADO	2.7-3.0	0- 500	3.0-5.8	10 -10 ⁶	10 ² -10 ⁵	
SILICIFICADO	2.6-2.9	25- 250	4.0-5.8	10 ³ -10 ⁶	10 -10 ⁵	
<u>ROCA ENCAJONANTE</u>						
ARENISCA	1.0-2.7	5- 20	1.8-4.0	10 -10 ⁵	0 -10 ²	2-5
ESQUISTOS	1.6-3.2	25- 50	2.7-4.3	10 -10 ⁵	0 -10 ²	10-20
CALIZA	1.8-2.8	5- 10	2.1-6.1	10 ² -10 ⁵	0 -10 ²	1-3
METASEDIMENTO	2.4-2.9	25- 250	3.0-7.0	10 -10 ⁴	0 -10 ²	?
ANDESITA	2.4-2.8	100-1000	4.0-5.8	10 ² -10 ⁴	0 -10 ²	?
<u>CUBIERTA</u> ALUVION, ETC.	1.5-2.0	5- 20	0.3-1.5	10 -10 ³	0 -10 ²	?
BASALTOS	2.7-3.3	600-6000	4.0-5.8	10 ² -10 ⁴	0 -10	1.3

CLAVE: cgs, centímetro-gramo-segundo; Ohm-m, ohmios-metro; F.M., factor metálico y eU. ppm, equivalente de uranio (U₃O₈) en partes por millón.

TABLA IV.1.1.1. RELACION ENTRE LA MINERALIZACION Y LOS PARAMETROS GEOFISICOS (TOMADO DE INVESTIGACION SOBRE MINERAL DE COBRE PORFIDICO EN LAS PROVINCIAS DE MENDOZA, NEUQUEN Y SAN JUAN ARGENTINA. NACIONES UNIDAS).

factible suponer que los cuerpos intrusivos de pórfidos de cobre faciliten una respuesta directa en el método gravimétrico, con excepción de medios ambientes anormales.

No obstante, los pórfidos de cobre intrusivos están aparentemente asociados a procesos palingenéticos de las fajas orogénicas jóvenes, las cuales se encuentran generalmente en un desequilibrio isostático. El espesor de la corteza terrestre involucrada facilita un incremento de las anomalías gravimétricas negativas en dimensiones regionales. Los rasgos estructurales mayores presentan este fenómeno en áreas menores.

4.1.3 METODO DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA.

La escala de susceptibilidad de los intrusivos es baja en general. No se producen cambios apreciables por una mineralización normal de pórfidos de cobre o por un proceso katamórfico. El límite superior en la escala de un intrusivo mineralizado, indicado en la tabla 4.1.1.1. toma en cuenta el caso en que una mineralización de sulfuros está acompañada, o íntimamente asociada, con la introducción de magnetita. De igual manera, la magnetita es la responsable de la susceptibilidad más alta de las andesitas, para las cuales, el valor normal no es más alto que el del intrusivo o el de la roca encajonante. La presencia de pirrotita en la serie de sulfuros incrementa la susceptibilidad y es detectable en ausencia de magnetita, en relación a un valor de fondo uniforme. Sin embargo, la aplicación

directa, en un estudio de detalle, sólo es posible en raras ocasiones.

La reflexión magnética directa de intrusivos, en la etapa de semidetalle, depende por completo del ambiente litológico. Normalmente, existen pequeños contrastes de susceptibilidad, pero éstos pueden ser positivos o negativos y las manifestaciones carecen de consistencia. La presencia de rocas volcánicas básicas, sin embargo, inhibe completamente el uso de las propiedades magnéticas para la detección de intrusivos o para una investigación detallada.

Para el campo gravitacional, se puede suponer que el espesor de la corteza terrestre se verá reflejado en un crecimiento del campo magnético regional. De esta manera, el parámetro magnético tiene una aplicación directa en la ubicación de fajas de intrusivos de escala regional. Por otra parte, las anomalías locales son más pronunciadas que en el caso del campo gravitatorio, lo que requiere, para su corrección del uso de técnicas muy complejas. Los magnetómetros de gran resolución y las computadoras para el manejo de los datos permiten en la actualidad el uso de tales métodos.

4.1.4 METODO SISMICO (ELASTICIDAD).

La discontinuidad de Mohorovicic, en la base de la corteza terrestre, se define mas por el cambio en el modo de propagación sísmica que por el contraste de velocidad, no obstante, es detectable sísmológicamente. El espesor de la corteza terrestre tiene, sin embargo, su manifestación sísmica en grandes áreas. Este fenómeno puede considerarse apropiado para la localización de fajas ígneas potenciales, en el sentido más amplio posible.

Dentro de la corteza, las velocidades de propagación sísmica transversal, en intrusivos intermedios, son muy poco diferenciables de las velocidades en las rocas de la parte superior de dicha corteza, y por tanto, no existe un contraste tal, en la anomalía, que permita identificar sísmicamente a un cuerpo de este tipo.

La mineralización no produce, por si misma, efectos en la velocidad del intrusivo, pero es significativamente disminuida por lixiviación (tanto como por meteorización) y en menor medida por procesos de alteración. La silicificación puede aumentar la velocidad sólo hasta cierto punto.

4.1.5 METODO ELECTRICO

4.1.5.1 RESISTIVIDAD

La variación de las características de resistividad en rocas intrusivas es casi la misma, o ligeramente más alta, que el común de las rocas encajonantes. Sin embargo, en muchos ambientes los intrusivos frescos presentan un contraste detectable de resistividad y en escala regional y subregional está aparentemente reflejada, algo vagamente, en datos aeroelectromagnéticos.

La mineralización de sulfuros o de magnetita, en concentraciones comunes a los depósitos de pórfidos de cobre, tienen poca o ninguna influencia en la magnitud de la resistividad cuando se hallan completamente frescos. Sin embargo, la oxidación de pequeñas cantidades de sulfuros libera suficiente ácido sulfúrico en las aguas subterráneas para disminuir apreciablemente la resistividad. Por otra parte, la silicificación eleva, casi invariablemente, la resistividad al reducir la porosidad. Por definición, un intrusivo lixiviado suele estar encima del nivel freático, y la falta de minerales metálicos hace que su resistividad tienda a ubicarse en la parte alta de la escala. Este es el caso particular de las cantidades sustanciales de óxidos de fierro que están presentes en un "sombrero de fierro" y pueden llevar a muy altas resistividades y como consecuencia picos eléctricos anormales. El efecto de la alteración hidrotermal en la resistividad de un intrusivo mineralizado es muy difícil de predecir. La destrucción de los

feldespatos comúnmente origina sales solubles, que disminuyen la resistividad aparente de la masa, pero la alteración a veces ocasiona una reducción de la porosidad y por tanto, un incremento de la resistividad.

A pesar de estas inconsistencias, se ha encontrado que la mineralización de sulfuros y la lixiviación se hallan generalmente reflejadas en bajas resistividades y la silicificación en resistividades claramente altas. Estas variaciones no pueden ser consistentes y no pueden considerarse como representativas de la extensión de la mineralización en una manera cuantitativa.

4.1.5.2 POLARIZACION INDUCIDA (P.I).

Los efectos de la P.I. se debon principalmente a los conductores metálicos presentes en la roca y pueden detectarse en muy bajas concentraciones. Los minerales arcillosos también resaltan o incrementan los efectos de la P.I. de tal manera que la roca receptora y el intrusivo estéril pueden considerarse polarizables, aunque normalmente en menor intensidad que la roca portadora de sulfuros (o magnetita). La presencia de grafito, sin embargo, incrementa notablemente la reactividad de cualquier roca receptora, aunque este factor no ha sido considerado en los valores comparativos indicados.

Existen varios métodos de medición, y varias unidades correspondientes. Las indicadas en la tabla 4.1.1.1 corresponden al factor metálico, el cual tiene dimensiones de conductividad (ohm-m).

Los intrusivos no mineralizados son algo menos reactivos que la roca receptora normal pero, la distinción no es muy evidente. Una cantidad tan reducida como un 1% de sulfuros puede producir un incremento de 100 veces en la polarización y en las características de la concentración típica de un depósito de pórfido de cobre; el factor metálico es aproximadamente igual al contenido de sulfuros, en tanto que el sulfuro se halle diseminado en forma de pequeñas partículas. El término diseminado, se aplica por igual, en este caso, a los cristales de sulfuros en espacios porosos y a las hojuelas o laminillas en fracturas, si los últimos son discontinuos y presentan un gran número de caras de partículas al electrolito intersticial. En concentraciones masivas de sulfuros, el factor metálico deja de ser proporcional a la ley y depende principalmente de la forma de presentación del sulfuro.

Como el factor metálico se calcula que es tan independiente como sea posible de los cambios del conjunto de las resistividades, la alteración y la silicificación tienen muy poco efecto en las características de la P.I. de las rocas. La Lixiviación por la cual los sulfuros frescos son removidos, tiene como consecuencia la disminución del factor metálico hasta el punto que la roca se vuelva no reactiva.

Las características de P.I. constituyen, de esta forma, el único medio directo para detectar pórfidos de cobre en una escala local, sin embargo, es impracticable e inaplicable para el estudio de tipo regional de intrusivos.

4.1.6 OTROS METODOS

La radiactividad natural en rocas intrusivas ácidas y mesosilíceas es apreciablemente más alta que en muchas rocas sedimentarias o básicas por factores de 5 ó 10. Esto ofrece métodos directos de detección a escala regional y de semidetalle, cuando la presencia de sulfuros no tiene por sí misma reflexión radiactiva que ayude a la definición local de una mena. En algunos casos, los minerales radiactivos están asociados con sulfuros en los pórfidos de cobre, aun cuando éste, no es el caso general. La reflexión radiactiva de los intrusivos es muy reducida por la cubierta superficial.

La actividad electroquímica en depósitos de pórfidos de cobre es generalmente baja, dado que en muchos casos, la oxidación ha alcanzado una estabilidad y el contenido de sulfuros es demasiado bajo. En condiciones ideales, pueden medirse efectos detectables sobre el margen o borde de los intrusivos de sulfuros en vetas.

El flujo geotérmico se incrementa generalmente en fajas de intrusivos, donde tal fenómeno es considerado como indicador de zonas potenciales en pórfidos de cobre. Sin embargo, ésta es una aplicación muy amplia de una característica geofísica y muy raramente pueden obtenerse datos que justifiquen su aplicación.

Recientemente, ha sido creado un equipo capaz de detectar emanaciones de SO_2 , el cual indica que concentraciones naturales de este gas están asociadas con depósitos de pórfidos de cobre.

Esta evidencia no es todavía concluyente y existen dificultades considerables en la práctica de obtención de datos.

Los resultados de las aplicaciones de los parámetros geofísicos en la prospección de depósitos de pórfidos de cobre se muestra en la tabla IV.1.6.1.

Es aparente, sin embargo, que las más nítidas manifestaciones geofísicas de fajas amplias de intrusivos que pudieran contener ocurrencias de cobre, descansan en sus efectos sobre los campos gravitacionales y magnéticos terrestres. Estos dos fenómenos pueden también ser indicadores de cuerpos intrusivos individuales, si las condiciones del medio ambiente son favorables, y los intrusivos son frecuentemente marcados por radiactividad inherente. En escala regional, la aplicación de estas manifestaciones geofísicas depende de la obtención de datos, y tales observaciones no han sido llevadas a cabo en la prospección de pórfidos de cobre, en la etapa de semidetalle, el trabajo de reconocimiento es factible, y aunque los estudios de gravedad no siempre se justifican, la prospección magnética aerotransportada y conjuntamente con cintilometría (método radiactivo) jugarían un papel importante. En ambas investigaciones, regional y de semidetalle, el papel de la geofísica está, sin embargo, subordinado a las consideraciones geológicas.

En la evaluación local del objetivo dado por los pórfidos de cobre, las características geofísicas son de gran importancia. Ningún método geofísico es capaz de indicar directamente la ubicación de la mena, diferenciada de la mineralización total de

PROPIEDAD	ZONA DE INTRUSIVOS (REGIONAL)	CUERPOS INTRUSIVOS (SEMIDETALLE)	SULFUROS
DENSIDAD	DIRECTA PERO ALGUNAS VECES ES AMBIGUA.	DIRECTA, PERO DEPENDIENTE DEL MEDIO AMBIENTE.	RARA
SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA	DIRECTA, AMBIGUA.	DIRECTA, PERO DEPENDIENTE DEL MEDIO AMBIENTE	APLICABLE EN OCACIONES INDIRECTAMENTE.
ELASTICIDAD	ALGUNAS APLICACIONES PERO POCOS DATOS.	RARAMENTE APLICABLE	INDIRECTO
RESISTIVIDAD	NO APLICABLE	RARAMENTE APLICABLE	FUERTEMENTE DEDUCTIVO.
SOBREVOLTAJE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	FUERTE APLICACION DIRECTA.
RADIOACTIVIDAD	RARAMENTE APLICABLE	DIRECTO	APLICABLE OCASIONALMENTE.
ELECTROQUIMICA	NO APLICABLE	NO APLICABLE	DIRECTA BAJO BUENAS CONDICIONES.
GEOTERMICA	DIRECTA, PERO POCOS DATOS.	DIRECTA, PERO POCOS DATOS.	INDIRECTA, PERO DE USO ESCASO.
EMANACION DE GASES	DUDOSA	DIRECTA, PERO NO PROBADO.	DIRECTA, NO PROBADO

TABLA IV.1.6.1. APLICACION DE LOS METODOS GEOFISICOS EN LA PROSPECCION DE DEPOSITOS DE COBRE PORFIDICO.
(TOMADO DE INVESTIGACION SOBRE MINERAL DE COBRE PORFIDICO EN LAS PROVINCIAS DE MENDOZA, NEUQUEN Y SAN JUAN
ARGENTINA. NACIONES UNIDAS).

sulfuros, pero todas las características mencionadas juegan algún papel en la dilucidación final del objetivo.

Por lo dicho antes, se entiende el porqué los métodos geofísicos en la prospección de pórfidos de cobre se llevan a cabo, principalmente, en la etapa de detalle. El método más utilizado es el de polarización inducida, algunas veces acompañado por mediciones de resistividad aparente.

A continuación se hace una breve explicación acerca del método de polarización inducida.

METODO DE POLARIZACION INDUCIDA (EXPLICACION TEORICA).

El método de polarización inducida se basa en las propiedades que tienen los conductores metálicos incrustados en una matriz conductora iónica o electrolítica, de aumentar su potencial hasta aproximarse a un valor constante cuando una corriente fluye a través del medio de conducción dual.

En el medio geológico, las partículas de mineral metálico representan los conductores metálicos y la matriz conductora iónica está representada por el medio rocoso.

APLICACION DEL METODO DE POLARIZACION INDUCIDA.

Este método consiste en hincar, sobre el terreno, dos electrodos de corriente (A y B) y dos electrodos que miden la diferencia de potencial (M y N). Si a través de los electrodos de corriente se inyecta corriente continua, en presencia de partículas metálicas, tales partículas se polarizan a lo largo de la superficie de contacto con el medio que los rodea y es, en esta interface, donde se realiza el cambio de conductividad

iónica a electrolítica o viceversa; la figura IV.1.6.2 muestra el efecto de la polarización inducida en la cual se puede observar como en las superficies opuestas del cuerpo se produce una acumulación de iones que no han cedido sus cargas; al momento en que se suspende la inyección de corriente, los iones regresan a su estado original, es decir, la polarización desaparece en un tiempo determinado; este lapso de tiempo se ve afectado por las propiedades de los materiales subyacentes.

