

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA



**LIXIVIACION BACTERIANA DEL MINERAL
DE URANIO DEL YACIMIENTO CHAPI
MACUSANI - PUNO**

TESIS

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

PRESENTADO POR :

***LEONCIO CISNEROS BERROCAL
EVER LINCOLN JARA GUARDIA***

LIMA-PERU

1993

CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
CAPITULO I	1
1. INTRODUCCION	2
1.1 <i>Generalidades</i>	2
1.2 <i>Antecedentes</i>	3
1.3 <i>Objetivo</i>	5
CAPITULO II	7
2 ESTUDIO GENERAL DE MICROORGANISMOS	8
2.1 <i>Microbios</i>	8
2.2 <i>Tamaño</i>	9
2.3 <i>Cultivo de microorganismos</i>	11
2.3.1 <i>Medios de cultivo</i>	12
2.3.2 <i>Esterilización del medio de cultivo</i>	13
2.4 <i>Estructura de la célula en microorganismos</i>	14
2.4.1 <i>Pared celular de bacterias</i>	16
2.4.2 <i>Membrana celular</i>	16
2.4.3 <i>Citoplasma</i>	17
2.4.4 <i>Flagelos</i>	18
2.5 <i>Fisiología microbiana</i>	19
2.5.1 <i>Metabolismo</i>	19
2.5.2 <i>Proteínas catalíticas</i>	20
2.5.3 <i>Oxidación por microorganismos</i>	21
2.6 <i>Autoduplicación de la célula microbiana</i>	23

2.7	<i>Estudio de la bacteria</i>	25
2.7.1	<i>Crecimiento de la bacteria</i>	25
2.7.2	<i>Fases de crecimiento</i>	26
2.7.3.	<i>Movimiento celular</i>	29
 CAPITULO III		 31
3.	CARACTERISTICAS QUIMICO - BIOLÓGICAS	
	DE LAS BACTERIAS	32
3.1	<i>Introducción</i>	32
3.2	<i>Bacteria y naturaleza</i>	32
3.2.1	<i>Identificación de bacterias</i>	33
3.2.2	<i>Clasificación de bacterias</i>	34
	3.2.2.1 <i>Bacterias heterótrofas</i>	35
	3.2.2.2 <i>Bacterias autótrofas</i>	35
3.3	<i>Importancia de las bacterias en la minería</i>	36
3.4	<i>Oxidación bioquímica de las bacterias del género thiobacillus</i>	37
	3.4.1 <i>Oxidación de azufre y sulfuro</i>	39
 CAPITULO IV		 41
4.	ASPECTOS BASICOS DE LA LIXIVIACION BACTERIANA	42
4.1	<i>Microorganismos que afectan la transformaciones de minerales</i>	43
4.2	<i>Parámetros limitantes en la actividad</i>	

<i>bacterial</i>	51
4.2.1 <i>Efecto de la temperatura</i>	51
4.2.2 <i>Efecto del grado de acidez</i>	54
4.2.3 <i>Efecto de la composición del medio</i>	57
4.3 <i>Mecanismo bacterial en la bio-lixivación</i>	58
4.3.1 <i>Mecanismo directo</i>	59
4.3.2 <i>Mecanismo indirecto</i>	59
4.4 <i>Aplicación de la lixivación bacteriana</i>	60
CAPITULO V	63
5. PRODUCCION Y DEMANDA DE URANIO EN EL MUNDO	64
5.1 <i>Descripción del uranio</i>	64
5.1.1 <i>Propiedades físicas</i>	65
5.1.2 <i>Propiedades químicas</i>	66
5.2 <i>Aplicación del uranio</i>	66
5.3 <i>Producción de uranio en el mundo</i>	68
5.3.1 <i>Generalidades</i>	68
5.3.2 <i>Desarrollo de la producción del Uranio</i>	72
5.4 <i>Precio del Uranio</i>	74
5.5 <i>Demanda del Uranio</i>	75
5.6 <i>Proyección de la provisión del Uranio</i>	79
5.7 <i>Proyección de WOCA en la demanda-provisión del Uranio</i>	80

CAPITULO VI	82
6. DISPONIBILIDAD DE URANIO EN EL PERU	83
6.1 <i>Introducción</i>	83
6.2 <i>Antecedentes</i>	84
6.3 <i>Areas uraníferas de interes</i>	85
6.3.1 <i>Recursos identificados</i>	85
6.3.2 <i>Recursos condicionales</i>	87
6.3.3 <i>Recursos hipoteticos</i>	89
6.3.4 <i>Recursos especulativos</i>	92
6.4 <i>Política del uranio</i>	93
6.5 <i>Convenio con la Región Mariategui</i>	95
 CAPITULO VII	 96
7. CARACTERISTICAS DEL MINERAL DE URANIO	
YACIMIENTO MACUSANI (PUNO)	97
7.1 <i>Introducción</i>	97
7.2 <i>Manifestaciones uraníferas en rocas</i>	
<i>volcanicas de Macusani (Puno)</i>	98
7.2.1 <i>Ubicación y acceso</i>	99
7.2.2 <i>Estudio radiométrico</i>	101
7.2.3 <i>Manifestaciones uraníferas</i>	102
7.2.4 <i>Estudios mineralógico</i>	109
7.2.4.1 <i>Introducción</i>	109
7.2.4.2 <i>Composición mineralógica</i>	111
7.2.5. <i>Mineralización</i>	115
7.2.6 <i>Características geoquímicas</i>	121

CAPITULO VIII	129
8. TRATAMIENTO MICROBIOLOGICO DEL MINERAL DE URANIO	130
8.1 Generalidades	130
8.2 Ensayo de análisis físico - químico	131
8.2.1 Preparación física	131
8.2.2 Determinación de la densidad aparente	139
8.2.3 Determinación de la humedad	139
8.2.4 Análisis granulométrico	141
8.2.5 Análisis químico	143
8.3 Técnicas de tratamiento de minerales de Uranio	145
8.3.1 Lixiviación ácida	148
8.3.1.1 Variables del proceso	150
8.3.2 Lixiviación alcalina	154
8.3.2.1 Variables del proceso	157
8.4 Estudio de la bacteria aplicada en lixiviación del mineral de Uranio procedente de Chapi-Macusani (Puno).	159
8.4.1 Estudio de la bacteria <i>thiobacillus ferroxidans</i> .	159
8.4.1.1 Características de la bacteria <i>thiobacillus ferroxidans</i>	161
8.4.2 Medios de cultivo.	162
8.4.3 Cultivo de la bacteria	162

8.4.4	Conteo de bacterias.	166
8.4.5	Parámetros que afectan el crecimiento de la bacteriana.	166
8.4.6	Adaptación del <i>Thiobacillus Ferrooxidans</i> .	173
8.5	Lixiviación bacteriana del Uranio.	175
8.5.1	Generalidades	175
8.5.2	Rol de la bacteria	177
8.5.3	Aumento de la actividad bacteriana.	178
8.5.4	Tolerancia de la bacteria <i>thiobacillus ferrooxidans</i> a los metales en la lixiviación.	182
8.5.5	Ensayo experimental de lixiviación bacteriana del mineral de Uranio Chapi-Macusani (Puno)	184
8.5.5.1	Introducción.	184
8.5.5.2	Condiciones de ensayo en el laboratorio	185
8.5.5.3	Procedimiento de lixiviación bacteriana	186
8.5.5.4	Cuádrós de resultados, gráficos y resumen de planilla de control	191

CAPITULO IX	217
9. TECNICAS ESPECIALES APLICADAS EN LA LIXIVIACION DE LOS MINERALES DE URANIO	218
9.1 <i>Introducción</i>	218
9.2 <i>Lixiviación a presión</i>	219
9.2.1 <i>Lixiviación acida a presión</i>	222
9.2.2 <i>Lixiviación alcalina a presión</i>	223
9.3 <i>Lixiviación curado ácido</i>	224
 CAPITULO X	 229
10. SEGURIDAD E HIGIENE EN EL PROCESAMIENT- TO DEL MINERAL DE URANIO	230
10.1 <i>Introducción</i>	230
10.2 <i>Principios básicos</i>	231
10.2.1 <i>Estructura atómica.</i>	231
10.2.2 <i>Ionización</i>	232
10.2.3 <i>Isótopos</i>	233
10.2.4 <i>Radiaciones electromagnéticas</i>	234
10.2.4.1 <i>Espectro electromag- nético</i>	235
10.2.5 <i>Radiactividad</i>	235
10.2.5.1 <i>Radiactividad natural</i>	236
10.2.5.2 <i>Naturaleza de la ra- diaciones</i>	237
10.2.6 <i>Ley de la desintegración ra- diactiva</i>	238
10.2.6.1 <i>Periodo de semi- desintegración</i>	241

10.3	<i>Protección radiológica</i>	242
10.3.1	<i>Clases de riesgos radiactivos</i>	244
10.4	<i>Contaminación radiológica en el procesamiento del mineral de uranio</i>	245
10.4.1	<i>Contaminación interna</i>	246
10.4.2	<i>Contaminación externa</i>	247
10.5	<i>Vigilancia radiológica</i>	248
10.5.1	<i>Límite de dosis</i>	250
10.6	<i>Dispositivos de protección</i>	251
10.6.1	<i>Ropa protectora</i>	253
10.6.2	<i>Protección de la inhalación de polvo radiactivo.</i>	253
10.7	<i>Bioensayo</i>	254
10.8	<i>Reglas para evitar la contaminación en el procesamiento del mineral de uranio</i>	254
10.9	<i>Símbolos</i>	256
	<i>CAPITULO XI</i>	259
	<i>11. CONCLUSIONES</i>	260
11.1	<i>Generales</i>	260
11.2	<i>Particulares</i>	261
11.3	<i>Recomendaciones</i>	264
	<i>ANEXOS</i>	
	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	

CAPITULO I

INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

1.1 GENERALIDADES

La presente tesis fué elaborada en el Laboratorio de Hidrometalúrgia, División de Materias Primas del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN).

Su estructura, como el título lo indica, se ha orientado básicamente a la aplicación de microorganismos en la lixiviación del mineral de uranio procedente de Chapi - Macusani (Puno).

Se ha escogido para el desarrollo de la tesis el tema: LIXIVIACION BACTERIANA DEL MINERAL DE URANIO PROCEDENTE DE CHAPI-MACUSANI (PUNO), por razones de aportar con técnicas propias en la lixiviación del uranio para beneficio propio de nuestro país, y específicamente para el Instituto de Energía Nuclear - IPEN.

Se sabe que la elección de un tema de investigación no siempre es producto de la inquietud, sino, de poseer un criterio valorativo de la importancia del tema que se trate, porque se realiza con los elementos que la nación nos ha facilitado para su servicio, por tanto también es nuestro deseo retribuir lo aprendido; teniendo en cuenta éste punto de vista, será mayor el que retribuya de lo que ha recibido, y que no se puede retribuir en mayor forma a la nación que dedicando todo nuestro conocimiento en la aplicación de ésta tecnolo-

gía de lixiviación a los minerales de Uranio, pensando que éste trabajo es y será el principio de futuras investigaciones de Biolixiviación del mineral de Uranio en el país.

Nos sentimos inconformes, no satisfechos, tuvimos en mente realizar la biolixiviación convencional (por agitación) con minerales de Uranio donde es mas difícil el proceso de lixiviación química; concientes de que una cosa es lo que se quiere y otra es la realidad; dejamos para futuras investigaciones la lixiviación bacteriana por agitación.

1.2 ANTECEDENTES

Desde hace bastantes años se ha venido tratando minerales de uranio, fundamentalmente marginales, en pilas (HEAP LEACHING), en minas ("in situ"), Con la intervención de elementos biológicos (bacterias), ésta actividad se ha llevado a cabo en diferentes países pero de forma más intensa en Portugal, Canadá y Francia.

El uranio está presente en pequeñas cantidades formando parte de minerales de baja ley, del cual no es económico la recuperación por el sistema convencional, aumentando la posibilidad de su recuperación usando bacterias. Desde 1963 se viene realizando la aplicación de esta nueva técnica, tal es el caso del RIO AIGON - MILLIKEN, (Canadá) donde se logra 130 000 lb/año

(YELLOW LAKE), similares esfuerzos se desplegaron en otros países como Sud Africa, aportando valiosas experiencias en la aplicación de microorganismos en la lixiviación del uranio. Haciendo de ésta, una técnica aceptable porque se requiere poca mano de obra, baja inversión y un consumo bajo de reactivo.

Se han hecho diferentes estudios para optimizar la acción bacteriana y lograr velocidades y rendimientos más elevados (SYMPOSIUM: RECUPERACION DE URANIO, Sao Paulo, Brasil - 1971) logrando reducir el tiempo de tratamiento, aumentando la extracción del uranio con bacterias en lecho estático, introduciendo aire a presión en diferentes puntos, etc.

Se trata de utilizar las bacterias para oxidar las sales ferrosas y de esta forma producir sales férricas para lixiviar minerales de uranio; como en Sud Africa, donde el componente principal del mineral de uranio es la uraninita, además del oro, la lixiviación ácida de dichos minerales requiere la adición de un oxidante para solubilizar el uranio tetravalente.

En febrero de 1975 se creó el Instituto Peruano de Energía Nuclear; en 1977 una brigada de prospección descubrió el Distrito uranífero de Macusani en la provincia de Carabaya (Puno), ubicando 43 indicios en los sectores de Tantamaco, Chapi, Calvario, Concharrumio, Chacaconiza, etc. A partir de 1982 en los laboratorios de hidrometalurgia del IPEN se experimenta con muestras

de mineral de uranio procedentes de Macusani, investigando y aplicando procesos de lixiviación por medios químicos a nivel del mar (Lima).

En febrero de 1991 se hace realidad por primera vez en el Perú, la ejecución de la lixiviación bacteriana del mineral de uranio Chapi-Macusani, en el laboratorio hidrometalúrgico del IPEN, como tema de la presente tesis (Carta Nº 016-91-IPEN/ORH)

1.3 OBJETIVOS

En el estudio del beneficio de un mineral no sólo hay que considerar los aspectos técnicos, sino también los aspectos económicos. La viabilidad técnica económica de los tipos de tratamiento del mineral uranífero está influenciada por la composición mineralógica y el tipo de ganga que acompaña al uranio.

La lixiviación es la operación con más incidencia económica en el costo de las concentraciones de uranio siendo, además, un proceso muy sensible a los cambios de calidad en las menas uraníferas. Por tanto, las técnicas de lixiviación están sujetas al tipo de mineral que se procesa; en este sentido, se aplican técnicas especiales como las siguientes:

- a) Lixiviación ácida o alcalina a presión
- b) Lixiviación bacteriana
- c) Lixiviación por curado ácido

Las dos primeras técnicas son aplicados a minerales de uranio que requiere oxidantes y se puede conseguir un ahorro muy importante de reactivos, así como una disminución en el impacto ambiental. La técnica de curado ácido se aplica a mineral de uranio de tipo arcilloso refractario.

El objetivo principal de la tesis "LIXIVIACION BACTERIANA DEL MINERAL DE URANIO PROCEDENTE DE CHAPI-MACUSANI (PUNO)" es comparar la eficiencia de extracción del uranio con bacterias con respecto a la lixiviación ácida por percolación (columnas).

CAPITULO II

ESTUDIO GENERAL DE MICROORGANISMOS

2. ESTUDIO GENERAL DE MICROORGANISMOS

En este capítulo se trata de estudiar en forma muy general a los microorganismos para entender de la mejor forma los aspectos generales de microbiología. Esto es, la importancia que tiene el tamaño de los microbios, cultivo de microorganismos, estudio de la estructura de las células y algunas funciones de las bacterias. Es importante que en todo proceso de lixiviación se entienda el papel que desempeñan los microorganismos, en tal sentido, los conocimientos básicos a tratar ayudarán a entender el proceso microbiano en la lixiviación del uranio.

2.1 MICROBIOS

Es fascinante estudiar el mundo microbiano, porque a donde se quiera ir, mirar objetos y tocar estos, allí están los microorganismos; esto es, en el objeto que estemos sentados o apoyados, todo esta cubierto de microorganismos; nuestros intestinos contienen más de estos entes microscópicos que habitantes nuestro planeta, y eso no es todo, porque el aire que respiramos está plagado de estos microorganismos. Es asombroso que estos seres microscópicos se hallen a 12 km. de altura de la superficie de la tierra, y a 2 km. de profundidad de la superficie de la misma, es decir

que, resulta casi imposible imaginar un lugar de la superficie de nuestro planeta en el que no se encuentren estos seres diminutos.

2.2 TAMANO

Los microorganismos constituyen un grupo de transición en el que concurren características de los reinos animales y vegetales; esto implica que no se les puede clasificar en las categorías animal ni vegetal, hacerlo conduciría a un absurdo. Todos los seres que por su extrema pequeñez no pueden ser vistos sin la ayuda de un instrumento óptico, se denominan microbios.

El mundo microbiano es variado, conociendo sus dimensiones se puede tener una idea de ese mundo; para una mayor claridad del caso, se muestra el siguiente cuadro:

<i>Protozoarios y Algas</i>	<i>10 micras</i>
<i>Mohos y Levaduras</i>	<i>5 - 10 micras</i>
<i>Bacterias</i>	<i>0,2 - 0,5 micras</i>
<i>Virus</i>	<i>0,01 - 0,3 micras</i>

Un microorganismo por pequeño que sea, por

"poco" que pese (5×10^{-13} g.) es un organismo, es un ser vivo completo, es un individuo en el que ocurren todas las funciones fundamentales que competen a todos los seres vivos y cuya célula tienen estructuras complejas, como las de cualquier animal o planta.

Algunas de las consecuencias que tienen los microorganismos son: su tamaño, la distancia que han de recorrer los nutrientes del medio externo hasta llegar al metabolismo del microbio, así por ejemplo el recorrido de los productos de desecho cuya concentración muy grande los haría tóxicos. Desde los sitios activos hasta el medio externo son miles y miles de veces más pequeños en comparación con otros seres vivos; esto implica que la nutrición, secreción y excreción es muchísima más eficiente.

Otra consecuencia, más importante aún es la relación Superficie - masa de los microorganismos, se sabe perfectamente que cuanto más pequeño es un cuerpo, mayor es la relación de la superficie por unidad de masa. Esto se comprenderá mejor, si por ejemplo se considera la siguiente relación:

Hombre	0,3 superficie/masa
Bacterias	120 000 superficie/masa

Esta relación superficie-masa es muy importante, ya que el intercambio de sustancias entre el micro-

organismo con el medio exterior se realiza através de su superficie, la vida de éste microorganismo depende de tal intercambio; esto significa que a mayor superficie, el intercambio de material (nutrientes) es muy rápido y esto conlleva a la asombrosa velocidad de reproducción o multiplicación que se puede observar en el medio de cultivo de las bacterias

2.3 CULTIVO DE MICROORGANISMOS

¿Por qué la necesidad de realizar el cultivo de microbios?. Para responder a ésta pregunta, se considerará un ejemplo muy simple: Acaso no es cierto que un botánico puede identificar a las plantas sobre el terreno por simple observación directa, en el caso en que no tenga acceso al lugar donde crecen las plantas puede aún identificarlas valiéndose de las colecciones de plantas disecadas.

Los profesionales tales como : el biólogo, los químicos u otros investigadores dedicados al estudio de la bio-extracción de algunos metales pueden proceder en forma similar al botánico, pero la observación directa de unas gotas de alguna sustancia (medio de cultivo por ejemplo) que contenga microbios en suspensión la realiza al microscopio, es de gran ayuda para identificar géneros microbianos tales como los protozoarios, hongos, algas y bacterias.

Pero cuando interesa estudiar los parámetros

que influyen en la reproducción microbiana, tales como: la acidez (pH), temperatura, presión, cantidad de oxígeno, etc., o estudiar la morfología del mismo, ya que ella cambia con las condiciones del medio en que viven, es mejor realizar el cultivo microbiano para obtener una población razonable de estos seres diminutos.

Para el presente caso en el que se ha empleado Bacterias del género *Thiobacillus-ferrooxidans*, es poco lo que se puede aprender por observación directa de las células, ya que el objetivo es interpretar el efecto que tienen algunos parámetros tales como: Nutrientes, efectos del oxígeno, temperatura, efecto de la luz, etc. Necesariamente para conseguir el objetivo propuesto se requiere del uso de una población bacteriana razonable.

2.3.1. MEDIOS DE CULTIVO

Los medios de cultivo utilizados para microorganismos son soluciones acuosas diluidas, que contienen sustancias químicas que son asimiladas por las células. Los cultivos simples contienen pocas sales minerales tales como: fosfatos de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de amonio, etc. En un medio de cultivo como los mencionados sólo pueden desarrollarse microorganismos que consumen CO_2 contenido en el aire, acompañado de la utilización de energía de la luz (al-

gas); en el caso de algunas bacterias que oxidan ciertos elementos químicos no utilizan la energía de la luz.

Existen microorganismos que sintetizan las sustancias de carbono (orgánico) como el *Thiobacillus-Ferrooxidans*, pero otros microorganismos no tienen esa facultad de síntesis de sustancias, ello obliga a que se adicione al medio de cultivo alguna sustancia que suministre el carbono necesario para que se reproduzca el microorganismo; en referencia a los microbios que se emplean en la hidrometalurgia se puede mostrar una extensa lista de medios de cultivo, esto se ilustra con más detalle en el capítulo de la parte experimental. (Capítulo VIII, Cuadro Nº 8 - 3)

2.3.2 ESTERILIZACION DEL MEDIO DE CULTIVO

Como hay microbios en todas partes, la condición para obtener la pureza de un medio de cultivo de microorganismos es la de cultivar en medios apropiados, esto se logra esterilizando el medio acuoso o medio de cultivo. A continuación se explica en que consiste la esterilización. Este proceso consiste en la destrucción total de microbios en el medio de cultivo, que se realiza en la mayoría de los casos por calentamiento húmedo. El aparato más usado para la esterilización de un medio acuoso es el autoclave, donde la temperatura puede elevarse a 120°C - 121 °C

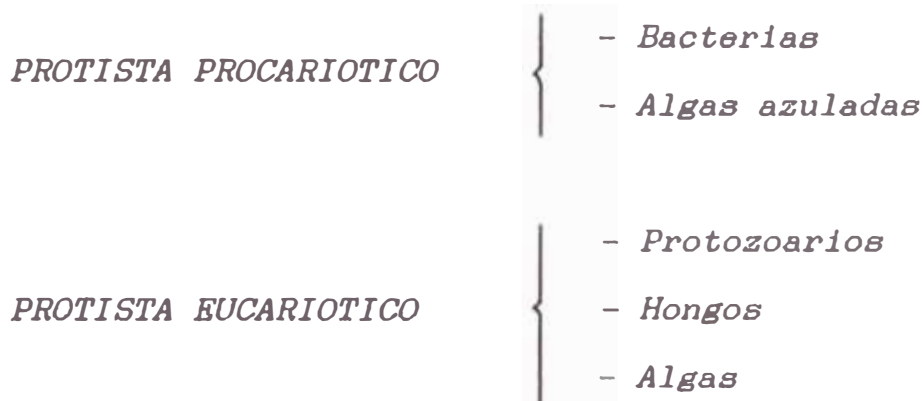
con una presión de 15 lb de vapor sobre la presión atmosférica, la cual en 15 minutos es suficiente para destruir toda forma de vida microbiana conocida. En verdad, el tiempo de esterilización está en función de la cantidad de microorganismos presentes en el medio de cultivo; teniendo presente que la muerte de una población microbiana por diversos factores es exponencial. La esterilización también se realiza en un medio seco, esto es con los rayos ultravioleta, método que no se emplea para esterilizar bacterias del género *thiobacillus* - ferroxidantes. ¿Como se realiza la esterilización a los medios de cultivo que contienen sustancias nutricionales sensibles al efecto del calor? en este caso no se realiza propiamente la esterilización, sino una filtración a través de ciertos materiales apropiados, tales como la placa de nitrato de celulosa (poros menores a $0,4 \mu$).

Una vez esterilizado el medio de cultivo, puede ser inoculado por las especies deseadas, y al cabo de horas tendremos millones de microorganismos (alta densidad) los que servirán para realizar diversos estudios.

2.4 ESTRUCTURA DE LA CELULA EN MICROORGANISMOS

Debe tenerse presente que en los microbios es muy difícil distinguir entre animal y vegetal, esto

porque algunos microbios se parecen a las plantas, tales como las algas, otras se asemejan a animales como es el caso de los protozoarios. Esto conlleva a que las bacterias no puedan clasificarse como animales o vegetales, porque presentan características tanto de uno como del otro. Es por esta razón que los microorganismos se ubican en un tercer reino denominado Protista, es decir seres unicelulares o pluricelulares que carecen de tejidos; esto origino que los protistas dividieran a los microbios en dos grupos:



A continuación se precisa la diferencia en la organización celular de los grupos mencionados:

En las células Eucarióticas, el núcleo está aislado del Citoplasma por una membrana nuclear, y poseen esteroides, mientras que en el grupo de Células Procarióticas no poseen Esteroides. En la Célula Procariótica la única membrana que rodea al núcleo es la membrana Citoplasmática, ésta a su vez está rodeado de una cubierta denominada PARED CELULAR que protege a la

célula de los cambios osmóticos con el medio. La membrana citoplasmática confiere la forma que caracteriza a las bacterias: esféricas (cocos), cilíndricas (bacilos) y espiral (esperilos).

2.4.1 PARED CELULAR DE BACTERIAS

Es una cubierta rígida cuyo espesor varía de 0,02 a 0,05 micras, sin ella las bacterias tendrían formas irregulares en el medio sólido y forma esférica cuando están suspendidos en medio líquido.

La estructura química de la pared celular es muy compleja, cambia de forma cuando las bacterias (Células) colisionan con un cuerpo sólido. El investigador TRIBUTSCH considera que la pared celular esta rodeado de un complejo polisacarido nitrogenado la que recibe el nombre de CAPSULA.

2.4.2 MEMBRANA CELULAR

El espesor de la membrana es menor que la pared celular (0,008 - 0,01 micrónes), y tiene una función biológica mucho más importante que de la pared celular, siendo ella la propiedad selectiva que tiene esta membrana respecto a la permeabilidad a distintas sustancias en solución la cual se da en el medio de cultivo, proceso de biolixiviación de minerales como Uranio, Cobre, etc.

La membrana celular está conformada por

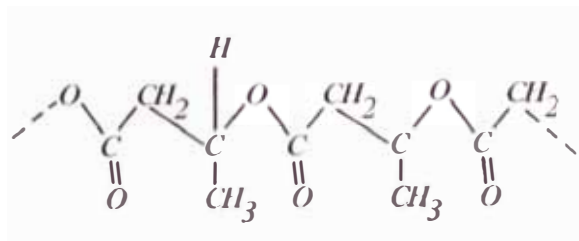
macromoléculas muy especiales, llamadas lipoproteínas.

2.4.3 CITOPLASMA

En el citoplasma de la célula bacterial se observa la región nuclear, presentando generalmente no más de 3 núcleos, donde ésta región nuclear contiene el ADN.

El ADN es una molécula circular, es decir no contiene extremos. La longitud de esta molécula es aproximadamente mil veces mayor que la propia bacteria, cuyo peso molecular está alrededor de 3×10^9 .

Las partículas que intervienen en la síntesis de las proteínas son las ribosomas, que están distribuidas uniformemente en el citoplasma, también tiene la función de depósito de reserva materiales de naturaleza diversa. Una de estas sustancias de reserva en ciertas bacterias es un polímero formado por unidades de ácido β - hidroxibutírico.



Este compuesto no se ha encontrado en otros seres, excepto en las bacterias; es una fuente de reserva de carbono y energía de diversas especies de bacterias.

2.4.4 FLAGELOS

Son órganos de locomoción de las bacterias, ellas tienen una pared rígida, cuyo origen esta en el citoplasma y se observa en bacterias de forma alargada, mientras que en las bacterias de forma esférica sólo tiene muy pocos flagelos.

Los flagelos están compuestos de proteínas únicamente y ésta se llama flagelina, para cada bacteria esta sustancia es distinta.

Hasta ahora todavía no se tiene idea de como se origina el movimiento o cómo se transmite el impulso a lo largo del flagelo. ¡Atención!. El movimiento requiere de energía y cuando la bacteria es colocada en situaciones en que se agota sus fuentes de energía el movimiento cesa. Bacterias deflageladas pueden regenerar el flagelo en corto tiempo. Esto asegura que las células tienen reservas de flagelita listas para ser empleadas en el crecimiento de nuevos flagelos.

2.5 FISILOGIA MICROBIANA

2.5.1 METABOLISMO

La propiedad más importante para una célula microbiana es su crecimiento. Por ello se debe tener cuidado con el uso adecuado del termino "Crecer". Cuando se dispone de una solución saturada de una sal y se sumerge un cristalito de dicha sal, se observa su crecimiento, de igual forma el crecimiento de una célula microbiana también tiene un proceso parecido en forma externa, ya que la célula para crecer tiene que tomar compuestos químicos simples del medio exterior, previa modificación apropiada para construir su estructura celular llegando eventualmente a la división o duplicación en forma ordenada de no ser así las propiedades de la célula de una generación a otra variaría profundamente.

Las sustancias químicas tomadas del medio exterior, por la célula, no solamente suministra los materiales de construcción, sino también la energía necesaria para efectuar el trabajo tan complicado, de modificar sustancias y convertirlas en sus macromoléculas, para esto, el único tipo de energía empleada por la célula es la energía química. Esta energía es extraída por la célula de las sustancias químicas del medio exterior para luego ser almacenada en un depósito central, donde la energía está en la forma de

Acido Adenosina Trifosfórico (ATP), esta energía es utilizada en los diversos trabajos celulares, como el acto inherente de crecer.

Las células al tomar las sustancias químicas del medio exterior, las transforma mediante una *SERIE DE REACCIONES* que se denomina *METABOLISMO*. Estas reacciones básicamente pueden ser de los siguientes tipos:

- a) Reacciones que permiten transformar las estructuras de las sustancias químicas tomadas del medio para adaptarlas de acuerdo a su necesidad (síntesis).
- b) Reacciones que permiten obtener la energía química a partir de las sustancias tomadas del medio exterior.

2.5.2 PROTEINAS CATALITICAS

Todas las reacciones químicas que ocurren dentro de la célula son catalizadas por sustancias denominadas *enzimas*. Estas parecen no intervenir en la reacción química, pero aceleran la velocidad de reacción celular. Sin ellas, las reacciones celulares ocurrirían espontáneamente con extrema lentitud o no reaccionarían en lo absoluto. Esto conlleva a pensar que sin las *enzimas* el metabolismo sería imposible, es decir, no habría crecimiento celular o reproducción microbiana.

Una célula microbiana consta de un gran número de Enzimas diferentes, donde cada una de ellas cataliza una reacción específica o un grupo de reacciones que están inter-relacionados.

Hay varias condiciones que influyen en la acción catalítica de las enzimas, tales como: temperaturas, nutrientes, acidez, presencia o ausencia de oxígeno y dióxido de carbono, etc.

Estos parámetros son de suma importancia no solamente en el crecimiento o reproducción microbiana, sino también en el proceso de Bio-lixiviación de metales.

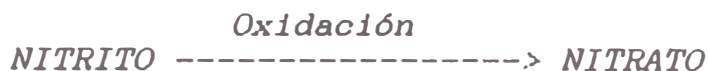
2.5.3 OXIDACION POR MICROORGANISMOS

Los microorganismos tales como hongos, protozarios y la mayoría de bacterias usan energía química contenida en ciertos compuestos químicos del medio, esto significa que la oxidación puede ocurrir tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos.

Primer caso. Las bacterias del género Nitrosomonas utilizan energía liberada por la reacción:



Segundo caso: Otras bacterias como el Nitrobacter toman el nitrito y obtienen energía por la oxidación del mismo:



Estas bacterias son de mucha importancia en la agricultura por ser sintetizadores de alimentos nitrogenados de las plantas.

En el campo de la Hidrometalúrgia, también contamos con muchos géneros de bacterias, como el Thibacillus Ferrooxidans que obtiene su energía de la oxidación del fierro y del azufre. En general esto demuestra que las bacterias están dotadas de una capacidad para realizar el proceso de oxidación, no solamente de sales ferrosas o sulfhídricas, sino también de amoniaco, nitrito, hidrógeno gaseoso, ¡hasta los compuestos orgánicos diversos!, pero eso no es todo, también se conocen bacterias con respiración anaeróbica, que realizan el proceso inverso a las bacterias del género Nitrobacter, por citar un caso.

*De lo mencionado anteriormente, se puede afirmar que la oxidación Biológica es un proceso de **TRANSPORTE DE ELECTRONES**, esto equivale a decir que una parte del sistema cede electrones (se oxida) y otro recibe o acepta electrones (se reduce).*

La energía contenida en los electrones

capturados se transforma en energía de ATP por una serie de reacciones complejas, cuyo mecanismo es en gran parte desconocido.

El ATP se obtiene por la reacción siguiente:



donde: ADP es el adenosindifosfato

Esta síntesis requiere de energía por una razón, los enlaces fosfóricos formado (ATP), contienen una considerable cantidad de energía y esto se logra aprovechando la energía del electrón tomado del medio. Esta transferencia de energía, del electrón al enlace forfórico de ATP se denomina "fosforilación oxidativa".

2.6 AUTODUPLICACION DE LA CELULA MICROBIANA

La autoduplicación consiste principalmente en la formación de dos células a partir de una, esto es la producción de un conjunto de Macromoléculas idénticas a las ya existentes.

Téngase presente que duplicar una célula no es copiar exactamente todas las macromoléculas a la vez, porque las fases de duplicación tienen que ser ordenadas, pero jerárquicamente, comenzando por la más importante de la cuál dependen todas las otras macromoléculas.

De todas las macromoléculas de una célula, las más importantes son: Los ácidos nucleicos y las proteínas. Los ácidos nucleicos son los únicos en verdadera autoduplicación celular y tiene dos funciones principales.

1. Autoduplicarse fielmente su estructura
2. Sirven de modelo para la síntesis de proteínas.

Las proteínas en su mayoría tiene una actividad enzimática, es decir que cataliza la síntesis de todos los componentes celulares. El proceso de autoduplicación celular sigue los pasos que se indican:

- a. Los ácidos nucleicos son duplicados.
- b. Los ácidos nucleicos son transformados en proteínas específicas.
- c. Todas las reacciones químicas de la célula son catalizados por enzimas (proteínas).

La duplicación del ácido nucleico como proceso químico debe ser catalizado por enzimas, en otras palabras los ácidos nucleicos tienen un plan de construcción de las proteínas. El conocimiento de la estructura y función de los ácidos nucleicos y de las proteínas es de suma importancia para entender el proceso de autoduplicación de la célula.

2.7. ESTUDIO DE LA BACTERIA

En esta parte se describe en forma general el estudio de crecimiento, etapas o fases y los movimientos de células como base a las funciones principales que tiene la bacteria.

2.7.1 CRECIMIENTO DE LA BACTERIA

Esta función fue estudiada con mucho detalle en bacterias, porque las observaciones son más fáciles que en otros microorganismos. Básicamente el crecimiento bacterial puede ser estudiado por muchos métodos, algunos de ellos son:

- a. Conteo de bacterias en el microscopio, cada cierto tiempo.
- b. Medición de la turbidez en el cual se desarrolla la célula.
- c. Medición de la masa de la célula (centrifugación y pesado).

Para muchos trabajos de investigación, en cuanto al crecimiento se refiere, es muy empleado el método (b) por su sencillez a la medición cuando se dispone de un equipo, como el FOTOCOLORIMETRO; para el trabajo de tesis se ha empleado el método (a), porque tiene una cierta ventaja relativa con otros métodos, es decir, que con este método se realiza el conteo de la bacteria en forma directa en un tiempo muy corto apro-

ximadamente (3`). Es el método empleado frecuentemente en las plantas de Biolixiviación.

La célula bacterial se alarga poco a poco, formando en el centro de la célula un tabique, quedando prontamente dos células, este proceso puede durar de unos minutos a inclusive horas; esto implica que en todo cultivo bacteriano, la reproducción o multiplicación no se mantienen al mismo ritmo, debido al efecto de la cantidad de nutrientes del medio de cultivo, al auto - envenenamiento por los desechos que las bacterias acumulan en el medio donde se desarrolla el crecimiento y otros factores como pH, temperatura, oxígeno, dióxido de carbono, luz o la oscuridad.

