

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo

**DETERMINACIÓN DE LOS CONTROLES DE MINERALIZACIÓN DEL
DEPÓSITO DE ALTA SULFURACIÓN CIÉNAGA NORTE,
HUALGAYOC-CAJAMARCA**

Presentado Por:

Bach. José Luis Quispe Jara

Asesor

M.Sc. José Alfredo Siveroni Morales

Cajamarca – Perú

- 2015 -

DEDICATORIA

A mi familia, especialmente a mi Madre, Martha Irene Jara Quispe, a mi Padre Marcelino Quispe Tanta y a mis hermanos, por el apoyo incondicional y constante brindado durante mi formación académica, profesional y personal; a mis hijos Karen, Jimena y Sebastián; Así como a mí amada esposa Rosa Ines Ganoza Alcántara, por su apoyo y motivación para superarme cada día.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la E.A.P.IG., de la Universidad Nacional de Cajamarca, por sus enseñanzas y apoyo incondicional en el desarrollo de la Tesis.

De la misma manera mi agradecimiento a todo el equipo de geólogos de Minera Coimolache, de manera especial al superintendente de Geología Mina y Desarrollo Ing. Percy Zamora Díaz, por promover y permitir que éste estudio se lleve a cabo.

Un reconocimiento especial a quienes de alguna manera colaboraron en la ejecución de la Tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FOTOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RELACIÓN DE PLANOS	xi
LISTA DE ABREVIACIONES	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.	3
2.2 BASES TEÓRICAS.	4
2.2.1 Depósitos epitermales de alta sulfuración (HS).....	4
2.2.2 Alteraciones hidrotermales	6
2.2.2.1 Factores que controlan las alteraciones hidrotermales en las rocas.....	6
2.2.2.2 Reacciones de hidrólisis	7
2.2.3 Alteraciones Hidrotermales en los Depósitos de Alta Sulfuración	9
2.2.4 Las fallas	13
2.2.4.1 Análisis cinemático de fallas	15
2.2.4.2 Modelos de fracturación.....	18
2.2.5 En busca de los espacios para las masas minerales	20
2.2.6 Rocas Volcánicas.....	26
2.2.6.1 Flujos lávicos y domos silíceos en vulcanismo subaéreo.....	26
2.2.6.2 Lavas andesíticas	26
2.2.6.3 Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF (cuarzo- feldespato alcalino, plagioclasas y feldespatoideas)	27
2.2.7 Depósitos piroclásticos, sedimentario volcanogénico y volcanoclástico resedimentado.....	28

	Pág.
2.2.7.1	Depósitos de movimiento en masa y flujo en masa 28
2.2.7.2	Depósitos volcanoclásticos en suspensión 31
2.2.7.3	Clasificación de rocas volcanoclásticas 32
2.3	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS 33
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1	UBICACIÓN Y ACCESO 35
3.2	TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN 36
3.3	PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN 36
3.3.1	Evaluación de la información existente 36
3.4	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS Y ELABORACIÓN DE INSTRUMENTOS..... 37
3.4.1	Mapeo geológico 37
3.4.2	Perforación diamantina 37
3.4.3	Logueo geológico de sondajes diamantinos..... 38
3.4.4	Muestreo de sondajes diamantinos..... 39
3.4.5	Relogeo litológico de testigos 39
3.4.6	Elaboración de modelos geológicos 3D. 40
3.5	MATERIALES..... 40
3.5.1	Descripción de los programas utilizados 40
3.6	TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 41
3.6.1	Análisis de datos 41
3.6.2	Tratamiento de datos para modelo de alteraciones 3D 41
3.6.3	Tratamiento de datos para modelo litológico 3D 42
3.6.4	Tratamiento de datos para modelo Estructural 3D 43
3.6.5	Tratamiento de datos para modelo de oro 3D 43
3.7	GEOLOGÍA DISTRITAL 44
3.8	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 47
3.9	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO 47
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
4.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 50

	Pág.
4.1.1	Control litológico 50
4.1.2	Control estructural 58
4.1.3	Control de alteración hidrotermal 62
4.1.4	Distribución del oro y geometría del yacimiento 69
4.2	CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS 69
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1	CONCLUSIONES..... 73
5.2	RECOMENDACIONES 74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Clasificación genética de los tipos de depósitos piroclásticos, -----	33
Cuadro 2. Clasificación de la alteración del yacimiento Ciénaga Norte. -----	42
Cuadro 3. Clasificación de la litología del yacimiento Ciénaga Norte. -----	43
Cuadro 4. Cuadro de rango de leyes de oro del yacimiento Ciénaga Norte-----	44

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Brecha hidrotermal matriz óxidos de hierro – Sondaje C-59.-----	51
Foto 2. Brecha hidrotermal matriz sílice arenosa – Sondaje C-59.-----	51
Foto 3. Brecha hidrotermal matriz sílice (Brecha craquel) – Sondaje C-57. -----	52
Foto 4. Roca piroclástica - toba de cristales – Sondaje C-28.-----	52
Foto 5. Roca piroclástica - toba de ceniza– Sondaje C-57. -----	53
Foto 6. Roca piroclástica - toba de cristales y líticos - Sondaje C-75.-----	54
Foto 7. Roca hipabisal - dique andesítico – Sondaje CIN14-099. -----	54
Foto 8. Alteración Sílice masiva – sondaje CIN14-098. -----	62
Foto 9. Alteración Sílice arenosa (compacta) – sondaje C-75.-----	63
Foto 10. Alteración Sílice vuggy – sondaje C-28. -----	63
Foto 11. Alteración argilico avanzado sílice-alunita – sondaje CIN-55. -----	64
Foto 12. Alteración argilico avanzado sílice-pirofilita-alunita (textura patchy) – sondaje C-36.-----	64
Foto 13. Alteración argilica – sondaje CIN14-097.-----	65
Foto 14. Alteración propilítica – sondaje CIN14-099. -----	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Modelo conceptual, mostrando la relación entre los depósitos de alta sulfuración e intermedia sulfuración y un sistema pórfido. (Sillitoe y Hedenquist, 2003)-----	5
Figura 2. Ambientes en los que se forman fluidos ácidos y alteración argílica avanzada: A, hipógeno; B, "steam heated" y C, supérgeno (Sillitoe, 1993)-----	12
Figura 3. Los tres tipos de fallas de Anderson (Javier L, 1993)-----	13
Figura 4. Los tres tipos de fallas de Anderson y sus combinaciones (Javier L, 1993)-----	14
Figura 5. Tectoglífos - Criterios de sentido de movimiento de fallas (Modificado de Macharé, 2001).-----	18
Figura 6. Modelos de fracturación (Dube & Guha, 1992).-----	20
Figura 7. Compresión-extensión más típicas que pueden encontrarse en una zona de falla (adaptada de Davis y Reynolds, 1996)-----	21
Figura 8. Relieves tipo pull-apart y pop-up (adaptada de Davis y Reynolds, 1996)-----	22
Figura 9. Desarrollo de un dúplex en extensión y compresión con estructuras tipo flor negativa y positiva (adaptada de Woodcock y Fischer, 1986)-----	23
Figura 10. Principales estructuras asociadas a una zona de falla (caso, dextral), indicando los sectores favorables y desfavorables para albergar cuerpos minerales (Woodcock y Fischer, 1986)-----	24
Figura 11. Relaciones de corte entre fallas e incremento de la fracturación. Adaptada de Tripp y Vearncombe (2004).-----	25
Figura 12. Lava y brecha asociado con andesítica subaerea y flujos de lava dacíticos (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.). Modificado de Huppert et. Al. (1982) y Macdonald (1972)-----	26
Figura 13. Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF. Streckeisen (1976)-----	27
Figura 14. Principales formas como se generan los flujos piroclásticos (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.). Modificado de Macdonald (1972)-----	29
Figura 15. Características de los depósitos de las erupciones explosivas – depósitos piroclásticos primarios (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.)	30

Figura 16. Características de facies coherentes y autoclásticas de lavas y las intrusiones-sinc volcánica (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.)-----	32
Figura 17. Términos utilizados para rocas piroclásticas primarias (Fisher, 1966)-	33
Figura 18. Mapa de ubicación del yacimiento Ciénaga Norte. -----	35
Figura 19. Columna estratigráfica para el proyecto Tantahuatay. (Calizaya J, 2006 -----	45
Figura 20. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N75°E. -----	58
Figura 21. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N65°E. -----	59
Figura 22. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N30°W. -----	59
Figura 23. Diagrama de rosas con datos tomados en los sistemas de fracturamiento.-----	60

RELACIÓN DE PLANOS

	Pág.
Plano 1. Plano geológico Distrital.....	46
Plano 2. Plano geológico y de alineamientos estructurales.....	48
Plano 3. Plano geológico Ciénaga Norte.....	49
Plano 4. Modelo litológico vista en planta.....	55
Plano 5. Modelo litológico 3D.....	56
Plano 6. Sección E754750 Litología.....	57
Plano 7. Plano Estructural.....	61
Plano 8. Modelo de alteraciones vista en planta.....	66
Plano 9. Modelo de alteraciones 3D.....	67
Plano 10. Sección E754750 Alteraciones.....	68
Plano 11. Modelo de oro vista en planta.....	70
Plano 12. Modelo de oro 3D.....	71
Plano 13. Sección E754750 Isovalores de oro	72

LISTA DE ABREVIACIONES

HS:	Alta sulfuración.
pH:	Grado de acidez o alcalinidad.
Eh:	Potencial de oxidación y reducción.
Au:	Oro.
Cu:	Cobre
Fe:	Hierro.
INGEMMET:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

RESUMEN

El Yacimiento Ciénaga Norte está ubicado en el distrito de Chugur, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca. Se encuentra enmarcado en el Corredor estructural Chicama – Yanacocha, donde se ubican importantes depósitos de alta sulfuración como: Yanacocha, La Zanja y Sipan. El yacimiento epitermal de alta sulfuración Cienaga Norte presenta mineralización de oro diseminado, cuyos controles de mineralización aún no han sido materia de estudio. El objetivo principal de esta investigación es determinar los controles de mineralización que condicionan la ocurrencia de oro; para lo cual se realizó el mapeo geológico, logueo de sondajes diamantinos e interpretación de la geología estructural, construyendo modelos geológicos 3D de litología, estructural, alteración hidrotermal, que permitan explicar la interrelación existente entre estos factores y el modelo de Oro en 3D. Los resultados encontrados nos indican que desde el punto de vista litológico la mineralización se encuentra controlada por estructuras de brecha hidrotermal, tobas de cristales y de cenizas asociados a los óxidos de hierro como goethita, jarosita y hematita. El control estructural de la mineralización está determinado por tres sistemas de fracturamiento principal: N75°E, N65°W y N30°W. El control de alteración hidrotermal de la mineralización en orden de importancia se tiene la alteración silíceas, argílica avanzada y argílica. La mineralización principalmente está asociada a estructuras silíceas en variedades de sandy sílica, vuggy sílica, sílice masiva, los que en profundidad se comportan como estructuras tabulares de control fractural.

Palabras Claves: Yacimiento epitermal, control litológico, estructural, alteración hidrotermal.

ABSTRACT

The Cienaga Norte deposit is located in the district of Chugur, Hualgayoc province, Cajamarca department. It is framed in the structural corridor Chicama - Yanacocha, where important deposits are located as high sulfidation: Yanacocha, La Zanja and Sipan. The high sulphidation epithermal deposit Cienaga Norte has disseminated gold mineralization, which controls mineralization have not yet been the subject of study. The main objective of this research is to determine the mineralization controls that determine the occurrence of gold; for which geological mapping, diamond drilling and logging of structural geology interpretation was performed by building 3D geological lithology structural models, hydrothermal alteration, that explain the interrelationship between these factors and Oro 3D model. The results indicate that from the point of view lithological mineralization is controlled by structures of hydrothermal breccia, tuff crystals and ash associated with iron oxides such as goethite, jarosite and hematite.

The structural control of mineralization is determined by three main fracturing systems: N75°E, N65°W and N30°W. Hydrothermal alteration control of mineralization in order of importance is the siliceous alteration, argillic and advanced argillic. The mineralization is mainly associated with siliceous structures varieties sandy silica, vuggy silica, massive silica, which behave in depth and tabular structures fractural.

Key words: epithermal deposit, lithologic control, structure, hydrothermal alteration.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Los depósitos tipo epitermal de alta sulfuración en la región norte del Perú, han sido materia de diferentes estudios geológicos principalmente tectónicos, magmáticos y metalogénicos. Generalmente los principales controles y características de mineralización se asocian a la litología, estructural, alteraciones hidrotermales y mineralogía.

Los controles de mineralización del depósito Ciénaga Norte, aún no han sido materia de estudio; por lo cual, aspectos como zonas de alta y baja ley, morfología del yacimiento y potencialidad podrían ser interpretadas erróneamente.

Según esta problemática se plantea la siguiente interrogativa: ¿Cuáles son los controles de mineralización que condicionan la ocurrencia de oro en el depósito Ciénaga Norte?

De acuerdo con el planteamiento del problema se formuló la siguiente hipótesis: Los controles de mineralización que condicionan la ocurrencia de oro en el depósito Ciénaga Norte, están asociados a la litología, estructural y alteración hidrotermal.

El área de estudio comprenderá los controles de mineralización del depósito Ciénaga Norte, ubicado en el Distrito de Chugur, Provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca. La investigación tendrá un enfoque mixto cualitativo – cuantitativo y profundidad correlacional.

El estudio tiene como propósito aportar conocimiento geológico acerca de los controles de mineralización que condicionan la ocurrencia de oro en el depósito Ciénaga Norte, como: litología, estructural y alteración hidrotermal para lo cual se construirá los modelos geológicos 3D, que permitan explicar la interrelación existente con la mineralización de oro y una mejor interpretación geológica del depósito; para

contribuir en la búsqueda de nuevas zonas mineralizadas en el depósito y en otros proyectos dentro de la Mina Tantahuatay, lo cual significará una adición de recursos y reservas minerales y por consiguiente una mayor vida de la operación.

El objetivo principal de esta investigación es determinar los controles de mineralización que condicionan la ocurrencia de oro en el depósito Ciénaga Norte de la mina Tantahuatay; y los objetivos específicos es determinar los controles litológicos, definir los controles estructurales y de alteración hidrotermal del yacimiento.

En el capítulo II se presenta el Marco teórico, los antecedentes teóricos de la investigación, bases teóricas y definición de términos básicos. En el capítulo III se detalla los Materiales y Métodos mostrando la ubicación geográfica de la zona de estudio, el procedimiento a seguir y tratamiento de datos, posteriormente en el capítulo IV se realiza la presentación y discusión de resultados, explicando los resultados obtenidos contrastándose con la hipótesis y por último en el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Tristán (2011). Realizó el estudio, *Control Estructural para el Emplazamiento de Vetas y Domos Félsicos en el distrito minero de Zacatecas*; concluyendo que el emplazamiento de diques riolíticos y domos asociados estuvo ligado a la primera etapa de fallamiento y mineralización y ambos factores (magmatismo y fallamiento) generaron la primera etapa de mineralización.

Echeveste (2010). Realizó el estudio, *Control Estructural de la Mineralización Epitermal del distrito Manantial Espejo, Santa Cruz*; concluyendo que el sistema de deformación produce un fallamiento principal el cual se presenta como un sistema receptivo, apto para ser rellenado por fluidos ascendentes que generaron el sistema principal de vetas de cuarzo.

Aguilar et al. (2010). Realizaron el estudio, *Control Estructural y Litológico en el Emplazamiento de Yacimientos Minerales en el Sector Condorama – Paratia (Cusco – Puno), sur del Perú*, concluyendo que Los sistemas hidrotermales emplazados en la zona de estudio muestran una estrecha relación entre las estructuras principales que condicionan y favorecen el desarrollo de estructuras mineralizadas y que las anomalías tienen como roca hospedante principalmente flujos piroclásticos de cenizas con fragmentos líticos, con textura porfirítica.

Pérez (2008). Realizó la Investigación de los *Controles Geológicos de la Mineralización en Veta Esperanza (Huachocolpa, Perú)*, concluyendo que la veta Esperanza presenta un control estructural en el que la dirección más favorable para las reservas es este – oeste a sureste con buzamientos verticales.

Ríos (2005). Realizó el estudio, *El Yacimiento Epitermal de Oro de Alta Sulfuración de Alto Chicama, Controles de Mineralización y Modelo Genético Preliminar*, mencionando que se ha podido determinar que el oro se depositó mayoritariamente en las zonas de sílice residual (vuggy silica) y de reemplazo de sílice en limolitas, habiendo muy poco al acercarse a la zona de alunita y prácticamente cero en las zonas de periferia de alteración (dickita-caolín).

Aliaga (2012). Realizó el estudio, *Controles de Mineralización del pórfido Au– Cu Morocha – Minas Conga, Cajamarca – Perú*, concluyendo que la alteración potásica de los diferentes pulsos intrusivos controlan la mineralización de Au-Cu en el proyecto Morocha.

Merino (2005). Realizó el estudio, *Geología y Controles de Mineralización en el Depósito Cerro Yanacocha – Distrito de Yanacocha (Cajamarca – Perú)*, concluyendo que los tufos de cristales representados por la unidad eutaxítica (Teut) son rocas favorables para la mineralización de oro-cobre de alta ley en el Cerro Yanacocha.

2.2 BASES TEÓRICAS.

2.2.1 Depósitos epitermales de alta sulfuración (HS)

Son depósitos epitermales cuya mineralización ocurrió a partir de fluidos hidrotermales calientes y ácidos, a profundidades de 1 a 2 Km; la temperatura de los fluidos varía de 100 °C a 320 °C y pueden alcanzar la superficie como fumarolas (Giggenbach, 1992; Hedenquist, 1995).

Estos depósitos ocurren ampliamente en arcos de volcanismo activo ocasionado generalmente por placas tectónicas en subducción. Comúnmente se relacionan a volcanismo tipo tras arco (Back Arc) y se ubican en posición intermedia entre intrusiones subvolcánicas y la superficie; esta conclusión está basada en estudios geológicos (Sillitoe, 1983, 1989, 1991) y geoquímicos (Rye, 1993; Hedenquist et al., 1994). Pueden contener metales preciosos, Au - Ag y metales base, Cu, Pb, Zn, Bi, etc.

La mineralización epitermal de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos. Los de “baja sulfuración” son reducidos y tienen pH cercano al neutro y los de “alta sulfuración” son oxidados y ácidos, pH de 1 – 5, (Hedenquist, 1987). Los términos de alta y baja sulfuración se refieren al estado de oxidación del azufre. En los de alta sulfuración se presenta como S^{4+} en forma de SO_2 (oxidado) y en los de baja sulfuración como S^{2-} en forma de H_2S (reducido).

Bajo condiciones ácidas y de oxidación típicas de los sistemas de alta sulfuración el Au puede ser transportado como complejo clorurado, si la salinidad es alta (10 – 20 % NaCl equivalente) y los fluidos oxidados; o como $HAu (HS)_2$ para condiciones redox intermedias (Bening & Seward, 1996).

La mineralización epitermal está asociada comúnmente a pórfidos de Cu – Au (Hedenquist & Arribas, 1998); (Figura 1). Esta relación no es fortuita pues la mejor manera de entender los depósitos epitermales es estudiarlos de manera integral como sistemas tipo pórfido gradando a los de alta sulfuración.