La diferencia de potencial en los electrodos M y N no desaparece instantáneamente, de igual forma que la corriente aplicada tarda en ser reestablecida; por tal motivo se recomienda que sea aplicada durante un lapso de tres minutos.

4.2 METODOS GEOQUIMICOS

4.2.1 INTRODUCCION

En la naturaleza los elementos químicos se encuentran en la corteza terrestre con una cierta abundancia relativa mas o menos conocida (clarke).

Esto permite que mediante estudios de geoquímica se detecten zonas en donde las concentraciones de algunos elementos minerales sean más altos que el clarke.

Estas zonas en las que se presentan valores altos se denominan anomalías o zonas anómalas. Mediante los estudios de

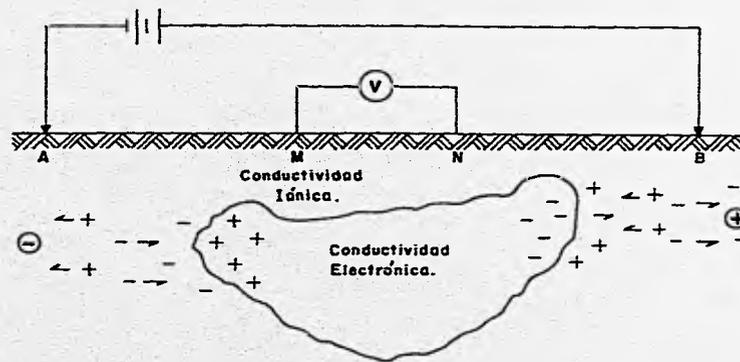


FIGURA. IV.1.6.2. EFECTO DE PDLARIZACION INDUCIDA.
(MARTINEZ, TESIS PROFESIONAL, 1994)

geoquímica se pretende ubicar las zonas anómalas ya que podrían corresponder a depósitos minerales explotables.

Los estudios geoquímicos se aplican dentro de una provincia metálica (área en la cual se observa una abundancia de un metal o grupo de metales en particular).

La provincia del SW de E.U.A y la parte N de México, es el área con mayor densidad de depósitos de cobre en todo el mundo. Por tal motivo, en esta zona se han realizado una gran cantidad de estudios geoquímicos principalmente entre los años de 1960 a 1980. Su finalidad ha sido la de encontrar técnicas que faciliten la búsqueda de depósitos de pórfidos de cobre; entre los estudios realizados se encuentran:

4.2.2 MUESTREO DE ROCAS.

Los posibles niveles de erosión en un sistema de pórfidos de cobre varía desde la exposición de las raíces profundas hasta la exposición del nivel del halo de pirita o bien hasta la exposición de la roca aparentemente inalterada (zonas de alteración hipogénica, ver figura II.5.1). Las zonas de alteración-mineralización han sido empleadas en el descubrimiento de depósitos de cobre, incluyendo algunos, cuyas zonas ricas en cobre no se exponen en la superficie.

Las zonas de alteración han sido investigadas por medio de análisis de muestras de roca, en la zona del pórfido de cobre de Kalamazoo cerca de San Manuel, Arizona. Los resultados se

muestran en la figura IV.2.2.1. En ella aparecen los intervalos de alto y bajo grado de concentración de 21 elementos menores especialmente relacionados con el contenido de las zonas (Chafee, 1976 a 1982).

Como resultado de los estudios realizados en el depósito de Kalamazoo se sugiere que esta serie de elementos, relacionados con la mena en muestras de roca, pueden ser de gran ayuda para evaluar las rocas expuestas de depósitos de pórfidos de cobre sepultados.

Este método como todos los demás presenta algunas dificultades entre las cuales se presentan el acceso a la zona de estudio.

4.2.3 MUESTRAS DE SUELOS.

El muestreo en suelos es un método comúnmente utilizado en la prospección geoquímica. Los análisis de suelos residuales pueden indicar la presencia de uno o más elementos patrón, los cuales pueden definir las aureolas externas o las partes externas de un sistema de pórfidos de cobre. Estas técnicas de muestreo en suelos se emplearon en el estudio geoquímico hecho en la vecindad del depósito de pórfido de cobre de Vekol, cerca de Casa Grande Arizona, figura IV.2.3.1.

Tal vez, los análisis que dan mejores resultados en el estudio de pórfidos cupríferos, en zonas semiáridas, son los que se realizan en el caliche y el barniz del desierto.

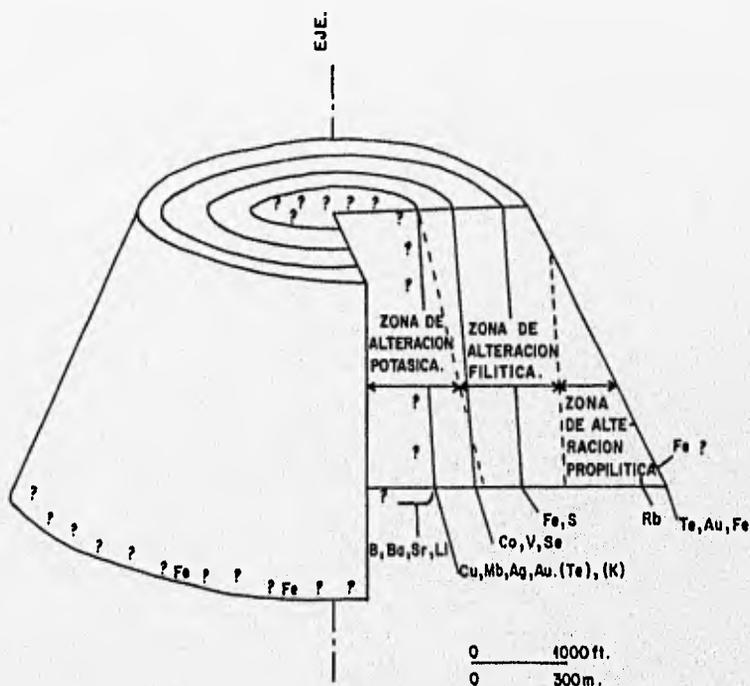
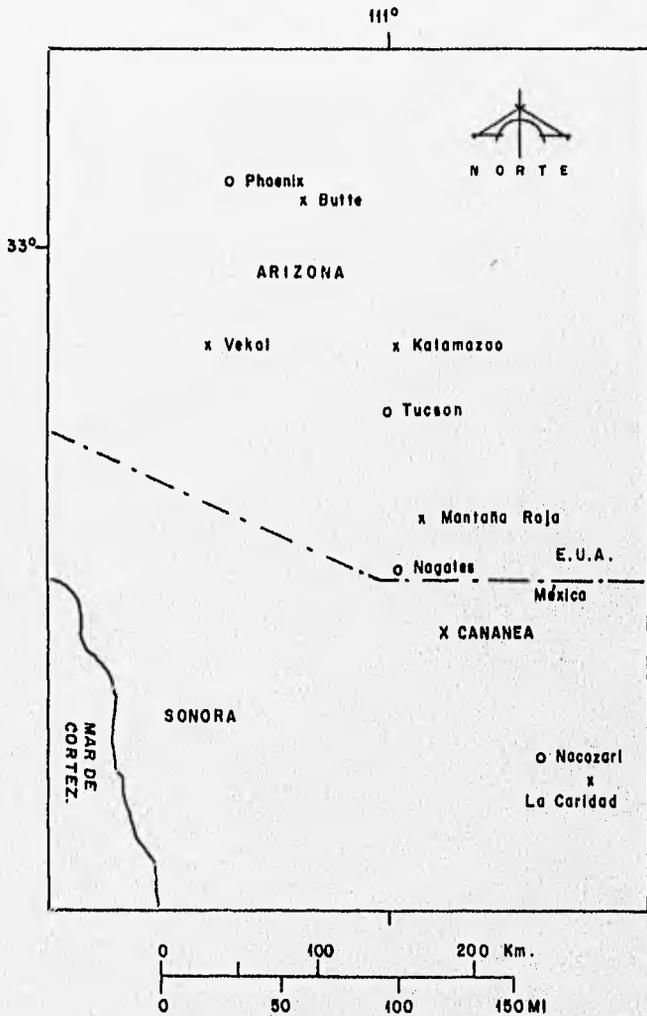


FIG. IV. 2.2.1. MODELO GEOQUIMICO DEL DEPOSITO DE PORFIRIO DE COBRE DE SAN MANUEL KALAMAZOO. LAS LINEAS GRUESAS MUESTRAN LA LOCALIZACION APROXIMADA DE LA SERIE DE ELEMENTOS. LAS LINEAS PUNTEADAS MARCAN LAS ZONAS DE ALTERACION BASADAS EN INFORMACION OBTENIDA DE POZOS. (MAURICE CHAFFEE, GEOCHEMICAL PROSPECTING TECHNIQUES FOR PORPHYRY COPPER DEPOSITS, SW U.S.A. Y N. MEXICO)



MAPA IV.2.3.4. LOCALIZACION DE DEPOSITOS DE PORFIROS DE COBRE EN EL SW DE E.U.A. Y N. DE MEXICO. (MAURICE CHAFFEE, GEOCHEMICAL PROSPECTING TECHNIQUES FOR PORPHYRY COPPER DEPOSITS, SW E.U.A. Y N. MEXICO)

El caliche (travertino) es un material rico en carbonato de calcio, el cual se desarrolla como parte de la formación de suelos en muchas regiones áridas. El propósito de la prospección geoquímica, en el caso del caliche es que, éste se forma en depósitos estratiformes directamente encima de la superficie. En un medio apropiado el cobre se puede presentar en rocas que posteriormente fueron cubiertas por caliche o en los límites cementados por éste. Entonces, el caliche sobreyacente puede concentrar molibdeno y cobre (Huff, 1970). De cualquier forma, los estudios de caliche no son muy utilizados, ya que éste no siempre está presente en las áreas mineralizadas.

Por otra parte, el barniz del desierto es un óxido rico en fierro o manganeso, que cubre las formas de la superficie de la roca en un medio ambiente árido. El barniz del desierto presenta la concentración de varios elementos (Chafee, 1975) y es utilizado en zonas restringidas. Así, su empleo queda limitado a las áreas en donde se presenta ampliamente distribuido.

4.2.4. MUESTRAS DE SEDIMENTOS DE ARROYO.

La recolección de sedimentos en canales de arroyos activos ha sido utilizado con resultados satisfactorios en todo el mundo. Ya que en las áreas de estudio es difícil encontrar zonas con buenos accesos y con un porcentaje alto de rocas expuestas como en el caso del SW de los E.U.A., pero en otros climas y medios

ambientes geológicos en donde los lugares son menos accesibles, este método es de gran utilidad.

Este método se aplicó con gran éxito en el depósito de pórfidos de cobre de la Caridad en el NW de México (ver figura IV.2.3.1.). Comparando el relieve de los alrededores de la Caridad este es excepcionalmente alto aproximadamente 1000 metros más. Este factor junto con el gran tamaño y alto grado del depósito, así como el sistema de drenaje sano y bien integrado hacen de La Caridad una área excelente para el estudio de sedimentos de arroyo.

Se recolectaron muestras de sedimentos de arroyo en la vecindad y arroyo abajo del depósito, estas fueron analizadas por más de 37 elementos; de estos 37 elementos, el análisis para cobre total hecho por extracción en frío para Cu, Mo, Zn, Ag y W produjeron anomalías que pueden distinguirse hasta una distancia remota de cuando menos 32 kilómetros aguas abajo (ver figura IV.2.4.1.).

Otro estudio similar se llevó a cabo en las montañas Patagonia, al sur de Arizona, para determinar cuales elementos definen mejor el ambiente conocido de pórfidos de cobre sepultado.

El resultado de estas investigaciones (Chafee y colaboradores, sin publicar), indica que las muestras dieron una alta concentración de Mo, Pb y Te y bajas concentraciones de Mn. Estas concentraciones sugieren que los elementos mencionados

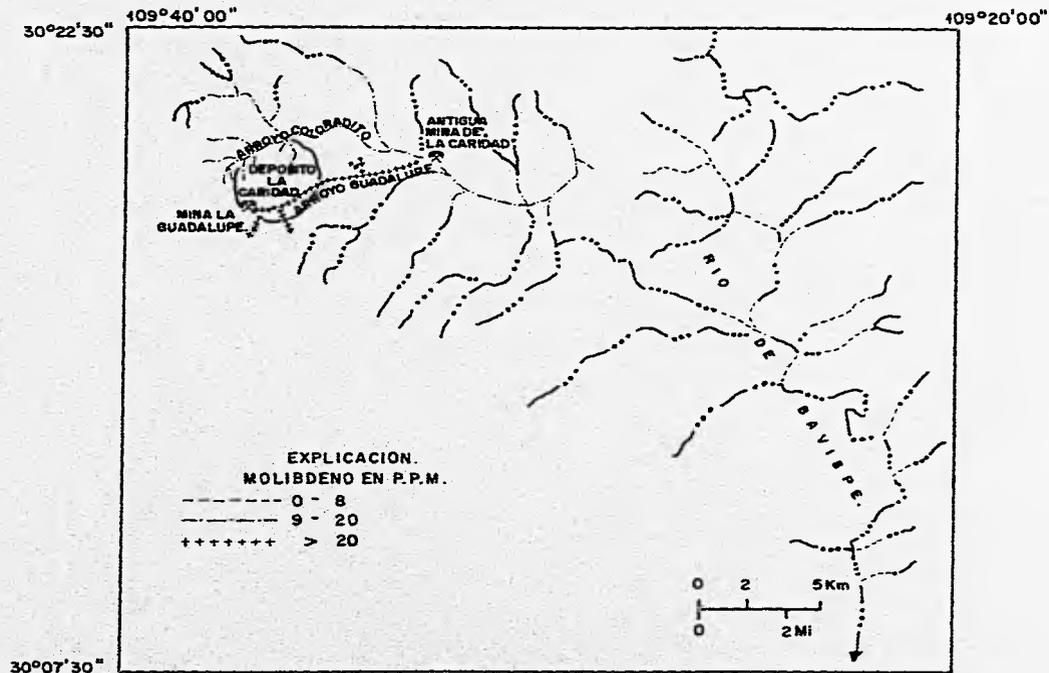


FIG. IV. 2.4.1. DISTRIBUCION DEL MOLIBDENO EN SEDIMENTOS DE ARROYO EN LA VECINDAD DEL DEPOSITO DE LA CARIDAD, SON. MEXICO.
(J. L. LEE MOREND Y COLABORADORES, RESULTADOS DE INVESTIGACIONES GEOQUIMICAS EN LA VECINDAD DEL PORFIDO CUPRIFERO DE LA CARIDAD EN EL N.E. DE SON. MEXICO. COMPARANDO MUESTRAS DE SEDIMENTOS DE ARROYO CON CONCENTRADOS DE BATEA Y VEGETACION)

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

pueden ser utilizados para definir límites de áreas que contengan depósitos de pórfidos de cobre aún no conocidos.

Cabe destacar que, en este método, la desventaja que se presenta es la posible contaminación de muestras ya sea debido al acarreo de materiales por el viento o por el hombre, en lugares en donde el clima es árido, ya que los arroyos son intermitentes; o bien, se debe tener cuidado de que las muestras tomadas en ríos permanentes se tomen en la parte central del río para evitar estas posibles fuentes de contaminación.