2.7.2 FASES DE CRECIMIENTO

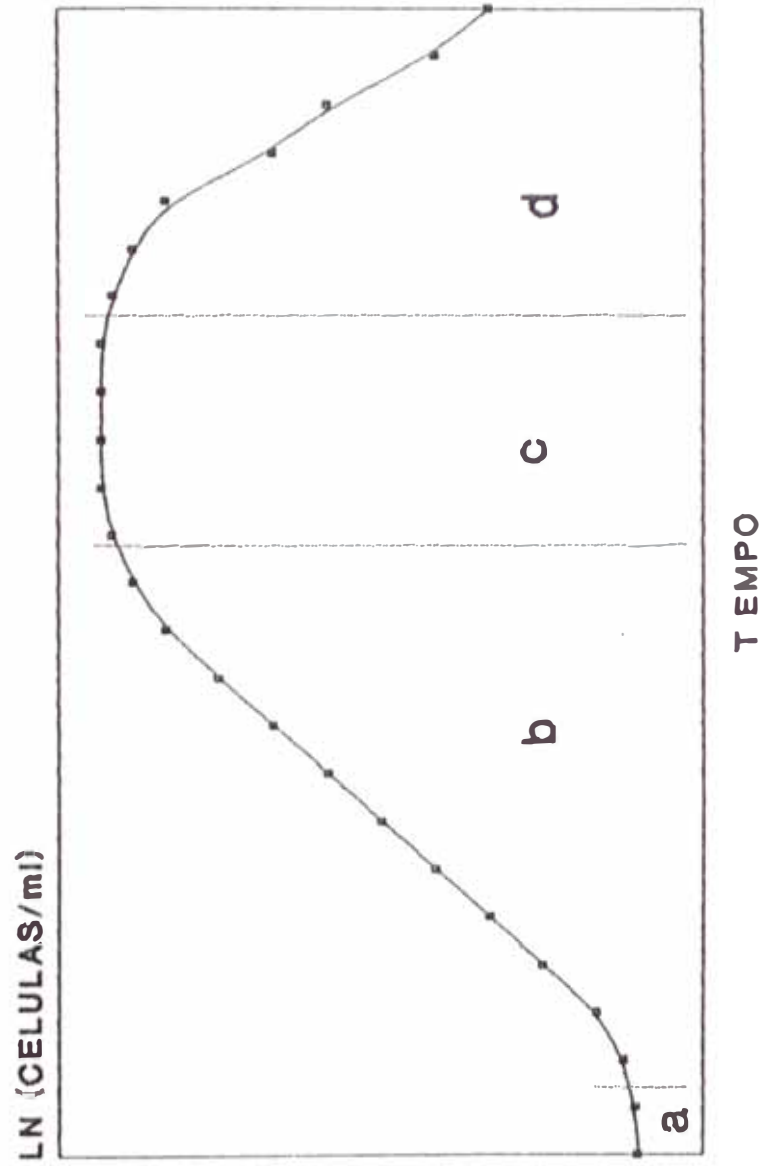
Cuando se estudia el incremento de la población bacterial a partir de un número de células inoculadas a un medio de cultivo se logra obtener en forma genérica la figura N^o 2-1.

En ella se aprecia las fases de crecimiento, de la multiplicación y muerte de la célula bacteriana en un medio de cultivo.

(a). FASE DE ADAPTACION, INCUBACION O CRECIMIENTO

En esta fase, las células se alargan sin dividirse, están preparándose para entrar en activa reproducción o multiplicación.

FIG. Nº 2-1
FASES DE CRECIMIENTO CELULAR



(b). FASE DE REPRODUCCION O MULTIPLICACION

La velocidad de reproducción o multiplicación de las células en el medio de cultivo aumentan en forma logarítmica. En esta fase es donde la célula se multiplica a la máxima velocidad, a las condiciones del cultivo.

(c). FASE ESTACIONARIA

Puede considerarse a ésta fase como aquella en la cual la reproducción o multiplicación neta es cero. Es una fase de equilibrio dinámico donde la multiplicación esta balanceada con aquellas células que mueren debido a los siguientes casos:

- 1.- Cuando las sustancias químicas (nutrientes) del medio de cultivo están agotándose.*
- 2.- Acumulación de sustancias de desechos celular en el medio de cultivo, que afectan como sustancias inhibidoras al crecimiento y reproducción celular.*
- 3.- Las condiciones en el medio de cultivo no son adecuadas (Temperatura, pH, agitación, presión)*

(d). FASE DE MUERTE

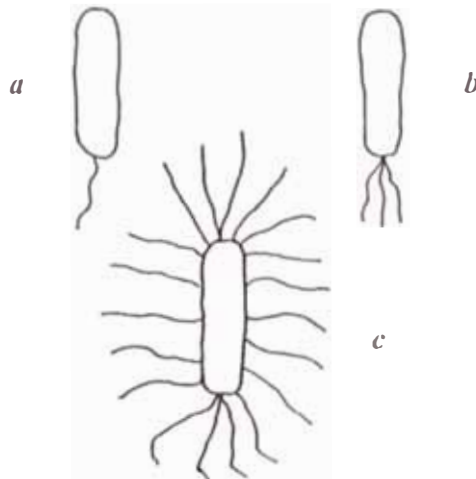
Las células, en esta fase tienen una muerte rápida, si la curva tiene una pendiente pronunciada, puede significar que las células hayan adquirido alguna forma

de resistencia tales como las esporas, que les permite mantenerse vivas por un tiempo relativamente largo.

El tiempo de cada fase depende de muchos parámetros, como por ejemplo el efecto de Acidez, Oxigenación, Temperatura, etc.

2.7.3 MOVIMIENTO CELULAR

Los flagelos son órganos muy largos y delgados que le permite a las células de pared rígida a trasladarse de un punto a otro en el medio de cultivo. No todas las bacterias cuentan con el flagelo. Este no puede ser visto por los métodos microscópicos normales y solo puede verse usando técnicas de tinción.



Tres tipos de inserción de flagelos en Bacterias.

Es de suma importancia que las células tengan movimiento traslacional. Como el acercamiento o alejamiento de ciertos estímulos químicos o físicos.

cuando desean dirigirse a regiones donde se concentra el oxígeno (bacterias aeróbicas) ó a algún compuesto químico en el medio de cultivo; o también hacia el agente que ejerce la atracción oscuridad o luz. Este órgano de la célula le permite acercarse o alejarse dependiendo de su necesidad.

CAPITULO III

CARACTERES QUIMICO BIOLÓGICO DE LAS BACTERIAS

3. CARACTERISTICAS QUIMICO-BIOLÓGICAS DE LAS BACTERIAS

3.1 INTRODUCCION

Muchos microorganismos se emplean para extraer metales de menas de baja ley. Estos microorganismos solubilizan los metales durante la Bio - lixiviación, teniendo mucha ventaja sobre técnicas, tales como la Hidrometalurgia, Pirometalurgia, etc., respecto a la menor perturbación del medio ambiente (contaminación).

En este capítulo se dará las características básicas de las bacterias y algunos mecanismos bioquímicos que involucran el proceso de lixiviación Bacteriana.

3.2 BACTERIA Y NATURALEZA

Los microorganismos son los seres que más abundan sobre nuestro planeta, con las capacidad de sobrevivir en las condiciones que ningún ser puede soportar. A continuación se citan algunas de éstas:

- a.- Se desarrollan a temperaturas que varían desde -20°C a 104°C .
- b.- Soportan concentraciones de hidrogenoides en rangos de pH menores de 1,0 hasta pH de 12,0

- c.- Soportan presiones, que van desde 0,1 atm. hasta 1 000 atm.
- d.- Soportan presiones osmóticas desde agua destiladas a concentraciones alta de sales.

Dentro de los microorganismos se distinguen las bacterias por su capacidad de reproducirse por división celular, no poseen membrana nuclear en general, por tener una estructura rígida (pared celular).

3.2.1. IDENTIFICACION DE BACTERIAS

Es muy importante identificar bacterias, esto se logra haciendo uso de coloraciones del cuerpo del microorganismo, puesto que las Bacterias son !incoloras!.

En 1884 CHRISTIAN GRAM descubrió, que ciertas Bacterias permanecían teñidas con colorantes histológicos usados en el estudio de los tejidos humanos, mientras que éstos se decoloran con solvente. Esta TINCION lleva actualmente el nombre de GRAM y puede separar a las bacterias en dos grandes grupos :

a.- GRAM POSITIVO

En éste grupo están aquellas bacterias que retienen la coloración de violeta de genciana y no se decolora por el solvente (alcohol).

b.- GRAM NEGATIVAS

Son aquellas bacterias que pierden la coloración de violeta de Genciana con el alcohol, necesitando ser teñidas por otro colorante como el ácido SAFRAMINA, que adquiere una coloración roja.

En la actualidad con el desarrollo del microscopio electrónico, así como con los avances en los estudios de la composición química, se ha llegado a saber que el comportamiento frente a la TINCION (coloración), corresponde a diferencias ultraestructurales y bioquímicas entre Bacterias.

3.2.2 CLASIFICACION DE BACTERIAS

Desde que se inició la bacteriología, se motivó al estudio de aquellos microbios dañinos a la salud; recién en el siglo pasado, se descubrieron a los agentes Etiológicos de la mayoría de las enfermedades infecciosas. O sea, las bacterias patógenas tal como PASTEURELLA PESTIS, éste germen mató 25 millones de personas en Europa durante el siglo XIV, y a pesar de que por nuestra parte, con los medicamentos, desechos de nuestra industria y nuestras ciudades se han matado millones de millones de estos agentes patógenos. La inmensa mayoría de microbios habitantes de la Tierra durante los últimos miles de millones de años, no se han percatado de nuestra presencia.

Sin embargo, a fines del siglo pasado y prin-

cipios del actual, dos importantes investigadores WINOGRADSKY Y BEIJERINCK, realizaron estudios muy interesantes sobre los microorganismos del suelo. Con ello se dieron pautas de la plena participación de las bacterias en áreas tan diferentes, como la Geología, la Agronomía y la Metalurgia extractiva.

Las bacteria propias del suelo que solo pueden prosperar en presencia de agua, pertenecen metabólicamente a dos tipos:

3.2.2.1. BACTERIAS HETEROTROFAS

Aquellos que utilizan compuestos orgánicos sintetizados por otros organismos como fuente de energía y que por no presentar características de patogenicidad son denominados SAPROFITAS.

3.2.2.2 BACTERIAS AUTOTROFICAS

Bacterias que utilizan fuentes de energía diferentes de la materia orgánica. Este microorganismo tampoco provoca enfermedades. Las fuentes de energía aprovechadas por las bacterias autotróficas pueden ser la luz, en el caso de bacterias fotosintéticas o de algunas reacciones químicas de compuestos inorgánicos; como es el caso de bacterias quimiolitotróficas.

Las bacterias, en general, intervienen en los ciclos ecológicos. Los heterotróficos descom-

ponen los compuestos orgánicos dejando listo para su posterior mineralización; las bacterias Autotróficas oxidan los minerales que son asimilados posteriormente por otros seres vivientes. De este modo se conocen los ciclos de carbono, nitrógeno, oxígeno, azufre y otros elementos químicos. La bacteria del género *Thiobacillus Ferrooxidans* desempeña un trabajo muy importante en la extracción de metales, porque obtiene su energía de compuestos sulfurosos, ferrosos, etc.

3.3 IMPORTANCIA DE LAS BACTERIAS EN LA MINERIA

Existen muchos microorganismos empleados para bio-extracción y bio-concentración de metales, tales como el microorganismo del género *thiobacillus*, *sulfobacillus*, levaduras y hongos, etc. Esta nueva tecnología tiene gran importancia futura para el abastecimiento de metales preciosos tales como oro, plata y metales estratégicos como el URANIO en nuestro País.

La bio-lixivación tiene una creciente importancia en el tipo de tratamiento de depósitos marginales, como el cobre y depósitos Uraníferos y Auríferos. Esto se justifica porque los límites tolerables en la extracción del metal no son rentables por los métodos convencionales, además las plantas de tratamiento con microorganismos (bacterias) se pueden construir con menor costo y menos demanda de mano de obra.

En la actualidad hay más de 20 metales que pueden obtenerse con el proceso microbiológico, esto implica demanda en microbios, productos de nutrición, equipo de proceso, etc. Por consiguiente la Bio-lixiación se convierte en una alternativa de extracción de metales cuando:

- 1.-La extracción de metales es demasiado costoso empleando métodos convencionales.
- 2.-El proceso convencional genera o produce contaminación del medio atmosférico, y del agua, originando que el control del mismo sea difícil y muy costoso.
- 3.-El valor del metal de la mena es demasiado bajo.

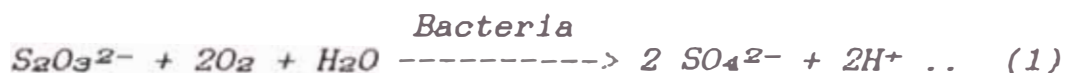
Considerando que los procesos de solubilización de metales tales como el Cobre, el Uranio, etc., son una reacción de oxidación; las bacterias más útiles serán aquellas que presentan mayor capacidad oxidativa y que pueden desarrollarse en ambientes constituidos netamente de minerales.

3.4 OXIDACION BIOQUIMICA DE LAS BACTERIAS DEL GENERO THIOBACILLUS

Estas bacterias son GRAM - NEGATIVO que pueden desarrollarse a diferentes pH; algunas de ellas son mostradas por su importancia en el proceso metalúrgico:

<i>BACTERIA</i>	<i>pH</i>
<i>Thiobacillus Thioparus</i>	6 - 8
<i>Thiobacillus Denitrificans</i>	6 - 8
<i>Thiobacillus Ferrooxidans</i>	1,2 - 6
<i>Thiobacillus Thiooxidans</i>	0,5 - 6

La característica común del género, es la oxidación del tiosulfato al estado de sulfato según la siguiente reacción general:



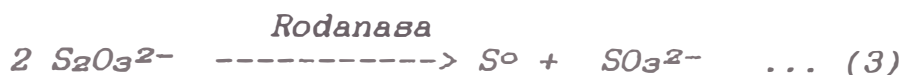
Los dos átomos de azufre son oxidados mediante una ruta metabólica, proporcionada por el sistema Enzimático de la bacteria; a continuación el mecanismo:

El tiosulfato puede ser sometido a una ruptura por tiosulfato reductasa, ruta propuesta por PECK (1960) utilizado por la bacteria *Thiobacillus thioparus*.



Otras enzimas como la RODANASA también son capaces de oxidar al tiosulfato según la reacción (3).

Esta enzima fué encontrado en la bacteria *Thiobacillus denitrificans* (1967) y en la *Thiobacillus ferrooxidans* (1969).



En las reacciones (2) y (3) se pueden observar la producción del ión sulfito (SO_3^{2-}), especie que en presencia de la Enzima Sulfito Oxidasa puede ser oxidado a sulfato.



La Enzima sulfito oxidasa fué aislada del *Thiobacillus Novellus* en 1965 por SUZUKI, posteriormente VESTAL Y LUNDGREN la aislarón del *Thiobacillus Thioparus* (1970) y del *Thiobacillus ferrooxidans* (1974).

3.4.1 OXIDACION DE AZUFRE Y SULFURO

De las reacciones (3) y (2), se ve que por mecanismos de las enzimas se producen compuestos de azufre oxidado y reducido, estos últimos son los sulfuros y el azufre elemental.

El S^{2-} es oxidado por Enzimas de tipo Sulfuro Oxidasa según la siguiente reacción:



El azufre elemental de la reacción (5) puede nuevamente ser oxidado en presencia de oxigenasa y glutación siendo reducido a sulfito, ecuación (6); para luego seguir los pasos metabólicos de la reacción (4).



CAPITULO IV

ASPECTOS BASICOS DE LA LIXIVIACION BACTERIANA

4. ASPECTOS BASICOS DE LA LIXIVIACION BACTERIANA

El proceso Bio - Hidrometalúrgico aprovecha las propiedades muy especiales que tienen ciertos microorganismos y las reacciones que estos originan en la superficie o sobre ciertos minerales. Es por esto que el proceso Bio - Hidrometalúrgico fué desarrollado para recuperar el cobre y que por primera vez su aplicación parece haber sido en el Rio Tinto - España (1752).

El crecimiento bacteriano se descubrió en 1888 por WINOGRADSKY en aguas que contenían fierro y formas oxidadas e insolubles de fierro; transcurrieron 40 años (1922) para que otros Investigadores (RUDOLFS Y HELBRONE - SOIL) reportaran la oxidación del sulfuro de Zn por ciertos microorganismos. Sin embargo el rol que cumplen los microorganismos no es comprendida sobre las transformaciones Geoquímicas hasta antes de 1947, año en que los Investigadores COLMER Y HANCKLE descubrierón y aislarón por primera vez la bacteria THIOBACILLUS FERROOXIDANS.

Una de las propiedades más importantes de la bacteria Thiobacillus - Ferrooxidans es su capacidad de acelerar enormemente la oxidación del ión ferroso (Fe^{2+}) al agente lixiviante ión férrico, Fe^{3+} . Otro rol que cumple la Bacteria mencionada, es que sabiendo perfectamente que los sulfuros metálicos expuestos al oxígeno

son oxidados al sulfato correspondiente y ácido sulfúrico, la velocidad de éste proceso se puede acelerar ! 10^8 ! veces por la actividad de la bacteria acidofílica fierro oxidante.

4.1 MICROORGANISMOS QUE AFECTAN LAS TRANSFORMACIONES DE MINERALES

Son muchas clases de microorganismos que afectan las transformaciones de minerales, incluyen Bacterias, Hongos, Algas, y Protozoarios.

Estos microorganismos son definidos como pequeñas partículas CATALITICAS que miden $1 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ donde un gran número de bacterias quimiolitotróficas han sido identificados con capacidad de oxidar sulfuros, azufre elemental e ión, Ferroso, Fe^{2+}

Desde el punto de vista Práctico, las bacterias de mayor importancia son :

THIOBACILLUS - FERROOXIDANS

Es la bacteria que tiene mayor interés metalúrgico, fué aislada por primera vez en 1947 de las aguas ácidas de una mina de carbón abandonada. Sus medidas típicas son $0,5 - 0,8 \mu\text{m}$. de ancho por $0,9 - 1,5 \mu\text{m}$. de

son oxidados al sulfato correspondiente y ácido sulfúrico, la velocidad de éste proceso se puede acelerar 10^8 veces por la actividad de la bacteria acidofílica fierro oxidante.

4.1 MICROORGANISMOS QUE AFECTAN LAS TRANSFORMACIONES DE MINERALES

Son muchas clases de microorganismos que afectan las transformaciones de minerales, incluyen Bacterias, Hongos, Algas, y Protozoarios.

Estos microorganismos son definidos como pequeñas partículas CATALITICAS que miden $1 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ donde un gran número de bacterias quimiolitotróficas han sido identificados con capacidad de oxidar sulfuros, azufre elemental e ión, Ferroso, Fe^{2+}

Desde el punto de vista Práctico, las bacterias de mayor importancia son :

THIOBACILLUS FERROOXIDANS

Es la bacteria que tiene mayor interés metalúrgico, fué aislada por primera vez en 1947 de las aguas ácidas de una mina de carbón abandonada. Sus medidas típicas son $0,5 - 0,8 \mu\text{m}$. de ancho por $0,9 - 1,5 \mu\text{m}$. de

largo, cuenta con un flagelo polar el cual le permite trasladarse en un medio líquido.

Su fuente de alimentación son las sustancias de forma reducida de Fierro y Azufre, que son comúnmente encontrados en los minerales de COBRE Y URANIO. Esta bacteria disuelve rápidamente los sulfuros metálicos, originando que estos pasen a solución como sulfatos. Luego son recuperados por procesos conocidos, tales como: Extracción por solventes, interoambio iónico, precipitación, etc.

Se hace mucho énfasis en ésta bacteria, porque diversos Investigadores reportarón que posee gran habilidad para adaptarse y ! sobrevivir ! en condiciones muy extremas, indicando incluso en las que éstas podrían ser fatales para otras formas de vida.

Esta bacteria oxida todo los sulfuros conocidos (ver el cuadro N^o 4-1) y ión ferroso, (Fe^{2+} en un rango de $4^{\circ}C - 35^{\circ}C$) y un pH de 1,0 - 4,8.

CUADRO N^o 4-1

ALGUNOS SULFUROS OXIDADOS POR THIOBACILLUS
FERROOXIDANS

<i>Covelita</i>	<i>CuS</i>
<i>Galena</i>	<i>PbS</i>
<i>Pirita</i>	<i>FeS₂</i>
<i>Esfalerita</i>	<i>ZnS</i>
<i>Milerita</i>	<i>NiS</i>
<i>Marcasita</i>	<i>FeS₂</i>
<i>Chalcosita</i>	<i>Cu₂S</i>
<i>Bornita</i>	<i>Cu₃FeS₄</i>
<i>Calcopirita</i>	<i>CuFeS₂</i>
<i>Molibdenita</i>	<i>MoS₂</i>
<i>Orpimenta</i>	<i>As₂S₃</i>

THIOBACILLUS ORGANOPARUS

Esta bacteria fue aislada por MARKOSKAYAN (1973) tiene la particularidad de oxidar solamente Azufre elemental y se desarrolla en un rango de pH de 1,5 a 5,0.

<i>PARAMETROS</i>	<i>CARACTERISTICAS</i>
<i>Forma</i>	<i>Alargada</i>
<i>Tamaño (μm)</i>	<i>0,5 - 0,7 x 1,1 - 1,8</i>
<i>Pared Celular</i>	<i>Gram negativo</i>
<i>Flagelo</i>	<i>- ó +</i>
<i>Fuente de energía</i>	<i>S⁰</i>
<i>Rango de pH (Optimo)</i>	<i>1,5 - 6,0 (3,0)</i>
<i>Fuente de Nitrógeno</i>	<i>NH₄⁺ , Urea</i>
<i>Relación de O₂</i>	<i>Aerobio estricto</i>
<i>Temp. de crecimiento</i>	<i>25°C - 30°C</i>

*El signo se refiere al Flagelo de las bacterias:
(-) indica la no existencia, y (+) indica existencia.*

THIOBACILLUS THIOOXIDANS

Aislado por SOKOLAVA Y KARAVAICO en 1964; KHELID y RAIPH en 1977, tiene la propiedad de oxidar Azufre elemental a temperaturas de 2°C a 35°C y valores de pH entre 0,5 - 5,0.

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<i>Forma de la Bacteria</i>	<i>Alargada</i>
<i>Tamaño (µm)</i>	<i>0.5 x 1.0 - 2.0</i>
<i>Pared Celular</i>	<i>Gram negativo</i>
<i>Flagelo</i>	<i>+ (uno)</i>
<i>Fuente de energía</i>	<i>S⁰, S₂O₃²⁻, S₄O₆²⁻</i>
<i>Rango de pH (Optimo)</i>	<i>0,5 - 6,0 (2,0 - 3,5)</i>
<i>Fuente de nitrógeno</i>	<i>NH₄⁺</i>
<i>Relación de O₂</i>	<i>Aerobio estricto</i>
<i>Temperatura de crecimiento (Optimo)</i>	<i>5°C - 40°C (28°C - 30°C)</i>

LEPTOSPIRILLUM FERROXIDANS

Esta bacteria fué aislada por el investigador MARKOS-YAN (1972) ;oxida solamente pirita y fierro ferroso.

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
<i>Forma</i>	<i>Espiralada, bordes redondos</i>
<i>Tamaño (µm)</i>	<i>0,2 - 0,4 x 0,9 - 1,1</i>
<i>Pared Celular</i>	<i>Gram Negativo</i>
<i>Flagelo</i>	<i>+</i>
<i>Rango de pH (Optimo)</i>	<i>1,5 - 4,0 (2,5-3,0)</i>
<i>Fuente de energía</i>	<i>Fe²⁺, Pirita</i>
<i>Temperatura óptima</i>	<i>30°C</i>
<i>Fuente de nitrógeno</i>	<i>NH₄⁺</i>
<i>Relación con el oxígeno</i>	<i>Aerobio estricto</i>

SULFOBACILLUS THERMOSULFIDOOXADANS

Utiliza azufre elemental, también sulfuroso e ión ferroso, Fe^{2+} , en presencia de 0,02 % de extracto de levadura, a temperaturas que están en el rango de $20^{\circ}C - 60^{\circ}C$ y a pH de 1,9 a 3,0.

Esta bacteria fué aislada por GOLOVACHEVA y KARAVAIKO en 1978, veamos algunas características de ésta bacteria termofílica.

PARAMETROS	CARACTERISTICAS
Forma de la Bacteria	Alargada
Tamaño Celular	0,6 - 0,8 x 1,0 - 3,0
Pared Celular	Gram negativo con cápsula
Fuente de energía	Sulfuros, S° , Fe^{2+}
Rango de pH (Optimo)	1,1 - 5,0 (1,7 - 2,4)
Temperatura (óptima) $^{\circ}C$	20 - 60 (50 - 55)
Formación de esporas	+
Fuente de nitrógeno	NH_4^+

SULFOLOBUS ACIDO CALDARIUS Y SULFOLOBOS BRIERLEYI

Son bacterias termófilicas que oxidan el azufre elemental en rangos de pH y temperaturas que se muestran en las características, siendo el primero aislado en 1972 por BROCK y COL y el sulfolobus Brierleyi en el año 1973 por Brierleyi

C A R A C T E R I S T I C A S		
PARAMETROS	S. ACIDOCALDARIUS	S. BRIERLEYI
Forma	Esférica	Esférica
Tamaño (um)	0,8 - 1,0	1,0 - 1,5
Pared Celular	Gram Negativo	Gram Negativo
Fuente de Energía*	Levadura, Peptona, Triptona	Levadura, Lactosa, Peptona, Triptona
Fuente de energía**	S ⁰	Sulfuros, Fe ²⁺ , S ⁰
Rango de pH (óptimo)	1,0 - 5,9 (2,0-3,0)	(1,5 - 2,0)
Rango de Temperatura	55°C - 80°C	45°C - 75°C
Temp. óptima	70 °C	70 °C
Relación con el O ₂	Aeróbico	Aeróbico

(*) Indica crecimiento en condiciones quimiolitotrófico

(**) Indica crecimiento heterotrófico / Mixotrófico

4.2 PARAMETROS LIMITANTES DE LA ACTIVIDAD BACTERIAL

Los microorganismos, en especial las bacterias, tienen una asombrosa facilidad para adaptarse al ambiente que las rodea. Es así como cambios originados en el medio de crecimiento provocan arreglos en su metabolismo y por ende en su macromolécula, Esto implica que se puede manipular el ambiente, pensando en la respuesta deseada de la célula.

Los parámetros que limitan el desarrollo de la actividad celular en un proceso de Bio-lixiviación son: la temperatura, la acidez, (pH), la composición de las sustancias químicas del medio de desarrollo celular (nutrientes), la solubilidad del Oxígeno y dióxido de carbono y la concentración de otras sustancias químicas en el proceso.

4.2.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La velocidad de crecimiento es afectada por la temperatura. Esto debido a que en los organismos de las bacterias no es posible el control de la temperatura por sí mismo, en comparación con el cuerpo del hombre, donde el control es efectuado por algún mecanismo del organismo.

Este factor es de singular importancia en los procesos de bio-lixiviación o bio-concentración de minerales. Porque influye, no solamente en la capacidad

EFFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ACTIVIDAD BACTERIAL

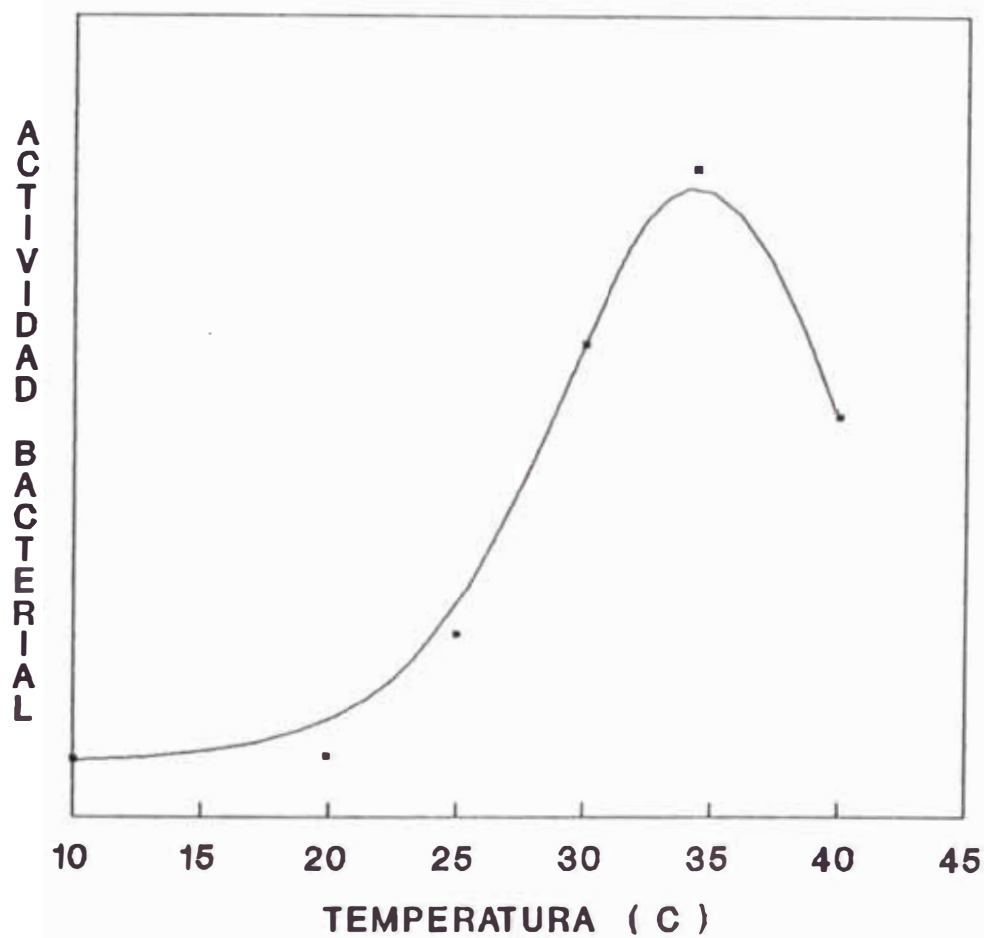


FIG. N 4-1

de crecimiento de las bacterias, sino también en la capacidad de respiración.

Investigaciones llevadas a cabo en Bacterias han definido la existencia de rangos de temperatura de crecimiento y respiratorios, al igual que rangos óptimos para las funciones vitales de estos microorganismos.

En general se puede afirmar que la máxima velocidad de extracción de un metal en proceso microbiológico, en especial con Bacterias *Ferrobacillus*, se alcanza a temperaturas que están en el rango de 35°C - 40°C . Sin embargo estos rangos de temperatura dependen de cada especie de mineral, Como se muestra, por ejemplo en el reporte siguiente:

MINERAL	TEMP. DE MAX. EXTRACCION
Sulfuro de Ni y Zn	35°C
Uranio	30°C - 35°C
Cobre (chalcopirita)	20°C - 35°C

El proceso microbiológico específicamente con bacterias de tipo *Ferrobacillos*, cesa a temperaturas que exceden a 45°C. Existiendo otros microorganismos, tales como las bacterias termofílicas, que tienen la capacidad de operar en el proceso de extraer o concentrar metales.

Cuando las temperaturas están por debajo de las óptimas también tienen efectos considerables. En la velocidad de crecimiento y por ende en la velocidad de extracción o concentración en el proceso Bio - Hidrometalúrgico. Investigaciones llevadas a cabo muestran que si la temperatura del medio se reduce en 18°C , la velocidad de lixiviación se reduce en 3 veces aproximadamente. Lo mencionado ha sido observado en disoluciones de minerales de URANIO, Zinc, Oxidación del Fe^{2+} etc.

Se recomienda, enfáticamente que éste parámetro debe ser considerado, prioridad número uno en el diseño de procesos de lixiviación con Bacterias, y para los tratamientos de minerales que se hallan en alturas frías, tales como el caso del yacimiento de Uranio de Puno - Macusani - Chapi donde las temperaturas bajan hasta $- 5^{\circ}\text{C}$ en épocas de invierno.

4.2.2 EFECTO DEL GRADO DE ACIDEZ

El efecto del pH en la actividad bacteriana es de suma importancia, para asegurar su crecimiento a un cierto rango de acidez, medidos en unidades de pH.

En un proceso de lixiviación es importante el ataque al mineral por CEPAS bacterianas del género adecuado que estén adaptadas a una vida en medio

ácido y en concordancia con las condiciones del proceso.

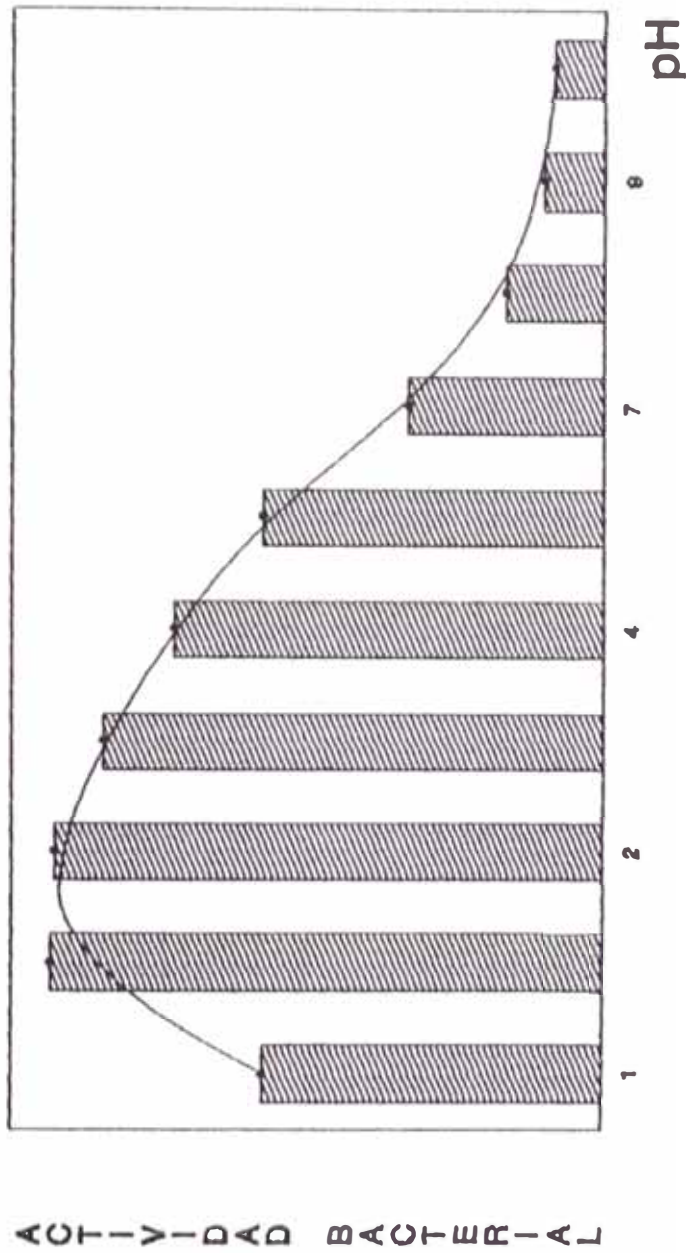
Para una mejor claridad se muestran las condiciones de acidez que se emplea en la lixiviación del mineral de Uranio Chapi - Macusani. El Uranio se solubiliza cuando el pH es menor de 3,0 con el riesgo de precipitar por efecto de los iones fosfatos, para evitar este inconveniente se debe lixiviar con una solución ácida menor de pH 1,5.

Cuando se realiza la lixiviación del Uranio con Bacterias del género *Thiobacillus* - ferroxidans, el microorganismo debe inocularse con un medio de vida adaptado a la acidez según la planificación de ensayo ; si se inocula a la acidez diferente al diseño, la Bacteria sufre un SHOCK que origina una inhibición "temporal" perjudicando la Biolixiviación e incluso puede encontrar la muerte.

En Conclusión, el factor de acidez debe tenerse en cuenta definitivamente cuando se realice el cultivo bacterial, y cuando se inocule la bacteria al substrato para la extracción del metal etc.

De éste parámetro depende el éxito o el fracaso de la solubilidad de los componentes del mineral y de la actividad propiamente de la bacteria dentro del proceso de Bio - lixiviación.

FIG. N° 4-2
EFFECTO DEL PH SOBRE LA
ACTIVIDAD BACTERIAL



4.2.3 EFECTO DE LA COMPOSICION DEL MEDIO

Cualquier ser viviente tiene un conjunto de requisitos nutricionales básicos. Las bacterias utilizadas en la lixiviación son microorganismos Autótrofos aerobicas del medio ácido.

Hay dos fuentes principales de energía para la vida autótrofa, quimiosintético:

- a.- Por oxidación de sustratos inorgánicos, amoniacó, nitratos, fierro ferroso, azufre, etc.
- b.- Absorción de la atmósfera de oxígeno O_2 y dióxido de carbono CO_2

El *thiobacillus ferrooxidans*, bacteria de mayor interés en los procesos Bio - Hidrometalúrgicos, tiene una especial necesidad por nutrientes tales como: CO_2 , $(NH_4)_2SO_4$, $FeSO_4$, $MgSO_4$, KCl , $Ca(NO_3)_2$, K_2HPO_4 , O_2 etc. Para la vida de Bacterias diferentes al *thiobacillus - ferrooxidans*, las cantidades de estos compuestos inorgánicos varían. La nutrición tiene mucha importancia para el aumento de la producción metálica, que están íntimamente relacionadas al aumento de crecimiento y reproducción celular. No se debe olvidar que los organismos vivientes, como las bacterias, requieren del agua, esto debido a que los nutrientes deben estar en solución para penetrar por la pared celular; Siendo imprescindibles el oxígeno, dióxido de carbono,

el nitrógeno y el fósforo.

Experimentalmente se demostró que el *thiobacillus ferrooxidans* obtiene el CO_2 exclusivamente del aire atmosférico. La disponibilidad de ésta resulta un factor limitante para la velocidad del crecimiento. Muchos investigadores dan cifras tales como 0.1%, 2.0% de CO_2 en el aire como óptimos. Estos reportes no son del todo concordantes, no existiendo tampoco acuerdo sobre si el efecto del dióxido de carbono es de tipo de saturación o si éste gas inhibe el crecimiento y reproducción a ciertas concentraciones relativamente elevadas, lo que implicaría que existe una concentración óptima.