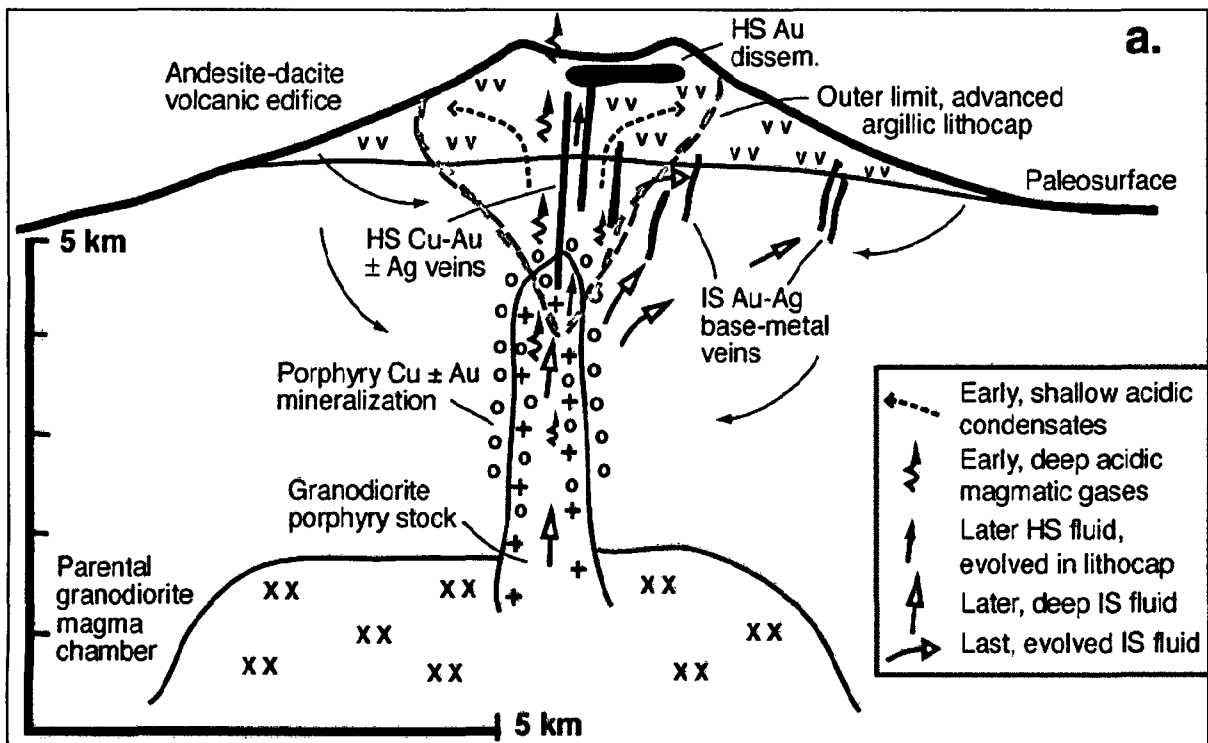


Figura 1. Modelo conceptual, mostrando la relación entre los depósitos de alta sulfuración e intermedia sulfuración y un sistema pórfido. (Sillitoe y Hedenquist, 2003)

2.2.2 Alteraciones hidrotermales

Término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a cambios fisicoquímicos y termodinámicos de los fluidos hidrotermales. La alteración hidrotermal se manifiesta mediante crecimiento, disolución y/o precipitación de minerales y reacciones de intercambio iónico entre la roca caja y el fluido caliente que circuló por la misma. Asimismo, produce cambios en las propiedades de las rocas, alterando su densidad, porosidad, permeabilidad, susceptibilidad magnética y resistividad. Simultáneamente con esos cambios físicos pueden ocurrir eventos geológicos, fallas y diaclasas, influyendo en el proceso de alteración; pues la presencia de estas estructuras favorece la circulación de fluidos hidrotermales.

Las reacciones de intercambio iónico son importantes en los procesos de alteración, por ejemplo Mg^{2+} por Ca^{2+} y/o Ca^{2+} y Na^+ por K^+ (Alteración potásica). Las reacciones de intercambio iónico también se conocen como cambio de base y corresponden a una reacción por la cual cationes absorbidos en la superficie de un sólido, tal como un mineral de arcilla, son reemplazados por cationes en la solución circundante. El intercambio de cationes metálicos de los minerales de una roca por H^+ corresponde a un caso especial conocido como hidrólisis y es muy importante en la mayoría de los tipos de alteración hidrotermal.

2.2.2.1 Factores que controlan las alteraciones hidrotermales en las rocas.

a. Temperatura

Mientras más caliente el fluido hidrotermal mayor será el efecto sobre la mineralogía original.

b. Composición del fluido

Sobre todo el grado de acidez o alcalinidad (pH), el estado de óxido reducción (Redox), la fugacidad del oxígeno; mientras más ácido el fluido mayor será la lixiviación de minerales originales.

c. Permeabilidad de la roca

Una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración. Sin embargo los fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico en las rocas, o permeabilidad secundaria. Otro factor que genera permeabilidad secundaria son los procesos tectónicos.

d. Duración de la interacción agua / roca

Mientras mayor volumen de agua caliente circule por las rocas y por mayor tiempo las modificaciones mineralógicas serán más completas.

e. Composición de la roca

Los minerales que componen las rocas tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, sin embargo en alteraciones intensas la mineralogía resultante es independiente del tipo de roca original.

f. Presión

Controla procesos como la profundidad de ebullición del fluido, fracturamiento hidráulico y generación de brechas freáticas e hidrotermales.

La temperatura y composición del fluido hidrotermal son los factores más importantes para la mineralogía hidrotermal resultante en un proceso de alteración.

2.2.2.2 Reacciones de hidrólisis

La estabilidad de feldespatos, micas y arcillas en procesos de alteración hidrotermal es comúnmente controlada por hidrólisis en la cual el K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y otros cationes se transfieren a la solución mientras que el H^+ se incorpora en las fases sólidas remanentes. Esto ha sido denominado metasomatismo de hidrógeno (Hemley et al., 1971).

La hidrólisis es una reacción de descomposición del agua y se manifiesta mediante la siguiente reacción:

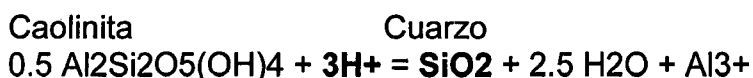
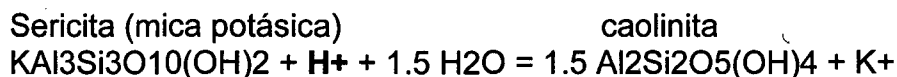


Todas las reacciones implican un empobrecimiento de H^+ en el fluido hidrotermal, consecuentemente un aumento del pH de la solución. Este fenómeno puede neutralizar fluidos ácidos originando zonaciones de distintos minerales hidrotermales. Cabe destacar que en la mayoría de las reacciones de hidrólisis se obtiene como subproducto SiO_2 y esta es la razón porque el cuarzo está siempre presente en rocas alteradas.

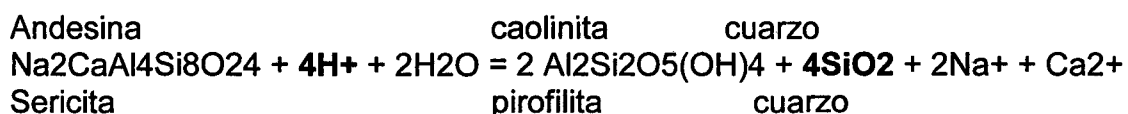
Aunque las reacciones de hidrólisis modifican el pH del fluido hidrotermal existen algunos minerales que pueden mantener ciertos rangos de pH mientras no se consuman totalmente; éstos se conocen como minerales buffer. Las series de minerales buffer hacen que las variaciones de pH sean escalonadas, influyendo en la solubilidad y precipitación de metales.

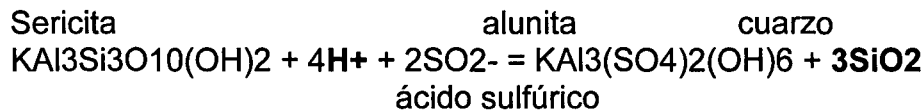
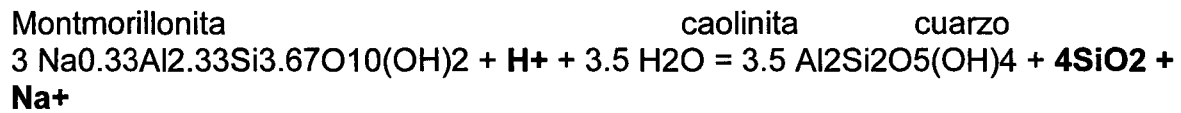
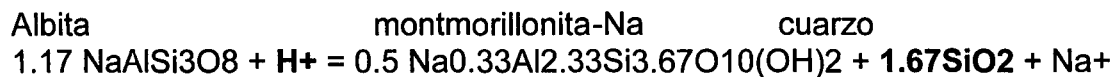
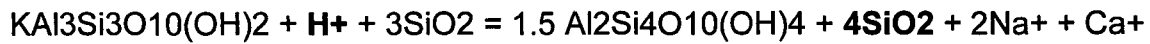
Ejemplo: Alteración hidrotermal de plagioclasa \rightarrow sericita \rightarrow arcillas \rightarrow cuarzo

En términos químicos esto se puede representar por las reacciones siguientes:



Otros ejemplos de hidrólisis:





2.2.3 Alteraciones Hidrotermales en los Depósitos de Alta Sulfuración

a. Alteración Silica

Alteración que se presenta generalmente en la primera etapa de la formación de un sistema de alta sulfuración. Se caracteriza por la interacción de fluidos hidrotermales ácidos, pH 1 - 2, con la roca caja, obteniendo como resultado sílice oquerosa o “vuggy” debido a la lixiviación de los componentes primarios de las rocas (feldespatos, fenocristales). La textura “vuggy” o cavernosa que se obtiene finalmente se debe a que la sílice es estable bajo condiciones ácidas. Sílice “vuggy” encontramos en la parte central de estos sistemas y por lo general alberga la mayor parte de mineralización económica. En algunos depósitos la zona de sílice “vuggy” no se manifiesta claramente y la mineralización de oro está asociada con minerales como dickita (depósitos Arena y Virgen – Perú) o pirofilita (White et al., 1995).

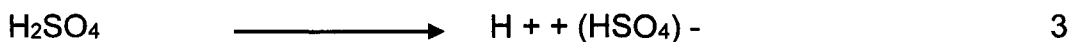
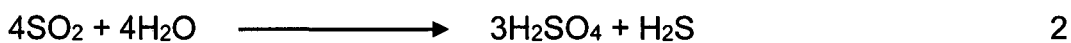
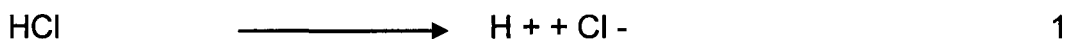
Es importante distinguir los términos alteración sílica y silicificación, pues el primero se produce por lixiviación ácida como se mencionó anteriormente mientras que el segundo es ocasionado por la introducción de sílice en las rocas; ambos procesos se manifiestan en los depósitos HS. En la mayoría de los depósitos HS, la principal etapa de mineralización de oro ocurre durante la parcial o total silicificación de la alteración sílica.

b. Alteración Argílica Avanzada

Se forma alrededor de la alteración sílica, manifiesta ensambles de alunita (K, Ca) / natroalunita + pirofilita + dickita + caolinita + zunyita + diáspora. El pH en que se forman varía de 1 – 3,5; esta alteración puede ser coetánea con la mineralización (Deyell et al., 2005). Los fluidos ácidos que causan alteración argílica avanzada son de 03 tipos (Figura 2); hipógeno, vapor caliente o “steam heated” y supérgeno (Sillitoe, 1993)

- **Hipógeno**

Los ambientes volcánicos contienen especies hipógenas de carácter ácido, siendo en orden descendente HCl, SO₂ y HF (Hedenquist, 1995). La disociación del HCl y H₂SO₄ (Ecuaciones 1 y 3 respectivamente) ocurren a <300 – 350 °C, previamente a estas reacciones ocurre la absorción, por parte del agua subterránea, de vapores magmáticos de alta temperatura, <400 °C, conteniendo SO₂, obteniendo los compuestos de la ecuación 2.



El contenido de HCl y H₂SO₄ en el agua manifiesta pH cercano a 1, suficientemente ácido para lixiviar la mayoría de componentes de la roca incluyendo aluminio, dejando como resultado sílice “vuggy”.

- **Vapor Caliente - “Steam Heated”**

En los depósitos de alta y baja sulfuración está presente el H₂S que al contacto con el oxígeno atmosférico origina ácido sulfúrico (Ecuación 4).



Esta reacción se produce en la zona vadosa a temperaturas de 100 – 120 °C. Si se produjera erosión sin hidrotermal el nivel freático del agua subterránea descendería ocasionando sobreimposición de la alteración argílica avanzada en profundidad.

El pH del agua ácida originada mediante este proceso es típicamente de 2 – 3, la causa de esto es la disminución del contenido de HCl en la solución. Esta acidez es suficiente para disolver vidrio volcánico y algunos otros minerales, sin embargo no afecta al aluminio el cual es prácticamente insoluble a pH > 2, por tanto dicho elemento formará aluminosilicatos como caolinita, pirofilita y alunita; mientras que el silicio obtenido de la disolución del vidrio volcánico origina silicificación en las rocas previamente lixiviadas. La baja presión y temperatura en la que se genera agua ácida mediante “steam heated” no permite el transporte de NaCl o metales, excepto algunas especies volátiles como Hg y As. Por lo tanto los ensambles originados mediante este proceso no manifiestan anomalías, excepto cuando existe sobreimposición en una zona mineralizada.

- **Supérgeno**

Las aguas ácidas obtenidas en este proceso se deben a la oxidación de sulfuros (Ecuación 5).



La oxidación supérgena se produce en condiciones similares al “steam heated”, en la zona vadosa y dependen del nivel freático. La temperatura característica es de 30 – 40 °C formando minerales secundarios como caolinita, alunita y jarosita. El proceso en mención es post hidrotermal, tiene mucha importancia en la geología económica de los depósitos de alta sulfuración, pues al oxidarse los sulfuros hacen posible el proceso de lixiviación.

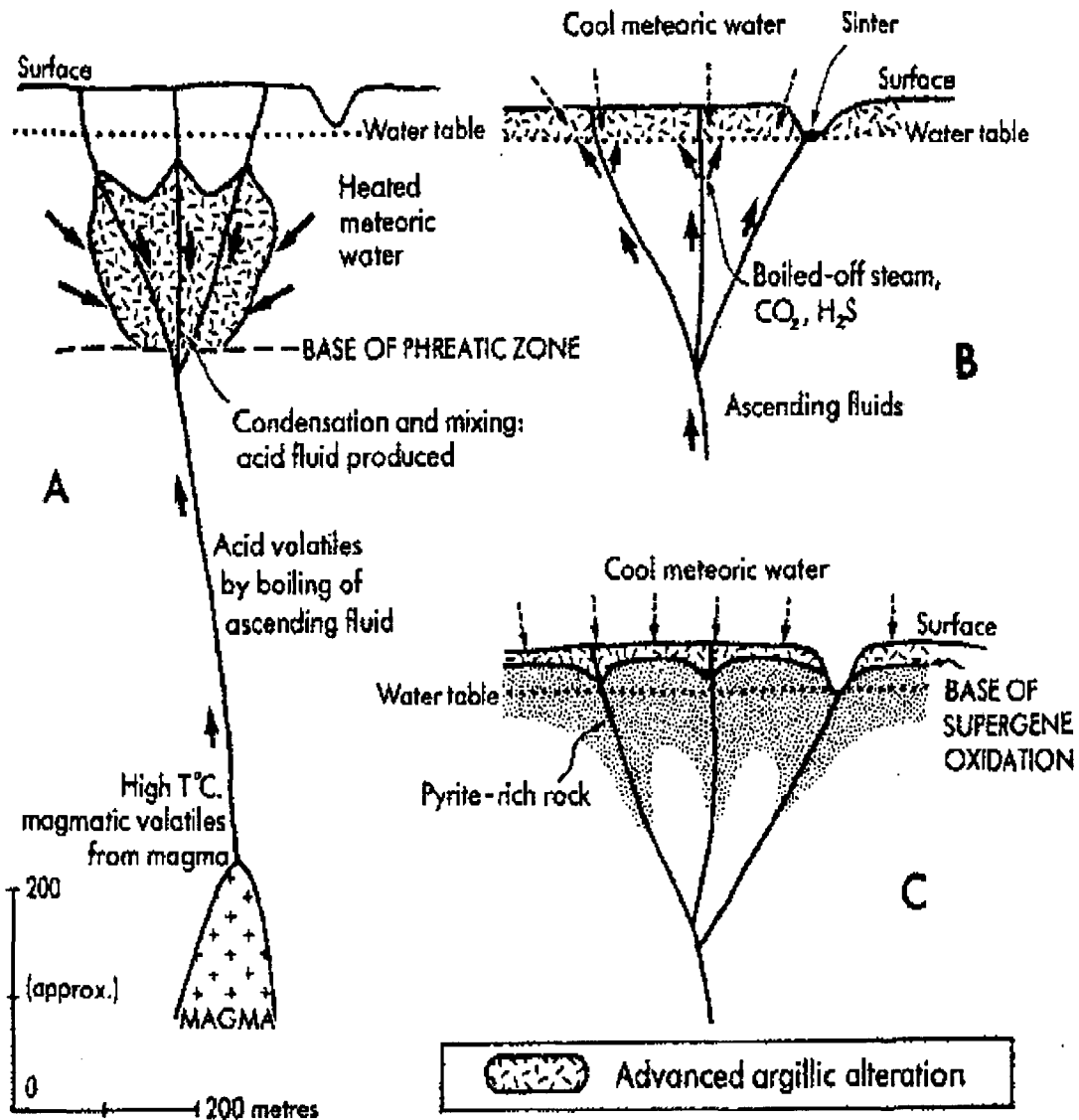


Figura 2. Ambientes en los que se forman fluidos ácidos y alteración argílica avanzada: A, hipógeno; B, "steam heated" y C, supérgeno (Sillitoe, 1993)

c. Alteración Argílica

Se manifiesta a continuación de la alteración argílica avanzada, varía en dos rangos de pH de acuerdo a los ensambles que presente. Si se presentan los del grupo de la caolinita (caolinita, dickita, halloysita), el pH varía de 4 – 5; mientras que si están los del grupo de la illita (illita, esmectita, illita + esmectita, montmorillonita), el pH varía de 4,5 – 6.

d. Alteración Propilítica

Se forma en la parte distal del sistema debido a que las soluciones ácidas que originaron la alteración sílica van neutralizándose al interactuar con la roca caja, por tal razón el pH en que se forman los ensambles de alteración propilítica, clorita + epidota + carbonatos; varía de 5,5 – 6,5.

2.2.4 Las fallas

Las fallas se deriva normalmente del trabajo clave y pionero de Anderson (1905), que realizó a comienzos del Siglo XX, una clasificación dinámica de los planos de rotura basada en el posicionamiento de los tres vectores principales de esfuerzos.

