

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
*Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y
Metalúrgica*



**“EFECTO DE LAS ARCILLAS EN LA CIANURACIÓN
DE ORO EN PILAS O MONTONES”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

PRESENTADO POR:

Roberto Antonio Visurraga Reinoso

Lima - Perú

-2007-

DEDICATORIA

A mis padres Clara y Rómulo por abnegado apoyo en los momentos más difíciles.

A mi pequeña Ericka y a mi dulce Nalda quienes son la motivación para la realización de mis proyectos.

Roberto Visurraga Reinoso

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su preocupación y amor hacia sus hijos.

Al verdadero amigo, Ingeniero Marcelo Barzola Esteban, persona caracterizada por su gran gesto humano, es el artífice de la realización de este trabajo.

Al Dr. Humberto Chirif R., el gran motivador para que este trabajo se realice, persona a quien guardo admiración por el ímpetu que impone, cuando realiza sus proyectos.

Al Dr. Rolando Carrascal M., por el gran aporte eficaz en la elaboración de este trabajo.

Al Ingeniero José Martínez Talledo, gran pilar de la respetable Escuela Profesional de Ingeniería Geológica.

Al Ingeniero José Mallqui R. un gran amigo a quien guardo admiración y respeto por su gran aporte en este trabajo.

A los Ingenieros Carlos Valencia, Carlos Rojas L. y Robert Uribe O. por su invaluable colaboración en esta tesis.

A todos los profesionales de mi alma mater, quienes contribuyeron con mi formación profesional.

INDICE

	<i><u>Pág.</u></i>
RESUMEN	1
CAPITULO I: GENERALIDADES	9
1.1 BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA EXTRACCIÓN DEL ORO	9
1.2 INTRODUCCION	12
1.2.1 Descripción del proceso de cianuración en pilas	15
CAPITULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	
2.1 FISICOQUIMICA DE SUPERFICIES	19
2.1.1 Interfase sólido-liquido	19
2.1.2 Fenómenos eléctricos en la interfase	20
2.1.3 Teoría de la doble capa de Stern o capa compacta	25
2.1.4 Potencial zeta ó potencial electrocinética.	28
2.2 COMPORTAMIENTO DE LAS DE LAS SUSPENSIONES COLOIDALES ACUOSAS DE LA MONTMORILLONITA Y EL PAPEL ESPECÍFICO DEL PH EN LA PRESENCIA DE ELECTROLITOS INDIFERENTES.	30

CAPITULO III: PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS.

3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	37
3.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	37

CAPITULO IV: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE ARCILLAS.

4.1	FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES DE ARCILLAS	38
4.1.1	INTRODUCCIÓN	38
4.1.2	ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.	39
4.1.3	ESTRUCTURA Y CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS	40
4.1.3.1	Estructura	40
4.1.3.2	Clasificación	43
4.1.4	PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	45
4.1.4.1	Superficie específica	46
4.1.4.2	Capacidad de Intercambio catiónico	46
4.1.4.3	Capacidad de absorción	47
4.1.4.4	Hidratación e hinchamiento	48
4.1.4.5	Plasticidad	49
4.1.4.6	Tixotropia	50

**CAPITULO V: DESCRIPCION GEOLÓGICA DEL TAJO DONDE SE
TOMARÁN LAS MUESTRAS MINERALES**

5.1	LITOLOGIA	52
5.2	ALTERACIÓN	52
5.3	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	53
5.4	MINERALIZACIÓN	54

CAPITULO VI: METODOLOGÍA DEL TRABAJO **56**

6.1 MATERIALES Y PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO.

6.1.1	MATERIALES.	56
--------------	--------------------	-----------

6.1.2	DESCRIPCIÓN DE UNA MUESTRA ARCILLOSA	59
--------------	---	-----------

6.1.2.1	Descripción macroscópica	59
----------------	---------------------------------	-----------

6.1.2.2	Descripción microscópica:	60
----------------	----------------------------------	-----------

6.1.3	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA POR DRX DE ARCILLAS EN ESTUDIO.	
--------------	---	--

6.1.4	CABEZA ENSAYADA DE MUESTRAS EN ESTUDIO	
--------------	---	--

6.1.5	PREPARACIÓN DE SOLUCIÓN SINTÉTICA.	68
--------------	---	-----------

6.2	PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO	69
------------	---------------------------------------	-----------

6.3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ADSORCIÓN	69
------------	---	-----------

6.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	76
------------	--------------------------------	-----------

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFIA	86
ANEXOS	
<u>ANEXO 1: ANALISIS POR CUANTITATIVO POR DIFRACCION DE RAYOS XEN LAS MUESTRAS TOMADAS DEL TAJO A SEGÚN CUADRO VI.1</u>	
A.1. ANALISIS POR DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X.	88
1.1 METODOLOGIA DE TRABAJO.	88
1.1.1. Muestra arcilla blanca (a menor profundidad).	88
1.1.2. Muestra de arcilla blanca (a mayor profundidad, 40 m.)	89
1.1.3. Muestra de arcilla marrón.	90
1.1.4. Muestra de arcilla roja.	91
<u>ANEXO 2: PRUEBAS METALURGICAS REALIZADAS EN OTRAS ZONAS GEOLOGICAS</u>	
A.2 PRUEBAS REALIZADAS CON OTROS MATERIALES ARCILLOSOS DE OTRAS ZONAS GEOLÓGICAS.	93
2.1. OBJETIVOS	93
2.2 ANALISIS CUANTITATIVO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	93

2.3	PRUEBAS METALURGICAS A NIVEL DE LABORATORIO	96
2.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS METALURGICAS A NIVEL DE LABORATORIO	101
A3:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104

LISTADO DE FIGURAS

Fig. I.1. Diagrama de Flujo de lixiviación en pilas.

Fig.II.1. Modelo que muestra la interfase sólido-líquido de un mineral en contacto con un líquido que es similar a un condensador eléctrico.

Fig.II.2. Esquema idealizado de la doble capa eléctrica.

Fig.II 3. Reparto de cargas con la distancia según la teoría de Stern. Caída de potencial de la doble capa.

Fig.II.4. Potencial Zeta o Potencial electrocinético.

Fig.II.5. Variación del potencial Z en función del pH.

Fig.II.6. Desarrollo de la superficie de la carga heterogénea para partículas dispersas de montmorillonita en soluciones acuosas aptas para un cristal imperfecto (cargas permanentes negativa en las caras) y secciones protolíticas en la superficie del borde de grupos OH (pH-depende del borde). Una doble capa eléctrica dominante (edl) con densidad (σ_o) en la cara de la placa mientras que la doble capa oculta con un potencial constante a pH constante ($\psi_{O,H}$) en su borde ya formado y ambos están neutralizados por la nube de iones contrarios (densidad de carga de las capas difusas, $\sigma_{d,f}$ y $\sigma_{d,e}$ para las caras y bordes respectivamente).

- Fig.II.7.** Representación esquemática de las dobles capas eléctricas dominante y ocultas formado alrededor de las placas de montmorillonita bajo diferentes condiciones de la solución. El efecto de los electrolitos indiferentes en una partícula cargada heterogeneticamente además el rol específico del pH.
- Fig.IV.8.** Estructura tipo t-o-t de una arcilla.
- Fig.IV.9.** Vista panorámica de una arcilla tipo t-o-t
- Fig.IV.10.** Etapas esenciales en la interacción del agua en la arcilla.
- Fig.VI.11.** Vistas panorámicas mostrando los aspectos geológicos de la mineralización aurífera estudiada.
- Fig.VI.12.** Testigos de perforación con Diamantinas, mostrando texturas típicas de cuarcitas además microfracturamientos en donde se hospeda la mineralización aurífera.
- Fig.VI.13.** Mineral con arcillas de color beige oscuro con tamaños muy finos.
- Fig.VI.14.** La misma muestra sin el material pulverulento. mostrando alteraciones descritas anteriormente.
- Fig.VI. 15.** Granos de cuarzo con cemento sintaxial.
- Fig.VI. 16.** Moldes de pirita con rellenos de limonita.
- Fig.VI. 17.** Fractura con relleno de cuarzo y limonitas contiendo oro.
- Fig.VI. 18.** Grano de oro en fragmento de ganga.
- Fig.VI. 19.** Vista anterior magnificada.
- Fig.VI. 20.** Grano de oro libre.
- Fig.VI. 21.** Partículas de oro vistas en microscopio electrónico.

- g.VI. 22. Intercrecimiento de esfalerita con limonita coliforme.**
- g.VI. 23. Vista anterior en nícoles cruzados.**
- g.VI. 24. Limonita de aspecto coliforme rodeando fragmento de ganga.**
- g.VI. 25. Grano de pirita parcialmente alterada pasando a limonitas.**
- g.VI. 26. Moléculas de agua ligadas al ión aurocianuro (color rojo) que ingresan entre las láminas de la estructura de la arcilla, que van a ser atraídos por los iones sodio o de calcio que están entre dichas láminas y por los iones OH situados en los bordes.**
- g.VI. 27. Las reacciones mostradas, ocurren debido a:**
pH > pH_{pzc, borde} ≈ 6,5
- g. A.1 Compendio comparativo de las curvas del porcentaje de recuperación del oro en función al tiempo de lixiviación (horas)**

LISTADO DE CUADROS

Cuadro N° IV.1	Clasificación de arcillas	44
Cuadro N° VI.1	Descripción de muestras arcillosas	56
Cuadro N° VI.2	Composición Mineralógica de Arcillas en Estudio de pruebas de adsorción.	67
Cuadro N° VI.3	Cabezas ensayadas de muestras.	68
Cuadro N° VI.4	Prueba en Botella con arcilla blanca (a menor profundidad).	71
Cuadro N° VI.5	Prueba en Botella con arcilla blanca (a mayor profundidad, 40 m.)	72
Cuadro N° VI.6	Prueba en Botella con arcilla marrón.	73
Cuadro N° VI.7	Prueba en Botella con arcilla roja.	74
Cuadro N° VI.8	Prueba en Botella con mineral arcilloso para porcentaje de extracción de oro.	75
Cuadro N° A.1	Prueba de cianuración en botella mineral Pariahuanca - Alto Chira.	97
Cuadro N° A.2	Prueba de cianuración en botella mineral Pariahuanca - Patival	98
Cuadro N° A.3	Prueba de cianuración en botella mineral aluvial	99

Cuadro N° A.4	Prueba de cianuración en botella mineral Pariahuanca - Capilla.	100
Cuadro N° A.5	Compendio comparativo de las pruebas del porcentaje de recuperación en función del tiempo de lixiviación en horas.	102

LISTADO DE DIFRACTOGRAMAS

Difractograma A.1	Muestra arcilla blanca (a menor profundidad)	88
Difractograma A.2	Muestra de arcilla blanca (a mayor profundidad, 40 m.)	89
Difractograma A.3	Muestra de arcilla marrón	90
Difractograma A.4 .	Muestra de arcilla roja	91

LISTADO DE UNIDADES FISICO-QUÍMICAS

<u>Nombre</u>	<u>Símbolo</u>	<u>unidades</u>
Cambio en la Energía libre de Gibbs	dG	KJ mol ⁻¹
Cambio en la Fuerza electromotriz	dE	ergios molécula ⁻¹
Densidad de Adsorción	Γ	moles/cm ²
Potencial químico	μ	KJ.mol ⁻¹
Potencial electroquímico del ión x ⁺	η_{x^+}	KJ mol ⁻¹
Potencial electroquímico del ión y ⁻	η_y	KJ mol ⁻¹
Carga del electrón.	e	Coulomb
Diferencia de potencial de Volta	$\Delta\psi$	Voltios
Diferencia de potencial de Galvani	$\Delta\phi$	Voltios
Constante de Faraday.	F	Coulomb equiv ⁻¹
Densidad de carga superficial	σ_0	Coulomb. cm ⁻²

RESUMEN

Se estudiaron muestras con materiales arcillosos a diferentes profundidades de un tajo perteneciente a una determinada región minera cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: Latitud Sur 08° 08'; Longitud Oeste 78° 04' con tamaños de partículas menores que 6 mm, 5 mm y 2 mm respectivamente, posteriormente se determinó la composición mineralógica mediante difracción de rayos X.

Las menas presentan una mineralogía compuesta principalmente por minerales arcillosos, tales como la montmorillonita, nontronita, muscovita, pirofilita, otros minerales tales como la goethita, el rutilo y una ganga compuesta por básicamente por cuarzo.

En la descripción macroscópica de una muestra arcillosa, se observa fragmentos de cuarzo de color blanco grisáceo a gris blanquecino, pigmentado por óxidos de color pardo amarillento a pardo oscuro. En conjunto la muestra se encuentra mezclada con óxidos de hierro (limonitas) de aspecto pulverulento y arcillas; éstas últimas posiblemente pigmentados por los óxidos.

En la descripción microscópica de luz transmitida, la muestra está constituida por un agregado de individuos de cuarzo con formas subangulosas a subredondeadas no mayores a 750 μm . Además se tiene muscovita, limonitas (goethita) en algunos casos de aspectos masivos, coliformes y como relleno de moldes de pirita, frecuentemente asociado a jarosita. Presenta fracturamientos muy finos, mostrando relleno con relictos de granos de cuarzo, limonitas pulverulentas, partículas oscuras de materia orgánica (carbón).

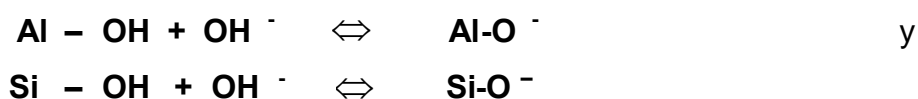
En la descripción microscópica de luz reflejada, se ha observado escasos granos de oro no mayor a 25 μm (en el microscopio electrónico se observa oro fino libre no mayor que 25 μm), a veces como inclusiones en los granos de cuarzo y otras como partículas libres e inmersas en la resina. También hay escasísimos granos anhedrales de pirita e intercrecimientos de limonitas con esfaleritas.

De acuerdo a la caracterización mineralógica por Difracción de rayos X de las muestras obtenidas, para analizar cual es la arcilla que produce el efecto preg-robbing; los resultados cuantitativos nos indican que la arcilla que está en mayor cantidad es la montmorillonita y según sus características fisicoquímicas de superficie hay dos posibilidades: que sea la montmorillonita sódica o cálcica. Pero si se analiza la propiedad de intercambio catiónico, el sodio es *más reactivo* que el calcio, entonces la arcilla que produce el efecto preg-robbing (secuestro del Au) es la montmorillonita sódica.

Al realizar las pruebas de adsorción y extracción del oro de las muestras obtenidas, se observa que hay intervalos de tiempo donde existen fluctuaciones en los respectivos porcentajes de adsorción (como también en la extracción), esto es debido, a la adsorción de los iones aurocianuros por la arcilla (Montmorillonita sódica), sobre las superficies entre sus hojas y también en los bordes de su estructura, posteriormente, se realiza una desorción, pero solo en los bordes del filosilicato, luego puede haber otra adsorción, luego desorción, debido a que en esta zona ocurren reacciones químicas que son reversibles en determinados intervalos de tiempo.

Las fluctuaciones en el porcentaje de extracción como ya se dijo anteriormente, se deben a la adsorción de los iones aurocianuro entre las hojas, especialmente de la montmorillonita sódica, como también otras arcillas pero en menor intensidad; luego sigue un ascenso debido a la actividad iónica en los bordes que representa un 20% de la carga total de la lámina. Dicha acción lo realizan los protones H^+ procedentes de los iones

OH^- (ubicados en la superficie de los bordes), uniéndose a los dipolos de agua y formando el $(\text{H}_3\text{O})^+$. Como el $\text{pH} > \text{pH}_{\text{borde}} = 6,5$; la superficie del mineral en el borde se carga negativamente, el cual repele al ión aurocianuro que tiene carga negativa. Luego, se puede concluir que las fluctuaciones en el porcentaje de adsorción y extracción del oro y según las características fisicoquímicas su superficie, lo origina la superficie entre las hojas T-O-T de la arcilla y también los bordes de la misma en un inicio. Posteriormente los ascensos en el porcentaje de extracción son debido a las reacciones de superficie de los bordes en dichas hojas, según:



Como se puede observar, que estas reacciones son reversibles, ósea, tiene que haber adsorción y luego desorción en determinados intervalos de tiempo.

Las muestras en estudio se prepararon a 10m y se enviaron a los ensayos químicos de oro y cuyos resultados dieron un promedio ponderado de 74,70 % que es lo que debería recuperarse. En la prueba metalúrgica del porcentaje de extracción del oro en función al tiempo de lixiviación, la máxima recuperación es de aproximadamente 60%, obteniéndose una pérdida del 14,70 %, luego podemos decir que existe un perjuicio económico para el inversionista.

El ión Aurocianuro que se encuentra entre las caras de las hojas, será muy difícil recuperar, porque el contacto con la solución cianurada es prácticamente nulo.

Es probable que el oro que está entre las caras, cerca a los bordes de las hojas se pueda recuperar, puesto que en esta posición logra un ligero contacto con la solución cianurada.

En función de esto, se debe realizar un buen control del mineral para evitar o minimizar la presencia de arcillas tipo Montmorillonita sódica, para no tener los problemas de recuperación de oro.

También se analizó el efecto preg-robbing en otras zonas geológicas relativamente cercanas a las coordenadas geográficas dadas, llamadas: Alto Chira, Aluvial, Capilla y Patival. Luego, realizando la caracterización correspondiente de cada muestra respectiva, se concluye que en este caso la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la illita. Después realizando las pruebas metalúrgicas en botellas para analizar el porcentaje de extracción de oro en función al tiempo de lixiviación, se observa que a mayor porcentaje de illita, será menor el porcentaje de extracción del oro.

Entonces, para poder optimizar la recuperación del oro, el profesional en Geología debe hacer estudios específicos de zonas geológicas arcillosas, identificar las arcillas que perjudican la producción de este metal precioso.

El profesional en Geología debe coordinar con el Metalurgista para que realice pruebas y así determine, cual es la arcilla que más perjuicio produce en la lixiviación del oro en pilas.

Una vez determinada la zona geológica y la arcilla que ocasiona el efecto preg-robbing, se recomienda evitar en lo posible, estos minerales arcillosos para que el proceso de lixiviación en pilas no se perjudique.

Según experiencias a nivel de laboratorio, el porcentaje de extracción del oro sin arcillas es aproximadamente 80 % y en las pruebas metalúrgicas realizadas resultó aproximadamente 60 % a 70% de extracción del metal valioso, obteniéndose una pérdida considerable para el inversionista.

SUMMARY

Samples were studied with loamy materials to different depths of a mining certain region whose coordinated geographical they are the following ones: South Latitude $08^{\circ} 08'$; Longitude smaller Oeste $78^{\circ} 04'$ with sizes of particles that 6 mm, 5 mm and 2 mm respectively, the mineralogical composition was determined later on by means of diffraction of rays X.

The ores present a compound mineralogy mainly for loamy minerals, such as the montmorillonite, nontronite, muscovite, pirofilita, other such minerals as the goethite, the one twinkles and a bargain composed for basically for quartz.

In the macroscopic description of a loamy sample, it is observed fragments of quartz of white grizzly colour to grey whitish, pigmented by oxides of brown yellowish colour to brown dark. On the whole the sample is blended with oxides of iron (limonite) of aspect powdery and clays; these last possibly pigmented by the oxides.

In the microscopic description of transmitted light, the sample is constituted by an attached of quartz individuals with forms sub angular to sub rounded not bigger to $750 \mu\text{m}$. One also has Muscovite, limonite's (goethite) in some cases of massive aspects, colofoms and like I stuff of pyre moulds, frequently associated to jarosita. It presents very fine fractures, showing filler with relicts of quartz grains, limonites powdery, dark particles of organic (coal) matter.

In the microscopic description of reflected light, it has not been observed scarce grains of gold bigger to $25 \mu\text{m}$ (in the electronic microchip fine free gold is not observed bigger than 25 m), sometimes as inclusions in the quartz grains and others as free particles and immerses in the resin.

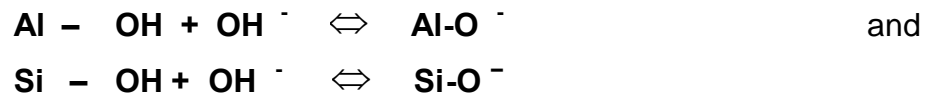
There are also scarce grains pyre anhedrales and limonite inters growths with esfalerites.

According to the mineralogical characterisation for Diffraction of rays X of the obtained samples, to analyse which is the clay that produces the effect preg-robbing; the quantitative results indicate us that the clay that is in more quantity is the montmorillonita and according to their physiochemical characteristics of surface there are two possibilities: that it is the sodium or calcic montmorillonita. But if the property of exchange cationic, the sodium is analysed it is more reagent than the calcium, then the clay produces the effect preg-robbing (I kidnap of Au) it is the sodium montmorillonita.

When carrying out the tests of adsorption and extraction of the gold of the obtained samples, it is observed that there are intervals of time where fluctuations exist in the respective percentages of adsorption (as well as in the extraction), this is due, to the adsorption of the ions auro cyanide for the clay (sodium Montmorillonita), on the surfaces among their leaves and also in the borders of their structure, later on, he/she is carried out an anti adsorption, but alone in the borders of the filosilicate, then it can have another adsorption, then anti adsorption, because in this area they happen chemical reactions that are reversible in certain intervals of time.

The fluctuations in the extraction percentage like it was already said previously, they are due to the adsorption of the ions auro cyanide among the leaves, especially of the sodium montmorillonita, as well as other clays but in smaller intensity; then it follows an ascent due to the ionic activity in the borders that it represents 20% of the total load of the sheet. This action carries out it the protons H^+ coming from the ions OH^- . (located in the surface of the borders), uniting to the dipoles of water and forming the $(H_3O)^+$. As the $pH > pK_a = 6,5$; the surface of the mineral in the border is loaded negatively, which repels to the ión auro cyanide that has negative load. Then you can conclude that the fluctuations in the percentage of adsorption and extraction of the gold and according to the physiochemical

characteristics its surface, originates it the surface among the leaves T-OR-T of the clay and also the borders of the same one in a beginning. Later on the ascents in the extraction percentage are due to the reactions of surface of the borders in this leaves, according to:



As you he/she can observe that these reactions are reversible, bony, he/she has to have adsorption and then anti-adsorption in certain intervals of time.

The samples in study got ready at 10m and they were sent to you rehearse them chemical of gold and whose results gave a pondered average of 74,70% that is what should recover. In the test metallurgic of the percentage of extraction of the gold in function at the time of lixiviation, the maximum recovery is of approximately 60%, being obtained a loss of 14,70%, and then we can say that an economic damage exists for the investor.

The ión Auro cyanide that is among the faces of the leaves will be very difficult to recover, because the contact with the solution cyanided is practically null.

It is probable that the gold that is among the faces, fences to the borders of the leaves it can recover, since in this position it achieves a slight contact with the solution with cyanide.

In function of this, he/she should be carried out a good control of the mineral to avoid or to minimise the presence of clays type sodium Montmorillonita, for not having the problems of recovery of gold.

The effect preg-robbing was also analysed in other geologic relatively near areas to the geographical given co-ordinates, calls: High Chira, Aluvial, Capilla and Patival. Then, carrying out the characterisation corresponding of each respective sample, you conclude that in this case the clay that produces the effect preg-robbing is the illita. Then carrying out the tests metallurgical in bottles to analyze the percentage of extraction of gold in function at the time of lixiviation, it is observed that to more illita percentage, it will be smaller the percentage of extraction of the gold.

Then, to be able to optimise the recovery of the gold, the professional in Geology should make specific studies of geologic loamy areas, which harm the production of this beautiful metal.

The professional in Geology should co-ordinate with Metallurgist so that she carries out tests and determine this way which is the clay that more damage takes place in the lixiviation of the gold in piles.

Once certain the geologic area and the clay that it causes the effect preg-robbing, are recommended to avoid as much as possible, these loamy minerals so that the lixiviation process in piles is not harmed.

According to experiences at laboratory level, the percentage of extraction of the gold without clays is approximately 80% and in the tests carried out metallurgical it was 60% approximately to 70% of extraction of the valuable metal, being obtained an economic considerable loss for the investor.

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA EXTRACCIÓN DEL ORO

El oro es un metal que ha sido motivo de muchas disputas y guerras entre países a lo largo de la historia de los europeos, mas no

de otras culturas que lo utilizaron por su brillo encantador, ya sea como adornos de motivos religiosos y personales de los jefes de sus respectivas épocas.

Los primeros descubrimientos respecto a este metal podrían ser más o menos en el 4000 a.C. y fueron encontrados en Egipto y Mesopotamia en la cual Egipto fue la cultura del oro hasta 1500 a. C.

Desde 3900 a. C. el oro ya se fundía en lingotes con hornos rudimentarios. Por el año 2000 a. C. ya se realizaba, en Egipto, la separación del oro de la plata y del cobre mediante tratamiento térmico con sal común.

En el 2700 a. C. se introdujeron los anillos de oro como sistema de pago, según algunas referencias históricas la primera moneda de oro apareció en 600 a. C.

En tiempos cercanos al nacimiento de Cristo, este metal fue encontrado y utilizado en regiones tales como la India, Irlanda, Bohemia o la península Ibérica.

Los romanos tenían algo de oro en sus regiones de origen, pero fue en sus expediciones militares donde consiguieron como botín cantidades importantes. Explotaron también en las minas del noroeste de España donde acumularon gran cantidad de lingotes de oro y monedas, más tarde se utilizaron grandes cantidades de oro en bienes de lujo contribuyendo a la caída del Imperio.

El oro es uno de los metales que rara vez se encuentra en estado puro, es inalterable, fácil de localizar y extraer de aluviones auríferos, por eso que desde la antigüedad los granos de oro se

obtienen lavando las arenas de los ríos debido a su alto peso específico.

En España los romanos desarrollaron la técnica de *ruina montium* por la cual grandes masas de materiales poco aglomerados se sometían al arranque hidráulico; para ellos utilizaron enormes masas de agua, conducidas desde grandes estanques situados en los montes, que producían una avenida canalizada de las mismas sobre el macizo. Aguas abajo, se situaban diques de madera sobre los que se retenían los metales pesados. Las acumulaciones auríferas se lavaban utilizando bateras. Posiblemente, la amalgamación fue usada por los romanos para concentrar el oro de los materiales retenidos por los diques aunque la primera mención a ese método se encuentra en el siglo XI.

En la edad Media se desarrolló la fusión con plomo y la copelación (separación del oro de sus impurezas por procesos de fusión oxidante).

Se utilizaban molinos para pulverizar las menas más duras, pues, los mineros aprendieron a tratar las menas de oro, que contenían arsénico, mediante tostación.

Con el descubrimiento de América por los españoles, los conquistadores llevaron grandes cantidades de oro a Europa, mas adelante los depósitos de Brasil aumentaron la producción mundial, principalmente en el siglo XVII.

En el siglo XVII, se realizó la separación del oro y la plata y empezó a afinarse el oro. La producción del oro como subproducto de otros metales (cobre, zinc, plomo) tuvo un papel importante en Alemania.

En 1863, el método de cloruración de Plattner fue introducido en Estados Unidos y, poco después, en Australia. En 1867 se usó, con gran éxito, el afino del oro con cloro. El afino electrolítico de Wohlwill fue desarrollado en 1878 y todavía se usa para obtener oro de una pureza elevada: 99,95 y 99.99%.