Especial mención merece, el suministro del oxígeno para el adecuado metabolismo del *thiobacillus - ferrooxidans* siendo un microorganismo aeróbico obligado. Cuando se requiere oxidar el ión ferroso (Fe^{2+}) con éstas bacterias, LYLIKOV, MALOUF Y PRATER, han definido desde 1 a 3 volúmenes de aire por volumen de solución cada hora, para una efectiva oxidación.

4.3 MECANISMO BACTERIAL EN LA BIO-LIXIVIACION

En lo referente a los mecanismos que intervienen en el proceso microbiológico - metalúrgico, existen dos posturas que explican el proceso de solubilización de metales:

4.3.1 MECANISMO DIRECTO

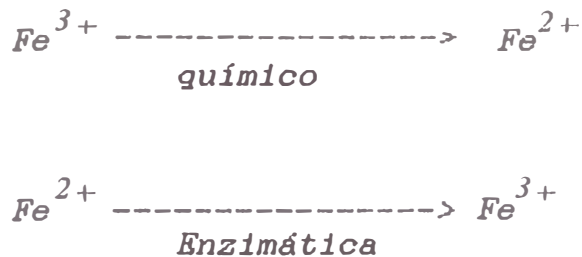
En éste mecanismo hay una acción de la bacteria sobre el mineral, es decir que hay un contacto físico de la bacteria con el substrato. Investigadores como RAZZEL y TRUSSELL explicaron la reacción del ataque directo en el sulfuro y en la calcopirita.



4.3.2. MECANISMO INDIRECTO

Para unos investigadores, la Bacteria actúa como mero catalizador en la transformación ferroso a férrico, siendo el férrico el que reacciona con el mineral.

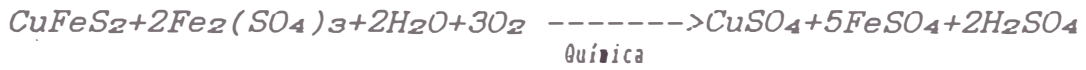
En la oxidación indirecta, el hierro sigue un ciclo del tipo:



Observar las siguientes secuencias de reacciones:

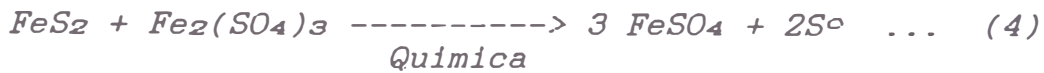


CALCOPIRITA



..... (3)

PIRITA



La reacción (3) fue confirmada por DUTRIZAC y MAC DONAL.

No existe una total claridad sobre los mecanismos de reacción en los procesos de bio-extracción. Lo más probable es que el mecanismo dependa de la naturaleza exacta del mineral

4.4 APLICACION DE LA LIXIVIACION BACTERIANA

La técnica de la Bio-lixivación en el tratamiento de minerales es posible aplicarla a los siguientes minerales de:

<i>Cobre</i>	<i>Manganeso</i>
<i>Cobalto</i>	<i>Arsénico</i>
<i>Níquel</i>	<i>Uranio</i>
<i>Zinc</i>	<i>Antimonio</i>
<i>Plomo</i>	<i>Oro</i>
<i>Bismuto</i>	<i>Plata</i>
<i>Molibdeno</i>	

Las aplicaciones comerciales de la lixiviación bacteriana en la industria minera han sido limitadas a dos minerales solamente: URANIO y COBRE, con la bacteria del género thiobacillus ferrooxidans.

En los minerales de Uranio la aplicación de esta tecnología en CANADA por la compañía Denison Mines Ltd. en Elliot Lake cerca de Ontario ha producido 360 000 Kg. de Uranio en el año de 1986. En los EE.UU. se produce cerca de 4 000 toneladas de uranio cada año por éste método. En otros países como Portugal, España, Sud-Africa, etc. están aplicando la lixiviación bacteriana a minerales de Uranio de baja ley con mucho éxito.

La recuperación del cobre por lixiviación bacteriana se práctica a escala industrial en diversos países tales como: Australia, EE.UU., Canada, Japón, etc. y a escala de laboratorio en Perú y Chile.

Estimándose que la gran mayoría de las 300 000 toneladas de cobre fueron recuperadas por lixiviación bacteriana en el año 1972.

*Una nueva aplicación del proceso de Bio-lixivación para recuperar metales preciosos como: el Oro y la Plata a partir de sulfuros refractarios están siendo desarrollados por muchas compañías en Canada, Perú, EE.UU., Sud-Africa, Rusia. Los sulfuros refractarios son los minerales como la Pirita y la Arsenopirita. En el tratamiento de extracción del Oro y la Plata se usa el *Thiobacillus ferrooxidans* que ataca a la pirita y la arsenopirita preferentemente en las dislocaciones o fracturas dando una oxidación parcial que es suficiente para dejar libre el Oro*

CAPITULO V

PRODUCCION Y DEMANDA DE URANIO EN EL MUNDO

5. PRODUCCION Y DAMANDA DE URANIO EN EL MUNDO

5.1 DESCRIPCION DEL URANIO

El uranio fue descubierto en 1789 por KLAPROTH y aislado por FELIGOT en 1841 dándole el nombre derivado del planeta URANO en honor del más antiguo Dios de los griegos que gobernaba el universo. Peligot demuestra que la sustancia descubierta por Martín Heinrich Klaproth era en realidad oxido de Uranio (UO_2).

El uranio es un elemento de transición interna miembro de la serie de los actínidos, es un metal muy activo químicamente, que reacciona con todos los elementos no metálicos. Se definen cuatro estados de oxidación (+3, +4, +5, y +6) de los cuales los estados tetra y hexavalente son los únicos presentes en los compuestos naturales.

El uso del uranio es limitado y su papel más importante en la actualidad es la generación de la energía eléctrica.

5.1.1 PROPIEDADES FISICAS

- <i>Peso específico (g/cm³)</i>	18,7
- <i>Punto de fusión (°C)</i>	1 100
- <i>Punto de ebullición (°C)</i>	4 000
- <i>Conductividad eléctrica (ohm-m)⁻¹</i>	4,0x 10 ⁻⁴

* ESTRUCTURA CRISTALINA DE LAS TRES FASES DEL URANIO

<i>Fase</i>	<i>Clase</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>
α	Ortorrónica	19,0
β	Tetragonal	18,11 (a 720°C)
Γ	Cúbica centrada	18,06 (a 805°C)

* TEMPERATURA DE ESTABILIDAD

<i>Fase de U.</i>	<i>Temperatura</i>
α	665 °C
β	665 °C - 775 °C
Γ	775 °C - 1 100 °C

5.1.2 PROPIEDADES QUIMICAS

<i>Simbolo</i>	<i>U</i>
<i>Número atómico</i>	<i>92</i>
<i>Peso atómico</i>	<i>238,03</i>
<i>Electronegatividad</i>	<i>1,7</i>
<i>Estado de oxidación</i>	<i>+3, +4, +5, +6</i>
<i>RADIO IONICO</i>	
<i>U⁴⁺</i>	<i>1,07 Å°</i>
<i>U⁶⁺</i>	<i>0,885 Å°</i>
<i>Configuración electrónica</i>	<i>[Rn] 7s²5f³6d¹</i>

5.2 APLICACION DEL URANIO

La energía nuclear es aprovechada por la humanidad desde hace solamente 50 años (primera reacción atómica controlada, 1942). Pero ésta energía esta llamada a ocupar un lugar sumamente importante en la resolución de problemas de todo orden con aplicaciones crecientes en Medicina, Agricultura, Diversas industrias, especialmente en la producción de alimentos y fundamentalmente en la GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA, cuyo consumo aumenta en forma vertiginosa. Este aumento reconoce una razón fundamentalmente económica puesto

que en centrales nucleares de tamaño adecuado la electricidad generada es más barata que la de cualquier otro origen; asimismo, las reservas de combustibles fósiles tienen un límite, además de ser necesario como materia prima en numerosas industrias y provocan contaminación ambiental. En cambio la energía nucleoelectrónica es limpia y las reservas de combustibles en forma de minerales radioactivos representan un potencial energético mucho mayor que todas las reservas conocidas de combustibles fósiles en su conjunto. Esto implica que la necesidad futura del uranio natural estará en función al crecimiento que tengan las centrales nucleoelectrificadas y de los tipos de reactores que se utilicen.

Los países productores de uranio del mundo occidental (WOCA) proyectan la demanda del uranio hasta el año 2005 basados en la capacidad generadora de electricidad nuclear.

Las proyecciones hechas por diferentes organizaciones (Departamento de Energía de Estados Unidos, Instituto del Uranio, NEA, e IAEA) se muestran en el cuadro Nº 5-1

CUADRO Nº 5 - 1
CAPACIDAD DE GENERACION ELECTRICA NUCLEAR
(GW(e))

ORGANIZACION	1 995	2 000	2 005
US-DOE	-----	315,35	353,35
U.-INSTITUTE	304,0	323,00	335,00
NEA / IAEA	309,5	335,8	351,1

NEA = Agencia de Energía Nuclear

IAEA = Agencia Internacional de Energía Atómica

5.3 PRODUCCION DE URANIO EN EL MUNDO

5.3.1 GENERALIDADES

La evolución de la industria del uranio en el mundo se puede reconocer como períodos siendo los principales los siguientes:

- 1.- El comienzo de la era energética nuclear (1938 - 1942)
- 2.- El período bélico y la primera etapa de expansión (1942 - 1957)
- 3.- El período de estabilización y de gran producción (1958 - 1965)
- 4.- Período de retracción y de transición (1965 - 1973)
- 5.- El mercado maduro y la segunda etapa de expansión, presente y futuro de la industria

del uranio.

El primer período comienza con el descubrimiento del fenómeno de fisión nuclear (fines de 1938) y trabajos de investigación para el aprovechamiento de la energía liberada en la fisión, por los países occidentales envueltos en la II guerra mundial

El segundo período se inicia con el desarrollo del proyecto MANHATTAN (fabricación de la bomba atómica) por los Estados Unidos, y la búsqueda sistemática de nuevos yacimientos de uranio en Canadá, Estados Unidos, y Australia, a efectos de disponer abundante materia prima para integrar una buena reserva de armas nucleares.

En el tercer período cesó la expansión de muchos países productores de concentrados de uranio, pues de ese momento la apertura de nuevas plantas, instalaciones de otras plantas fueron nulas. Y los establecimientos existentes pudieron seguir operando algunos años, usando la capacidad disponible, pero en distintas escalas especialmente en Canadá, Sud Africa, y Australia. Esto debido a que los EE.UU. (1959) anuncia que no renovaría sus contratos de compra de concentrados de uranio con Belgica, Canadá y Sud Africa, los que vencían en 1962 (Bélgica, Canadá) y 1965 (Sud Afri-

ca). Ya que su STOCK de uranio para fines militares estaba completo.

La retracción se agudizó en muchos países como en los EE.UU., donde sólo 13 plantas de 26 quedaron en producción, también Canadá sólo opero 1/10 de producción, al igual que Sud Africa bajo su producción a 1/4, correspondiendo a Francia el único país que incrementó su producción de uranio al igual que los productores pequeños como Argentina, España, Portugal, etc. sea para consumo interno o para exportar.

Al termino de 1973 se origina la crisis energética debido al incremento del precio del petróleo, como consecuencia, la única solución a corto plazo era recurrir a la producción núcleo-eléctrica, plegándose muchos países, pero la misma demandaría grandes cantidades de uranio (Cuadro Nº 5 - 2).

En la nueva coyuntura, era evidente que EE.UU. seguiría siendo el principal consumidor de uranio, sea para atender sus necesidades de sus centrales nucleares, y así como para asegurar el abastecimiento de aquellos que contribuyeran sus dos principales firmas para exportarlas (Westhinghamhouse y General Electric)

CUADRO N° 5-2
ANNUAL REACTOR RELATED URANIUM REQUIREMENTS TO 2005
(TONNES)

COUNTRY	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	2000	2005
ARGENTINA	114	126	109	100	147	150	148	235	189	180	230	180
BELGIUM	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	950	895 ^{a)}
BRAZIL	110	110	110	110	110	110	110	300	300	300	300	500
BULGARIA ^{b)}	390	390	600	850	850	850	1000	1000	1300	1300	1300	1300
CANADA	1400	1600	1700	1800	1900	1900	1900	2000	2000	2000	2000	2300
FINLAND	761	863	863	863	956	1049	1235	1235	1749	2263	2777	3805
FRANCE	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480	480
FRANCE ^{c)}	6200 ^{c)}		6050	7200	6750	7600	6600	7400	6750	7000	8000	7600 ^{a)}
GERMANY, F.R. OF	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3500	3500
INDIA ^{b)}	230	230	230	315	315	400	400	400	400	480	1400	1900
ITALY ^{c)}	191	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JAPAN	4800	6000	6400 ^{d)}	6600 ^{d)}	6900	7100 ^{d)}	7300 ^{d)}	7600 ^{d)}	7800 ^{d)}	8000 ^{d)}	9200	12800 ^{a)}
KOREA, REP. OF	1190	1390	840	1040	1070	1120	1470	1620	1420	1880	1820	1820
MEXICO	0	0	0	145	112	98	98	268	211	223	216	216
NETHERLANDS	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	280 ^{a)}
PAKISTAN	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
SOUTH AFRICA	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
SPAIN	1019	1300	1254	1100	1300	1150	1550	925	1350	1250	1670 ^{b)}	2150 ^{a)}
SWEDEN	1148	1325	1500	1400	1500	1500	1500	1500	1500	1300	1220 ^{f)}	600 ^{a)}
SWITZERLAND	566	570	529	529	537	537	532	532	532	532	680	680
UNITED KINGDOM	1500	1550	1700	1900	1900	1850	1800	2200	1600	1700	1700	1900
UNITED STATES	11850 ^{g)}	11150 ^{g)}	14190	13350	13420	13350	12540	13500	12770	12770	14080	13620
YUGOSLAVIA	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
OTHER WOC ^{e)}	740	740	740	740	740	740	740	740	740	740	1030	1100
TOTAL OECD	33499	34520	38148	38704	39032	39812	38547	40482	39127	39377	43575	46805
TOTAL WOC ^{a)}	36270	37503	40564	41541	41913	42967	41900	44432	42774	43567	48958	52908
NON-WOC ^{a)} REPORTED	1151	1253	1463	1713	1806	1899	2235	2235	3049	3563	4077	5105
TOTAL	37421	38756	42027	43254	43719	44866	44135	46667	45823	47130	53035	58013

a) Brown Book data.

b) IAEA estimate.

c) Secretariat estimate.

d) Interpolated estimates as provided by country.

e) Includes Taiwan, China.

f) Based on lower capacity forecast.

g) Enrichment feed deliveries.

5.3.2 DESARROLLO DE LA PRODUCCION DEL URANIO

La producción del uranio por los países productores del uranio del mundo occidental (WOCA) en 1989 ascendió a casi 34 910 ton. de uranio. Comparado a la producción de 1988 que fué de 36 628 ton. de uranio, hay una disminución de más de 1 700 ton. (4,7 %) aproximadamente. Lo calculado para 1990 es casi de 31 000 ton. de uranio, principalmente debido a la disminución de la producción en Canadá, Francia, Sud Africa y los EE. UU.

En la Fig. Nº 5 - 1 se muestra el desarrollo de las producciones anuales entre 1977 y 1990 por los países productores como Canadá, Australia, Nigeria, Sud Africa, Los EE.UU. y el resto del WOCA (incluyendo Argentina, Brasil, Bélgica, Francia, Alemania, India, Pakistan, Portugal, España y Yugoslavia)

La producción total de Uranio aumentó de casi 28 500 ton. en 1977 a un máximo de más de 44 000 ton. en 1980 y 1981 y bajan de allí, siguiendo la dirección de los precios del uranio al nivel esperado de 31 000 ton. de uranio en 1990.

La producción de uranio en los países no-WOCA (Bulgaria, China, CSFR, el antigua RDA, Hungría, Rumania y la ex-URSS) no están bien documentados, el siguiente cuadro Nº 5 - 3 muestra la producción aproximada de 1990.

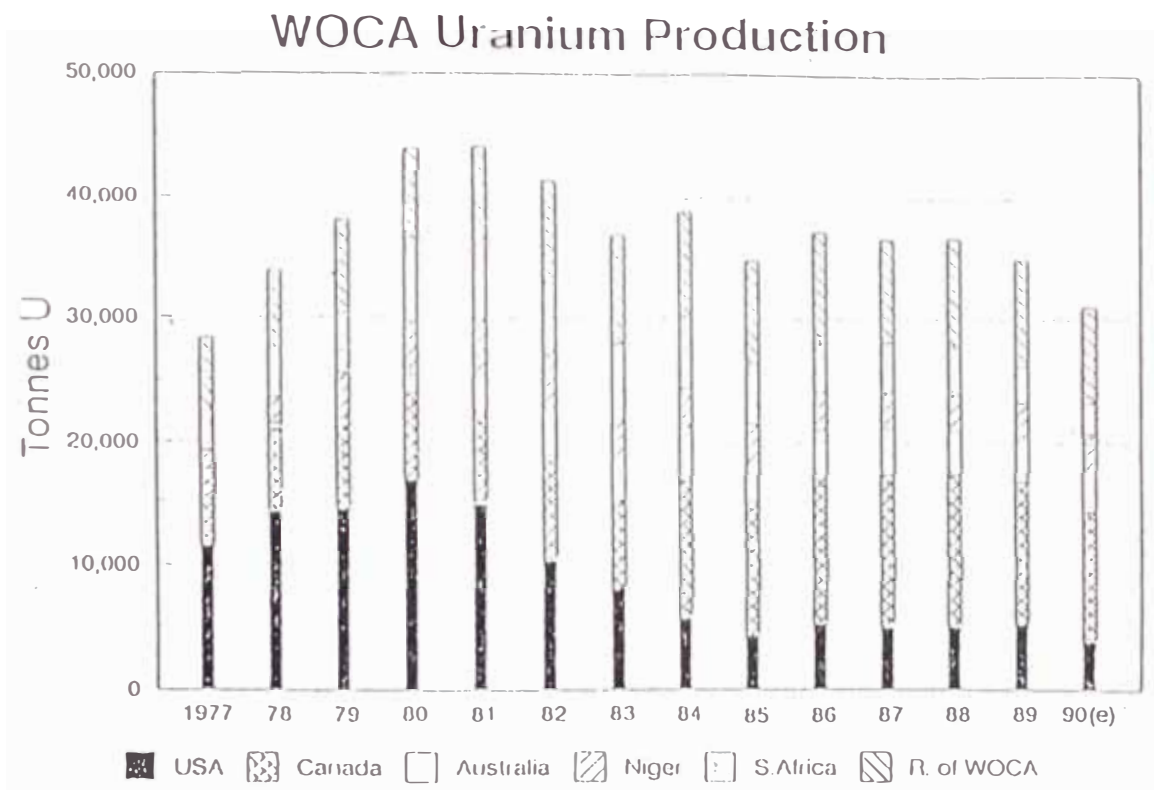


FIG. 5-1

CUADRO Nº 5 — 3	
<i>Bulgaria</i>	700 TM U
<i>China</i>	500 TM U
<i>CSFR</i>	1 500 TM U
<i>Ex-RDA</i>	5 200 TM U
<i>Hungary</i>	500 TM U
<i>Romania</i>	500 TM U
<i>Ex-URSS</i>	7 000 TM U
-----	-----
<i>Total</i>	13 900 TM U

La producción acumulativa entre 1946 y 1990 de los países listados es calculado entre 500 000 y 600 000 ton. de uranio; siendo la ex-Unión Soviética, la ex-RDA, CSFR los que contribuyeron en mayor cuantía.

La producción total en el mundo de WOCA y no-WOCA, se calcula que para 1990 ascendió a casi 45 000 ton. de uranio con una tendencia a la baja.

5.4 PRECIO DEL URANIO

En el mercado del uranio en el mundo existen dos precios, el de entrega inmediata "Spot Market" y el contrato de venta a largo plazo, con un movimiento

en la producción de éste último del orden de 65 %.

En lo relacionado al "Spot Market" a partir de 1980 empezó a descender a US \$ 9,50 /lb. U. hasta fines de 1990, el precio fué muy similar al año de 1974. En la actualidad, este precio a comenzado a subir, encontrándose a US \$ 12,00 /lb. U. En el precio de ventas a largo plazo se consideraba el Americano U.S.D.O.E. y el Europeo EURATOM; en estos contratos el precio promedio se muestra en la Fig. Nº 5 - 2.

La crisis energética de 1973 obligó a muchos países desarrollados a buscar nuevas alternativas de energía, que originó un incremento en el precio del uranio, siendo el mayor alcanzando US \$ 85,0 /Kg. U. para los años 1976 - 1979 (Fig. Nº 5 - 3). Reflejándose un incremento en la producción en el periodo de 1973 - 1983 (Fig. Nº 5 - 4)

En los países de WOCA, aunque la capacidad de producción es superior a la producción actual, el futuro suministro de los centros de producción no cubre la demanda esperada, el déficit de suministro se incrementará mientras el precio del uranio en el mercado se mantenga bajo.

5.5 DEMANDA DE URANIO

La demanda de uranio se ha incrementado de 34 200 TM en 1984 a 41 500 TM en 1989. El suministro de uranio de la producción minera para el período muestra

un descenso de 38 000 TM. en 1984 a 34 000 TM en 1989. La diferencia entre la demanda y el suministro fué positivo sólo para los años 1984 y 1986, mientras que los restantes mostraron una pequeña caída de la producción en 900 T.M. en 1987 y un estimado de 7 500 TM en 1990 (Fig.Nº 5 - 4), la pequeña caída de la producción es cubierta principalmente del inventario de uranio que se tiene acumulado en los años de sobre producción que es estimado en 150 000 TM

5.6 PROYECCION DE LA PROVISION DE URANIO

La futura proyección de uranio para WOCA hasta el año 2005 se basa en dos conceptos:

- 1.- Capacidad de producción
- 2.- Producción futura esperada

Los numeros actuales para estas proyecciones son recopilados tal como se observa en el cuadro siguiente:

	1996	2000	2005
Capacidad de Producción	41 575	37 465	34 065
Producción esperada	33 260	29 972	27 252

Para una mayor claridad, se muestran en la figura Nº 5 - 5, las proyecciones de capacidad de producción y la producción esperada.

5.7 PROYECCION DE WOCA EN LA DEMANDA - PROVISION DEL URANIO

La demanda-provisión se muestra en la fig. NQ 5-6 que incluye los conceptos de provisión (capacidad de producción, producción futura esperada), que se describió previamente en el punto 5.6.; esta ilustración esta sustentada por la siguiente comparación:

	1995	2000	2005
<i>Demanda (TM)</i>	46 300	49 300	52 600
<i>Capacidad de Producción (TM)</i>	41 500	37 500	34 100
<i>Deficit de Provision 1 (TM)</i>	4 700	11 800	18 500
<i>% de Demanda</i>	10,00	23,9	35,2
<i>Prodc. Futura Esperada (TM)</i>	33 300	29 900	27 200
<i>Deficit de Provision 2 (TM)</i>	11 000	19 300	25 300
<i>% de Demanda</i>	28,0	39,1	48 70

WOCA Uranium Supply Projections

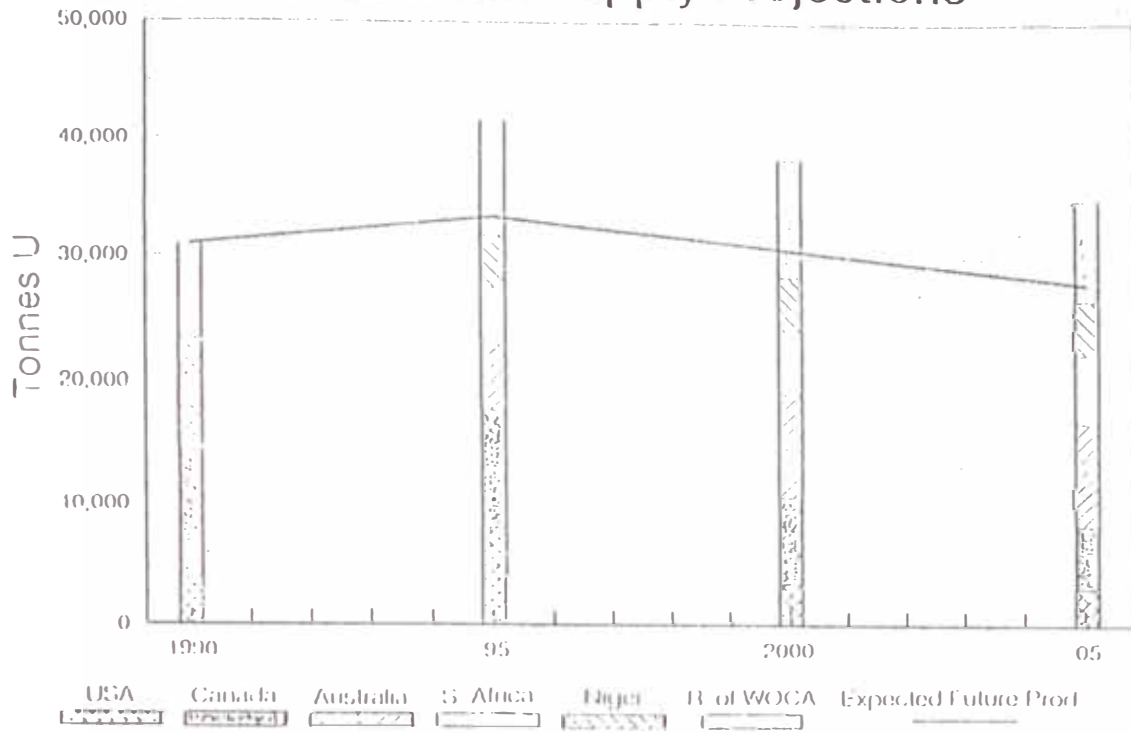


FIG. 5-5

WOCA Uranium Supply - Demand Projections

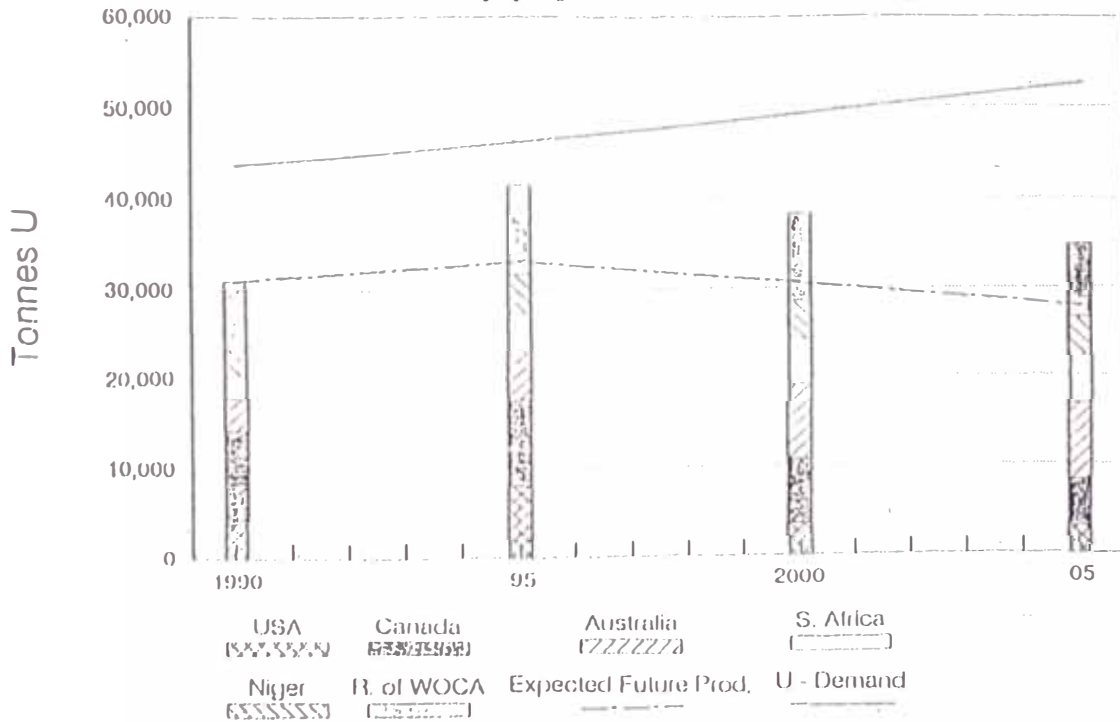


FIG. 5-6

CAPITULO VI

DISPONIBILIDAD DE URANIO EN EL PERU

6.0 DISPONIBILIDAD DE URANIO EN EL PERU

6.1 INTRODUCCION

La actividad de prospección desarrollada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear - IPEN desde su creación estuvo dirigido fundamentalmente a la búsqueda de Uranio en los yacimientos polimetálicos del País; como resultado de estos trabajos se descubrieron una serie de yacimientos con mineralización Uranífera asociada a otros minerales como Cu, Zn, Ag, Pb, etc. que no revertían mayor interés económico y donde el Uranio puede ser considerado como sub-producto.

Durante los últimos 10 años la actividad de prospección y exploración se ha desarrollado en el Departamento de Puno (Proyecto Chapi), depósito que cuenta con el mayor potencial de Uranio (10 000 TM de Uranio). En estos trabajos se ha contado con ayuda internacional, las instituciones que colaboraron fueron las siguientes: La Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (USAEC), en la investigación de yacimientos metálicos, la Comisión Alemana en la investigación de Vilcabamba y finalmente el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA); con cuya ayuda se define el Distrito Uranífero de Macusani.

6.2 ANTECEDENTES

El Instituto Peruano de Energía Nuclear (I-PEN), desde su inicio por intermedio de la dirección de Materia Prima, ha ejecutado prospección de Mineral Radiactivo en depósitos polimetálicos del País, tal como se menciona en la introducción. La selección de áreas a nivel nacional esta de acuerdo a una concepción de modelo metalogenético, mediante el cual se determina 376,450 Km² de formación geológica de primera prioridad con buenas probabilidades de albergar depósitos de Uranio.

La Dirección de Materias Primas a partir de 1977 prospecta las áreas de primera prioridad, resultante de la selección de áreas efectuada en 1975 en el Departamento de Puno y Cerro de Pasco (Oxapampa).

La prospección general se inicia en el año de 1980 en la formación volcánica Quenamari, donde se determinó el Distrito Uranífero de Macusani y Crucero, en un área de 1000 Km².

Por prospección radiométrica regional se ubican 43 anomalías y 66 indicios de Uranio, donde se efectuaron estudios sistemáticos y de detalle, siendo el proyecto Chapi el Prospecto más importante conocido a la fecha.

6.3 AREAS URANIFERAS DE INTERES

De los estudios efectuados por el Instituto Peruano de Energía Nuclear - IPEN en las áreas de interés mediante la prospección de Uranio, se considera que en el País el Uranio se encuentra en rocas volcánicas terciarias (formaciones sedimentarias continentales).

A fin de proporcionar las áreas en las cuales se encuentra el Uranio, se ha adoptado la siguiente clasificación:

6.3.1 RECURSOS IDENTIFICADOS

Se llama así a los cuerpos rocosos mineralizados cuya existencia y localización se conoce, pueden estar o no completamente evaluados, tanto en ley como en extensión y ser extraídos económicamente. Aquí se tiene el Distrito Uranífero de Macusani - Puno, evaluándose radiométricamente los sectores de interés recomendados, tales como: Huiquiza, Tantamaco, Cuychini, Cerro Calvario, Chapi, Cerro Concharrumio y Chacacóniza, habiéndose realizado laboreo minero con la finalidad de reconocer la mineralización y efectuar la evaluación en los prospectos de Pinocho, Chilcuno VI (Huiquiza), Chapi y Cerro Concharrumio. Cuadro N° 6 - 1

En el prospecto Chapi se han identificado 3 396 TM de Uranio es decir, 1672 TM de Uranio como recurso razonablemente asegurado (RRA) y 1724 TM

CUADRO Nº 6-1

DISTRITO URANIFERO DE MACUSANI

INVENTARIO DE RECURSOS						
PROSPECCION	RAA (PROBADO)	RAE I (PROBABLE)	RAE II (POSIBLE)	PROSPECTIVO	ESPECUL.	Σ
CHAPI	1 672	1 724		6 600		10 000
CHILCUNO VI	80	20		400		500
PINOCHO	40	30		130		200
CONCHARRUMIO		92	58	50		200
CALVARIO				195		195
TOTAL	1 792	1 866	58	7 375		
DISTRITO URANIFERO DE MACUSANI (*)					18 910	18 910
< * > 1 000 km² DE DISTRIBUCION DE ROCAS VOLCANICAS TERCEARIAS						30 000
						TN U ₃ O ₈

FUENTE : "INFORME INTERNO IPEN-DMP" (1989), Ing. GUIDO ARROYO

de Uranio como recursos adicionales estimados (RAE), en una superficie de 0,1405 Km².

Se estima un potencial de 10 000 TM de Uranio en una superficie probable de 2,5 Km². Por tanto el prospecto Chapi tiene la mejor perspectiva de convertirse en el primer yacimiento económico de nuestro País. Considerando que la formación Quemamani tiene una distribución de 1 000 Km² posibilitan incrementar las expectativas a 30 000 TM de Uranio para el Distrito Uranífero de Macusani - Puno.

6.3.2 RECURSOS CONDICIONALES

Son aquellos recursos que pueden convertirse en reservas, cuando se encuentren las condiciones adecuadas tanto técnica y económicas, por ser conocidas, constituyen un potencial inmediato. En este grupo se incluyen las manifestaciones donde el Uranio está asociado a otros yacimientos mineros importantes, los más destacados por el orden de sus reservas son los siguientes:

A) BAYOVAR

Este yacimiento está ubicado en el departamento de Piura, según los estudios realizados por el IPEN tiene reservas de 587'670 000 TM de fosfatos con 30,5% de P₂O₅, el Uranio en éste yacimiento fosfatado varía de 30 - 100 ppm con un potencial de 20 000 TM de Uranio.

B) TURMALINA

El yacimiento de Turmalina se encuentra ubicado en el departamento de Piura, cuya mineralización principal es el Wolframio, el Uranio en éste yacimiento está como Uraninita cuyas leyes varían de 0,006 a 0,25% de Uranio, se estima una reserva de 10 TM. de uranio

C) CUENCA DE AYACUCHO

En esta región se han detectado anomalías radiactivas en las cuales ha sido identificado el Mineral de URANIO como Meta - Autunita. Como áreas de interés están consideradas las provincias de Cangallo y La Mar.

En la provincia de Cangallo han sido descubiertos indicios pequeños de Uranio en un depósito de Traverertino donde han actuado fenómenos de lixiviación y migración de Uranio dentro de una secuencia volcánica recubierta por volcánicos de composición basáltica.

D) VILCABAMBA (Cuzco)

El mineral de Uranio está asociado al Cobre, Plomo, Níquel y Cobalto, las leyes varían de 0,05 - 2,0% de Uranio. Este depósito ha sido estudiado desde 1954 por el IPEN en cooperación con la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (1961), también se tiene la cooperación de una Misión de la República Federal de Alemania para estudiar la mineralización.

E) SAYAPULLO (Cajamarca)

El Uranio está asociado al Cobre y Molibdeno con una ley de 0,1 - 0,22%, éste yacimiento está ubicado en la provincia de Cajabamba.

F) RESTAURADORA (Huancavelica)

La ley de éste yacimiento está entre 0,1 - 0,13% de Uranio y está asociado principalmente al cobre.

G) MERCEDES (Huancavelica)

Este yacimiento tiene una ley promedio de 0,11% de Uranio, está asociado al Cobre.

Los principales centros mineros en los cuales es posible la recuperación del URANIO como sub-producto en la Minería Peruana, Presentan en la mayoría de estas minas un tonelaje reducido con altas concentraciones de Uranio que corresponde a la mediana y pequeña minería. Para una mejor ilustración se tiene la fig. Nº 6-1 y el cuadro Nº 6-2.

6.3.3 RECURSOS HIPOTETICOS

Llamamos así a aquellas fuentes desconocidas que razonablemente se espera encontrar dentro de los distritos mineros conocidos o en terrenos con filiación Uranífera conocida; el país tiene experiencia en recursos hipotéticos en terrenos volcánicos (Macusani), es decir el Uranio está asociado a rocas terciarias.