Los tres tipos de fallas de Anderson en función de la orientación de los vectores de esfuerzo y planos de rotura. σ_1 siempre bisecta el ángulo menor ($< 45^\circ$) entre los planos de deslizamiento (Figura 3)

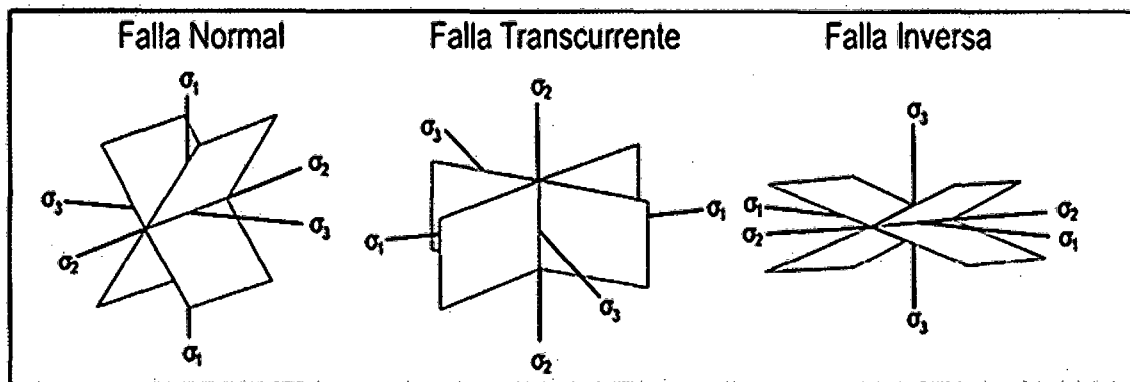


Figura 3. Los tres tipos de fallas de Anderson (Javier L, 1993)

Las fallas distan mucho de presentar un comportamiento ideal andersoniano y al respecto deberíamos recordar una premisa fundamental: las fallas se curvan y de hecho casi nunca son planos sino más bien "superficies curvadas". Producto de esas curvaturas se generan situaciones asimétricas en la distribución de esfuerzos a ambos lados de la falla o zona de falla, resultando en zonas de extensión (transtensión) o compresión (transpresión) locales. (Figura 4)

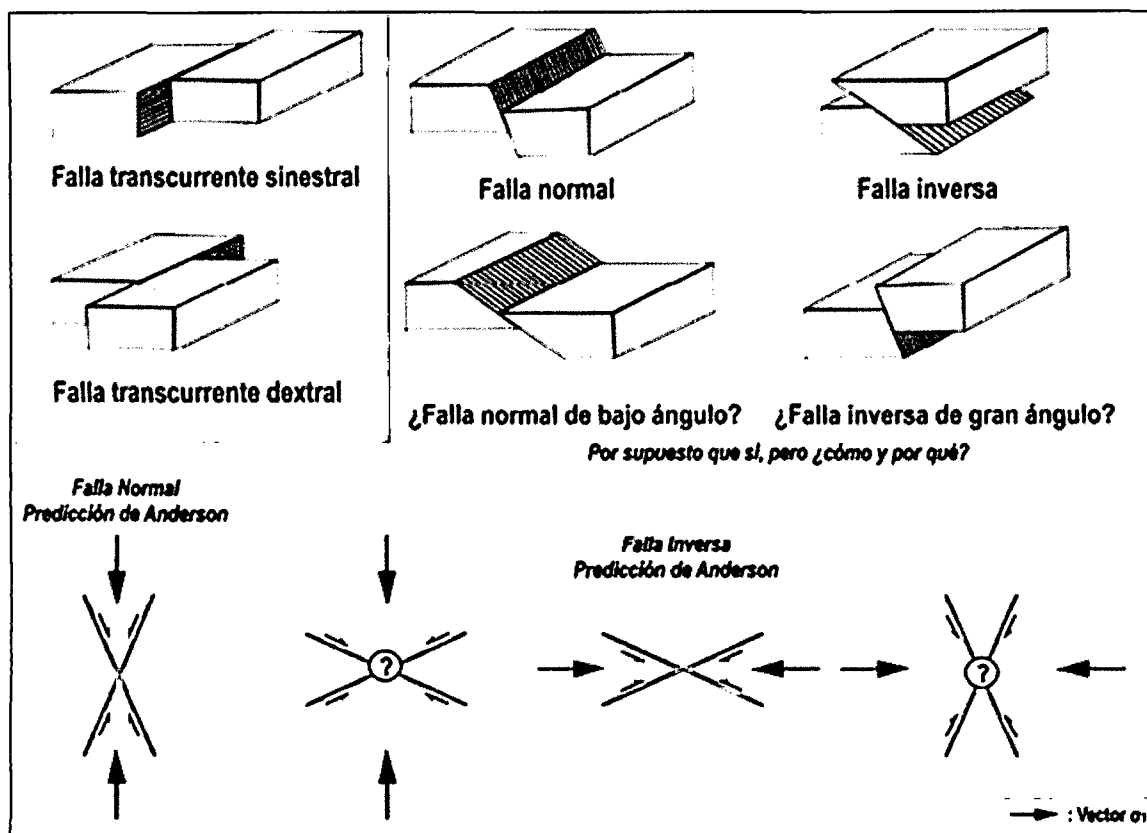


Figura 4. Los tres tipos de fallas de Anderson y sus combinaciones (Javier L, 1993)

Que las fallas cambien de dirección en el espacio es más que esperable, ya que la orientación de la superficie de rotura está condicionada por el comportamiento físico de los materiales. Dado que la geología es (a cualquier escala) heterogénea (cambia la litología o se producen cambios físicos dentro de una litología), es de esperar que las superficies cambien a su vez de dirección cuando la rotura va atravesando medios físicamente diferentes.

En lo que se refiere a las fallas inversas de gran ángulo o las normales de bajo ángulo (contrarias a los principios andersonianos), digamos que la naturaleza busca siempre el camino más fácil para la disipación de energía. Así, si durante una fase tectónica compresiva se han formado fallas inversas (a bajo ángulo), cualquier relajación cortical posterior utilizará (en parte) esos mismos planos de falla para formar fallas normales, sólo que estas serán a bajo ángulo. Lo mismo explica de manera opuesta el caso contrario; así, después de una relajación cortical a través de fallas normales, una fase compresiva utilizará (en parte) los planos de aquellas fallas para formar fallas inversas de gran ángulo.

2.2.4.1 Análisis cinemático de fallas

El análisis cinemático de fallas consiste en determinar el sentido de movimiento (transcurrente, normal o inverso) de fallas, a través de la interpretación de una variedad de pequeñas estructuras asociadas a las estrías en el plano de falla, denominadas "tectoglifos".

Las fallas son muy importantes, debido a que influyen en la deposición de menas y geometría de un yacimiento (si estas se encuentren activas durante la circulación de fluidos mineralizantes) o cambian la geometría inicial del yacimiento (si son posteriores al evento mineralizante). Por ello, es de gran importancia conocer los diferentes modelos de fracturación y la cinemática de fallas, a fin entender los estilos de deformación espacial y temporal a los que está sujeto un determinado yacimiento; de manera que pueda ser una guía complementaria para la exploración.

a. Principio

El desplazamiento relativo entre dos bloques a ambos lados de un plano de falla es el dato esencial para todo análisis cinemático. Si bien de manera simple, se dice que una falla es normal o inversa (si su desplazamiento es principalmente vertical) o que es dextral o sinistral (si el desplazamiento es principalmente horizontal), lo cierto es que la mayoría de las fallas tiene desplazamientos oblicuos. Así, las fallas resultan siendo normal-sinistral o todas las otras combinaciones.

La dirección de desplazamiento está dada por las estrías de fricción, cuyo pitch (ángulo entre la dirección de las estrías y la horizontal del plano de falla, medido sobre este plano) es fácilmente medido con brújula o transportador, en el campo.

Las mediciones de campo útiles para el análisis cinemático de fallas son las siguientes:

- Rumbo y buzamiento del plano de falla principal
- Sentido de movimiento de la falla

- Pitch y dirección de inclinación de las estrías de falla

Estos datos estructurales son plasmados en proyecciones estereográficas y permiten determinar la dirección e inclinación de los esfuerzos principales σ_1 (compresivo), σ_2 (intermedio) y σ_3 (tensional), responsables de la deformación.

b. Indicadores Cinemáticos (Tectoglifos)

Los indicadores cinemáticos o tectoglifos son una serie de estructuras pequeñas (milimétricas a métricas), desarrolladas en medio frágil y asociadas a fallas. Se emplean para determinar la dirección y sentido de desplazamiento sobre un plano de falla.

En la Figura 5, se muestran los principales tectoglifos empleados para definir el sentido del bloque faltante. Seguidamente se procederá a describir las características más relevantes de cada uno de ellos.

- **Elemento estriador al cabo de la estría.** Este puede ser un fragmento de roca. (Figura 5A)
- **Material triturado al cabo de la estría.** Está constituido por material arrancado del plano de falla y depositado a un extremo de la estría. (Figura 5B)
- **Banqueta al cabo de la estría.** En este caso, el material arrancado del plano de falla es acumulado al extremo de la estría en forma de un pequeño promontorio. (Figura 5C)
- **Escama de arrastre.** El material arrancado del plano de falla es depositado al extremo de la estría en forma de una escama. (Figura 5D)
- **Nichos de arranque.** Se manifiestan como microdeslizamientos. (Figura 5E)
- **Escama de arranque.** Cuando se presentan este tipo de tectoglifos, las estrías tienen uno de sus extremos levantados, arrancando material del plano de falla y dejando como resultado una superficie irregular. (Figura 5F)
- **Colas de mineral.** Durante este proceso se tiene presencia de minerales a un extremo de la estrías, mientras que hacia el lado opuesto se tiene polvo de mineral, dispuesto a manera de microbandas. (Figura 5G)

- **Lomos al abrigo.** Para que se genere este tectoglifo se requiere de un elemento estriador endentado en el plano de falla, de tal manera que durante el desplazamiento relativo de bloques, el material arrancado del plano de falla se deposita a manera de lomas y es protegido por el elemento estriador endentado. (Figura 5H)
- **Planos ondulados.** Según sea el movimiento, los planos de falla ondulados presentan facetas estriadas y lustradas ó no estriadas y con presencia de óxidos. El sentido de movimiento, será determinado por la orientación de las facetas estriadas. (Figura 5I)
- **Cristalización al abrigo.** Dentro de las estrías se producen ciertos desniveles y se produce el crecimiento de minerales como el cuarzo, calcita, zeolitas o sulfatos, en la dirección del movimiento. (Figura 5J)
- **Fallas de Ridel.** Este tipo de falla se producen por esfuerzos de cizalla en la proximidad del plano de falla. Se generan dos tipos de fallas una denominada R1 y otra R2. Las R1 forman un ángulo de 15° a 20° con el plano de falla principal y son sintéticas (movimiento en el mismo sentido que la falla mayor). Las fallas R2 forman un ángulo de 70° a 80° con el plano de falla principal y son antitéticas. (Figura 5K y 5L)
- **Lúnulas de tracción.** Son fracturas abiertas algunas veces a manera de semi-círculos. La superficie de fractura es irregular y no presenta estrías. Forman un ángulo entre 30° y 40° con el plano de falla principal. La dirección de buzamiento de las fracturas o la parte cóncava de los semi-círculos nos indican el sentido de movimiento. (Figura 5M)
- **Lenticulaciones.** Este tipo de tectoglifos son los únicos que se generan en medio dúctil entre los descritos. Son Microestructuras penetrativas con planos curvilineales que determinan la deformación de las rocas en lentes. La orientación de las lenticulaciones determinan el sentido de movimiento de la falla principal. (Figura 5N)

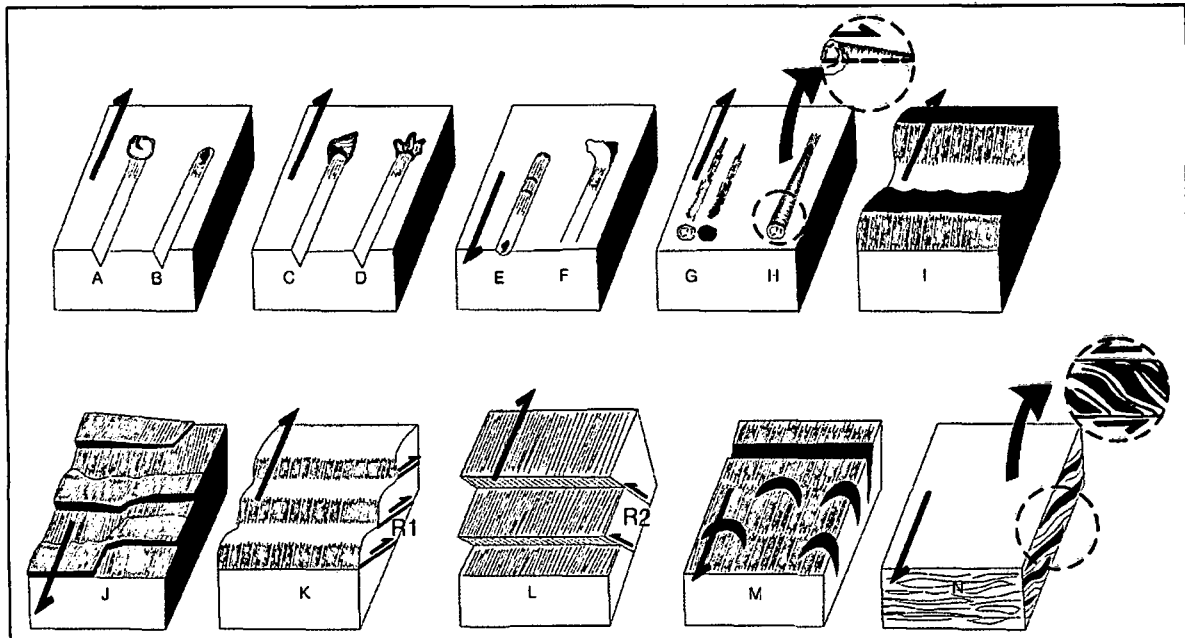


Figura 5. Tectoglifos - Criterios de sentido de movimiento de fallas (Modificado de Macharé, 2001).

2.2.4.2 Modelos de fracturación

La fracturación es considerada, como una deformación continua debido a la acción de los esfuerzos σ_1 , σ_2 y σ_3 . Los modelos de fracturación conocidos han sido desarrollados a partir de observaciones múltiples durante ensayos de mecánica de rocas o en zonas cizallantes naturales.

Seguidamente, se van a describir los principales estilos de deformación, responsables de la fracturación, entre los que se pueden mencionar:

a. Fracturas desarrolladas en una zona de cizallamiento – modelo de Riedel

H. Cloos y W. Riedel (1928 - 1929), fueron los pioneros en realizar experimentos de cizallamiento y determinaron dos tipos de fallas a las que denominaron R1 y R2. Posteriormente, numerosos autores complementaron el modelo inicial, proponiendo otros tipos de deformación asociadas a zonas de cizallamiento; en base a observaciones de campo (Figura 6A) y serán expuestas a manera de resumen a continuación.

- Fallas conjugadas R1 y R2, hacen ángulos aproximados de $\Phi/2$ con las direcciones teóricas de máximo cizallamiento.
- Fracturas tensionales T desarrolladas por tracción indirecta, aproximadamente forman un ángulo de 45° con la dirección de cizallamiento principal. Determinadas por Cloos (1955) y Wilcox (1973).
- Fracturas tipo P, simétricas a las fallas o R1; definidas por Skempton (1966) en zonas de cizallamiento natural.
- Pliegues en echelón, formando un ángulo de 45° con el cizallamiento principal y perpendiculares a las fracturas de tracción T. Determinadas por Wilson (1970).
- Desarrollo de esquistocidad perpendicular a los planos de fracturas de tracción T. Evaluadas por Vialon (1976).

Por lo expuesto en el modelo descrito, las fracturas tensionales asociadas a cizallamiento son muy importantes, debido a que son las más favorables para albergar mineralización, ocurren a diferentes escalas y pueden adoptar geometrías complejas. Por ello, entender su génesis y los estilos de deformación asociados son muy importantes, Sibson (1987) y Dubé & Guha (1992); pudieron explicar convenientemente la ocurrencia de dichas fracturas (Figura 6B), contribuyendo notablemente en la actualidad en la búsqueda y localización de cuerpos mineralizados.

b. Zonas de transtensión ó transpresión

Las zonas de transtensión o transpresión, están estrechamente relacionadas a fallas transcurrentes y el origen de una o la otra; va a depender fundamentalmente del sentido de movimiento de la fallas transcurrentes. Por ejemplo, cuando una falla principal NW - SE, movimiento sinistral y con una inflexión E - W en su parte central; por el movimiento que tiene, produce desplazamientos normales que generan cuencas tipo "pull apart" o fracturas abiertas, denominadas zonas de transtensión (Figura 6C). Mientras que, si el movimiento fuese dextral se producirían ejes de pliegues y fallas inversas, llamadas zonas de transpresión (Figura 6D).

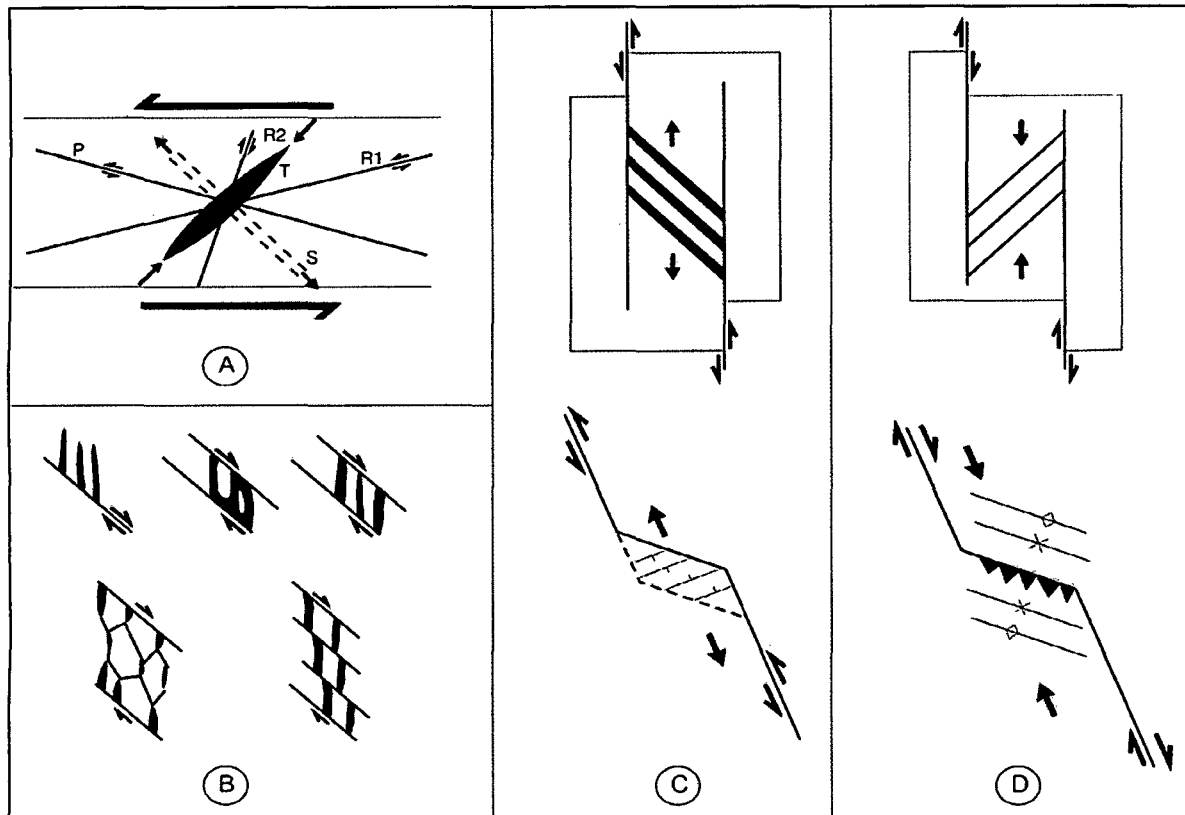


Figura 6. Modelos de fracturación (Dube & Guha, 1992).