4.2.5. CONCENTRADOS DE BATEA (PROSPECCION ALUVIONAL).

Este es un estudio de sedimentos, los cuales son utilizados para estudios de reconocimientos geoquímicos; no obstante, exista poca información disponible al respecto de pórfidos de cobre en regiones áridas.

Uno de los pocos estudios reportados hasta ahora es el realizado en el depósito de pórfido de cobre de La Caridad en el NW de México. Para este fin, se preparó una división de las muestras de sedimentos de arroyo colectados en el estudio geoquímico. En los resultados obtenidos se observó que únicamente el Cu, Mo, W, Ag y Zn produjeron anomalías relacionadas con el depósito.

Dentro de estos resultados, cabe resaltar que la anomalía de wolframio revelada por los análisis se puede seguir por lo menos 11 kilómetros hacia abajo del depósito. Una distancia importante

para un elemento comúnmente poco estudiado en conexión con un depósito de pórfido de cobre.

Por estos motivos, se puede decir que los métodos de sedimentos de río o de concentrados de batea ayudan a descubrir, con cierta facilidad, un depósito.

4.2.6 MUESTREO DE VEGETACION.

La geobotánica es otra técnica que puede ser empleada en la búsqueda de depósitos de pórfidos de cobre pero por desgracia al igual que en el caso de los concentrados de batea existen pocos informes acerca de este método.

La única planta que se ha demostrado su relación con concentraciones de cobre en materiales superficiales, es la especie de amapola de california (*escholtzia mexicana*), que se ha encontrado en suelos ricos en cobre cerca de algunos depósitos de pórfidos de cobre (Lovering y colaboradores, 1975; Warren y colaboradores 1951; Chafee y Gale 1976); uno de estos depósitos en donde se ha encontrado es Butte Arizona (ver figura IV.2.3.1.). En este depósito la abundancia de plantas fue cartografiada (figura IV.2.6.1.) y revela una estrecha relación entre el área de contenidos altos en muestras de suelos y las áreas con densidades altas de plantas de amapola (Chafee y Gale, 1976); desafortunadamente, esta planta no se encuentra en todos los depósitos conocidos.

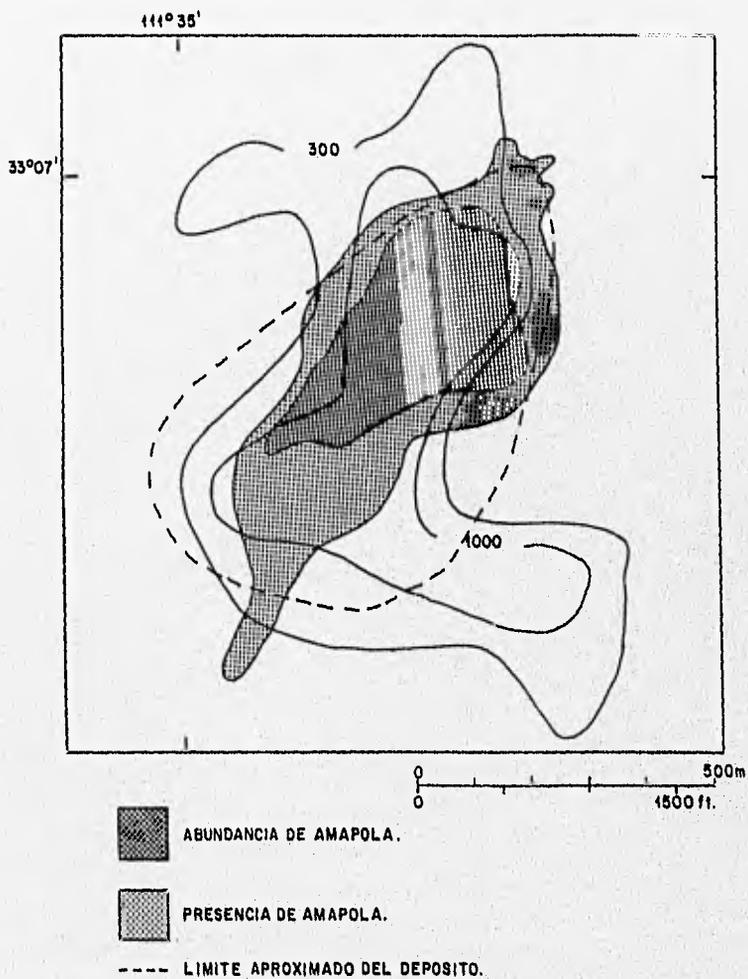


FIG. IV.2.6.1. DISTRIBUCION DE AMAPOLA CON RELACION AL DEPOSITO DE COBRE DE BUTTE ARIZONA.
(MAURICE CHAFFEE, GEOCHEMICAL PROSPECTING TECHNIQUES FOR PORPHYRY COPPER DEPOSITS, SW DE LOS E.U.A Y N. DE MEXICO)

Otro estudio de vegetación se realizó en el depósito de La Caridad (NW de México). Este estudio fue llevado a cabo en tallos y hojas de mezquite y sabino, en donde se encontraron distribuciones de concentraciones anómalas de Cu, Mo, Zn y Ag, cabe señalar que estas anomalías se consideraron ya que se encontraron tanto en tallos como en hojas, por este motivo se considera que identifican positivamente el área que contiene mineral.

La anomalía de cobre total que se registró por este método, se extiende alrededor de 15 kilómetros aguas abajo del depósito.

Sin embargo, las desventajas que presenta este método son que por un lado los análisis son muy tardados (aproximadamente 2 años) y las concentraciones varían. Además se necesita que las plantas muestreadas tengan sus raíces en el cauce del río y que las plantas se encuentren en gran cantidad y a lo largo de toda la zona de estudio.

Sin embargo, los estudios realizados en los depósitos de Butte, Vekel y La Caridad indican que los métodos biogeoquímicos pueden localizar cualquiera de estos tres depósitos, pero se señala que estos métodos dan mejores resultados si se aplican en la etapa de detalle.

4.2.7 MUESTRAS DE AGUA DE POZOS.

Los análisis de aguas de pozos son muy poco utilizados ya que presentan dos grandes desventajas: primero, el bajo número de pozos existentes en la mayoría de las zonas de estudio; y segundo, que las concentraciones de los elementos son muy bajas y sólo pueden ser detectadas en una forma muy pobre por medio de análisis costosos. Por tal motivo, se considera que esta técnica podría ser mejor desarrollada en el futuro. Además se piensa que los estudios de geobotánica deben ser hechos en plantas con raíces profundas, las cuales llegan a tocar en ocasiones el nivel de aguas subterráneas y por este motivo los resultados pueden ser muy similares en ambos métodos.

4.2.8 MUESTRAS DE GASES EN SUELOS.

Esta es otra técnica que puede ser utilizada en el estudio de los depósitos de pórfidos de cobre sepultados, la medida de las concentraciones de varios gases que se presentan en inclusiones. La mayoría de los elementos volátiles y componentes que están asociados con estos depósitos minerales se encuentran citados por Chafee, 1975, algunos de estos gases son dióxidos de azufre o también puede formarse mercurio cerca del depósito de sulfuros óxidados. Este método presenta algunas dificultades, como por ejemplo es necesario que el material que sobreyace al depósito sea permeable para que los gases migren hacia la

superficie en donde pueden ser medidos; otro factor que interviene es la presencia de aguas subterráneas sobre el depósito, ya que estas dificultan la migración de los gases hacia la superficie; por tales circunstancias este método puede ser mejor aplicado en un medio ambiente árido como por ejemplo en las áreas del SW de los Estados Unidos y el NW de México.

CAPITULO V.

5.- GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA

5.1. LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO

5.2. FISIOGRAFIA

5.- GEOGRAFIA Y FISIOGRAFIA DEL AREA MARIQUITA

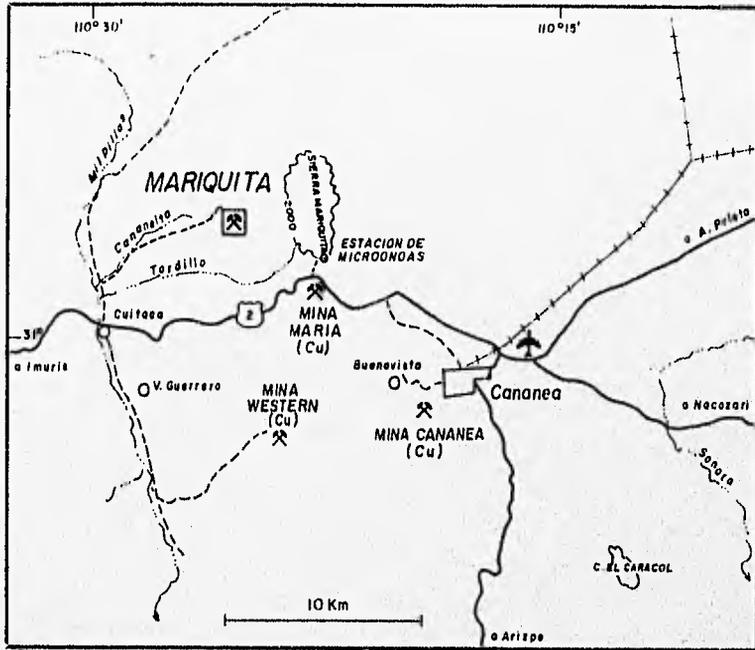
5.1. LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO.

Mariquita se localiza en la porción central norte del estado de Sonora, en el municipio de Cananea, del mismo estado, sus coordenadas geográficas son: $31^{\circ} 02' 06''$ a $31^{\circ} 03' 30''$ de latitud norte y $110^{\circ} 26' 14''$ a $110^{\circ} 25' 17''$ de longitud oeste.

El área de estudio se localiza dentro del distrito minero de Cananea, el cual es de gran importancia, ya que ha sido un importante productor de cobre a nivel mundial. Está ubicado en la porción NW del distrito a 20 Km al NW de la ciudad de Cananea. Otros puntos de referencia son: 50 Km al SE de Nogales, Son., y a 30 Km al S de la frontera con EUA, y a 5 Km al N de la carretera Federal N^o 2 Imuris-Agua Prieta (ver figura V.1.1). Topográficamente, Mariquita se localiza en las estribaciones de la sierra Mariquita, uno de los rasgos topográficos más sobresalientes en el área.

El área de estudio se encuentra muy bien comunicada, se llega partiendo de Cananea por la carretera federal N^o 2 Agua Prieta-Imuris, hasta el poblado de Cuitaca con una distancia de 28 Km, de ahí se continúa hacia el norte por un camino de terracería hasta llegar al fundo minero, con una distancia de aproximadamente 8 Km.

La ciudad de Cananea, Son., se encuentra muy bien comunicada con el resto del estado, con el estado de Chihuahua y con EUA, por medio de carreteras. Se une a Hermosillo, capital del estado



S I M B O L O S

- MINA O DEPOSITO
- CARRETERA
- TERRACERIA
- RAZGO TOPOGRAFICO
- ARROYO O RIO
- POBLADO
- FFCC
- AEROPUERTO



PLANO N. 1.1.
 PLANO DE LOCALIZACION
 DEL PROYECTO MARIQUITA.

de Sonora por medio de una carretera de primer orden; se tienen también carreteras de Cananea a Agua Prieta y Arizpe, así como poblaciones de EUA. También cuenta con comunicación por ferrocarril a la población de Nogales, Son., de donde hay comunicación ferroviaria al resto de la República por medio del ferrocarril del Pacífico. También cuenta con una pista de aterrizaje para aviones pequeños, sin que haya un servicio regular.

5.2. FISIOGRAFIA.

El área de Mariquita queda comprendida dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (ver figura V.2.1), en la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos. La provincia de la Sierra Madre Occidental está constituida por un conjunto de sierras con orientación general NNW-SSE, con anchos en algunos lugares de hasta 300 Km. La provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental se encuentra constituida por rocas volcánicas extrusivas que varían en composición de intermedias (andesitas) a ácidas (riolitas), de edad Terciario Superior. Esta secuencia de rocas volcánicas sobreyace a rocas intrusivas de composición ácida (granitos y granodioritas).

La provincia se ha subdividido en tres subprovincias, que son:

- 1.- Zona de la Altiplanicie.
- 2.- Zona de Barrancas.

3.- Zona de Sierras y Valles Paralelos.

A esta última subprovincia pertenece el área de Mariquita. La subprovincia de Sierras y Valles Paralelos, constituye la parte más occidental de la provincia y se caracteriza por la presencia de sistemas de montañas, con sus crestas paralelas, con orientación NNW-SSE, separados por valles intermontanos rellenos de material aluvial y en algunas partes de conglomerados mal consolidados; se encuentra limitada al poniente por la zona desértica de Sonora y la Llanura costera de Sinaloa; y al oriente por la subprovincia de Barrancas. La génesis de la subprovincia de Sierras y Valles Paralelos corresponde a fallamientos escalonados, aunque en ocasiones y hacia las estribaciones occidentales de las sierras de Cananea es posible observar una serie de valles y montañas originadas por una secuencia de horst y grabens. Mariquita se localiza al oeste de la sierra de la Mariquita, la cual es uno de los rasgos topográficos más sobresalientes de la zona, con una elevación máxima del orden de 2500 msnm.

En el área de estudio, la topografía es moderada, siendo más abrupta en la porción sur y más suave hacia el norte. En el área se tienen cerros alineados sensiblemente al norte, con una elevación máxima de 1600 msnm, y una elevación mínima de 1400 msnm. La mayor parte de las precipitaciones pluviales tienen un escurrimiento hacia la porción occidental de la sierra; estos escurrimientos constituyen el arroyo de Cocóspera, el cual a su

vez vierte sus aguas dentro del río Magdalena que desemboca en el Golfo de California.

CAPITULO VI.

6.- GEOLOGIA DEL PROYECTO MARIQUITA

6.1. GEOLOGIA REGIONAL (DISTRITO DE CANANEA)

6.1.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA

6.2. GEOLOGIA DE DETALLE (PROYECTO MARIQUITA)

6.2.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA

6.2.2. ESTRUCTURAS

6.2.3. ALTERACION

6.2.4. MINERALIZACION

6.2.5. HISTORIA GEOLOGICA

6.1. GEOLOGIA REGIONAL (DISTRITO DE CANANEA).

6.1.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA.

El distrito cuprífero de Cananea presenta una elongación NW-SE de aproximadamente 25 Km de largo por 6 Km de ancho y con numerosas manifestaciones de mineralización de Cu-Mo y en menor escala metales preciosos y Pb-Zn; presenta una secuencia de rocas ígneas y sedimentarias que abarcan desde el Pre-Cámbrico hasta el Terciario (ver figura VI.1.1.1) y que son, empezando de las más antiguas:

GRANITO CANANEA.- El Granito Cananea representa el basamento Pre-Cámbrico en el distrito, ocurre sólo en pequeños y ocasionales afloramientos en la vecindad del depósito de Cananea.

CUARCITA CAPOTE.- La Cuarcita Capote del Cámbrico presenta una gradación de la siguiente forma: la base está constituida por una arcosa con lentes de arenisca conglomerática y fragmentos clásticos de 2 a 3 cm de diámetro; en su parte media se presentan facies más arenosas equigranulares, con tamaño promedio de los granos de 0.5 a 1.0 mm; el miembro superior es una argilita o "siltstone" laminado de color gris verdoso con granos angulares. El mineral más abundante de esta formación es el cuarzo. La mejor sección de esta formación se localiza en la cuenca Capote, de donde toma su nombre, esta unidad también aflora en lomeríos localizados al SW del pico de Henrietta.