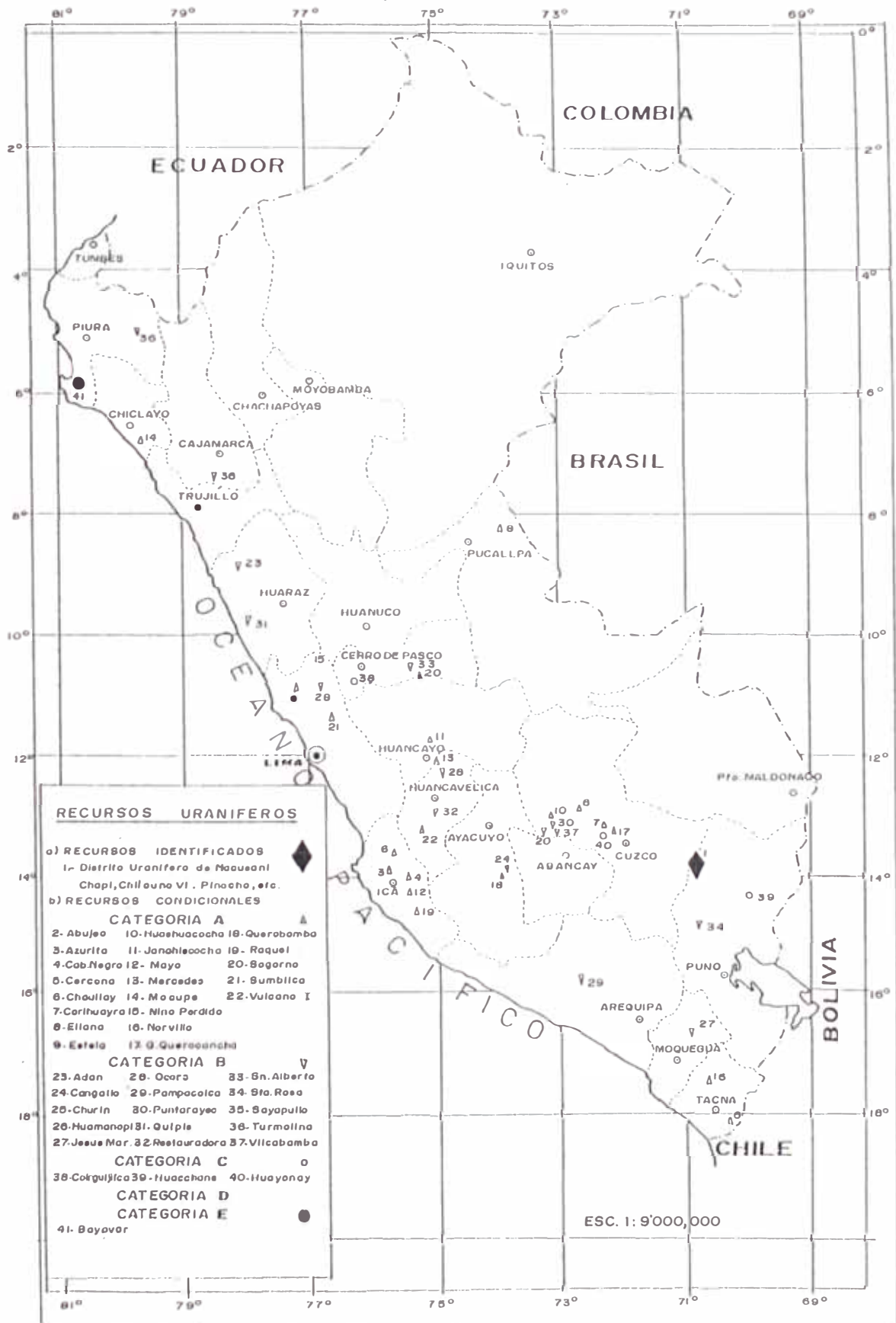


FIG 6.1

CUADRO Nº 6-2

POTENCIAL DE URANIO POR CATEGORIAS EN EL PERU

CATEGORIA (A)		CATEGORIA (B)	
ABUJAO-BUCUNYA	(UCAYALI)	ADAN	(ANCASH)
AZURITA	(ICA)	CANGALLO	(AYACUCHO)
CABEZA DE NEGRO	(ICA)	CHURIN	(LIMA)
CERCANA	(TACNA)	HUAMANAPI	(CUZCO)
CHAULLAY	(CUZCO)	JESUS MARIA	(MOQUEGUA)
CORIHUAYRACHINA	(CUZCO)	OCORO	(HUANCAVELICA)
ELIANA	(ICA)	PAMAPACOLPA	(AREQUIPA)
EOTELA	(LIMA)	PUNTARAYOC	(CUZCO)
HUASHUACocha	(CUZCO)	QUIPIS	(ANCASH)
JANCHISCOCHA	(JUNIN)	RESTAURADORA	(HUANCAVELICA)
MAYO	(ICA)	SAN ALBERTO	(PASCO)
MERCEDES	(HUANCAVELICA)	SANTA ROSA	(PUNO)
MOCUPE	(CHICLAYO)	SAYAPULLO	(CAJAMARCA)
NINO PERDIDO	(LIMA)	TURMALINA	(PIURA)
NORVILLE	(TACNA)	VILCABAMBA	(CUZCO)
Qda. QUEROCANCHA	(CUZCO)		
QUEROBAMBA	(AYACUCHO)		
RAQUEL	(ICA)		
SOGORNO	(PASCO)		
SUMBILCA	(LIMA)		
VULCANO Nº 1	(HUANCAVELICA)		

CATEGORIA (C)	CATEGORIA (D)	CATEGORIA (E)	
COLQUIJIRCA	(PASCO)	BAYOUAR	(PIURA)
HUACCHANE	(PUNO)		
HUAYONAY	(CUZCO)		

FUENTE : Ing. JACINTO VALENCIA H. "INFORME INTERNO IPEN-DMP" (1988)

rias igualmente son importantes otros terrenos seleccionados a la actividad ignea.

El vulcanismo terciario de la cordillera oriental presenta ambientes favorables por analogía con el distrito Uranífero de Macusani. esta actividad volcánica tiene amplia distribución en el País. Como por ejemplo se puede citar el vulcanismo de Ayacucho, donde se ha encontrado mineralización Uranífera Autunitica.

RESUMEN DE LA FIGURA N° 6-1
POTENCIAL DE URANIO POR CATEGORIAS

CATEGORIA	POTENCIAL (TM.U)
A (21 Localidades)	0 - 10
B (15 Localidades)	10 - 100
C (3 Localidades)	100 - 1 000
D (0 Localidades)	1 000 - 10 000
E (1 localidades)	10 000
40 LOCALIDADES EN TOTAL	

6.3.4 RECURSOS ESPECULATIVOS

Son aquellos no descubiertos, que pueden existir en cualquier parte del territorio nacional, ya sea en los tipos convencionales de depósitos o también

en los tipos no convencionales que tengan algún potencial. En este grupo se considera a todos los terrenos que presentan perspectivas de contener depósito de Uranio por similitud a depósitos de Uranio conocidos a nivel mundial. Con este criterio se estableció en 1977 la primera clasificación del territorio nacional (modificado en 1982) en prioridades, teniendo en cuenta los índices de favorabilidad Geológica Uranífera (IFGU), habiendo obtenido la siguiente clasificación (ver fig. Nº 6-2).

- 1º Prioridad 366 450 Km² (Recursos Hipotéticos)
- 2º Prioridad 210 400 Km² (Recursos Especulativos)
- 3º Prioridad 237 600 Km² (Recursos Especulativos)

6.4 POLITICA DEL URANIO

El Instituto Peruano de Energía Nuclear - IPEN tiene la responsabilidad de organizar y ejecutar las actividades relacionadas a la minería y metalurgia de minerales radiactivos en el territorio nacional (según el decreto ley Nº 23112) así como interesar a empresas nacionales o extranjeras mediante un trato directo. Se sabe que el IPEN ha enviado invitaciones a varios países a través de las embajadas, habiéndose interesado varias empresas extranjeras tales como : COGEMA DONG TRIEU (Francia), CNEA Y TECHINT (Argentina), AGIPNUCLEARE (Italia), LUCHY GOLDSTAR (Corea del Sur) Y GRUPO SNC (Canadá).

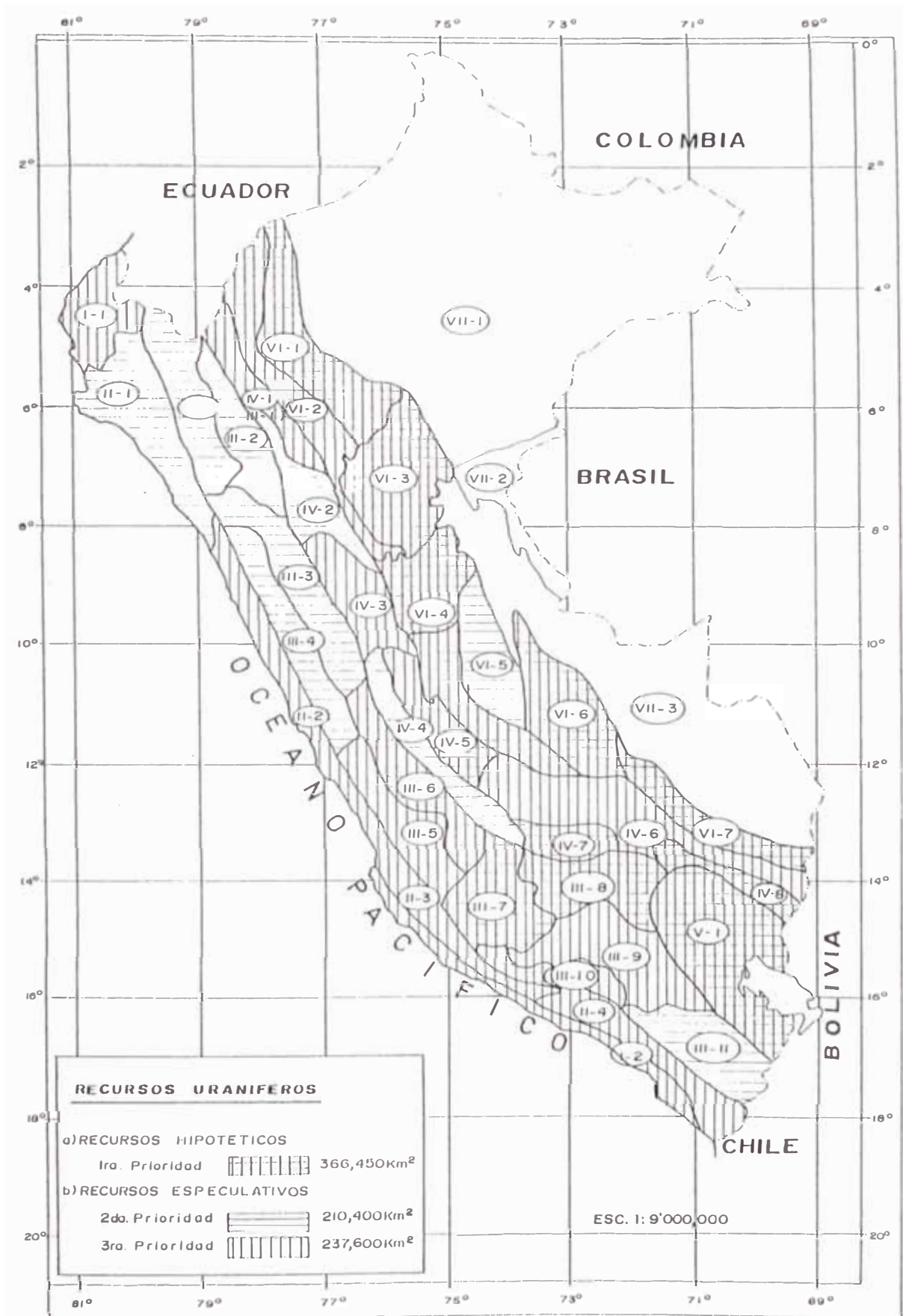


FIG. 6.2

*De acuerdo a la disponibilidad presupuestal del IPEN cuyo aporte financiero ha sido siempre del tesoro público y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) es que se realizó la prospección y exploración en el área de Puno (volcánicos Que-
namari), poniendo énfasis en el Distrito Uranífero de Macusani y su evaluación parcial; estos han llegado un límite en lo que respecta al aporte económico nacional, lo que no permite seguir en los programas de exploración, poniendo en evidencia que es necesario la inversión con riesgo, es decir negociar con empresas internacionales*

6.5 CONVENIO CON LA REGION MARIATEGUI

El Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) realiza trabajo de procesamiento de mineral de Uranio procedente del yacimiento de Chapi - Macusani (PUNO), en convenio con la Región Mariátegui, desde el 23 de Octubre (1991).

Los trabajos de procesamiento se realiza en la ciudad de Puno (Chejoña), con 7,5 toneladas de mineral a escala Banco desde la etapa de preparación física del mineral hasta obtener el producto final (pasta amarilla).

El convenio es financiado casi en su totalidad por la Región Mariátegui, con un aporte de \$ 10 000 aproximadamente.

CAPITULO VII

CARACTERISTICAS DEL MINERAL DE URANIO YACIMIENTO MACUSANI (PUNO)

7.0 CARACTERISTICAS DEL MINERAL DE URANIO - YACIMIENTO DE MACUSANI (PUNO)

7.1 INTRODUCCION

Para tratar el mineral de Uranio por cualquier método de lixiviación, es imprescindible el estudio mineralógico acompañado del análisis químico cualitativo y cuantitativo; sin estos estudios no es posible interpretar los procesos metalúrgicos del Uranio u otros minerales. Se ha analizado profundamente los resultados de los estudios de las características del mineral de Uranio antes de realizar el proceso experimental del presente trabajo de tesis.

Como el tema de investigación es la lixiviación del Uranio con Bacterias, es necesario entender el efecto que podrían tener en el proceso de extracción del Uranio los componentes del Mineral tanto cualitativamente como cuantitativamente a la actividad de la bacteria en el proceso de lixiviación.

Por suerte, los estudios físicos llámense estudios Radiométricos, mineralógicos, petrográficos y estudios químicos del mineral de Uranio están bastantes avanzados por el personal del IPEN - DMP, especialmente el yacimiento de Macusani - Puno, específicamente la zona de Chapi, el cual fué sometido a tratamiento con bacteria en la lixiviación en columnas.

Entre los factores que están influenciados por la mineralogía de una mena, aparte de lo mencionado y la ley de Uranio, se consideran como más importantes los siguientes :

- a) La intensidad de molienda necesaria para lograr la liberación del mineral de Uranio.*
- b) La posibilidad de separación del mineral de Uranio de la ganga mediante técnicas físicas.*
- c) La naturaleza del agente usado (ácido, alcali, oxidante) y consumo de reactivo.*
- d) Las propiedades geológicas probables de la suspensión acuosa de los minerales (con los efectos consiguientes sobre agitación, espesamiento, filtración, etc.).*
- e) La composición iónica y la concentración probable del líquido de lixiviación (determina el tamaño de planta de intercambio iónico o de extracción con disolventes y la pureza del producto final).*

7.2 MANIFESTACIONES URANIFERAS EN ROCAS VOLCANICAS DE MACUSANI (PUNO)

En el año de 1977 se delimitó las distintas áreas Uraníferas de nuestro país, entre ellas fué seleccionada de primera prioridad la del departamento

de Puno (Macusani). En el mismo año, se da la primera campaña de prospección radiométrica autotransportada donde se descubrieron las primeras anomalías en el área de Macusani.

El logro más importante de éste trabajo fué el descubrimiento de varios indicios radiactivos, algunos de ellos con minerales de Uranio visible y todo ello incluidos en rocas volcánicas terciarias (en esencia tobáceas).

En el año siguiente se descubrieron nuevas manifestaciones Uraníferas, pero en esta ocasión en niveles sedimentarios; de ellos aún no se dispone de datos concluyentes sobre la geología del mineral de Uranio, de la metalogénesis de las acumulaciones, y de los factores que controlan el proceso de mineralización

7.2.1 UBICACION Y ACCESO

El área bajo estudio se ubica en el distrito de Macusani de la provincia de Carabaya, en el departamento de Puno, para descubrir las anomalías y manifestaciones Uraníferas se ha revisado sólo una superficie de 80 Km² de un total de 400 Km².

Esta zona dista 1650 Km de Lima y su acceso se hace por medio de 1080 Km de camino natural consolidado Arequipa - Juliaca - Pucará - Macusani -

Area de estudio.

El distrito de Macusani tiene una altura media de 4 300 m.s.n.m. con una cota de 4 100 - 4 400 m.s.n.m. como mínimo y máximo respectivamente. El clima de esta zona es lluvioso registrándose 600 mm de precipitación pluvial, nevando una vez por año entre los meses de Diciembre - Marzo. La insolación es intensa, la cual con el factor antes mencionado favorece enormemente la alteración y meteorización de las rocas aflorantes.

Algo que fué muy desconcertante en cuanto al descubrimiento es la no acumulación frecuente de otros minerales con el Uranio en la zona de estudio.

La vegetación es escasa, no existen arbustos, sólo el pasto natural llamado ICHU que sirve de alimento a los auquénidos y ovinos de la zona; como cultivo solamente se siembra la papa para consumo local.

Los afloramientos en el área de estudio se componen en un 60% de las rocas volcánicas terciarias de composición reolítica, constituidos por tobas e ignimbritas de la formación "volcánica Macusani", los demás afloramientos lo constituyen las rocas paleozoicas y cuaternarias.

7.2.2 ESTUDIO RADIOMETRICO

Las técnicas más útiles en la exploración de Uranio son sin duda alguna las radiométricas. De hecho, combinando los estudios radiométricos aéreos con los exámenes de las anomalías detectados en el terreno y el perfilaje gamma de los sondeos se ha detectado o descubierto una gran proporción de los recursos Uraníferos conocidos como el yacimiento Macusani.

Los estudios radiométricos aéreos se realizarán por las Naciones Unidas para el desarrollo, estudios que sirven para la evaluación de grandes zonas, en ellas se utiliza detectores muy sensibles. Una vez detectada las anomalías radiactivas se registran y se representan en mapas con miras a una sub-siguiente verificación sobre el terreno.

El estudio radiométrico de la superficie es un complemento en el estudio de las anomalías Uraníferas en el terreno y exige el empleo de escintilómetros portátiles que son instrumentos de equipo de campo utilizados más a menudo en la exploración del Uranio. A esto se debe agregar el empleo combinado de estudios geoquímicos y geofísicos en toda las fases de la exploración.

Los Escintilómetros se instalan en vehículos para realizar estudios radiométricos móviles, los cuales en la zona de Macusani son muy variados, es decir en rangos que van desde 180 a 200 Cuentas/s, y

sobre roca aflorante de 200 a 300 Cuentas/s.

En las laderas de las quebradas la reactividad varía entre 100 y 300 cuentas/s, esto no guarda una relación estricta con los contenidos en Uranio de las rocas aflorantes, debido sencillamente a que en las zonas de llanura desciende entre 50 - 100 cuentas/s, esto por existir un desequilibrio considerable o por la presencia de otros elementos radiactivos (principalmente torio).

7.2.3 MANIFESTACIONES URANIFERAS

Las manifestaciones Uraníferas se alojan en tobas, ignimbritas y sedimentos de la formación Macusani del terciario superior, la cual aflora en la meseta de Quemanari.

Como resultado de los estudios realizados por los investigadores del IPEN (W. HERRERA, F. ROSADO) se descubrieron cinco manifestaciones Uraníferas principales, de las cuales una muestra control sedimentario y las cuatro restantes estructural (Fig. Nº 7 - 1).

Se considera que las tobas han sido las rocas de aporte del Uranio, que también sirven como roca - huésped para mineralizaciones secundarias. En el ámbito de estas áreas (zona uranífera de Macusani-Puno) se practicó la técnica de espectrometría aérea e itine-

rarios de radiometria autoportada.

a) **MANIFESTACIONES "HUIQUIZA DERECHA N° 1" EN SEDI-
MENTOS**

La manifestación en este lugar se halla en niveles de arenisca que posee grano grueso y medio. Las mineralizaciones están silicificadas. (fig. Nº 7 - 2).

La mineralización de Uranio, es de color amarillo y verdoso, eso significa una mineralización de tipo Autunítico y torbenita, las cuales se confinan en las areniscas en forma de lentes y también adquieren formas esqueléticas.

En esta zona se ha realizado análisis de 30 muestras que dieron contenidos de uranio comprendidas entre 48 y 2800 ppm.

b) **"HUIQUIZA DERECHA N° 2"**

Los minerales de Uranio muestran colores anaranjados y marrón debido a las soluciones ferríferas que circulan a través de tobas formando óxido de hierro de limitada profundidad, los que posiblemente contribuyeron a la fijación de los minerales de Uranio. También se ha descubierto mineral de color verde que se encuentra cubierto por depósitos coluviales y algo de suelo.

La mineralización se halla disperso irregularmen-

te, se han realizado análisis de muestras minerales de esta zona y se ha encontrado que la concentración en Uranio llega hasta un 0,25 % (ver fig.Nº 7 - 3).

c) **HUIQUIZA IZQUIERDO N° 3**

Esta zona se ubica en el margen izquierdo del río Macusani, en el cerro Huiquiza, en la quebrada Chilcuno grande (ver fig.Nº 7 - 4). La manifestación Uranífera se halla representada por minerales amarillos, esto indica la presencia de un tipo de minerales de Uranio, la !Autunita! que están distribuidos irregularmente en las ignimbritas. Minerales recogidas en lugares muy ricos arrojaron hasta 2 % de Uranio.

d) **CUYCHINE N° 4**

La mineralización de esta manifestación uranífera, de color verde intenso, acusa valores radiométricos superiores a las 10 000 Cuentas/s sobre una longitud de 100 m aproximadamente y se encuentra confinado dentro de las diaclasas de las ignimbritas.

e) **TANTAMACO N° 5**

Se localiza cerca del poblado de Tantamaco y es de carácter mixto, por estar contenido en tobas y ignimbritas. En cuanto a los indicios radiactivos en las ignimbritas, ésta tiene un comportamiento igual a las

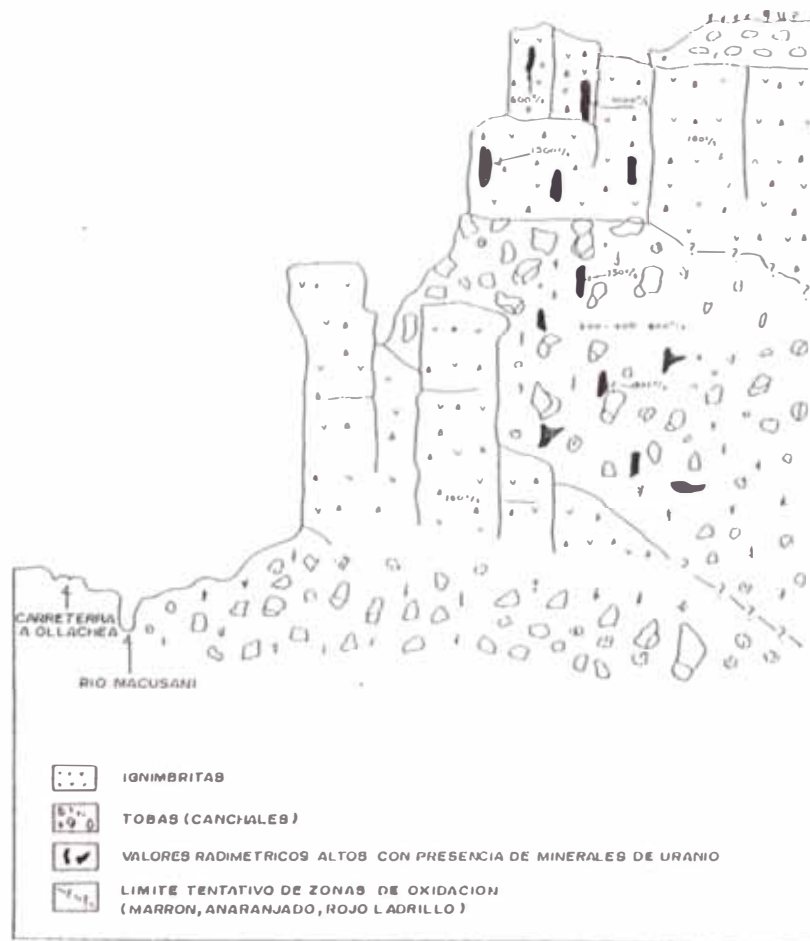


FIG. 7-3 Manifestación Iulquizza Derecha N° 2. Sección mirando hacia el norte.

FIG. 7-3

manifestaciones de Huiquiza izquierdo y Cuychine. Los minerales de Uranio (autunita y torbenita) se alojan en una zona de falla que ha producido un craquelamiento intenso a la toba, donde se observa una intensa caolinitización y milonitización que dan una coloración blanco amarillento al conjunto. Las muestras con alta concentración de minerales dieron hasta 2,3 % de Uranio. Los valores radiométricos se muestran en la fig. N° 7 - 5.

7.2.4 ESTUDIOS MINERALOGICO

Extraído el mineral de Uranio del yacimiento, el geólogo separa las muestras necesarias para el estudio mineralógico y petrográfico, remitiendo el resto para ser sometido a pruebas metalúrgicas y análisis químico, respectivamente.

7.2.4.1 INTRODUCCION

Los indicios Uraníferos encontrados en Macusani se caracterizan por la asociación de la mineralización del Uranio a rocas piroclásticas. Este tipo de yacimiento no está todavía bien definido desde el punto de vista mineralógico, ni metalogénico.

En todos los trabajos de exploración en las ignimbritas de la meseta de Quemamani, se ha encontrado PECHBLENDA, en casi todos los indicios situados en los niveles superiores de la pila volcánica. El Uranio está

como tetravalente en la Pechblenda.

Esto significa que la mineralización, no solamente se debe a la lixiviación y redeposición del Uranio en rocas piroclásticas, sino también a la oxidación de la pechblenda *In Situ*; esto nos permite afirmar que:

- 1) Constituye un caso singular entre la mineralización de Uranio asociados a rocas volcánicas.
- 2) Por su ley y caracteres metalogénicos, conducirá a descubrir yacimientos de mucha importancia.

7.2.4.2 COMPOSICION MINERALOGICA

El estudio de la mineralogía reviste importancia, no solo con el propósito de clasificarlos, sino porque muchas veces la presencia de un mineral determinado arroja luz sobre la historia geológica de una roca. A esto se debe agregar que la determinación de la composición química en las rocas puede ofrecer datos de gran importancia referente a la comprensión de los procesos Geoquímicos y a la evolución de los diferentes tipos.

Las características mineralógicas de los componentes se describen a continuación.

a) CUARZO

De composición SiO_2 y considerado por algunos mineralogistas como óxido, constituye uno de los minerales más ampliamente distribuidos en la corteza terrestre,

como se sabe, la unión Si-O constituye el enlace más fuerte y por tanto, el cuarzo no se combina con otros elementos, es decir, no es susceptible de alterarse. En la práctica se demuestra por la ausencia de costras en el cuarzo, que son características de otros minerales como los feldespatos con las cuales se le puede confundir.

El cuarzo esta formado por cristales angulosos o redondeados, generalmente fracturados, rotos, agrietados y corroidos por la matriz; se ha notado también que contiene frecuentemente inclusiones de apatito, silimanita y moscovita; en las rocas encajantes de la mineralización del Uranio, la mayoría de cristales de cuarzo son ahumados, bipiramidales. El cuarzo rellena las figuras o cavidades de la matriz, algunas veces los huecos de esta última están bordados de tridimita.

El cuarzo presenta caracteres distintivos que lo hace fácilmente reconocible. En primer lugar su dureza es igual a 7, la cual no permite que el mineral sea rayado por el cuchillo de acero pero este a su vez puede rayar el vidrio. A veces también suele confundirse con la calcita, pero esta es mucho más blanda (dureza 3) y además reacciona vigorosamente con el ácido clorhídrico. El cuarzo es inatacable por la mayoría de los ácidos.

b) FELDESPATO POTASICO

Los feldespatos constituyen el grupo de minerales más importantes de las rocas ígneas y en general de la corteza terrestre. Su composición comprende fundamentalmente de especies: Ortosa y Microclina y puede expresarse de la siguiente manera:

ORTOSA Y MICROCLINA - $KAlSi_3O_8$

La Ortosa y Microclina constituyen en realidad un caso de dimorfismo, pues para una misma composición química uno cristaliza en el sistema Monoclínico y la otra en el Triclínico. En general los feldespatos potásicos son de tono rojizos, raramente es blanco o grisáceo.

En los indicios de Macusani hay Sanidinas y Ortosas; ésta última siempre subordinada a la primera. La sanidina forma cristales idiomórfos o subidiomorfos, generalmente fracturados que pueden contener 25% de albita ($NaAlSi_3O_8$).

c) PLAGIOCLASAS

Se trata generalmente de cristales de oligoclasa idiomorfos a subidiomorfos, frecuentemente zonados y fracturados y con inclusiones de micas, circón y apatito. Ocasionalmente forman cristales mixtos con los feldespatos potásicos.

d) **BIOTITA**

Las micas constituyen el grupo de minerales petrográficos más fáciles de reconocer, ya que sus características peculiares se manifiestan muy bien. La composición química de estos minerales corresponde a:

Biotita : $(KH)_2(MgFe_2)(AlFe)_2Si_3O_{12}$

Moscovita : $H_4K_2Al_3Si_6O_{24}$

En realidad la Biotita es la mica común en las rocas ígneas, siendo la Moscovita una curiosidad acompañante en la mayoría de los casos. Se diferencian muy bien por su color pues mientras la primera es verde o pardo oscuro, la segunda es de un color caramelo o pardo muy claro (comúnmente se designan como mica oscura y mica clara).

En las rocas volcánicas de Macusani - Puno, son muy abundantes, aparecen como cristales de color pardo oscuro que a veces llegan a alcanzar hasta 1 cm de sección. En ocasiones, la Biotita está cloritizada y a veces fesferrificada, pasando a Moscovita, y solo presenta inclusiones de apatito o de cristales opacos. Hay que destacar que la Biotita es siempre muy abundante en las rocas encajantes de los indicios Uraníferos.

e) **MOSCOVITA**

Rara como mineral primario, es a veces de tipo

lapidolítico y por tanto la portadora del Litio de las tobas. Frecuentemente es secundaria, bien sea por transformación de las plagioclasas o la Biotita.

f) ANDALUCITA

De color rosado, claramente pleocróica, de rojizo a verde claro, forma cristales aciculares, idiomórfos, más o menos fragmentados, que excepcionalmente puede llegar a medir 2 cm de longitud. Se ha notado que la andalucita está asociado con silimanita, biotita y plagioclasas

g) MINERALES ACCESORIOS

Los más frecuentes son apatito, silimanita, circonio y rutilo, así como alguna magnetita y pirita que aparecen diseminados en la matriz. Ninguno de ellos presenta características especiales.

Por otro lado, dado el parecido entre la composición química de las tobas (ignimbrita) y el vitrófido, se puede pensar que la MACUSANITA (vidrio volcánico) es el resultado de la fusión parcial de las tobas a una temperatura que no llegó a alcanzar la de la andalucita (cuadro N° 7 - 1).

7.2.5 MINERALIZACION

Los indicios de Macusani, aunque semejantes por la naturaleza de sus rocas encajantes a algunas de

CUADRO N° 7-1

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DE MACUSANI PUNO -PERU

MAYORES	MUESTRA (%)		TRAZAS	MUESTRA (ppm)	
	1	2		1	2
SiO ₂	71,50	73,00	Ba	200	30
Al ₂ O ₃	14,35	15,60	Cs	70	340
Fe ₂ O ₃	1,47	0,65	Sn	50	280
MnO	0,04	0,06	Rb	750	2 000
MgO	0,37	0,04	Sr	100	10
CaO	1,53	0,30	Pb	50	80
Na ₂ O	3,40	4,10	As	30	200
K ₂ O	4,75	3,90	Zn	120	120
TiO ₂	0,28	0,20	Cu	40	30
P ₂ O ₅	0,31	0,53	Ni	50	30
OTROS	1,99	1,33	Li	200	1 500
			B	300	3 000
			U	10,2	6,8
			Th	3,7	3,0
TOTAL	99,99	99,71			

MUESTRA 1 : IGNIMBRITA, PINOCHO

MUESTRA 2 : OBSIDIANA (MACUSANITA), CHILCUNO CHICO

los que se han descubierto en rocas piroclásticas actuales en otras partes del mundo, tales como México, Bolivia, muestran ciertas características mineralógicas y estructurales que los hace ser únicos en el mundo en su género.

MINERALES HIPOGENICOS

La Pechblenda es el mineral primario de Uranio en todo los indicios de Macusani descubiertos hasta ahora (cuadro Nº 7 - 2) PINOCHO, CHILCUNO, KIGUITIAN Y CHAPI. La presencia de este mineral era predecible, porque en todo los indicios se había encontrado gummitas.

Aparte de los sulfuros no se han encontrado hasta ahora minerales acompañando la pechblenda; en algunos indicios, como en CHAPI se han encontrado que la pechblenda rellena masivamente las fracturas de las rocas piroclásticas; éste dato es sumamente importante porque el trabajo de tesis se basa justamente en el mineral de Chapi el que se trató con bacterias. (cuadro Nº 7 - 3).

Sin embargo, dada la fuerte alteración sufrida por los minerales primarios sólo se puede decir que la pechblenda y los sulfuros de hierro, que se formaron por la deposición rítmica de un gel complejo urano-sulfurado, son de hecho los únicos componentes de la mineralización

CUADRO N° 7-2

PRINCIPALES ANOMALIAS DE LA MESETA DE QUEMANARI

Nº	INDICIO	ALTURA (m)	COMPOSICION MINERALOGICA
1	PINOCHO	4 300	pe, gu, au, fo, ur
2	ESPERANZA I Y II	4 375	au, fo
3	ESPERANZA III	4 350	au, fo
4	CHILCUNO VI	4 340	gu, au, fo
5	KIGUITIAN II Y III	4 355	gu, au, ps
6	KIGUITIAN I	4 150	au
7	CALVARIO	4 430	gu, au, fo
8	CHAPI ALTO	4 600	gu, be, au, fo
9	CHAPI BAJO	4 400	au

EL NUMERO DEL INDICIO INDICA SU SITUACION EN EL MAPA DE LA FIGURA 7-8.

pe : PECHBLENDA

ps : PSILOMELANA

gu : GUMNITA

be : BECQUERELITA

au : AUTUNITA

ur : URANOTILO

fo : FOSFURANILITA

MINERALES SUPERGENICOS

Los minerales secundarios de Uranio parapechblenda y gummita minerales hexavalentes son los principales constituyentes de la mineralización.

La oxidación de la pechblenda ha conducido a su progresiva transformación en parapechblenda y gummitas negras, naranjas y amarillas, especialmente éstas últimas. La parapechblenda sólo se ha visto formando pequeñas placas dentro de las gummitas negras, concretamente en aquellas secciones que todavía conservan los sulfuros de hierro inalterados.

Las gummitas naranjas, también muy raras, se encuentran unas veces en el contacto de las gummitas negras y amarillas caso de PINOCHO, o dentro de las gummitas amarillas caso de CHAPI, donde pseudomorfizan a los esferulitos de pechblenda.

Las gummitas amarillas son, en la mayoría de los casos, los principales constituyentes de la mineralización. Ellas consisten de una asociación micro criptocrystalina de silicatos y fosfatos de Uranio, especialmente Uranotilo y fosfuranilita. Unas veces tienen textura compacta y brillo vitreo, otras veces son terrosas y de color amarillo apagado.

En cuanto a los minerales supergénicos, los silicatos y fosfatos de Uranio, son los más importantes, especialmente la autunita, pues no solo rellenan los poros y tapizan las fracturas de las rocas encajantes

CUADRO N° 7-3

ANALISIS QUIMICO (%) DE LA PECHBLENDA DE MACUSANI

	CENTRO	CENTRO	BORDURA
UO_2	78,38	79,57	39,40
ThO	---	----	--
CaO	3,55	3,21	8,54
SiO_2	---	---	---
FeO	---	0,02	3,01
PbO	0,04	---	---
P_2O_5	0,29	5,38	23,43
⁺ TOTAL	82,26	88,18	74,38

sino que pseudomorfizan también a las propias gummitas.

Finalmente, aparte de la autunita, que es el mineral secundario más frecuente y el único que se encuentra en los indicios inferiores de las tobas - CHAPI BAJO Y KIGUITIAN BAJO, los otros minerales hexavalentes son el uranotilo y la fosfuranilita. En el cuadro N° 7 - 2 se resume la situación y composición mineralógica de las principales anomalías.

Las leyes promedios de Uranio de los diferentes indicios tales como PINOCHO, CHILCUNO, CHAPI fluctúan entre 0,09 - 0,4 %.

7.2.6 CARACTERISTICAS GEOQUIMICAS

El estudio de la distribución de los elementos químicos en la corteza terrestre (profundidad), es de gran importancia cuando el yacimiento en estudio es posible de explotar, para el presente caso, la variación de concentración de los elementos químicos especialmente de Uranio en forma vertical da una mejor aclaración al respecto.

En los datos concernientes a la geoquímica de las ignimbritas de Quemamani, La Macusanita (vidrio no desvitrificado) es tomada como roca de referencia y los elementos que los constituyen son considerados como representativas de la composición original del magma riolítico, lo que aporta una información

directa sobre la composición del mismo en un punto dado de su evolución.

DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS MAYORES

El resultado de los estudios con respecto a los elementos mayores se muestra en la fig. Nº 7 - 6, donde se puede evidenciar que permanece constante la composición química y mineralógica en forma vertical. De este resultado se puede notar que se trata de una composición medianamente rica en sílice (72 % en promedio) y per - aluminosa (14,3 - 15,3 %) y se puede notar también que es muy pobre en Fe, Ca, Mg. Ti; los cambios más notables conciernen a los alcalinos con una relación $K_2O/Na_2O >1$ para la roca desvitrificada y <1 para la Macusanita. Esta modificación puede ser el resultado de la desvitrificación y alteración, siendo este fenómeno el que transforma la mesostasa cuarzo feldespática en arcilla.

El análisis químicos de estos elementos mayores se indican en el cuadro Nº 7-4

DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS MENORES

El análisis de los elementos de las ignimbritas de Quemánari han sido de preferencia aquellos que guardan una relación con el Uranio. Las variaciones

CUADRO N° 7-4

ANALISIS QUIMICO DE LA IGNIMBRITAS DE MACUSANI Y DE LA MACUSANITA.