En 1885 el descubrimiento de un gran yacimiento en Rand de Sudáfrica se puso a la vanguardia en la producción mundial.

En 1888 se descubre en Escocia el proceso de cianuración, que puede considerarse como uno de los principales descubrimientos metalúrgicos. Con este método se trataron menas cuya explotación por otros métodos no era posible, o no era rentable económicamente, debido a la fina distribución del oro en ellas.

En 1970 se estabilizó la producción mundial, hoy en día se calculan reservas de aproximadamente de 70 000 Mg., la producción mundial es de más de 2000 toneladas al año siendo los principales productores Sudáfrica, Australia, Estados Unidos, Rusia, Canadá y China.

En 1970, el método tradicional de percolación o tratamiento con cianuro se cambió por el método de carbón en pulpa o el de resina en pulpa.

En estos últimos años se describen métodos basados en la formación de complejos de oro, como los formados con tiourea, aunque la extensión a escala comercial de estos procedimientos todavía no se ha producido.

1.2 INTRODUCCION

Para extraer el oro y la plata a partir de sus menas, es importante identificar los minerales que se encuentran actuando: la ganga, los minerales asociados, el oro existente en ellos y los minerales que causan efectos nocivos en la cianuración (minerales cianicidas).

La reacción de lixiviación del oro metálico a partir de sus menas en una solución diluida de cianuro de sodio o de potasio está dada por la ecuación de Elsner o la de Habashi, respectivamente:



Se observa que el oro está disuelto como complejo aurocianuro de oro, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, el cual debe ser en lo posible en mayor cantidad, siempre en cuando se controle adecuadamente los parámetros del proceso y además se seleccionen los minerales acompañantes de modo que estos no sean perjudiciales en la lixiviación.

La ecuación de Elsner o la de Habashi, es aplicable en el proceso de cianuración en pilas como en procesos de cianuración por agitación.

El oxígeno es importante en la disolución del oro y plata, es introducido directamente en la solución por inyección de aire.

La velocidad de disolución del oro y plata en soluciones de cianuro depende del área superficial del metal en contacto con la fase líquida y también de la velocidad de agitación.

Otros factores que influyen en la velocidad de disolución son las siguientes:

Tamaño de la partícula

Si se presenta oro grueso en la mena, se debe recuperarlo utilizando jigs, mesas, trampas, etc. antes de efectuar la cianuración, porque las partículas gruesas demorarían demasiado tiempo en disolverse y por lo tanto no justificaría económicamente, salvo que el mineral sea poroso y se pueda recuperar el oro por montones o pila por precolación.

Oxígeno

Es un elemento fundamental para que ocurra la disolución del oro y plata y para esto se inocula el aire atmosférico a la pulpa, que es la fuente de oxígeno.

Concentración de la solución de cianuro

La solubilidad del oro en una solución de CN aumenta al pasar de las soluciones diluidas a las concentradas. La solubilidad es muy baja con menos de 0.005% NaCN, crece rápidamente cuando contiene 0.01% NaCN y después lentamente, llegando al máximo cuando contiene 0.25% NaCN. La proporción más eficaz es de 0.05 a 0.07% NaCN. La concentración usual de CN para el tratamiento de menas de oro es de 0.05% NaCN y para menas de plata de 0.3% para concentrados de oro-plata, la fuerza de NaCN está entre 0.3 - 0.7%. El NaCN es el más usado en el proceso de cianuración, aunque también se emplea el KCN.

Temperatura

La velocidad de disolución del oro y la plata en una solución de NaCN aumenta con el incremento de la temperatura, por encima de 85°C, se pierde cianuro por descomposición, transformándose en ácido cianhídrico causando una seria contaminación ambiental.

Alcalinidad protectora

Las funciones del hidróxido de calcio en la cianuración son las siguientes:

- Evitar pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- Prevenir pérdidas de cianuro por acción del CO₂ del aire.
- Neutralizar los componentes ácidos.
- Facilitar el asentamiento de las partículas finas de modo que pueda separarse la solución rica clara de la mena cianurada.

Porcentaje de finos

Si el porcentaje de finos es alto, mayor al 20% del total (< -10 mallas, 1.7 mm) las partículas tienden a aglutinarse y no dejan pasar las soluciones de cianuro, por lo tanto se tendrá que hacer un previo curado de estos minerales con cal, cemento o ambos para lograr aglomerarlos y facilitar la percolación.

1.2.1 Descripción del proceso de cianuración en pilas

El proceso de lixiviación en pilas es una lixiviación por percolación de mineral acopiado sobre una superficie impermeable, preparada para coleccionar las soluciones; a escala industrial contempla el tratamiento de 1000, 10 000 hasta 50 000 ton / día o más de mineral. La adopción de la técnica está condicionada a las características del mineral, habiéndose determinado en forma práctica

y a escala piloto las características favorables, por sus menores costos de capital y de operación, es también atractiva para el desarrollo de depósitos pequeños. Su gran flexibilidad operativa le permite abarcar tratamientos cortos (semanas) con mineral chancado o bastante prolongados (meses hasta años) con mineral grueso, al tamaño producido en la mina.

En líneas generales, el mineral fracturado o chancado es colocado sobre un piso impermeable formando una pila de una altura determinada, sobre la que se esparce solución diluida de cianuro de sodio que percola a través del lecho disolviendo los metales preciosos finamente diseminados.

La solución de lixiviación, enriquecida en oro y plata se colecta sobre el piso permeable que, dispuesto en forma ligeramente inclinada, la hace fluir hacia un pozo de almacenamiento. Desde este pozo, la solución es alimentada a una serie de estanques de clarificación, filtración, precipitación, etc. retornando el efluente estéril a la pila de mineral:

a) Trituración:

Dependiendo del tamaño al cual sea adecuado triturar puede existir chancado en 1, 2 ó 3 etapas

El mineral debe ser chancado al 100% de cualquiera de las mallas siguientes:

100 % - 1"

100 % - 3/4"

100 % - 1/2"

100 % - 3/8"

Los tres primeros tamaños se logran con trituración secundaria, mientras que la última sólo se obtiene con chancado terciario.

b) Cianuración:

Consta de un tanque de cabeza de una capacidad instalada a una altura sobre la pila. La solución lixivante fluye por gravedad hacia el Pad. La solución pregnant es recepcionada mediante un canal de concreto que al igual que al piso de las pilas tiene una pendiente de 1.5% pasando luego a los filtros mediante una tubería plástica.

La solución después de habersele eliminado los finos y el oxígeno pasa un tanque de agitación herméticamente cerrado en donde se le adiciona zinc en polvo y acetato de plomo.

c) Precipitación:

El principio de la precipitación de metales preciosos contenidos en soluciones de CN empleando polvo de zinc, está basado en el hecho de que el oro y la plata son electronegativos respecto al zinc, ocurriendo un reemplazo electroquímico del oro y la plata por el zinc, seguido por el desplazamiento del hidrógeno del agua por el sodio según la siguiente reacción:



En la práctica, ocurre un exceso en el consumo de Zn por encima de la demanda teórica debido a que tanto el cianuro con el álcali libre en la solución tiende a atacar al Zn disolviéndolo.

Las reacciones son más eficientes con la adición de acetato de plomo:



c.1) Precipitación en carbón activado

Se realiza generalmente cuando el mineral contiene muy poca proporción de plata, es decir cuando el mineral está constituido principalmente por oro como metal precioso.

d) Desorción del oro del carbón activado

En este caso generalmente el carbón cargado con oro es sometido al proceso de desorción en volúmenes alcalinos alcohólicos, el oro pasa a solución, formando un electrolito rico en oro el cual pasa a electro-deposición en cátodos de lana de acero que es fundido previo lavado ácido para recuperar el oro.

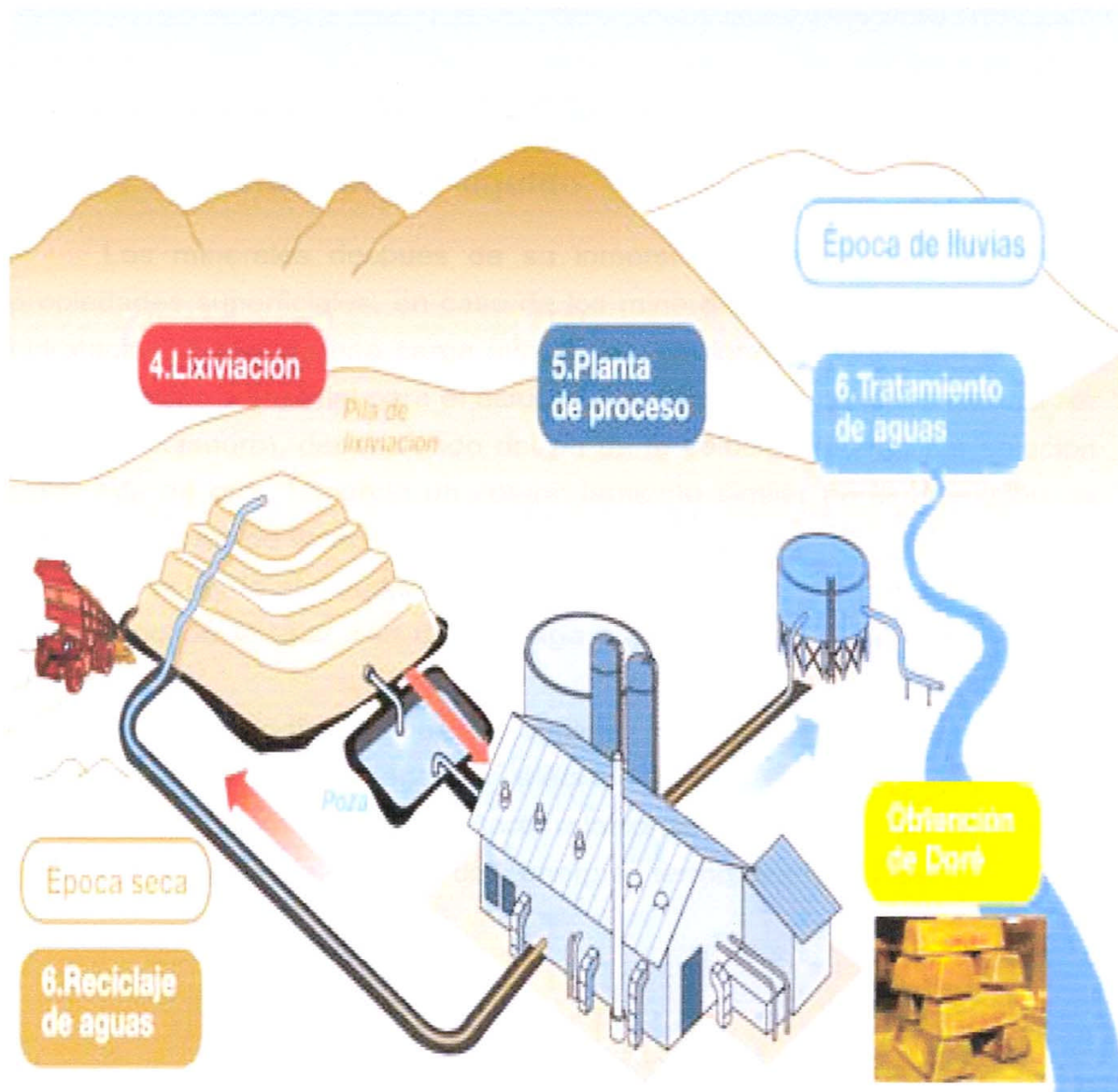


Fig. I.1. Diagrama de Flujo de lixiviación en pilas
Fuente: Centro de información Yanacocha

2.1 FISICOQUIMICA DE SUPERFICIES

2.1.1 Interfase sólido-líquido

Los minerales después de su inmersión en agua, logran obtener propiedades superficiales, en caso de los minerales arcillosos, estos sufren hidratación, originado una carga superficial. El signo y el valor de la carga son de interés primordial para el estudio de la adsorción de iones (puede ser el ión aurocianuro), dependiendo del pH de la solución (puede ser solución cianurada de oro), teniendo un comportamiento similar en la adsorción de ciertos reactivos de flotación.

De acuerdo al estudio de ciertos investigadores, ellos deducen que el mecanismo de la aparición de la carga superficial se debe a fenómenos eléctricos.

La interfase sólido-líquido que se origina, se comporta de manera muy similar a la de un condensador eléctrico o una celda de Volta, y en consecuencia el mecanismo estará relacionado a conceptos de cargas superficiales, potenciales eléctricos, energías termodinámicas, etc.

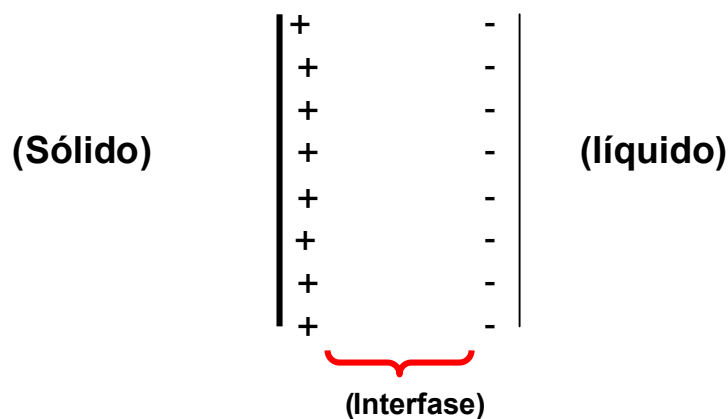


Fig. II. 1. Modelo que muestra la interfase sólido-líquido de un mineral en contacto con un líquido que es similar a un condensador eléctrico.

2.1.2 Fenómenos eléctricos en la interfase

a) El electrodo reversible

Se tiene un sistema reversible formado por dos fases cuya fuerza electromotriz varía cuando la composición de las dos fases o una de ellas que la compone varíe.

A temperatura y presión constantes, la variación de la energía libre dG_A de la interfase aplicada a componentes iónicos y neutros del sistema, está dada por la ecuación:

$$[dG_A]_{T,P} = - \underbrace{\sum_{i=3}^n \Gamma_i d\mu_i}_{\text{Componentes Neutros}} - \underbrace{\sum \Gamma_i d\mu_i}_{\text{Componentes iónicos}} \quad \dots \text{ (II.1)}$$

Donde:

Γ : Densidad de Adsorción (mol/cm²)

μ : Potencial químico (Kj/mol)

La diferencial de la fuerza electromotriz (F.E.M.) dE_A de la interfase está dada por la relación:

$$-dE_A = \frac{1}{e} (d\eta_{x^+} - d\eta_{y^-}) \quad \dots \text{ (II.2)}$$

Donde:

η_{x^+} : Potencial electroquímico del ión x⁺

η_{y^-} : Potencial electroquímico del ión y⁻

e : Carga del electrón.

Combinando las ecuaciones (1) y (2) y aplicando la condición de electronegatividad del sistema, se puede dar una forma termodinámica

rigurosa a la relación que une dG_A , E_A y la composición de la solución. Se puede también expresar la variación del potencial a través de la interfase xy-solución por la relación:

$$dE_A = - \frac{d\mu_{y^-}}{e} = \frac{d\mu_{x^+}}{e} \quad \dots\dots (II.3)$$

Introduciendo este resultado, (3) en (1) se tiene:

$$[dG_A]_{T,P} = \underbrace{-\sum_{i=3}^n \Gamma_i d\mu_i}_{\text{Componentes Neutros}} - e(\Gamma_{x^+} - \Gamma_{y^-}) dE_A - \sum_{i \neq x^+, y^-} d\mu_i \quad \dots\dots (II.4)$$

Componentes

Neutros

Si se supone que x^+ e y^- adsorbidos son componentes de cristales xy (fase sólida), mientras que los otros adsorbidos permanecen en la fase líquida, el término $e(\Gamma_{x^+} - \Gamma_{y^-})$ es la carga superficial, luego:

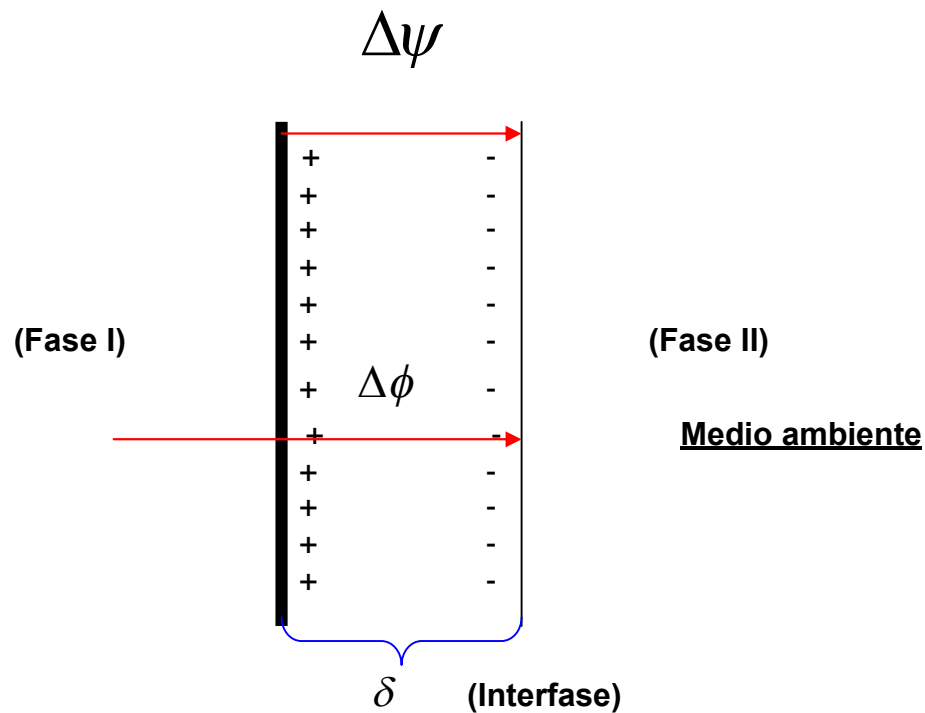
$$[dG_A]_{T,P} = -\sum_{i=3}^n \Gamma_i d\mu_i - \sigma dE_A \quad \dots\dots (II.5)$$

El término $\sum_{i=3}^n \Gamma_i d\mu_i$ incluye los componentes iónicos y neutros distintos de x^+ e y^- .

b) Diferencia de potencial en la interfase

Sea una fase I y el medio que lo rodea II. La diferencia de potencial entre la superficie de la fase I y su medio II se llama diferencia de potencial de Volta, de cavidad o de contacto ($\Delta\psi$) el cual tiene un valor definido y moderado.

La diferencia de potencial entre la parte interna de la fase I y su medio II se llama diferencia de potencial de Galvani ($\Delta\phi$). Esto se puede esquematizar en la figura siguiente:



$\Delta\psi$: Diferencia de potencial de Volta

$\Delta\phi$: Diferencia de potencial de Galvani

Luego el “salto de potencial de superficie” se define como:

$$\chi = \Delta\phi - \Delta\psi \quad \text{.....(II.6)}$$

La caída de potencial en la interfase se debe en parte a la polarización de ella, así como a la orientación de los dipolos de las

moléculas de agua en los casos de interfase cristales soluciones-salinas. La variación del potencial electroquímico entre las fases es:

$$\Delta\eta^+ = \mathbf{Z}_i \mathbf{e} \Delta\phi + \Delta\mu_i \quad \text{..... (II .7)}$$

No es necesario conocer el valor de, sino sobre todo su sentido de variación en función de la composición de las fases y es necesario admitir que:

$$d\mathbf{E}_A = d(\Delta\phi) \quad \text{..... (II .8)}$$

Del valor de $\Delta\phi$ podemos distinguir:

- a) Una parte corresponde a la polarización de la interfase y a la orientación de los dipolos, esto es, el potencial χ en un sentido restringido.
- b) Una parte corresponde al desplazamiento de las cargas libres, esto es, la diferencia de potencial de la doble capa.

En el sistema x/x^+y^- /solución salina, los potenciales electroquímicos de los constituyentes mayores x^+ e y^- son constantes en la fase sólida xy , $\Delta\phi$, varía con la composición de los iones x^+ e y^- en la solución, siendo estos llamados iones que determinan el potencial se puede expresar así:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\eta_i - \Delta\mu_i}{\mathbf{Z}_i \mathbf{e}} \quad \text{..... (II. 9)}$$

En el equilibrio $\Delta\eta_i = 0$

Se sabe que: $d(\Delta\mu_i) = kT \cdot d\ln a_i \quad \text{..... (II.10)}$

Luego: $d(\Delta\phi) = -\frac{kT}{\mathbf{Z}_i \mathbf{e}} d\ln a_i \quad \text{..... (II.11)}$

De la ecuación (6): $\chi = \Delta\phi - \Delta\psi$

Si χ no dependiera de la composición de la solución y además se sabe que

$\Delta\phi$ varía con la composición de la misma, entonces:

$$\text{Por lo tanto: } d(\Delta\phi) \approx d(\Delta)\psi = -\frac{kT}{Z_i e} d \ln a_i \quad \dots\dots (II.12)$$

La diferencia de potencial en el interior de la capa superficial depende solo de la actividad a_i en la fase líquida de los iones que determinan el potencial. Un valor importante de la carga superficial es aquella por la cual $\sigma.A=0$ y $\Delta\psi_0=0$, esto se llama **punto de carga nulo** (PNC)

Luego:

$$\Delta\psi = \frac{KT}{Z_i e} \ln \frac{a_i}{a_0} \quad \dots\dots (II.13)$$

Donde a_i representa la actividad del ión i en el punto de carga nulo.

En la solución acuosa, el símbolo $\Delta\psi$ es reemplazado por ψ_0 puesto que en el seno de la solución $\psi = 0$ ($\Delta\psi = \psi_0 - \psi$)

$$\psi_0 = \frac{KT}{Z_i e} \ln \frac{a_i}{a_0} = \frac{KT}{Z_i e} \left(\ln \frac{c_i}{c_0} + \ln \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right) \quad \dots\dots (II.14)$$

El coeficiente de actividad λ depende de la fuerza iónica I de la solución con:

$$I = \frac{1}{2} \sum c_i Z_i^2 \quad \dots\dots (II.15)$$

Si la fuerza iónica es constante entonces: $\ln \frac{\lambda_i}{\lambda_0} = 0$

Por lo tanto:

$$\psi_0 = \frac{KT}{z_i e} \ln \frac{c_i}{c_0} \quad \dots\dots(II.16)$$

El potencial termodinámico ψ_0 depende de la actividad en la solución de los iones que determinan el potencial.

2.1.3 Teoría de la doble capa de Stern o capa compacta

No hay sólido que sea completamente insoluble en un líquido electrolítico, por ejemplo un mineral en agua, las reacciones que ocurren entre las moléculas de agua y las diversas superficies que se presentan en el mineral no todas son iguales, por lo tanto las energías libres de la solución varían. En consecuencia, algunos minerales o metales pasarán a solución en cantidades diferentes y la superficie mineral adquiere una carga que es opuesta en signo a los iones que han pasado a solución.

Algunos iones que han pasado a solución están concentrados por la acción de la carga superficial que se genera y se ubican en la vecindad inmediata de la cara del mineral, creándose la llamada doble capa eléctrica, una interior y otra exterior.

La capa interior se debe a la superficie cargada del mineral y no penetra profundamente a la fase sólida.

La capa exterior está constituida de iones extraídos de la superficie del mineral por la acción de las moléculas de agua. Opuesto a esta capa interior, los iones de la capa exterior están dispersos fuera de la superficie mineral.

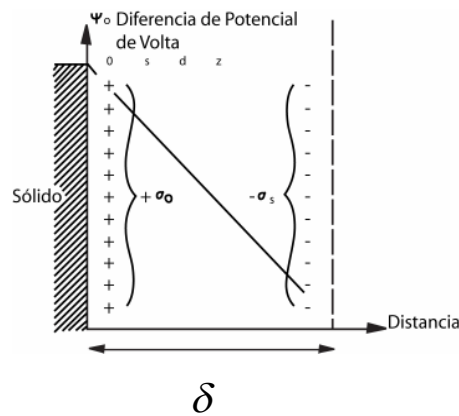


Fig. II.2. Esquema idealizado de la doble capa eléctrica

(Ref. Beneficio de Minerales- Pierre Blazy- 1971)

Según Stern, la doble capa está formada por:

- La carga de la superficie sólida σ_0 está repartida en forma homogénea.
- La carga de la solución es repartida:

En un plano paralelo a la superficie, llamado plano interior de Stern, situado a una distancia δ de la superficie. Es la capa compacta de la doble capa a la cual corresponde la carga superficial σ_s y el potencial ψ_δ .
- La carga en el seno de la solución (iones dispersos) es nula.

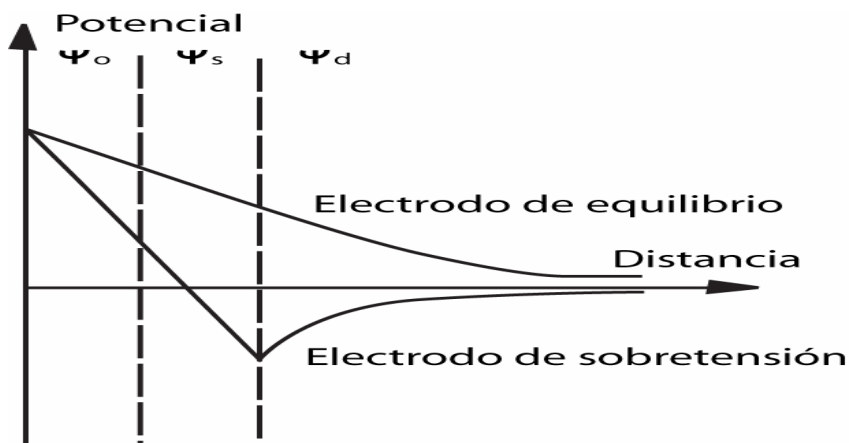


Fig. II. 3. Reparto de cargas con la distancia según la teoría de Stern.

Caída de potencial de la doble capa.

(Ref. Beneficio de Minerales- Pierre Blazy-1971)

La carga superficial σ_s de un sólido en agua está determinada por la densidad de Adsorción de los iones positivos en la superficie del sólido. En el caso de una sal univalente, está dado por:

$$\sigma_s = F(\Gamma_{M^+} - \Gamma_A) \quad \dots\dots\dots(\text{II. 17})$$

Donde:

Γ_{M^+} : Densidad de adsorción (moles/cm²) del catión.

Γ_{N^-} : Densidad de adsorción (moles/cm²) del anión.

F : Constante de Faraday.

La actividad de los iones del sólido en solución ocurre en el punto de carga nulo (P.Z. N).

Si la diferencia de potencial debido a los dipolos, etc. permanece constante, el potencial total de la doble capa o la superficie potencial es cero en el punto nulo. Es decir el potencial ψ_0 varía a fuerza iónica constante, en función de la actividad en la solución de los iones que se encuentran en el origen de la capa de superficie (ecuación de Nernst).

Para un silicato:

$$\psi_0 = \frac{RT}{F} \ln \frac{a_{H^+}}{a_{H_0^+}} \quad \dots\dots\dots (\text{II. 18})$$

$a_{H_0^+}$: Actividad de los iones de hidrogeno en el punto de carga nulo.