2.2.5 En busca de los espacios para las masas minerales

a. Extensión y compresión en zonas de falla

Quando hablamos de masas minerales necesitamos tratar el tema del “Espacio disponible”, ya que mientras más grande este, mayor podrá ser el cuerpo mineral. Como indicábamos anteriormente; puesto que el esfuerzo que las genera tiene una dirección específica, se desarrollarán entonces sectores que acumulen o liberen energía en el entorno de la falla. Allí donde se “libere energía” se generarán espacios y por lo tanto existirá una mayor probabilidad de encontrar mineralizaciones importantes.

El movimiento de las fallas a lo largo de superficies planares perfectas (cosa poco común en la naturaleza) se desarrolla sin complicaciones, deslizándose una pared sobre la otra sin interferencias. Bajo estas condiciones la aparición de ramales a partir de la falla principal es de mínima a inexistente. Sin embargo, si una falla presenta una

inflexión abrupta o gradual se producen situaciones complejas, que dan lugar a procesos de estiramiento o acortamiento. (Figura 7)

La curvatura de las fallas puede ser descrita en términos de las inflexiones y saltos que se suceden a lo largo de las mismas (Davis y Reynolds, 1996).

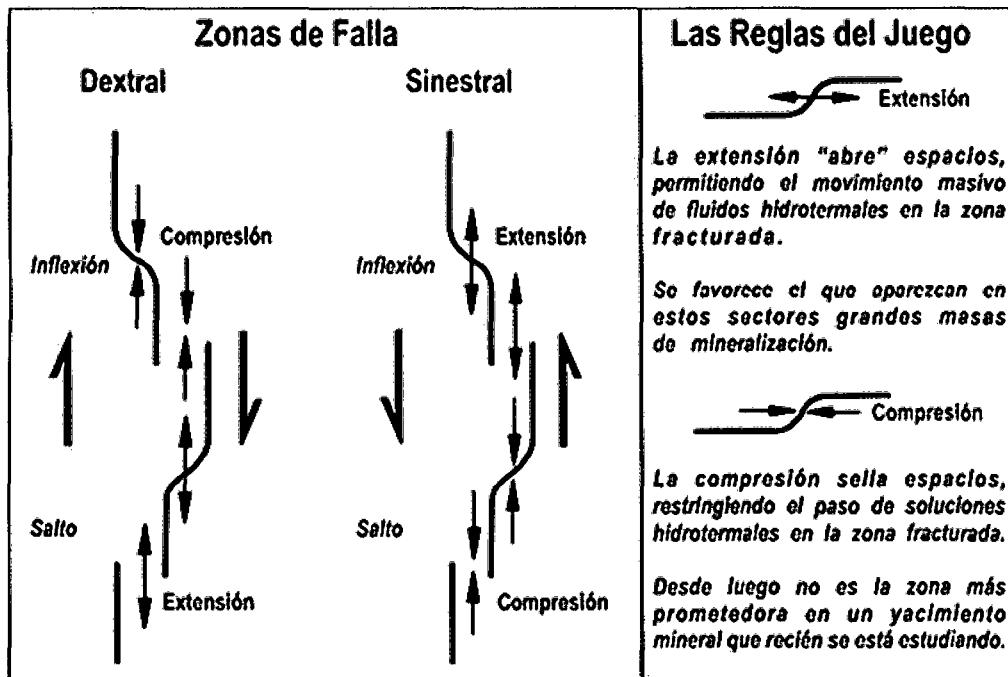


Figura 7. Compresión-extensión más típicas que pueden encontrarse en una zona de falla (adaptada de Davis y Reynolds, 1996)

Hablaremos de inflexiones en cierre cuando el movimiento de uno de los bloques a lo largo de la falla se realiza contra la curva. Por el contrario, si el movimiento aleja el bloque de la curva, diremos que se trata de una inflexión en apertura. Bajo el punto de vista de la exploración de yacimientos minerales, las inflexiones en apertura son las más interesantes, ya que es en esos lugares donde se generan espacios, y por ende, donde las soluciones hidrotermales pueden circular con mayor facilidad. Además, a escala regional, una inflexión en apertura es el lugar perfecto para el desarrollo de intrusiones menores bajo condiciones extensionales. Aparte de las inflexiones, otro rasgo típico de las zonas de falla son los saltos que a diferencia de las inflexiones, no se conectan entre sí, aunque mantienen una dirección igual o parecida y el mismo sentido de movimiento. Al igual que las inflexiones, los saltos pueden generar zonas en apertura o en cierre.

b. Cuando las inflexiones y saltos condicionan relieve y espacio

Las zonas en apertura y en cierre (en inflexiones y saltos) pueden dar lugar respectivamente a depresiones (pull-apart) susceptibles de ser rellenadas por materiales sedimentarios o volcánicos, o a alzamientos compresionales (pop-up)

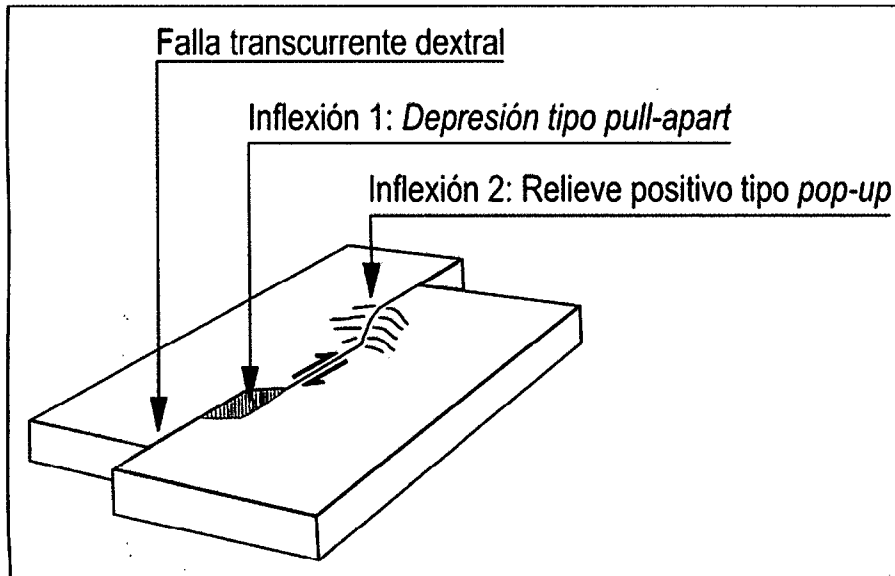


Figura 8. Relieves tipo pull-apart y pop-up (adaptada de Davis y Reynolds, 1996)

La presencia de inflexiones y saltos a lo largo de una falla promueve a su vez la formación de estructuras denominadas “dúplex” (Woodcox y Fischer, 1986). Las rocas que se encuentran dentro de la zona de influencia de una inflexión o salto se pueden fallar progresivamente (fallas menores paralelas a la dirección de la inflexión) generando sistemas imbricados en relación a la falla principal. Por otra parte en el caso de fallas de traza recta, la formación de un dúplex puede originarse a través del desarrollo de fracturas de Riedel.

Así en los dúplex extensionales asociados a fallas transcurrentes se formarán hundimientos, y en los compresionales, levantamientos. Unas de las estructuras más notables derivadas son las denominadas “flores positivas” y “flores negativas” (Woodcock y Fischer, 1986), que a su vez se corresponden con los casos de dúplex compresional y extensional, respectivamente.

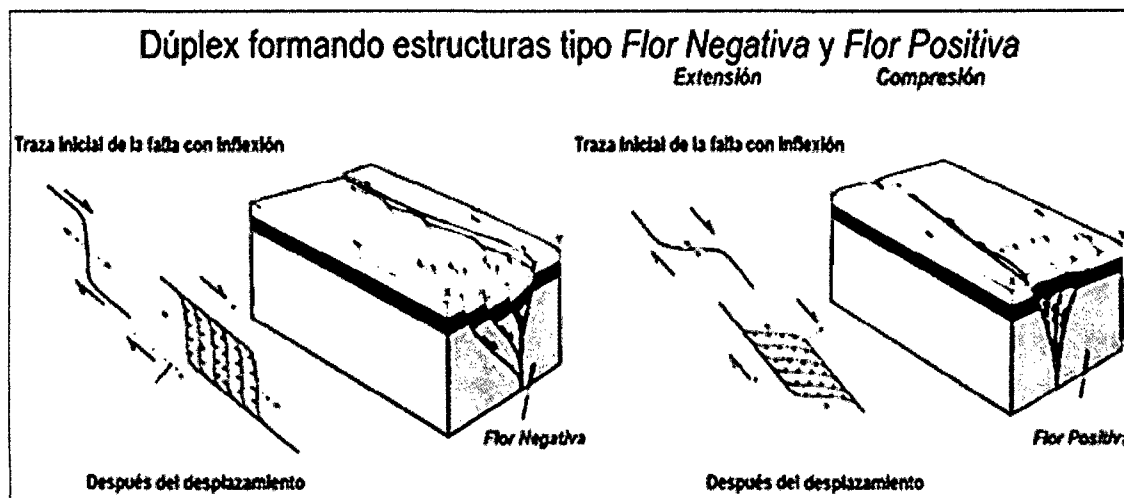


Figura 9. Desarrollo de un dúplex en extensión y compresión con estructuras tipo flor negativa y positiva (adaptada de Woodcock y Fischer, 1986)

La geometría interior de las fallas secundarias de un dúplex muestra que estas convergen en profundidad hacia una zona de falla única (sistema anastomosado):

- En el caso de una estructura en flor negativa, las fallas secundarias dentro del dúplex tendrán un comportamiento mixto: transcurrente-normal, por lo cual decimos que la zona interior está en extensión y sometida a hundimiento.
- En el caso de una estructura tipo flor positiva, las fallas interiores se comportarán como transcurrentes-inversas, por lo cual decimos que la zona está en compresión y por lo tanto sometida a levantamiento.

Con estos elementos podemos ya configurar un cuadro más avanzado sobre las estructuras que podemos esperar en una zona de falla, pero más importante aún es el que podemos realizar "predicciones" sobre las zonas que serán más y menos favorables para albergar una mineralización. El siguiente cuadro nos muestra a manera de resumen la mayor parte de las estructuras que se pueden formar en una zona de falla, donde se ha marcado además los que se ha definido como sectores favorables y desfavorables.

Dado lo variadas que pueden ser las escalas a las que se desarrollan estas estructuras asociadas, conviene aquí aclarar que lo de sector favorable puede ser interpretado desde aquellos sectores que son susceptibles de favorecer intrusiones o

el vulcanismo hasta aquellos donde la circulación de fluidos hidrotermales resulta más fácil.

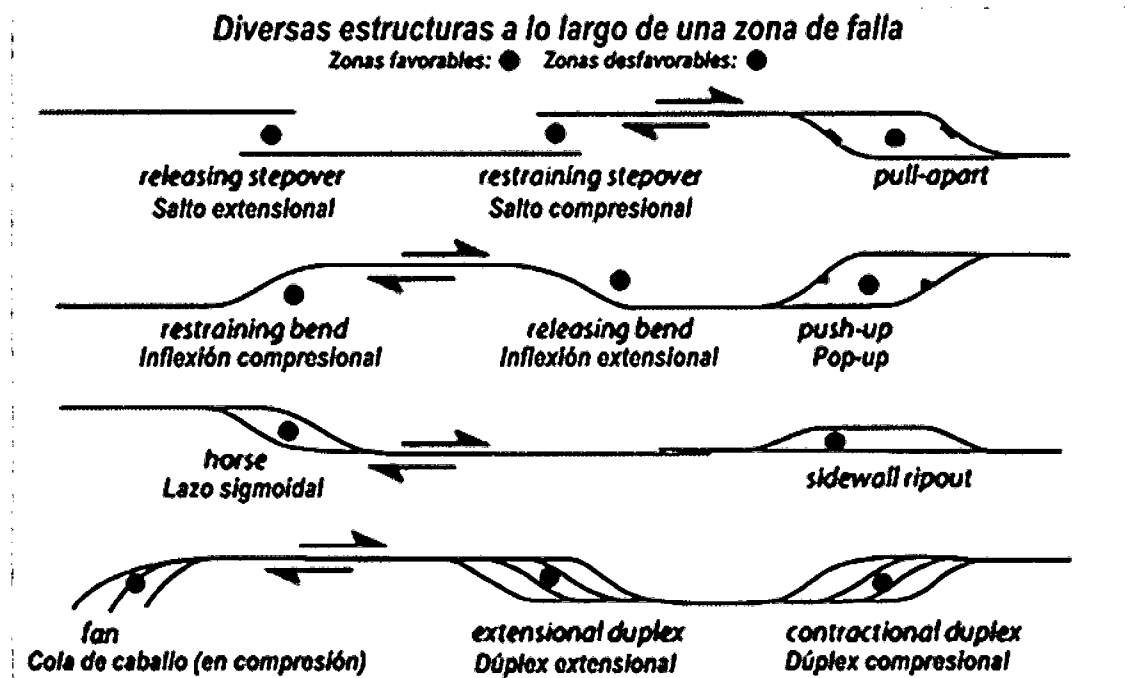


Figura 10. Principales estructuras asociadas a una zona de falla (caso, dextral), indicando los sectores favorables y desfavorables para albergar cuerpos minerales (Woodcock y Fischer, 1986)

Como veremos más adelante, la generación de espacios durante el régimen de circulación de fluidos favorece la descompresión y por lo tanto la precipitación de la carga mineral, por lo que en realidad hablamos de transporte y precipitación. Mientras mayor sea el régimen extensional, más grandes serán los espacios y por lo tanto también lo serán los cuerpos minerales resultantes.

c. Otros casos estructurales favorables: permeabilidad estructural

Más allá de la extensión-compresión, todos visualizamos de manera intuitiva que un macizo de roca altamente fracturado permitirá el paso de fluidos más fácilmente que uno con escasa fracturación. Tripp y Vearncombe (2004) fueron aún más allá con esta idea y la perfeccionaron, desarrollando un procedimiento muy parecido al de trazar curvas de isoconcentración de polos en la red de Schmidt, sólo que en vez de polos lo que utilizaron fueron los puntos resultantes de la intersección entre fallas o fallas y

determinadas litologías en la región aurífera de Ora Banda (Eastern Goldfields Province) en Australia (Figura 11).

Tripp y Vearncombe (2004) indican que hay tres formas principales por las cuales puede incrementarse la densidad de fracturas:

1. Cambios en la geometría de una falla.
2. Intersecciones falla-falla.
3. Intersecciones entre fallas y una anisotropía pre-existente.

Es precisamente en aquellos sectores donde la falla cambia de dirección donde pueden surgir nuevas fallas (p.ej., estructuras tipo dúplex). En lo que se refiere a las intersecciones falla-falla, el resultado es evidente, mientras más fallas se corten entre sí, más permeabilidad estructural existirá (Figura 11). El punto final hace mención a la intersección de fallas con anisotropías.

Estas anisotropías pueden corresponder a cambios litológicos, layering ígneos, contactos intrusivos, etc. Allí donde la falla encuentra estos cambios puede producirse un incremento en la fracturación.

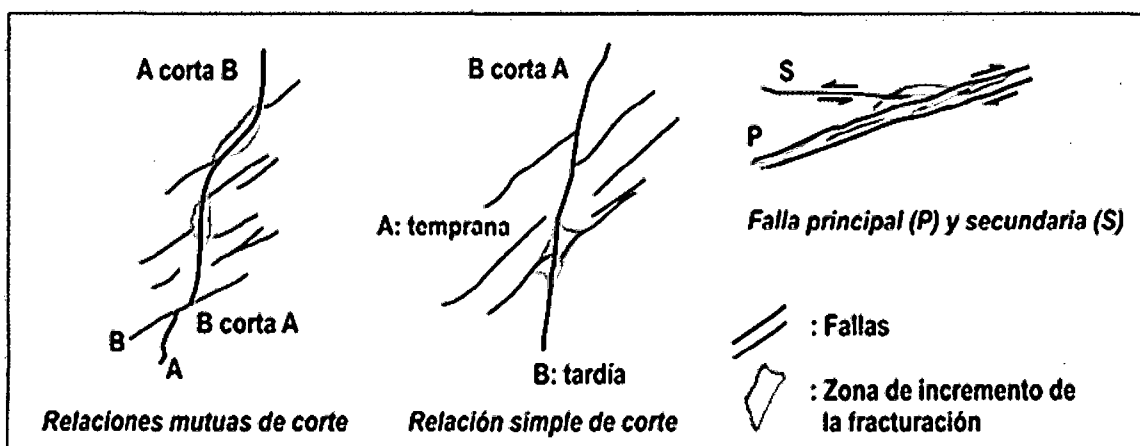


Figura 11. Relaciones de corte entre fallas e incremento de la fracturación. Adaptada de Tripp y Vearncombe (2004).

2.2.6 Rocas Volcánicas

2.2.6.1 Flujos lávicos y domos silícicos en vulcanismo subaéreo

Las lavas producto de vulcanismo subaéreo forman comúnmente flujos y domos potentes (10 a más de 100 metros), cortos (menos de unos pocos km) y de poco volumen (menos de 1 km cúbico). Sin embargo, existen ejemplos de flujos de lavas individuales de grandes volúmenes. (Echevarría, 2007)

Los flujos y domos silícicos subaéreos también están asociados a depósitos clásticos generados por colapso gravitacional, como las brechas de talud que se acumulan en los frentes del flujo y en las márgenes del domo, durante y después del emplazamiento. (Echevarría, 2007)

2.2.6.2 Lavas andesíticas

Las lavas andesíticas poseen características intermedias entre las ácidas y básicas. Pueden fluir varios kilómetros desde el centro de origen, pero también forman comúnmente domos y flujos cortos y potentes. Pueden desarrollar disyunción columnar o prismática, perpendicular a la superficie de enfriamiento. En ocasiones están relacionadas a esporádicos eventos explosivos. (McPhie, 1993)

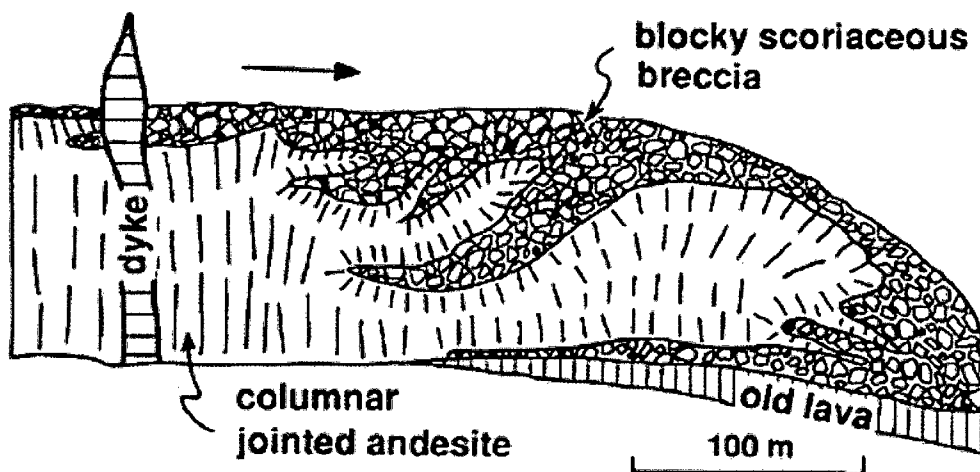


Figura 12. Lava y brecha asociado con andesítica subaerea y flujos de lava dacíticos (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.). Modificado de Huppert et. Al. (1982) y Macdonald (1972)

2.2.6.3 Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF (cuarzo-feldespato alcalino, plagioclasas y feldespatoideos)

El diagrama "Streckeisen" o "QAPF" es actualmente el diagrama más "oficial" en la denominación de las rocas ígneas. El diagrama permite en una manera bastante fácil la denominación de rocas plutónicas y volcánicas. Solamente el contenido modal de 4 minerales en una muestra (y la textura) definen al final el nombre de la roca. Esta nomenclatura se fundamenta en las reglas de la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas.