ELEMENTOS MAYORES EN %

	MH-3	MH-4	MH-5	MH-6	MH-7	MH-8	MAC-9	MH-10	MAC-10	MH-1	MAC-1	MH-2
SiO ₂	73,43	72,9	70,25	72,10	71,43	73,01	73,22	71,50	73,00	71,1	72,8	72,65
Al ₂ O	14,35	14,81	15,57	14,38	15,39	14,91	16,13	14,35	15,6	15,8	16,3	14,68
Fe ₂ O	1,26	1,36	1,46	1,24	1,38	1,14	0,76	1,47	0,65	1,03	0,59	1,29
MnO	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04
MgO	0,2	0,2	0,19	0,2	0,21	0,2	---	0,37	0,04	0,05		0,24
CaO	0,5	0,59	0,69	0,6	0,66	0,81	0,05	1,53	0,3	0,81	0,16	0,65
Na ₂ O	3,37	3,2	3,17	3,16	3,69	3,45	4,26	3,4	4,10	3,20	4,1	3,25
K ₂ O	4,54	4,87	4,75	4,78	5,5	4,89	3,73	4,75	3,9	5,0	3,7	4,84
TiO	0,13	0,14	0,16	0,10	0,22	0,14	0,06	0,28	0,2	0,15	0,02	0,12
P ₂ O ₅	0,36	0,42	0,3	----	0,27	----	0,39	0,31	0,53	0,37	0,55	0,35
OTROS	1,51	1,6	2,96	2,17	0,79	0,99	1,05	----	----	---	----	1,53
TOTAL	99,19	99,61	99,53	99,22	99,58	99,57	99,71	98,0	98,38	98,15	98,28	99,64

MH = IGNIMBRITA

MAC = MACUSANITA

verticales de estos elementos se hallan representados en la fig. N^o 7 - 7 y los análisis químicos se muestran en el cuadro N^o 7 - 5.

En cuanto al Uranio y Th, se observa el siguiente comportamiento:

	IGNIMBRITAS	MACUSANITA
U	5,6 - 18 ppm.	18,44 ppm.
Th	8,6 - 13,3 ppm.	2,27 ppm.

La mayoría de contenidos (leyes) en torio de las ignimbritas es superior 10 ppm, mientras que la macusanita es de 2,27 ppm; el comportamiento del Uranio es inverso con relación al torio en la macusanita se observa que el uranio es de 18,44 ppm, mientras que para las ignimbritas es de 10 ppm en promedio.

CONCLUSION. - El Uranio se ha enriquecido en relación al torio.

CAPITULO VIII

TRATAMIENTO MICROBIOLOGICO DEL MINERAL DE URANIO

**ESTUDIO DE LA LIXIVIACION
BACTERIANA DEL MINERAL DE
URANIO CHAPI-MACUSANI (PUNO)**

8. TRATAMIENTO MICROBIOLOGICO DEL MINERAL DE URANIO

8.1 GENERALIDADES

La hidrometalúrgia integra la disolución de los metales de minerales, como el uranio y sus recuperaciones. La BIOHIDROMETALURGIA se orienta principalmente en los mismos objetivos, pero se aprovechan los MICROORGANISMOS (Bacterias) activos con respecto al ataque sobre los minerales y las ganga del mismo.

Por tanto, para dominar procesos BIOHIDROMETALURGICOS es necesario el entendimiento de varias disciplinas, es así que el desarrollo de la lixiviación bacteriana depende de la cooperación interdisciplinaria de: Químicos, Microbiólogos, Metalúrgicos y Geólogos.

Para el tratamiento del mineral de uranio procedente de Chapi-Macusani (Puno), se empleó bacterias del género thiobacillus ferrooxidans cuya reproducción se logra en forma eficiente, con métodos y técnicas propias, que dieron muy buenos resultados en la cuantía de la población bacteriana. De esta forma se logra adaptar las células a las condiciones del proceso antes de ser inoculadas a las columnas de lixiviación del uranio.

La eficiencia de la lixiviación bacteriana, respecto a la lixiviación sin bacterias, a dado resul-

tados alentadores en este trabajo de TESIS, demostrando de esta forma, que la lixiviación bacteriana del mineral de uranio de Chapi - Macusani, es realizable con la participación de la bacteria *Thiobacillus - Ferrooxidans*.

8.2 ENSAYO DE ANALISIS FISICO-QUIMICO

Antes del procesamiento del mineral de uranio, es imprescindible tener en cuenta las siguientes etapas: preparación física, determinación de la humedad del mineral, análisis granulométrico, análisis de la ley de cabeza, etc. De estos parámetros depende mucho obtener resultados experimentales válidos, así como la optimización de parámetros en el proceso de tratamiento.

8.2.1 PREPARACION FISICA

Un estudio químico metalúrgico detallado y sistemático requiere de muchísimo cuidado en la selección de las muestras y en la preparación de una mezcla adecuada, que sea representativa de todo el mineral de uranio.

La importancia del muestreo del mineral se fundamenta en que, de ella depende una gran parte de la interpretación cuantitativa y cualitativa de los resultados de la experiencia; así como de las consecuencias que involucran los errores de un mal muestreo.

Cabe así entender la importancia del muestreo para el procesamiento de mineral. Sin embargo, al hablar de la operación de muestreo a veces se suele tener la impresión de algo que se dice y que muy pocos lo entienden o no le dan la importancia que se merece.

La prueba de un buen muestreo es que de dos muestras tomadas independientemente del mismo material, los resultados de la experiencia deben estar dentro de los límites permitidos

METODO DE MUESTREO

No está en demasía mencionar que el muestreo tiene por objeto seleccionar el material de tal forma que una fracción de la población de muestra obtenida represente a la población entera. Tener muy en cuenta que si los elementos integrantes están en mayor o menor proporción en la muestra que en la población, entócesⁿ la muestra dejara de ser representativa.

Para seleccionar el método de muestreo debe considerarse lo siguiente:

- a.- Cantidad de muestra
- b.- Area de muestreo
- c.- Seguridad requerida.
- d.- Recursos disponibles

El muestreo del mineral de uranio, se realiza bajo criterio humano o también criterio de unidad tipo. Esto último se basa en el juzgamiento de la per-

sona que hace el muestreo, quedando la elección de la unidad tipo a libre criterio del muestreador, en otras palabras, el problema que enfrenta el químico-metalúrgico es determinar la mejor forma de realizar el muestreo de la población con el objeto de que las diferencias entre la muestra y las "verdaderas medidas" de la población sean mínimas. Lo que equivale a decir que el error de muestreo debe ser mínimo.

Los resultados analíticos de los ensayos (físico-químicos) dependen de la exactitud de la operación de muestreo

PREPARACION DE LA MUESTRA

La muestra de mineral de Uranio obtenida en la extracción del yacimiento, aún no está lista para el procesamiento. Por tanto, ésta requiere de una preparación por lo cual se siguen los siguientes pasos:

a) TRANSPORTE DE LA MUESTRA

Es de suma importancia en los minerales de uranio, realizar la operación de transporte con prontitud y con sumo cuidado hacia el ambiente de muestreo, para prevenir la contaminación interna y externa, y también evitar la degradación del mineral de uranio (por ser muy frágil) procediendo de esta manera se evita la formación de muchos finos, que pueden tener consecuencias negativas en la lixiviación.

b) REDUCCION DE TAMAÑO

Las muestras de mineral de uranio que llegan a la cancha de muestreo en muchos casos no están en condiciones inmediatas para realizar el sistema de HOMOGENIZADO - CUARTEADO. Por tanto se requiere reducir el tamaño mediante la chancadora (trituración) o la pulverizadora (molienda).

Esta operación de reducir el tamaño del mineral, está en función a la granulometría la cual se requiera realizar el tratamiento de lixiviación. En muchos casos, a escala banco o Piloto el proceso de lixiviación se realiza con mineral tal como viene de la mina.

c) CUARTEADO

Refiriéndose a la cantidad de muestra a tratar en la lixiviación en pilas o lixiviación convencional del mineral de uranio, o para el análisis (químico, granulométrico, de humedad, etc.) es necesario realizar en forma sistemática la operación de muestreo (sistema de Homogenizado-Coneo-Cuarteado) a fin de obtener muestras muy representativas.

SISTEMA DE HOMOGENIZADO-CONEO-CUARTEADO

Cuando se trata de conseguir que la muestra de mineral tome la forma de tronco de cono, éste debe ser mezclado uniformemente, de tal manera que al cuartearse

las porciones resultantes sean iguales en composición y peso. Esta operación se prosigue hasta obtener muestras que representen al total (foto N°8 - 1), Es decir, luego de cuartear se toma el material de dos cuartos opuestos, repitiéndose la operación con esta muestra, hasta obtener la cantidad de muestra necesaria (ver esquema N°8 - 1).

En esta operación, el mineral de uranio debe tener un termino medio en el contenido de agua, osea no debe estar muy húmedo para evitar problemas de homogenizado, ni muy seco, para evitar la pérdida del material debido al polvo, y la contaminación del mineral por inhalación.

SISTEMA DE BANCO

Se emplea el cuarteador de JONES, para muestra en cantidades "grandes", la ventaja de éste sistema es que se logra muestras cuarteadas parejas y discretas dando mayor confiabilidad en el cuarteado con respecto al sistema anterior, en forma relativa (foto N°8-2)

d. - PULVERIZADO

Toda muestra de mineral de uranio enviada al laboratorio de análisis químico debe estar Malla 200 para lo cual la muestra obtenida del cuarteado debe ser pulverizado a una muestra fina que permita ser disuelta rápidamente con los ácidos en el proceso de análisis de

tal forma que una cierta cantidad de muestra pulverizada constituida de partículas del mismo tamaño, por más pequeña que sea la alícuota, siempre seguirá representando el contenido porcentual de los elementos constituyentes del mineral de uranio.

Esta operación se realiza en molino de disco, previa limpieza con arena fina y alcohol etílico, para finalmente ser tamizado el mineral molido con cedazo malla 200, y todo el grueso resultante sea retornado al pulverizador

e.- LLENADO DE MUESTRA PARA ANALISIS

La muestra de mineral de uranio para ser enviada al laboratorio de análisis debe estar bien homogenizado, ya que en la operación de pulverización se forman capas. La cantidad del mineral debe ser lo suficiente que permita al analista disponer de la muestra del mineral para realizar el análisis químico las veces que sean necesarias.

La muestra enviada al laboratorio debe tener especificaciones de:

- 1°. Procedencia del mineral
- 2°. Cantidad de la muestra
- 3°. Fecha del envío.

8.2.2 DETERMINACION DE LA DENSIDAD APARENTE

Esta operación se realiza en recipientes cilíndricos bien calibrados y tarados de un volumen de 50 litros y consiste en rellenar el mineral de uranio en estos para luego ser pesados en una balanza que esté en perfectas condiciones.

Para fines de cálculos, la densidad aparente se determina con la relación de peso/volumen que ocupa el mineral:

<i>PESO (Kg)</i>	<i>VOLUMEN (l)</i>	<i>DENSIDAD APARENTE</i>
<i>80,0</i>	<i>50,0</i>	<i>1,60</i>

8.2.3 DETERMINACION DE LA HUMEDAD

La muestra para el análisis de humedad no sólo debe ser representativa en partículas finas o en partículas gruesas, sino que debe ser representativa de ambas, esto debido a que el porcentaje de humedad es variable a diferentes tamaños de granos.

La temperatura de secado es uno de los parámetros más importantes en la determinación de la humedad del mineral, puede contener sales cuyos radicales ácidos pueden ser eliminados a temperaturas ligeramente por encima de 110 °C. Por todo esto la muestra de mineral de uranio es generalmente secado a 110 °C en

DETERMINACION DE LA HUMEDAD

MINERAL DE URANIO : CHAPI -MACUSANI (PUNO)

REALIZADO EN · LAB. PREPARACION FISICA DMP-IPEN

REPORTE · 25 MARZO 1991

PESO DE LA TARA	PESO TARA+PESO DEL MINERAL	MALLA
589,5 g	961,0 g	-1/4"

PESO (g)		TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (h)
MINERAL+TARA	MINERAL		
961,0	371,5	110	0
952,1	362,6	110	1
952,0	362,5	110	2
951,9	362,4	110	3
951,7	362,2	110	4
951,7	362,2	110	5
951,7	362,2	110	6

$$\text{HUMEDAD} = \frac{(961,0 - 951,7)}{(961,0 - 589,5)} \times 100$$

HUMEDAD = 2,49 %

una estufa.

En el procesamiento de mineral de uranio es de mucha importancia conocer la humedad del mineral a lixiviar porque esto permite conocer con mucha exactitud la cuantía del uranio, y ayuda a elegir la correcta relación sólido-líquido, optimizando de esta forma el empleo de agua. ¿Por que es imprescindible conocer la humedad antes de realizar la lixiviación?. Porque la humedad está sujeta a los cambios climáticos, es decir a problemas de insolación, humedad ambiental, lluvias etc.

8.2.4 ANALISIS GRANULOMETRICO

El propósito del control granulométrico en el procesamiento de mineral de uranio es: chequear la magnitud de los valores que se liberan de la ganga a diversos tamaños de partícula; ayudar al estudio específico de los elementos químicos que constituyen el mineral; chequear la calidad de la molienda, y determinar la granulometría del lecho filtrante en las columnas de lixiviación.

Esta operación se realizó en el RO-TAP TESTING, durante un tiempo necesario de oscilación, cuyo resultado se muestra en el cuadro N^o 8 - 0.

Este parámetro de análisis granulométrico es de mucha ayuda para el ingeniero de procesos en el

CUADRO N° 8-0

ENSAYO : ANALISIS GRANULOMETRICO

MALLA : -1/4"

REALIZADO EN : LAB. PREPARACION FISICA DMP-IPEN

REPORTE : 22 DE MARZO DE 1991

MINERAL DE URANIO CHAPI-MACUSANI

MALLA	PESO (g)		% PASEN
+ 4	28,96	1,881	98,119
+ 10	255,42	16,586	81,533
+ 18	270,39	17,558	63,975
+ 25	172,55	11,205	52,770
+ 35	142,61	9,261	43,509
+ 50	183,86	11,939	31,570
+ 80	193,13	12,541	19,029
+100	66,91	4,345	14,684
+120	71,93	4,671	10,013
+200	62,77	4,076	5,937
-200	91,43	5,937	0,000

tratamiento de minerales de uranio, porque permite adelantar algunas decisiones tal como la operación de mayor trituración y molienda, conociendo la distribución del uranio por malla.

En trabajos de lixiviación de mineral de uranio a nivel de laboratorio los tamaños de partículas son - 1/4", a escala banco son muchos mayores, y - 3" como tamaño promedio en lixiviación estática.

8.2.5 ANALISIS QUIMICO

El análisis químico de cabeza del mineral de uranio se realiza para obtener con la mayor exactitud el contenido (ley) del uranio y algunos componentes, como fierro, fósforo etc. siendo estos datos muy importantes en la determinación cuantitativa de dichos elementos químicos con respecto a la cantidad de mineral sometida al tratamiento. De esta forma permite realizar un control adecuado en la concentración de componentes iónicos, tales como el uranio en el licor para evitar la inhibición de los mismos de la actividad bacterial en el proceso de lixiviación.

Es muy importante tener en cuenta la concentración de los elementos químicos restantes del mineral antes de realizar la lixiviación bacteriana, para dar criterios y justificaciones del comportamiento de las células bacterianas en la lixiviación. Se ha logrado obtener información muy importante del análisis



FOTO No: 8 – 3. Vibrador de Tamices – RO TAP, empleado para el análisis Granulométrico del mineral de Uranio. Lab. Hidrometalurgia – IPEN.

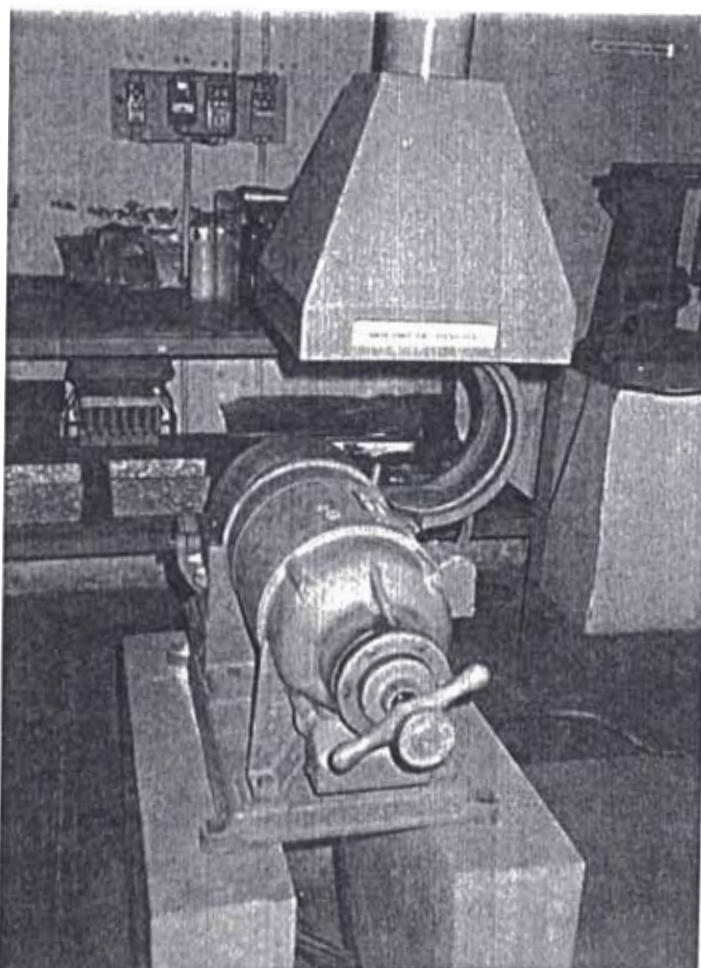


FOTO No. 8 – 4. Molino de Discos, empleado en la preparación de muestra para la Ley de Cabeza. Lab. Hidrometalurgia – IPEN.

espectrográfico (cuadro Nº 8 - 2) que permite optar el control de parámetros como la acidez, tiempo de retiro del licor, la concentración de iones en el licor, etc.

El análisis de cabeza del mineral se realizó en el laboratorio de análisis químico del IPEN (cuadro Nº 8 - 1).

8.3 TECNICAS DE TRATAMIENTO DE MINERALES DE URANIO.

Para lixiviar los minerales de uranio, las técnicas de tratamiento se han seleccionado de acuerdo a las características mineralógicas y al tipo de ganga a la cual el uranio está asociado.

Según Ruzika los minerales de uranio se pueden clasificar en tres grupos:

a) *Minerales con uranio hexavalente*

Fosfatos:

<i>Autunita</i>	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10 \text{ a } 12 \text{ H}_2\text{O}$
<i>Meta-autunita</i>	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 21/2 - 61/2 \text{ H}_2\text{O}$
<i>Turbenita</i>	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$

Silicatos:

<i>Uranofana</i>	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{SiO}_3)_2(\text{OH})_2 \cdot 5 \text{ H}_2\text{O}$
------------------	---

Oxidos:

<i>Gummita</i>	$\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
----------------	---

CUADRO N° 8-1

ANALISIS QUIMICO DE LA LEY DE CABEZA

MINERAL: YACIMIENTO CHAPI-MACUSANI (PUNO)

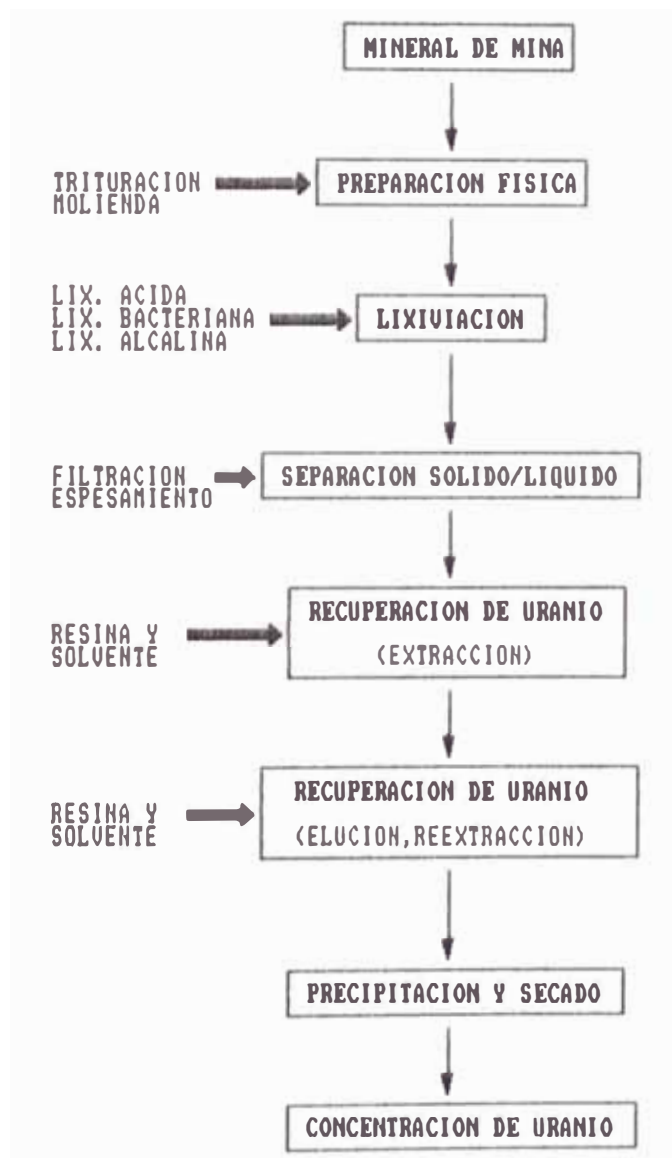
ELEMENTO	LEY DE CABEZA (%)
URANIO	0.400
FIERRO	1.430
FOSFORO	0.162

CUADRO N° 8-2

ANALISIS ESPECTROGRAFICO SEMI-CUANTITATIVO DE LOS
ELEMENTOS INORGANICOS CONSTITUYENTE DEL COMPOSITO
DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA DEL MINERAL MACUSANI
PUNO-PERU

ELEMENTOS MAYORES	ELEMENTOS MENORES	ELEMENTOS TRAZAS		
		MAYORES	INTERMEDIOS	MENORES
10 %	10 a 1,0 %	1,0 a 0,1%	0,1 a 0,01 %	0,01 a 0,001 %
Si	Al Fe Na K	Ca Mg U P	Ti Sn Pb Mn B	Cu Be Li Th

ES UEMA GENERAL DEL PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE URANIO



b) *Minerales con uranio hexavalente y tetravalente.*

Oxidos:

<i>Uraninita</i>	UO_2 , xUO_3	
<i>Pechblenda</i>	UO_2 , yUO_3	($y > x$)

Silicatos:

<i>Coffinita</i>	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$
------------------	---------------------------

c) *Mineral con uranio tetravalente*

Oxidos combinados:

<i>Brannerita</i>	$(U, Ca, Fe, Th, Y) (Ti)_2 O_6$
-------------------	---------------------------------

Los minerales del primer grupo son fácilmente solubles en medios ácidos, los del segundo grupo requieren condiciones de oxidantes para separar el uranio por lixiviación y los del tercer grupo son casi insolubles, esto conlleva a que el mineral a tratar proceda de una molienda fina, al empleo de oxidantes fuertes, a gastos en exceso de ácido y temperatura elevada.

8.3.1 LIXIVIACION ACIDA

Es la técnica de más uso, se aplica a los minerales de uranio con ganga silícica, con la desventaja de ser un proceso no muy selectivo; el uranio es disuelto con muchas impurezas.

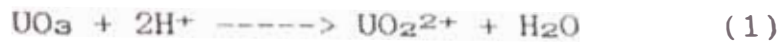
Los ácidos más comunes que se usan en ésta técnica son: el ácido sulfúrico, ácido nítrico y

el ácido fosfórico.

QUIMICA DEL PROCESO

Existen dos estados de valencia en los cuales ocurre en forma natural el uranio, la forma hexavalente (UO_3) y la tetravalente (UO_2).

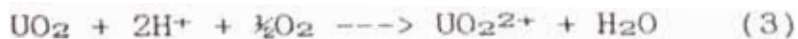
En el caso del uranio hexavalente, la reacción es:



En la solución el ión uranil forma complejos con el ión sulfato:



Para el caso del uranio tetravalente es necesario que el uranio se oxide:



La reacción (3) es muy lenta a las condiciones naturales. Para acelerar la oxidación del uranio tetravalente se realiza el proceso en presencia del ión férrico en solución, según la reacción siguiente:



La acción de un oxidante como MnO_2 , reoxida

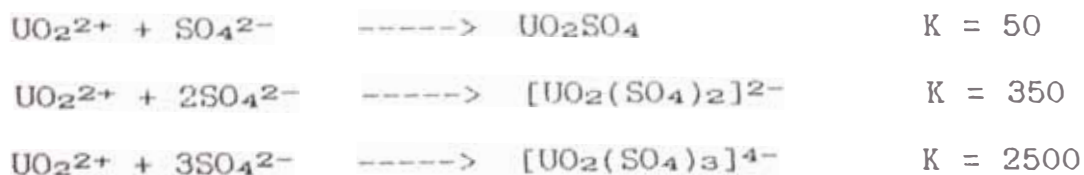
el ión ferroso a férrico:



El rol del ión férrico en la disolución ácida del UO_2 , actúa como un catalizador de transferencia de un electrón. Oxidantes como: MnO_2 , O_2 , ClO_3^- son menos efectivos que el Fe^{3+} en la solubilización del UO_2 a las condiciones ambientales de presión y temperatura.

La oxidación del UO_2 se determina por medición de la fuerza electromotriz del licor de lixiviación, que debe mantenerse entre - 400 y - 500 m V.

La lixiviación ácida se realiza con ácido sulfúrico acuoso, por ser preferentemente económico, accesible y por presentar la formación de los complejos siguientes:



8.3.1.1 VARIABLES DEL PROCESO

A) TAMAÑO DE GRANO.

Es una de las variables más importantes del proceso de lixiviación, de ella depende la veloci-

dad de disolución del uranio por un contacto efectivo del lixivante y la superficie del mineral. El requerimiento de la molienda podría variar desde 3 a 200 mallas, esto dependerá de la mineralogía y el tipo de proceso.

Un objetivo secundario, es producir un material que pueda ser pulpeado y bombeado a través del circuito de procesamiento.

Sin embargo la molienda exagerada conlleva a la disolución de la ganga (impurezas) que elevan el costo de operación.

B) DOSIS DE ACIDO

La cantidad de ácido sulfúrico que se emplea en la lixiviación oscila entre 20 - 100 Kg. por tonelada de mineral. Es la variable de mayor incidencia en los costos. (40% en costo total, 70% del costo de operación).

La acidez debe ser tal, que haya suficiente ácido libre para disolver el uranio sin mayor incidencia a la ganga y evitar la reprecipitación del uranio disuelto hasta poder extraerlo de las soluciones.

La presencia de ciertos iones produce la precipitación del UO_2^{2+} en los rangos de pH siguientes:

FOSFATOS	CARBONATOS	HIDROXIDOS	ARSENIATOS
1,9 a 2,5	3,5 a 6,0	3,8 a 6,0	1,3 a 1,7

Cuando la solución lixiviante (licor) contiene fosfato y arseniato es recomendable la presencia de iones férricos en exceso para retardar la precipitación del uranio.

C) OXIDANTES

Es fundamental el medio oxidante en el proceso de lixiviación por la presencia del U^{4+} o algún reductor del mineral siendo el ión férrico el oxidante de mayor uso, requiriéndose de 0,5 g/l como cantidad mínima para asegurar la oxidación de uranio tetravalente para alcanzar un fem de -430 mV.

D) RELACION SOLIDO - LIQUIDO (S/L)

Este parámetro es dependiente de la técnica de lixiviación. Para la lixiviación convencional la relación sólido - líquido varía de 1/1 a 1/3. Mientras que para la lixiviación en pilas la relación aumenta y es normal alcanzar relaciones de 1/1 ó aun mayores para los ciclos de lavado.

Esta relación aporta un doble beneficio en el proceso:

1° Economía en el consumo de ácido

2° Mayor concentración del lixiviado

E) TEMPERATURA

Influye en la velocidad de disolución de los minerales de uranio, aumentando la temperatura, se mejora la extracción del mineral refractario. El control de éste parámetro es de vital importancia, para evitar el ataque innecesario sobre el mineral de uranio que puede ocasionar un consumo excesivo de ácido.

En países como Canadá y Sud Africa la temperatura de lixiviación convencional oscila de 65 °C a 75°C para alcanzar una extracción satisfactoria.

Para el caso de lixiviación convencional del mineral de uranio de Macusani - Chapi, la temperatura óptima es de 40 °C.

F) DENSIDAD DE PULPA

La mejor densidad de pulpa en la lixiviación ácida es la que permite una adecuada agitación y un bombeo satisfactorio. Una mayor densidad permite reducir la capacidad de los tanques de lixiviación para un tiempo determinado de retención, requiriendose menor cantidad de ácido y oxidante para obtener mayor concentrado de uranio.

En forma industrial en los EE.UU la densidad de pulpa varía desde 50 a 60 % en contenido de sólidos, cuando se realiza una lixiviación por agitación mecánica. Un 75% en Canadá para una lixiviación por agitación con aire.

G) TIEMPO DE RETENCION

El tiempo necesario de lixiviación depende de todas las condiciones de ataque, como son: tipo de mineral (granulometría), concentración de ácido, intensidad de agitación, temperatura, densidad de pulpa etc.

Para cada mineral hay un tiempo **máximo**, más allá del cual no resulta económico continuar la lixiviación del mineral de uranio.

8.3.2 LIXIVIACION ALCALINA

Se realiza cuando el mineral de uranio contiene cantidades apreciables de caliza, pues son consumidoras de ácido. El reactivo que se emplea es una solución de carbonatos alcalinos o carbonato de amonio que puede extraer el uranio aprovechando la formación del complejo $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ que es muy soluble en agua con una gran estabilidad.

Esta técnica se puede aplicar tanto a los minerales de uranio primario, como a los secundarios. Para el primer caso se requiere una dosis muy fuerte de oxidantes para obtener una extracción satisfactoria. Por otra parte la íntima asociación del uranio con ciertos componentes de la ganga no son atacados por el lixivante, obligando a que la molienda sea más fina que en la lixiviación ácida a fin de exponer el ataque efectivo sobre las partículas del mineral.

VENTAJAS:

- a) carácter no corrosivo.
- b) Su selectividad por uranio, vanadio y algunos silicatos.
- c) Posible recuperación del uranio por precipitación del lixiviado.
- d) Posible uso de la solución resultante de la precipitación en la lixiviación, con la finalidad de emplear reactivos contenidos en la solución, que son muy costosos.

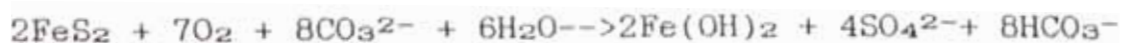
DESVENTAJAS:

Algunos minerales de la ganga pueden ser atacados por los alcalinos, originando un consumo en exceso del lixivante. Entre ellos tenemos:

YESO:



PIRITA:

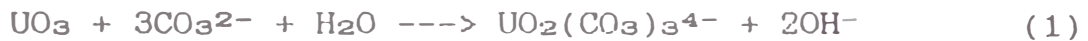


Esta técnica se usa únicamente, cuando el mineral de uranio contiene un exceso de minerales carbonatados que consumen en gran cantidad de ácido. A pesar de su aparente ventaja con respecto a la lixiviación ácida, existen razones de orden económico, en su aplicación, por ejemplo: el requerimiento energético

es casi el doble que el circuito ácido.

QUIMICA DEL PROCESO

1.- Para el uranio hexavalente, U^{6+}



2.- Para el Uranio tetravalente (U^{4+}), requiere condiciones de Oxidación.



El OH^- formado en las reacciones (1) y (2) producirá una precipitación del uranio cuando alcance una concentración que eleva el pH, según la reacción (3).



Para evitar éste inconveniente se agrega bicarbonato a fin de neutralizar el OH^- formado.



La concentración del ión bicarbonato requerido está en función de la ganga del mineral a tratar, pues las gangas sulfurosas, como la pirita

generan bicarbonato y otros los consumen.

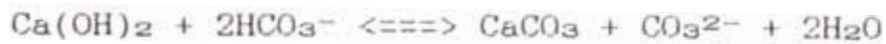
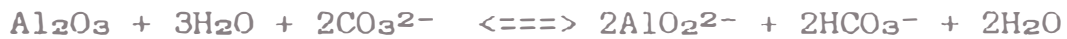
PIRITA:



SILICE:



ALUMINA:



8.3.2.1 VARIABLES DEL PROCESO

A) REDUCCION DE TAMAÑO

Como la lixiviación alcalina es selectiva, los carbonatos tienen una acción débil hacia la ganga. Por tanto el reactivo es restringido a la penetración del mineral. Esto es, una exposición limitada de los minerales de uranio reduce la velocidad de disolución, aumentando la velocidad de exposición.

La granulometría depende del tipo de relación del mineral de uranio y la ganga, llegando en algunos casos hasta el 70 - 80% menor que la malla 200.

B) CONCENTRACION DE REACTIVO

La cantidad de reactivo que se emplea en la lixiviación alcalina, debe ser tal que mantenga un pH de 9,0 a 10,5 en el proceso, esto se realiza en una pulpa cuya solución tiene una concentración de:

40 - 50 g/l de Na_2CO_3

10 - 20 g/l de NaHCO_3

Debe tenerse en cuenta que una concentración insuficiente de HCO_3^- produce un aumento de iones OH , que si pasa de un pH de 10,5 el uranio tiende a precipitarse como $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$.

C) CONDICIONES DE OXIDACION TEMPERATURA TIEMPO

El uranio hexavalente se disuelve fácilmente en soluciones de carbonatos alcalinos, mientras que el uranio tetravalente requiere de un oxidante.



La lixiviación alcalina requiere de alta temperatura de 70 a 80 °C en reactores Pachuca, 95 a 120 °C en autoclaves, y pudiendo permanecer hasta 96 horas en reactores "Pachuca".

D) DENSIDAD DE PULPA

Generalmente la densidad de pulpa en la lixiviación alcalina se mantiene en un rango de 50 - 60 % de sólidos, lo que permite una agitación por aire.

8.4 ESTUDIO DE LA BACTERIA APLICADA EN LIXIVIACION DEL MINERAL DE URANIO PROCEDENTE DE CHAPI-MACUSANI (PUNO)

Para la lixiviación bacteriana del mineral de uranio, es conveniente saber las características y la cantidad de células presentes en un mililitro de cultivo, antes del inicio del proceso de lixiviación microbiológica.

La lixiviación de metales, como el uranio, cobre, etc. por medio de microorganismos, es un proceso fisiológico y químico de oxidación-reducción. Esto implica que el metabolismo de la bacteria, incluye una oxidación de un substrato adecuado.

8.4.1 ESTUDIO DE LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS.

La bacteria de mayor interés en el proceso de lixiviación de minerales de uranio hasta la fecha es la bacteria del género Thiobacillus - Ferrooxidans. Esta bacteria está clasificada como QUIMIOLITOTROFO y su fuente de alimentación son sustancias químicas reducidas de Hierro o Azufre. Es decir que puede derivar la energía para su crecimiento desde la oxidación de azufre o desde la oxidación de iones Fe^{2+} a Fe^{3+} con la presencia de oxígeno.



Donde:

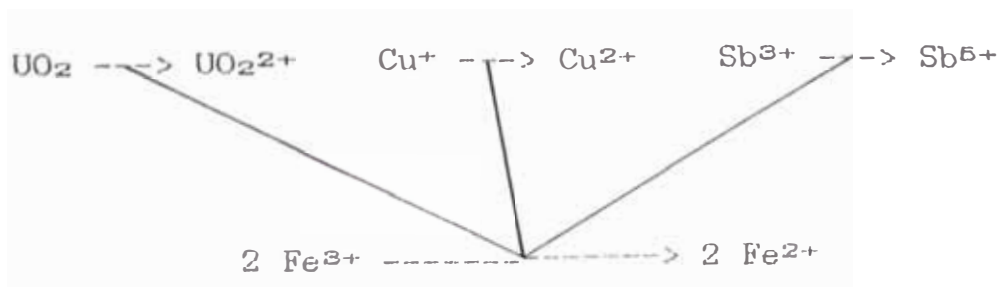
E: Energía necesaria para la producción de ADENOSI-TRIFOSFATO (ATP)

El ATP es una sustancia conservadora de la energía en el metabolismo de la célula. Por esta razón, la bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* es el microorganismo más importante involucrado en la lixiviación del mineral de uranio. Este proceso generalmente tiene lugar en dos etapas: Oxidación y acidificación, ésta última etapa depende de la presencia del azufre, como FeS_2 , en el mineral.

Las etapas mencionadas de oxidación y acidificación se muestra en la siguiente reacción:



El ión férrico formado por la oxidación del sulfuro ferroso o sulfato ferroso, puede oxidar a una variedad de minerales, tales como uranio, Cobre y otros, como se muestran en el siguiente esquema:



Este proceso se conoce generalmente como ataque indirecto.