A 20°C:

$$\psi_0 = \frac{2,3 RT}{F} (\text{PH}_{\text{PCN}} - \text{PH}) \text{ Voltios} \quad \dots\dots\dots (\text{II. 19})$$

La determinación del punto de carga nulo es muy importante para ver la capacidad de Adsorción de los iones (iones aurocyanuros por ejemplo) en la

superficie de las capas de las arcillas y para esto debemos conocer el concepto de potencial Zeta o potencial electrocinético.

2.1.4 Potencial zeta ó potencial electrocinético

Cualquier ión que se encuentre en capas cercanas de la superficie mineral tiende a separarse de la superficie sólida durante el movimiento del fluido, como esta capa difusa es sacada de la superficie durante dicho movimiento, luego el equilibrio del sistema se rompe y se genera una diferencia de potencial entre el líquido y la partícula que se le conoce como potencial zeta o potencial electrocinético.

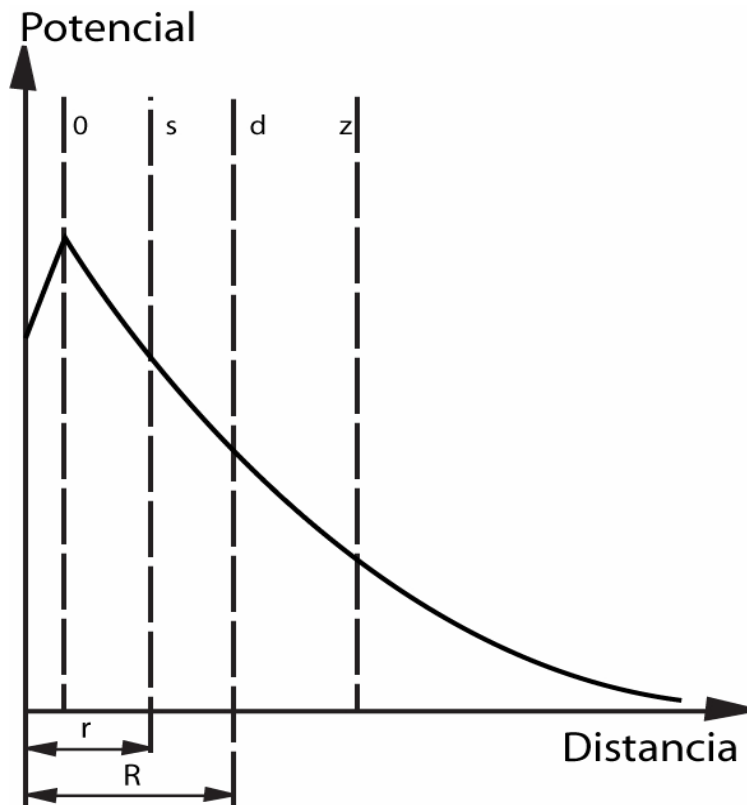


Fig. II.4. Potencial Zeta o Potencial electrocinético

r: radio de iones disolventes

R: radio de iones solventes

(Ref. Beneficio de Minerales- Pierre Blazy-1971)

J.M. Cases (1967) demostró que la carga superficial de los silicatos depende del pH. Esta es **positiva** para los PH inferiores al punto de carga nulo y esta carga permite adsorber iones de signo contrario. Como se dijo anteriormente es importante determinar el punto de carga nulo y para esto se debe realizarlo con la ayuda de los fenómenos electrocinéticos, entonces es necesario:

- Determinar, si el electrodo del soporte empleado es bien indiferente a la superficie de la especie mineral estudiada.
- Construir las curvas $Z = f(\text{PH})$ con diferentes fuerzas.
- Mostrar que una variación conveniente del PH modifica el signo del potencial Z.

Luego al graficar tenemos como un ejemplo para el circón:

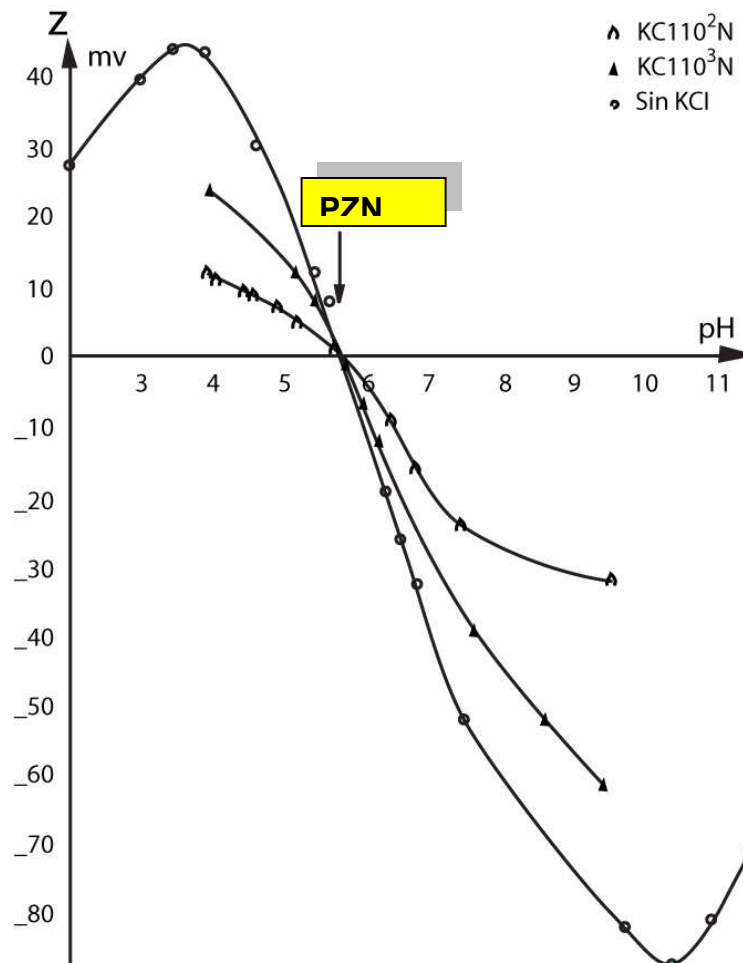


Fig. II.5. Variación del potencial Z en función del pH

(Ref. J.M. Cases 1968)

2.2 COMPORTAMIENTO DE LAS DE LAS SUSPENSIONES COLOIDALES ACUOSAS DE LA MONTMORILLONITA Y EL PAPEL ESPECÍFICO DEL PH EN LA PRESENCIA DE ELECTROLITOS INDIFERENTES

El comportamiento coloidal de las arcillas depende del pH y muchas propiedades en suspensión ya son conocidas, donde la única carga heterogénea de las placas son aquellas que se encuentran en las partes asimétricas: borde-cara, cara-cara, borde-borde el cual resultan propiedades particulares que aun están en investigación.

El pH y la influencia de los electrolitos indiferentes no pueden ser diferenciados apropiadamente en forma simultánea. Mientras que el efecto específico de los aniones prefieren a los carbonatos, fosfatos, silicatos o polianiones orgánicos. El efecto de los iones H^+ tienen que ser distinguidos a partir de una simple neutralización de cargas de los iones indiferentes.

En informaciones recientes, el efecto de pasar a estado líquido diferentes aniones, fueron investigados de manera similar con sales de sodio y después con ácidos para suspensiones de arcillas en forma paralela. Las mediciones de los pHs fueron muy diferentes en las suspensiones paralelas, los protones fueron considerados solo como coagulaciones de cationes firmes y de bajos valores coagulantes en suspensiones ácidas para sistemas homo iónicos sódicos fueron firmemente adsorbidos en la superficie de la arcilla.

Un estudio de las propiedades reológicas de las suspensiones de la montmorillonita que dependen del pH.

El efecto del pH y los electrolitos indiferentes es mutuo; ninguno de ellos puede ser interpretado solo. Se intentó bosquejar esquemáticamente como el material característico de montmorillonita que gobierna la formación del campo electrostático local alrededor de la gran asimetría de las placas de arcilla (el aspecto radio y densidad de carga superficial del borde y cara uno

respecto del otro) en medios acuosos contienen electrolitos indiferentes cerca de los productos autoprotolíticos de agua en las figuras II.6 y II. 7.

La principal contribución de la carga superficial de las capas de la montmorillonita es la permanente carga negativa en los planos basales aptos para la sustitución isomórfica. Una carga negativa asociada con un catión sustituido en la hoja tetraédrica (Al^{+3} por Si^{+4}) resulta en una distribución de carga localizada, en vista de que muchas más cargas negativas difusas proceden del catión sustituido en la hoja octaédrica (Mg^{+2} por Al^{+3}). Este exceso de cargas distribuidas como mallas es compensada por cationes en la parte difusa de la doble capa eléctrica dominante (edl) encima de las caras (Fig. II. 7). Adicionalmente en lugares polares, principalmente grupos octaédricos Al-OH y tetraédricos Si-OH, están situados en los bordes de rotura.

Esos lugares anfóteros están cargados condicionalmente y así varían (cualquiera de los dos positivos o negativos) cargas que se pueden desarrollar en los bordes por transferencia directa de H^+ o OH^- procedentes de la fase acuosa dependiendo del pH como se muestra en la figura II.6. Las cargas variables del borde son compensadas por una nube de iones contrarios en una doble capa eléctrica oculta, en el interior la doble capa dominante que se extiende a una superficie de partículas probables que caen encima bajando la concentración de los electrolitos indiferentes (Fig. II. 7). Esta última es probable, si el espesor de la doble capa (longitud de Deybe ~ 3 nm a 0,01 M) es más largo que la delgada lamella (menor que 1 nm estimado según datos cristalográficos) como se muestra abajo en la Fig. II. 7, la doble capa oculta en la región del borde puede surgir de lo anterior en un comienzo de una concentración electrolítica estimada entre 0,01 y 0,1M en base a la solución de la ecuación de Poisson – Boltzmann para una sección de la partícula.

La caracterización de la carga superficial de los minerales de arcilla, cuando permanecen las cargas procedentes de sustituciones isomórficas de iones de la celda del cristal están cercanos a las cargas variables del borde, es más complicada que de los óxidos metálicos. En este caso, la densidad superficial de la carga interna (σ_{in}) puede ser definido como la cantidad neta de densidad de carga estructural permanente (σ_0) y la densidad de carga neta superficial de protones ($\sigma_{0, H}$): $\sigma_{in} = \sigma_0 + \sigma_{0, H}$.

El término de punto de carga cero (Pzc) está definido para un único pH, donde la carga neta superficial es cero para óxidos anfóteros donde las cargas sólo dependen del pH, esto no es apropiado para minerales de arcilla con ambas cargas permanentes pues dependen del pH.

Adicionalmente las definiciones del punto de carga cero han sido introducidas. El punto carga neta cero de protones (PZNPC) esta dado por $\sigma_{0, H} = 0$ y el punto de punto de carga cero neto (PZNC) esta dado por $\sigma_{in}=0$ ha sido introducido por Sposito (1984, 1992).

Desafortunadamente la terminología consistente para puntos de carga cero no han sido utilizadas aun, pero nadie discrepa su importancia en la caracterización de la superficie de la partícula. El PZNPC parece ser correcto para el único caso de carga superficial heterogénea en plaquetas de montmorillonita, sin embargo, los protones tienen una afinidad específica con las cargas permanentes y así el uso del $pH_{PZC, \text{borde}}$, el pH del PZC perteneciendo a lugares de borde anfótero es aceptado.

Hasta la fecha, la valoración potenciométrica todavía es un enfoque principal para estudiar la química ácido- base de la superficie de los minerales arcillosos.

Uno de los problemas es encontrar un estado referencial (como el PZC de óxidos), por lo menos un estado inicial definitivo. Esto parece ser una buena

solución para la valoración protón – saturado de montmorillonita preparado mediante el método de Barshad (1969)

Esto resultó aproximadamente en una confiable constante de afinidad de protones relacionado en algunos casos a los fuertes y más débiles en la superficie. Solo algunas publicaciones señalan la relación de la matriz sólida con la disolución en varias especies de aluminio hidrolizadas, ácido silícico y sus productos hidro- aluminosilicatos, sin embargo su interacción con la superficie de la arcilla debería ser considerado en la descripción del modelo (SCM) que fueron aplicadas con éxito en una reciente información (Lía 2001) para interpretar la reacción de superficie ácido – base involucrado en la disolución de arcillas de illita durante la valoración prolongada. Un modelo termodinámico consistentes (llamado como modelo de arcilla) fue desarrollado para iones metálicos adsorbidos con una hinchazón 2: 1 de sus capas tal como la montmorillonita.

La anterior dilución la carga heterogénea de los minerales arcillosos presentados originalmente por Van Olphen (1963), sirvió como soporte para posteriores investigaciones, gobernadas por las interacciones de las partículas en suspensiones de minerales arcillosos. Aunque la carga total de la partícula es siempre negativa, ambas partes cargadas negativamente y positivamente en la superficie del mineral arcilloso existen simultáneamente bajo condiciones ácidas (pH a pH_{pzc} , borde). Sin embargo, la doble capa positiva cerca del borde a las placas está oculta que contiene electrolitos indiferentes a bajas concentraciones (encima de la Fig. II. 7), y así una segunda partícula no puede ser vista. La atracción entre las partes cargadas opuestas frente a frente se realiza en agregados con estructura heterocoagulada borde – cara menor que el pH de borde PZC (≈ 7), solo si la región su borde positivo surge una entrada anterior de electrolito concentrado. Pocos trabajos han sido publicados en la predicción teórica (usando teoría DLVD) del pH dependiendo de la estabilidad de ley montmorillonita. La dependencia significativa del pH fue encontrada

experimentalmente y explicadas en forma teórica para un borde cargado ($\text{PH}_{\text{borde}} \approx 6,5$) de una muestra de H- montmorillonita, donde solo hay suspensión de cargas en las caras que fueron consideradas. El efecto del pH y las cargas permanentes en la sensibilidad de hinchamiento de las arcillas con electrolitos, fueron explicados, en base a conceptos teóricos similares en otros informes. Este enfoque probado para ser efectivo en la predicción en la reducción de la permeabilidad media de los posos contenidos en las arcillas hinchadas. Aunque una aplicación exitosa del DLVO teórico para una contribución mutua de la doble capa eléctrica en la cara y borde de la placa de la montmorillonita fueron publicados hace 20 años atrás donde la capacidad del DLVD teórico parece describir el tipo de heterogeneidad path-wise que ha sido cuestionada en un reciente trabajo.

Un excelente modelo DLVO fue usado para calcular la dependencia del pH de las interacciones cara – cara, borde – cara y borde – borde, el cual incluye un pequeño rango de repulsión conveniente para estructuras o fuerzas de hidratación, así llamada contribución ácido – base polar y contribuciones de Van der Walls.

En algunas suspensiones coloidales estables, la partícula en total es repulsiva, mientras que más o menos el desprendimiento físico de la malla de adherencia de las partículas forman una suspensión inestable. Sea lo que fuera la razón, la formación de la fuente red de la partícula afecta la mecánica, las propiedades de fluir de las suspensiones de las arcillas.

En general, las suspensiones estables muestran que los líquidos viscosos prefieren un flujo Newtoniano con adelgazamiento o carácter pensante, mientras que la apariencia y frecuente carácter plástico ambos con referencia tixotrópicas en la formación de la malla de partículas agregadas. La reología de las suspensiones de las arcillas esta sujeto a tremendos trabajos por varias décadas, especialmente por que las aplicaciones prácticas son múltiples. Los efectos de las variables, tales como la concentración de la suspensión y la calidad de las sales, además el efecto

de los agentes débiles en el flujo del caudal que han sido investigados, también dependen del pH.

El objetivo de esta investigación es mostrar el efecto específico del pH sobre la superficie cargada y dispersada de la montmorillonita, el cual tiene influencia de la interacción de las partículas en suspensiones, la sensibilidad de los electrolitos, el orden espontáneo de las placas y la formación de geles de montmorillonita a diferentes pHs y la fuerza iónica.

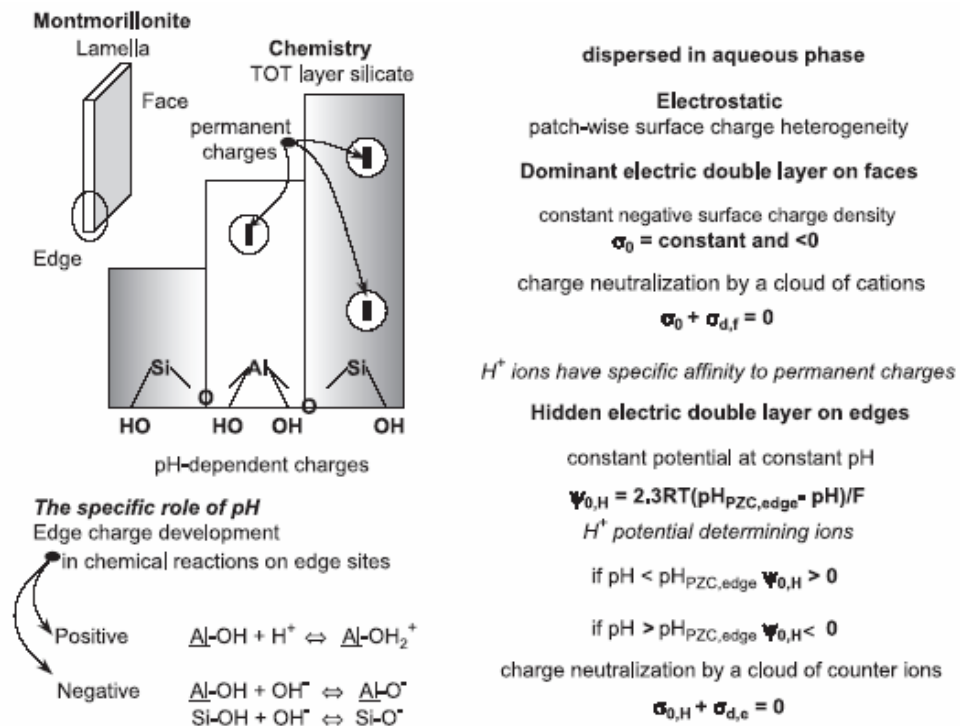


Fig. II .6. Desarrollo de la superficie de la carga heterogenética para partículas dispersas de montmorillonita en soluciones acuosas aptas para un cristal imperfecto (cargas permanentes negativa en las caras) y secciones protolíticas en la superficie del borde de grupos OH (pH -depende del borde). Una doble capa eléctrica dominante (edl) con densidad (σ_0) en la cara de la placa mientras que la doble capa oculta con un potencial constante a pH constante ($\psi_{0,H}$) en su borde ya formado y ambos están neutralizados por la nube de iones contrarios (densidad de carga de las capas difusas, $\sigma_{d,f}$ y $\sigma_{d,e}$ para las caras y bordes respectivamente).

(Ref. Hungary. Szered .University of Szeged. 2004)

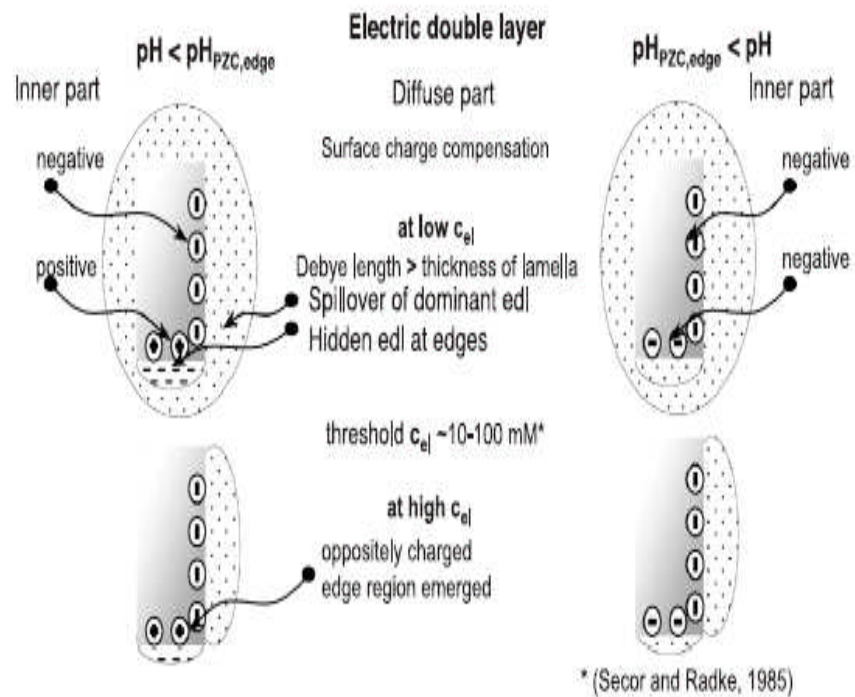
The role of pH and indifferent electrolytes in the structure of

Fig. II.7. Representación esquemática de las dobles capas eléctricas dominantes y ocultas formado alrededor de las placas de montmorillonita, bajo diferentes condiciones de la solución.

El efecto de los electrolitos indiferentes en una partícula cargada heterogeneticamente además el rol específico del pH.

(Ref. Hungary. Szered .University of Szeged. 2004)

CAPITULO III: PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las culturas pre -incas se obtenía el oro de pequeñas minas, producto de los afloramientos de fluidos hidrotermales y en muchos casos se encontraba en forma nativa.

En la época de los españoles, el oro se extrajo a gran escala para llevarlo a España, producto del trabajo de las mitas siguiendo las vetas para luego obtener el metal, aplicando el método de amalgamación.

En la actualidad con el progreso de nuevas tecnologías de extracción y la alta cotización en el mercado internacional, justifica extraer el oro en regiones geológicas, donde se encuentra diseminado, acompañado de minerales desfavorables (minerales cianicidas, arcillas, etc.) y baja ley. El motivo que originó la presente tesis de investigación fue el problema que ocasionan los minerales arcillosos en la extracción del oro y plata en diferentes compañías mineras, debido al efecto de preg-robbing (secuestro del oro) originando bajas recuperaciones de dichos metales finos.

3.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Identificar la arcilla que produce el efecto preg-robbing en el proceso de cianuración del oro en pilas o montones.

Determinar las causas que explican las razones que ocasionan el bajo porcentaje de recuperación del oro en el proceso de lixiviación en pilas o montones cuando hay presencia de arcillas.

Contribuir a optimizar la recuperación en el proceso de cianuración.

CAPITULO IV: ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE ARCILLAS

4.1 FISICOQUÍMICA DE SUPERFICIES DE ARCILLAS

4.1.1 Introducción

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 μm).
- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas. Para un sedimentólogo, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm .
- Para un ceramista una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica. Desde el punto de vista económico las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas y con distintas propiedades tecnológicas y aplicaciones.
- Desde el punto de vista de un metalurgista es un perjuicio ya que causa problemas en la concentración de minerales, como en la flotación que ensucia los concentrados e incrementa el consumo de reactivos; en el caso de la hidrometalurgia causa pret-robbing de los metales disueltos en solución como en el caso de la lixiviación de cobre oxidado y en la cianuración de oro y plata.

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula, en este sentido se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 μm . Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las 2 μm .

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

4.1.2 Antecedentes del estudio.

Es sabido que el carbón en líneas generales presente en el mineral es un adsorbente del oro de soluciones cianuradas y esto lo demuestra el caso de muchas compañías mineras y este es uno de los motivos por el cual mineral que contenga material carbonaceo no tiene que alimentarse al proceso de cianuración, ya que trae como consecuencia que las recuperaciones de oro tiendan a decrecer y esto es lo que se conoce como “Efecto Preg-Robbing”.

Efecto Preg-Robbing, es el secuestro (adsorción) del oro disuelto en soluciones cianuradas en un material adsorbente, en este caso el material adsorbente actúa como un intercambiador iónico.

La lixiviación en líneas generales y en especial la lixiviación en montón es un método metalúrgico alterno usado para extraer los metales de depósitos de menas que imposibilitan el uso de los métodos convencionales debido a factores económicos y ambientales.

4.1.3 ESTRUCTURA Y CLASIFICACIÓN DE LAS ARCILLAS

4.1.3.1 Estructura

Como veremos, las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos $(\text{SiO}_4)^{4-}$ se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} .

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (Figura siguiente).

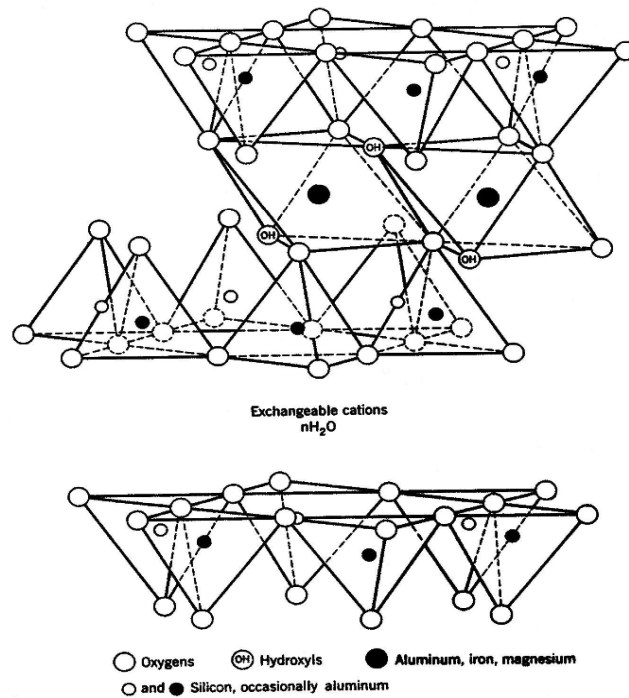


Fig. IV.8. Estructura tipo t-o-t de una arcilla

(Ref. Mineralogía C. Díaz Mauriño)

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica y se denominan **bilaminares, 1:1**, o **T:O**; o bien por tres capas: una octaédrica y dos tetraédricas, denominándose **trilaminares, 2:1** o **T:O:T**. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina **lámina**.

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina **trioctaédrica** (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si solo están ocupadas dos tercios de las posiciones octaédricas y el tercio restante está vacante, se denomina **dioctaédrica** (el Al^{3+} es el catión octaédrico dominante).

En algunos filosilicatos (esmecticas, vermiculitas, micas...) las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos

cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina **T: O: T: O** o **2:1:1**. La unidad formada por una lámina más la interlámina es la unidad estructural. Los cationes interlaminares más frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

También pertenecen a este grupo de minerales la sepiolita y la paligorskita, a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas de tipo mica. A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, éstos tienen hábito fibroso (figura siguiente), ya que la capa basal de oxígenos es continua, pero los oxígenos apicales sufren una inversión periódica cada 8 posiciones octaédricas (sepiolita) o cada 5 posiciones (paligorskita). Esta inversión da lugar a la interrupción de la capa octaédrica que es discontinua.