Existen algunas excepciones que no se incluyen en este diagrama, como la piedra pómez (ignimbrita) o las rocas con un contenido menor de 10 % en Q-A-P-F (es decir, la suma del contenido en cuarzo + feldespato alcalino + plagioclasa + feldespatoideos no alcanza 10 %).

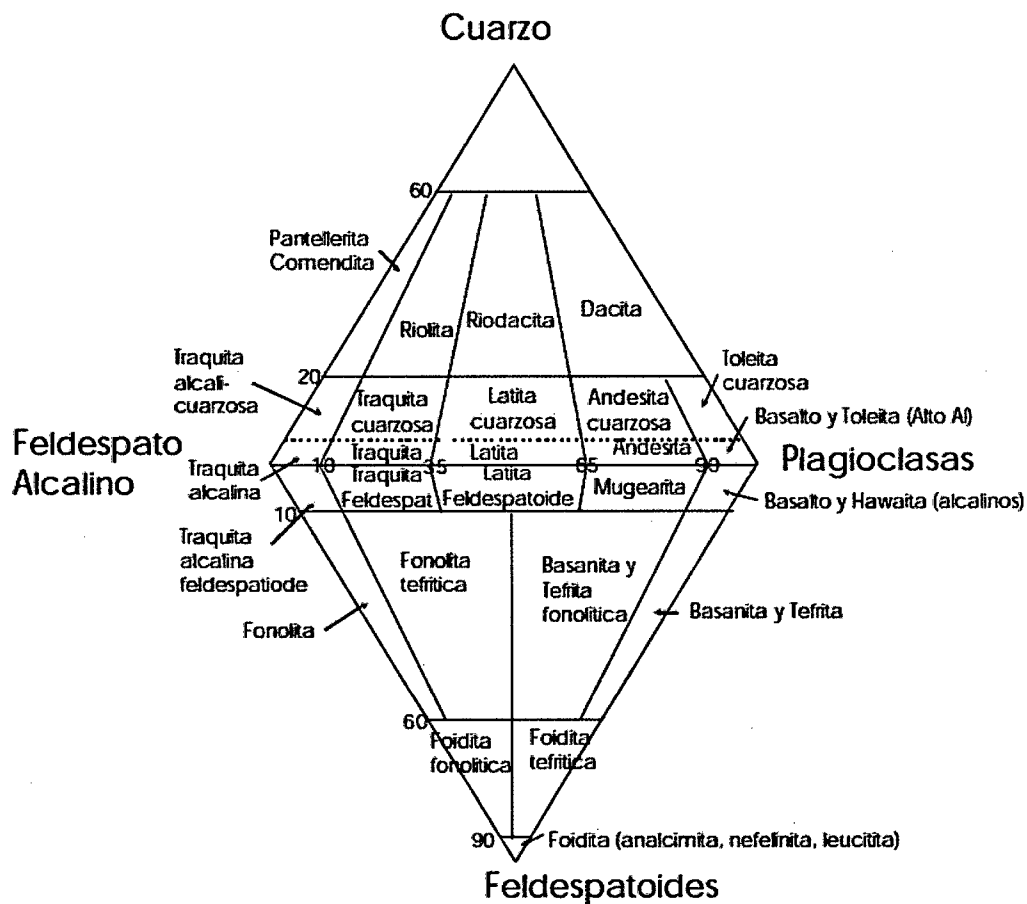


Figura 13. Clasificación de rocas volcánicas en un diagrama QAPF. Streckeisen (1976)

2.2.7 Depósitos piroclásticos, sedimentario volcanogénico y volcaniclástico resedimentado

Los depósitos volcaniclásticos primarios involucran procesos volcánicos de formación, transporte y deposición de clastos. Esos clastos originados y depositados en principio por procesos volcánicos pueden ser rápidamente resedimentados, o erosionados y re-trabajados con posterioridad por procesos superficiales no volcánicos, formando una gran variedad de depósitos resedimentados o volcanogénicos sedimentarios. (McPhie, 1993)

2.2.7.1 Depósitos de movimiento en masa y flujo en masa

Los flujos en masa volcaniclásticos pueden ser muy móviles y transportar partículas por grandes distancias. En general, ocurre poca modificación textural, por lo que la forma y tamaño de las partículas reflejan procesos de formación de clastos. . (McPhie, 1993)

a. Depósitos primarios de flujos piroclásticos:

Los flujos piroclásticos son dispersiones altamente concentradas de gas-partícula, calientes, muy móviles, originados por erupciones volcánicas. Las partículas son piroclastos formados por desintegración explosiva del magma y roca de caja.

b. Origen de los flujos piroclásticos:

- Relacionados a extrusiones de flujos lávicos y domos (A), por colapso gravitacional, o relacionados a erupciones explosivas que acompañan a la extrusión de domos. Dichos flujos se denominan: flujos de bloques y ceniza o nubes ardientes, y los depósitos: depósitos de flujos de bloques y cenizas o depósitos de avalanchas calientes.
- Por colapso vertical de columnas eruptivas explosivas (B). En vulcanismo tipo vulcaniano, con producción de pequeños volúmenes de flujos de escoria y ceniza,

los depósitos se denominan: depósitos de flujo de escoria y cenizas. Mientras que en vulcanismo tipo pliniano se generan flujos piroclásticos voluminosos cuyos depósitos se denominan ignimbritas.

- Por flujo directamente del cráter del volcán (C).

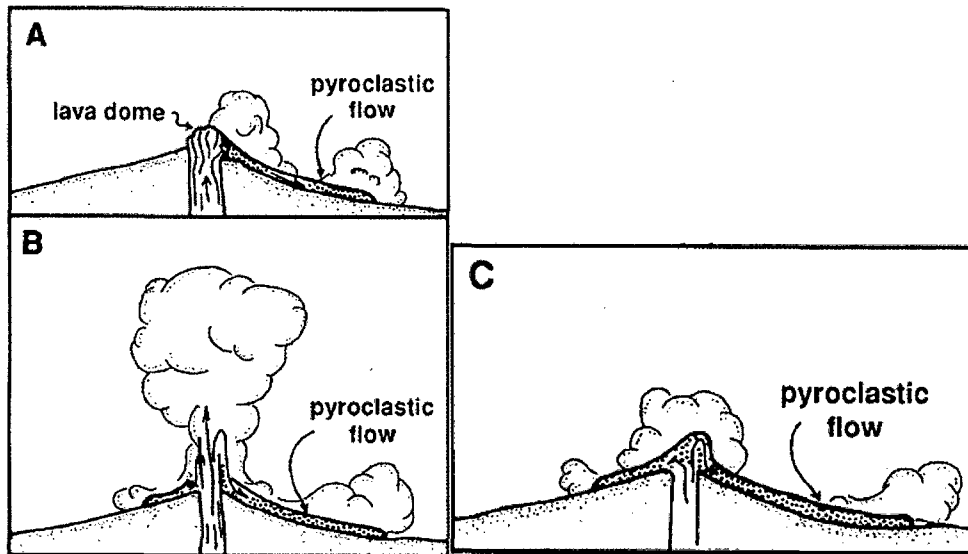


Figura 14. Principales formas como se generan los flujos piroclásticos (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.). Modificado de Macdonald (1972)

c. Características de los depósitos de flujo

Predominan los piroclastos magmáticos juveniles, como pómez, escoria, trizas, cristaloclastos, también puede haber líticos (provenientes del magma o roca de caja). Pueden ser de composición variada, los más voluminosos son riolíticos o dacíticos, mientras que los depósitos de menor volumen son dacíticos o andesíticos (McPhie, 1993)

d. Tipo de depósitos

- **Depósitos de flujo de bloques y ceniza:** bloques líticos angulosos, poco vesiculares, algunos con fracturas radiadas de enfriamiento. La matriz es de ceniza (trizas angulosas). Soldamiento muy poco común. Los clastos son todos del mismo tipo de magma (depósitos monolíticos). Pueden presentar gradación inversa, y contener estructuras de escape de gases. En general asociados con

flujos lávicos y domos andesíticos, dacíticos y riolíticos, principalmente en volcanes compuestos y calderas.

- **Depósitos de flujo de escoria y ceniza:** depósitos no seleccionados, controlados por la topografía, compuestos por lapilli escoriáceo andesítico o basáltico. Soldamiento común. Gradación inversa de los clastos mayores. Estructuras de escape de gas y madera carbonizada.
- **Ignimbritas o depósitos de flujo pumíceos:** lapilli y bloques pumíceos, trizas y cristaloclastos, también litoclastos subordinados. Amplio rango de soldamiento y texturas de desvitrificación y recristalización. Fragmentos pumíceos mayores pueden estar inversamente gradados, mientras que los clastos líticos están normalmente gradados. Poseen estructuras de escape de gas, madera carbonizada. Relacionados a calderas.

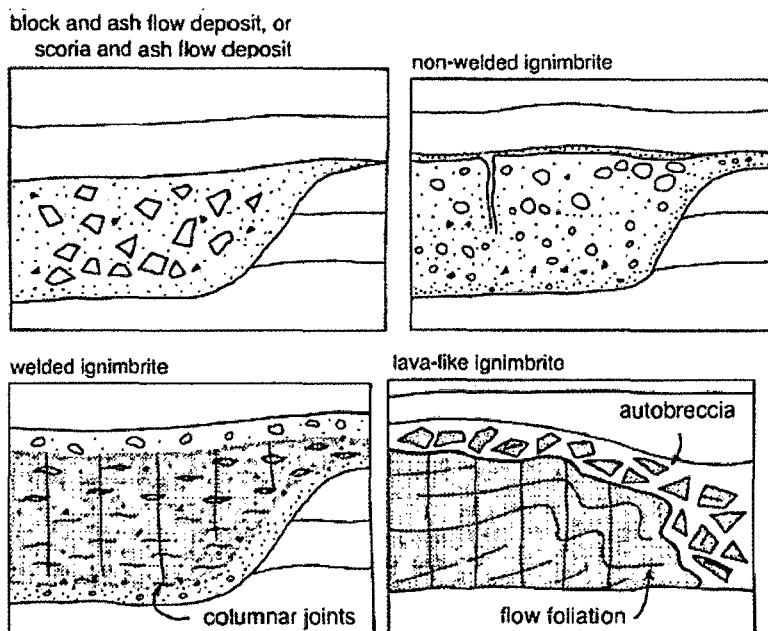


Figura 15. Características de los depósitos de las erupciones explosivas – depósitos piroclásticos primarios (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.)

2.2.7.2 Depósitos volcanoclásticos en suspensión

Suspensión es el transporte de partículas por flotación dentro de un fluido turbulento. La depositación ocurre cuando el fluido se desacelera y las partículas caen por gravedad. (Echevarría, 2007)

Las erupciones volcánicas explosivas eyectan piroclastos que son transportadas en suspensión por nubes de cenizas en la atmósfera o por suspensión en agua.

a. Depósitos piroclásticos de caída

Pueden ser originados por cualquier tipo de explosión (freatomagmáticas, freáticas, magmáticas) y por magmas de cualquier composición. Los piroclastos grandes y densos siguen trayectorias balísticas y caen cerca del origen sin estar influenciados por el viento. Los piroclastos pequeños y livianos forman columnas y plumas eruptivas y son transportados a grandes distancias del centro eruptivo, dependiendo de velocidad de caída, extensión lateral de la pluma, velocidad del viento. (McPhie, 1993)

- **Aglutinado:** es un depósito de caída formado por clastos juveniles fluidales poco vesiculares y bombas que se acumulan cerca del centro eruptivo (magmas de baja viscosidad)
- **Aglomerado:** es un depósito piroclástico de caída, grueso, formado por bombas y bloques. Se restringe a posiciones muy cercanas al centro efusivo. Cuando la acumulación es muy rápida, los fragmentos calientes pueden fundirse y deformarse, formando un depósito de caída soldado.

Los depósitos de caída subaéreos disminuyen en tamaño de grano y espesor con la distancia al centro efusivo. Son continuos y en forma de manto. Buena selección que refleja el tamaño y densidad de los clastos. Los depósitos de lapilli son clasto sostén. Los estratos pueden tener gradación interna (normal o inversa) de acuerdo con la densidad de los clastos. Lapilli acrecionario son comunes en depósitos tamaño ceniza.

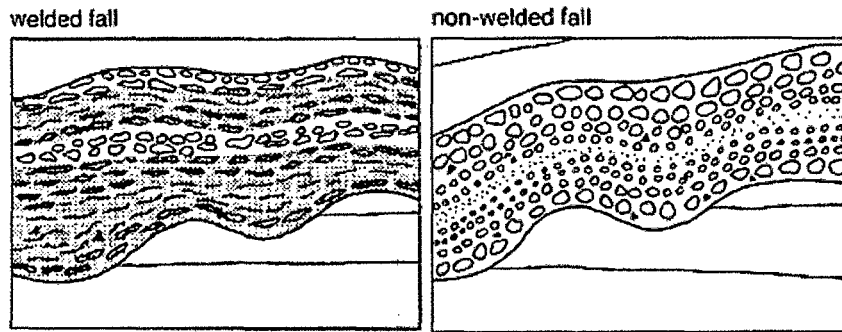


Figura 16. Características de facies coherentes y autoclásticas de lavas y las intrusiones-sync volcánica (McPhie J., Doyle M. y Allen R., 1993.)

b. Características de los depósitos de caída al aumentar la distancia al centro efusivo:

- Disminuye el espesor
- Decrece el tamaño máximo de grano (pómez y líticos)
- Decrece el tamaño medio de grano
- Aumenta la selección
- Cambian los componentes de la población de clastos

2.2.7.3 Clasificación de rocas volcanoclásticas

Para la clasificación de rocas volcánicas es necesario, primero una aproximación descriptiva. La aplicación de términos genéticos debe ser el último paso, después que todas las características litológicas y faciales de campo hayan sido evaluadas. (Echevarría, 2007)

Se puede utilizar la siguiente nomenclatura genética basado en el tamaño de grano para los tipos comunes de depósitos volcanoclásticos (Fisher, 1966)

Cuadro 1. Clasificación genética de los tipos de depósitos piroclásticos,

Tamaño de grano	Depósitos No consolidados	Depósitos Consolidados
<1/16 mm	Ceniza fina	Toba fina (cinerita)
1/16 - 2mm	Ceniza gruesa	Toba gruesa
2 - 64 mm	Lapilli	Lapillita (o toba lapillítica o brecha lapillítica)
> 64 mm	Bomba (forma fluidal), o bloque (angular)	Aglomerado (cuando tiene bombas), brecha piroclástica o volcánica.

Fuente: Echevarria, 2007

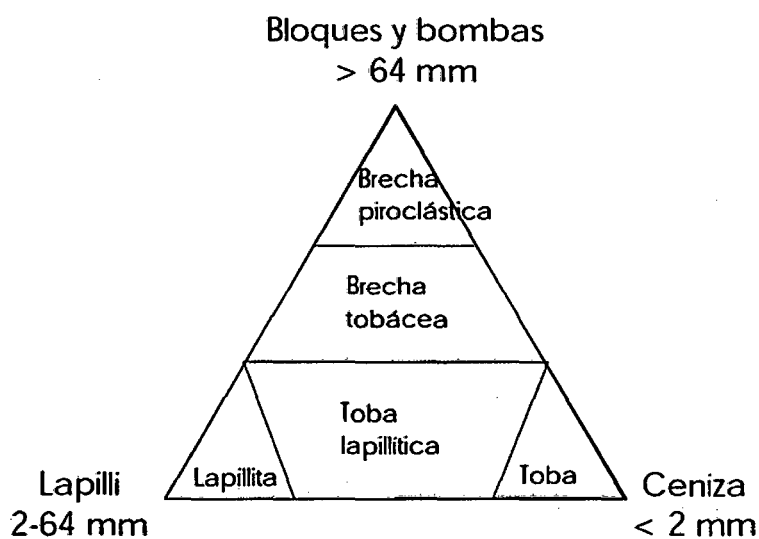


Figura 17. Términos utilizados para rocas piroclásticas primarias (Fisher, 1966)

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Yacimiento Mineral: El yacimiento mineral es un sector de la corteza terrestre en el que, a raíz de uno y otros procesos geológicos, se produjo la acumulación de una sustancia mineral, que puede utilizarse industrialmente, dado su calidad, cantidad y sus condiciones de yacimiento, para su explotación comercial. (Dávila, 2011)

Alteración Hidrotermal: Respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a cambios fisicoquímicos y termodinámicos de los fluidos hidrotermales. (Maksaev, 2001)

Falla: se trata de una fractura frágil en una roca, a lo largo de la cual se ha producido un desplazamiento visible paralelo a la superficie de la fractura. (Oyarzún, 2013).

Zona de Falla: Se trata de una estructura frágil compuesta por innumerables planos de falla, sub-paralelos o marcadamente oblicuos entre sí, interconectados, y estrechamente espaciados. En algunos sectores la zona de falla puede contener zonas de brecha o harina de falla (fault gouge) que obviamente no permitirán observar los planos interconectados antes mencionados. (Oyarzún, 2013).

Lineamiento: Rasgo lineal, con uno o varios segmentos rectos o ligeramente curvos, identificado en una imagen de satélite, aerofotos, mapas topográficos o geofísicos; los grandes lineamientos son interpretados como la expresión superficial de antiguas estructuras corticales profundas o trans-litosféricas. Aunque por su tamaño, muchas veces es difícil apreciarlos en el campo, es conveniente intentar confirmar su carácter, antes de su tratamiento. En general, solo se dispone del rumbo y longitud de los segmentos. (Macharé, 2001).