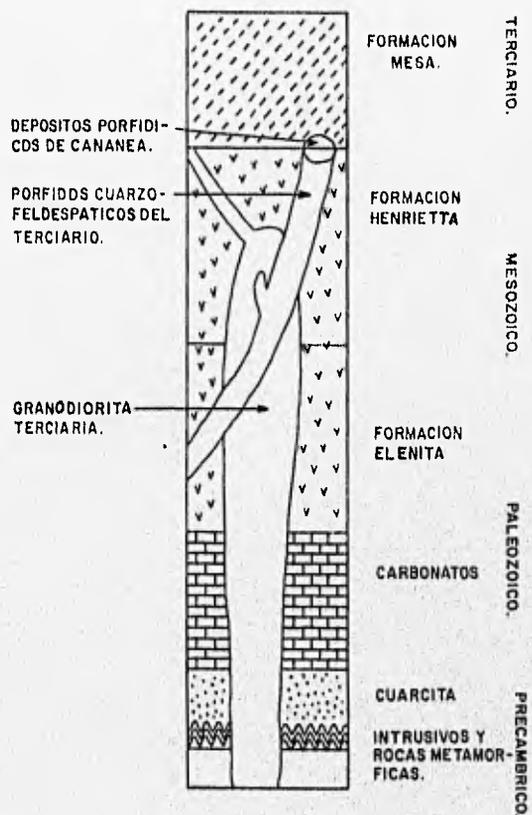


FIG. VI.1.1.1. ESTRATIGRAFIA GENERALIZADA DEL AREA DE CANANEA.
(TOMADO DE W.A. WDDZICKY, 1992)

CALIZA PUERTECITOS.- La Caliza Puertecitos junto con la Cuarcita Capote representan las unidades sedimentarias del distrito. La caliza que pertenece al Carbonífero es una caliza arcillosa de estratificación delgada con pedernal, que hacia la porción superior se vuelve más pura y de estratificación gruesa. Esta unidad en los contactos con los intrusivos forma tactitas o hornfels en los horizontes arcillosos. Basándose en similitudes litológicas algunos autores han correlacionado estos sedimentos con formaciones paleozoicas que afloran en áreas cercanas a Cananea. A esta formación se le ha asignado una edad del Carbonífero ya que se encontraron fragmentos fósiles que establecen esa edad para las calizas.

Sobre los sedimentos, descansa discordantemente una secuencia de formaciones volcánicas depositadas entre el Triásico y Terciario Temprano, que son: Elenita, Henrietta y Mesa, separadas entre sí por discordancias erosionales.

FORMACION ELENITA.- Fue descrita por Emmons en 1910, la naturaleza del emplazamiento había sido descrita con dos facies, una intrusiva y otra extrusiva, haciendo extensiva esta naturaleza a las tres formaciones volcánicas. Posteriormente en 1936, Valentine demostró que estas tres formaciones volcánicas tienen una naturaleza extrusiva única y exclusivamente.

Esta formación consiste en su parte basal de traquitas con una característica estructura fluidal. En su parte superior consiste de flujos riolíticos, cerca del límite superior se encuentran delgados horizontes de aglomerados, en los cuales

fragmentos redondeados de varios centímetros se presentan en una matriz riolítica. En esta unidad es posible localizar capas bien estratificadas de areniscas, posiblemente depositadas en un ambiente lacustre. El espesor total de esta formación no ha sido determinado con precisión aunque se considera una unidad potente con varios cientos de metros, la edad asignada considerando sus relaciones estratigráficas es Triásico-Jurásico.

FORMACION HENRIETTA.- Esta formación ha sido subdividida en tres miembros: El miembro basal está constituido por series de flujos de dacitas y latitas, aglomerados y tobas finas, el miembro medio consiste de flujos riolíticos y por último el miembro superior compuesto de flujos traquiandesíticos, brechas y tobas de composición intermedia. Sus contactos inferior y superior son discordantes debido a erosión.

Esta formación tiene una amplia distribución en el distrito, pero es en la porción norte de la cuenca Capote donde se describió por primera vez. Se le considera un espesor aproximado de 1700 m y se le ha asignado una edad cretácica.

FORMACION MESA.- Esta formación ocupa la mayor parte del área de Cananea. Está compuesta por tobas y aglomerados estratificados, en la porción superior se presentan flujos andesíticos.

Para esta formación se ha estimado un espesor aproximado de 1800 m, aunque pudiera ser mayor ya que en algunas partes se extiende debajo de las gravas recientes; se le ha considerado una

edad Cretácico Tardío-Terciario Temprano, siendo la última unidad extrusiva en el área.

La secuencia terciaria consiste de una serie de intrusivos que empiezan con el emplazamiento de un batolito dentro del cual se han segregado las siguientes facies:

GRANODIORITA CUITACA.- Se presenta como una roca equigranular de apariencia uniforme de color rosa a gris claro. Está compuesta por plagioclasa (oligoclasa-andesina), ortoclasa, cuarzo y ferromagnesianos, siendo el más común hornblenda y en menor proporción biotita.

La Granodiorita Cuitaca ha sido datada como Cretácico Tardío-Terciario, por pruebas radiométricas se le asignó una edad de 64 +/- 3 m.a. (Anderson y Silver, 1977).

SIENITA EL TORRE.- De textura más fina que la granodiorita, se presenta de un color gris a rosa. Consiste principalmente de feldespatos (ortoclasa y microclina) y hornblenda; en menor proporción se presenta biotita. En ocasiones presenta una textura más porfídica.

DIORITA TINAJA.- Esta unidad presenta fuertes variaciones en composición, que varían desde un gabro hasta una monzonita. La diorita que es la roca más representativa es una roca masiva de color verdoso, compuesta de andesina y hornblenda con pequeñas cantidades de ortoclasa, cuarzo y magnetita.

Posteriormente al emplazamiento del batolito se tienen diques y pórfidos subvolcánicos que se describen a continuación:

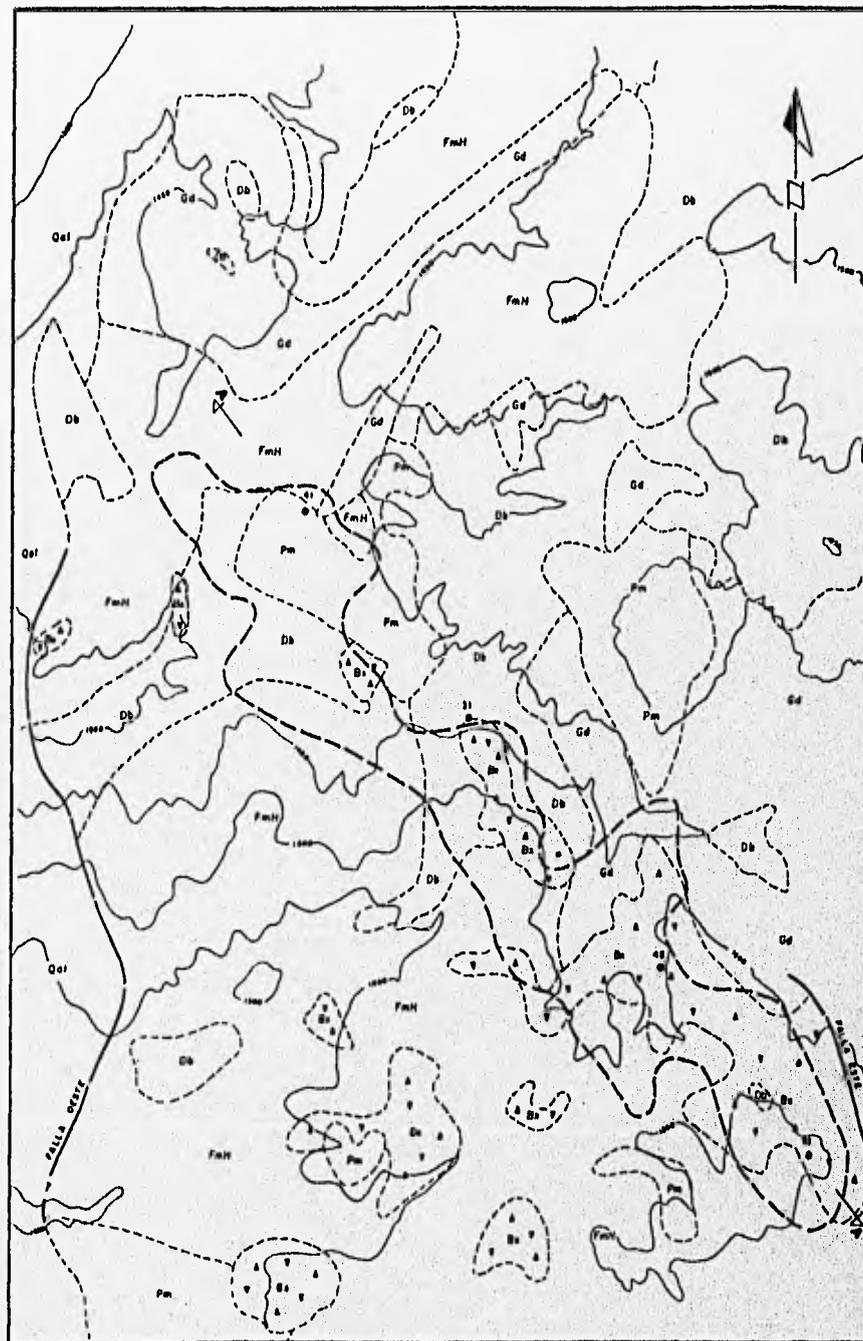
DIABASA MARIQUITA.- Esta formación se emplaza como un potente dique, es variable en textura pero de composición regular. La textura más típica tiene un carácter porfídico distintivo y está constituida por cristales euedrales de labradorita en una matriz fina de andesina y ferromagnesianos.

DIABASA CAMPANA.- Se presenta como delgados diques de grano fino que cortan a las unidades descritas anteriormente. Este nombre se generaliza a diques de grano fino de composición intermedia.

PORFIDOS CUARZO-FELDESPATICOS.- Son los intrusivos terciarios más recientes; este nombre se ha generalizado a pórfidos subvolcánicos de composición variable entre riolíticos y dioríticos. Ocurren como pequeños stocks emplazados en fallas orientadas al NW, a estos pórfidos se relaciona la mineralización de Cu-Mo en el distrito de Cananea.

Estos pórfidos corresponden a la última unidad ígnea en el distrito, durante el Terciario, han sido datados en aproximadamente 58 m.a. (Cominco Ltd. Lab.).

ALUVION.- En las partes bajas y en ocasiones en laderas de las montañas se encuentran cubiertas por aluvión terciario, el cual es discordante con las rocas que lo subyacen.



EXPLICACION

GEOLOGIA

CUATERNARIO	Qal	ALUVION
TERCIARIO	Db	BRECHA
	Pm	PORFIDO MONZONITICO
	Gd	DIABASA MARIQUITA/CAMPANA
CRETACICO	FmH	GRANODIORITA CUITACA
	FmH	FORMACION HENRIETTA

SIMBOLOS

	CONTACTO GEOLOGICO
	FALLA NORMAL
	CUERPO MINERALIZADO
	BARRENO
	LINEA DE SECCION
	CURVA DE NIVEL



U. N. A. M.

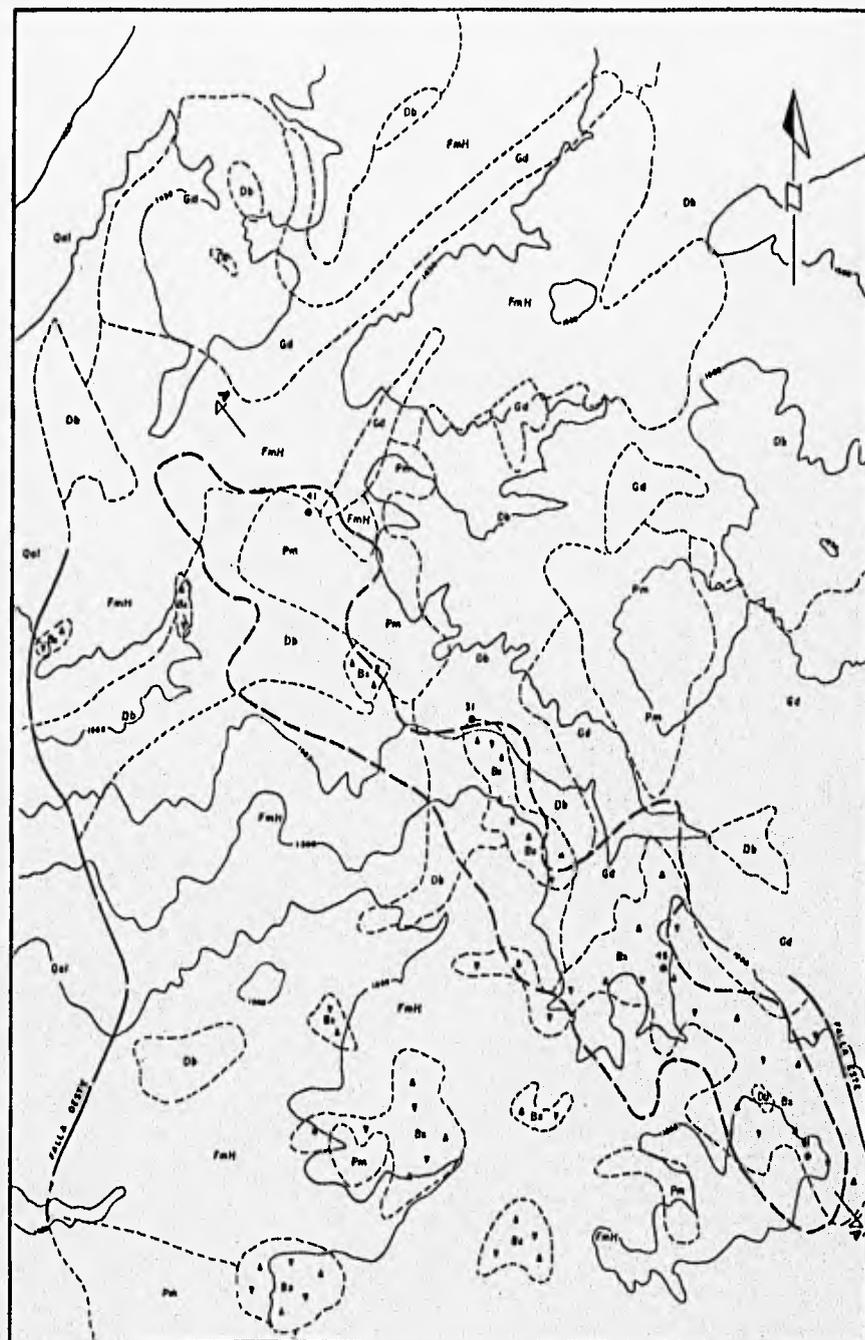
FACULTAD DE INGENIERIA.
DIV. DE CIENCIAS DE LA TIERRA.

MAPA GEOLOGICO DEL PROYECTO MARIQUITA.

TESIS
PROFESIONAL.

1988.