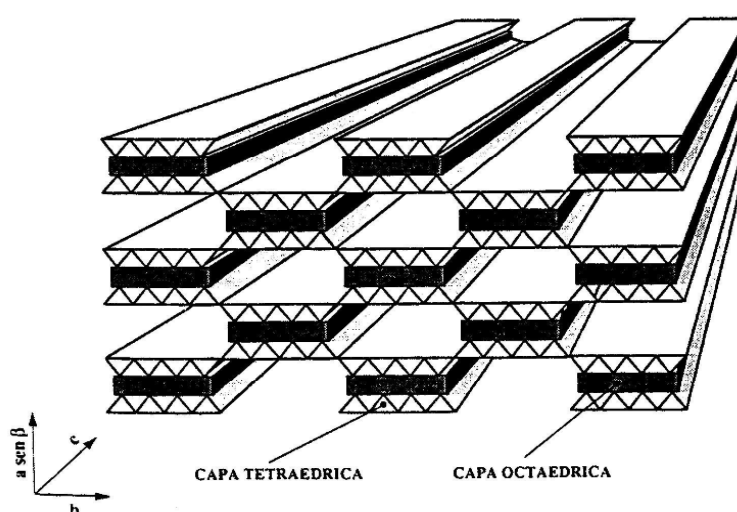


Fig.IV .9. Vista panorámica de una arcilla tipo t-o-t

(Ref. Mercedes Suárez Barrios: Universidad de Salamanca)

4.1.3.2 Clasificación

Los filosilicatos se clasifican atendiendo a que sean bilaminares o trilaminares y dioctaédricos o trioctaédricos (Tabla siguiente). Como puede verse pertenecen a los filosilicatos grupos de minerales tan importantes como las micas y las arcillas.

	DIOCTAÉDRICOS	TRIOCTAÉDRICOS	CARGA		
BILAMINARES T:O 1:1		Caolinita	Antigorita	X = 0	
	CANDITAS	Nacrita	SERPENTINA		Crisotilo
		Dickita			Lizardita
		Halloisita			Bertierina
TRILAMINARES T:O:T 2:1	Pirofilita		Talco		X = 0
		Montmorillonita		Saponita	X = 0,2-0,6
	ESMECTITAS	Beidellita	ESMECTITAS	Hectorita	
		Nontronita			
	Vermiculitas		Vermiculitas		X = 0,6-0,9
	Illitas				X = 0,9
		Moscovita		Biotita	X = 1
	MICAS	Paragonita	MICAS	Flogopita	
			Lepidolita		
T:O T:O 2:1:1	C L O R I T A S				
FIBROSOS	Paligorskita	Sepiolita			

Cuadro IV.1. Clasificación de arcillas

4.1.4 Propiedades Físico-Químicas.

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido / líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, como ya se ha citado, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

4.1.4.1 Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

❖ Caolinita de elevada cristalinidad hasta	15 m^2/g .
❖ Caolinita de baja cristalinidad hasta	50 m^2/g .
❖ Halloisita hasta	60 m^2/g .
❖ Illita hasta	50 m^2/g .
❖ Montmorillonita	80-300 m^2/g .
❖ Sepiolita	100-240 m^2/g .
❖ Paligorskita	100-200 m^2/g .

4.1.4.2 Capacidad de Intercambio catiónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.

A continuación se muestran algunos ejemplos de capacidad de intercambio catiónico (en meq/100 g):

➤ Caolinita:	3-5
➤ Halloisita:	10-40
➤ Illita:	10-50
➤ Clorita:	10-50
➤ Vermiculita:	100-200
➤ Montmorillonita:	80-200
➤ Sepiolita-paligorskita:	20-35

4.1.4.3 Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlamina (esmeclitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma

aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

4.1.4.4 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como

caciones de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

4.1.4.5 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, et al., 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

4.1.4.6 Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

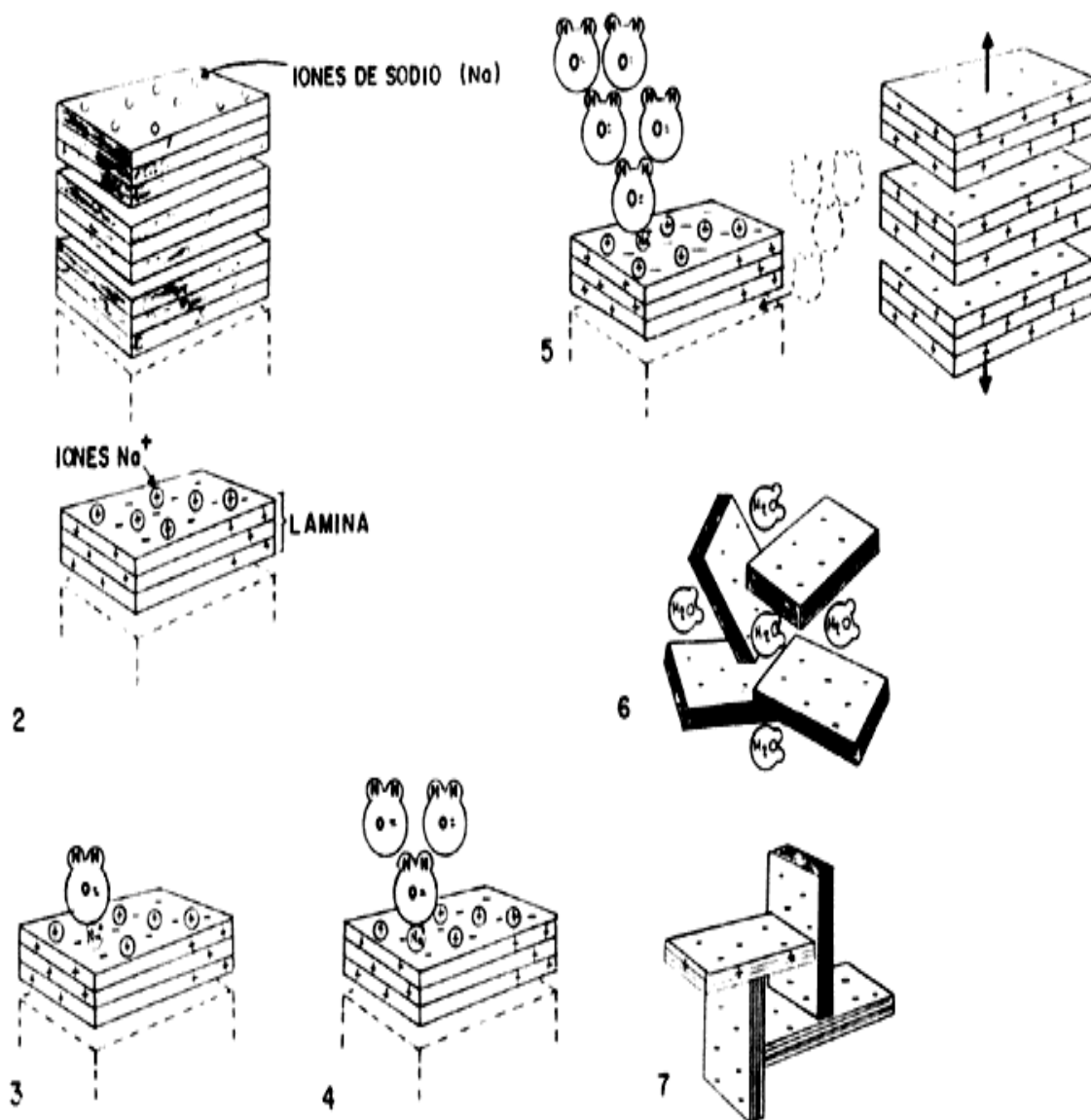


Fig. IV.10. Etapas esenciales en la interacción del agua en la arcilla.

(Ref. Bibliotecadigital.ilce.edu)

CAPITULO V. DESCRIPCION GEOLÓGICA DEL TAJO DONDE SE TOMARON LAS MUESTRAS MINERALES

5.1 LITOLOGIA

El tajo consta básicamente de dos unidades litológicas bien definidas: cuarcitas en la parte inferior y cubriendo a estas areniscas, limonitas y arcillas, ambas unidades pertenecientes a la Formación Chimú.

La mineralización en este Tajo está dada principalmente en las estructuras de rumbo NO con buzamientos ligeramente verticales, que han servido de conductos para el aporte de mineralización.

5.2 ALTERACIÓN

La alteración principal es cuarzo-sericita y en menor proporción se encuentra diáspora, este último mineral caracteriza a los yacimientos epitermales.

Alteración fílica

Cuarzo-Sericita: Este ensamble mineralógico muestra a la sericita como relleno intersticial; esta alteración disminuye con el incremento de la silicificación.

Sericitización: Muestra a la sericita intersticial pervasiva, dado en horizontes lutáceos alterados a arcillas, y en areniscas de grano fino a medio, como resultado de la transformación de las impurezas contenidas en la matriz.

Silicificación

Se han reconocido dos etapas de silicificación:

La primera dada a manera de halos en los laterales del eje de los feeders, decrece a manera que se alejan del centro. Muestra a los bordes de los granos de cuarzo ligeramente obliterados.

La segunda a manera de venillas de sílice blanca lechosa, ligeramente porosa, rellenando microfracturas y en algunos casos a los “boxworks” (previamente lixiviados).

Argilización

Se da en niveles de lutitas, con formación de minerales como la pirofilita, caolín y otros tipos de arcillas.

5.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

En el tajo A las estructuras con presencia de mineralización oscilan entre N 30° W y N 50° W en promedio, buzamientos al SW y ligeramente verticales; se reconocen fracturas con relleno de goetita y jarosita, los halos de alteración están dados principalmente por la silicificación.

Reconocemos dos tipos de estructuras principales:

Estructuras Primarias o “feeders”: Se ubican conjuntamente con zonas de fallas de rumbo NO. La alteración cuarzo-sericita muestra a una cuarcita de color blanquecino con apariencia pulverulenta.

Estos “feeders” al interceptar niveles lutáceos forman entrampamientos por debajo y encima de estos, ocasionando enriquecimiento mineralógico en estas zonas.

La hematita ocurre principalmente en zonas de falla y continúan en profundidad a lo largo del eje de la estructura. En zonas cercanas a superficie el área de influencia es mayor

Se han encontrado sulfuros relictos caracterizados por una mineralización de pirita finamente diseminada sobre las cuarcitas de grano medio, con halos de lixiviación concéntricos, manifestados por la oxidación posterior.

La presencia de cinabrio indicaría proximidad a los “feeders”.

Estructuras Secundarias:

Paralelas a las principales a manera de fracturas abiertas con óxidos y halos de silicificación cortos, no es muy visible la alteración cuarzo-sericita.

5.4 MINERALIZACIÓN

La mineralización hasta ahora conocida, se emplaza casi exclusivamente en las cuarcitas, consiste de goethita y jarosita, con oro libre emplazado principalmente en fracturas.

La zona de influencia de esta mineralización en estructuras es aproximadamente entre 20 a 40m.

Esta distancia no es aplicable a zonas en las cuales se tiene como techo a niveles lutáceos, donde se tiene una mineralización más amplia por el sello que ejercen estas capas.

La mineralización del Tajo A sería del tipo mesotermal por la presencia de diáspora ($\text{AlO}_2(\text{OH})$) mineral que se da a temperaturas de 300 a 350°C, y sericita (Terry Leach & Co).

Los minerales más comunes son: goetita, jarosita, hematita, diáspora.

La característica principal del área mineralizada, es que se encuentra emplazada dentro de una zona fuertemente fracturada, otra característica importante es que las cuarcitas han sido disgregadas por la alteración del cemento a cuarzo-sericita perdiendo su textura original produciendo una textura arenosa amarillo-rojiza muy conspicua en superficie, la cual utilizamos como guía de mineralización.

El cuerpo mineralizado tiene como limite inferior a una intercalación de areniscas, limolitas y arcillas muy conspicuos, el límite superior consiste del otro conjunto de areniscas, limolitas y arcillas, similar al anterior, de modo que el cuerpo mineralizado se encuentra delimitado por estas rocas.

CAPITULO VI: METODOLOGÍA DEL TRABAJO

6.1. Materiales y pruebas a nivel de laboratorio

6.1.1 Materiales.

Los materiales arcillosos se muestrearon en el tajo A de la mina, en diferentes sitios, tratando de extraer de preferencia material arcilloso y cuya descripción se da en el Cuadro N° VI.1.

Cuadro N° VI.1

Muestra N°	Descripción de Muestra
1	ARCILLA BLANCA N° 2 (A MENOR PROFUNDIDAD).
2	ARCILLA BLANCA (A MAYOR PROFUNDIDAD, 40 m.)
3	ARCILLA MARRÓN
4	ARCILLA ROJA.

Las que se describen en forma macroscópica a continuación:

MUESTRA N° 1.

Constituido por partículas menores a 5mm. y de color blanco arenoso algo amarillento.

MUESTRA N° 2.

Constituida por partículas menores a 2mm. y de color blanquecino.

MUESTRA N° 3.

Constituida principalmente por arcillas de color beige oscuro, con tamaños de partícula menor a 2 mm.

MUESTRA N° 4.

Constituida principalmente por arcillas de color rojo más conocidas por illitas con fragmentos angulosos y sub-angulosos de cuarcitas con tamaños de partícula menores a 6mm.

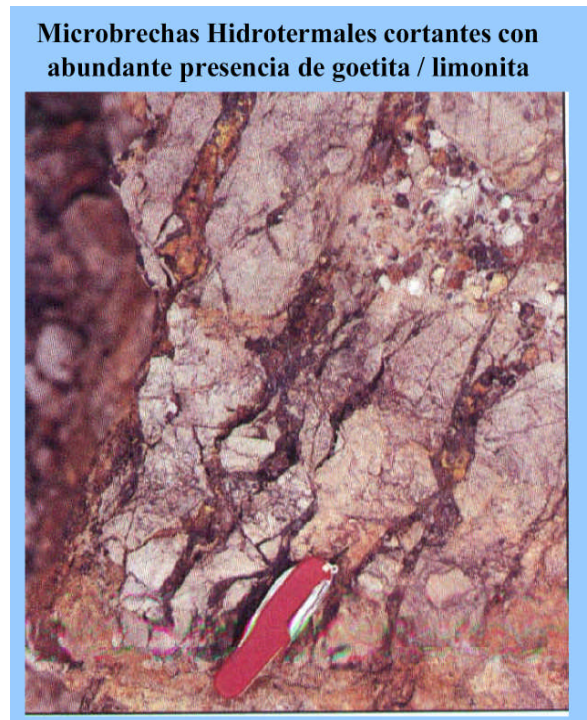
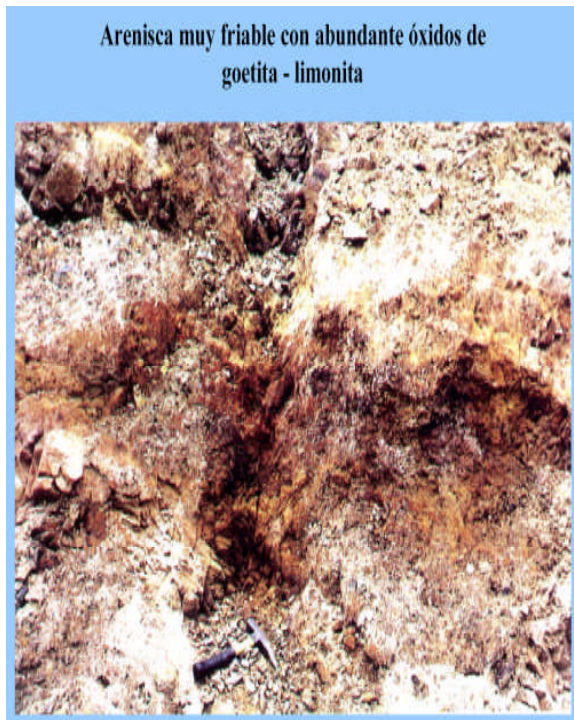
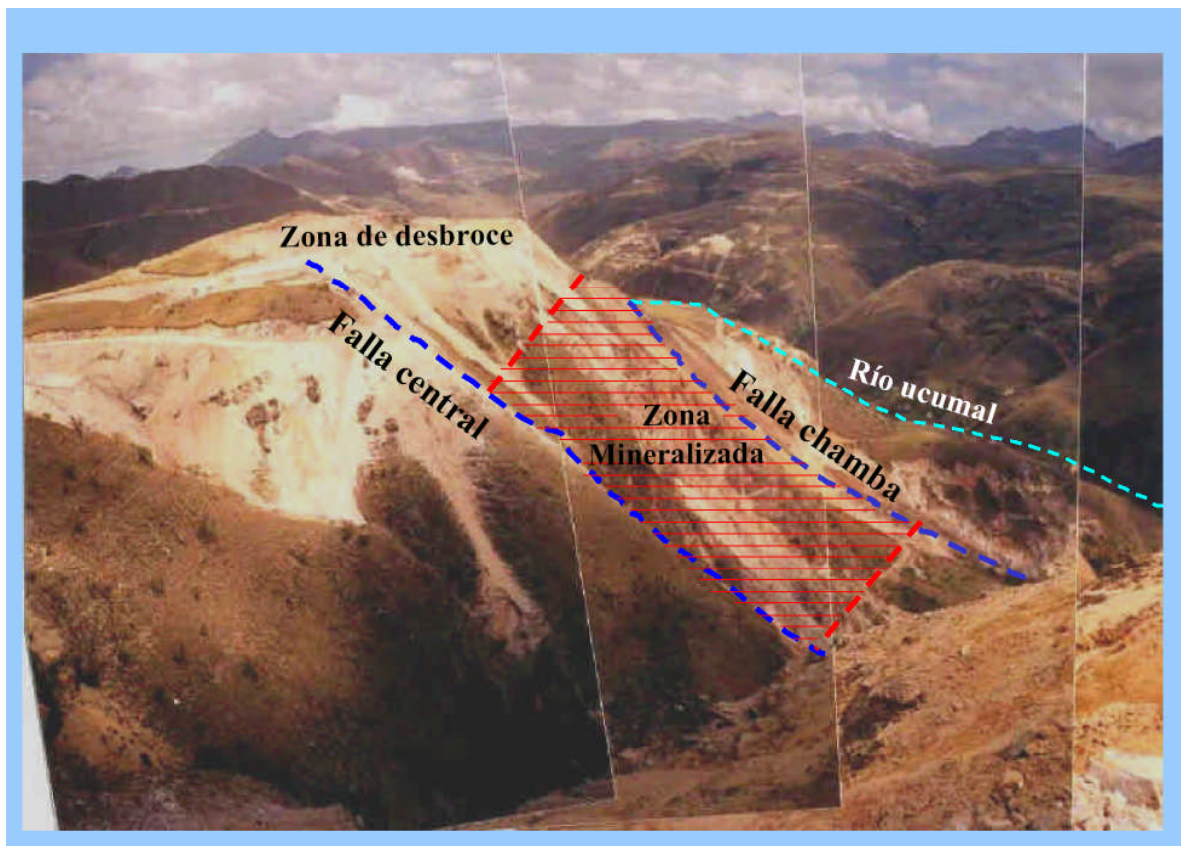


Fig. VI.11. Vistas panorámicas mostrando los aspectos geológicos de la mineralización aurífera estudiada.

Cortesía: Dr. Rolando Carrascal M.

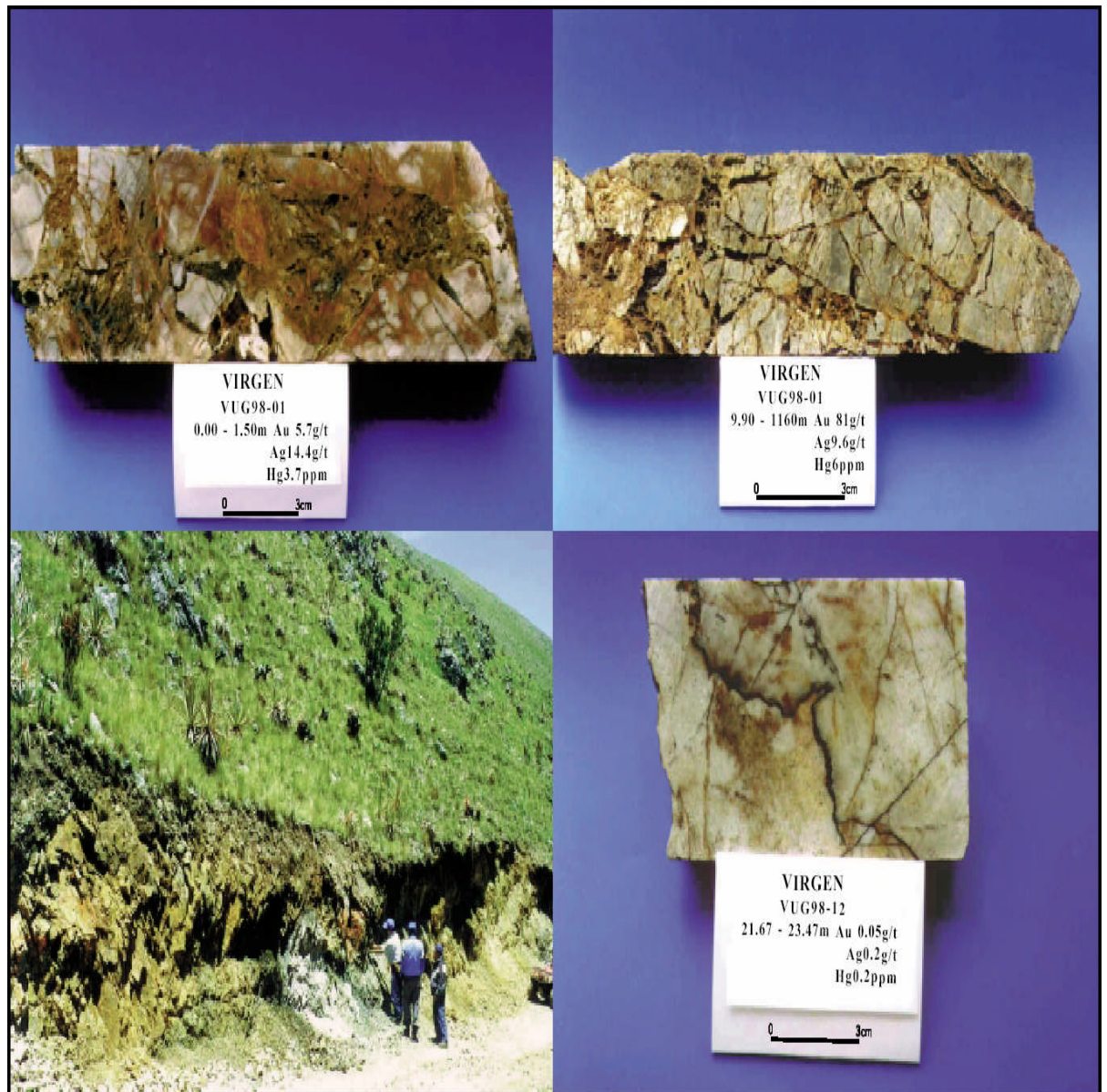


Fig.V. 12. Testigos de perforación con Diamantinas, mostrando texturas típicas de cuarcitas además microfracturamientos en donde se hospeda la mineralización aurífera.

Cortesía: Dr. Rolando Carrascal M.

6.1.2 Descripción de una muestra arcillosa

6.1.2.1 Descripción macroscópica

Muestra constituida por fragmentos de cuarzo de color blanco grisáceo a gris blanquecino, pigmentado por óxidos de color pardo amarillento a pardo oscuro. Presenta una textura granular fina de granos de cuarzo mayormente hialino de dimensiones submilimétricas; ocasionalmente presenta óxidos o finas partículas oscuras entre sus intersticios. En conjunto la muestra se encuentra mezclada con óxidos de hierro (limonitas) de aspecto pulverulento y arcillas; éstas últimas posiblemente pigmentados por los óxidos.



Fig.VI. 13. Mineral con arcillas de color beige oscuro con tamaños muy finos.



Fig. V I.14. La misma muestra destacando los fragmentos angulosos mostrando alteraciones hidrotermales y oxidación.

6.1.2.2 Descripción microscópica

Luz Transmitida

La muestra está constituida por un agregado de individuos de cuarzo con formas subangulosas a subredondeadas no mayores a 750 μm . Algunos granos de cuarzo presentan bordes de recrecimiento de cuarzo secundario autógeno, denominado cemento sintaxial, los cuales sellan los bordes de contacto con otros minerales y como consecuencia, disminuye en parte la porosidad primaria de la roca. Además se tiene moscovita, limonitas (goethita) en algunos casos de aspectos masivos, coloformes y como relleno de moldes de pirita, frecuentemente asociado a jarosita.

Presenta fracturamientos muy finos, mostrando relleno con relictos de granos de cuarzo, limonitas pulverulentas, partículas oscuras de materia orgánica (carbón).

Luz Reflejada

Se ha observado escasos granos de oro no mayor a 25 μm a veces como inclusiones en los granos de cuarzo y otras como partículas libres e inmersas en la resina. También escasísimos granos anhedrales de pirita e intercrecimientos de limonitas con esfaleritas los cuales muestran reflexiones internas de color amarillo parduzco a amarillo muy pálido casi incoloro, además de intercrecimientos de limonitas de aspecto colofome y ocasionalmente intercrecido junto a hematita.