Control. Se denomina así al efecto regulador de un agente o parámetro sobre la evolución de un sistema o proceso. En el estudio de los yacimientos metalíferos es esencial determinar el control ejercido por la litología (control litológico) y por las estructuras (control estructural) en la distribución de la mineralización económica. De igual manera, ambos controles influyen en la distribución de los cuerpos mineralizados a escala local, distrital, regional y de fajas metalíferas a escala continental. En consecuencia son factores claves en la exploración geológico-minera (Oyarzún, 2009).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN Y ACCESO

El proyecto Ciénaga Norte se encuentra ubicado en el distrito de Chugur, Provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca a 4000 m.s.n.m, entre las coordenadas UTM (Datum PSAD56):

Este	Norte
754 400	9 254 400
755 300	9 255 400

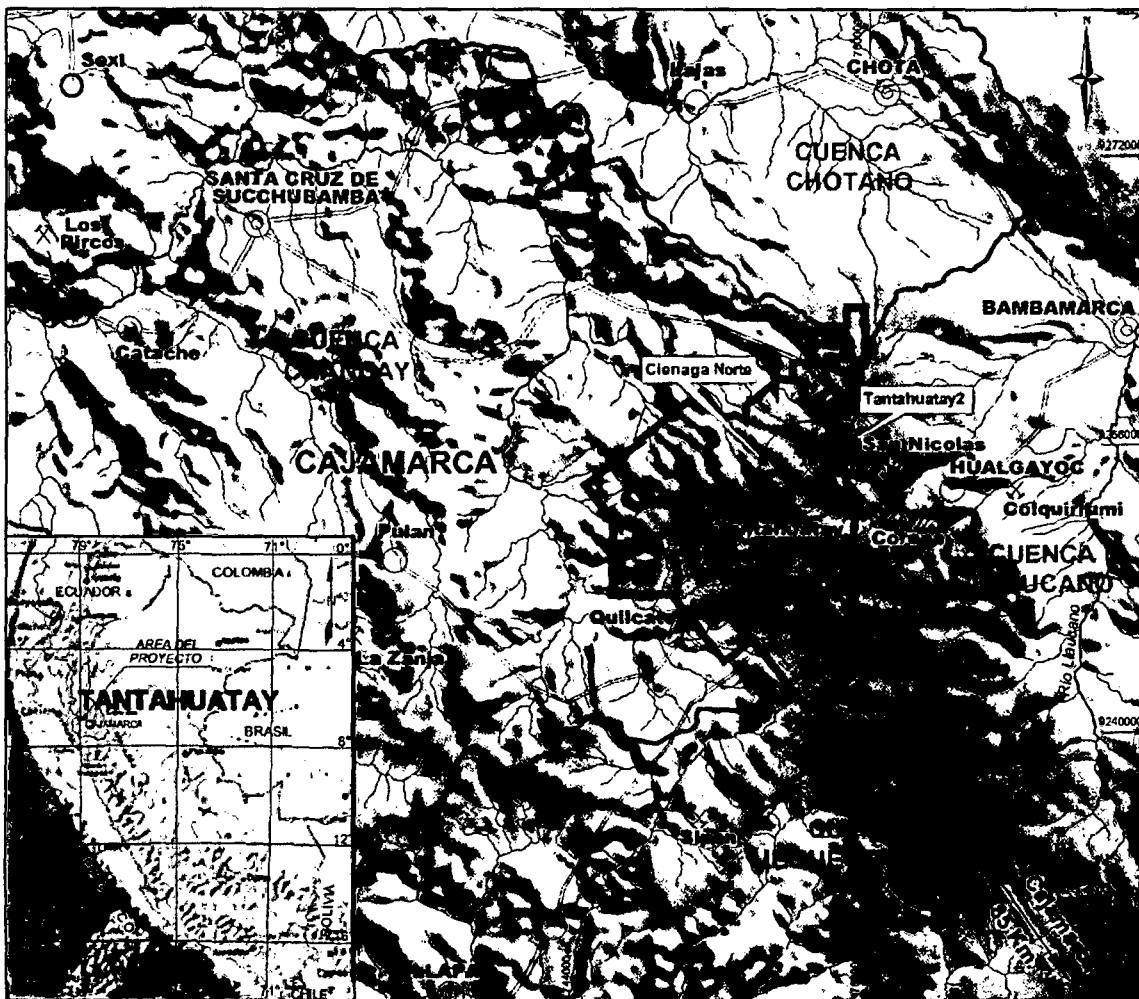


Figura 18. Mapa de ubicación del yacimiento Ciénaga Norte.

El acceso a la zona del proyecto es mediante carretera asfaltada en la ruta Cajamarca – Hualgayoc, a una distancia aproximada de 85 Km, con un tiempo aproximado de 2 horas de viaje en camioneta (Figura 18).

3.2 TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Tipo de investigación será correlacional de IV nivel, diseño no experimental – transversal y correlacional/causal, usando el método descriptivo.

3.3 PROCEDIMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el estudio de investigación se revisó la información de trabajos anteriores realizados en el proyecto, así mismo se realizó diferentes trabajos de campo como mapeo geológico, logueo geológico, relogueo litológico de sondajes diamantinos y toma de muestras para análisis químico.

La información de campo y laboratorio es recolectada en formatos para ser ingresada al software de base de datos Acquire, en el cual se válida para su posterior uso en los software de modelamiento Leapfrog Geo y Minesight.

Para la construcción de los modelos geológicos 3D de oro, alteraciones, litológico y estructural, se han procesado los datos de geología y geoquímica de oro de los sondajes diamantinos ejecutados en las diferentes campañas de perforación, haciendo uso del software Leapfrog Geo.

Con los modelos geológicos 3D, se realizó la interpretación de los factores como litología, alteración y estructural que condicionan la ocurrencia de oro en el depósito.

3.3.1 Evaluación de la información existente

Se consideró como información básica inicial, los trabajos realizados por Coimolache en la campaña de infill drilling del año 2014, 2006 y el trabajo de exploración realizado por la empresa BISA en el año 2002 y Southern Perú corporation entre los años 1994-1997.

La información complementaria consistió en análisis de imágenes de ortofotos, muestras de mano y fragmentos de testigos de perforación de las campañas de perforación del 2014, 2006, 2002 y 1997.

3.4 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS Y ELABORACIÓN DE INSTRUMENTOS

Para el desarrollo del proyecto de investigación se utilizó el siguiente procedimiento:

3.4.1 Mapeo geológico

Para la investigación se revisó la geología de superficie teniendo como base el plano geológico a escala 1/1000, del año 2006 (Calizaya J, 2006); así mismo la geología estructural, para lo cual se realizó visitas de campo y toma de rumbos y buzamientos.

Como actividad complementaria se realizó el análisis de ortofotos, identificando alineamientos y estructuras que se verificaron con las salidas de campo.

Este trabajo fue de suma importancia porque permitió correlacionar los contactos de superficie con la información de sondajes, considerando tipo de: alteración (sílice masiva, sílice granular, sílice vuggy, argílica avanzado, argílica y propilítica), litología (brechas, tobas y diques subvolcánicos) y estructuras (fallas y fracturas), durante la construcción de los modelos geológicos 3D.

3.4.2 Perforación diamantina

Entre los meses de abril a junio se realizó 1300m de perforación diamantina distribuidos en 13 sondajes ubicados en el borde Este del depósito cuyo objetivo fue evaluar la posible extensión del pit de \$1250/oz Au, que nos permita incrementar nuevos recursos medidos e indicados; así como identificar nuevos objetivos que representen incremento de los recursos existentes.

En esta etapa, como producto se obtuvo las muestras core de diámetro HQ, la que nos sirvió para obtener información geológica de profundidad a través del logeo geológico.

En campo se tomaron los datos topográficos del collar (este, norte, elevación, inclinación y azimut) de cada sondaje, lo que sirvió para ubicarlos espacialmente en sus coordenadas reales. Con estos datos obtenidos en campo se elaboraron los archivos "collar" y "survey" en formato *.CSV, los que se importaron desde el software Leapfrog Geo, para graficar en 3D los sondajes perforados. Estos archivos iniciales fueron la base para mostrar la información de leyes y geología que se obtuvo de los sondajes.

3.4.3 Logeo geológico de sondajes diamantinos

Consistió en la descripción geológica y grafica de cada sondaje perforado de acuerdo a las tablas configuradas en el software GVMapper. Estos datos de logeo son muy importantes porque constituyen el primer paso para el muestreo de sondajes y además nos proporcionaron los datos para la interpretación de la geología del depósito.

Los datos que se describieron e ingresaron a las tablas del software son: tipo de alteración (sílice masiva, sílice granular, sílice vuggy, argílica avanzado, argílica y propilítica), litología (volcánicas, subvolcánicas e intrusivas), estructuras (fallas, fracturas y venillas), mineralización (% de óxidos y sulfuros) y mine zone (oxidados, mixto, sulfuros). Estos datos nos permitieron obtener una hoja de logeo digital de cada sondaje.

Los datos de logeo fueron descargados en formato *.CSV para ser ingresado al software Acquire, de donde se extrajo la data validada para la elaboración de los modelos geológicos 3D.

Se elaboraron los archivos "alteración" y "litología" en formato *.CSV, los que se importaron desde el software leapfrog Geo, para construir el modelo 3D de alteración y litología.

3.4.4 Muestreo de sondajes diamantinos.

Se realizó en base al logueo geológico y según el procedimiento de muestreo; el que especifica realizar un muestreo de manera sistemática cada 2.00m, pudiendo variar según el criterio del geólogo, para lo cual se elaboró la hoja de muestreo donde se especifica los tramos del muestreo y el QA/QC del muestreo; a cada muestras se le asignó un código de barras, el cual es utilizado en todo el proceso de muestreo hasta obtener el resultado emitido por el laboratorio.

El proceso de muestreo consiste en extraer la mitad de la muestra core del sondaje para ser enviado a análisis geoquímico ICP+Au en laboratorio SGS y la otra mitad queda como muestra testigo en los almacenes de cores del proyecto.

Los reportes de leyes entregados por el laboratorio SGS fueron ingresados al software AcQuire, de donde se extrajo la data validada para la elaboración del modelo 3D de oro.

Se elaboró el archivo "Assay" en formato *.CSV, el que se importó desde el software leapfrog Geo, para construir el modelo 3D de oro.

3.4.5 Relogeo litológico de testigos

El proceso de relogeo litológico de testigos, consistió en la revisión, identificación y descripción de la litología de acuerdo a las tablas configuradas en el software GVMapper y en hojas de logueo. Este trabajo se realizó a aquellos sondajes ejecutados en las campañas anteriores al 2014, cuyos datos fueron necesarios para completar la información existente y que permitió realizar una mejor interpretación en la construcción del modelo litológico.

Los datos de relogeo fueron descargados en formato *CSV para ser ingresado al software Leapfrog Geo, donde se realizó la construcción del modelo litológico 3D.

3.4.6 Elaboración de modelos geológicos 3D.

Con la ayuda del software Leapfrog Geo, se realizó la construcción de los modelos geológicos 3D: litológico, alteraciones y oro; así como la interpretación de la geología estructural en 3D. Este proceso consistió en el procesamiento e interpretación de todos los datos obtenidos del proceso de logueo, relogueo y muestreo de los sondajes diamantinos.

Cada modelo geológico fue construido mediante la interpolación de datos geológicos y modificados de acuerdo a una interpretación propia que se tiene del depósito.

Estos modelos nos ayudaron a interpretar como los factores geológicos modelados como: litología, alteración hidrotermal y geología estructural controlan la mineralización de oro.

3.5 MATERIALES

Los materiales que se usaron en el presente trabajo de investigación fueron:

- Plano Topográfico 1/1000, PSAD 56
- GPS
- Picota.
- Ácido Clorhídrico (HCl al 12%).
- Lupas de 10X y 20X aumentos.
- Brújula Brunton.
- Rayador o lápiz de dureza (dureza 7)
- Protáctor 1/1000.
- Bolsas para muestras.
- Tablero de mapeo.
- Flexómetro de 5m
- Plumón tinta indeleble.
- Libreta de campo
- lápiz 2B.
- Cámara Fotográfica Digital
- Ortofoto 1/500

3.5.1 Descripción de los programas utilizados

Los softwares geológicos usados para el trabajo de investigación son de uso interno y licenciados a Cia. Minera Coimolache S.A., entre los cuales tenemos:

- **acQuire:** Este software gestor de base de datos, se utilizó para validar los datos de leyes y datos de logueo
- **Leapfrog Geo:** Este software de modelamiento geológico, se utilizó para generar los modelos geológicos 3D.
- **Minesight:** Este software geológico, se utilizó para correlacionar los modelos geológicos y para la impresión de planos y secciones del informe final.
- **Auto Cad:** Este software fue utilizado para el intercambio de archivos entre los softwares geológicos y para la impresión de planos del informe final.
- **Dips:** Este software fue utilizado para el análisis estructural.

3.6 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.6.1 Análisis de datos












Para la construcción de los modelos geológicos se ha utilizado la información del logueo de 13,893.60m de perforación diamantina distribuidos en 110 sondajes diamantinos correspondientes a los diferentes programas de perforación ejecutados hasta la fecha. Del total de la información revisada, fue necesario realizar el relagueo litológico de 7,627.90m de muestras testigo correspondiente a 56 sondajes diamantinos, con la finalidad de completar la información faltante para el modelo litológico 3D. Así mismo para la construcción del modelo de oro se ha utilizado los resultados de geoquímica de oro de 8,111 muestras primarias de sondajes diamantinos y 301 muestras de accesos

3.6.2 Tratamiento de datos para modelo de alteraciones 3D

Los datos de alteración obtenidos del logueo de sondajes diamantinos, se han agrupado en 5 unidades modelables con el fin de simplificar el modelo de alteraciones. Este agrupamiento se ha realizado directamente en el software Leapfrog Geo, teniendo como base la clasificación que se muestra en cuadro 2.

La interpolación que realizó el software, fue modificada siguiendo principios geológicos y propio conocimiento del depósito; la revisión e interpretación se realizó en secciones cada 50m y según criterio hasta obtener un modelo aceptable. Estos resultados del modelamiento se mostraran a través de planos, secciones y vistas 3D.

Cuadro 2. Clasificación de la alteración del yacimiento Ciénaga Norte.

DATOS DE LOGUEO			MODELO LITOLÓGICO		
ALTERACIÓN	ABREVIATURA	COLOR	UNIDAD MODELABLE	ABREVIATURA	COLOR
Silice Masiva	SilMas		Silice Masiva	SilMas	
Silice Vuggy	SilVug		Silice Lixiviada	SilLix	
Silice Granular	SilGra				
Argilico avanzado	ArglAvd		Argilico avanzado	ArglAvd	
Argilica	Argl		Argilica	Argl	
Propilitico	Prpt		Propilitico	Prpt	

3.6.3 Tratamiento de datos para modelo litológico 3D

Los datos de litología obtenidos del logueo y relogueo de sondajes diamantinos, se han agrupado en 6 unidades modelables con el fin de simplificar el modelo litológico. Este agrupamiento se ha realizado directamente en el software Leapfrog Geo, teniendo como base la clasificación que se muestra en cuadro 3.

La interpolación que realizó el software, fue modificada siguiendo principios geológicos y propio conocimiento del depósito; la revisión e interpretación se realizó en secciones cada 50m y según criterio hasta obtener un modelo aceptable. Estos resultados del modelamiento se mostraran a través de planos, secciones y vistas 3D.

Cuadro 3. Clasificación de la litología del yacimiento Ciénaga Norte.

DATA DE LOGUEO				MODELO LITOLÓGICO
LITO_GEN	LITO_TYPE	LITO_CODE	NOMBRE	Lito Model
Pirocl	Pirocl	Pirocl	Piroclastico (indiferenciado)	TCri
	T	T	Toba	
	TCri	TCri	Toba Cristalino	
	TCenz	TCenz	TCenz	TCenz
	TCL	TCL	Toba Cristalolitico	TCL
Hpa	Hpa	Hpa	Hipabisal (Indiferenciado)	Hpa
	Dk	Dk	Dique	
Int	Int	Int	Intrusivo	Int
Bx	Bx	Bx	Brecha (indiferenciada)	BxH
	BxH	BxH	Brecha Hidrotermal	
	BxCr	BxCr	Brecha Craquelada	

3.6.4 Tratamiento de datos para modelo Estructural 3D

Los alineamientos y estructuras mapeadas e interpretadas en la ortofoto fueron graficados en planta usando el software Autocad y Minesight e importadas al Leapfrog Geo, donde se realizó la interpretación de los sistemas de fallamiento y la clasificación de las direcciones de fallas y estructuras.

Se consideraron 92 datos de rumbos y buzamientos con lo cual se realizó los diagramas de rosas para cada sistema de fallamiento y fracturamiento reconocido. Para este análisis fue necesario el uso del software Dips.

Los resultados se muestran a través de figuras, planos, secciones y vistas 3D.






3.6.5 Tratamiento de datos para modelo de oro 3D

Todos los resultados de geoquímica de oro que se obtuvieron del muestreo de sondajes ejecutados hasta el momento fueron ingresado al software Leapfrog Geo e interpolados considerando un cutoff >0.15 g/t Au. Así mismo se realizó una segunda interpolación considerando los rangos de oro del cuadro 4, con el fin de verificar la

relación de las leyes altas con los modelos de litología, alteración hidrotermal y estructural.

La interpolación que realizó el software, fue modificada considerando un alcance de hasta 50m en los bordes del modelo; la revisión e interpretación se realizó en secciones cada 50m y según criterio hasta obtener un modelo aceptable. Estos resultados del modelamiento se mostraran a través de planos, secciones y vistas 3D.

Cuadro 4. Cuadro de rango de leyes de oro del yacimiento Ciénaga Norte

Ley de Au g/t	
	0.00 - 0.15
	0.15 - 0.40
	0.40 - 0.80
	0.80 - 1.50
	> 1.50

3.7 GEOLOGÍA DISTRITAL

La secuencia estratigráfica está definida desde la base por areniscas del Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior, margas y calizas de las formaciones Inca, Chulec y Pariatambo. Estas subyacen al Grupo Pulluicana conformado por calizas y areniscas del Cretáceo superior. Cortando a este basamento sedimentario se tienen stocks y cuerpos intrusivos de composición intermedia como la diorita San Miguel y la diorita Quebrada Puente de la Hierba. Además conocemos otros cuerpos intrusivos menores como el sill Coimolache. Sobre yaciendo a la secuencia anterior en discordancia angular se tiene una amplia distribución de rocas volcánicas del Terciario, que son parte de un evento bimodal desarrollado en un margen continental activo; está evidenciado por una secuencia de domos subaéreos y tobas piroclásticas que afloran entre los cerros Tantahuatay y alrededores (Macfarlane et al, 1990). Coronando a esta secuencia se tiene a las tobas ignimbríticas correspondientes a los Volcánicos Huambos del Plio-Pleistoceno (Figura 19).

SISTEMA	FORMACION	Pot. m.	LITOLOGIA	DESCRIPCION	Edad M.A
CUATERNARIO	Holoceno Pleistoceno			Depósitos morrénicos fluvio-glaciares	<1.5
	PLIOC.	VOLC. HUAMBOS		Tobas piroclásticas, riolíticas riolodacíticas	
TERCIARIO	MIOC. SUP.	VOLCANICO CALIPUY		Domos riolodacíticas	8,3
				Tufo riolodacítico	9,6
				Bx, vns. qz-py, en, cv	+ 11,0
				Domo andesítico (porfirítico hornbléndico)	12,6
				Andesitas porfiríticas, hornbléndicas	
				Andesitas basálticas afaníticas	12,7
MIOCENO MEDIO				Tufo andesítico	12,7
				Domos andesíticos	13,2
				Stock diorítico monzo-diorita	12,7
CRETACEO	SUPERIOR	YUMAGUAL y/o PULLUCANA		Lacólitos/Sills calizas gris claras a parduzcas masiva en bancos medianos a gruesos y escasos niveles de lutitas	11,8
			Sills dioríticos		
	INF.	PARIATAMBO		Calizas bituminosas gris oscuras con niveles de lutitas	

Figura 19. Columna estratigráfica para el proyecto Tantauatay. (Calizaya J, 2006)

La geología del área se caracteriza por la ocurrencia de secuencias de unidades mayormente volcánicas, que se hallan suprayaciendo a las calizas del Grupo Puillucana del Cretaceo, que afloran al Este del área del proyecto, donde son cortadas por un intrusivo félsico (FQB), graniodorítico a diorítico.