Durante la oxidación el O_2 , H^+ y Fe^{2+} son consumidos. el Fe^{3+} y H_2O , son el producto de la reacción. Este proceso ocurre a una acidez externa de pH 1.8 (pero el pH interno es neutro) que producirá un gradiente electroquímico para la síntesis de 1 mol de ATP por 2 moles de iones ferrosos oxidados.

8.4.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS.

PARAMETROS	CARACTERÍSTICAS
FORMA	Alargada
Tamaño (um)	0,3 - 0,5 x 1,0 - 1,7
Pared Celular	GRAM - Negativo
Flagelo	+ (uno)
Fuente de energía para su crecimiento	S^0 , Fe^{2+} , $S_2O_3^{2-}$, $S_4O_6^{2-}$
Rango de pH (óptimo)	1,2 - 6,0 (1,8 - 2,5)
Fuente de Nitrógeno	NH_4^+
Relación de Oxígeno	Anaeróbico estricto
Temperatura: de crecimiento	$5^{\circ}C - 40^{\circ}C$
óptima	$28^{\circ}C - 35^{\circ}C$

8.4.2 MEDIOS DE CULTIVO

Entre los medios de cultivo utilizados en la investigación de microorganismos aplicadas en el tratamiento de minerales, existen una gran variedad de formulaciones. Estos medios de cultivos están definidos químicamente, conteniendo nutrientes indispensables y en la cantidad necesaria para permitir el desarrollo de las células.

Las composiciones típicas del medio de cultivo, en especial para la bacteria *THIOBACILLUS FERROXIDANS* se muestra en el cuadro N^o 8 - 3.

8.4.3 CULTIVO DE LA BACTERIA

La bacteria que se cultivó pertenece al género *Thiobacillus Ferroxidans*, proveniente de las aguas de Mina de CENTROMIN PERU (Cerro de Pasco). El medio de cultivo que se empleó, es la formulación de Tuovinen - Kelly (TK).

PROCEDIMIENTO

- a) Preparar una solución de pH 1,6 con agua destilada y ácido sulfúrico 1,0 N.
- b) Añadir las siguientes sales (g/l):

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ----> 0,5

K_2HPO_4 -----> 0,5

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ---> 0,5

CUADRO N° 8-3

FORMULACIONES TÍPICAS DEL MEDIO DE CULTIVO PARA
LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS (g/l)

COMPONENTE	MEDIO DE CULTIVO			
	9K	TUOVINEN-KELLY	KELLY-JONES	BRYNER
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	3,00	0,5	0,360	1,00
K_2HPO_4	0,50	0,5	0,054	0,30
KCl	0,10	---	----	0,05
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,50	0,5	0,150	3,00
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0,01	---	----	0,10
$\text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	--	---	----	8,00
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	--	---	----	0,05
Na_2SO_4	--	---	----	0,05

COMPONENTE DE ENERGIA

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	44,2	30,0	44,2	22,5
---	------	------	------	------



FOTO No. 8 – 5. Preparación del medio de cultivo para la Bacteria THIOBACILLUS FERROOXIDANS. Lab. Hidrometalurgia – IPEN.

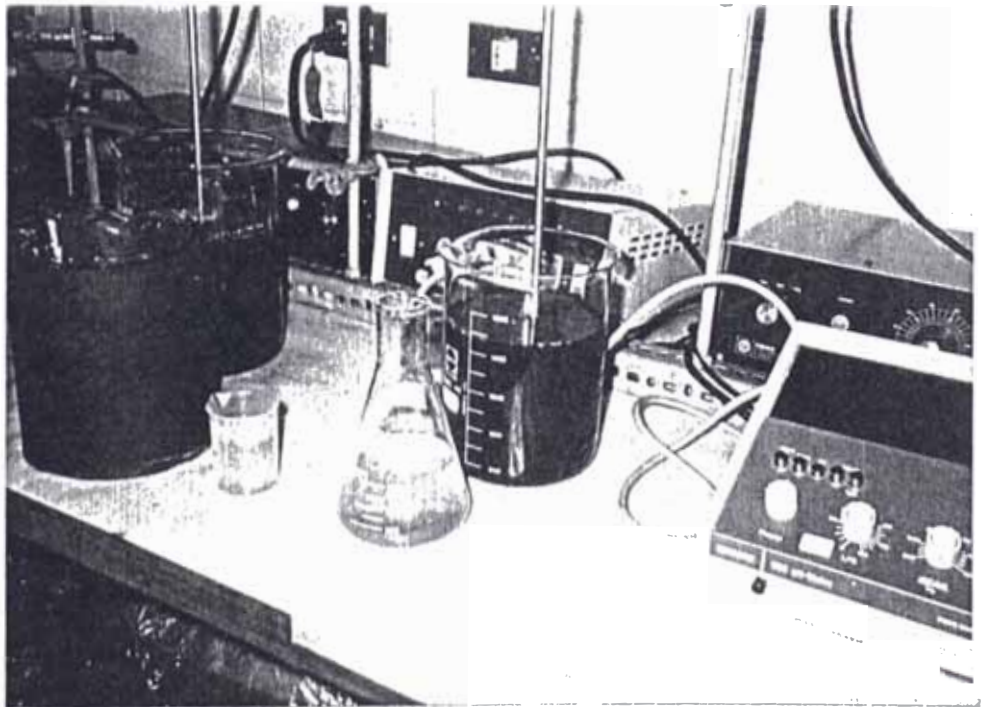


FOTO No. 8 – 6. Cultivo de la Bacteria THIOBACILLUS FERROOXIDANS en Operación. Lab. Hidrometalurgia – IPEN.

- c) Esterilizar en autoclave a 121°C (15 lb/pul^2) de presión de vapor durante 30 a 40 minutos.
- d) Enfriar la solución esterilizada, durante 3 a 4 horas.
- e) Añadir 30 g/l de sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- f) Inocular la bacteria en agitación lenta.
- g) Mantener la agitación del medio en 110 rpm.
- h) Realizar el conteo de las células regularmente.

Se han realizado pruebas experimentales en el cultivo de las células bacterianas, sin esterilizar el medio de cultivo obteniendo una población mayor de 42'000 000 de células por mililitro de cultivo. Estas pruebas se realizarón en el laboratorio de procesos y ensayos (DMP) del IPEN.

En el proceso de cultivo de bacterias es importante el control de la acidez del medio, para evitar la precipitación de Fe^{3+} .

Con el propósito de adaptar a la bacteria, para el proceso de lixiviación del uranio, también se realizó un cultivo en medio sólido. Esto porque, las células provenientes del cultivo líquido al inocular al mineral para lixiviar, sufrirá una inhibición temporal a la actividad bacterial; siendo necesario de cierto tiempo para que estas puedan adaptarse, crecer, desarrollarse, etc. en el medio.

8.4.4 CONTEO DE BACTERIAS

El crecimiento de la bacteria *Thiobacillus Ferroxidans* (número de células/ml), se determinó mediante el conteo directo de las células en una cámara de NEUBAUER, o "THOMA" haciendo uso de un microscopio que cuente con un accesorio adicional denominado contraste de fase. Este accesorio mejora mucho la observación de las células, sin el cual resulta muy difícil la detección de la bacteria en la cámara; esto debido a que las bacterias *Thiobacillus Ferroxidans* son muy delgadas y sin coloración especial. (Cuadro N^o 8-4)

8.4.5 PARAMETROS QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO DE LA BACTERIA.

Es necesario tener en cuenta una serie de variables que la células bacterianas precisan para su crecimiento y reproducción, entre ellos se tiene:

a) ACIDEZ (pH)

En la lixiviación del mineral de uranio es decisivo que el lixivante esté acondicionado en una acidez adecuada, que permita la máxima solubilización del uranio acompañado de una mínima cantidad de impurezas en el proceso de recuperación. Esto se logra acondicionando un pH predeterminado, en el lixivante. Para el presente estudio el pH de lixiviación varia

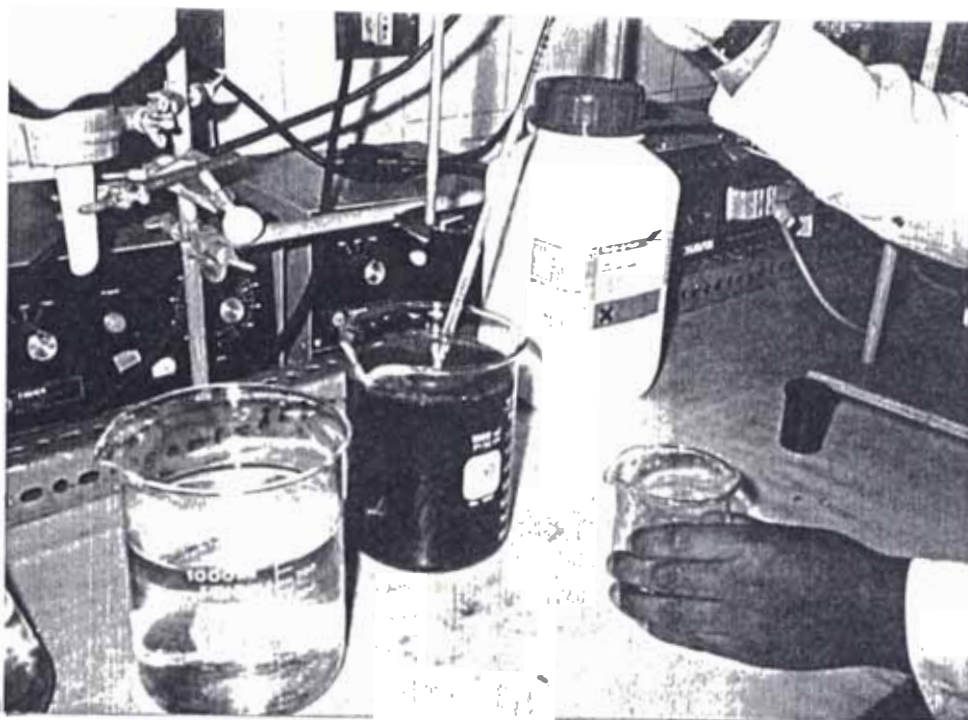


FOTO No. 8 – 7. Extracción de muestra para realizar el conteo del número de células. Lab. de Hidrometalurgia – IPEN.

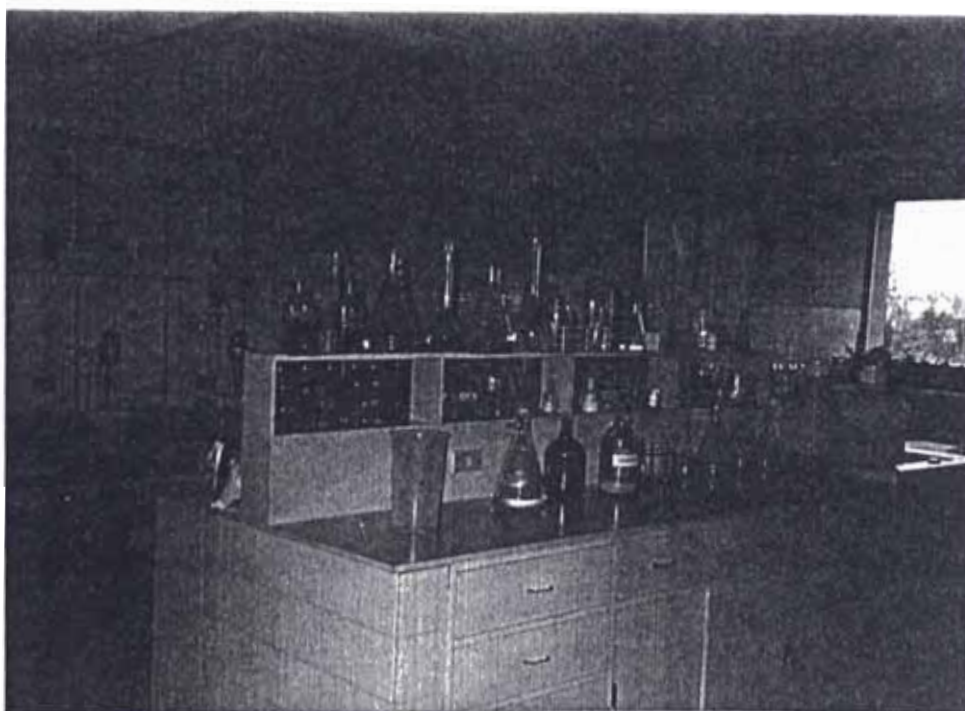
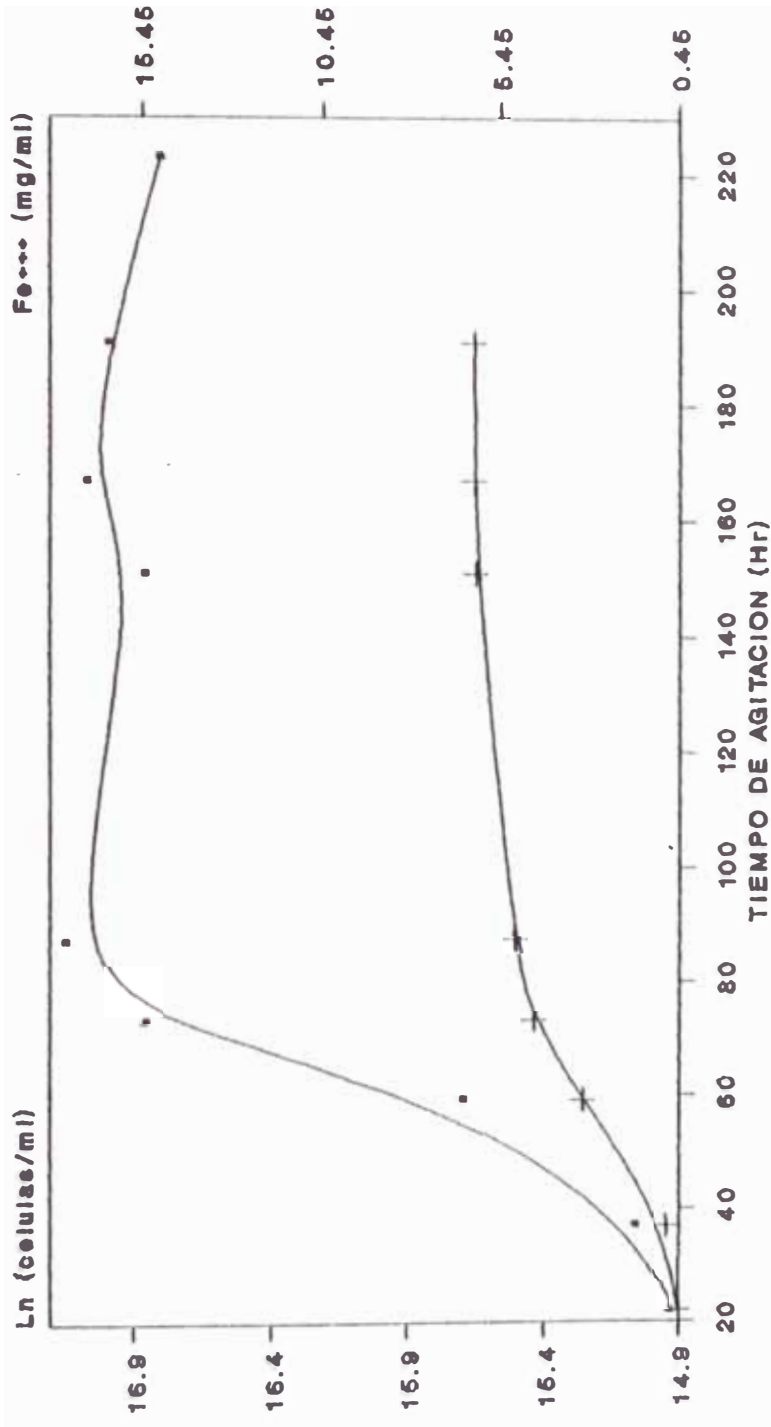


FOTO No. 8 – 8. Laboratorio de Hidrometalurgia del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), donde se realizó el cultivo de Bacterias y la Lixiviación Bacteriana del mineral de Uranio.

GRAFICO N° 8-3

CURVA DE CRECIMIENTO DE LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS Y LA CINETICA DE OXIDACION DE Fe⁺⁺



• CRECIM. DE BACTERIA + Fe⁺⁺ mg/ml

REALIZADO EN: LAB. HIDROMETALURGICO IPEN
REPORTE: 6 ABRIL - 21 MAYO LIMA-PERU

según la planificación del ensayo.

Cuando se lixivía el mineral de uranio con Thiobacillus Ferrooxidans, estas deben estar adaptadas a las condiciones de acidez de lixiviación, antes de inocular. Esto para evitar la inhibición temporal de la célula bacteriana en el proceso de oxidación del sustrato.

b) NUTRIENTES

Todo ser vivo tiene un conjunto de requisitos nutricionales básicos. El thiobacillus ferrooxidans es una bacteria especial con respecto a sus necesidades por nutrientes.

La nutrición tiene tal importancia que el aumento de la producción metálica (uranio, cobre, etc.) está vinculado al aumento del crecimiento y reproducción celular.

El Thiobacillus Ferrooxidans requiere para su desarrollo de sustancias químicas como: K_2HPO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, donde el fósforo es requerido para el metabolismo energético y para los primeros pasos de oxidación del hierro. El magnesio es necesario para la fijación del CO_2 .

c) OXIGENO Y DIOXIDO DE CARBONO

Todo microorganismo autótrofo quimiosintético debe de tener un sistema de enzimas para con-

vertir el CO₂ en compuestos orgánicos, de la cual es sintetizada la materia orgánica para la formación de enzimas y protoplasma, para el crecimiento y reproducción de las células. Mientras que para los sistemas heterotrofos que utilizan compuestos orgánicos como fuente de carbono, los enlaces carbono - carbono (c-c) ya están formados. Esto implica que los sistemas autotróficos requieren más energía que las células heterotróficas. El CO₂ es un factor limitante para el crecimiento y desarrollo del *thiobacillus ferrooxidans*, esto por la solubilidad baja que presenta en soluciones ácidas.

El oxígeno sirve como receptor de electrones en el proceso de oxidación, se le considera como un factor que controla la extracción de metales. Hasta ahora es el único oxidante usado por la bacteria *Thiobacillus* en ambientes del proceso de lixiviación.

d) **TEMPERATURA**

La temperatura es una variable que limita el desarrollo y crecimiento de las células bacterianas en el medio de cultivo líquido, sólido y en la lixiviación del mineral de uranio.

El rango de temperatura para la actividad óptima del *thiobacillus ferrooxidans*, es de 28°C - 35°C. Para otro microorganismo la temperatura de desarrollo es diferente.

El cultivo de bacteria realizado en el laboratorio del IPEN fue de 18°C a 25°C (temperatura ambiental) a una acidez adecuada, pensando en las mismas condiciones de pH, y temperatura del proceso de lixiviación.

e) EFECTO DE LA LUZ

Los rayos ultravioletas tienen un efecto de inhibición al crecimiento y desarrollo del *thiobacillus ferrooxidans*. Para evitar éste efecto, el cultivo bacterial se realizó en la oscuridad.

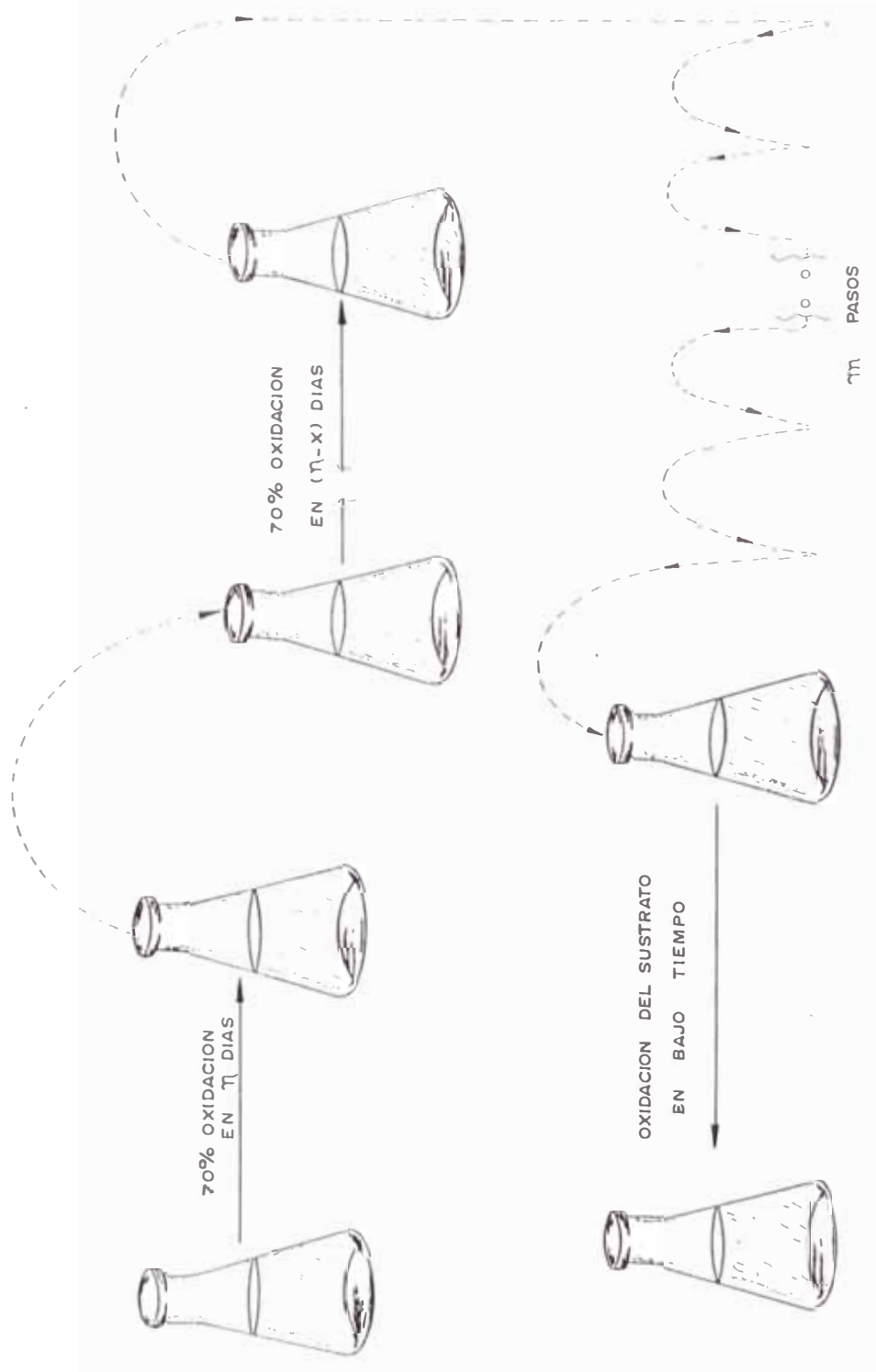
A medida que el substrato (hierro) esté siendo oxidado a férrico por la bacteria, este poderoso oxidante ofrece protección de los rayos visibles.

En el proceso de lixiviación del mineral de uranio en columnas de PVC, el efecto de inhibición por la luz desaparece, favoreciendo el crecimiento y la actividad metabólica de la bacteria.

8.4.6 ADAPTACION DEL *THIOBACILLUS FERROOXIDANS*

La producción de biomasa obtenida por medio de una serie de cultivos sucesivos sobre el mismo substrato, da como resultado una progresiva adaptación de la célula, logrando reducir la fase muerta (fig N° 2-1), incremento de la velocidad de oxidación en el substrato y el aumento de la velocidad de reproducción de las células (mayor pendiente de la fase exponencial).

ADAPTACION DE LA BACTERIA T. FERROXIDANS POR CULTIVOS SUCCESIVOS



La adaptación de la Bacteria finaliza cuando el tiempo de oxidación del sustrato Fe^{2+} a Fe^{3+} en un 70 % de dos medios de cultivos sucesivos son iguales.

8.5 LIXIVIACION BACTERIANA DEL URANIO

8.5.1 GENERALIDADES

El incremento de la extracción del uranio en presencia del ión férrico, a llevado a un renovado interés por la lixiviación férrica. Esto ha motivado ha que se realicen estudios sobre la disolución óptima de uranio bajo condiciones de temperatura, concentración de ácido y nivel de ión férrico.

El desarrollo de procesos para la oxidación de iones ferrosos a férrico ha agregado nuevo ímpetu en el uso de la bacteria del género *thiobacillus ferrooxidans* en la lixiviación de minerales de uranio. En la actualidad es muy conocida la acción de la bacteria mencionada en la lixiviación de minerales de uranio y cobre, en pilas, desechos e "in situ". De esta forma, la lixiviación bacteriana es aplicable como una alternativa a la recuperación de valores metálicos partir de minerales que no son "rentables" económicamente con el tratamiento convencional

La bacteria *thiobacillus ferrooxidans* no

actua directamente sobre las especies uraníferas, sino sobre otras sustancias tales como: hierro ferroso, sulfuros, etc. produciendo medios lixiviantes poderosos que disuelven el uranio según las reacciones siguientes:



El ataque de la bacteria a la pirita es directo en presencia del oxígeno (Ec. 1), e indirectamente por el sulfato férrico (Ec. 3) proveniente de la oxidación bacteriana de las sales ferrosas (Ec. 2). En presencia de sales férricas la disolución química de la pirita es mucho más rápida que el ataque directo con bacterias, igualmente lo es la oxidación bacteriana de las sales ferrosas.

La disolución del uranio tetra y hexa valente, por las sales férricas y el ácido sulfúrico se representa a continuación:



Las condiciones idóneas para el funcionamiento metabólico de la bacteria en el proceso de oxidación del sustrato es:

pH : 1.2 - 1,8
T (°C) : 28 - 35

A todo ello, se agrega una buena aireación (O₂, CO₂), una suficiente cantidad de sustancias energéticas (sales ferrosas ó pirita), acompañados de suficiente cantidad de nutrientes inorgánicos

8.5.2 ROL DE LA BACTERIA

El thiobacillus ferrooxidans podría jugar dos roles en la lixiviación del mineral de uranio: oxidación directa de uranio tetravalente a uranio hexavalente o un rol intermedio de proporcionar suministro del ión férrico (Fe³⁺) el cual lleva a cabo la oxidación de U⁴⁺. Hasta donde se conoce la bacteria actua en forma indirecta en la solubilización del uranio (Ec. 6)

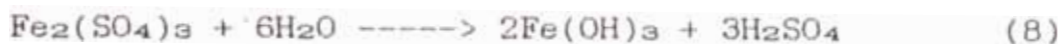


El ión ferroso producido (Ec. 6) es nuevamente oxidado a la forma férrica por la bacteria THIBACILLUS FERROOXIDANS en el proceso de lixiviación

de acuerdo a la reacción (7)



En esto se corre el riesgo de que se forme un precipitado de hidróxido férrico, $\text{pH} \geq 2,5$ (Ec. 8) ó frecuentemente como sulfato férrico básico (jarosita) (Ec. 9), que tiene un efecto negativo en el proceso de lixiviación o ataque al substrato por la bacteria y del lixivante



De lo mencionado anteriormente se deduce que el rol de la bacteria en el proceso de lixiviación del uranio, parece estar confinado a la regeneración del oxidante químico, ión férrico, y a la producción del lixivante.

8.5.3 AUMENTO DE LA ACTIVIDAD BACTERIAL

Con el fin de aumentar la solubilización del uranio, es necesario promover la oxidación micro-biológica del ión ferroso, debido a que la energía emitida durante estos pasos de oxidación puede emplearse para el crecimiento y desarrollo de la célula bacte-

riana como la única razón. Para que exista la oxidación bacterial, el ambiente de proceso debe estar optimizado para promover un rápido crecimiento de la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*. Los factores más importantes son:

- 1.- Número razonable de células
- 2.- Suministro adecuado de humedad
- 3.- Un pH óptimo
- 4.- Una fuente de energía disponible
- 5.- Suministro suficiente de O₂ y CO₂
- 6.- Suministro necesario de nutrientes esenciales
- 7.- Ausencia de cualquier inhibidor

El *thiobacillus ferrooxidans* es una bacteria de tipo CHIMIOAUTOTROFICA, es decir obtiene su energía a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos como:



Es un microorganismo de suelos aeróbicos el cual puede ser hallado en cualquier lugar de la naturaleza, donde estén presentes las condiciones ácidas asociado con el ión ferroso o con mineral sulfuroso. Esta bacteria requiere de un tiempo relativamente corto para su regeneración; según reporte de laborato-

rio por Harrison, Gow y Hughson²:

<i>REPORTE</i>	<i>SUBSTRATO</i>
6.5 h	Ión ferroso
14.0 h	Chalcopyrita

Los reportes mencionados dependen en gran parte de todas las variables que afectan directamente a las células bacterianas; en los casos donde el control de variables que limitan el crecimiento y desarrollo son relativamente deficientes, tomará mucho tiempo de generación (incluso días) para que la célula pueda dividirse en dos

Es importante el requerimiento de la humedad por la bacteria en el proceso de lixiviación, porque actúa como un vehículo para transferir los nutrientes, el O₂ y el dióxido de carbono requeridas, así como para remover los productos de su actividad y para sus traslados a otras áreas superficiales.

El desarrollo de las células bacterianas está sujeto a un establecimiento de niveles adecuados de acidez y sólo en ese rango oxidará el substrato para obtener la energía biológica que requiere, de esta forma se logra un aumento de la actividad bacterial en la lixiviación de minerales de uranio. ¿ Como ocurre la conversión de energía de estos microorganismos ?

El sistema de conversión ocurre en una membrana que posee una secuencia de proteínas, cuya

función es transferir los electrones. Los electrones que reciben estas proteínas son obtenidos de las fuentes de energía a un nivel energético alto y pasan a lo largo de las cadenas de proteínas desde un agente desconocido a través de una coenzima y dos citromas, hasta que el oxígeno molecular sea reducido. En el paso de los electrones por la cadena de proteínas, estas pierden energía, esa energía es ganada por la bacteria que la utiliza para sintetizar un compuesto rico en energía, el ATP, que es un portador biológico de energía, y responsable del ciclo de reacciones bioquímicas.

En resumen, lo que necesitan estas bacterias es absorber electrones ! a altos niveles de energía para poder vivir. (ver fig. N° 8 - 4)

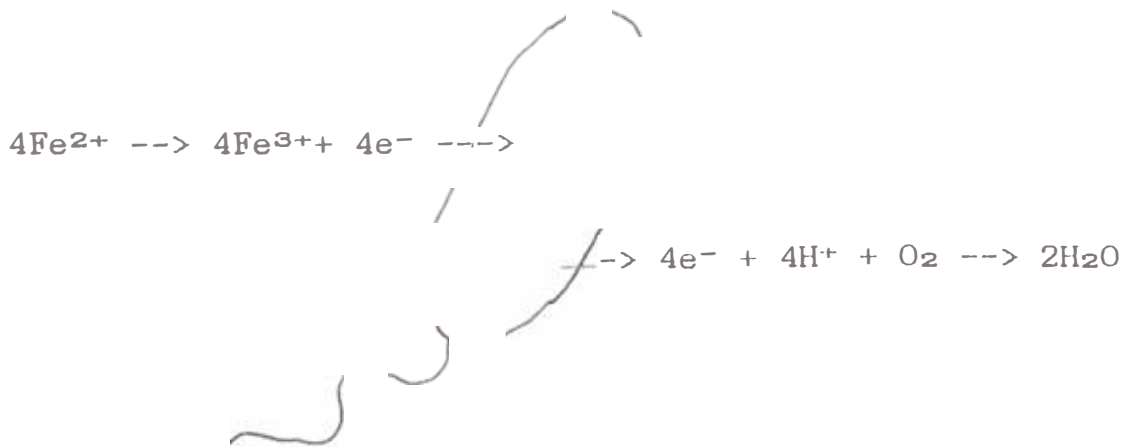


Fig. No. 8-4

8.5.4 TOLERANCIA DE LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS A LOS METALES EN LA LIXIVIACION

La Bacteria *Thiobacillus Ferrooxidans* utilizadas en la lixiviación bacteriana del mineral de uranio, tiene una notable tolerancia a metales, comparadas con otros microorganismos. Pero, esta tolerancia se puede mejorar por la crianza de generaciones sucesivas en medios de cultivo con la concentración progresiva de iones metálicos. De esa forma se les puede adaptar y producir cepas de mayor tolerancia a ciertos elementos metálicos. (Tabla Nº 8 - 1).

El investigador KEENAN demostró que las bacterias pueden lograr una oxidación de Fe^{2+} unas 200 000 veces más rápido que la oxidación electroquímica, a cierta condición de medios de oxidación. Con el cuidado de no excederse de 25 g/l de ión férrico, para evitar la inhibición al crecimiento y desarrollo de la célula del *thiobacillus ferrooxidans*.

Concretamente, en la lixiviación bacteriana de minerales de uranio con el *thiobacillus ferrooxidans* todavía hay mucho que investigar. Como el problema de la radioactividad del mineral ¿Inhibe a la bacteria la radiactividad del mineral?. BRUYNES-TOYN sostiene que los rayos Gama (δ) y Beta (β) emitidos por el mineral !No afectan! a las bacterias.

TABLA N° 8-1

TOLERANCIA DE LA BACTERIA THIOBACILLUS FERROOXIDANS A LOS METALES

METAL	TOLERANCIA MAXIMA	
	g/l	Molar(M)
Al	12	0.44
Cu	55-60	0.87
Zn	120-130	1.8
Ni	50-55	0.85
Co	10	0.17
U	10	0.04
UO ₂ ²⁺	12	0.044
Th ⁴⁺	0.58	2.5x10 ⁻³
Ag	5x10 ⁻²	0.5x10 ⁻³
Iones As	5x10 ⁻²	0.7x10 ⁻³
Iones Se	5x10 ⁻²	0.6x10 ⁻³
Iones Te	5x10 ⁻²	0.4x10 ⁻³
Mo	5x10 ⁻³	0.3x10 ⁻⁴
Hg	0.1	0.5x10 ⁻³
Fe ³⁺	25	0.446

FUENTE: PRIMER SEMINARIO SOBRE TECNOLOGIAS BIO
E HIDROMETALURGICAS (JUNTA DE ACUERDO DE
CARTAGENA LIMA-1989)

8.5.5 ENSAYO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACION BACTERIANA DEL MINERAL DE URANIO CHAPI-MACUSANI (PUNO)

8.5.5.1 INTRODUCCION

El propósito de realizar la lixiviación por percolación del mineral de uranio con la participación de microorganismos, es la de comparar la eficiencia de extracción del uranio en la lixiviación Química-biológica respecto a la lixiviación ácida con ataque normal.

Esta técnica de lixiviación bacteriana, ha servido para demostrar que la separación de uranio del mineral procedente de Macusani - Chapi Alto (Puno) es realizable y con una eficiencia del doble que la lixiviación sin bacterias.

La gran ayuda que brinda el mineral tratado, es proporcionan las sustancias inorgánicas, como: Calcio, Magnesio, Fosfato, Hierro, etc. que son nutrientes fundamentales para el crecimiento y desarrollo de la bacteria *thiobacillus ferrooxidans*. Como quiera que el principal componente uranifero del mineral lixiviado es la Autunita, $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ se logra de ésta forma que el proceso de lixiviación sea más eficiente.

La ventaja de realizar la lixiviación con bacterias en el procesamiento de minerales de uranio, es la generación del oxidante Fe^{3+} a partir de

Fe^{2+} con mayor velocidad que la reacción electroquímica, solubilizando de esta forma el uranio tetravalente a un menor costo.

8.5.5.2 CONDICIONES DE ENSAYO EN EL LABORATORIO

a) LECHO DE LIXIVIACION

COLUMNA DE LIXIVIACION			LECHO FILTRANTE	
TUBO	DIAMETRO	ALTURA	MATERIAL	ALTURA
PVC	2"	24"	Grava de río	1,57"

GRANULOMETRIA DE LECHO FILTRANTE

MALLA TYLER	VOLUMEN (cm ³)
4	40
10	20
18	20
25	1

b) MINERAL DE URANIO A LIXIVIAR

PROCEDENCIA DEL MINERAL	CANTIDAD (Kg) POR COLUMNA	GRANULOMETRIA	ALTURA DEL MINERAL EN LA COLUMNA
Chapi-Macusani (Puno)	1,0	-1/4"	12,2"

c) PLANIFICACION DEL ENSAYO DE LIXIVIACION

PARAMETRO	COLUMNA			
	C1	C2	C3	C4
Bacteria	---	✓	✓	✓
Temperatura Ambiental (20°C)	✓	✓	✓	✓
Granulometría	- 1/4 "	- 1/4 "	- 1/4 "	- 1/4 "
pH	1,5	1,5	1,5	1,8
Oxidante $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ 1 a 20 días.	---	---	33 g	---

8.5.5.3 PROCEDIMIENTO DE LIXIVIACION BACTERIANA

Las cuatro columnas de lixiviación fueron cargadas con 10 Kg. de mineral de uranio y operadas según la planificación del ensayo. En el riego del lixivante las columnas se emplearon peras de 1 litro de capacidad, con las características de que en

cada columna de lixiviación se disponga un espacio de 7 cm. de altura para el espejo del lixivante. Este sistema de riego se autocontrola por el principio de diferencia de presiones, de esa forma no requiere personal para el control de riego y también evita el rebalse del lixivante.

El cargado de mineral homogenizado a las columnas de lixiviación se realiza de tal forma, que las partículas del mineral de uranio al depositarse no se clasifique por tamaño, este paso es de suma importancia para el contacto adecuado del lixivante con el substrato. Dicho de otra manera, el mineral en la columna debe estar formado por un lecho homogéneo para evitar zonas preferenciales a la percolación, llamado efecto de pared.