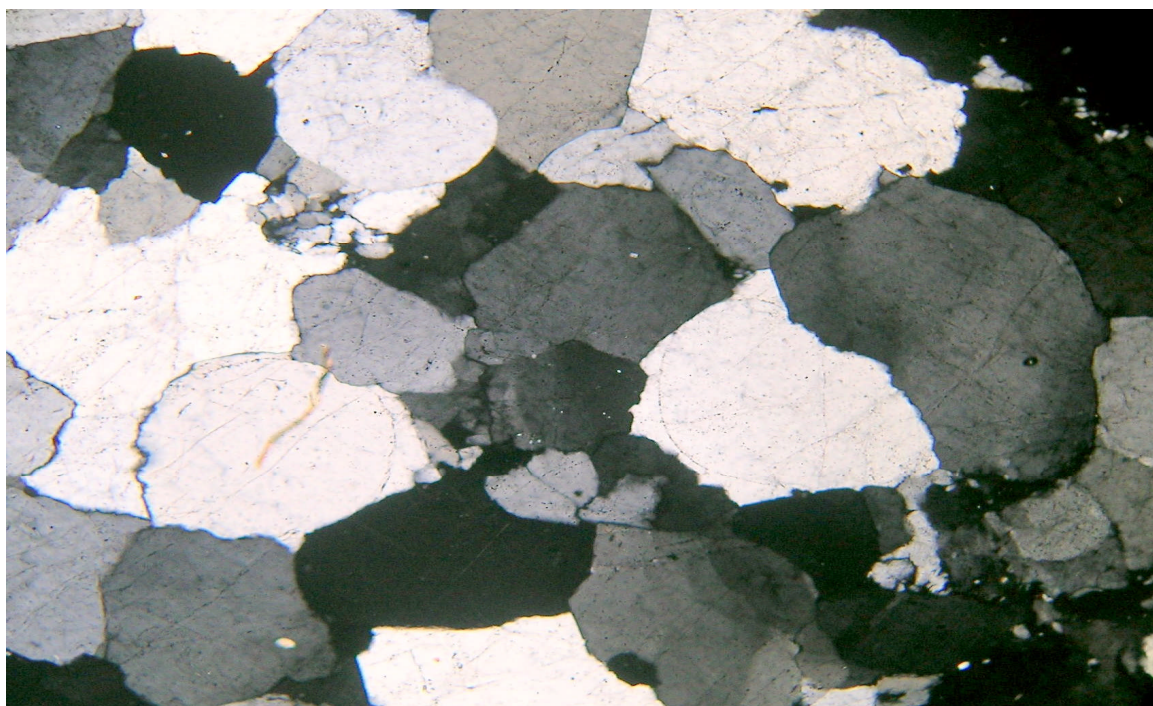
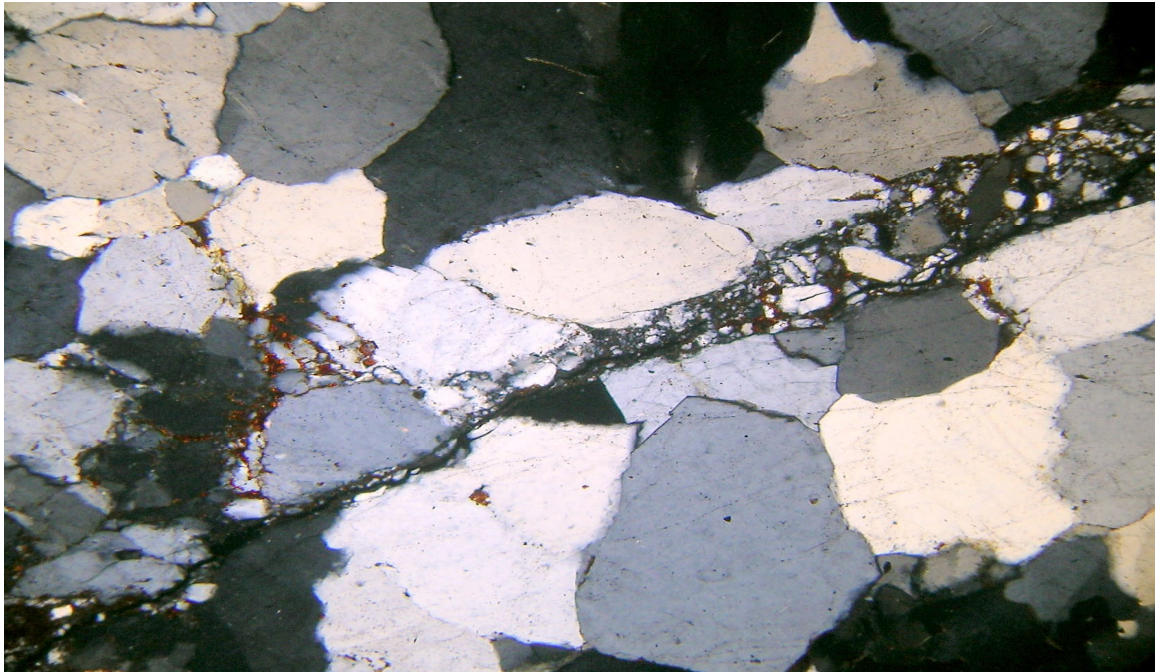


Fig. VI.15. Micrografía del material estudiado conformado por cuarzo cemento sintaxial (10 X).



**Fig. VI. 16. Fractura con relleno de cuarzo y limonitas
conteniendo oro (10X)**

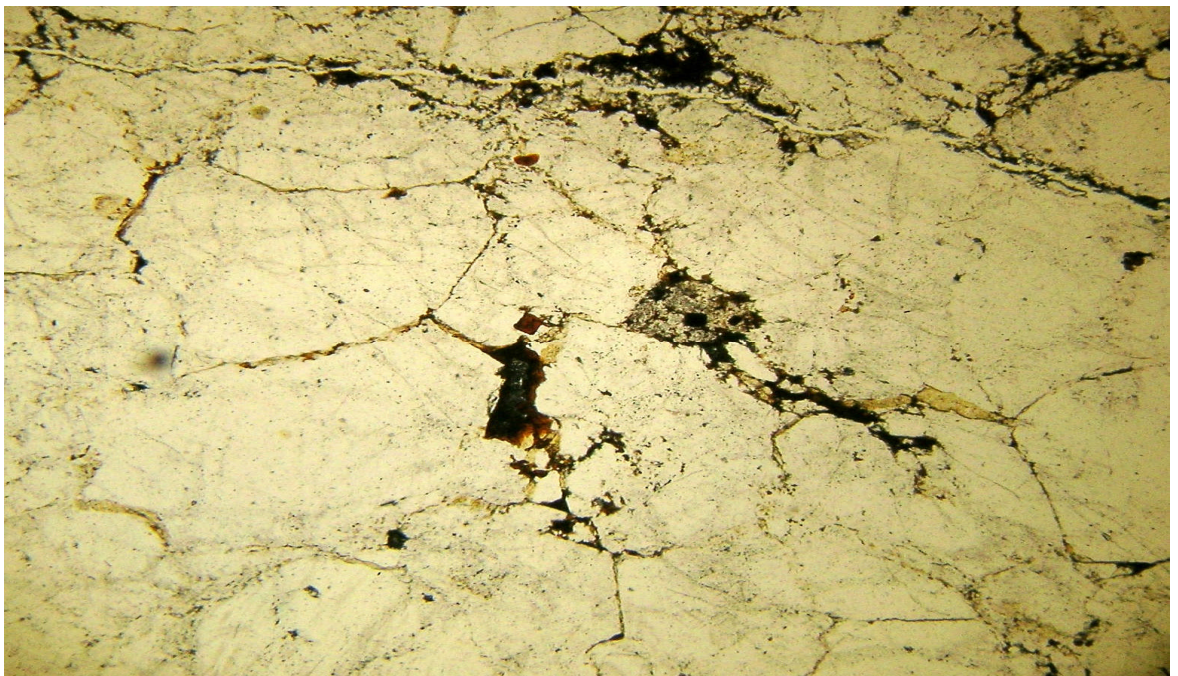


Fig. VI. 17. Moldes de pirita oxidada con rellenos de limonita (10 X)

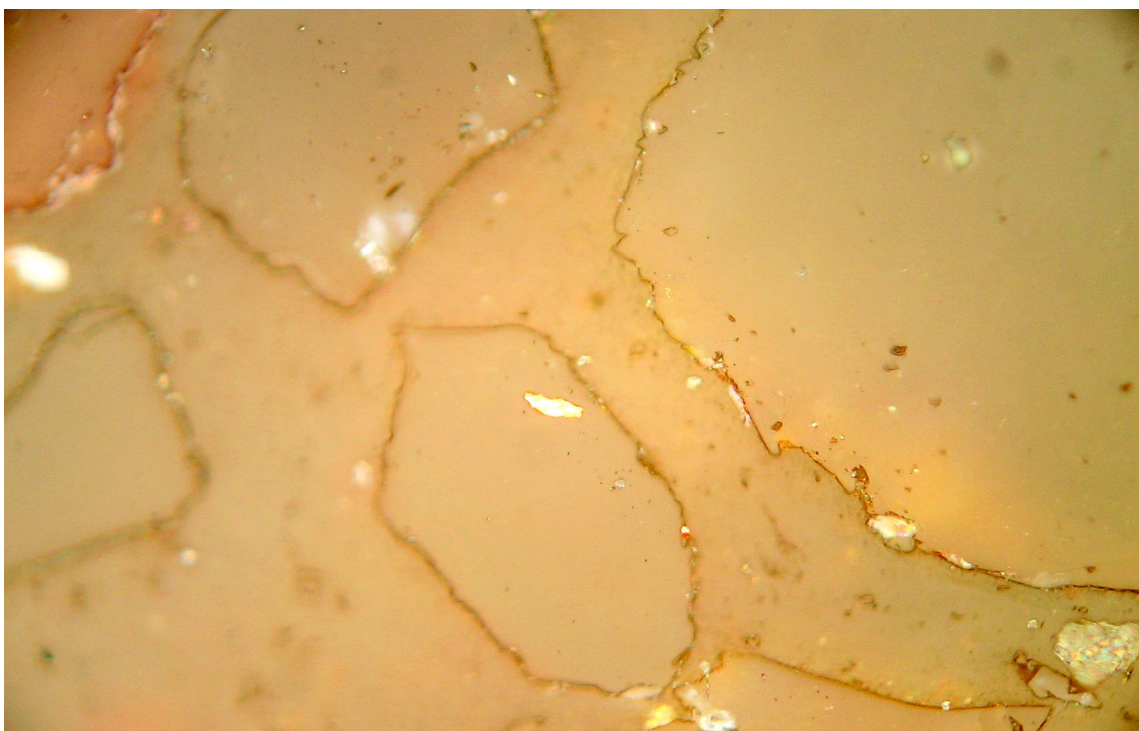


Fig. VI. 18. Grano de oro en fragmento de ganga (10 X).

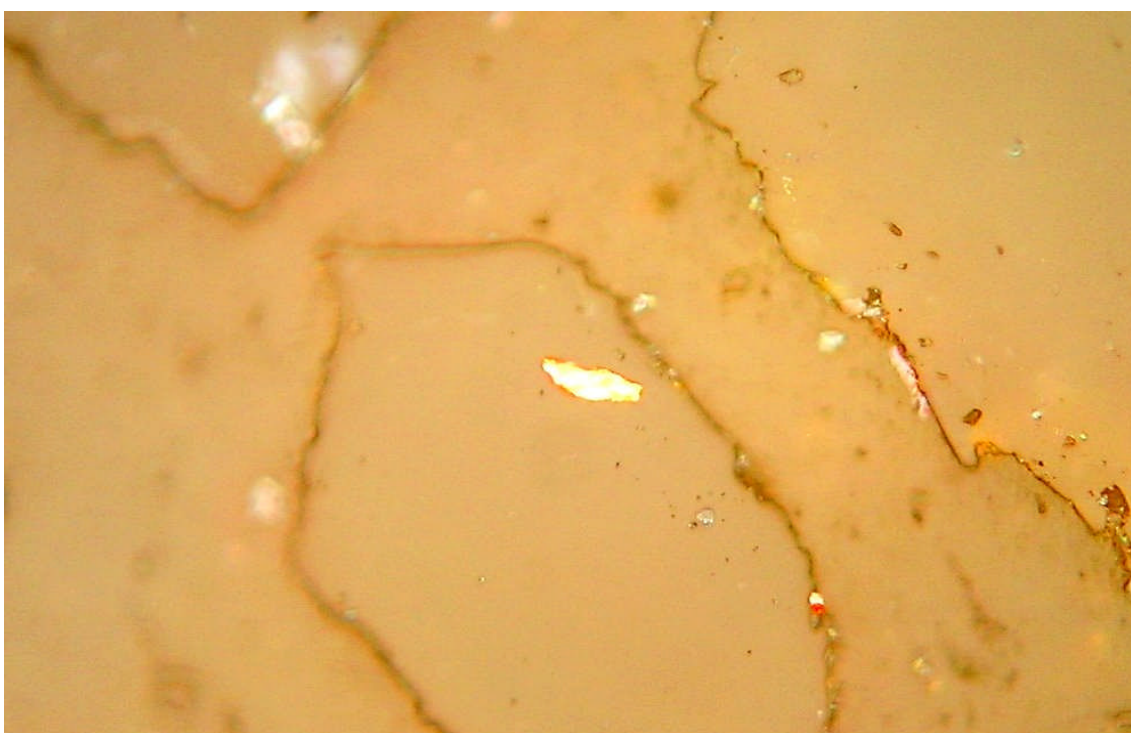


Fig. VI. 19. Vista anterior magnificada (20 X).

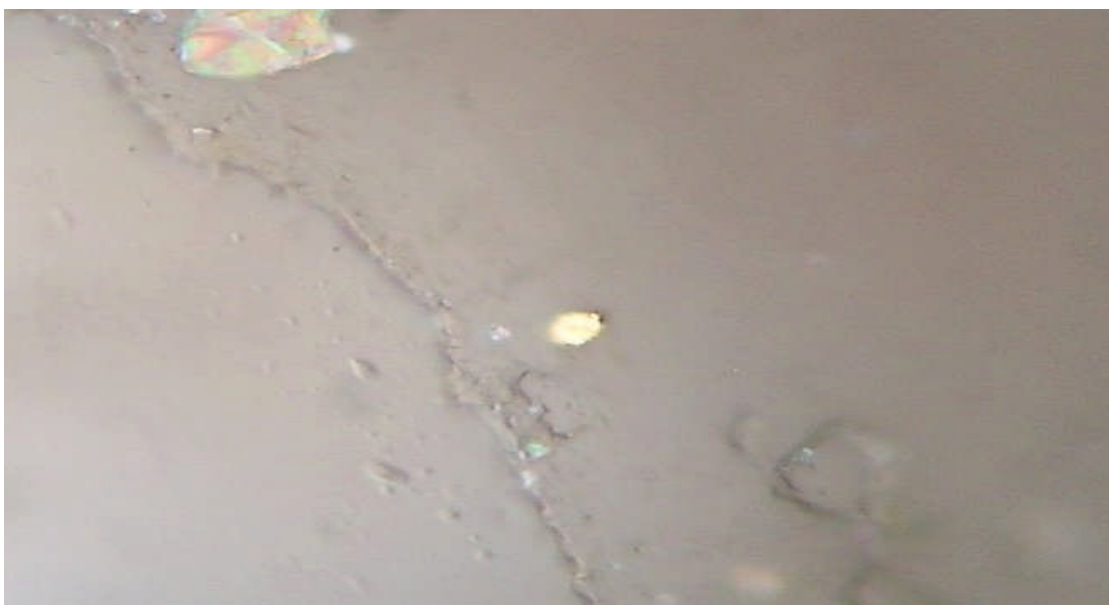
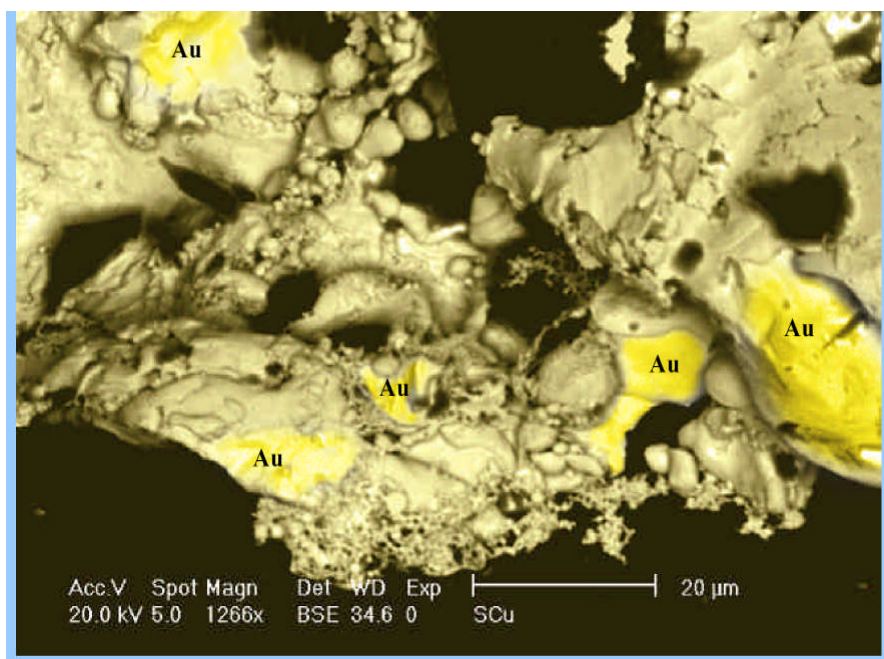


Fig. VI. 20. Grano de oro libre (20 X).



Partículas de oro con pureza encima del 95% asociado con Cuarzo, diáspora y óxidos

Fig.VI.21. Partículas de oro vistas en microscopio electrónico.

Cortesía: Dr. Rolando Carrascal

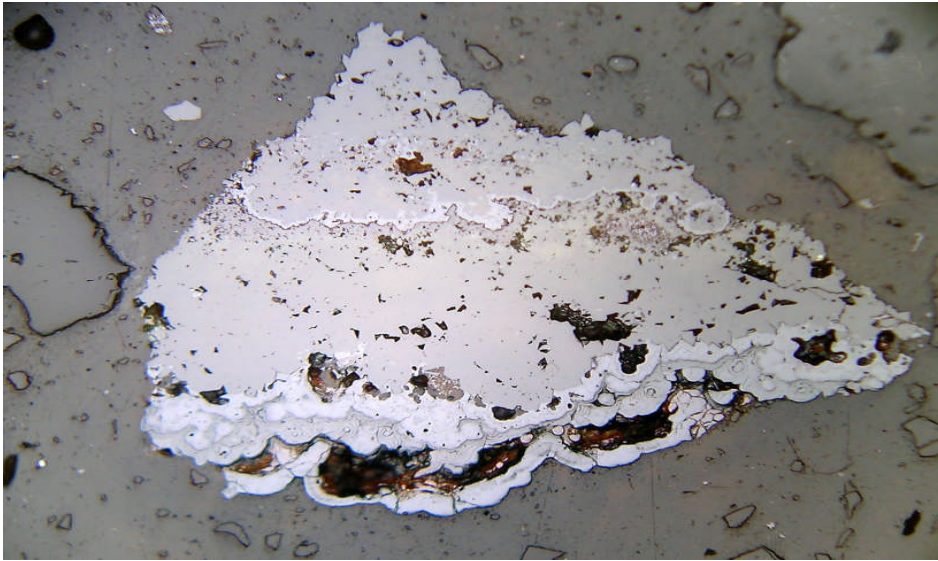


Fig. VI. 22. Intercrecimiento de esfalerita con limonita coloforme (10 X).

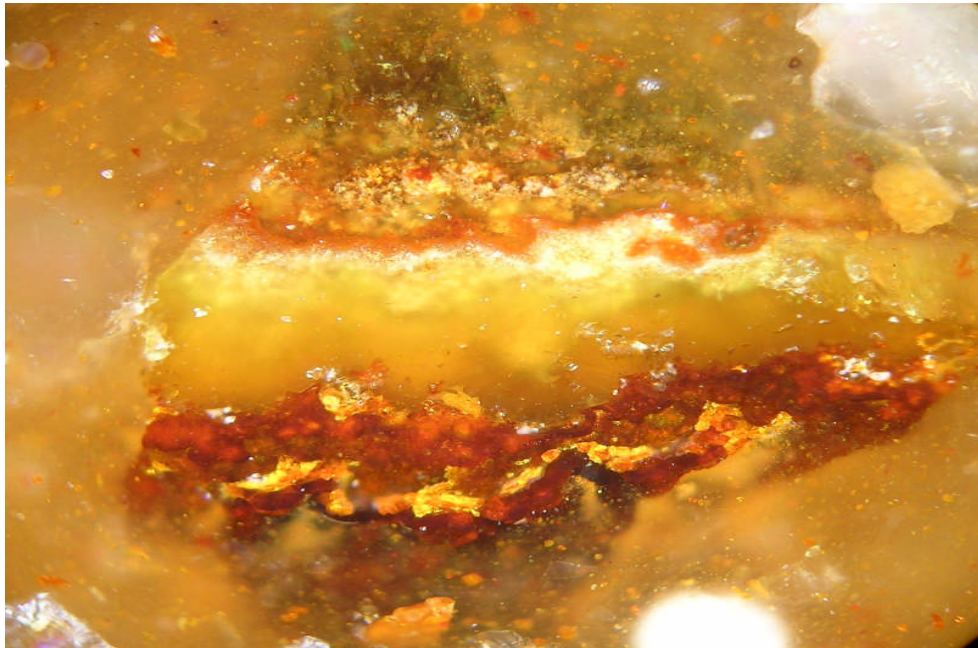


Fig. VI. 23. Vista anterior en nícoles cruzados (10X).

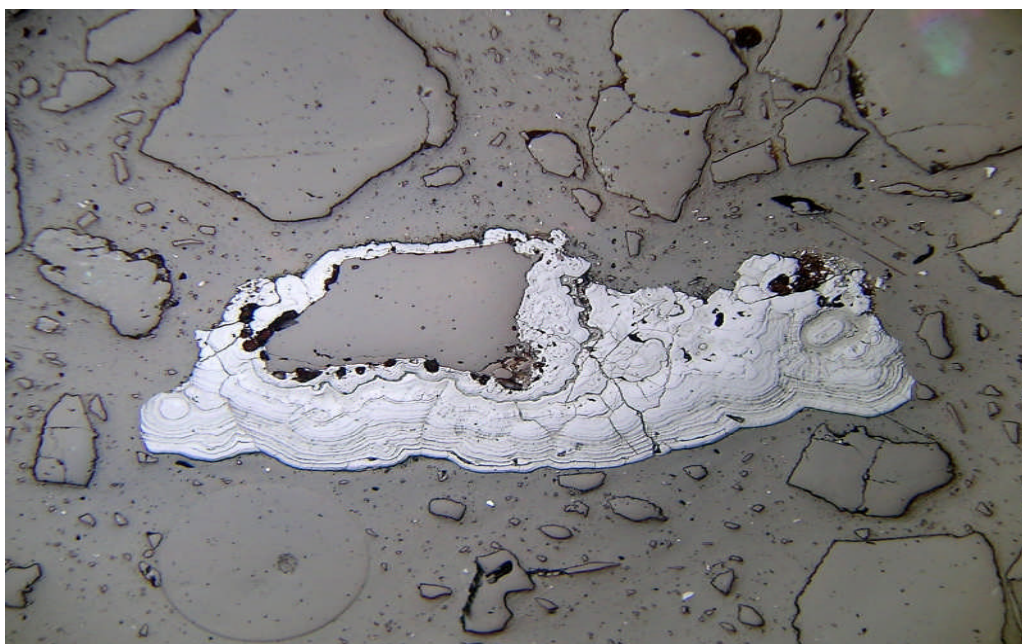


Fig. VI. 24. Limonita de aspecto coloforme rodeando fragmento de ganga (10X).

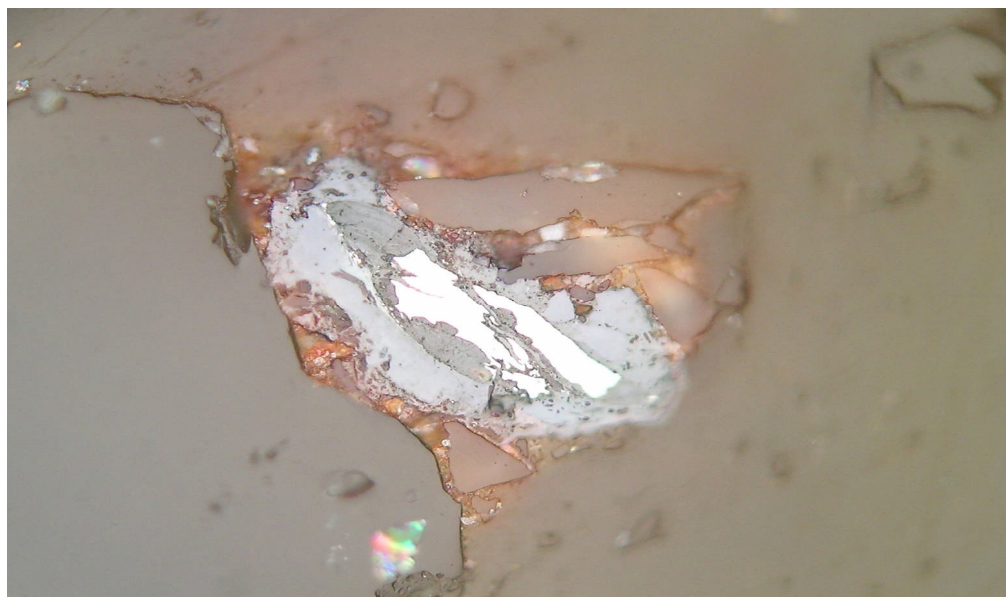


Fig. VI. 25. Grano de pirita parcialmente alterada pasando a limonitas (20X).

6.1.3 Caracterización mineralógica por DRX de arcillas en estudio.

Para este análisis la muestra es irradiada por rayos X monocromáticos provenientes de un anticátodo de Cu con filtro de Níquel, obteniéndose un difractograma de rayos X del cual se establece la composición mineralógica.

A continuación se indica la composición mineralógica de cuatro muestras de Arcillas que se utilizaron en las pruebas de adsorción de Au determinados por difracción de rayos X, complementada por observaciones microscópicas y análisis espectral y cuyo análisis difractométrico se dan en los difractogramas que están en los anexos y cuya composición mineralógica se da en el Cuadro N° VI.2.

Cuadro N° VI.2

Composición Mineralógica de las Muestras de Arcilla en Estudio de Pruebas de Adsorción

Mineral	Composición	Mineral (%)			
		75%	45%	42%	72%
Cuarzo	SiO ₂	75%	45%	42%	72%
Goethita	FeO(OH)	6%	---	---	7%
Montmorillonita-15A	Ca _{0.2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7%	5%	10%	5%
Montmorillonita-18A	Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·6H ₂ O	8%	16%	14%	7%
Montmorillonita-21A	Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·8H ₂ O	---	7%	6%	---
Nontronita-15A	Na _{0.3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	3%	8%	5%	4%
Moscovita-2M1	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	---	9%	6%	---
Pirofilita-1A	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	---	7%	12%	4%
Rutilo	TiO ₂	---	2%	4%	---

6.1.4 Cabeza ensayada de muestras en estudio.

Las muestras en estudio se prepararon a 10m y se enviaron a los ensayos químicos de oro y cuyos resultados se dan en el Cuadro N° VI.3:

Cuadro N° VI.3

Cabezas Ensayadas de Muestras

Muestra N°	Leyes Au (ppm)		Soluble
	Total	Soluble	Au (%)
1	0,162	0,129	79,63
2	0,366	0,193	52,73
3	0,320	0,268	83,75
4	0,243	0,225	92,59

6.1.5 Preparación de solución sintética.

Se hizo uso del Dicyanoaurato de potasio para uso de laboratorio de 98 % de pureza cuyo peso molecular es de 288.1 de Aldrich Chem. Co., Con esta se preparó la solución sintética a 12.36 ppm de Au, que sirvió para realizar las pruebas de Adsorción con las arcillas que se caracterizaron.

6.2 PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO.

Se realizó cuatro pruebas con las diferentes muestras de arcillas que se caracterizó, las condiciones se dan con amplitud en los cuadros N° VI.4; VI.5; VI.6, VI.7; VI.8 y un resumen a continuación:

Peso Muestra Material	
Arcilloso(g)	1000
Dilución (L/S)	2
PH	10 a 10.5
Au Solución Entrante (ppm)	12,36
Fuerza de Cianuro (%)	0.02 (200 ppm)
Tiempo (horas)	144

Los parámetros que se determinaron y calcularon son los siguientes:

- Controles de las soluciones a las 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 120 y 144 horas; como mediciones de pH, de cianuro libre y determinaciones de Au y Ag.
- Calculo de la distribución de Au y Ag a las 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72, 96, 120 y 144 horas.
- Calculo de los consumos de cianuro y cal.
- Cada residuo después de un lavado se envió a los análisis de oro y plata respectivamente.

6.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ADSORCIÓN

Los resultados pueden verse en los cuadros elaborados como N° VI.4, VI.5, VI, 6 y VI, 7 y reflejadas en la graficas de la parte inferior respectivamente.

Se observan intervalos de tiempo, donde existen subidas y caídas en los porcentajes de adsorción del oro especialmente.

El porcentaje de extracción del oro y plata indica la cantidad de oro disuelto en la solución cianurada.