FIG. VI. 2. 1. 1.



EXPLICACION

GEOLOGIA

CUATERNARIO	Gal	ALUVION
	Br	BRECHA
Terciario	Pm	PORFIDO MONZONITICO
	Db	DIABASA MAMQUITA/CAMPANA
	Gd	GRANODIORITA CUITACA
CRETACICO	FmH	FORMACION HENRIETTA

SIMBLOS

	CONTACTO GEOLOGICO
	FALLA NORMAL
	CUERPO MINERALIZADO
	BARRENO
	LINEA DE SECCION
	CURVA DE NIVEL



U. N. A. M.	FACULTAD DE INGENIERIA.	
	DIV. DE CIENCIAS DE LA TIERRA.	
MAPA GEOLOGICO DEL PROYECTO MARIQUITA.		
TESIS PROFESIONAL.	1996.	FIG. V. 2. 1. 1.

6.2. GEOLOGIA DE DETALLE (PROYECTO MARIQUITA)

6.2.1. LITOLOGIA Y ESTRATIGRAFIA.

En el área de Mariquita se tiene una secuencia de rocas ígneas del Cretácico al Terciario (ver figura VI.2.1.1) que por sus características y posición estratigráfica se correlacionaron con las unidades identificadas del distrito de Cananea que fueron descritas anteriormente, pero que localmente presentan características propias, estas unidades son:

FORMACION HENRIETTA.- Consiste de rocas volcánicas de composición andesítica-dacítica, que varían en texturas de grano fino a porfídica, con horizontes de aglomerados, en gran parte erosionada; esta unidad del Cretácico representa las rocas más antiguas del área de estudio.

En algunas partes del área, principalmente en la porción SE del yacimiento, esta unidad se encuentra intensamente brechada, perdiéndose las características originales de la roca, por lo que para efectos del estudio del área se consideró prácticamente como una unidad independiente, esta brecha se forma en zonas de contacto con el intrusivo.

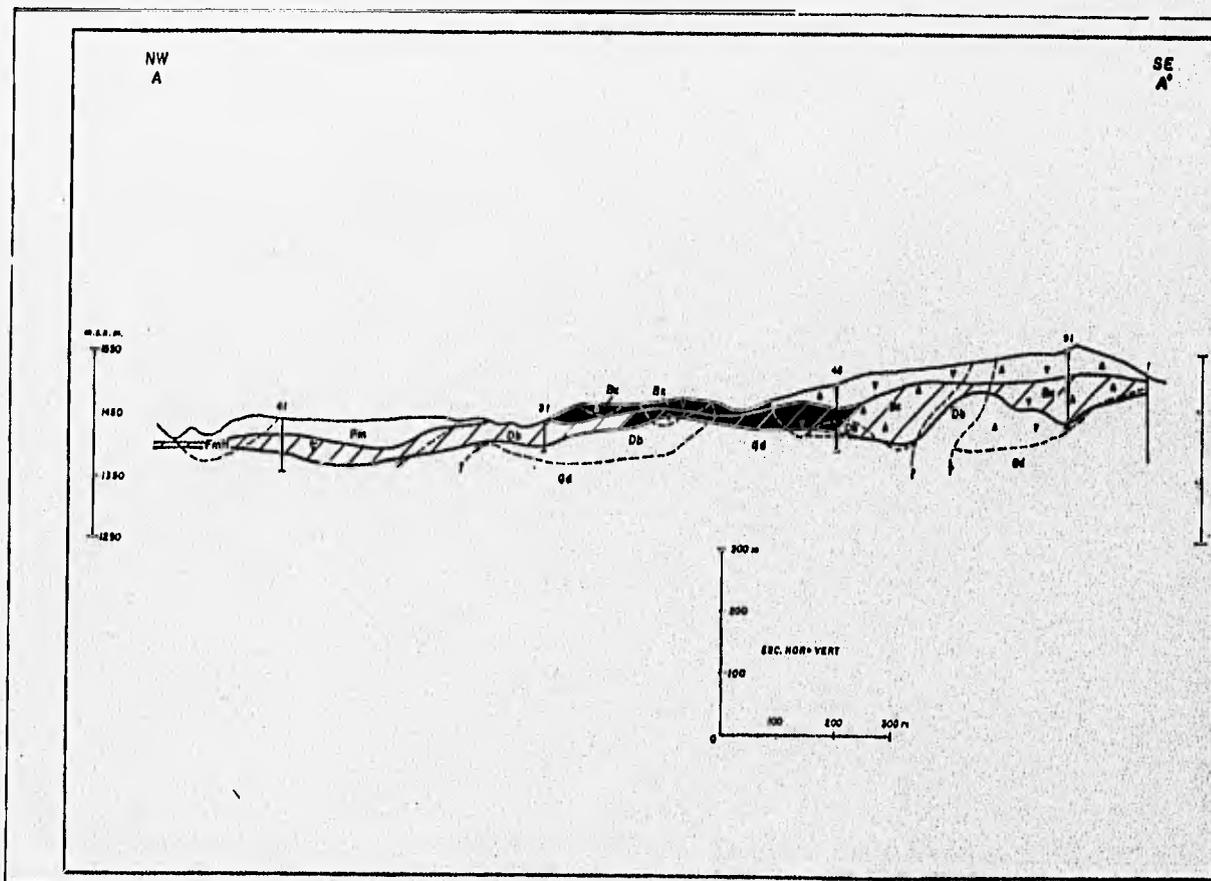
GRANODIORITA CUITACA.- Esta unidad es un intrusivo plutónico que en el área presenta facies graníticas a dioríticas de grano grueso, predominando una granodiorita de hornblenda-biotita. Esta

intrusiona a la Formación Henrietta y produce brechas favorables para el emplazamiento de la mineralización.

DIABASA MARIQUITA.- Esta roca de carácter subvolcánico se emplaza como un dique, que tiende a acuíñarse al E-SE contra la granodiorita y tiene una mayor potencia en la porción oeste del área, también se presenta como delgados diques. Presenta una textura porfídica con fenocristales de labradorita, en una matriz fina, que en partes presenta el arreglo conocido como "goose track".

DIABASA CAMPANA.- Más joven que la Diabasa Mariquita, podría considerarse como una etapa tardía de ésta, con textura de grano fino a porfídica, con una moderada concentración de magnetita, se presenta con delgados diques o sills que cortan a las unidades descritas anteriormente.

PORFIDOS MONZONITICOS.- Son los últimos intrusivos terciarios, se emplazan como stocks de poco diámetro, con un alineamiento NW, que tiende a ampliarse a profundidad. Al emplazamiento de estos pórfidos se relaciona la mineralización en el área Mariquita (ver figura VI.2.1.2.)



EXPLICACION
GEOLOGICA

- | | | |
|-----------|--|------------------------|
| TENDIENDO | | BRECHA |
| | | PORFIDO MONZONITA |
| | | DIABASA MARGARITA |
| | | GRANODIORITA CUICUILCO |
| CONTACTO | | FORMACION HENRIQUETA |
| SIMBOLOS | | |
| | | FALLA NORMAL |
| | | CUERPO MINERAL |
| | | BARRENO |
| | | CONTACTO GEOLOGICO |

U.N.A.M.

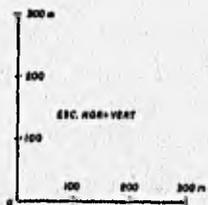
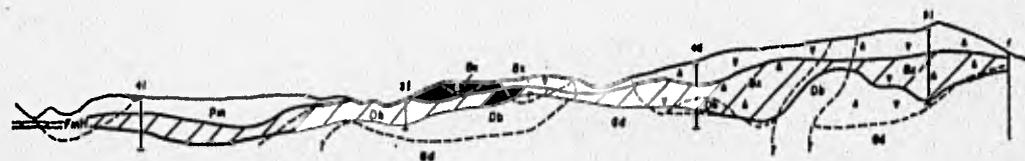
FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS E INGENIERIA

SECCION GEOLOGICA DEL PROYECTO

TESIS
PROFESIONAL.

1999.

FIG.

NW
ASE
A'E. M.
1550
1400
1250

EXPLICACION

GEOLOGIA

Terciario		BRECHA
		PORFIDO MONIZONITICO
		DIABASA MARIQUITA/CAMPANA
		GRANODIORITA QUITACA
Cretacico		FORMACION HENRIETTA

SIMBLOS

	FALLA NORMAL
	CUERPO MINERALIZADO
	BARRENO
	CONTACTO GEOLOGICO

U.N.A.M.

FACULTAD DE INGENIERIA.

DIV. DE CIENCIAS DE LA TIERRA.

SECCION GEOLOGICA DEL PROYECTO MARIQUITA.

TESIS
PROFESIONAL.

1988.

FIG. VI.2.1.2

6.2.2. ESTRUCTURAS.

Los principales rasgos estructurales en el área coinciden con los alineamientos regionales NW-SE; en Mariquita el control de la mineralización está relacionado a sistemas de fracturas y fallas de poca magnitud de rumbo NW-SE. También se presentan otros sistemas de fracturamiento, no tan bien definidos, uno aproximadamente E-W y otro NE-SW; se presentan otros sistemas de cizallamiento formados en los contactos con los diques de diabasa.

Se tiene también brechamiento irregular asociado con la mineralización, excepto en la porción SE del cuerpo donde se tiene una zona de brechamiento regular asociado y coincidiendo con una zona de mejor enriquecimiento, este brechamiento se presenta en las rocas volcánicas, siendo más intenso en el contacto con la granodiorita y disminuyendo gradualmente a medida que se aleja de éste, lo que sugiere una brecha de contacto la cual proporciona espacios abiertos y buenos conductos que fueron aprovechados por las soluciones hidrotermales posteriores al emplazamiento de los pórfidos.

Se tienen dos estructuras post-minerales importantes y que son conocidas como Falla Este y Falla Oeste (ver figura VI.2.1.1). La Falla Este se define bien en la porción SE del cuerpo, donde localmente es el límite de la mineralización, tiene un rumbo N-NW aproximadamente vertical y pone en contacto rocas volcánicas de la formación Henrietta, fuertemente brechadas, con la Granodiorita Cuitaca. La Falla Oeste tiene un mayor desarrollo

a rumbo, esta falla es el límite de la mineralización en la porción oeste, se define en superficie por un contacto entre roca y aluvión , presenta un alineamiento aproximadamente paralelo al de la Falla Este; esta falla de tipo normal forma parte de un sistema regional de bloques caídos hacia el oeste, poniendo en contacto la secuencia estratigráfica de Mariquita con zonas de aluvión de hasta 300 m de espesor, lo cual da idea del desplazamiento de estos bloques.

6.2.3. ALTERACION.

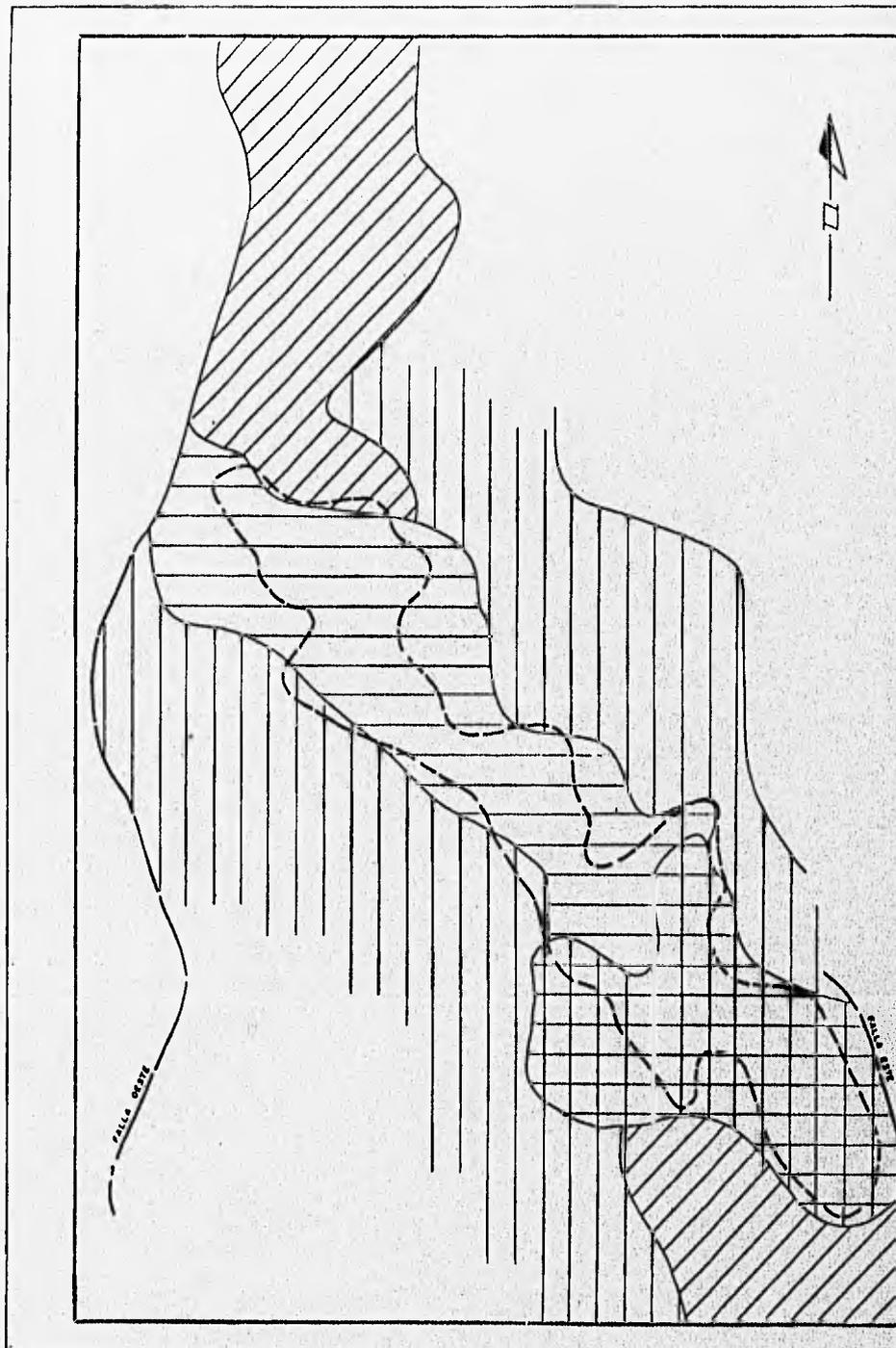
El depósito de Mariquita no es un yacimiento tipo pórfido cuprífero en sentido estricto, pero puede ser considerado como tal, ya que presenta muchas características similares principalmente en cuanto a alteración y mineralización se refiere.

La alteración en el área se relaciona a la última etapa de intrusión terciaria, ya que es producida en una etapa hidrotermal inmediatamente posterior al emplazamiento de los pórfidos subvolcánicos, afectando a los mismos pórfidos en forma irregular. Estas soluciones hidrotermales aprovecharon la preparación previa consistente en sistemas de fracturamiento NW-SE principalmente, así como otros sistemas menos definidos y también el fracturamiento en el contacto con los pórfidos para alterar tanto a éstos como a las rocas anteriores. En la porción SE del área las soluciones aprovecharon la permeabilidad de una

brecha de contacto produciendo una alteración más intensa y completa.