En la parte central se ha desarrollado una gruesa secuencia volcánica, consistente de andesitas basáltica afaníticas a hornbléndicas hacia la base, seguida de una secuencia de las lavas andesíticas porfiríticas, que están cortadas por una secuencia piroclástica andesítica y de tobas líticas de composición dacítica que afloran muy discontinuamente. Estas secuencias de unidades volcánicas se hallan intruídas por cuerpos de brechas hidrotermales, aun no caracterizados y localmente por domos dacíticos-riolodacíticos que se encuentran como remanentes de la erosión (Torres et al, 2001). (Plano 1)

3.8 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Estructuralmente, el área del proyecto se enmarca dentro de un megabloque estructural complejo, que es el resultado de diferentes fases tectónicas reconocidas para el norte del país, limitado al norte por la flexión de Cutervo (Buenaventura, 1992) y al sur por la flexión de Cajamarca (INGEMMET, 19984). Dentro de este bloque estructural es importante señalar que los lineamientos estructurales principales, más antiguos y dominantes son los andinos, que han sido cortados por sistemas Noreste y luego por estructuras subordinadas Norte-Sur y Este-Oeste, que configuran el marco estructural del distrito. (Plano 2)

3.9 GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO

Corresponde a un depósito de filiación epitermal de alta sulfuración (HS) con mineralización de oro diseminado y escaso contenido de plata. Los cuerpos mineralizados están conformados por el conjunto de brechas hidrotermales, estructuras silíceas en variedades de sandy sílica, vuggy sílica, sílice masiva principalmente, los que en profundidad se comportan como estructuras tabulares de control fractural y con orientación dominante E-W; el cuerpo de mineral sílice-óxidos distribuido en superficie tienen una elongación N-S, controlados por tres sets de fracturamientos principales E-W, N 60° E, N 20° W. (Plano 3)

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los controles de mineralización de oro más importantes en este depósito son: el control estructural y el control litológico.

4.1.1 Control litológico

El depósito se desarrolla principalmente en un ambiente piroclástico conformado por tobas de cristales y de cenizas; cortan el sistema, brechas hidrotermales y diques tardíos de andesitas magnéticas con alteración propilitica. La mejor mineralización de oro se relaciona principalmente a la ocurrencia de brechas hidrotermales y tobas de cristales. Estas rocas con buena permeabilidad y porosidad fueron más receptivas para la infiltración de los fluidos hidrotermales. (Planos 4, 5 y 6)

a. Brecha hidrotermal

Este tipo de roca corta las rocas piroclásticas del depósito, presenta una disposición subvertical concordante con el sistema de fallamiento N75°E, alojando los mejores valores de oro con valores de hasta 2 g/t Au.

Para el modelo litológico las brechas silíceas del depósito se han agrupado como una sola unidad litológica, estas brechas se describen a continuación:

- **Brecha de óxidos de hierro (Bx Ox).** Constituidos por fragmentos subangulosos, con tamaños de 1 cm a 10 cm principalmente, son sílice gris, englobados en matriz de óxidos goetíticos, jarositas y limonitas dominantes en el ambiente presenta turgitas y baritina cristalizada.

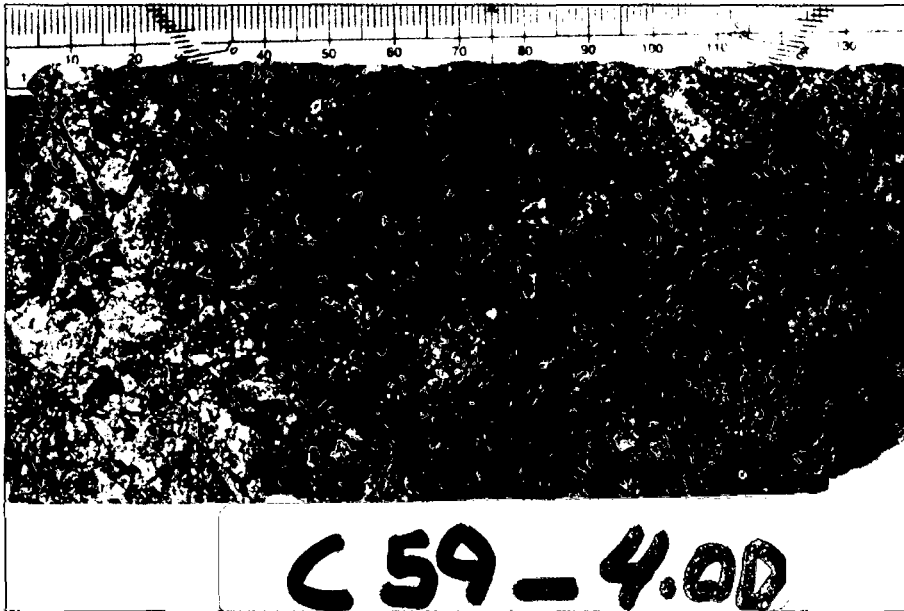


Foto 1. Brecha hidrotermal matriz óxidos de hierro – Sondaje C-59.

- **Brecha de sílice granular - arenosa (Bx Sandy).** Se caracteriza por la presencia de fragmentos de tamaños 1 cm a 5 cm, presenta fragmentos subangulosos a subredondeados de sílice gris masiva y vuggy en matriz de sílice arenosa y/o sílice sandy soldada con adición de óxidos de hierro en la matriz, goetitas y jarositas principalmente.

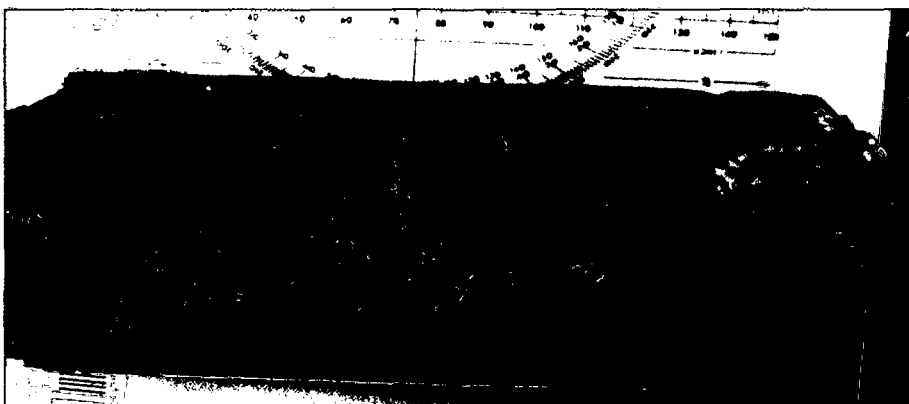


Foto 2. Brecha hidrotermal matriz sílice arenosa – Sondaje C-59.

- **Brecha de sílice (Bx Sil).** Conformado por fragmentos angulosos de 1 cm a 5 cm, se ha reconocido brechas clasto soportado y matriz soportado, son brechas de craquelamiento o de ruptura, sus fragmentos son de sílice gris masiva y la matriz es sílice de grano muy fino, polvo de roca y en la mayoría de los casos van relacionados con las brechas de óxidos.



Foto 3. Brecha hidrotermal matriz sílice (Brecha craquel) – Sondaje C-57.

b. Tobas de Cristales

Es el protolito principal, se exponen en todo el depósito, según el modelo litológico tienen una disposición subhorizontal. Esta roca presenta fenocristales rotos desde milimétricos hasta 0.5cm, con textura porfírica y en algunos casos se presenta con matriz fina (ceniza) con fenos alterados a arcillas (roca deleznable). La característica de este tipo de roca es que se observan clastos subangulosos de forma esporádica.

Los valores de oro que se reconocen en este tipo de roca asociado a la alteración silíceo, varía hasta 0.7 g/tAu.

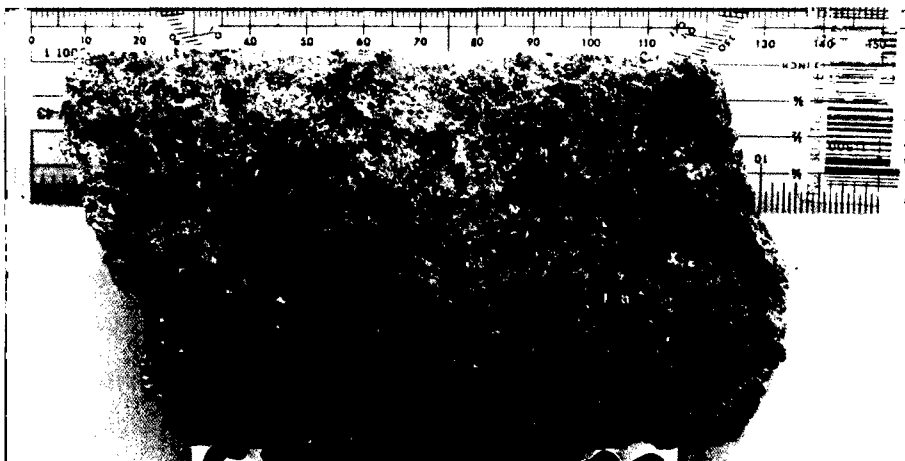


Foto 4. Roca piroclástica - toba de cristales – Sondaje C-28.

c. Tobas de cenizas

Este tipo de roca tiene espesor variable e irregular, según el modelo litológico tiene una disposición subhorizontal concordante con la tobas de cristales. Esta roca presenta una matriz fina de ceniza (roca deleznable) y en algunos casos se observa laminaciones o pequeños nódulos.

Los valores de oro que se reconocen en este tipo de roca asociado a la alteración silícea, varía hasta 0.4 g/tAu.

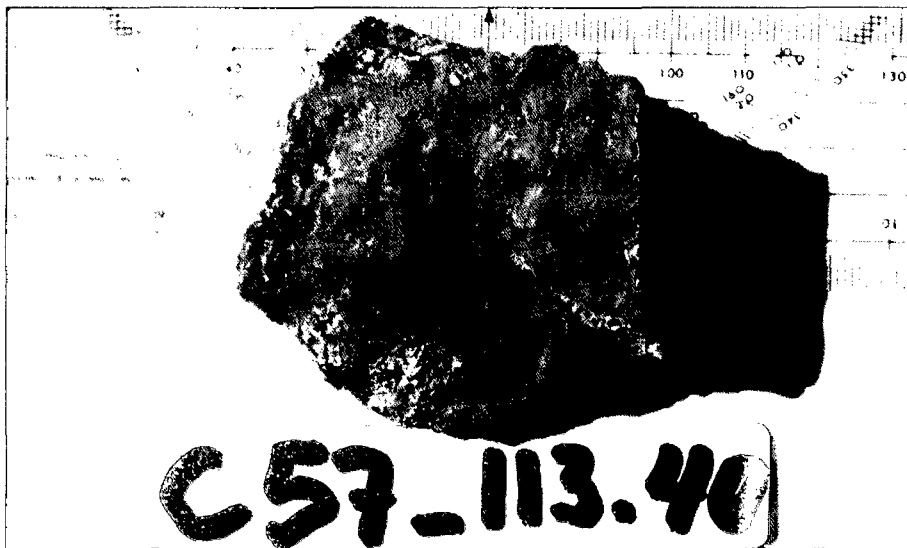


Foto 5. Roca piroclástica - toba de ceniza– Sondaje C-57.

d. Tobas de cristales y líticos

Este tipo de roca se encuentra intercalado con las tobas de cristales y de cenizas, teniendo una disposición subhorizontal. Esta roca presenta una matriz de cristales con clastos angulosos a subangulos <3cm de fragmentos polimicticos que le dan a la roca una apariencia brechoide.

Los valores de oro que se reconocen en este tipo de roca asociado a la alteración silícea, varía hasta 0.4 g/tAu.

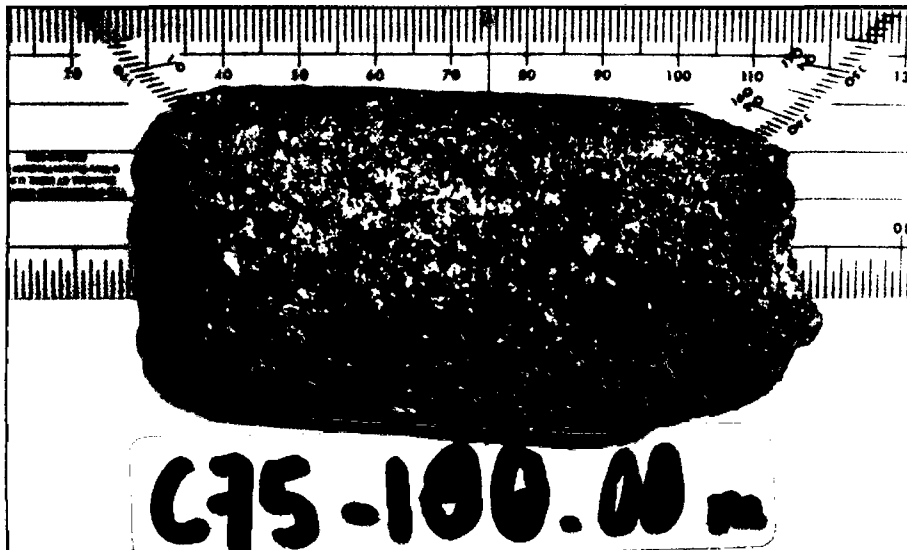


Foto 6. Roca piroclástica - toba de cristales y líticos - Sondaje C-75.

e. Hipabisal

Está representado por rocas propilitizadas gris verdosas de textura porfirítica de grano medio a fino, presenta fenos de plagioclasas y horblendas bien desarrolladas con diseminación de magnetita. Este tipo de roca se encuentra como diques o domos andesíticos cortando el sistema de alta sulfuración (post mineral).

Este tipo de roca no presenta valores económicos de oro < 01 g/t Au.



Foto 7. Roca hipabisal - dique andesítico – Sondaje CIN14-099.

4.1.2 Control estructural

Se ha determinado tres sistemas de fallamiento N75°E, N65°W y N30°W, con sus respectivos sistemas de fracturamiento que se describen a continuación. (Plano 7)

a. Sistema fallamiento N75°E

Este sistema de fallamiento normal está asociado a las estructuras de sílice y brechas hidrotermales que son las que presentan mejor mineralización de oro. La dirección preferente varía entre N70°E y N85°W con buzamiento sub vertical.

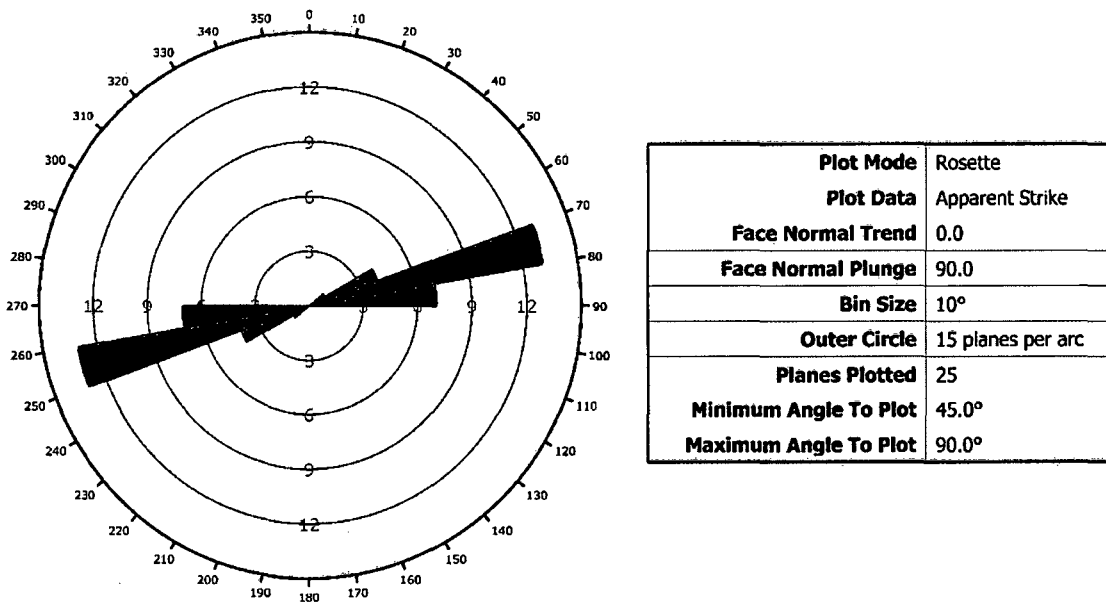
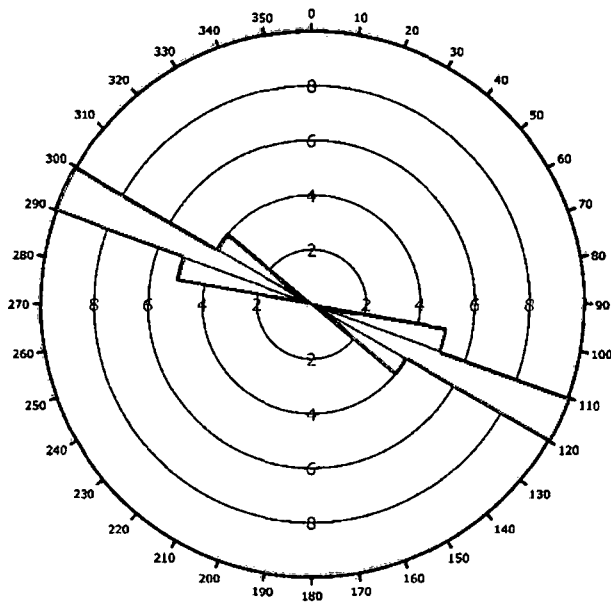


Figura 20. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N75°E.

b. Sistema de fallamiento N65°W.

Este sistema de fallamiento esta intersectado por el fallamiento N75°E y constituye un importante control para la mineralización de oro. La dirección preferente varía entre N60°W y N70°W con buzamiento sub vertical.

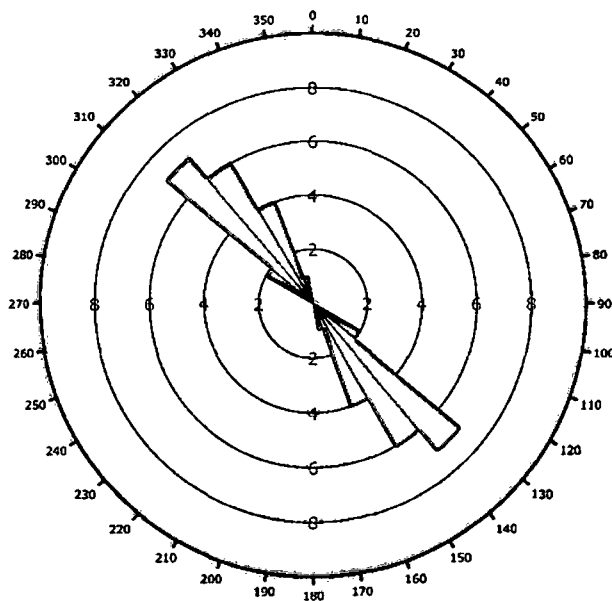


Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	19
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 21. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N65°E.

c. Sistema de fallamiento N 30° W

Este sistema de fallamiento más tardío que se puede reconocer está más relacionado al fallamiento de rumbo regional (sistema andino), con débil relleno de mineralización. La dirección preferente varía entre N20°W y N45°W con buzamiento sub vertical.