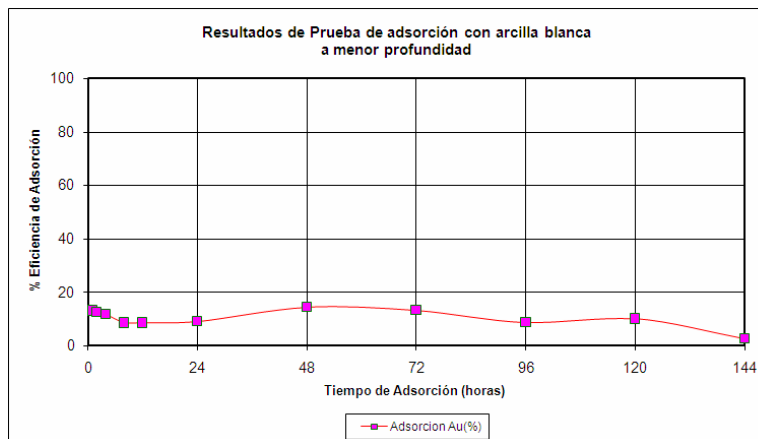
Al realizarse dichas pruebas en botella del mineral arcilloso (Cuadro N° 6.7), se logró un porcentaje máximo de extracción del 59,7% del oro disuelto en la solución.

Entre 8 a 12 horas existe una pérdida del 11,33% del oro en la solución.

Al realizar el cuadro y gráfica de comparación del porcentaje de eficiencia de adsorción en función al tiempo de lixiviación en horas, se nota claramente que cada mineral arcilloso tiene diferente capacidad de adsorción.

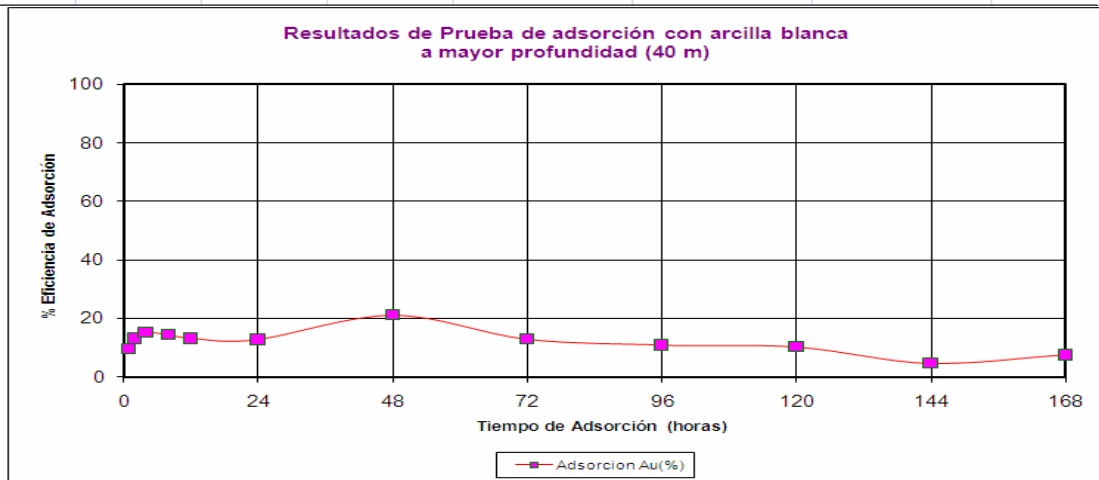
PRUEBA EN BOTELLA DE ADSORCION CON ARCILLA BLANCA A MENOR PROFUNDIDAD									
Observaciones				CONDICIONES					
Ninguna				Cianuración					
				Peso Muestra (g) 1000					
				Dilución (L/S) 2					
				pH 10 a 10.5					
				Au Solución Entrante (g) 12.36					
				Fuerza de Cianuro (%) 0.02 (200 ppm)					
				Tiempo (horas) 144					
				Cal (Kg/MT) 1.20					
				NaCN (Kg/TM) 0.309					
RESULTADOS									
PRODUCTOS	PESO (g)	Tiempo (Horas)	pH	CN ppm	Consumo de Reactivos Kg/TM		Ley (ppm)		Eficiencia de Adsorción Au
					NaCN	Cal	Au Analizado	Au Reajustado	
Sol. Rica 1 (*)	2000.00	1.00	10.58	156	0.089	1.120	11.298	11.298	13.14
Sol. Rica 2 (*)	2000.00	2.00	10.50	170	0.157	1.120	11.100	11.382	12.49
Sol. Rica 3 (*)	2000.00	4.00	10.40	181	0.194	1.120	10.916	11.476	11.77
Sol. Rica 4 (*)	2000.00	8.00	10.59	199	0.195	1.120	11.055	11.888	8.61
Sol. Rica 5 (*)	2000.00	12.00	10.52	186	0.209	1.120	10.778	11.887	8.61
Sol. Rica 6 (*)	2000.00	24.00	10.51	188	0.217	1.120	10.445	11.824	9.10
Sol. Rica 7 (*)	2000.00	48.00	10.46	193	0.197	1.120	9.483	11.123	14.49
Sol. Rica 8 (*)	2000.00	72.00	10.48	173	0.237	1.120	9.414	11.291	13.2
Sol. Rica 9 (*)	2000.00	96.00	10.30	193	0.258	1.120	9.765	11.877	8.69
Sol. Rica 10 (*)	2000.00	120.00	10.31	196	0.262	1.120	9.347	11.703	10.03
Sol. Rica 11 (*)	2000.00	144.00	10.35	168	0.309	1.120	10.056	12.648	2.78
Residuo	1000.00						0.723	0.723	97.22
Au y Ag entrante	1000.00							26.015	
Cabeza Ensayada								0.162	
Solubilidad en Cianuro								0.129	79.63

(*) Volumen en cc.

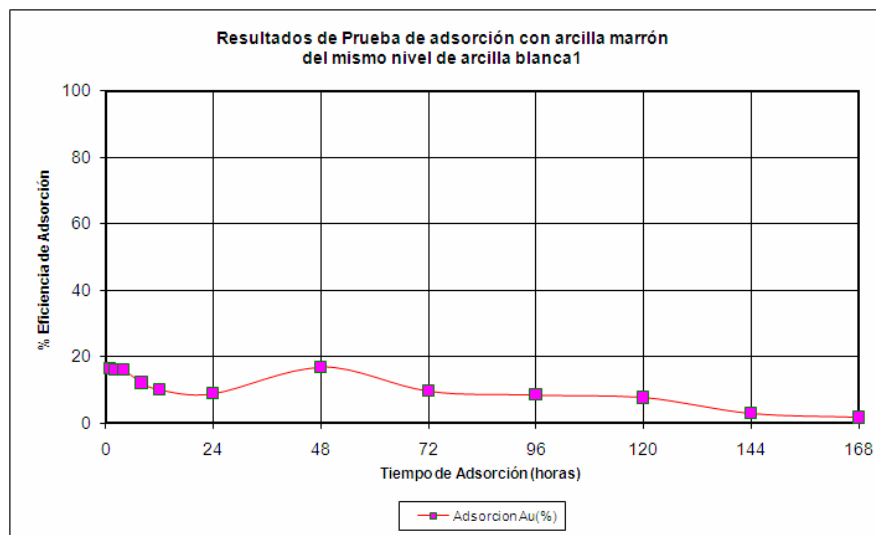


CuadrVI 4

PRUEBA EN BOTELLA DE ADSORCION CON ARCILLA BLANCA A MAYOR PROFUNDIDAD (40 m)									
Observaciones Ninguna				CONDICIONES					
				Cianuración					
				Peso Muestra (g) 1000					
				Dilución (L/S) 2					
				pH 10 a 10.5					
				Au Solución Entrante 12.36					
				Fuerza de Cianuro (0.02 (200 ppm)					
				Tiempo (horas) 168					
				Cal (Kg/MT) 1.6					
				NaCN (Kg/TM) 0.541					
RESULTADOS									
PRODUCTOS	PESO (g)	Tiempo (Horas)	pH	CN ppm	Consumo de Reactivos Kg/TM		Ley (ppm)		ciencia de Adsorción Au
					NaCN	Cal	Au Analizado	Au Reajustado	
Sol. Rica 1 (*)	2000.00	1.00	10.44	132	0.137	1.400	10.720	10.720	9.54
Sol. Rica 2 (*)	2000.00	2.00	10.35	168	0.218	1.400	10.021	10.289	13.18
Sol. Rica 3 (*)	2000.00	4.00	10.30	171	0.273	1.400	9.537	10.056	15.15
Sol. Rica 4 (*)	2000.00	8.00	10.42	197	0.281	1.400	9.377	10.134	14.49
Sol. Rica 5 (*)	2000.00	12.00	10.23	174	0.317	1.400	9.300	10.291	13.16
Sol. Rica 6 (*)	2000.00	24.00	10.12	173	0.373	1.400	9.111	10.335	12.79
Sol. Rica 7 (*)	2000.00	48.00	10.24	196	0.320	1.400	7.882	9.334	21.24
Sol. Rica 8 (*)	2000.00	72.00	10.05	176	0.365	1.400	8.670	10.319	12.93
Sol. Rica 9 (*)	2000.00	96.00	9.92	171	0.421	1.600	8.695	10.560	10.89
Sol. Rica 10 (*)	2000.00	120.00	10.19	199	0.420	1.600	8.544	10.627	10.33
Sol. Rica 11 (*)	2000.00	144.00	10.18	134	0.539	1.600	9.000	11.296	4.68
Sol. Rica 12 (*)	200.00	168.00	10.18	130	0.541	1.600	8.444	10.965	7.47
Residuo	1000.00						1.770		92.53
Au y Ag entrante	1000.00							23.701	
Cabeza Ensayada								0.366	
Solubilidad en Cianuro								0.193	52.73

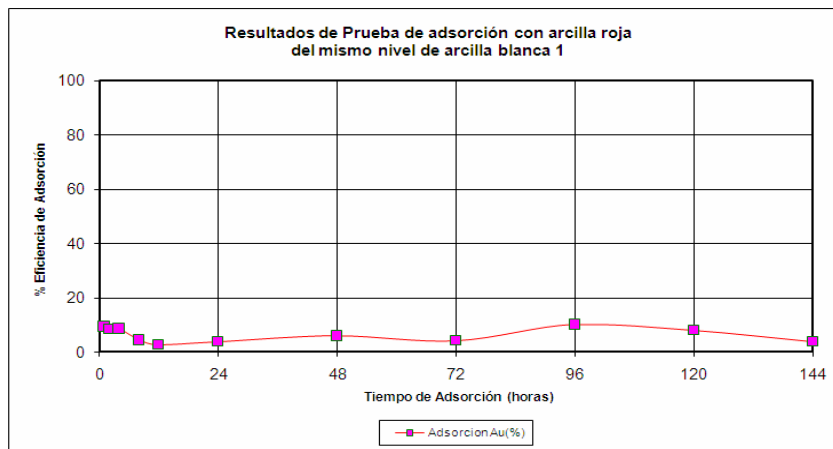


PRUEBA EN BOTELLA DE ADSORCION CON ARCILLA MARRON DEL MISMO NIVEL DE ARCILLA BLANCA 1														
Observaciones Ninguna					CONDICIONES									
					Cianuración									
					Peso Muestra (g)					1000				
					Dilución (L/S)					2				
					pH					10 a 10.5				
					Au Solución Entrante					12.36				
					Fuerza de Cianuro (0.02 (200 ppm)				
					Tiempo (horas)					168				
					Cal (Kg/MT)					1.200				
					NaCN (Kg/TM)					0.456				
RESULTADOS														
PRODUCTOS	PESO (g)	Tiempo (Horas)	pH	CN ppm	Consumo de Reactivos Kg/TM		Ley (ppm)		Eficiencia de Adsorción Au					
					NaCN	Cal	Au Analizado	Au Reajustado						
Sol. Rica 1 (*)	2000.00	1.00	10.35	122	0.149	1.200	10.656	10.656	16.59					
Sol. Rica 2 (*)	2000.00	2.00	10.28	152	0.189	1.200	10.441	10.707	16.19					
Sol. Rica 3 (*)	2000.00	4.00	10.26	200	0.180	1.200	10.194	10.721	16.08					
Sol. Rica 4 (*)	2000.00	8.00	10.27	199	0.172	1.200	10.444	11.226	12.13					
Sol. Rica 5 (*)	2000.00	12.00	10.24	167	0.227	1.200	10.441	11.484	10.11					
Sol. Rica 6 (*)	2000.00	24.00	10.14	162	0.301	1.200	10.333	11.637	8.91					
Sol. Rica 7 (*)	2000.00	48.00	10.22	185	0.287	1.200	9.059	10.622	16.86					
Sol. Rica 8 (*)	2000.00	72.00	10.18	180	0.303	1.200	9.753	11.542	9.65					
Sol. Rica 9 (*)	2000.00	96.00	10.00	163	0.378	1.200	9.642	11.675	8.61					
Sol. Rica 10 (*)	2000.00	120.00	10.30	199	0.376	1.200	9.511	11.785	7.75					
Sol. Rica 11 (*)	2000.00	144.00	10.24	172	0.420	1.200	9.889	12.401	2.93					
Sol. Rica 12 (*)	2000.00	168.00	10.27	149	0.456	1.200	9.777	12.536	1.67					
Residuo	1000.00						0.479	0.479	98.13					
Au y Ag entrante	1000.00							25.551						
Cabeza Ensayada								0.320						
Solubilidad en Cianuro								0.268	83.76					
(*) Volumen en cc.														



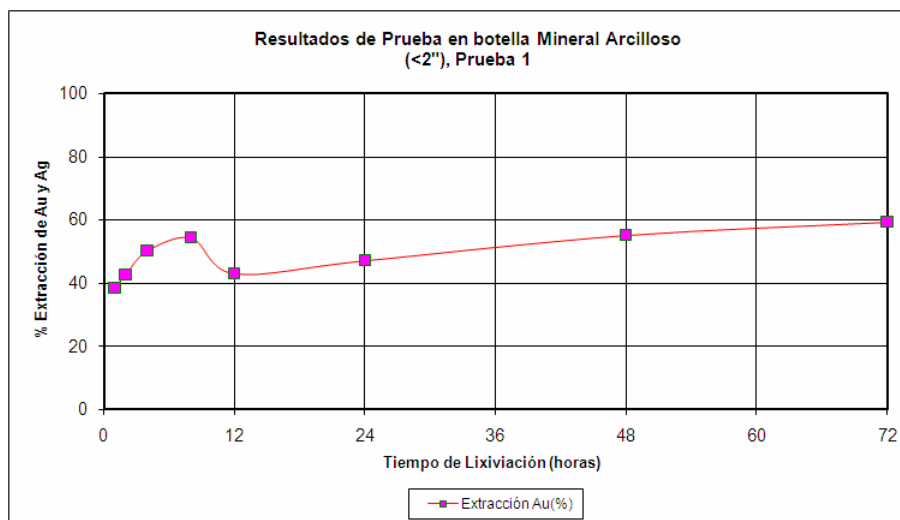
PRUEBA EN BOTELLA DE ADSORCION CON ARCILLA ROJA DEL MISMO NIVEL DE ARCILLA BLANCA 1									
Observaciones Ninguna				CONDICIONES					
				Cianuración					
				Peso Muestra (g) 1000					
				Dilución (L/S) 2					
				pH 10 a 10.5					
				Au Solución Entrante 12.36					
				Fuerza de Cianuro (0.02 (200 ppm)					
				Tiempo (horas) 144					
				Cal (Kg/MT) 4.100					
				NaCN (Kg/TM) 0.406					
RESULTADOS									
PRODUCTOS	PESO (g)	Tiempo (Horas)	pH	CN ppm	Consumo de Reactivos Kg/TM		Ley (ppm)		Eficiencia de Adsorción Au
					NaCN	Cal	Au Analizado	Au Reajustado	
Sol. Rica 1 (*)	2000.00	1.00	10.29	151	0.098	3.600	11.500	11.500	9.33
Sol. Rica 2 (*)	2000.00	2.00	10.18	183	0.131	3.600	11.322	11.610	8.47
Sol. Rica 3 (*)	2000.00	4.00	10.08	155	0.177	3.600	11.017	11.588	8.64
Sol. Rica 4 (*)	2000.00	8.00	10.21	184	0.214	3.600	11.278	12.124	4.42
Sol. Rica 5 (*)	2000.00	12.00	10.29	180	0.248	3.600	11.222	12.353	2.63
Sol. Rica 6 (*)	2000.00	24.00	10.21	190	0.259	3.600	10.789	12.197	3.84
Sol. Rica 7 (*)	2000.00	48.00	10.10	157	0.349	3.600	10.255	11.933	5.92
Sol. Rica 8 (*)	2000.00	72.00	10.07	181	0.383	3.600	10.212	12.147	4.24
Sol. Rica 9 (*)	2000.00	96.00	9.85	199	0.368	3.600	9.215	11.405	10.08
Sol. Rica 10 (*)	2000.00	120.00	9.82	189	0.378	4.100	9.261	11.681	7.91
Sol. Rica 11 (*)	2000.00	144.00	9.76	170	0.406	4.100	9.555	12.207	3.76
Residuo	1000.00						0.668	0.668	97.37
Au y Ag entrante	1000.00							25.368	
Cabeza Ensayada								0.243	
Solubilidad en Cianuro								0.225	92.59

(*) Volumen en cc.



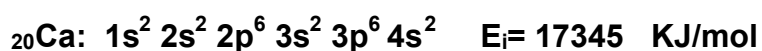
PRUEBA EN BOTELLA MINERAL ARCILLOSO (100% <2")									
Prueba 1									
Observaciones					CONDICIONES				
Ninguna					Cianuración				
					Peso Muestra (g) 10000				
					Dilución (L/S) 1				
					pH 9,8 a 11.4				
					Fuerza de Cianuro (%) 0.02 (200 ppm)				
					Tiempo (horas) 72				
					Cal (Kg/MT) 1.000				
					NaCN (Kg/TM) 0.076				
RESULTADOS									
PRODUCTOS	PESO (g)	Tiempo (Horas)	pH	CN ppm	Consumo de Reactivos Kg/TM		Ley (ppm)		Extracción(%) Au
					NaCN	Cal	Au Analizado	Au Reajustado	
Sol. Rica 1 (*)	10000.00	1.00	11.44	210	0.002	0.700	0.159	0.159	38.43
Sol. Rica 2 (*)	10000.00	2.00	11.18	208	0.005	0.700	0.175	0.176	42.49
Sol. Rica 3 (*)	10000.00	4.00	10.46	194	0.016	0.700	0.206	0.208	50.19
Sol. Rica 4 (*)	10000.00	8.00	10.23	180	0.030	0.700	0.222	0.225	54.31
Sol. Rica 5 (*)	10000.00	12.00	10.11	170	0.040	0.700	0.174	0.178	42.98
Sol. Rica 6 (*)	10000.00	24.00	9.80	157	0.053	0.800	0.190	0.195	47.05
Sol. Rica 7 (*)	10000.00	48.00	9.64	141	0.069	1.000	0.222	0.226	55.02
Sol. Rica 8 (*)	10000.00	72.00	9.81	134	0.076	1.000	0.238	0.245	59.15
Residuo	10000.00						0.169	0.169	40.85
Au y Ag entrante	10000.00							0.414	100.00
Cabeza Ensayada								0.426	

(*) Volumen en cc.



6.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con el análisis por Difracción de rayos X, podemos observar que la montmorillonita se encuentra en mayor proporción. Pero, hay dos posibilidades: la montmorillonita sódica o la montmorillonita cálcica, porque ambos tienen alta superficie específica, luego, ¿cuál de los tipos de Montmorillonita es la que produce el efecto preg-robbing? Podemos deducir que la respuesta está el catión Na y Ca, analizando su configuración electrónica y relacionando con su potencial de ionización tenemos:



Se observa que el sodio para ionizarse necesita perder un electrón para tener 8 electrones en su nivel de valencia, mientras que el calcio necesita perder dos electrones, pero su energía de ionización es mucho mayor y esta cualidad lo hace menos reactivo que el sodio. Luego la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la *montmorillonita sódica*.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas en botellas para determinar el porcentaje de adsorción y porcentaje de extracción del oro, se pueden identificar, dos tipos básicos de adsorción: la adsorción física, o *fisiadsorción* y la adsorción química, o *quimiadsorción*. La diferencia entre ellas radica en el tipo de interacciones entre el adsorbente y el adsorbato. En la adsorción física las interacciones predominantes son de tipo van der Waals, mientras que en la adsorción química las interacciones se asemejan a los enlaces químicos. Esto da lugar a entalpías de adsorción muy diferentes: alrededor de -20 kJ/mol para la fisiadsorción y cerca de -200 kJ/mol para la quimiadsorción (Atkins, 1991).

La formación de enlaces durante la adsorción química hace que el proceso sea más selectivo, es decir, que dependa marcadamente de la naturaleza de las sustancias involucradas. El helio, por ejemplo, no se adsorbe químicamente sobre una superficie ya que no forma enlaces ni compuestos. Es común que la interacción química entre el adsorbente y el adsorbato produzca cambios en la estructura de los compuestos involucrados. Esto puede modificar su reactividad y de ello depende la capacidad catalítica del adsorbente.

La cantidad de material adsorbido en un sistema depende de la temperatura y la presión o la concentración del adsorbato. Si la temperatura se mantiene constante durante el experimento, el grado de adsorción puede estudiarse como función de la presión o la concentración y generar así lo que se conoce como la isoterma de adsorción.

Cuando el proceso dominante es la fisiadsorción, las características cualitativas de las isotermas de adsorción de diversos materiales son muy similares. De hecho, los resultados de la adsorción de solutos diversos se ajustan bastante bien, en un intervalo restringido de concentraciones (m), a los que predice la siguiente ecuación empírica, propuesta en 1909 por Freundlich:

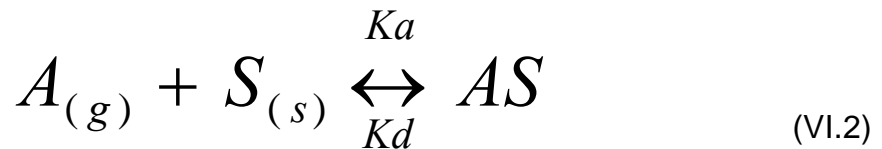
$$N = C_1 m^{\frac{1}{C_2}} \quad (\text{VI.1})$$

Donde N es la cantidad de sustancia adsorbida por gramo de adsorbente y C_1 y C_2 son constantes experimentales sin ningún significado físico (C_2 es siempre mayor que 1, y usualmente se encuentra entre 2 y 4) (Glasstone, 1968).

En 1916, Langmuir desarrolló un modelo simple para tratar de predecir el grado de adsorción de un gas sobre una superficie como función de la presión del fluido. En este modelo se supone que:

- 1) El adsorbato forma una capa monomolecular sobre la superficie;
- 2) Todos los sitios de la superficie son equivalentes;
- 3) No hay interacción entre las partículas adsorbidas y
- 4) Las moléculas adsorbidas no tienen movimiento sobre la superficie (Daniels, 1984).

En el modelo de Langmuir se propone el siguiente esquema dinámico para representar la adsorción:



Donde A simboliza al adsorbato gaseoso, S al adsorbente sólido, y AS al complejo adsorbente-adsorbato. Los procesos de adsorción y desorción están caracterizados por el valor de las constantes de velocidad K_a y K_d respectivamente. Si se define la variable θ como la fracción de la superficie cubierta, o grado de recubrimiento (θ siempre está entre 0 y 1), y se asume que la rapidez de adsorción $(d\theta/dt)_a$ es proporcional a la presión del gas y a la fracción descubierta de la superficie, se tiene:

$$(d\theta/dt)_a = K_a p (1 - \theta) \quad (\text{VI.3})$$

Durante la desorción, la rapidez del proceso $(d\theta/dt)_d$ debe ser entonces proporcional al grado de recubrimiento de la superficie:

$$(d\theta/dt)_d = K_d \theta \quad (\text{VI.4})$$

En el equilibrio dinámico la rapidez de ambos procesos son iguales a:

$$(d\theta/dt)_a = (d\theta/dt)_d,$$

Luego, resulta:

$$\theta = \frac{K_p}{1 + K_p} \quad (\text{VI.5})$$

Y la constante $K_p = K_a / K_d$ determina el estado de equilibrio a una presión dada. Esta relación da lugar a la conocida isoterma de Langmuir, que tiende a ajustarse a los datos experimentales mejor que la isoterma de Freundlich.

Como la adsorción es un proceso exotérmico, el incremento de temperatura favorece la desorción del adsorbato y θ disminuye si se mantiene la presión constante. En algunos sistemas la fisisorción es el proceso dominante a bajas temperaturas, mientras la adsorción química se manifiesta a altas temperaturas.

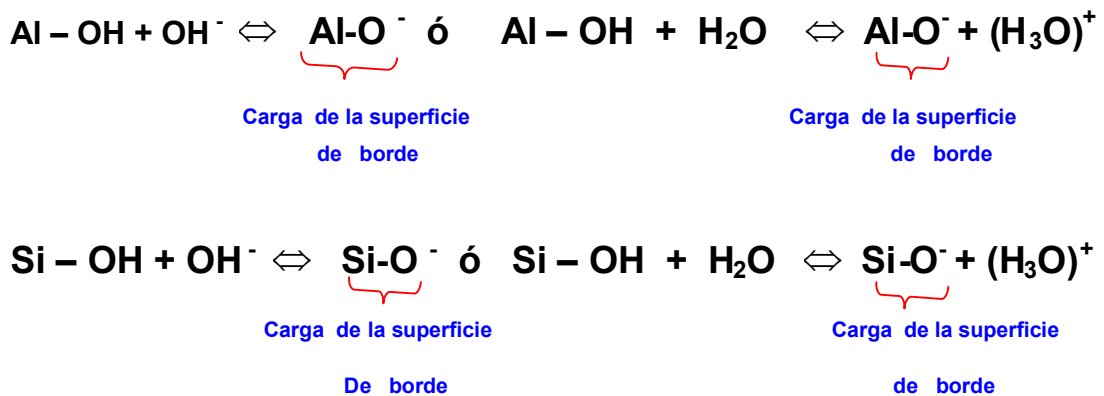
En los minerales silicatados tales como las arcillas y las micas, la sustitución de Al^{+3} por Si^{+4} en la sílice tetraédrica y de Mg^{+2} por Al^{+3} en la capa octaédrica, resulta con carga negativa la superficie del cristal, situadas entre las hojas de la estructura de las arcillas, que es *independiente de las condiciones de la solución* (Ver Fig. II.6).

Los cambios de pendiente en las curvas del porcentaje de Adsorción, indican que las arcillas ensayadas realizan procesos de adsorción y desorción en determinados periodos de tiempo.