La alteración en el área consiste de cuarzo-sericita y caolín, y una etapa aparentemente posterior de vetillas de alunita. La alteración se presenta en forma regular variando entre una combinación de cuarzo-sericita en la porción SE y alteración a caolín en la porción NW del área; se relaciona directamente con la mineralización, ya que la zona de mayor alteración en superficie coincide burdamente con el cuerpo mineralizado. La alunita se presenta en forma regular, con una débil a moderada concentración de vetillas delgadas en toda el área alterada. En algunas porciones del área la alteración llega a ser tan intensa que se pierden todas las características y rasgos distintivos de las rocas originales, esto sucede sobre todo en las rocas volcánicas que tienden a ser más susceptibles para alterarse y mineralizarse (ver figura VI.2.3.1)

La alteración afecta principalmente y en forma más regular a las rocas volcánicas; afecta irregular y selectivamente a las diabasas, respetando principalmente a las facies de grano fino, los pórfidos también presentan una alteración irregular, con una débil alteración en la porción SE y una intensa caolinización en la porción NW.



EXPLICACION

ALTERACION

-  Fto Qz-Ser/Deb Coe
Intenso FeO₂
-  Mod Qz-Ser y Coe
Intenso FeO₂
-  Mod Qz-Ser y Coe
Deb FeO₂
-  Deb Qz-Ser y Coe
Deb FeO₂

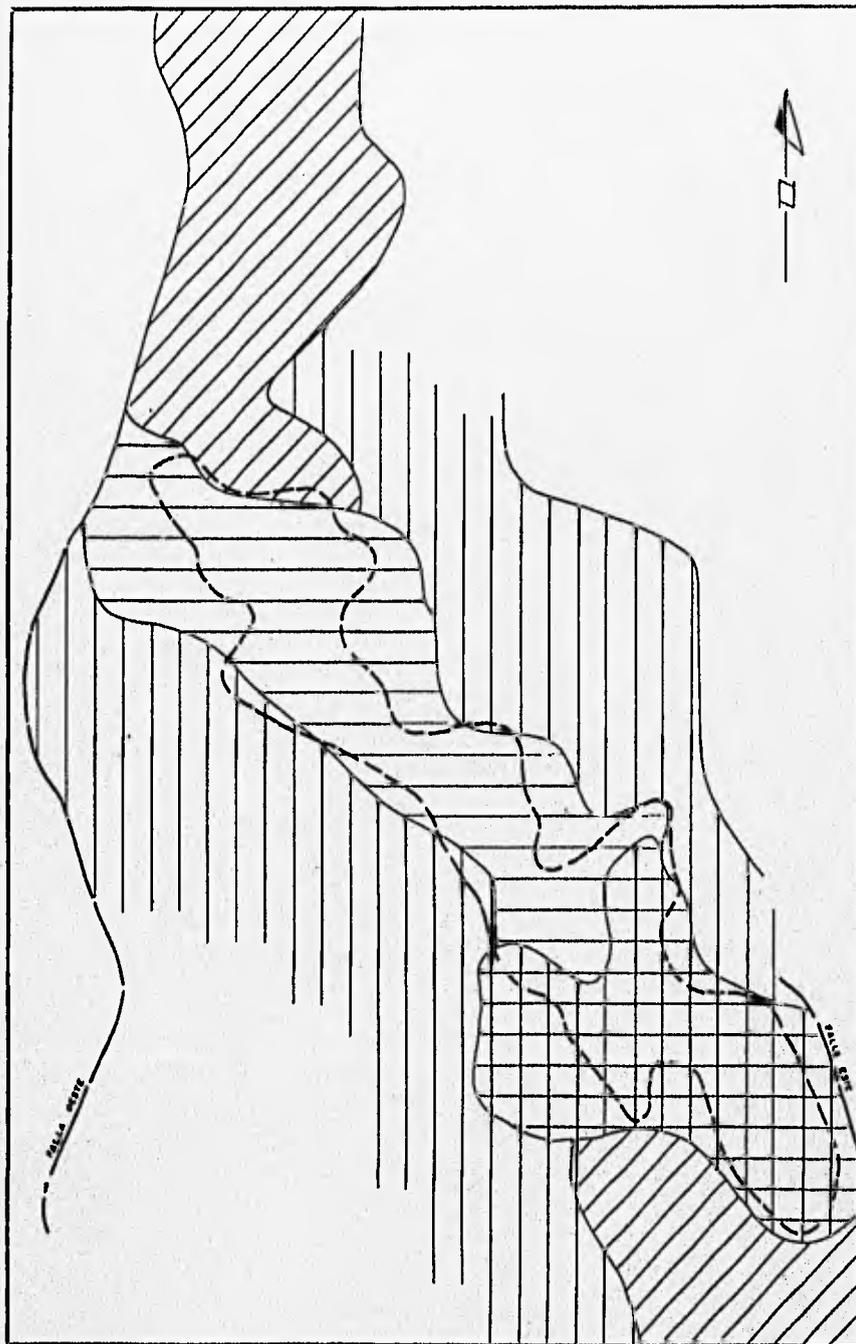
SIMBOLOS

-  LIMITE DE ALTERACION
-  FALLA NORMAL
-  CUERPO MINERALIZADO
-  BARRENO



U.N.A.M. FACULTAD DE INGENIERIA
DIV. DE CIENCIAS DE LA TIERRA
**MAPA DE ALTERACIONES DEL PROYECTO
MARIQUITA**

TESIS PROFESIONAL 1990 FIG. VII



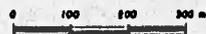
EXPLICACION

ALTERACION

-  **Fis. Qz-Ser/Dob. Coe. In. FeOz**
-  **Mod. Qz-Ser y Coe. In. FeOz**
-  **Mod. Qz-Ser y Coe. Dob. FeOz**
-  **Dob. Qz-Ser y Coe. Dob. FeOz**

SIMBOLOS

-  **LIMITE DE ALTERACION**
-  **FALLA NORMAL**
-  **CUERPO MINERALIZADO**
-  **BARRENO**



U.N.A.M.	FACULTAD DE INGENIERIA.
	DIV. DE CIENCIAS DE LA TIERRA.
MAPA DE ALTERACIONES DEL PROYECTO MARIQUITA.	
TESIS PROFESIONAL.	1990.
FIG. VT. 2.5.1	

6.2.4. MINERALIZACION

En el área de Mariquita la mineralización económica es únicamente de cobre, con algunos valores de molibdeno y plata sin interés económico. La mineralización en el área consiste de limonitas de fierro y cobre en la zona de oxidación, calcocita secundaria en la zona de enriquecimiento, pirita y calcopirita en la zona de sulfuros primarios.

Las limonitas son la expresión en superficie de la mineralización primaria, se distribuyen irregularmente en el área pero en general predominan limonitas de fierro sobre cobre; la concentración de las limonitas está relacionada al grado de alteración, puesto que las zonas de mayor alteración son las que presentan una mayor concentración de limonitas; en esta zona se llegan a ver en fracturas minerales de cobre típicos de la zona de oxidación como son: malaquita, azurita y turquesa. La zona de oxidación presenta un espesor irregular que varía desde 3 hasta 85 m, siendo más potente en la porción oeste del área.

En la zona de enriquecimiento la calcocita secundaria es el mineral más importante desde el punto de vista económico. La calcocita se presenta con una distribución irregular en el área, como un reemplazamiento incipiente de pirita y en menor proporción de calcopirita, en un manto orientado NW-SE (ver figura VI.2.1.2.), con dimensiones en planta de 1650 m x 170 m, tiene variaciones en espesor entre 7 y 105 m con un promedio de aproximadamente 30 m; en algunos casos varía drásticamente de espesores potentes a espesores delgados en pocos metros

horizontales; estos cambios drásticos se observan sobre el mismo alineamiento NW-SE. La calcocita se presenta diseminada o en delgadas vetillas, reemplazando parcialmente a pirita y en menor proporción a calcopirita. El contacto superior entre la zona de enriquecimiento y oxidación en general se define bien con límites muy marcados, aunque en algunas partes sí puede observarse un cambio gradual, el contacto inferior entre la zona de enriquecimiento y los minerales primarios en general es gradual, aunque en algunos lugares de la porción SE se define muy bien coincidiendo con el contacto entre rocas volcánicas y granodiorita. Las mejores zonas de enriquecimiento tanto en espesor como en ley se presentan en la porción SE, lo que puede deberse a una roca más favorable con más fracturamiento y/o brechamiento lo que propició la lixiviación y el reemplazamiento de pirita y calcopirita.

El enriquecimiento se presenta en una forma más regular en las rocas volcánicas con un reemplazamiento parcial de pirita y calcopirita; en el pórfido el reemplazamiento de pirita y calcopirita por calcocita es menor; la calcocita se encuentra sólo como película; en la diabasa el enriquecimiento es más irregular, sólo como delgadas películas ó en fracturas, se restringe a los diques de grano fino en donde tiende a acuñarse la mineralización en parches estériles entre el manto de calcocita, debido a la poca permeabilidad de los diques de grano fino. Con respecto a la alteración, la mineralización se presenta tanto en cuarzo-sericita como en caolín; influye mas ó menos en forma directa, el grado de alteración.

En la zona de sulfuros primarios la pirita se encuentra ampliamente distribuida en el área en concentraciones de 1 a 2% relacionada a zonas de alteración; llegan a presentarse localmente concentraciones altas de 4 a 5%; asociadas a la pirita pero en mucho menor proporción se presenta también calcopirita; ambas se presentan diseminadas, en delgadas vetillas ó como rosetas en vetillas de cuarzo. En la porción E del cuerpo se tiene un ligero incremento de calcopirita diseminada, sobre todo en la diabasa. Se observan trazas de molibdenita en vetillas de cuarzo. Los sulfuros primarios se distribuyen en forma regular en el área en todas las unidades litológicas, donde predomina siempre la pirita sobre la calcopirita.

En algunos barrenos de la porción central se observa un fenómeno en donde existen dos zonas de enriquecimiento separadas por una zona fuerte de oxidación; la explicación a esto puede ser un fracturamiento de tendencia más horizontal producido en los contactos con los diques de diabasa, lo cual propicia oxidación en la porción inferior de zonas enriquecidas previamente, enriqueciendo otra zona a profundidad; otra explicación puede ser la presencia de diques de diabasa de grano fino con muy poca permeabilidad, lo cual propicia zonas de enriquecimiento restringidas al contacto superior e inferior produciendo zonas de enriquecimiento separadas, aunque no se tiene una explicación definitiva a este fenómeno, por lo que se pudo observar cualquiera de las dos explicaciones arriba mencionadas o una combinación de ambas puede ser la causa.

En el yacimiento de Mariquita y de acuerdo a un orden de sucesión, los minerales susceptibles de beneficio económico son: la calcopirita que es el mineral primario característico de los pórfidos cupríferos típicos, continúan los óxidos de cobre que tiene una distribución pobre e irregular entre los que están malaquita, azurita y turquesa, por último la calcocita que es el mineral económico más importante y el cual es definitivamente secundario.

6.2.5. HISTORIA GEOLOGICA.

El distrito de Cananea se localiza en la sub-provincia fisiográfica de Sierras y Valles Paralelos, también es parte de la provincia de Pórfidos de Cobre de Norteamérica. El área fue parte del arco magmático del Triásico al Terciario Temprano y que fue afectado por la orogenia Laramide del Cretácico al Terciario Temprano (Coney, 1976). Stocks porfídicos intrusionan durante el Terciario y son responsables de la mayor parte de los pórfidos de cobre en Arizona, Nuevo México y Norte de México (Titley, 1982). La región posteriormente fue afectada por un fallamiento tensional que se inició en el Mioceno; esto produjo un fallamiento NW-SE y dio como resultado la actual topografía de Sierras y Valles y la inclinación del distrito hacia el este. Las rocas más antiguas están cubiertas por rocas volcánicas de composición intermedia a ácida depositadas entre el Triásico y el Terciario Temprano; esta secuencia volcánica se inicia con la Formación Elenita que consiste de flujos, tobas y aglomerados de

composición dacítica-andesítica; posteriormente la Formación Henrietta que sobreyace discordantemente a la Formación Elenita y que marca una evolución temporal a un vulcanismo más félsico. Un fallamiento N45W a N60W corta la Formación Elenita, pero es anterior a la Formación Henrietta. El vulcanismo continúa durante el Cretácico Tardío con la depositación de la Formación Mesa, la cual se depositó discordantemente sobre una superficie ya erosionada.

En forma casi contemporánea a la Formación Mesa se emplazaron intrusivos del Cretácico Tardío al Terciario Temprano, la Granodiorita Cuitaca la cual tiene una amplia distribución en el área, se le asignó una edad por pruebas radiométricas de 64 ± 3 m.a. para la principal fase de actividad (Anderson y Silver, 1977). El fallamiento N-NE fue aproximadamente contemporáneo con la actividad ígnea Laramídica. Durante el Paleoceno-Eoceno, 58 m.a. (Comico, Ltd: Lab.) se emplazaron una serie de pórfidos cuarzo-feldespáticos, posiblemente como una etapa tardía y diferenciada de la Granodiorita Cuitaca, estos intrusivos se emplazan a lo largo de un tren estructural NW-SE; la mineralización del distrito está asociada a esos stocks.

La historia geológica del área Mariquita, se puede resumir brevemente de la siguiente manera: depositación de rocas volcánicas, en el área de Mariquita sólo aflora la Formación Henrietta, después el emplazamiento de la Granodiorita Cuitaca en el Terciario Temprano, intrusiona a las rocas volcánicas de la Formación Henrietta del Cretácico y produce brechamiento de contacto, posteriormente se emplaza la Diabasa Mariquita como

diques potentes, en el área de Mariquita los diques se emplazan en zonas de debilidad formadas en el contacto volcánicas-granodiorita y produce más brechamiento y fracturamiento, lo que propicia la formación de zonas favorables para alterarse y mineralizarse; por último se emplazan pórfidos feldespáticos que son los últimos intrusivos del Terciario; a una etapa hidrotermal inmediatamente posterior se relaciona la alteración y mineralización del área. Los pórfidos se encuentran en la porción SE y NW y las soluciones hidrotermales migran más en forma lateral que vertical aprovechando zonas favorables de fuerte permeabilidad preparadas previamente, como son los fracturamientos y/o brechamientos; los fracturamientos presentan un marcado alineamiento NW-SE que son los alineamientos regionales.

CAPITULO VII.

7.- EVALUACION

7. EVALUACION.

El proyecto Mariquita fue estudiado desde fines de los años sesentas, por diferentes compañías que hicieron trabajos de detalle en superficie consistentes en geología superficial con especial atención en litología, alteración y estructuras; este trabajo fue llevado a cabo con base en planos topográficos a diferentes escalas; posteriormente, se desarrollaron muestreos geoquímicos tanto de roca como de sedimentos de arroyo; también se llevaron a cabo levantamientos geofísicos con el método de polarización inducida. Con los resultados de los estudios anteriores se establecieron objetivos de barrenación, que concluyeron con una etapa de barrenación de diamante, con lo cual se indicó mineralización de baja ley tipo pórfido, pero con poco tonelaje. Fue hasta la década de los 80's cuando Compañía Minera Constelación puso otra vez interés en el área; a fines de los 80's elaboró un programa de barrenación donde combinaron los sistemas de barrenación con diamante y los de circulación inversa; observaron que los dos sistemas eran compatibles y que no había diferencia en los resultados obtenidos con uno u otro de los sistemas, sino que se complementaban. En esta etapa de barrenación se definió un cuerpo de baja ley y poco tonelaje, que si bien no es un cuerpo de interés económico desde un beneficio tradicional de los pórfidos cupríferos por flotación y fundición, sí es económico en el caso de Mariquita por tratarse de mineral de enriquecimiento susceptible de ser beneficiado por sistemas de

lixiviación o extracción por solventes; para lo cual se hicieron pruebas de laboratorio, las cuales fueron positivas.