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	10 planes per arc
Planes Plotted	20
Minimum Angle To Plot	45.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figura 22. Diagrama de rosas con datos tomados en el sistema de fallamiento N30°W.

d. Sistema de fracturamiento.

Se han reconocido tres sistemas de fracturamiento siendo el más importante el sistema EW que se comporta como trampas tensionales, están ubicados mayormente en la parte central del depósito en donde se han desarrollado las principales estructuras con mineralización económica de oro. Se tiene también el sistema de fracturamiento NS y NE con buzamientos verticales.

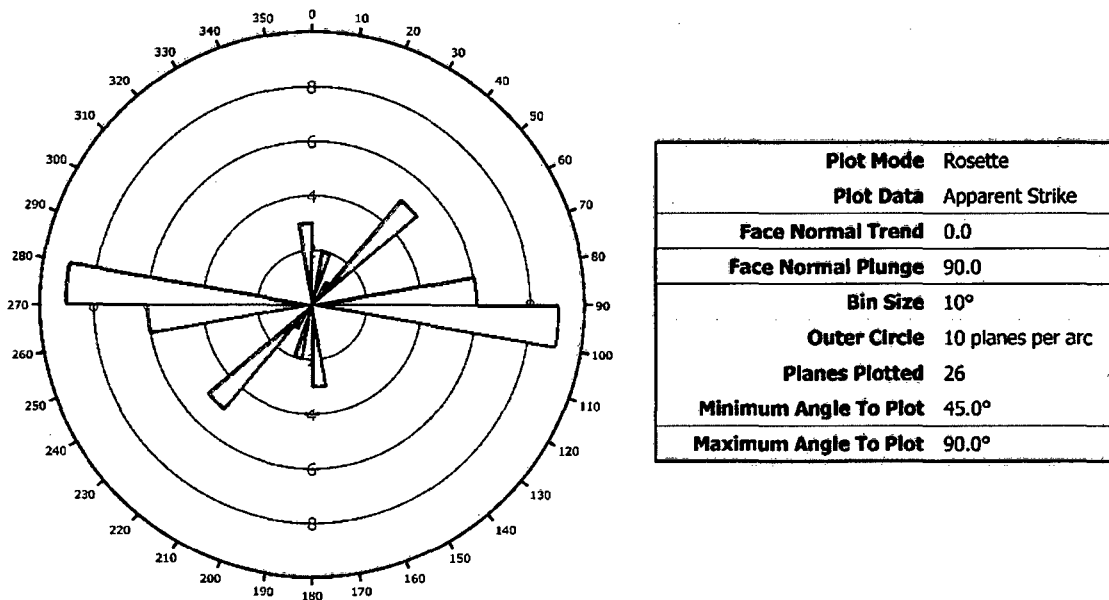


Figura 23. Diagrama de rosas con datos tomados en los sistemas de fracturamiento.

4.1.3 Control de alteración hidrotermal

La alteración en el depósito es típica de un sistema ácido-sulfato (alta sulfuración). La alteración es intensa y los límites del depósito están definidos por la extensión de las rocas alteradas. Existe un patrón zonal, con sílice granular-vuggy y sílice masiva en la parte central, que gradúa alejándose del centro, a sílice-alunita±pirofilita (argílica avanzada), caolinita-illita±dickita (argílica) y epidota-clorita (propilítica), este último asociado también a los diques tardíos que cortan el sistema hidrotermal. Volumétricamente el tipo de alteración más abundante es arcilla, pero la alteración silíceo es la más importante para la mineralización de oro. (Planos 8, 9, y 10)

Entre las alteraciones hidrotermales reconocidas tenemos:

- a. **Silicificación:** representado por la sílice masiva, sílice granular (Sandy silica) y vuggy sílica. Este tipo de alteración se encuentra en la parte central del depósito y coinciden con el sistema de fallamiento N75°W.



Foto 8. Alteración Sílice masiva – sondaje CIN14-098.



Foto 9. Alteración Sílice arenosa (compacta) – sondaje C-75.

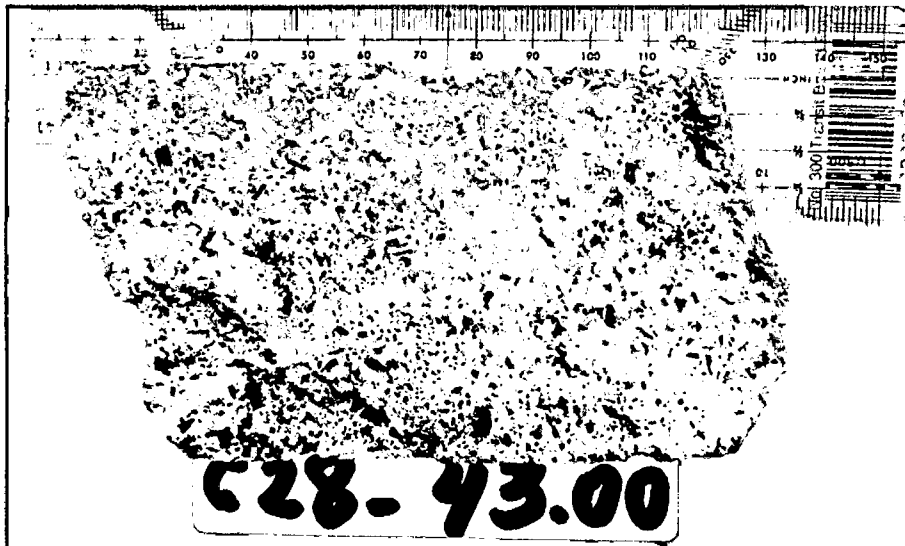


Foto 10. Alteración Sílice vuggy – sondaje C-28.

- b. **Argílico avanzado:** representado por el ensamble cuarzo-alunita, a profundidad se reconoce cuarzo-alunita-pirofilita y cuarzo-pirofilita-alunita estos dos últimos generalmente en textura patchy lo que nos indica mayor temperatura del sistema. Este tipo de alteración bordea la silicificación.

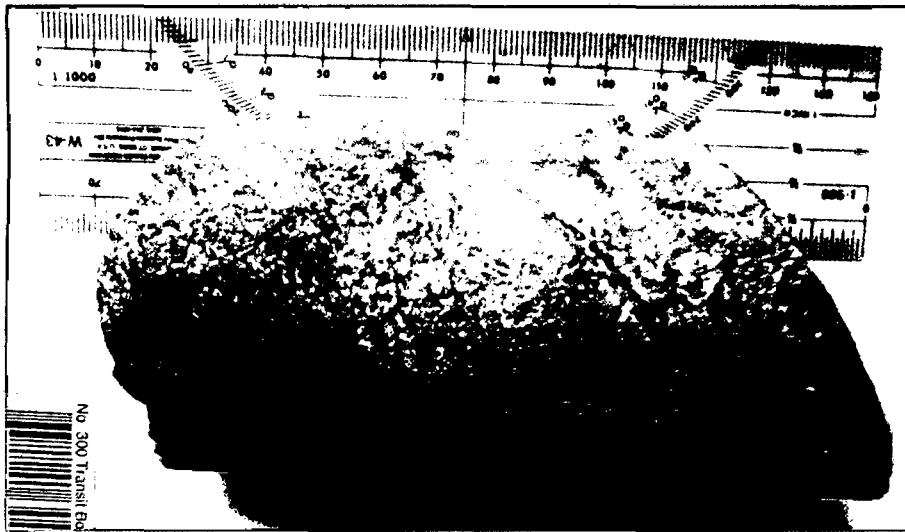


Foto 11. Alteración argilico avanzado silíceo-alunita – sondaje CIN-55.

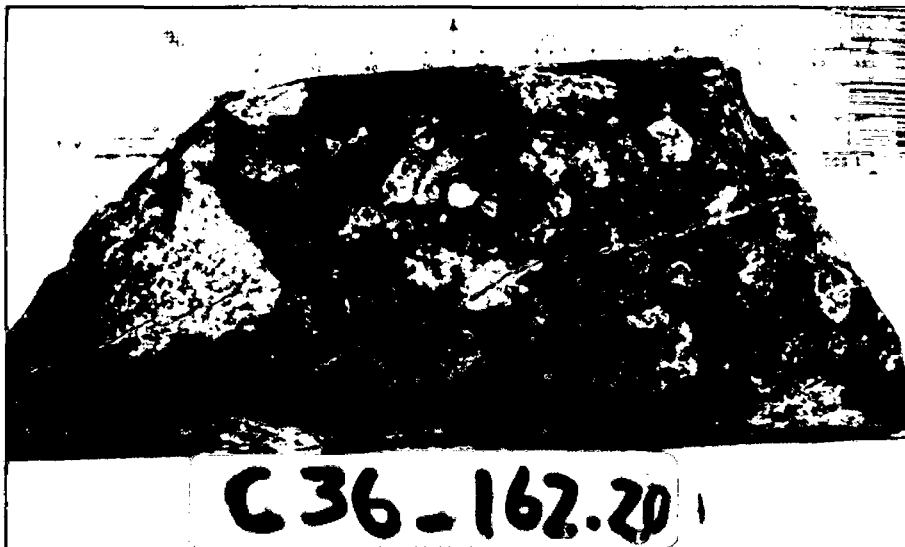


Foto 12. Alteración argilico avanzado sílice-pirofilita-alunita (textura patchy) – sondaje C-36.

c. **Argilica:** representado por el ensamble caolín-illita±dickita±pirita, este tipo de alteración se encuentra en todo el depósito de forma remanente, lateral y verticalmente nos indica que estamos saliendo del sistema hidrotermal.

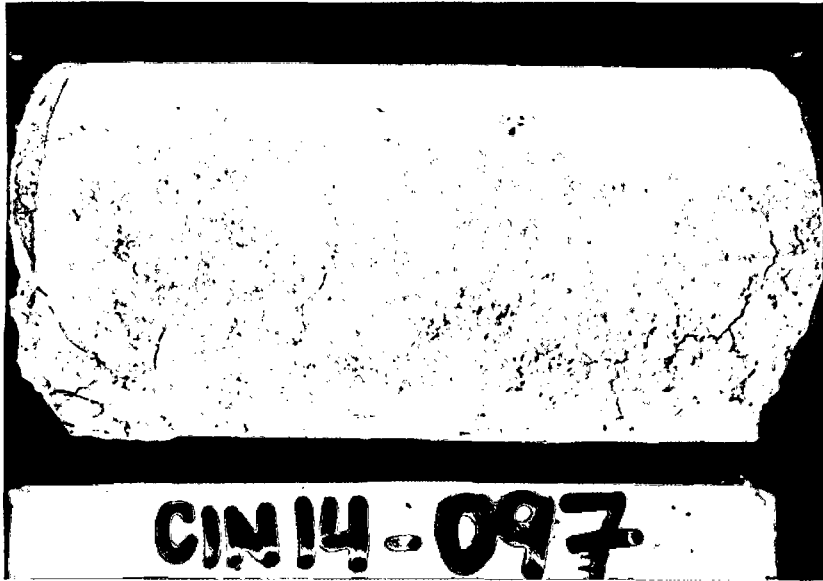


Foto 13. Alteración argílica – sondaje CIN14-097.

- d. **Propilítica:** representado por el ensamble epidota-clorita±pirita, este tipo de alteración se encuentra en la parte distal del depósito; también se ha reconocido en los diques tardíos que cortan el sistema hidrotermal, su característica en el depósito es el color verdoso de la roca y generalmente presenta magnetita.

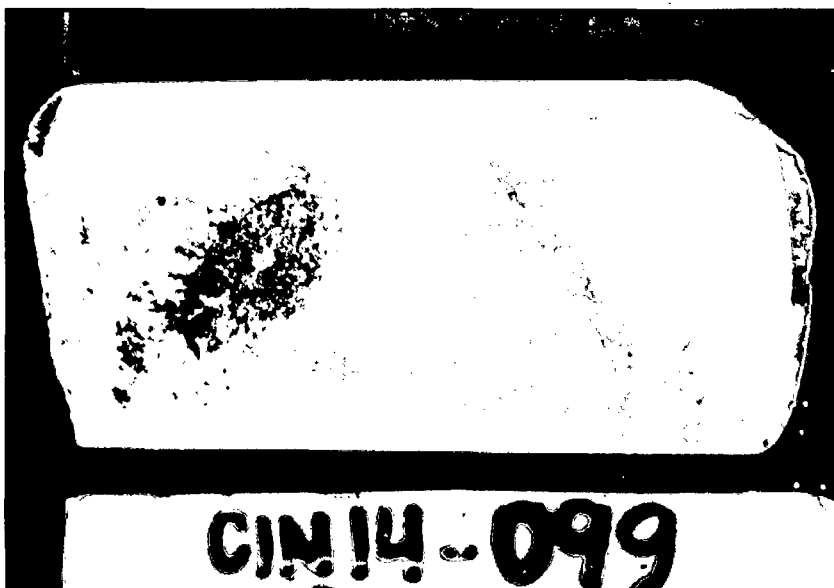


Foto 14. Alteración propilítica – sondaje CIN14-099.

4.1.4 Distribución del oro y geometría del yacimiento

La mineralización es principalmente oro diseminado relacionado a los óxidos de fierro: goetita, jarosita y hematita, cuyos los valores económicos se encuentran en la zona de óxidos y mixtos del depósito. La mejor mineralización de oro se relaciona principalmente a las brechas hidrotermales y a cuerpos silíceos (sílice masiva, sandy sílica, vuggy sílica). En profundidad estos cuerpos de brechas y sílice muestran un adelgazamiento progresivo con buzamientos sub vertical y una tendencia de E-W.

La distribución del oro se encuentra controlada por el sistema de fallamiento andino SE-NW y localmente por N65°W y N75°E, cuyas intersecciones han servido como zonas favorables para el emplazamiento de las brechas hidrotermales y la mejor mineralización de oro. (Planos 11, 12 y 13)

En la zona de sulfuros de la parte Este del depósito, se tiene valores de oro >0.5g/t Au y valores anómalos de Cu, en alteración argílica y argílica avanzado, relacionado a venillas de sílice tipo stock work y pirita ±cv-cpy.

4.2 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Se planteó originalmente en la hipótesis que la ocurrencia de la mineralización de oro en el depósito Ciénaga Norte está controlada por la litología, estructural y alteración hidrotermal. En base a este planteamiento inicial se comprobó que la ocurrencia de mineralización de oro, concuerda con los tres controles geológicos.

Según la interpretación realizada, el control de mayor importancia es el estructural, comprobándose que la mineralización está controlada por el fallamiento N75°E, coincidente con las estructuras silíceas y brechas mineralizadas.

La roca clasificada como brecha hidrotermal, es la más favorable para la mineralización de oro, le sigue en orden de importancia las tobas de cristales.

El control de alteración hidrotermal favorable para la mineralización de oro es la silicificación (Sílice masiva, sílice vuggy y sílice granular)

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La mineralización de oro se encuentra controlado por la litología tipo brecha hidrotermal que es la que aloja los mejores valores de oro; en menor grado las tobas de cristales y tobas de ceniza silicificadas.
- La mineralización de oro está controlado por tres sistemas principales de fallamiento: N75°E, N65°W y N30°W; así como el sistema de fracturamiento EW.
- La mineralización de oro está controlada por alteración silícea y alteración argílica avanzada. La presencia de oro diseminado económico no solamente se restringe a la sílice, se evidencia también mineralización en las zonas con alunita y pirofilita.
- La geometría de la mineralización de oro está delimitada por el control estructural, litología y alteración hidrotermal presente en el depósito.

5.2 RECOMENDACIONES

- Seguir buscando blancos o targets, hacia el borde NW del PIT Ciénaga Norte, siguiendo los patrones y criterios estructurales establecidos en este trabajo, para así identificar nuevas zonas con potencial de oro en óxidos.
- Realizar una campaña de perforación de sondajes profundos en la zona de venillas para evaluar mineralización por cobre.
- Realizar un estudio petrográfico para verificar las unidades litológicas reconocidas.
- Realizar un modelo 3D de arcillas, tomando como base los datos de análisis terraspec de sondajes diamantinos, para una mejor recuperación del oro en el proceso de minado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar et al. 2010. Control estructural y litológico en el emplazamiento de yacimientos minerales en el sector Condorama – Paratia (Cusco – Puno), sur del Perú, Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco, PE, 27 setiembre - 1 octubre 2010, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 496-499.

Aliaga, M. 2012. Controles de Mineralización del pórfido Au– Cu Morocha – Minas Conga, Cajamarca –Perú, tesis de para optar el grado de Ingeniero Geólogo, p 97-104, 106-109.

Chira, J y col. 2007. Prospección Geoquímica Regional en la cuenca del río Jequetepeque (Regiones Lambayeque y Cajamarca. INGEMMET serie B. Geología Económica, N° 17, p 9-20.

Dávila, J. 2011. Diccionario Geológico, INGEMMET, Perú., p 329-330, 414.

Echevarría, L. 2007. Mapeo en terrenos volcánicos, School of Mines Colorado, 52p.

Echeveste, H. 2010. Control estructural de la mineralización epitermal del distrito manantial espejo, Santa Cruz, Revista de la Asociación Geológica Argentina, p 325 – 334.

Rosas, J y Calizaya, J. 2007. Informe de las exploraciones 2006 - Geología, perforación diamantina y estimación de recursos minerales en óxidos, Ciénaga Norte, p 1 - 60

Lillo, J y Oyarzun, R. 2013. Geología estructural aplicada a la minería y exploración minera – Principios Básicos, Ediciones GEMM - Aula2pontonet. 73 – 149 p.
Consultado en línea el 28 de Abril del 2015 en
http://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/index_libros.html

Maksaev, V. 2001. Alteraciones hidrotermales. Capítulo del Curso GL 54A Metalogénesis, p.1-14

McPhie, J.; Doyle M. y Allen, R. 1993. Volcanic Textures, a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Centre for the Ore Deposits and Exploration Studies, University of Tasmania, Australia. 197 p.

Merino, M. 2005. Geología y Controles de Mineralización en el Depósito Cerro Yanacocha – Distrito de Yanacocha (Cajamarca –Perú), tesis de para optar el grado de Ingeniero Geólogo, p 82-101.

Oyarzún, J. 2014. Léxico de Geología Económica: Términos de uso común en España e Iberoamérica, Ediciones GEMM – Aula2punto.net, p 34-35

Pérez, C. 2008. Investigación de los Controles Geológicos de la Mineralización en Veta Esperanza (Huachocolpa, Perú), tesis de para optar el grado de Ingeniero Geólogo, p 19-25, 63-66.

Ríos, H. 2005. El Yacimiento Epitermal de Oro de Alta Sulfuración de Alto Chicama, Controles de Mineralización y Modelo Genético Preliminar, tesis de para optar el grado de Ingeniero Geólogo, p 51-63.

Torres, A; Camero, D; Duran, G. 2001. Informe de Actividades Geológicas, Campaña de Exploración 2000. AD BISA. “Geología de THY y CIE”. 82p.

Tosdal, R. 1996. Geologic and Structural Setting of the Tantauatay Volcanic field and Associated High-Sulfidation Cu-Au Mineralization, Northern Perú. 56p.

Tristán, M. et al. 2011. Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 64, núm. 3, 2012, p. 353-367