En la gráfica correspondiente al porcentaje de extracción del oro, también hay aumento y disminución en la pendiente de la curva para determinados intervalos de tiempo, luego podemos decir:

Cuando *aumenta el porcentaje de adsorción*, el oro se adsorbe como complejo aurocianuro-dipolo de agua entre las hojas o entre caras de la arcilla (ver Fig. VI.26), debido a la presencia de iones sodio o calcio presentes entre ellas a lo largo del plano **b-c** (ver Fig. IV 9) y también

sobre los bordes de las hojas (dirección **a Sen β**). El oro entre las hojas o entre caras, será muy difícil recuperar y se ubicará tal como indica la Fig.VI. 27, mientras que la otra parte que está adsorbido sobre los bordes; ésta se podrá recuperar, si se mantiene un buen control del proceso en donde el pH juega un rol importante. Luego, continúa la *disminución en el porcentaje de adsorción* (aumento en el porcentaje de extracción del oro) debido a reacciones exotérmicas en los bordes de las hojas (cambio en la energía libre ΔG del condensador molecular de la doble capa eléctrica). Como el pH del medio está entre 10 a 10,5; además según estudios hechos anteriormente, el $\text{pH}_{\text{pzc, borde}}$ es aproximadamente 6,5 ($\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc, borde}}$); entonces la superficie del borde se carga negativamente (ver Fig. II. 7), posteriormente dicha superficie se carga positivamente produciendo una especie de sobretensión en el condensador molecular, en consecuencia se produce las siguientes reacciones reversibles:



Se observa que los protones H^+ procedentes de los OH^- de los bordes se combinan con los **dipolos de H_2O** transformándose en iones $(\text{H}_3\text{O})^+$ dejando libre al ión aurocianuro $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$. A partir de este momento comienza a aumentar el porcentaje de extracción del oro y plata, pero no en su totalidad, debido a que el otro grupo quedó atrapado entre las hojas.

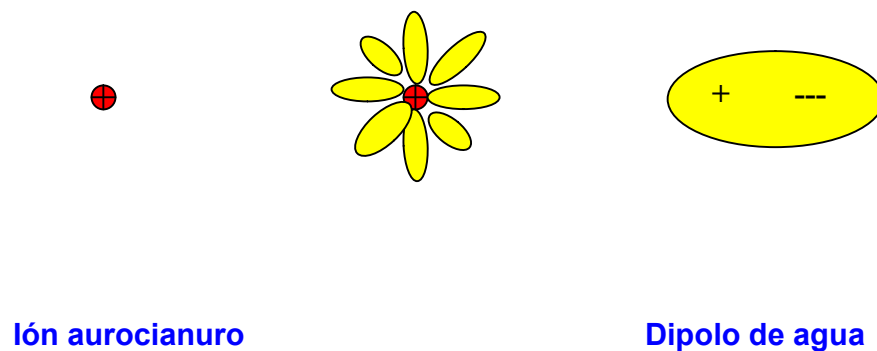


Fig. VI. 26. Moléculas de agua ligadas al ión aurocianuro (color rojo) que ingresan entre las hojas o entre placas de la estructura de la arcilla, que van a ser atraídos por los iones sodio o de calcio que están entre dichas láminas y por los iones OH^- situados en los bordes.

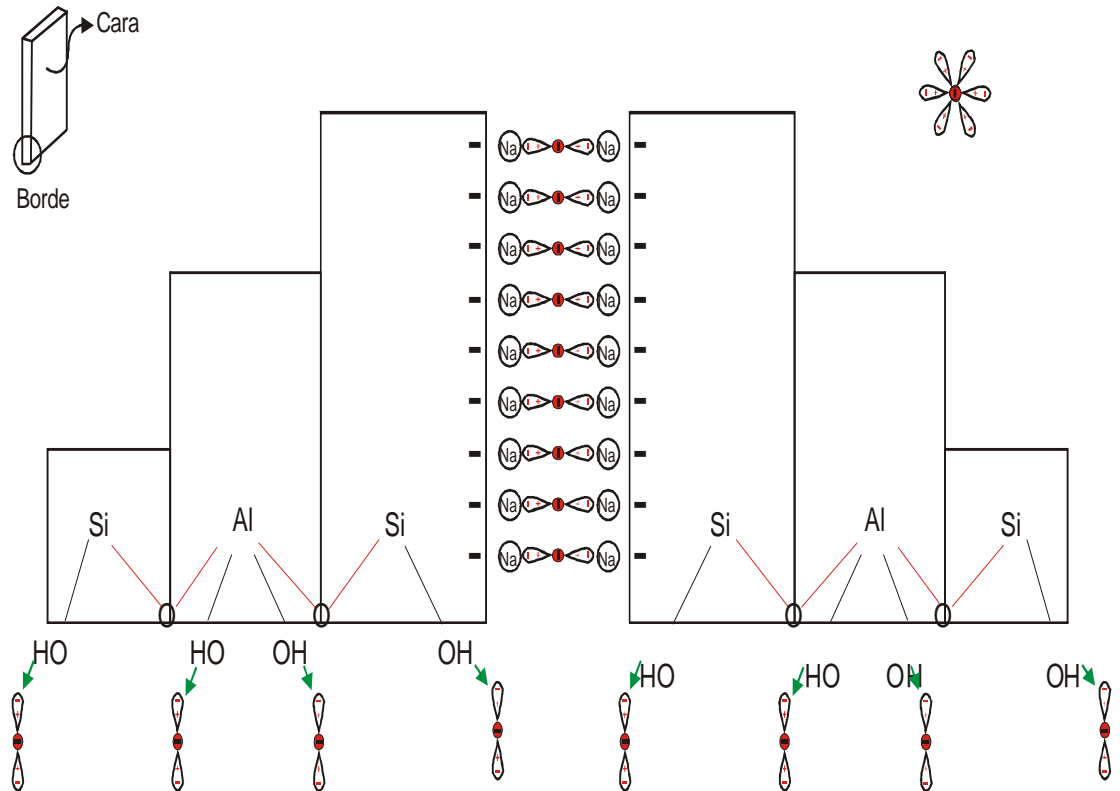
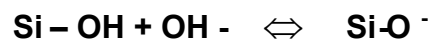
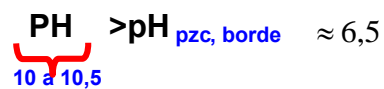


Fig.VI. 27. Las reacciones mostradas, ocurren debido a:



Se observa en el esquema, que los protones H^+ , se combinan con los dipolos de agua transformándose en $(\text{H}_3\text{O})^+$, dejando libre a los iones aurocianos, comenzando el aumento en el % Extracción, pero no en forma total, porque hay una fracción de oro secuestrada entre las hojas que son muy difíciles de recuperar.

CAPITULO VII.

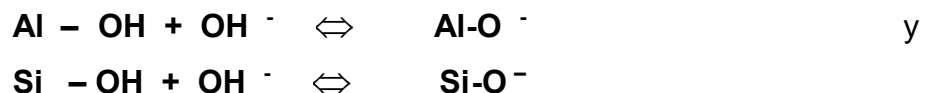
CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

De acuerdo a la caracterización mineralógica por Difracción de rayos X de las muestras obtenidas, para analizar la arcilla que produce el efecto preg-robbing; los resultados cuantitativos nos indican que la arcilla que está en mayor cantidad es la **montmorillonita**.

Según las características fisicoquímicas de superficie (altos valores en su superficie específica e intercambio iónico) hay dos posibilidades: montmorillonita sódica o montmorillonita cálcica.

Analizando la propiedad de intercambio catiónico, la configuración electrónica, el potencial de ionización del sodio y del calcio, el ión más reactivo resulta ser el sodio, entonces la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la **montmorillonita sódica**.

Al realizar las pruebas de adsorción y extracción del oro de las muestras se observa que hay intervalos de tiempo donde existen fluctuaciones en los respectivos porcentajes de adsorción y extracción del oro, esto es debido a la acción de los protones H^+ procedentes de los iones OH^- ubicados en la **superficie de los bordes** cuyas reacciones son:



Estas reacciones ocurren porque: $pH_{medio} > pH_{pzc, borde} \approx 6,5$.

Las reacciones en la superficie de los bordes son reversibles, entonces habrá procesos de adsorción y posteriormente desorción en los intervalos de tiempo que indican las curvas de porcentaje de adsorción y extracción en función al tiempo de lixiviación.

El descenso en el porcentaje de extracción del oro, se deben también a la adsorción de los iones aurocianuro entre las hojas tipo T-O-T de la montmorillonita sódica pero este fenómeno no es reversible.

El ión Aurocianuro que se encuentra entre las caras de las hojas, será muy difícil recuperar, porque el contacto con la solución cianurada es prácticamente nulo.

Es probable que el oro que está ubicado entre las caras, cerca a los bordes de las hojas, se pueda recuperar, puesto que en esta posición logra un ligero contacto con la solución cianurada.

Las muestras en estudio se prepararon a 10m y se enviaron a los ensayos químicos de oro y cuyos resultados dieron un promedio ponderado de 74,70 % que es lo que debería recuperarse. En la prueba metalúrgica del porcentaje de extracción del oro en función al tiempo de lixiviación, la máxima recuperación es de aproximadamente 60%, obteniéndose una pérdida del 14,70 %, luego podemos decir que existe un perjuicio económico para el inversionista.

En función a lo expuesto, se debe realizar un buen control del mineral para evitar o minimizar la presencia de arcillas tipo Montmorillonita sódica, para no tener los problemas de recuperación de oro.

Se debe realizar estudios metalúrgicos en otras zonas de la región para determinar otras arcillas que produzcan el efecto pret-robbing.

También se analizó el efecto preg-robbing en otras zonas geológicas relativamente cercanas a las coordenadas geográficas dadas (ver anexos), llamadas: Alto Chira, Aluvial, Capilla y Patival. Luego, realizando la caracterización correspondiente de cada muestra obtenida, se concluye que en este caso la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la **illita**. Después realizando las pruebas metalúrgicas en botellas para analizar el porcentaje de extracción de oro en función al tiempo de lixiviación, se observa que a mayor porcentaje de illita, será menor el porcentaje de extracción del oro.

Para poder optimizar la recuperación del oro, el profesional en Geología debe hacer estudios específicos de zonas geológicas arcillosas para identificar las arcillas que perjudican la producción de este metal precioso.

El profesional en Geología debe coordinar con el Metalurgista para que realice pruebas y así determine, cual es la arcilla que más perjuicio produce en la lixiviación del oro en pilas.

Una vez determinada la zona geológica y la arcilla que produce el efecto preg-robbing, se recomienda evitar en lo posible estos minerales arcillosos para que el proceso de lixiviación en pilas no se perjudique.

Según experiencias a nivel de laboratorio, el porcentaje de extracción del oro sin arcillas es aproximadamente 80 % y en las pruebas metalúrgicas realizadas resultó aproximadamente 60 % a 70% de extracción del metal valioso, obteniéndose una pérdida económica considerable para el inversionista.

BIBLIOGRAFIA

MARSDEN J. *The chemistry of gold extraction*.

USA, Arizona, Phelps Dodge Corporation. 1993

VARGAS GALLARDO J. *Metalurgia del Oro y la Plata*.

Bolivia, Oruro, Universidad de "San Andrés" de la Paz. 1984.

KUDRYK, D.A. CORRIGAN, W.W. LIANG. *Mining, extraction, and Processing. A publication of the Metallurgical Society of AIME*.

USA. New York, 1984.

D. W. FUERSTENAU AND RAGHAVAN. *Some aspects of thermodynamics of flotation. Department of Materials Science and Engineering*.

USA. University of California. 1976.

PIERRE BLAZY. *Beneficio de Minerales*.

Francia. Paris ,1971.

C.S.HURLBUT. *Manual de Mineralogía*.

USA. New York. 1982

C. DIAZ MAURIÑO. *Iniciación práctica a la mineralogía*.

España. Madrid. 1976

E. TOMBÁCZ, M. SZEKERES. *Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. Applied clay science*.

Hungary. Szered. University of Szeged. 2004. www.elsevier.com/locate/clay

MIRIA BASHINI. *Minerales arcillosos: Un enfoque químico*

Argentina. Mina@uncoma.edu.ar

ANEXOS

A.1. ANALISIS POR DIFRACTOMETRIA DE RAYOS X.

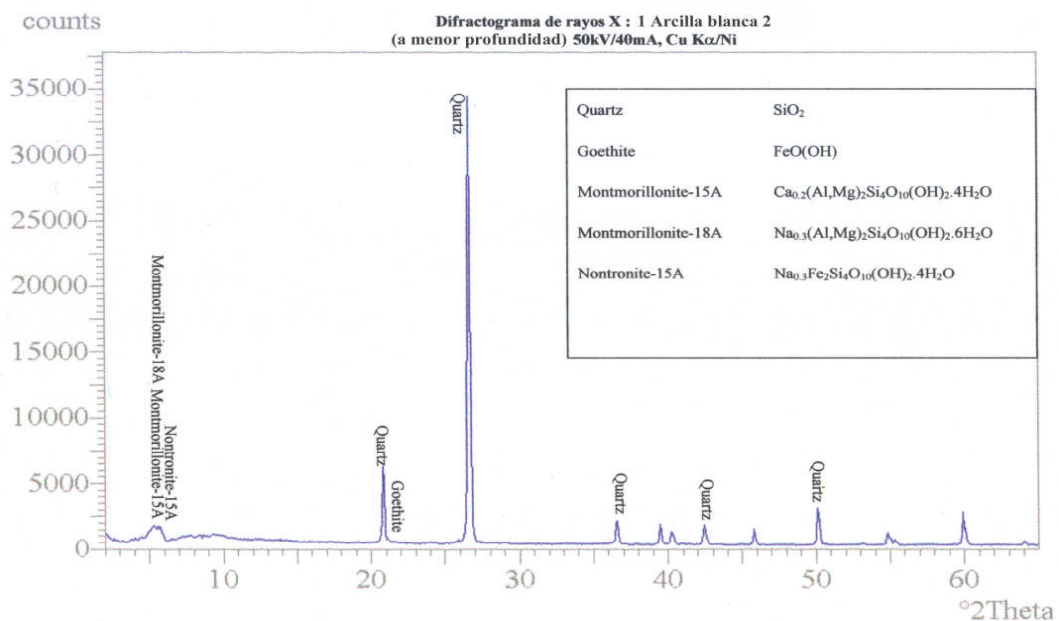
1.1 METODOLOGIA DE TRABAJO.

Para este análisis la muestra es irradiada por rayos X monocromáticos provenientes de un anticátodo de Cu con filtro de Níquel, obteniéndose un difractograma de rayos X del cual se establece la composición mineralógica.

A continuación se indica la composición mineralógica de cuatro muestras determinadas por difracción de rayos X, complementado por observaciones microscópicas y análisis espectral.

1.1.1. Muestra arcilla blanca (a menor profundidad).

Constituido por partículas menores a 5mm. De color blanco arenoso algo amarillento, cuyo análisis difractométrico se da en el difractograma N°A.1 y cuya composición mineralógica es la siguiente:

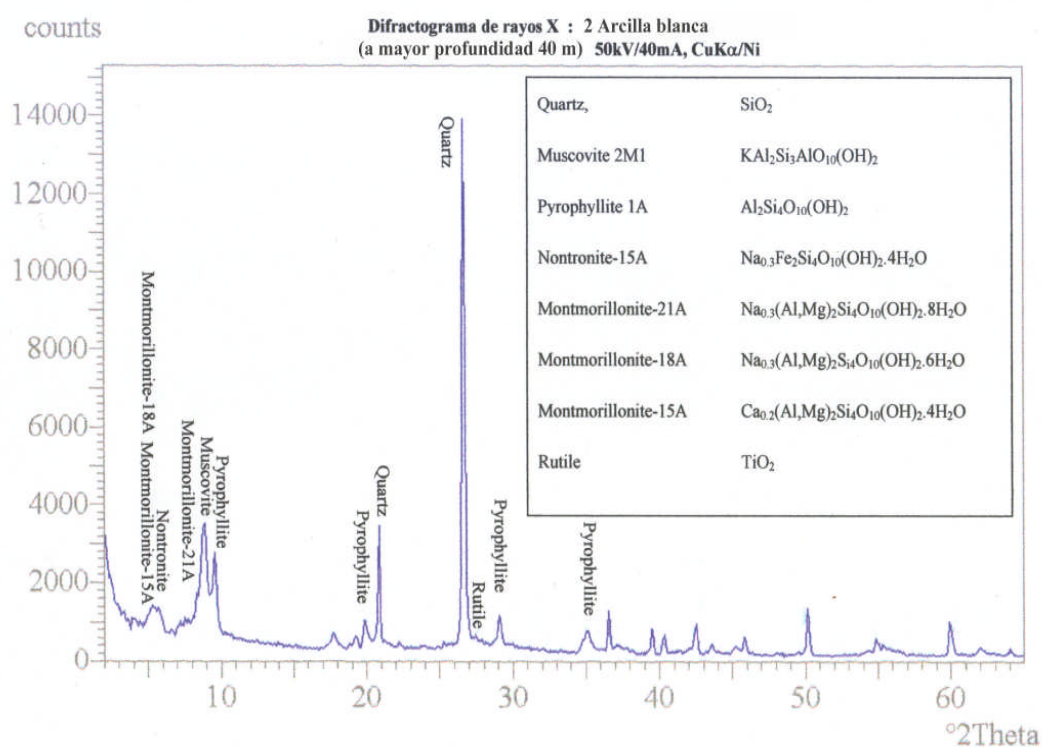


Difractograma A.1

Cuarzo	SiO ₂	75%
Goethita	FeO (OH)	6%
Montmorillonita-15A	Ca _{0.2} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	7%
Montmorillonita-18A	Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .6H ₂ O	8%
Nontronita-15A	Na _{0.3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	3%

1.1.2. Muestra de arcilla blanca (a mayor profundidad, 40 m.)

Constituida por partículas menores a 2mm. Y de color blanquecino, cuyo análisis difractométrico se da en el difractograma N° A.2 y cuya composición y cuya composición mineralógica se da a continuación:

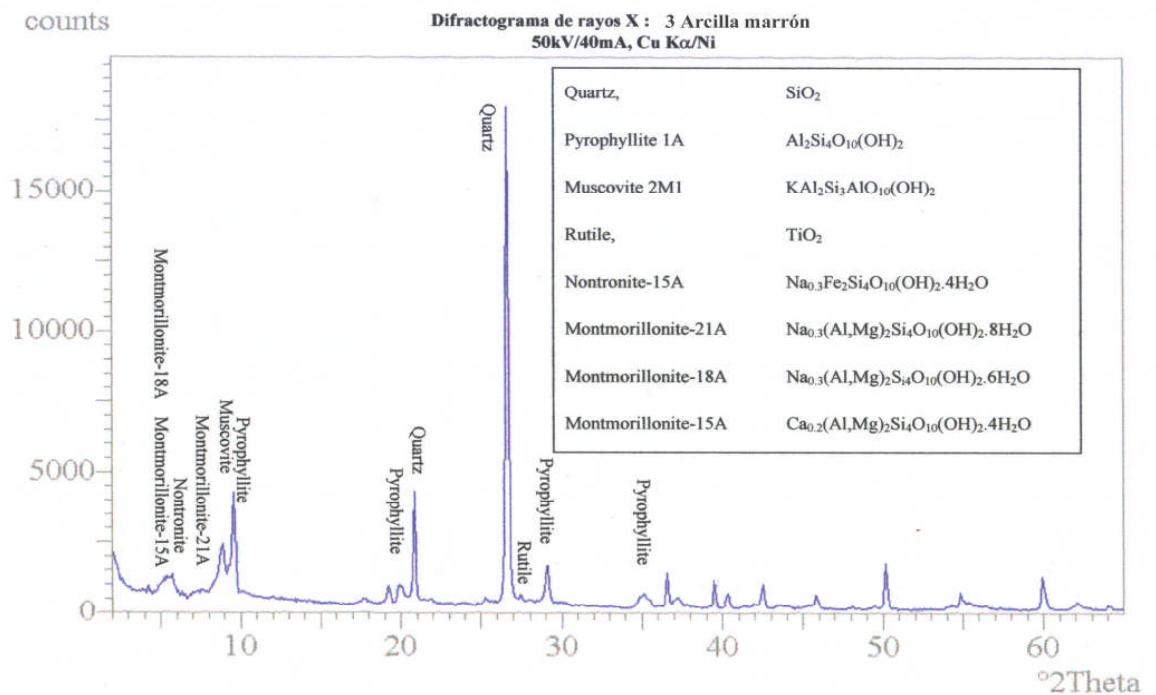


Difractograma A.2

Cuarzo	SiO ₂	45%
Moscovita-2M1	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	9%
Pirofillita-1A	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	7%
Nontronita-15A	Na _{0,3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	8%
Montmorillonita-21A	Na _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .8H ₂ O	7%
Montmorillonita-18A	Na _{0,3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .6H ₂ O	16%
Montmorillonita-15A	Ca _{0,2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	5%
Rutilo	TiO ₂	2%

1.1.3. Muestra de arcilla marrón.

Constituida principalmente por arcillas de color beige oscuro, con tamaños de partícula menores a 2mm, cuyo análisis difractométrico se da en el difractograma N° A.3 y cuya composición mineralógica se da a continuación:

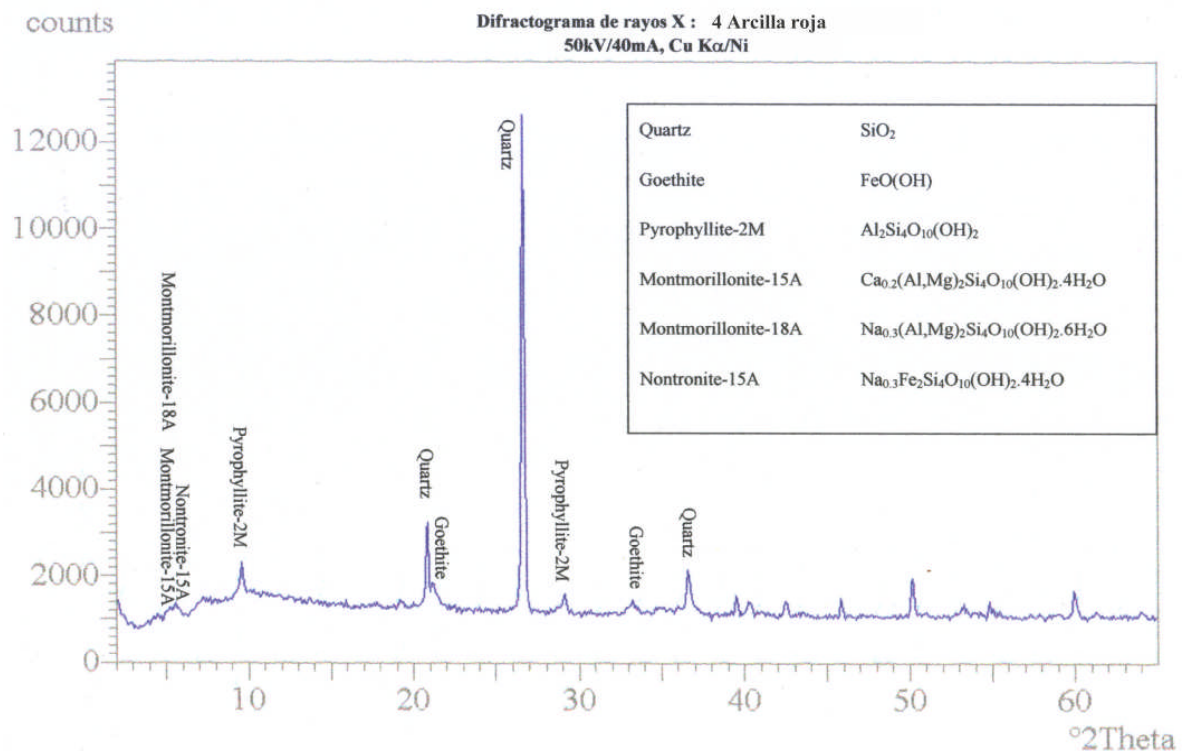


Difractograma A.3

Cuarzo	SiO_2	42%
Pirofillita-1A	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	12%
Moscovita-2M1	$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	6%
Rutilo	TiO_2	4%
Nontronita-15A	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5%
Montmorillonita-21A	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	6%
Montmorillonita-18A	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14%
Montmorillonita-15A	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	10%

1.1.4. Muestra de arcilla roja.

Constituido principalmente por fragmentos angulosos y subangulosos de cuarcitas con tamaños de partícula menorea a 6mm. Y cuyo análisis difractométrico se da en el difractograma N° A.4 y cuya composición mineralógica se da a continuación:



Difractograma A.4

Cuarzo	SiO_2	72%
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	7%
Pirofillita-2M	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	4%
Montmorillonita-15A	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5%
Montmorillonita-18A	$\text{Na}_{0.3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	7%
Nontronita-15A	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4%

A.2. PRUEBAS REALIZADAS CON OTROS MATERIALES ARCILLOSOS DE OTRA ZONAS GEOLÓGICAS CERCANAS.

Se realizó las respectivas caracterizaciones mineralógicas por Difracción de rayos X de arcillas en estudio para determinar el análisis cuantitativo de arcillas en lugares ya determinados.

Se realizó pruebas en botellas de minerales arcillosos de las zonas llamadas Alto Chira, Aluvial, Capilla, Patival y los resultados se pueden ver en los cuadros A.1, A.2, A.3 y A.4 acompañados de sus respectivas gráficas que corresponden al porcentaje de recuperación del oro en función al tiempo de lixiviación.

Finalmente se realizó un compendio comparativo de los cuatro cuadros para relacionarlo con los análisis cuantitativos de arcillas, para obtener conclusiones.

2.1 OBJETIVOS:

Identificar la arcilla que produce el efecto preg-robbing en cada uno de los tajos de trabajo de zonas geológicas cercanas a la anterior en la cual se determinó la existencia de montmorillonita sódica.

Cuantificar el perjuicio que produce la arcilla existente en la recuperación del oro.

Contribuir a optimizar la recuperación en el proceso de cianuración.

2.2 ANALISIS CUANTITATIVO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Se tomaron muestras de las zonas llamadas Alto Chira, Aluvial, Capilla, Patival y los resultados son los siguientes:

RESULTADOS DE ANÁLISIS CUANTITATIVO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LAS MUESTRAS TOMADAS

Para el análisis, se utilizó tubo de Cu en un difractor SHIMADZU modelo XRD-6000, con energía de 40 Kv, 30 mA

RESULTADOS DEL ANALISIS:

N°	MINERAL	FORMULA	%
MUESTRA ALTO CHIRA -200 M			
01	Cuarzo	SiO ₂	63.67
02	Illita	K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H ₂ O	8.78
03	Calcita	CaCO ₃	7.89
04	Montmorillonita	Ca _{0.2} (Al, Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	4.74
05	Amorfo	-	4.45
06	Albita	(Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈	4.03
07	Jarosita	KFe(SO ₄) ₂ (OH) ₆	1.84
08	Anatasa	TiO ₂	1.36
09	Wolastonita	CaSiO ₃	1.19
10	Clorita	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	1.07
11	Hematita	Fe ₂ O ₃	0.98
MUESTRA ALUVIAL -200 M			
01	Cuarzo	SiO ₂	67.31
02	Illita	K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H ₂ O	14.56
03	Amorfo	-	4.29
04	Calcita	CaCO ₃	3.85
05	Jarosita	KFe(SO ₄) ₂ (OH) ₆	2.14
06	Goetita	FeO(OH)	2.14
07	Hematita	Fe ₂ O ₃	1.93
08	Clorita	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	1.64
09	Albita	(Na, Ca) (Si, Al) ₄ O ₈	0.86
10	Ortoclasa	(K, Ba, Na) ₂ (Si, Al) ₄ O ₈	0.71
11	Anatasa	TiO ₂	0.57

MUESTRA CAPILLA -200 M

01	Cuarzo	SiO_2	71.02
02	Illita	$\text{K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H}_2\text{O}$	14.99
03	Amorfo	-	5.00
04	Jarosita	$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	2.28
05	Clorita	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	1.78
06	Anhidrita	CaSO_4	1.71
07	Ortoclasa	$(\text{K, Ba, Na})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$	1.14
08	Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$	1.07
09	Hematita	Fe_2O_3	0.57
10	Gibsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	0.44

MUESTRA PATIVAL -200 M

01	Cuarzo	SiO_2	58.04
02	Illita	$\text{K-Na-Mg-Fe-Al-Si-O-H}_2\text{O}$	9.55
03	Amorfo	-	7.17
04	Montmorillonita	$\text{Ca}_{0.2}(\text{Al, Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	5.57
05	Albita	$(\text{Na, Ca})(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$	4.54
06	Hematita	Fe_2O_3	3.51
07	Dickita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	3.18
08	Jarosita	$\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	2.31
09	Anhidrita	CaSO_4	2.15
10	Goetita	$\text{FeO}(\text{OH})$	1.43
11	Calcita	CaCO_3	1.43
12	Ortoclasa	$(\text{K, Ba, Na})_2(\text{Si, Al})_4\text{O}_8$	1.12

2.3 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS CUANTITATIVO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede deducir que las arcillas que pueden producir el efecto preg-robbing son la montmorillonita cálcica y la illita.