Para la evaluación de reservas en Mariquita se usó toda la información de barrenación disponible, tanto de diamante como de circulación inversa. El cálculo se hizo por dos métodos diferentes: por polígonos y por secciones.

En el método por polígonos se usó la media de la distancia entre barrenos para crear los vértices del polígono, el área del polígono fue calculada manualmente con planímetro y el espesor del bloque fue dado por el espesor mineralizado del barreno, con lo cual se hizo el cálculo del volumen del bloque generado por cada barreno, para el cálculo del tonelaje se usó un peso específico promedio de 2.5 gr/cm^3 . El método por polígonos dio un mayor tonelaje pero se consideró que no era confiable debido a la irregularidad del cuerpo mineral, por lo que el espesor mineralizado de un barreno no se puede considerar representativo de todo un polígono.

Para el método por secciones se emplearon secciones paralelas orientadas E-W, las cuales se interpretaron en este sentido, pero con el apoyo de secciones N-S para una mejor interpretación de las zonas mineralizadas, sobre todo en los acúñamientos de la mineralización. Para el área de influencia de cada sección se tomó en cuenta la suma de la distancia de las secciones inmediatas tanto al S como al N entre 2. El cálculo de las áreas se hizo manualmente con planímetro, multiplicándose por el área de influencia para obtener el volumen del bloque generado por cada barreno, y se multiplicó por el peso específico

considerado como 2.5 gr/cm^3 para obtener toneladas, sumándose finalmente los tonelajes parciales de cada sección para obtener el tonelaje total. Aunque el tonelaje obtenido con este sistema fue menor que lo obtenido con el sistema por polígonos, se consideró más confiable, puesto que es más conservador y más adaptado a la irregularidad del cuerpo mineralizado.

Para el cálculo de la ley se asignó el promedio del intervalo mineralizado de cada barreno como ley promedio del bloque generado por el barreno. Para el cálculo de la ley promedio del cuerpo se ponderaron las leyes y tonelajes de cada bloque, al multiplicar el tonelaje por ley en cada bloque, para obtener que la Ley Promedio = $\frac{\sum (\text{tonelaje} \times \text{ley})}{\sum \text{tonelaje}}$. Posteriormente se han efectuado otras revisiones con el apoyo de computadoras, sin tener cambios sustanciales en el tonelaje y ley, lo cual da la certeza de que los resultados de la evaluación del yacimiento son confiables: Si bien en el caso de Mariquita no se llegó a un tonelaje como el de los pórfidos de cobre típicos, se llegó a un tonelaje y ley suficientes para ser un yacimiento de rendimiento económico, como lo indican los estudios de viabilidad efectuados.

CAPITULO VIII

8.- METODOS DE EXPLOTACION

8.1. METODOS DE EXPLOTACION SUBTERRANEOS.

8.2. METODOS DE EXPLOTACION SUPERFICIALES.

Los métodos de explotación para los yacimientos de pórfidos cupríferos se dividen en:

- a).- Métodos de explotación subterráneos.
- b).- Métodos de explotación superficiales.

8.1 METODOS DE EXPLOTACION SUBTERRANEOS.

De los métodos de explotación subterráneos, el más usado para la explotación del cobre es el de hundimiento por bloques.

Este método es utilizado para la explotación de yacimientos de pórfidos cupríferos, en donde existen rocas semiconsistentes, propensas al derrumbe espontáneo debido a su fracturamiento, crucero o esquistosidad.

El método consiste en delimitar bloques por todos sus lados, colocar explosivos y ocasionar con éstos el hundimiento de dichos bloques; el mineral se extrae por la parte inferior, rellenándose el hueco con el material de la parte superior del bloque (sin valor económico). Precisa de un gran número de obras de preparación, por este motivo el tiempo empleado y la inversión para extraer el mineral son muy elevados.

Solamente cuando la profundidad de los yacimientos es muy grande o cuando las condiciones climáticas no permiten usar un método de explotación superficial, es recomendable el uso de este método (fig.VIII.1.1).

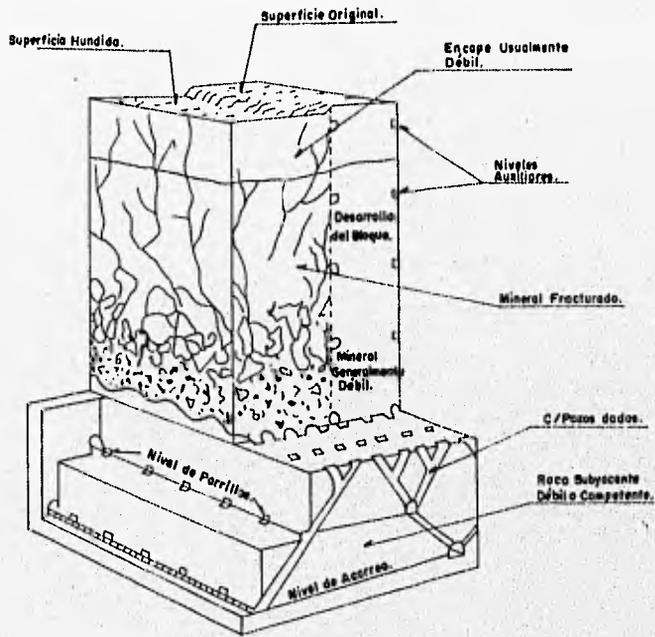
En México no es usado pero en otros países como E.U.A., Canadá y sobre todo en Chile (San Manuel, El Salvador, el Teniente) es usado con mucho éxito.

8.2 METODOS DE EXPLOTACION SUPERFICIALES.

De los métodos de explotación superficiales el más usado para la explotación de yacimientos de pórfidos de cobre es el de Tajo Abierto (ver fig.VIII.2.1.).

Se define como el conjunto de excavaciones al aire libre o a la intemperie, que se practica con el fin de extraer los minerales de cobre, de sus yacimientos respectivos y cercanos a la superficie del terreno (menos de 170 m de profundidad).

Para efectuar estos trabajos se debe hacer una planeación basada en los datos obtenidos de la exploración, a través de la perforación, con esta información se determina la profundidad, dimensiones y forma del yacimiento, así como la distribución de los contenidos de cobre y de los demás minerales existentes.



**FIG. VIII. 1.1. HUNDIMIENTO POR BLOQUES.
(MARTINEZ, TESIS PROFESIONAL, 1994)**

(TOMADO DE DEL ANGEL, TESIS PROFESIONAL, 1990)

Esquema de explotación a cielo abierto.

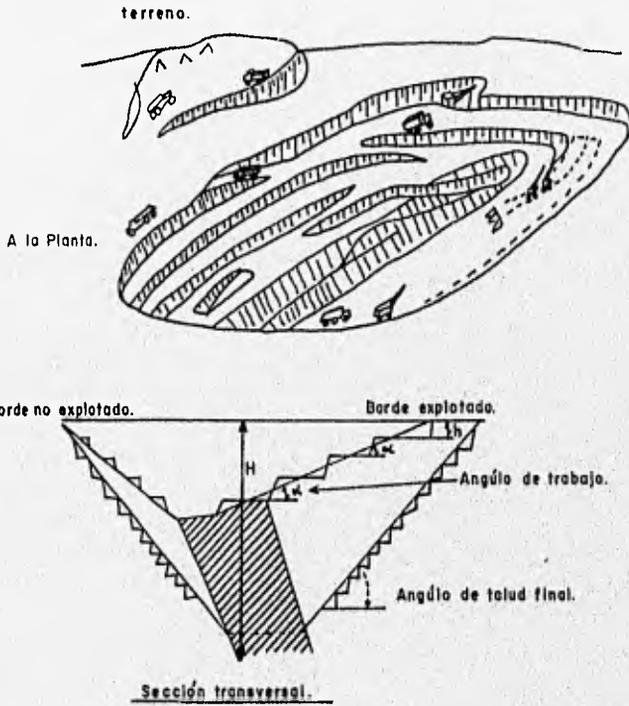


FIG. VIII. 2.1. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN SISTEMA DE EXPLOTACION A TAJO ABIERTO.

Con estos datos se puede desarrollar también la infraestructura necesaria (caminos, rampas e instalaciones auxiliares).

La gran difusión de este método, se explica por toda una serie de ventajas sobre los métodos subterráneos, así como a las innovaciones tecnológicas desarrolladas después de la Segunda Guerra Mundial.

Cuatro fueron las innovaciones tecnológicas más importantes:

- 1.- Introducción de la perforadora rotaria la cual aumenta la velocidad de perforación; se necesita menos personal que el necesario para usar la perforación por pulseta (golpe).
- 2.- Redujo el costo en el uso de dinamitas con la introducción de las mezclas "ANFO" (Amonium-Nitrate-Fuel-Oil).
- 3.- Incremento de la capacidad de los equipos de excavación y rezagado.

Se introdujeron innovaciones como las: a) Palas de ataque. Esta pala está montada sobre orugas y con radio de giro de 360°, se accionan eléctricamente, b) Dragalinas.- palas excavadoras de cucharón de arrastre.

- 4.- Incremento de la capacidad de los equipos de acarreo.
Después de la Segunda Guerra Mundial se empezaron a usar camiones con capacidades mayores de 60 Ton.

Dentro de los diferentes tipos de minado a Tajo Abierto para la explotación de cobre los más importantes son:

- 1.- De un solo banco.- Se tiene un solo nivel de operación y la altura normal de los bancos varía de 4 m (en roca floja) a 6 m.
- 2.- Bancos múltiples.- Se usan en criaderos o mantos con espesores mayores de 16 m. El ancho de los bancos varía de 6 m a 25 m, su altura varía de 6 a 20 m, esto depende del tamaño de los equipos de acarreo.

El promedio de altura en tajos grandes tipo Cananea y la Caridad es de 16 m.

Estos bancos pueden formar una espiral hasta el fondo del tajo, o bien, pueden ser bancos horizontales unidos por rampas con pendientes del 8 al 12%.

Cuando un yacimiento es explotado a tajo abierto, la zona a explotar se divide en capas horizontales. Los tajos adquieren en el proceso de explotación una forma escalonada, puesto que se explotan varias capas horizontales simultáneamente.

Las partes del cuerpo que toman la forma de un escalón se llaman bancos. En los bancos se pueden distinguir los siguientes elementos:

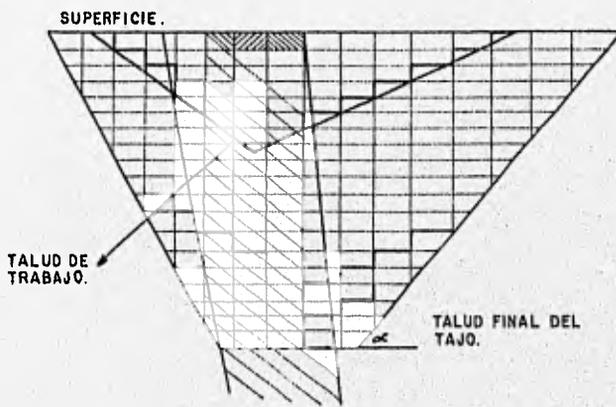
- 1.- Banco superior o inferior.
- 2.- Cara libre del banco.
- 3.- Inclinação o ángulo de talud del banco.- (ver fig.VIII.2.2) El ángulo de talud es el ángulo formado por la intersección del plano o cara del banco con el plano horizontal.
- 4.- Altura del banco.- Es la distancia vertical entre el nivel superior e inferior del banco, ésta varía de acuerdo a varios factores como el equipo de perforación o las necesidades de producción.
- 5.- Ancho del banco.- En la explotación a tajo abierto se extrae el mineral y el material no aprovechable o tepetate.

El proceso de extracción del mineral recibe el nombre de trabajo de extracción y el de remoción de tepetate, descapote.

El proceso de los trabajos de explotación es el siguiente:

- a) Perforación o barrenación.
- b) Voladura o disparo.
- c) Cargado o rezagado.

SECUENCIA DE MINADO EN UN TAJO ABIERTO.



(TOMADO DE DEL ANGEL, TESIS PROFESIONAL, 1990)

FIG. VIII. 2.2. ANGULO DE INCLINACION DE LOS TAJOS.

d) Acarreo del mineral a la planta de beneficio.

e) Acarreo del tepetate a los terreros.

En la mayor parte de los yacimientos de pórfidos de cobre en el mundo se usa este método para su explotación: ejemplos de ellos son México, E.U.A. (aproximadamente 80%), Rusia y Chile.

CAPITULO IX

9.- BENEFICIO Y METALURGIA.

9.1. METODO DE FLOTACION.

9.2. METODOS DE LIXIVIACION.

9.-BENEFICIO Y METALURGIA.

Los métodos más utilizados para beneficiar los minerales producto de pórfidos cupríferos son: a) flotación y b) lixiviación.

9.1. METODO DE FLOTACION.

Debido a que los pórfidos cupríferos son de baja ley y no se pueden fundir directamente, el mineral debe ser concentrado previamente.

La aplicación del método depende de las condiciones específicas del mineral, así como de otras consideraciones tecnológicas y de sus posibilidades económicas.

Para la aplicación de éste se requiere como se dijo antes de la preparación del mineral; el cual es triturado y molido hasta convertirlo en polvo. Este polvo es mezclado con agua y algunos reactivos y posteriormente la mezcla es introducida a las celdas de flotación; el principio de estas celdas es la agitación y aereación, estos procesos producen un burbujeo. La acción de los reactivos tiende a adherir las partículas de mineral de cobre a las burbujas, las cuales emigran hacia la superficie de la celda. Esta espuma es derramada sobre un canal junto con el mineral de cobre el cual es secado y enviado a la fundición. El mineral sin

valor económico tiende a quedarse dentro de la celda de flotación, pero debido al flujo existente es enviado al exterior de las celdas, hacia la presa de jales.

Los concentrados de cobre obtenidos por flotación se someten a un proceso de tostación o secado con el fin de eliminar la humedad y los productos químicos empleados en la flotación, que dificultan el manejo de dichos concentrados en el proceso de fundición.

La fundición se realiza principalmente en hornos de reverbero, cuya función es fundir los concentrados de cobre para formar la mata y la escoria y permitir que se segreguen en dos capas a fin de que se puedan separar para su posterior tratamiento o desecho.

La mata fundida se coloca en un convertidor al cual se le inyecta aire a través de toberas; este proceso ocasiona la oxidación del sulfuro ferroso. El anhídrido sulfuroso generado escapa por la boca del convertidor, y el óxido ferroso reacciona con la sílice del fundente o con el revestimiento del convertidor si éste es de tipo ácido y forma una escoria que flota en la superficie.

Al final de este proceso de escorificación, cuando el azufre asociado al hierro se ha oxidado, se inicia el proceso para la obtención del cobre, en este proceso el sulfuro ferroso se oxida y forma óxido cuproso, el cual a su vez, se reduce con el sulfuro

cuproso todavía existente, queda el cobre libre y se forma anhídrido sulfuroso.