Todas las columnas de lixiviación disponen de un lecho filtrante que permite el fácil drenaje del licor. El lecho mencionado está formado por gravas y arenas de río resistentes al ácido sulfúrico, clasificados por tamaño, debidamente lavadas.

Al pie de cada columna se dispone de recipientes de 600 ml. para recibir la solución que sale del sistema de lixiviación.

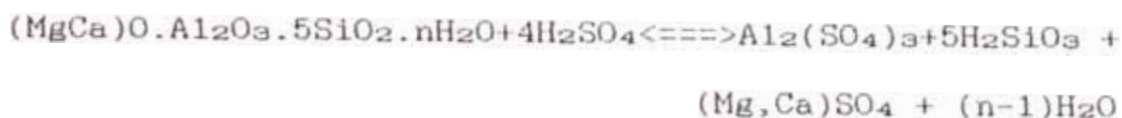
El proceso de lixiviación de minerales de uranio consta de las siguientes etapas:

ETAPAS DEL PROCESO DE LIXIVIACION
BACTERIANA DEL URANIO

1.- HUMECTACION -NEUTRALIZACION

Se inicia agregando al lecho de lixiviación un volumen de solución ácida, cuya concentración es prefijada a las condiciones de la experiencia, desde la pera (recipiente de riego) para luego recibir el excedente en el recipiente receptor del licor, dejando que drene en forma total la solución agregada hasta que el goteo sea nulo. Al cabo de ese tiempo se logra recoger en la base de las columnas un volumen inferior al volumen agregado (V) puesto que el mineral se ha humectado en función de sus características como: granulometría, porosidad, capilaridad, etc. A éste volumen de líquido retenido en el seno del mineral en las columnas se les llama volumen humectante (VH), que representa el máximo grado de humedad compatibles con las condiciones del mineral en el lecho de lixiviación. El volumen recogido en la base de las columnas ($V - VH$), pH y potencial de oxidación (mv) es registrado en la planilla de control, luego es ajustado el volumen y el pH prefijado para ser transvasado al recipiente de riego de esta forma debe iniciar un nuevo ciclo. Esta operación se repite diariamente hasta que el pH de salida del lecho de lixiviación sea igual al pH de planificación de ensayo.

En esta etapa de acondicionamiento del sistema se tienen las siguientes reacciones hipotéticas:



2.- LIXIVIACION

Una vez conseguida la uniformidad de pH prefijado en el lecho de lixiviación se inocular la bacteria *thiobacillus ferrooxidans* en las columnas según la planificación de ensayo.

El licor cargado de uranio es evaluado en volumen, pH, potencial de oxidación, etc. para luego acondicionar la acidez, volumen en forma diaria y ser transvasado al recipiente de riego (pera), de esa forma se inicia un nuevo ciclo de lixiviación

Es conveniente retirar el volumen circulante de

la lixiviación cada cierto tiempo que crea conveniente el investigador. Las razones principales para optar lo mencionado son:

- 1.- Evitar la inhibición bacterial por efecto de iones metálicos
- 2.- Evitar la alta viscosidad del licor que reduce la permeabilidad del lecho.
- 3.- Evitar la pérdida de células bacteriales

Esta etapa de lixiviación nos conduce a obtener la máxima solubilidad del uranio, llegado a este punto se espera el drenado total de las columnas, para luego iniciar la etapa de lavado.

3.- LAVADO

Consiste en realizar el desplazamiento de las soluciones de uranio retenidas dentro del lecho de lixiviación, con soluciones ácidas débiles para evitar la hidrólisis de los compuestos solubilizados y finalmente el desplazamiento debe realizarse con agua fresca. En esta etapa no hay reciclaje de soluciones, solamente renovación.

El volumen de solución requerida para el lavado (VL) en términos aproximados es de 4 a 6 veces del VH con una percolación muy lenta según la naturaleza del mineral y el contenido de Uranio en VH (solución retenido).

**8.5.5.4 CUADROS DE RESULTADOS, GRAFICOS Y
RESUMEN DE PLANILLA DE CONTROL.**

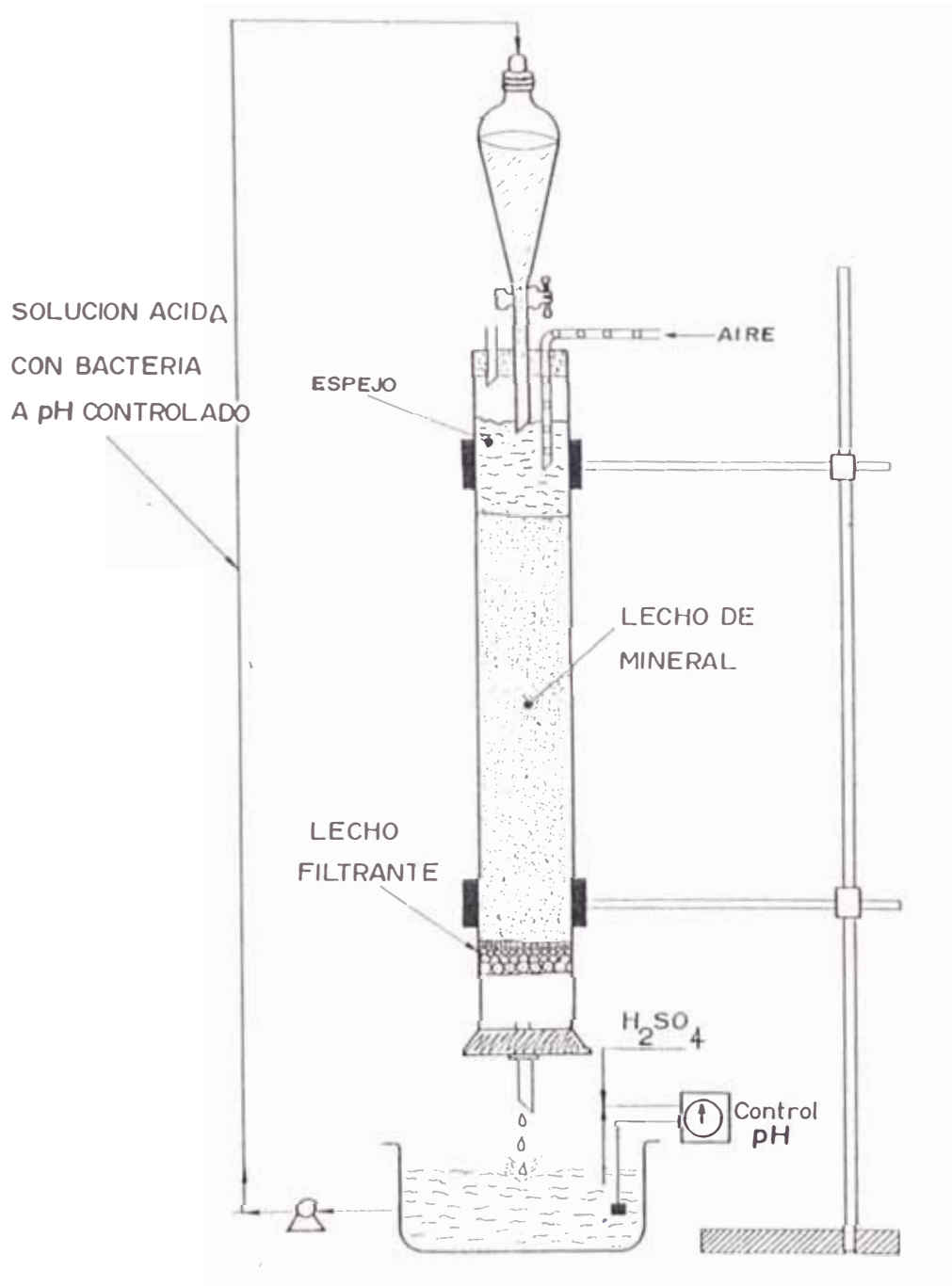
Para mejor interpretación del proceso de lixiviación bacteriana del mineral de Uranio procedente del Yacimiento Chapi-Macusani (Puno), se muestra los siguientes cuadros, gráficos y el resumen de la investigación de la presente Tesis en una planilla de control de las columnas de lixiviación según la planificación de ensayo (8.5.5.2c). Estas planillas de control son las " Libretas electorales " del proceso de lixiviación en cada columna, realizada tal como se mencionó en el capítulo I.



FOTO. Columna de Lixiviación Bacteriana en pleno montaje por Leoncio Cisneros (de lentes) y Lincoln Jara, realizado en las Instalaciones de la División de Materias Primas - IPEN.



FOTO No. 8 – 11. Columna de Lixiviación Bacteriana del mineral de Uranio en Operación. Lab. de Hidrometalurgia – IPEN.



COLUMNA DE LIXIVIACION BACTERIANA
DEL MINERAL DE URANIO

CUADRO N° 8-5

RESULTADO DE LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO PARA URANIO

FIERRO Y FOSFORO

REPORTE : LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO-I.P.E.N.

COLUMNA C1

N° muestra de Laboratorio	Fecha de analisis	Uranio (mg/ml)	Fierro (mg/ml)	Fosforo (mg/ml)
084	28-5-91	0,29	0,019	0,42
089	17-6-91	1,03	0,081	0,66
094	27-6-91	1,03	0,077	0,49
098	15-7-91	0,88	0,078	0,34
102	26-7-91	1,22	0,124	0,43
106	5-8-91	1,23	0,130	0,52
110	12-8-91	0,88	0,070	0,28
115	18-9-91	1,12	--	--
119	19-9-91	0,88	--	--
123	20-9-91	0,21	--	--

COLUMNA C2

N° muestra de Laboratorio	Fecha de analisis	Uranio (mg/ml)	Fierro (g/ml)	Fosforo (mg/ml)
085	28-5-91	0,29	0,009	0,29
090	17-6-91	3,97	1,76	0,94
095	27-6-91	3,40	2,97	1,07
099	15-7-91	1,50	4,31	1,06
103	26-7-91	1,43	5,15	1,15
107	5-8-91	1,33	5,61	1,11
111	12-8-91	0,87	5,22	0,48
116	18-9-91	0,34	--	--
120	19-9-91	0,16	--	--
124	20-9-91	0,01	--	--

CUADRO N° 8-6

RESULTADO DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO

DE URANIO, FIERRO Y FOSFORO

REPORTE : LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO-IPEN

COLUMNA C3

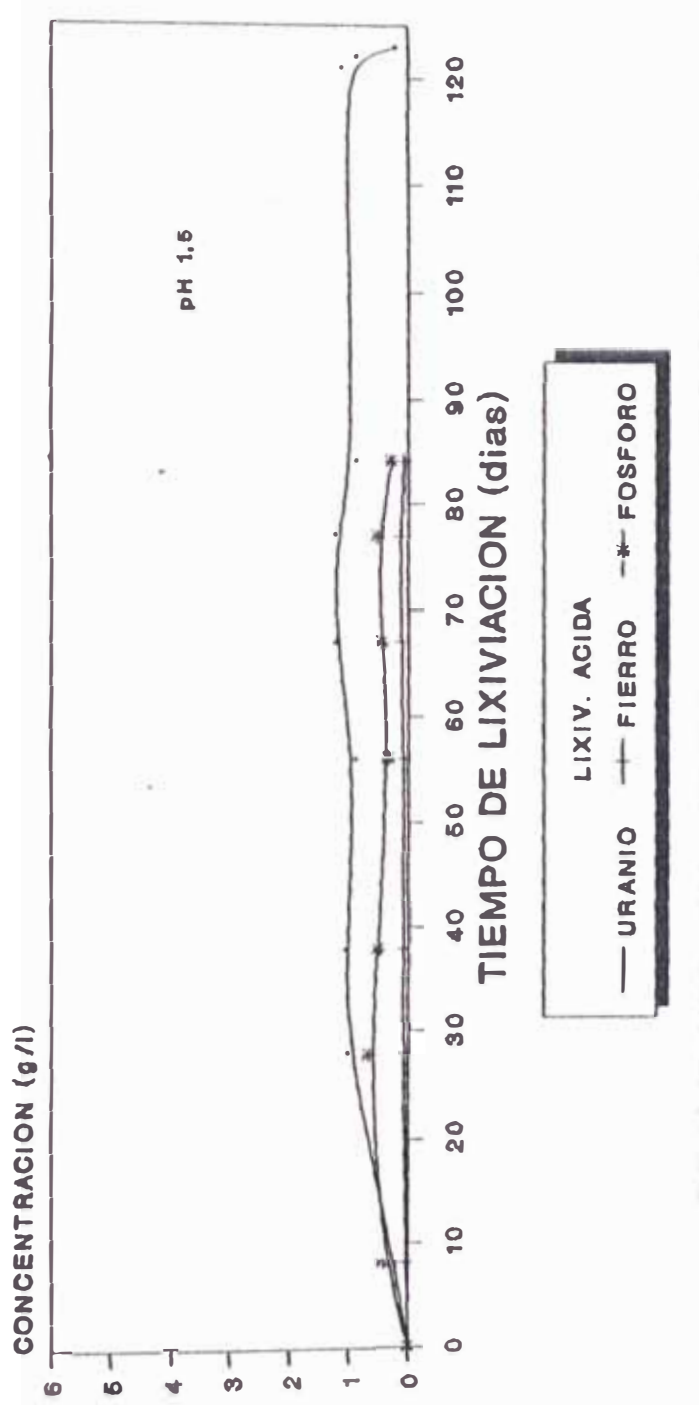
N° muestra Laboratorio	Fecha de analisis	Uranio mg/ml	Fierro mg/ml	Fosforo mg/ml
086	28-5-91	0,29	0,00	0,27
091-092	17-6-91	3,60	7,33	1,52
096	27-6-91	2,19	6,30	1,06
100	15-7-91	0,61	4,69	0,54
104	26-7-91	0,48	5,06	0,54
108	5-8-91	0,48	5,45	0,52
112	12-8-91	0,29	5,04	0,52
117	18-9-91	0,07	--	--
121	19-9-91	0,07	--	--
125	20-9-91	0,01	--	--

COLUMNA C4

N° muestra de Laboratorio	Fecha de analisis	Uranio mg/ml	Fierro mg/ml	Fosforo mg/ml
087	24-5-91	0,29	0,009	0,55
088	28-5-91	0,29	0,009	0,55
093	17-6-91	3,97	0,653	0,24
097	27-6-91	2,77	2,160	0,55
101	15-7-91	1,50	3,940	0,91
105	26-7-91	1,43	3,460	0,84
109	5-8-91	1,33	4,770	0,82
113	12-8-91	0,87	4,260	0,71
118	18-9-91	0,28	---	---
122	19-9-91	0,28	---	---
126	20-9-91	0,01	---	---

COLUMNA C1

URANO, FIERRO Y FOSFORO EN EL LIXIVIADO DEL MINERAL CHAPI-MACUSANI (PUNO)

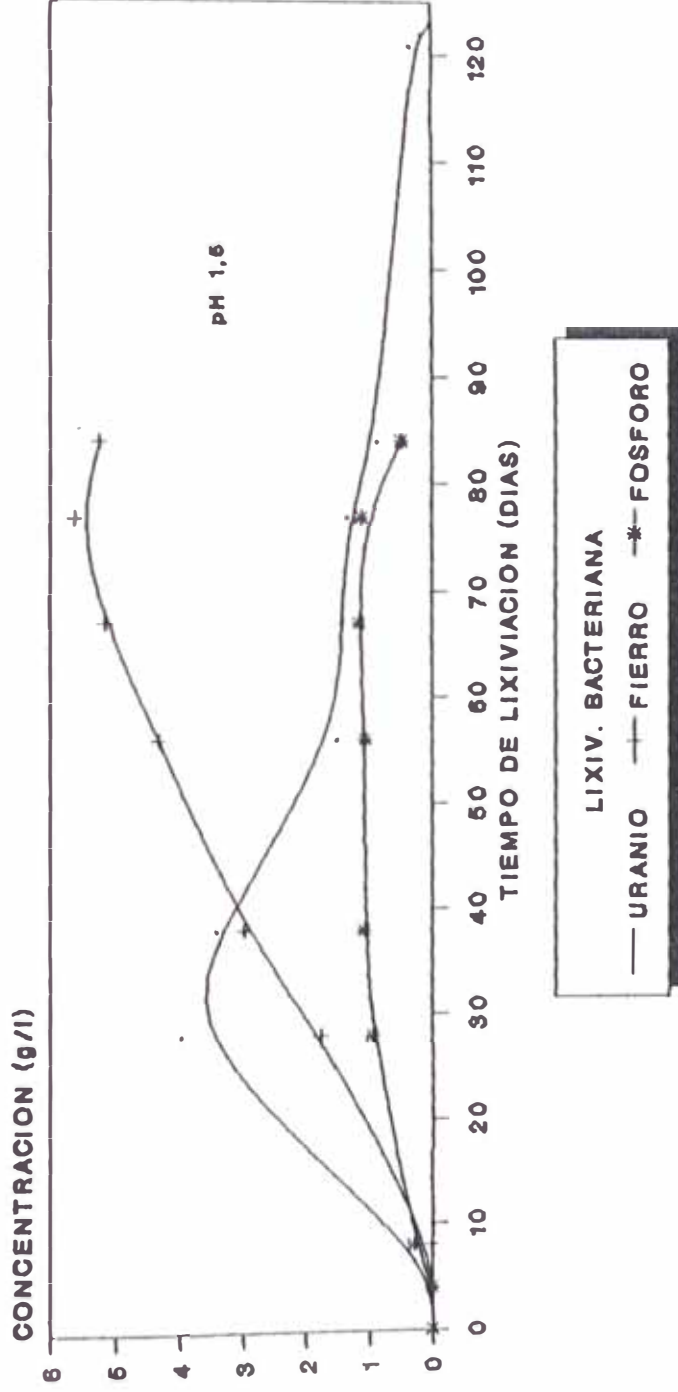


REALIZADO :EN LAB.HIDROMETALURGICO IPEN
REPORTE: 20 MAY- 20 SET. 1991 LIMA-PERU

FIG N° 8 5

COLUMNA C2

URANIO, FIERRO Y FOSFORO EN EL LIXIVIADO DEL MINERAL CHAPI-MACUSANI (PUNO)

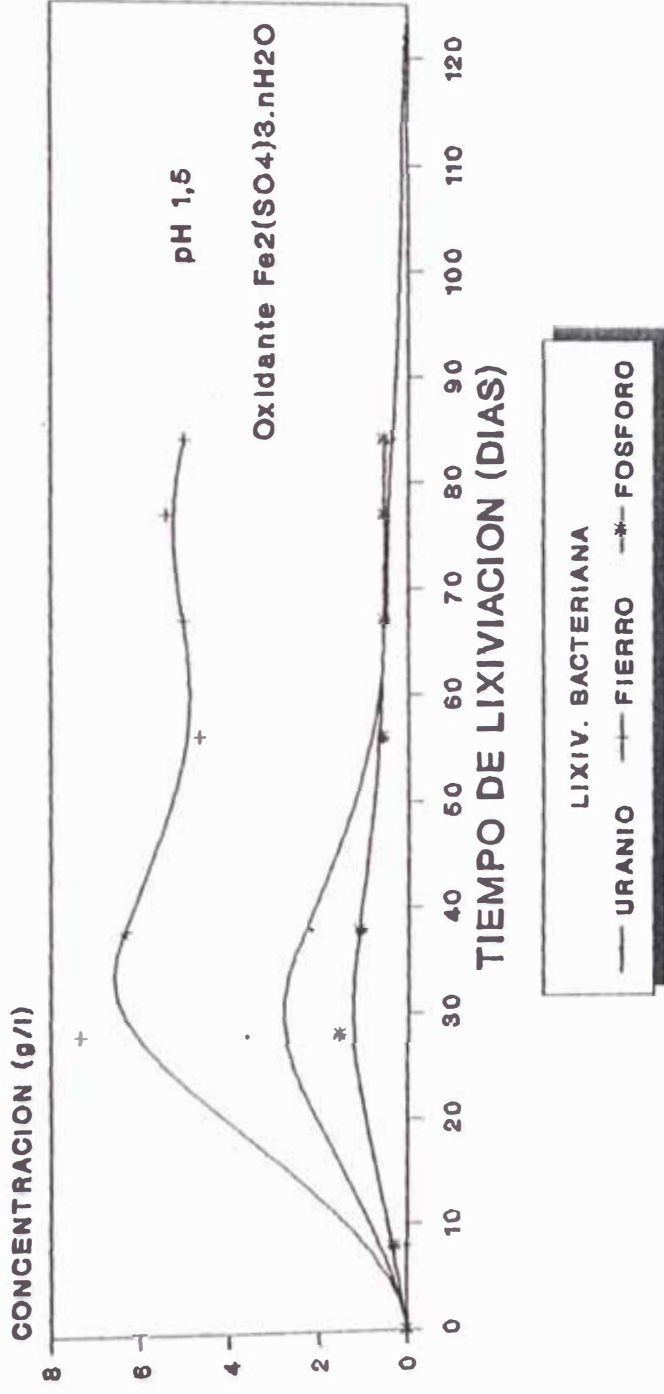


REALIZADO :EN LAB. HIDROMETALURGICO IPEN
REPORTE: 20 MAY-20 SET. 1991 LIMA-PERU

FI RA N 8 6

COLUMNA C3

URANIO, FIERRO Y FOSFORO EN EL LIXIVIADO DEL MINERAL CHAPI-MACUSANI (PUNO)

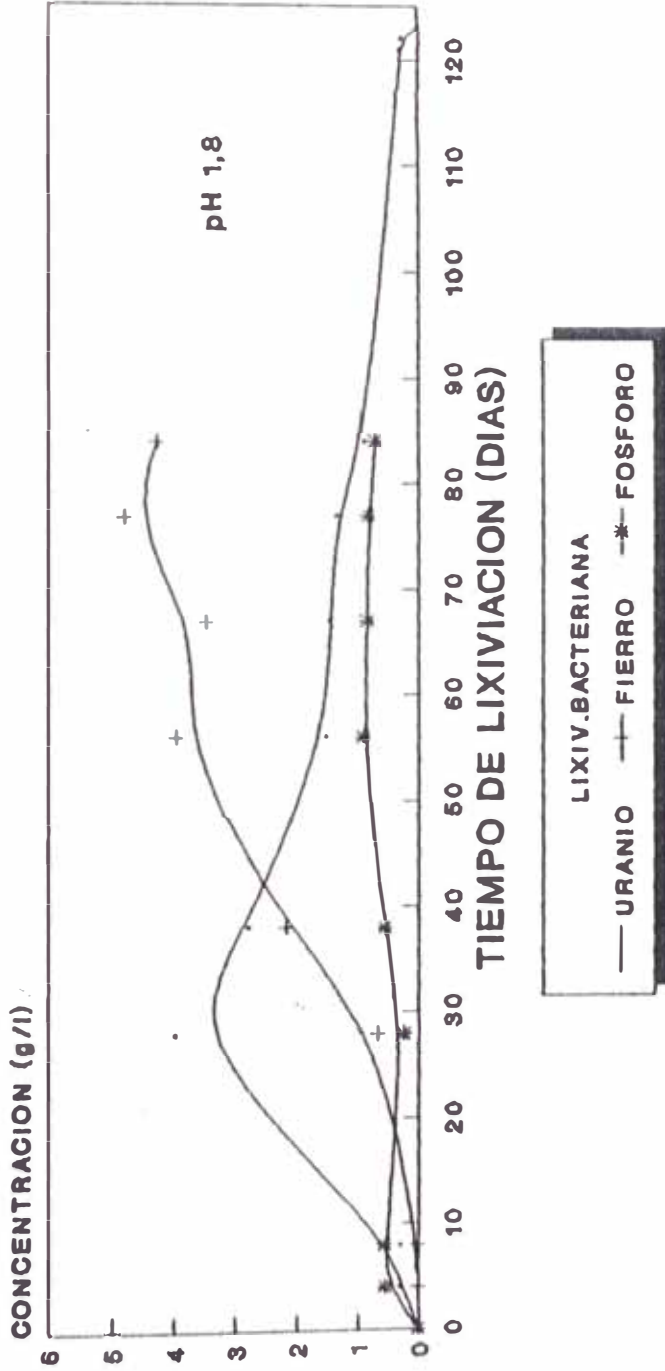


REALIZADO :EN LAB.HIDROMETALURGICO IPEN
 REPORTE:20 MAY- 20 SET.1991 LIMA-PERU

FIG. N° 8 7

COLUMNA C4

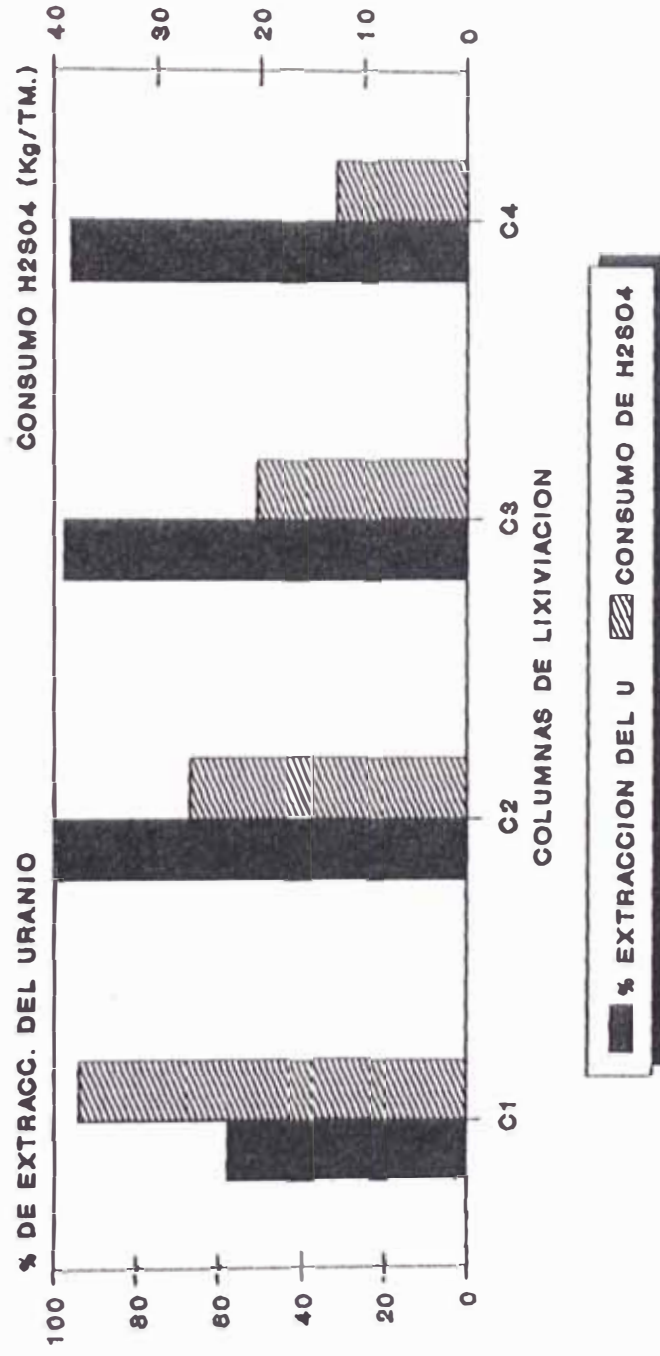
URANIO, FIERRO Y FOSFORO EN EL LIXIVIADO DEL MINERAL CHAPI-MACUSANI (PUNO)



REALIZADO EN: LAB. HIDROMETALURGICO IPEN
REPORTE: 20 MAY-20 SET. 1991 LIMA-PERU

FIG. Nº 8-8

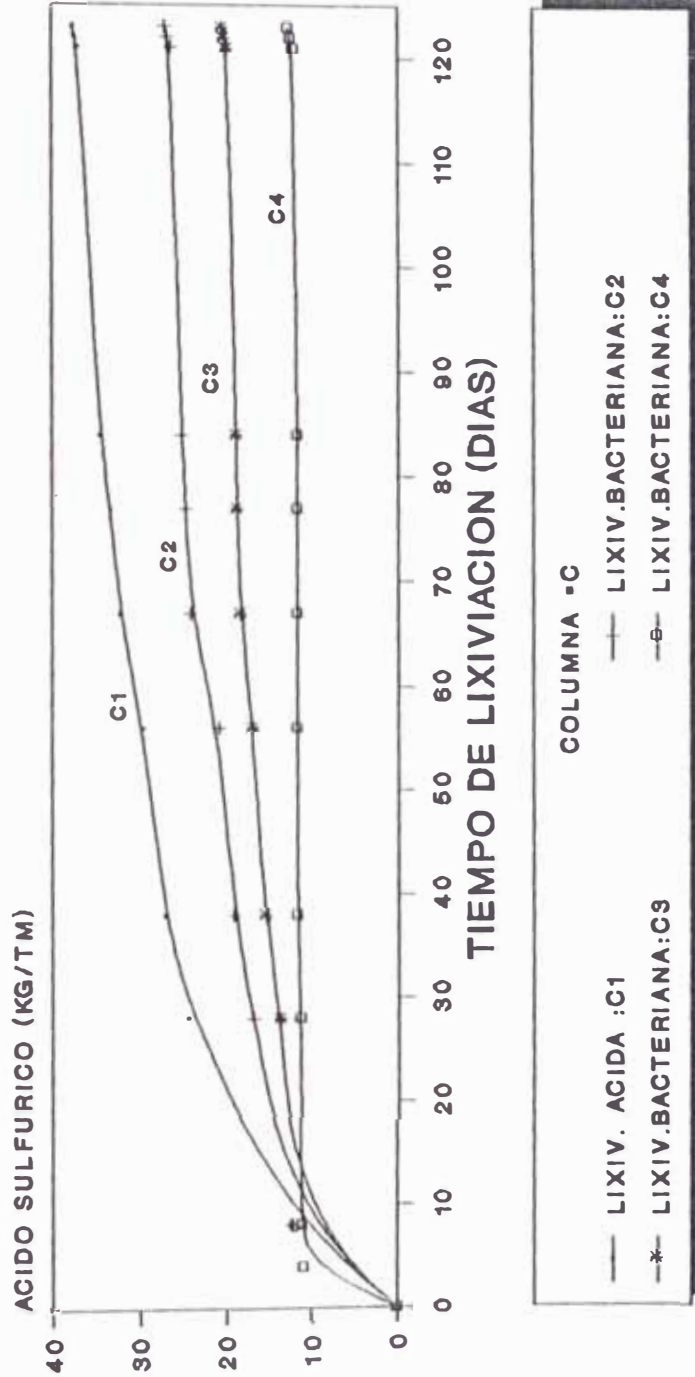
COMPARACION DE RENDIMIENTO DEL URANIO Y CONSUMO DE H₂SO₄ DURANTE 123 DIAS DE PROCESO DE LIXIVIACION.



REALIZADO :EN LAB.HIDROMETALURGICO IPEN
 REPORTE:20 MAY-20 SET.1991 LIMA-PERU

FIG. N° 8-15

CONSUMO DE H₂SO₄ SEGUN PLANIFICACION DE ENSAYO DE LIXIVIACION DEL MINERAL DE URANIO, CHAPI-MACUSANI (PUNO).



REALIZADO EN: LAB.HIDROMETALURGICO-IPEN.
REPORTE: 20 MAY-20 SET.1991 LIMA-PERU.

FIG. N° 8-14

COLUMNA C1 PLANILLA DE CONTROL RESUMEN

MINERAL DE URANIO CHAPI - MACUSANI						
PESO DEL MINERAL (Kg)		HUMEDAD (%)	LEY DE CABEZA (%)			DENSIDAD APARENTE
HUMEDO	SECO		URANIO	FIERRO	FOSFORO	
1,03	1,0	2,49	0,4	1,43	0.162	1,6

CONDICION DEL PROCESO					
LIXIVIACION		LIXIVIANTE (pH)	CAUDAL DE RIEGO		MINERAL A MALLA
BACTERIANA	ACIDA		l/m ²	l/TM.DIA	
---	SI	1,5	148	298,78	-1/4"

PROCESO DE LIXIVIACION				
INICIO	TERMINO	DURACION	Nº CICLOS	ETAPA DE NEUTRALIZ.
20 MAY 91	20 SET.91	123 DIAS	80	8 DIAS

VOLUMEN	LITROS (l)	l/TM.DIA
HUMECTANTE (UH)	0,2500	248,81
CIRCULANTE (UC)	0,3000	298,58
EMPAPANTE (UE)	0,0115	11,45
OPERATIVO (UO)	0,2885	287,13
LAUADO (UL)	0,9125	908,17

VOLUMEN TOTAL RETIRADO (l)	RENDIMIENTO SEGUN LIQUIDO	CONC. PROMEDIO DE LA SOLUCION (g/l)		
		URANIO	FIERRO	FOSFORO
2,511	58,22 %	0,9274	0,0584	0,358

CONSUMO DE REACTIVO (Kg/TM)	
ACIDO SULFURICO	SULFATO FERRICO
37,66	---

COLUMNA C2

PLANILLA DE CONTROL

RESUMEN

MINERAL DE URANIO CHAPI - MACUSANI						
PESO DEL MINERAL (Kg)		HUMEDAD (%)	LEY DE CABEZA (%)			DENSIDAD APARENTE
HUMEDO	SECO		URANIO	FIERRO	FOSFORO	
1,03	1,0	2,49	0,4	1,43	0.162	1,6

CONDICION DEL PROCESO					
LIXIVIACION		LIXIVIANTE (pH)	CAUDAL DE RIEGO		MINERAL A MALLA
BACTERIANA	ACIDA		1/m ²	1/TM.DIA	
SI	--	1,5	148	298,78	-1/4"

PROCESO DE LIXIVIACION				
INICIO	TERMINO	DURACION	Nº CICLOS	ETAPA DE NEUTRALIZ.
20 MAY 91	20 SET.91	123 DIAS	80	8 DIAS

VOLUMEN	LITROS (l)	1/TM.DIA
HUMECTANTE (UH)	0,2500	248,81
CIRCULANTE (UC)	0,3000	298,58
ENPAPANTE (UE)	0,0120	11,94
OPERATIVO (UD)	0,2880	286,63
LAVADO (UL)	0,9125	908,17

VOLUMEN TOTAL RETIRADO (l)	RENDIMIENTO SEGUN LIQUIDO	CONC. PROMEDIO DE LA SOLUCION (g/l)		
		URANIO	FIERRO	FOSFORO
2,766	99,384 %	1,4372	2,138	0,5635

CONSUMO DE REACTIVO (Kg/TM)	
ACIDO SULFURICO	SULFATO FERRICO
27,04006	---

COLUMNA C3

PLANILLA DE CONTROL

RESUMEN

MINERAL DE URANIO CHAPI - MACUSANI						
PESO DEL MINERAL (Kg)		HUMEDAD (%)	LEY DE CABEZA (%)			DENSIDAD APARENTE
HUMEDO	SECO		URANIO	FIERRO	FOSFORO	
1,03	1,0	2,49	0,4	1,43	0.162	1,6

CONDICION DEL PROCESO					
LIXIVIACION		LIXIVIANTE (pH)	CAUDAL DE RIEGO		MINERAL A MALLA
BACTERIANA	ACIDA		l/m ²	l/TH.DIA	
SI	--	1,5	148	298,78	-1/4"

PROCESO DE LIXIVIACION				
INICIO	TERMINO	DURACION	Nº CICLOS	ETAPA DE NEUTRALIZ.
20 MAY 91	20 SET.91	123 DIAS	80	8 DIAS

VOLUMEN	LITROS (l)	l/TH.DIA
HUMECTANTE (UH)	0,2410	239,86
CIRCULANTE (VC)	0,3000	298,58
EMPAPANTE (VE)	0,0110	10,95
OPERATIVO (VO)	0,2890	287,63
LAUADO (VL)	0,9125	900,17

VOLUMEN TOTAL RETIRADO (l)	RENDIMIENTO SEGUN LIQUIDO	CONC. PROMEDIO DE LA SOLUCION (g/l)		
		URANIO	FIERRO	FOSFORO
3,046	97,76 %	1,2838	3,7631	0,635

CONSUMO DE REACTIVO (Kg/TH)	
ACIDO SULFURICO	SULFATO FERRICO
20,3856	33,0 g (1º 20 DIAS)

COLUMNA C4

PLANILLA DE CONTROL

RESUMEN

MINERAL DE URANIO CHAPI - MACUSANI						
PESO DEL MINERAL (Kg)		HUMEDAD (%)	LEY DE CABEZA (%)			DENSIDAD APARENTE
HUMEDO	SECO		URANIO	FIERRO	FOSFORO	
1,03	1,0	2,49	0,4	1,43	0.162	1,6

CONDICION DEL PROCESO					
LIXIVIACION		LIXIVIANTE	CAUDAL DE RIEGO		MINERAL
BACTERIANA	ACIDA	(pH)	l/m ²	l/TM.DIA	A MALLA
SI	--	1,8	148	298,78	-1/4"

PROCESO DE LIXIVIACION				
INICIO	TERMINO	DURACION	Nº CICLOS	ETAPA DE NEUTRALIZ.
20 MAY 91	20 SET.91	123 DIAS	80	8 DIAS

VOLUMEN	LITROS (l)	l/TM.DIA
HUMECTANTE (UH)	0,2435	242,34
CIRCULANTE (UC)	0,3000	298,58
EMPAPANTE (UE)	0,0115	11,44
OPERATIVO (UO)	0,2885	287,13
LAVADO (UL)	0,9125	908,17

VOLUMEN TOTAL RETIRADO (l)	RENDIMIENTO SEGUN LIQUIDO	CONC. PROMEDIO DE LA SOLUCION (g/l)		
		URANIO	FIERRO	FOSFORO
3,103	96,136 %	1,2393	1,514	0,4376

CONSUMO DE REACTIVO (Kg/TM)	
ACIDO SULFURICO	SULFATO FERRICO
12,6932	-----

CAPITULO IX

TECNICAS ESPECIALES APLICADA EN LA LIXIVIACION DEL URANIO

9.0 TECNICAS ESPECIALES APLICADAS EN LA LIXIVIACION DE LOS MINERALES DE URANIO

9.1 INTRODUCCION

Para la lixiviación de los minerales de Uranio, se emplean varias técnicas cuya selección dependerá en gran parte de la mineralogía y el tipo de ganga que acompaña al mineral de Uranio.