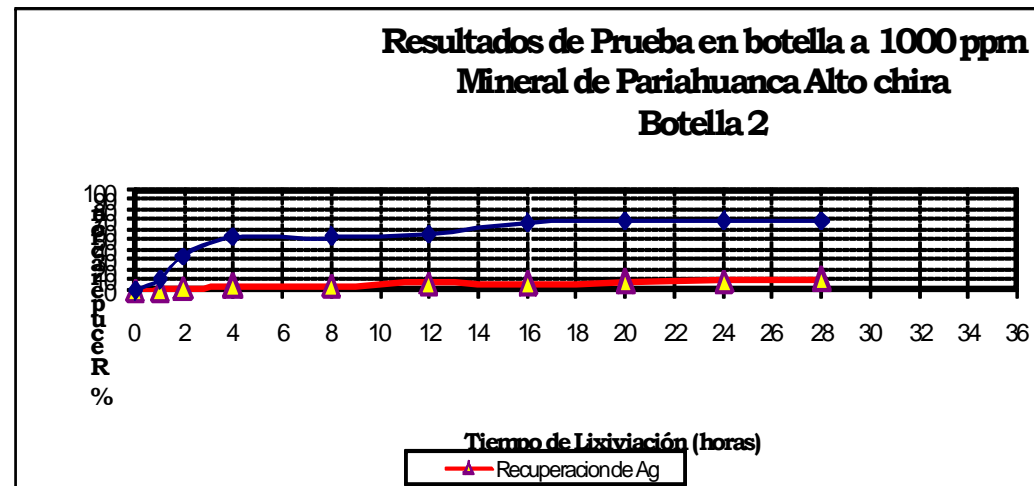
En todos los casos la illita está en mayor cantidad que la montmorillonita cálcica, además posee el catión Sodio en su estructura que es más reactivo que el Calcio, luego la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la **illita**.

2.3 PRUEBAS METALURGICAS A NIVEL DE LABORATORIO

Se realizó cuatro pruebas con las diferentes muestras de arcillas que se caracterizó, las condiciones se dan con amplitud en los cuadros N° A.1; A.2; A.3, A.4 y un resumen a continuación:

Peso Muestra Material	
Arcilloso(g)	1000
Dilución (L/S)	2
PH	10 a 10,5
Au Solución Entrante (ppm)	12,36
Fuerza de Cianuro (%)	0,02 (200 ppm)
Tiempo (horas)	28

PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA MINERAL PARIAHUANCA - ALTO CHIRA															
												Cuadro A. 1			
Observaciones		CONDICIONES													
		Peso Muestra (g) 2000 Tamaño Granulometrico 100% < 2" Dilución (L/S) 2 pH 10 a 11 Fuerza de Cianuro (%) 1000 ppm Tiempo (horas) 28 Adicion inicial de Cal (gr) 1.000 Adicion inicial de NaCN (gr) 4.162													
RESULTADOS															
PRODUCTOS	vol (ml)	Tiempo (horas)	pH	CN- ppm	Consumo de Reactivos				Ley (ppm)		mg		Recuperacion ensayada(%)		
					NaCN (gr)	NaCN (Kg/ton)	Cal (gr)	Cal (Kg/ton)	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
Sol. Rica 1 (*)	4000	0	9.06	1000.0	0.208	0.000	2.71	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.08
Sol. Rica 2 (*)	4000	1	10.52	4.0	3.829	2.018	0.05	1.380	0.045	0.026	0.180	0.104	10.39	0.23	15.39
Sol. Rica 3 (*)	4000	2	10.46	769.5	0.886	2.461	0.07	1.415	0.149	0.217	0.596	0.894	34.41	1.98	17.72
Sol. Rica 4 (*)	4000	4	10.78	886.0	0.438	2.680	0.05	1.440	0.228	0.340	0.912	1.603	52.66	3.54	18.75
Sol. Rica 5 (*)	4000	8	10.59	937.5	0.240	2.801	0.08	1.480	0.228	0.340	0.912	1.943	52.66	4.30	20.55
Sol. Rica 6 (*)	4000	12	10.74	1027.5	-0.106	2.748	0.10	1.530	0.243	0.602	0.972	3.331	56.12	7.37	19.89
Sol. Rica 7 (*)	4000	16	10.71	994.5	0.021	2.758	0.10	1.580	0.291	0.291	1.164	2.689	67.21	5.95	17.27
Sol. Rica 8 (*)	4000	20	10.54	863.5	0.525	3.021	0.15	1.655	0.297	0.458	1.188	3.648	68.59	8.07	19.97
Sol. Rica 9 (*)	4000	24	10.56	998.5	0.006	3.024	0.10	1.705	0.297	0.472	1.188	4.162	68.59	9.20	20.14
Sol. Rica 9 (*)	4000	28	10.64	1007.0	-0.027	3.010	0.00	1.705	0.300	0.469	1.200	4.622	69.28	10.22	
Residuo	2000								0.266	20.300	0.532	40.600	30.72	89.78	
Cabeza Calculada	2000								0.866	22.611	0.866	22.611	100.00	100.00	
Cabeza Ensayada									0.634	10.160					
Solubilidad en Cianuro									1.200	4.622			69.28	10.22	



PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA MINERAL PARIAHUANCA - PATIVAL
COMARSA

Observaciones

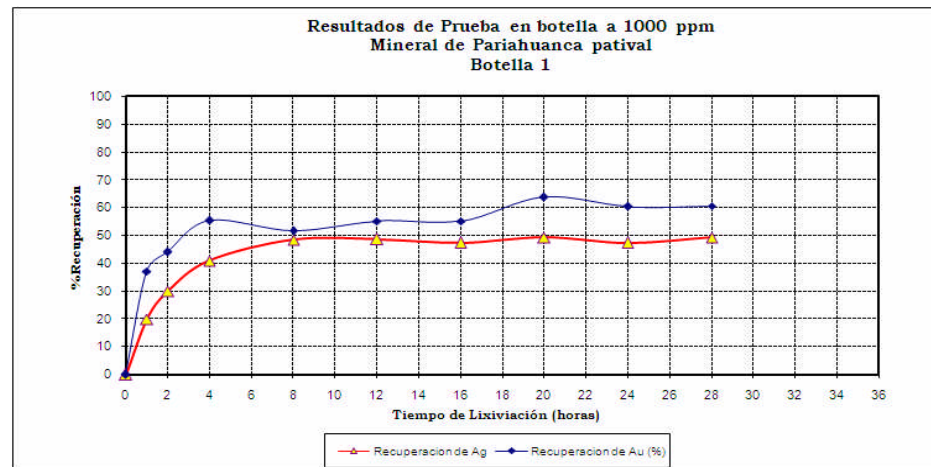
CONDICIONES

Cuadro A.2

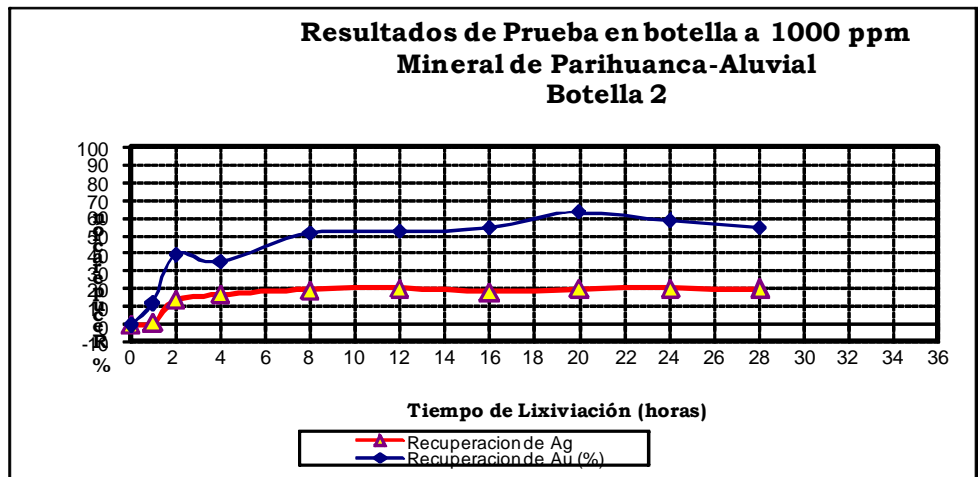
Peso Muestra (g) 2000
 Tamaño Granulometrico 100%<2"
 Dilución (L/S) 2
 pH 10 a 11
 Fuerza de Cianuro (%) 1000 ppm
 Tiempo (horas) 28
 Adición inicial de Cal (gr) 1.200
 Adición inicial de NaCN (gr) 4.162

RESULTADOS

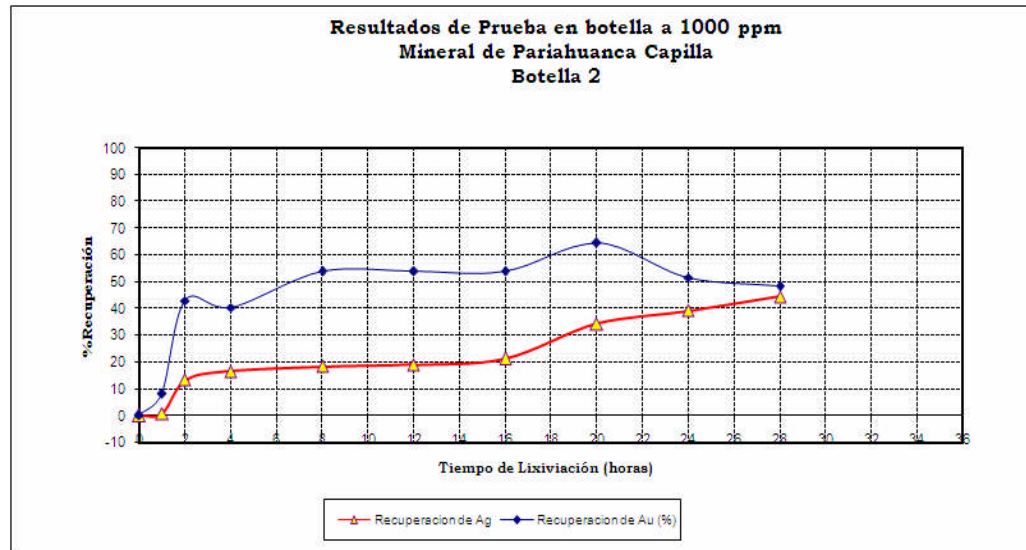
PRODUCTOS	vol (ml)	Tiempo (horas)	pH	CN- ppm	Consumo de Reactivos				Ley (ppm)		mg		Recuperacion ensayada(%)		
					NaCN (gr)	NaCN (Kg/ton)	Cal (gr)	Cal (Kg/ton)	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
Sol. Rica 1 (*)	4000	0	8.21	1000.0	0.208	0.000	1.20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	
Sol. Rica 2 (*)	4000	1	10.32	737.0	1.011	0.609	0.57	0.885	0.164	8.000	0.656	32.000	37.23	19.99	14.74
Sol. Rica 3 (*)	4000	2	10.81	940.5	0.229	0.724	0.00	0.885	0.194	10.000	0.776	48.000	44.04	29.98	18.81
Sol. Rica 4 (*)	4000	4	10.67	979.5	0.079	0.763	0.00	0.885	0.244	11.915	0.976	65.660	55.39	41.01	19.59
Sol. Rica 5 (*)	4000	8	10.48	949.0	0.196	0.861	0.03	0.900	0.228	11.915	0.912	77.575	51.76	48.45	18.98
Sol. Rica 6 (*)	4000	12	10.68	1023.5	-0.090	0.816	0.02	0.910	0.243	13.263	0.972	94.882	55.16	48.63	20.47
Sol. Rica 7 (*)	4000	16	10.66	854.5	0.559	1.096	0.00	0.910	0.243	13.158	0.972	107.725	55.16	47.45	17.09
Sol. Rica 8 (*)	4000	20	10.47	996.0	0.015	1.103	0.05	0.935	0.281	14.316	1.124	125.515	63.79	49.39	19.92
Sol. Rica 9 (*)	4000	24	10.51	936.0	0.246	1.226	0.05	0.960	0.266	13.789	1.064	137.723	60.39	47.42	18.72
Sol. Rica 9 (*)	4000	28	10.63	1006.5	-0.025	1.214	0.02	0.970	0.267	14.226	1.068	153.260	60.61	49.26	20.13
Residuo	2000								0.347	3.430	0.694	6.860	39.39	50.61	
Cabeza Calculada	2000								0.881	80.060	0.881	80.060	100.00	100.00	
Cabeza Ensayada									0.920	24.700					
Solubilidad en Cianuro									1.124	153.260			63.79	95.72	



PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA MINERAL ALUVIAL															
Observaciones		CONDICIONES												Cuadro A.3	
		Peso Muestra (g) 2000 Tamaño Granulometrico 100% < 2" Dilución (L/S) 2 pH 10 a 11 Fuerza de Cianuro (%) 1000 ppm Tiempo (horas) 28 Adición inicial de Cal (gr) 1.000 Adición inicial de NaCN (gr) 4.162													
RESULTADOS															
PRODUCTOS	vol (ml)	Tiempo (horas)	pH	CN- ppm	Consumo de Reactivos				Ley (ppm)		mg		Recuperacion ensayada(%)		
					NaCN (gr)	CN (Kg/t)	Cal (gr)	Cal (Kg/ton)	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	
		0	9.06	1000.0	0.208	0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	
Sol. Rica 1 (*)	4000	1	10.52	0.0	3.844	2.026	0.29	0.645	0.030	0.226	0.120	0.904	12.02	0.81	
Sol. Rica 2 (*)	4000	2	10.46	0.0	3.844	3.948	0.00	0.645	0.098	3.830	0.392	15.546	39.28	13.99	
Sol. Rica 3 (*)	4000	4	10.78	0.0	3.844	5.870	0.00	0.645	0.088	3.723	0.352	18.948	35.27	17.05	
Sol. Rica 4 (*)	4000	8	10.59	0.0	3.844	7.792	0.02	0.655	0.128	4.043	0.512	23.951	51.30	19.55	
Sol. Rica 5 (*)	4000	12	10.74	0.0	3.844	9.714	0.02	0.665	0.130	4.421	0.520	29.506	52.10	20.34	
Sol. Rica 6 (*)	4000	16	10.71	0.0	3.844	11.636	0.00	0.665	0.135	4.526	0.540	34.347	54.11	18.25	
Sol. Rica 7 (*)	4000	20	10.54	0.0	3.844	13.558	0.05	0.690	0.158	5.158	0.632	41.401	63.33	19.96	
Sol. Rica 8 (*)	4000	24	10.56	0.0	3.844	15.480	0.05	0.715	0.145	5.263	0.580	46.979	58.12	20.45	
Sol. Rica 9 (*)	4000	28	10.64	0.0	3.844	17.402	0.02	0.725	0.125	5.649	0.500	53.786	54.60	19.94	
Residuo	2000								0.249	28.680	0.498	57.360	49.90	79.55	
Cabeza Calcu	2000								0.499	55.573	0.499	55.573	104.50	100.00	
Cabeza Ensayada									0.690	25.170					
Solubilidad en Cianuro									0.632	53.786			63.33	48.39	



PRUEBA DE CIANURACION EN BOTELLA MINERAL PARIAHUANCA - CAPILLA																
Observaciones		CONDICIONES												Cuadro A.4		
		Peso Muestra (g) 2000 Tamaño Granulometrico 100% < 2" Dilución (L/S) 2 pH 10 a 11 Fuerza de Cianuro (%) 1000 ppm Tiempo (horas) 28 Adicion inicial de Cal (gr) 1.000 Adicion inicial de NaCN (gr) 4.162														
RESULTADOS																
PRODUCTOS	vol (ml)	Tiempo (horas)	pH	CN- ppm	Consumo de Reactivos				Ley (ppm)		mg		Recuperacion ensayada(%)			
					NaCN (gr)	NaCN (Kg/ton)	Cal (gr)	Cal (Kg/ton)	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag		
Sol. Rica 1 (*)	4000	0	9.06	1000.0	0.208	0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	
Sol. Rica 2 (*)	4000	1	10.52	3.9	3.829	2.019	0.29	0.645	0.020	0.210	0.080	0.840	8.28	0.81	0.078	
Sol. Rica 3 (*)	4000	2	10.46	845.0	0.596	2.316	0.00	0.645	0.104	3.410	0.416	13.850	43.06	13.41	16.9	
Sol. Rica 4 (*)	4000	4	10.78	950.0	0.192	2.413	0.00	0.645	0.098	3.416	0.392	17.284	40.58	16.73	19	
Sol. Rica 5 (*)	4000	8	10.59	954.0	0.177	2.501	0.02	0.655	0.13	3.021	0.520	19.120	53.83	18.51	19.08	
Sol. Rica 6 (*)	4000	12	10.74	976.0	0.092	2.547	0.02	0.665	0.130	2.421	0.520	19.741	53.83	19.11	19.52	
Sol. Rica 7 (*)	4000	16	10.71	949.0	0.196	2.645	0.00	0.665	0.130	2.421	0.520	22.162	53.83	21.46	18.98	
Sol. Rica 8 (*)	4000	20	10.54	968.0	0.123	2.707	0.05	0.690	0.156	5.138	0.624	35.451	64.60	34.32	19.36	
Sol. Rica 9 (*)	4000	24	10.56	990.5	0.037	2.725	0.05	0.715	0.125	5.143	0.500	40.609	51.76	39.32	19.81	
Sol. Rica 9 (*)	4000	28	10.64	997.0	0.012	2.731	0.02	0.725	0.117	5.236	0.468	46.124	48.45	44.66	19.94	
Residuo	2000								0.249	28.580	0.498	57.160	51.55	55.34		
Cabeza Calculada	2000								0.483	51.642	0.483	51.642	100.00	100.00		
Cabeza Ensayada									0.690	25.170						
Solubilidad en Cianuro									0.624	46.124			64.60	44.66		



2.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS METALURGICAS A NIVEL DE LABORATORIO

Según los resultados de las pruebas, todas las muestras presentan el efecto preg- robbing.

Si hacemos una comparación del porcentaje de recuperación del oro a 28 horas, para los tajos Alto Chira y Patival, sus resultados son relativamente superiores a la de Aluvial y Capilla.

Se sabe que la arcilla que produce el efecto preg-robbing es la illita; relacionando con el porcentaje de recuperación de oro a 28 horas se tiene el siguiente cuadro:

Tajo	%Recuperación a 28 horas	% de illita en cada tajo
Alto Chira	69.26	8.78
Patival	60.61	9.55
Aluvial	56.10	14.56
Capilla	48.45	14.99

Luego, podemos observar que a mayor porcentaje de illita, menor será la recuperación del oro. Entonces la illita produce un efecto económico perjudicial en el proceso de lixiviación del oro.

Si hacemos un compendio comparativo de todos los cuadros anteriores tenemos lo siguiente:

**COMPENDIO COMPARATIVO DE LAS PRUEBAS DEL
PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE
LIXIVIACIÓN EN HORAS**

Tiempo (horas)	Alto Chira (%)	Patival (%)	Capilla (%)	Aluvial (%)
0	0	0	0	0
1	10.39	37.23	8.26	12.02
2	34.41	44.04	43.06	39.28
4	52.66	55.39	40.58	35.27
6	52.66	51.76	53.83	51.3
12	56.12	55.16	53.83	52.1
16	67.21	55.16	53.83	54.11
20	68.59	63.79	64.6	63.33
24	68.59	60.39	51.76	58.12
28	69.26	60.61	48.45	50.1

Cuadro A.5

Graficando todas las curvas en un solo plano cartesiano y relacionando con los porcentajes de illita en cada muestra se tiene:

**COMPENDIO COMPARATIVO DE LAS CURVAS DEL
PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DEL ORO EN FUNCIÓN AL
TIEMPO DE LIXIVIACIÓN (HORAS)**

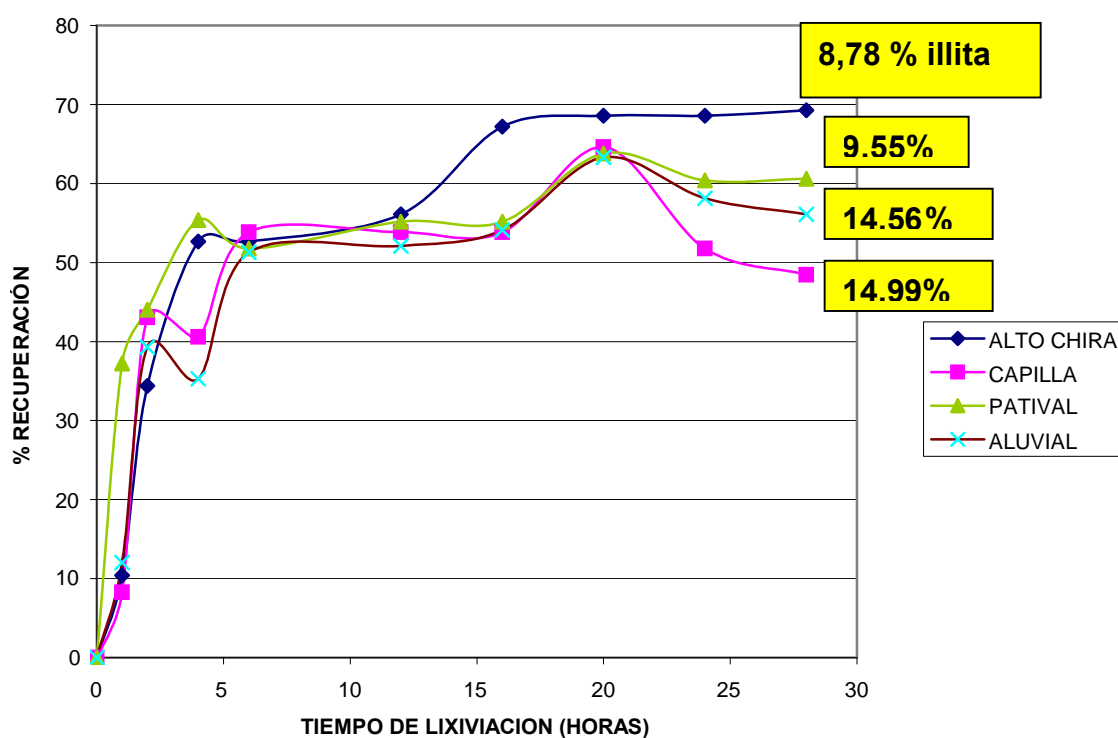


Fig. N° A.1

En esta gráfica se puede ver claramente que a mayor porcentaje de illita en el mineral aurífero, menor será el porcentaje de recuperación del oro. En consecuencia esta arcilla representa un perjuicio económico.

A.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La arcilla que produce el efecto preg-robbing es la illita.

A mayor porcentaje de illita en el mineral, menor es la recuperación del oro.

La illita representa un perjuicio en la recuperación del oro durante el proceso de lixiviación.

La illita representa un perjuicio económico para el inversionista.

Para poder optimizar la recuperación del oro, el profesional en Geología debe hacer estudios específicos de zonas geológicas arcillosas para identificar las arcillas que perjudican la producción de este metal precioso.

El profesional en Geología debe coordinar con el Metalurgista para que realice pruebas y así determine, cual es la arcilla que más perjuicio produce en la lixiviación del oro en pilas.

Una vez determinada la zona geológica y la arcilla que produce el efecto preg-robbing, se recomienda evitar en lo posible estos minerales arcillosos para que el proceso de lixiviación en pilas no se perjudique.

Según experiencias a nivel de laboratorio, el porcentaje de extracción del oro sin arcillas es aproximadamente 80 % y en las pruebas metalúrgicas realizadas resultó aproximadamente a 70, 60, 55 y 48 % de extracción del metal valioso en 28 horas de lixiviación, obteniéndose una pérdida económica considerable para el inversionista.

CURRICULUM VITAE



1. DATOS PERSONALES

Nombres y Apellidos :	Roberto Antonio Visurraga Reinoso
Dirección	Jr. Río Blanco No 767-Urb. Villa del Norte Los Olivos
Teléfono	5236045- 96668933
Libreta Electoral	08570234
Fecha de Nacimiento	31-10-69

2. ESTUDIOS REALIZADOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Especialidad: Ingeniería Metalúrgica.

3. OTROS ESTUDIOS

Idiomas: Inglés (Catholic Language Center)

4. EXPERIENCIA PRE-PROFESIONAL

COBRES LAMINADOS S.A. (COBRELSA) del 15 de Enero al 24 de Marzo de 1990 en la sección de Laboratorio Químico y Control de Calidad.

5. EXPERIENCIA LABORAL

CONSORSIO METALURGICO S.A. (COMESA) del 15 de Abril de 1990 al 10 de Abril de 1991, en la sección de Fundición, Moldeo y Tratamientos Térmicos.

FUNDICION "LOS SAUCES" S.R.L. del 01 de Noviembre de 1991 al 03 de Abril de 1992 en la sección de Fundición, Moldeo y Acabados.

PRODUCTOS 7M S.A. del 23 de Agosto de 1992 al 18 de Noviembre de 1993 en la sección de Fundición y Moldeo.

SOCIEDAD MINERA ADRIANA V DE HUARAZ S.A. del 03 de Enero de 1994 hasta el 08 de Mayo de 1998. Jefe de Guardia.

UNIVERSIDAD SAN IGNACIO DE LOYOLA

Periodo 99-II-Jefe de Prácticas en el Departamento de Matemática hasta la fecha.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Periodo 2000-I hasta la fecha.

Profesor del curso de **Cristalografía** en la Facultad de Ing. Geológica, Minera y Metalúrgica.

CENTRO PRE UNIVERSITARIO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Profesor del curso de **Aritmética** desde el periodo 2002-I hasta la fecha.

Roberto Visurraga Reinoso