Estas reacciones continúan hasta ver eliminado todo el azufre, lo que puede determinarse observando el color de la flama la cual cambia de roja a verde y finalmente a color azul en la etapa de soplado. El cobre obtenido mediante este proceso es llamado Cobre Blister (Cobre ampollado), el cual es de una pureza de entre el 99.0 al 99.4 % de cobre.

El último paso en este largo proceso es el de refinado, con el cual se eliminan las últimas impurezas que aún le quedan, tanto solubles (Fe, As, Ni y Zn) como insolubles (Se, Te, Au, Ag y Pb). Al final de todo este desarrollo, el cobre obtenido tiene una pureza del 99.94 al 99.97% de cobre el cual se funde en lingotes para su posterior comercialización.

Cabe señalar que este método es el más utilizado en México y el mundo para beneficiar el cobre extraído de pórfidos cupríferos.

9.2. METODOS DE LIXIVIACION.

Este proceso también es conocido como hidrometalurgia y consiste en la disolución del cobre que se encuentra en los minerales en un medio acuoso y finalmente separado por precipitación química o electrolítica (procesos húmedos) para la recuperación del cobre.

Este método se emplea en minerales de cobre oxidados, sulfuros, carbonatos y algunas veces en cobre nativo.

Las instalaciones para extraer el cobre por lixiviación son en promedio un 40% más económicas que las instalaciones necesarias para extraer la misma cantidad de cobre por el método de fusión.

Existe una amplia variedad de solventes que pueden ser utilizados en este proceso, la elección del solvente adecuado depende de las características del mineral y las condiciones de cada caso.

Los métodos de lixiviación más utilizados son:

9.2.1. METODO DE LIXIVIACION INSITU.

Se aplica a yacimientos con un grado mínimo aprovechable, los cuales no justifican la aplicación de otro método. Este consiste en aplicar las soluciones lixiviantes a los minerales en su lugar de origen; para la buena aplicación de este método se requiere de la presencia de fracturas para que por éstas fluyan las soluciones. En caso contrario se debe aumentar la superficie de contacto y provocar fracturamiento mediante explosivos.

9.2.2. METODO DE LIXIVIACION POR LOTES.

Este método es similar al anterior y consiste en sacar el mineral para que tenga contacto con el aire, logrando que se oxiden los sulfuros a sulfatos y agregando las soluciones lixiviantes. Este proceso es largo aun cuando se ha acelerado al hacer las reacciones exotérmicas. El manejo de grandes tonelajes hace que se reduzcan los costos.

9.2.3. METODO DE LIXIVIACION POR PERCOLACION.

Es el método más utilizado, es un trabajo a contra corriente con la particularidad de que el mineral debe tener un mayor contenido de cobre que en los otros métodos.

Este método consiste en poner el mineral en tanques interconectados de tal forma que se hagan pasar las soluciones lixiviantes de un tanque a otro. La solución obtenida al final de este recorrido es enviada a la recuperación; en cada recorrido de la solución, los minerales contenidos en los tanques son cambiados. La solución lixiviante nueva se vierte en el tanque que contiene el mineral de menor concentración. Con este sistema la solución más concentrada se pone en contacto con el mineral más rico y la menos concentrada con el mineral de menor contenido de cobre.

9.2.4. METODO DE LIXIVIACION POR AGITACION.

Mediante este proceso se mantienen en suspensión las partículas finas por medio de agitación neumática o mecánica. Este método es utilizado para minerales de alta ley o bien para concentrados, para los cuales no es factible el uso de percolación.

En la actualidad se ha desarrollado otro método de lixiviación, conocido como lixiviación bacteriológica. Esta técnica consiste en la exposición del mineral al aire de la atmósfera y a una bacteria llamada *theobacillum ferroxidans*, logrando mediante las reacciones producidas la lixiviación de los minerales de cobre.

CAPITULO X

CONCLUSIONES

- Todos los yacimientos de pórfidos cupríferos están relacionados espacial y genéticamente con cuerpos intrusivos porfídicos, cuyo emplazamiento tuvo lugar relativamente a poca profundidad, en forma pasiva y que corresponden a pórfidos granodioríticos, adamelíticos, dioríticos, tonalíticos, dacíticos, latíticos, etc.

- Todos los pórfidos cupríferos han experimentado oxidación y todos han sido enriquecidos secundariamente (excepto Ajo y Copper Mountain).

- Es conveniente utilizar los diferentes criterios de prospección en la localización de yacimientos de pórfidos de cobre ya que estos delimitan áreas en donde las características geológicas sugieran directa o indirectamente la presencia de estos yacimientos.

- Los criterios de prospección se derivan de una serie de conclusiones prácticas acerca de la estratigrafía y petrografía de los diferentes tipos de rocas y de la estructura y mineralización de los yacimientos.

- Los estudios geoquímicos son muy importantes en la prospección de yacimientos cupríferos ya que indican zonas anómalas y reducen las áreas de exploración a las localidades concretas de mayor interés.

-Los estudios geofísicos son muy importantes; por una parte complementan la exploración y, en algunos casos, indican con bastante precisión la ubicación de la mineralización.

-El método geofísico que da mejor resultado en la búsqueda de un yacimiento de pórfidos cupríferos es el de polarización inducida.

-Los métodos geoquímicos que dan mejores resultados en el estudio de yacimientos de pórfidos cupríferos son: a) el muestreo de rocas (esquirlas) y b) el muestreo de sedimentos de arroyo.

- La necesidad de las grandes compañías productoras de metales de incrementar constantemente sus reservas ha propiciado que los sistemas de exploración mejoren; tanto los métodos de exploración indirecta (geoquímica y geofísica) como los métodos directos (barrenación, obras), se han eficientado buscando que la exploración sea más agresiva y más confiable.

Los avances en la tecnología de explotación y metalurgia de los yacimientos, buscando abaratar los costos de producción, hacen que las reservas minerales se incrementen constantemente, ya que si hay yacimientos que al momento de su evaluación no son económicos, al mejorar y optimizar los sistemas de explotación y/o recuperación de los metales, pueden pasar de ser yacimientos no económicos o marginales a ser yacimientos de rendimiento económico. Esto puede ser ejemplificado con el caso de Mariquita, ya que aunque no es un pórfido de cobre típico en cuanto a tonelaje se refiere, es un depósito que en la actualidad es

económicamente explotable como lo indican los estudios de viabilidad efectuados. Esto puede ser gracias a la actualización de las técnicas de extracción de cobre por solventes, con la cual yacimientos de tonelaje pequeño y baja ley pueden ser económicamente explotables.

Es importante que al momento de hacer la evaluación de un depósito se tomen en cuenta todas las posibilidades antes de decidir que un área no tiene interés, y si en este momento el depósito es económicamente marginal se debe tener en cuenta que en un futuro cercano puede llegar a ser un yacimiento de rendimiento económico.

- En la selección del método de explotación para un pórfido cuprífero se deben tomar en cuenta varios factores como son: la profundidad del yacimiento, el que los yacimientos contengan o no grandes volúmenes de mineral, que la topografía del terreno no impida la operación de la mina y las condiciones climáticas de la zona

Esto permite seleccionar el método más apropiado para la explotación del yacimiento, haciendo que esta operación sea lo más rentable posible.

BIBLIOGRAFIA:

- Alarcón López Ubaldo., Estudio geológico y geoquímico de la porción sureste de la sierra de San Antonio, estado de Sonora, en relación con sus posibilidades cupríferas., tesis profesional, 1968.
- Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 1995., Consejo de recursos minerales, SEMIP.
- Arroyo E., Cerón C., García H., Rodríguez A. y Rubinstein F., Geología, prospección y aspectos económicos de los yacimientos de cobre, tesis profesional, UNAM 1990.
- Ayala R. F., 1981, The porphyry copper deposit at Cananea, Sonora, México. Geol. Soc. Am., abstr. programs 13.0
- Benitez J. A., 1970, Proyecto de exploración por cobre diseminado en el área de Mariquita, Cananea, Sonora, Tesis Profesional, U N A M.
- Bateman A.M., Yacimientos minerales de rendimiento económico, Ed. Omega, Barcelona, quinta Ed. 1978.
- Bloom Harold. Geochemical exploration as applied to copper-molibdenum deposits., Geology of the porphyry copper deposits southwestern North America., Titley & Hicks.
- Brand Arthur A. Geophysics in the exploration for Arizona porphyry coppers, geology of the porphyry copper deposits southwestern North America., Titley & Hicks.

- Cendejas C.E., y Bárcenas R.A., Evaluación geológica del pórfido cuprífero de El Transval, Mpio. de Cumpas, Edo. de Sonora., tesis profesional., ESIA, IPN, 1976.
- Chaffee Maurice A. Geochemical prospecting techniques for porphyry copper deposits (southwestern United States and northern México., Geology of the porphyry copper deposits southwestern north América., Titley & Hicks.
- Chavelas Lluch F., Geología y prospección minera en el área "Aire Libre", municipio de Teziutlán, Puebla., tesis profesional, 1991.
- Cia. Minera Constelación, S. A. de C. V. , 1988 - 1990, Información privada de exploración, planos, secciones, cálculos, etc. no publicada.
- Coolbaugh, D. F., Geophysics and geochemistry in the discovery and development of the La Caridad porphyry copper deposit, Sonora, Mexico: In geophysics and geochemistry in the search for metallic ores: Peter J. Hood, editor: Geological survey of Canada, economic geology report 31, p. 721 - 725, 1979.
- Enciclopedia Británica, E.U.A., 1992-1993.
- Garza González Vélez C.E., Metalogénia del distrito minero de Tiámaro, Mich. y sus relaciones con los yacimientos de tipo "cobre porfídico", tesis profesional, UNAM, 1978.
- Gran enciclopedia Larousse, Tomo V.

- Hernández Velázquez J., Geología y prospección minera del área Palmar Chico, municipio de Amatepec, México., tesis profesional, 1990.
- Investigación sobre mineral de cobre porfídico en las provincias de Mendoza, Neuquen y San Juan Argentina., Naciones Unidas, New York 1970.
- Jensen M.L., & Bateman A.M. Economic mineral deposits., Ed., John Wiley & Sons, Third edition U.S.A. 1979.
- Jerome S. E., Some features pertinent in explorati6n of porphyry copper deposits., Geology of the porphyry copper deposits southwestern north América., Titley & Hicks.
- Kusvart Milos and Bohmer Miloslav., Prospecting and exploration of mineral deposits. developments in economic geology., House of the Czechoslovak academy.
- Lahee Frederic H., Geología práctica, editorial omega, 1958.
- Lee Moreno J. L. Chaffee M. A., Resultados de investigaciones geoquímicas en la vecindad del pórfido cuprífero de La Caridad en el noreste de Sonora, México, comparando muestras de sedimentos de arroyo, concentrados de batea y vegetación., reporte práctico.
- Lemas C. M. 1983, María project, Cananea district, Mexico. no publicado.
- Mc. Kinstry Hugh Exton, Geología de Minas., editorial omega, 1977.

- Pérez S.E., Los pórfidos cupríferos de Sonora-Una interpretación metalogenética., Depto. geología universidad de Sonora, México, Mem. VII Comv. Nacional Sociedad Geológica Mexicana Pag.194-212
- Ramos A., 1989, Final report, Mariquita project. no publicado.
- Rosales Gómez Jesús, Estudio geológico en la exploración del cobre en el área de La Colmilluda, municipio Churumuco, Michoacán., tesis profesional, 1971.
- Sillitoe H.R., A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits., Economic geology Vol. 67, 1972 Pag. 184-197
- Sutulov Alexander., Copper porphyries, editorial, Miller Freeman publications, 1975.
- Titley S.R., Intrusion and wall rock porphyry copper deposits., Economic geology Vol. 67, 1972 Núm. 1 Pag. 122-123.
- Titley S.R. Advances in geology of the porphyry copper deposits southwestern north America., The university of Arizona press/Tucson, Arizona 1982. Pag. 7-33 y 297-309.
- Turner A.L. Rainer G. L., Kleinkopf M.D., Lee J. L., 1982, Regional northeast-trending structural control of mineralization, northern Sonora, Mexico. Economic geology, vol. 77, p. 25-37.

- Valentine W. G., 1936, Geology of the Cananea mountains, Sonora, México. Geol. Soc. America Bull, vol. 47, p. 53-86.
- Velasco J. R., 1966, Geology of the Cananea district; in geology of the porphyry copper deposits, southwestern north America, university of Arizona, p. 245-249.
- Wodzicki W. A., 1992, The Maria deposit, Sonora, Mexico: A Telescoped porphyry system. thesis for the degree master of science in geology. University of California.
- Zendejas Mendivil Samuel., Exploración del cobre disseminado, en el proyecto Catalinas, del distrito minero de Cananea, Sonora. Tesis profesional.1970.

MAPAS E ILUSTRACIONES

- Fig. I.2.1. Vista polar de la distribución de los pórfidos cupríferos.
- II.3.1 Relación entre leyes-tonelajes de los pórfidos cupríferos.
- II.3.2 Leyes y tonelajes de los depósitos de pórfidos cupríferos y pórfidos cobre-molibdeno en la Cuenca del Pacífico.
- II.3.3 Producción y reservas de los pórfidos cupríferos mexicanos.
- II.5.1 Diagrama esquemático de un sistema de pórfido cuprífero.
- II.5.2 Escala de estabilidad de algunos minerales de alteración, según la temperatura y acidez.
- II.5.3 Zonas concéntricas de alteración y mineralización en un pórfido cuprífero.
- II.7.1 Edades de los pórfidos cupríferos.
- II.7.2 Edades de los yacimientos de pórfidos de Cu-Mo.
- II.8.1 Cinturones de pórfidos cupríferos en relación a cinturones orogénicos y límites de placas.
- II.8.2 Representación esquemática de la génesis de los depósitos de pórfidos cupríferos en el contexto de placas tectónicas.
- II.8.3 Características de los depósitos de cobre disseminado en varios ambientes.
- III.2.1 Tipos de limonitas en criaderos de cobre de tipo pórfido cuprífero.
- IV.1.1.1 Relación entre la mineralización y los parámetros geofísicos.
- IV.1.6.1 Aplicación de los métodos geofísicos en la prospección de depósitos de cobre porfídico.
- IV.1.6.2 Efecto de la polarización inducida.
- IV.2.2.1 Modelo geoquímico del depósito de pórfido de cobre de San Manuel Kalamazoo.

- IV.2.3.1 Mapa de localización de los depósitos de pórfido de cobre en el SW de E.U.A. y norte de México.
- IV.2.4.1 Distribución del molibdeno en sedimentos de arroyo en la vecindad del depósito de la Caridad, Son. México.
- IV.2.6.1 Distribución de amapola con relación al depósito de cobre de Butte, Arizona.
- V.1.1 Plano de localización de Mariquita.
- V.2.1 Mapa de provincias fisiográficas.
- VI.1.1.1 Columna estratigráfica generalizada del distrito de Cananea.
- VI.2.1.1 Mapa geológico del Proyecto Mariquita.
- VI.2.1.2 Sección geológica del Proyecto Mariquita.
- VI.2.3.1 Mapa de alteraciones del Proyecto Mariquita.
- VIII.1.1 Hundimiento por bloques.
- VIII.2.1 Diagrama esquemático minado a cielo abierto
- VIII.2.2 Secuencia de minado en un tajo abierto (ángulo de inclinación de los tajos).