Los minerales de Uranio con ganga silícica se lixivian invariablemente con reactivo ácido, mientras que los que tienen cantidades relativamente alta de caliza, se lixivian con reactivos alcalinos.

Muchos yacimientos de uranio en el Mundo, al irse agotando en el contenido (ley) del mineral, en la calidad, etc, dá como consecuencia el surgimiento de nuevas reservas de mineral que son muy difíciles de tratar por los métodos comunes, acompañado los problemas de energía y contaminación ambiental.

La lixiviación es una fase del proceso muy sensible a los cambios de calidad del mineral de Uranio y lo que es más, influye el medio ambiente. El cambio de las menas (Mineralogía) del Uranio, el alto costo de reactivos, equipos y energía en la lixiviación han originado optar por el uso de técnicas de lixiviación no convencionales.

En minerales de Uranio piríticos, la lixivía-

cion a presión o la lixiviación bacteriana permite el ahorro de reactivos y la disminución de la contaminación ambiental, la lixiviación de curado ácido se aplica a los minerales de carácter refractario y arcilloso, dando buenos resultados en la recuperación del Uranio.

A la lixiviación Bacteriana se le está dando un enfoque muy especial para hacerla competitiva en velocidad con las otras técnicas de lixiviación convencional.

9.2 LIXIVIACION A PRESION

Muchas menas de Uranio, con especies como la Brannerita en la que el Uranio está como tetravalente es de carácter refractario; al tratar con técnicas convencionales se requiere de un alto consumo de reactivos, temperatura y tiempo. Con la lixiviación a presión se logra aumentar la temperatura por encima del punto de ebullición del agente lixivante y se acelera la disolución del Uranio, en un tiempo muy corto y con menor consumo de reactivos en comparación con las técnicas convencionales.

Las ventajas que ofrece ésta técnica son:

1. Mayor velocidad de reacción en el menor tiempo
2. Ahorro de reactivos
3. Menor perturbación del medio ambiente

4. Los reactores que se emplean son menos voluminosos.

El reactor donde se realiza la lixiviación a presión es comúnmente conocido como autoclave. Y se puede clasificar en 5 tipos:

- a.- Autoclave agitado por vapor
- b.- Autoclave agitado mecánicamente
- c.- Autoclave giratorio
- d.- Autoclave de columnas
- e.- Autoclave tubular

En la industria del Uranio, el único tipo de autoclave empleado hasta ahora es el agitado mecánicamente (Fig. Nº 9 - 1).

Este reactor lleva dos turbinas para agitar la pulpa y en el centro un turbomezclador que dispersa el aire a través de la pulpa. Otras veces el ingreso del aire u oxígeno se realiza mediante un difusor estático debajo de la turbina que agita la pulpa. La calefacción de la pulpa se realiza inyectando vapor al reactor.

En estos reactores de lixiviación a presión, es importante disponer de un buen sistema de control automático. para el control de la temperatura en la admisión del vapor, así como el control de presión para la entrada del aire u oxígeno.

9.2.1 LIXIVIACION ACIDA A PRESION

Esta técnica es empleada en la CEI (Ex-URSS) Canada y Sud Africa, principalmente la inyección de vapor está en el rango de 160°C- 180°C, con una presión total de 12 atm, que se controla automáticamente midiendo el porcentaje de la presión parcial del oxígeno.

A continuación se muestran las reacciones principales que intervienen en la lixiviación a presión por vía ácida, para un mineral de Uranio primario pirítico:



Para obtener buenos resultados en el producto de las reacciones (1) y (2) es imprescindible que la

presión parcial del oxígeno se mantenga en el rango de 2 - 6 atmósferas.

Las reacciones (3), (4) representan la hidrólisis parcial y total de las sales férricas, esta hidrólisis no es deseable en el proceso por repercutir negativamente en la solubilización del uranio. Por trabajos experimentales se demuestra que la máxima velocidad de disolución del uranio es de 175°C, por encima de ella se forma la hidrólisis de las sales férricas.

El uranio tetravalente es oxidado según la reacción (5) y (6) por el ión férrico (Fe^{3+}) y ácido sulfúrico. Para obtener buenos rendimientos, el mineral debe contener no menos de 1,0 % de pirita, en caso contrario se tendría que añadir más pirita o sales ferrosas

Cuando el mineral contiene carbonatos superiores a 0,5 %, tiene un efecto negativo, que repercute en el consumo de ácido, y en la reducción de la presión parcial del oxígeno, limitando las reacciones (1) y (2). Para evitar éste percance es necesario ventilar e inyectar oxígeno fresco.

9.2.2 LIXIVIACION ALCALINA A PRESION

La disolución alcalina de las especies uraníferas pueden representarse por las siguientes ecuaciones:



El oxígeno gaseoso se disuelve en el agua para luego ser absorbido en la superficie del mineral de uranio reducido y/o a través de complejos intermedios carbonatados, para la posterior disolución de uranio como complejo carbonatado.

La cinética de disolución del uranio es afectada por la presión y temperatura aumentando la disolución del uranio hasta cierto valor de ellos; así como el efecto de la presión parcial del oxígeno (Fig. Nº 9-2 , 9-3).

La temperatura en el reactor oscila en el rango de 105°C - 140°C con una presión total de 3 - 5 atmosferas.

La lixiviación alcalina se ha aplicado y se sigue usando en Canada, EE.UU. y Francia; aunque el problema de corrosión es mayor que en la lixiviación convencional.

9.3 LIXIVIACION CURADO ACIDO

Si el mineral de Uranio es refractario y/o arcilloso, es decir que el Uranio está bloqueado por la ganga asociada, necesita ácido muy concentrado para liberar uranio. Con la lixiviación a presión esto no es

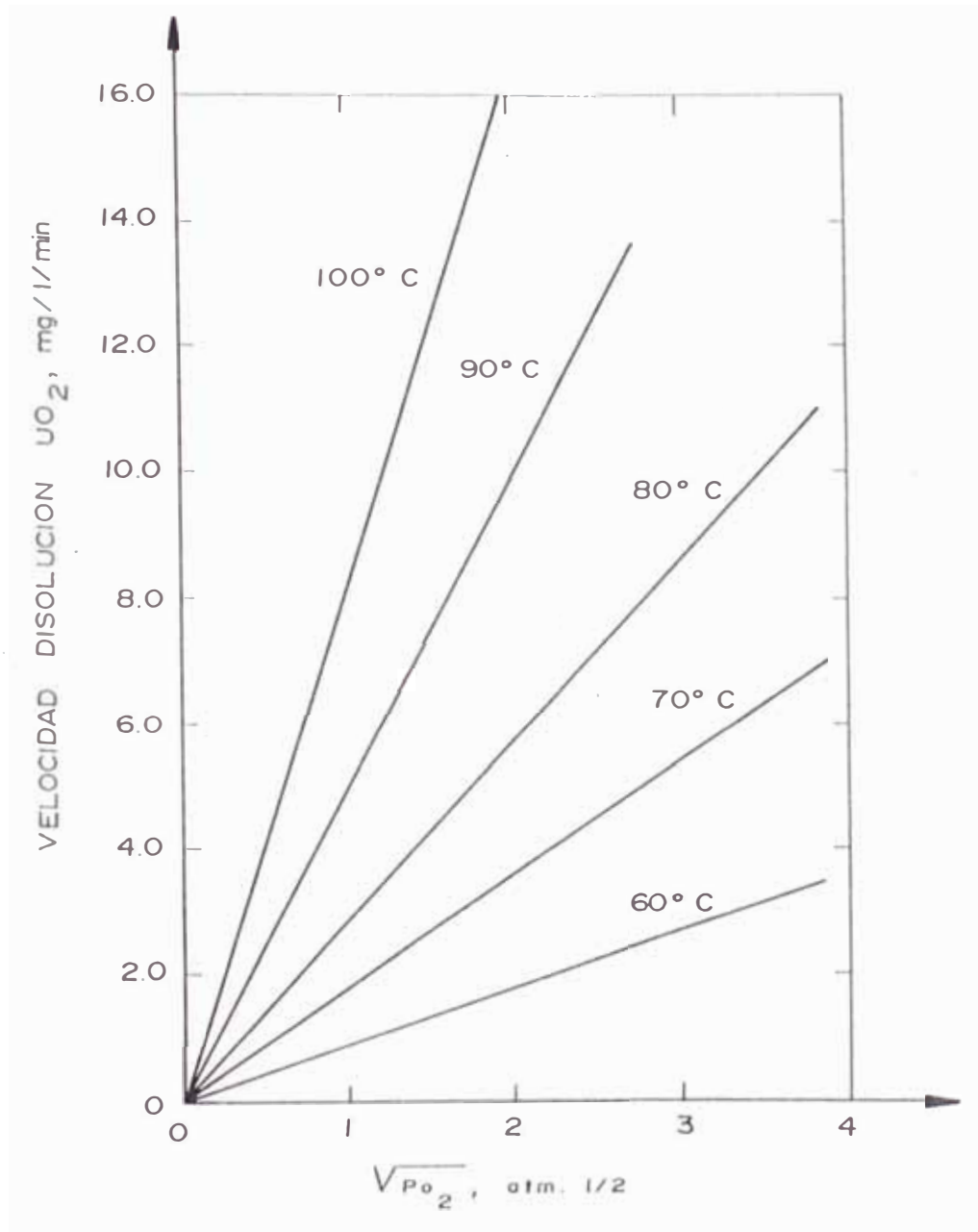


FIG. 9.2 EFECTO DE LA PRESION PARCIAL DEL OXIGENO SOBRE LA VELOCIDAD DE DISOLUCION DE UO_2

FIG. 9.2

viable, ya que la relación (Líquido/Sólido) es aproximadamente 1,0 y el gasto del ácido sería excesivo.

El curado consiste básicamente en impregnar el mineral molido y seco, con la mínima cantidad de agua y ácido sulfurico para la digestión del uranio.

La cantidad de agua en el proceso de curado debe ser suficiente para que el yeso formado se hidrate (mayor de 100°C) evitando que se frague, y la dosis de ácido después de neutralizar los componentes alcalinos del mineral, sea suficiente para disolver las especies uraníferas refractarias.

Esta técnica de curado ácido permite atacar las especies uraníferas en condiciones energéticas, evitando la dispersión y la solubilización de la sílice, etc.

Muchas plantas de tratamiento del uranio, especialmente en los EE.UU. aplican esta técnica, con minerales de tipo arenisca y con cantidades variables de arcilla, han logrado recuperar un 97 % de uranio con un consumo de 90 Kg. de ácido/ton. a diferencia de 96 % de recuperación de uranio con un consumo de 150 Kg. de ácido/ton. con la técnica de lixiviación convencional.

En El Perú, el IPEN realiza la lixiviación de curado ácido con los minerales de Chapi - Macusani (Puno), observándose las diferencias con la lixiviación normal, que se indican a continuación:

- 1.- *En el ataque normal, la acidez (pH) del lixiviante se mantiene constante, durante el proceso*
- 2.- *El tiempo de lixiviación en el curado es de 12 horas, a nivel de mar*

Esta última diferencia depende de la temperatura del medio y de la presión. El IPEN realizó la técnica de curado ácido en la ciudad de Puno (3 800 msnm) en un tiempo de 2 meses (De Noviembre de 1991 a Enero de 1992) para recuperar un 95% de uranio con un consumo de 25 Kg. de ácido/ton. de mineral de uranio con un contenido de ley de cabeza de 0,18 %.

CONCLUSION.- *El consumo de ácido, y el tiempo de tratamiento en la lixiviación curado ácido, está en función de la ley del mineral, o el tipo de ganga que esta asociado al uranio y a las condiciones del medio ambiente.*

CAPITULO X

SEGURIDAD E HIGIENE EN EL PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE URANIO

10. *SEGURIDAD E HIGIENE EN EL PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE URANIO.*

10.1 *INTRODUCCION*

Con el fin de comprender los diversos procesos de desintegración de sustancias radiactivas y sus consecuencias o riesgos que presenta en la salud del trabajador que opera en las diferentes etapas del procesamiento de minerales de uranio, ha sido necesario un seguimiento riguroso desde la etapa de extracción del mineral del yacimiento de Chapi hasta la concentración del uranio por técnicas de intercambio iónico.

En éste capítulo se da un alcance descriptivo en forma general de los tipos de riesgo de contaminación a los que está expuesto el trabajador en el procesamiento del mineral de uranio. Al igual que a la vigilancia radiológica resaltando el orden de importancia de los peligros de contaminación. Así como los límites permisibles del uranio y otros elementos radio-nucleicos de mayor importancia relativa, como el Rn, Th, etc. para finalizar con las reglas generales que todo trabajador debe tener muy en cuenta para evitar los riesgos radiológicos.

10.2 PRINCIPIOS BASICOS

10.2.1 ESTRUCTURA ATOMICA

El átomo es la unidad mas simple en la que puede dividirse un elemento químico, reteniendo las propiedades originales del mismo. Los átomos de todos los elementos químicos están constituidos por tres bloques subatómicos principalmente, ellos son: electrones, protones y neutrones. Dicho de otra manera, el átomo se puede imaginar que esta integrado de dos partes principales, siendo éstas el núcleo y la nube electrónica

EL NUCLEO

Es la parte central del átomo que contiene los nucleones, constituyendo prácticamente toda la masa del átomo.

LA NUBE ELECTRONICA

Rodea la parte nuclear del átomo y es donde giran los electrones alrededor del núcleo. Puesto que el átomo de cualquier elemento químico es eléctricamente neutro en su estado basal, es decir, que el número de electrones en la nube electrónica es igual al número de partículas positivas (protones) del núcleo.

Las disposiciones de los electrones en el átomo, es el resultado de muchos estudios, que

indican que están agrupados en órbitas que poseen una energía definida y un número máximo de electrones.

La configuración electrónica de los átomos se obtuvo de estudios del espectro atómico, de la variación en su composición química y propiedades en función del número atómico.

De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica no puede existir más de un número determinado de electrones en cada órbita, tal como se indica a continuación.

NIVEL (n)	1	2	3	4	5
N° MAX. de Electrones ($2n^2$)	2	8	18	32	50

10.2.2 IONIZACION

Los átomos en su estado natural de energía más baja (estado basal) tienen igual número de electrones y protones, disponiendo una carga eléctrica residual nula. Cuando los átomos se combinan para formar compuestos, la molécula resultante posee igual número de protones y electrones (es también eléctricamente neutro). Tan pronto como el electrón es extraído

de un átomo o molécula, el componente resultante posee una carga eléctrica debido a que las partículas positivas (protones) se encuentran en exceso en relación a los electrones. A este componente que resulte de la extracción del electrón de un átomo o molécula se identifica con el nombre de ión.

Los iones pueden estar cargados positiva o negativamente y existen en forma sólida, líquida o gaseosa. Esto es que los iones positivos se producen al extraer electrones de átomos o moléculas neutras, mientras que los iones negativos se logran cuando se adhiere electrones a moléculas o átomos neutros.

La ionización es un fenómeno que origina iones por pérdida o ganancia de electrones. Por tanto, todo lo que provoque la extracción o adición de electrones en una molécula o átomo da lugar a la ionización originando la producción de un par iónico (un electrón libre y un ión positivo residual).

10.2.3 ISOTOPOS

Son átomos que tienen los mismos números de protones, con un número diferente de neutrones. Estos átomos que cuentan con esta característica son el general indistinguibles químicamente, las propiedades químicas de los isótopos son los mismos, ya que esta propiedad depende únicamente del número de electrones.

A continuación se citan algunos elementos

isotópicos:

OXIGENO:	$\begin{matrix} 18 \\ 0 \\ 8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 17 \\ 0 \\ 8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 18 \\ 0 \\ 8 \end{matrix}$
HIDROGENO:	$\begin{matrix} 1 \\ H \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 2 \\ H \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 3 \\ H \\ 1 \end{matrix}$
URANIO:	$\begin{matrix} 235 \\ U \\ 92 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 238 \\ U \\ 92 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 234 \\ U \\ 92 \end{matrix}$

10.2.4 RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS

La radiación es cualquier fenómeno que se produce desde una fuente en todas las direcciones.

Las cargas eléctricas en movimiento crean un campo eléctrico y un campo magnético y produce la radiación de energía electromagnética cuando está en movimiento acelerado. Dicha energía radiada se propaga como una perturbación en forma de una onda electromagnética, componiéndose en forma simultánea de un campo eléctrico (E) y un campo magnético (H) vibrando al mismo tiempo los dos componentes con la misma frecuencia en el vacío. Oscilando a 90° entre sí y a 90° de la dirección de propagación.

PROPAGACION DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS

Las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío a la velocidad de la luz ($3,0 \times 10^{10}$ cm/s) ésta es considerada de naturaleza dual, es decir que

los fenómenos de propagación se explican considerando como una onda; y la interacción con la materia como en los procesos de absorción y emisión, como partículas.

10.2.4.1 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Las radiaciones electromagnéticas se presentan en un gran rango de energía, donde a medida que disminuye la longitud de onda (λ) se aumenta la energía de la radiación. Como ejemplo, la luz visible puede llegar a producir cambios químicos, pero el tejido vivo no es afectado mayormente a excepción de la retina del ojo.

La luz ultravioleta tiene más energía que la luz visible produce cambios químicos más fácilmente pudiendo enrojecer la piel etc.

Las radiaciones electromagnéticas que tienen energía superior a los rayos ultravioleta, tales como los rayos x y gama, pueden provocar cambios estructurales del átomo. Este grupo de radiaciones son ionizantes. (Ver tabla N^o10 - 1).

10.2.5 RADIATIVIDAD

Entre los elementos químicos naturales existen los totalmente estables que no sufren modificaciones en su estructura y los inestables que sufren variaciones en la constitución de su núcleo atómico en

uno o varios de sus isótopos hasta alcanzar la estabilidad, emitiendo espontáneamente partículas o radiaciones. A este fenómeno se le denomina radiactividad.

10.2.5.1 RADIATIVIDAD NATURAL

Los principales elementos radiactivos que forman parte de la corteza terrestre son potasio (^{40}K), uranio y el torio. Estos elementos emiten radiaciones de distintos tipos, conocidos con el nombre de alfa (α), beta (β) y gama (Γ).

Las sustancias radiactivas emiten espontáneamente radiaciones en forma continua e independiente a las condiciones del medio. La radiactividad del uranio fue descubierta por BECQUEREL (1896) al observar que minerales y sales de uranio velaban placas fotográficas con propiedades similares a las radiaciones descubiertas poco antes por ROENTGEN, el cual, desconociendo su origen las denominó rayos X. La radiactividad del Th (torio) fué descubierta dos años después en forma independiente por M. CURIE y SCHIDT.

Los isotopos como ^{238}U , ^{235}U , y ^{232}Th , al desintegrarse producen una serie de elementos radiactivos intermedios que a su vez, se desintegran hasta llegar a dar un producto final estable, que es el plomo.

Dado que el tiempo necesario para que un átomo de uranio se desintegre en uno de plomo,

es conocido como vida media por ser una propiedad física del elemento uranio. Si se determinan las cantidades del elemento padre (uranio) e hijo (plomo) presentes en un mineral, se puede calcular el tiempo transcurrido desde la cristalización. Esta propiedad es lo que se aplica en los diversos métodos de cálculo de la edad geológica.

10.2.5.2 NATURALEZA DE LA RADIACION

Elementos como el uranio, torio y el potasio poseen en mayor o menor grado la propiedad de emitir radiaciones, razón por la cual se les denomina minerales radiactivos.

Estas radiaciones, son imperceptibles para nuestros sentidos, pero son susceptibles de ser descubiertas por aparatos especiales que los captan.

RADIACIONES ALFA (α)

Son partículas corpusculares cargados de electricidad positiva y están constituidas por núcleos de átomos de helio en desplazamiento rápido. Son muy poco penetrantes y solo pueden atravesar en condiciones normales de temperatura y presión, apenas decenas de micrones de materiales de poca densidad (aluminio, materia orgánica).

RADIACIONES BETA (β)

Son rayos materiales debido a electrones rápidos, más penetrantes que los rayos alfa. El espesor que puede atravesar está en relación directa con la energía de la partícula. Por ejemplo una energía de 1 Mev puede atravesar 4 metros de aire o 2 milímetros de aluminio.

RADIACION GAMA (Γ)

Son de naturaleza electromagnética como los rayos X pero de longitud de onda aún más corta que las radiaciones alfa y Beta. Tienen un poder de penetración mucho mayor, llegando en el aire hasta 150 m; necesi-
tándose 5 cm de plomo para detener la mayor parte de ellas. (Cuadro Nº 10-1)

10.2.6 LEY DE LA DESINTEGRACION RADIOACTIVA

La desintegración radiactiva responde a leyes estadísticas y sus propiedades son independientes de cualquier influencia del entorno como, temperatura, presión, campos eléctricos o magnéticos y reacciones químicas.

A continuación se deducirá una expresión que permita calcular el número de núcleos de una sustancia radiactiva en cualquier tiempo. Para esto se asume una muestra radiactiva que en el instante t_0 contiene n_1 núcleos, en el transcurso de un Δt a partir

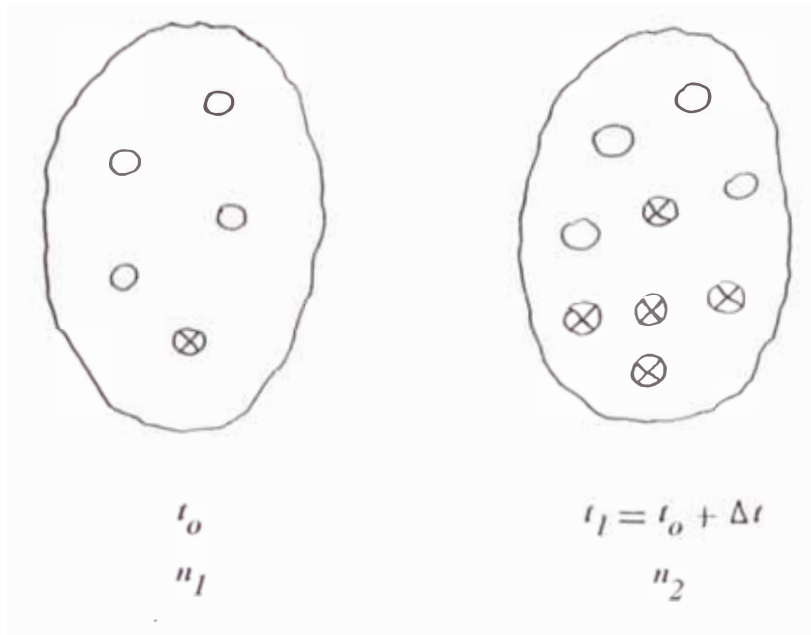
CUADRO N° 10-1

ALGUNOS RADIOELEMENTOS QUE ABUNDAN EN FORMA NATURAL

ISOTOPO	PERIODO DE SEMI-DESINTEGRACION	CLASES DE EMISION	ENERGIA (Mev)
⁴⁰ ₁₉	$1,25 \times 10^9$ años	BETA Y GAMA	1,33-1,46
⁸⁷ ₃₇ Rb	$5,0 \times 10^9$ años	BETA	0,275
¹⁴⁷ ₆₂ Sm	$1,3 \times 10^{11}$ años	ALFA	2,18
¹⁷⁶ ₇₁ Lu	$2,4 \times 10^{10}$ años	BETA Y GAMA	0,43-0,306
¹⁸⁷ ₇₅ Re	$5,0 \times 10^{10}$ años	BETA Y GAMA	0,008-0,134

FUENTE: CURSO DE CAPACITACION EN ENERGIA NUCLEAR DEL 18 AL 26-4-88

de t_0 se producirán algunas desintegraciones:



n_1 , n_2 : es la cantidad de núcleos de una muestra radiactiva.

La probabilidad de desintegración en el intervalo Δt es:

$$\lambda \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

donde:

λ : Es la probabilidad de desintegración en una unidad de tiempo.

La probabilidad en forma matemática es:

$$\frac{n_2 - n_1}{n_1} = \frac{\text{Número de casos favorables}}{\text{Número de casos posibles}} \dots\dots(2)$$

Igualando las relaciones (1) y (2) se obtiene:

$$\lambda \Delta t = [n_2 - n_1] / n_1 = \Delta n / n_1$$

Cuando se tiene un tiempo infinitesimal

se obtiene:

$$\lambda dt = -dn/n$$

resolviendo :

$$\lambda \int_0^t dt = - \int_{n_1}^{n_2} dn/n$$

$$\lambda t = -\ln (n_2/n_1)$$

$$\boxed{n_2 = n_1 e^{-\lambda t}} \dots\dots\dots (3)$$

10.2.6.1 PERIODO DE SEMI DESINTEGRACION

Es el tiempo que debe transcurrir para el número de núcleos en una sustancia radiactiva

se reduzca a la mitad, por tanto:

$$n_2 = n_1/2 \dots\dots\dots (4)$$

Relacionando las ecuaciones (4) y (3) se obtiene:

$$n_1/2 = n_1 e^{-\lambda t}$$

despejando el tiempo (t)

$$t = \ln 2 / \lambda \quad 0,693 / \lambda$$

En el cuadro Nº 10 -2 se muestra algunos valores del Periodo (t).

El número de desintegraciones que sufre un núcleo se expresa en Curie, unidad que equivale a la cantidad de material radiactivo en $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo ; referidos a la actividad de 1 g de radio (aproximadamente).

La Comisión Internacional de Unidades y medidas de Radiación (ICRU) recomienda el uso del becquerel (Bq).

Donde: Becquerel (Bq) = 1 desintegración/seg.

10.3 PROTECCION RADIOLOGICA

Los riesgos radiactivos para nuestro sentido son muy análogos al riesgo eléctrico. son impalpables,

CUADRO N° 10-2

ALGUNOS VALORES DE LA CONSTANTE DE SEMI-DESINTEGRACION

NUCLEIDO	CONSTANTE λ (s ⁻¹)	PERIODO (t)
²³⁸ ₉₂	$4,9 \times 10^{-18}$	$4,5 \times 10^9$ anos
²²⁶ ₈₈ Ra	$1,3 \times 10^{-11}$	1620 anos
¹³¹ ₅₃	$1,0 \times 10^{-6}$	8,05 dias
⁶⁰ ₂₇ Co	$4,2 \times 10^{-9}$	5,23 anos
¹⁹² ₇₇ Ir	$1,0 \times 10^{-7}$	74,3 dias
¹³⁷ ₅₅ Cs	$7,3 \times 10^{-10}$	30,0 anos

FUENTE: CURSO DE RADIOPROTECCION-IPEN (1988)

invisibles, inodoros y no pueden ser descubiertos ni medidos sin la ayuda de aparatos especiales.

En las diferentes etapas de procesamiento de minerales de uranio, los riesgos radiactivos exigen la puesta de medios de detección, de prevención de la zona de trabajo, acompañados de normas o reglamentos estrictos. De esta forma se minimiza la exposición a la radiación ionizante del personal que por trabajo están sometidos a los riesgos radiactivos.

10.3.1 CLASES DE RIESGOS RADIATIVOS

a) RADIACION EXTERNA

Hay irradiación externa cuando el cuerpo humano está sometido a las irradiación emitidas por fuentes radiactivas. La acción nociva de esta contaminación termina en el momento en que el trabajador expuesto a la radiación abandona la zona de irradiación. La dosis recibida por el organismo del hombre está en función a la intensidad de la radiación y del tiempo de exposición.

b) RADIACION INTERNA

Es cuando los radionucleicos penetran al interior del organismo, esto puede realizarse de 3 formas:

1° INHALACION

En forma de partículas (polvo) es conducido den-

tro del pulmón al respirar el aire. Esta contaminación es muy frecuente en la extracción del mineral radiactivo del yacimiento, preparación física del mineral, etc.

2° INGESTION

Es cuando los radionucleicos ingresan por la incorporación en los alimentos o agua de bebida esto a consecuencia de la falta de higiene antes de ingerir los alimentos, también al momento de consumir los alimentos dentro del área de procesamiento (preparación física del mineral).

3° VIA TRANSCUTANEA

Las sustancias radionucléidos atraviesan la piel, incorporándose por contacto a través del torrente sanguíneo (heridas). Los riesgos internos se prolongan hasta su total eliminación de la irradiación del radio nucleído.

10.4 CONTAMINACION RADIOLOGICA EN EL PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE URANIO.

En toda planta de procesamiento del mineral de uranio se trata de producir un concentrado de uranio por procesos físicos - químicos.

Los trabajadores (obreros, ingenieros, etc.) que desempeñan una labor en las diferentes etapas del procesamiento del mineral de uranio, están expuestos a

la radiación o contaminación externa así como a la contaminación interna de sustancias radiactivas tratadas. Con una diferencia a los trabajadores de minas de uranio, donde el radón y sus descendientes (hijos) suelen constituir problemas muy serios, contrariamente a la planta de procesamiento, donde el principal riesgo radiológico es el derivado del uranio, torio inhalado o ingerido.

10.4.1 CONTAMINACION INTERNA

Las fuentes primarias de contaminación interna en el procesamiento de mineral de uranio están en las etapas de preparación física, la etapa de precipitado, secado y envasado del producto final (Yellow Cake).

En el ambiente de preparación física lugar donde se produce polvo (trituration, cribado, transbordo del mineral de uranio), debe emplearse recinto adecuado para contener el polvo radiactivo con una ventilación por extractores. La manipulación de preferencia debe realizarse con mineral húmedo, evitando de esa forma la inhalación de partículas radiactivas suspendidas en el aire.

En la etapa final del procesamiento del mineral de uranio (precipitación, secado y envasado) es esencial el buen orden, limpieza y una buena ventila-

ción (extractores de aire) y el uso de respiradores, guantes para proteger la piel contra la absorción de sustancias radiactivas, botas y ropa protectora o ropa de faena para el cambio diario de la misma.

Para la limpieza de los ambientes mencionados conviene utilizar equipos de aspiración en lugar de escobas. Está estrictamente prohibido fumar y comer en las zonas de preparación física, secado y envasado.

10.4.2. CONTAMINACION EXTERNA

La exposición del trabajador a la contaminación externa (radiaciones beta, gama) en las etapas de procesamiento del mineral de uranio es significativamente más alto, en fases como la de precipitación, filtrado, secado, envasado de concentrado y almacenamiento del producto final (Yellow Cake).

La radiación gama puede variar de una planta de tratamiento a otra, según sea la ley del mineral, ley y edad del concentrado y el tipo de proceso.

El uranio recién separado es primordialmente emisor alfa (α) al ir acumulando los productos (hijos) aumenta la actividad beta (β) y gama (Γ), alcanzando el 50 % en forma aproximada del equilibrio al cabo de 24 horas, siendo de mayor riesgo cuando la ley del mineral a tratar es relativamente alta.

En la minería y tratamiento del mineral de uranio se producen grandes cantidades de desechos sólidos y líquidos. Los radionuclidos causantes de los riesgos radiológicos asociados con estos desechos son los que forman parte de la serie radiactiva del uranio 238 y torio 232 (ver fig. Nº 10 -1).

10.5 VIGILANCIA RADIOLOGICA

El esfuerzo relativo dedicado a los diferentes tipos de vigilancia radiológica depende del grado y naturaleza del riesgo, para esto se hace una diferenciación de riesgos radiológicos de trabajos en mina y en el procesamiento del mineral de uranio.

En las minas de uranio, los descendientes del radón constituyen el peligro predominante y por lo tanto requiere una vigilancia continua, siguiendo por su importancia, la radiación externa y el polvo radiactivo suspendido en el aire.

En el procesamiento del mineral, el orden de importancia de los peligros varia según cada fase de proceso. En las zonas de almacenamiento del mineral, trituración y clasificación, el polvo del mineral constituye la fuente principal de exposición. Los descendientes del radón se presentan en concentraciones bajas o moderadas y la radiación externa es mínima. En la zona de manipulación del producto final, el polvo del concentrado es la fuente principal de exposición a la

Serie del ^{238}U		Serie del ^{235}U		Serie del ^{232}Th		
Nucleido	Período	Nucleido	Período	Nucleido	Período	
^{238}U	$4,5 \times 10^9 \text{ a}$	^{235}U	$7,1 \times 10^8 \text{ a}$	^{232}Th	$1,41 \times 10^{10} \text{ a}$	
^{234}Th	24,1 d	^{231}Th	25,6 h	^{228}Ra	5,8 a	
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1,17 min	^{231}Pa	$3,4 \times 10^4 \text{ a}$	^{228}Ac	6,13 h	
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 99,87% 0,13% </div>		^{227}Ac	21,0 a	^{228}Th	1,910 a	
^{234}Pa	6,75 h	^{227}Th	18,6 d	^{224}Ra	3,64 d	
^{234}U	$2,47 \times 10^5 \text{ a}$	^{223}Ra	11,7 d	^{220}Rn	55 s	
^{230}Th	$8,0 \times 10^4 \text{ a}$	^{223}Rn	3,9 s	^{218}Po	0,15 s	
^{226}Ra	1602 a	^{213}Po	$1,8 \times 10^{-3} \text{ s}$	^{214}Pb	10,64 h	
^{222}Rn	3,823 d	^{213}Pb	36 min	^{214}Bi	60,8 min	
^{218}Po	3,05 min	^{211}Bi	2,2 min	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 64,0% 36,0% </div>	^{212}Po	304 ns
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 99,98% 0,02% </div>		^{211}Po	0,5 s	^{208}Tl	3,10 min	
^{214}Pb	26,8 min	^{207}Pb	Estable	^{212}Pb	Estable	
^{214}Bi	19,7 min					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 99,98% 0,02% </div>						
^{214}Po	164 μs					
^{210}Tl	1,3 min					
^{210}Pb	21 a					
^{210}Bi	5,01 d					
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> ~ 100% 0,00013% </div>						
^{210}Po	138,4 d					
^{206}Tl	4,19 min					
^{206}Pb	Estable					

FIG. 10-1 Contaminantes radiactivos potenciales en los residuos de tratamiento del uranio

radiación beta (β) y gama (Γ) mientras que los descendientes del radón son insignificantes o inexistentes.

La radiación externa se vigila con instrumentos de inspección y dosímetros individuales que deben ser robustos, impermeables y herméticos al polvo.

10.5.1 LIMITE DE DOSIS

La finalidad del límite de dosis es reducir el riesgo a un nivel aceptable. Se aplica a la suma de dosis debidas a todas las fuentes de radiación excepto a las exposiciones médicas.

El sistema de limitación de dosis de la CIPR (Comisión Internacional de protección contra la radiación), exige que se sumen las exposiciones a las radiaciones externas y a la incorporación de materiales radiactivos. Por lo tanto la fórmula es:

$$\frac{H_E}{50 \text{ msv}} + \frac{E_{RnD}}{0.02 \text{ J}} + \frac{E_{OD}}{1,3 \text{ Bqh l}^{-1}} \leq 1$$

Donde:

H_E : Exposición a la radiación externa (msv)

E_{RnD} : Exposición a los descendientes del radón (J)

E_{OD} : Exposición al polvo de mineral radiactivo
(salvo los descendientes del radón)

$B \text{ qh l}^{-1}$: Becquerelio hora por litro

Los denominadores de la fórmula son los límites anuales correspondientes recomendados por CIPR

Unidades:

$$1 \text{ sv} = 1 \text{ Joule} \times \text{Kg}^{-1}$$

$$1 \text{ sv} = 100 \text{ Rem}$$

$$1 \text{ Rem} = 10^{-2} \text{ Joule} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

En razón de la toxicidad química del uranio natural ^{238}U en forma soluble, la inhalación de uranio de cualquier composición isotópica no debe exceder de 2,5 mg, ni la ingestión de 150 mg de uranio soluble al día. En el cuadro N^o 10 - 3, se dan los límites de dosis en la inhalación, ingestión para los trabajadores (personal ocupacionalmente expuesto) y para los individuos de la población; para los elementos de Uranio, Torio, Silicio, Radón, etc.

10.6 DISPOSITIVOS DE PROTECCION

El empleo de medios de protección personal en los trabajos de procesamiento de minerales de uranio según los riesgos de contaminación no solo deberían proporcionar protección adecuada sino la utilización obligada por el trabajador. De tal manera que disminuya la probabilidad de contaminación externa e interna.

CUADRO Nº 10-3

ABSORCION MAXIMA ADMISIBLE DE RADIONUCLEIDO ANUALMENTE (μCi)

RADIONUCLEIDO	ORGANO CRITICO	TRABAJADOR INHALACION EN HORAS DE TRABAJO	POBLACION	
			INGESTION	INHALACION
^{238}U	RINON	$1,8 \times 10^{-1}$	$4,7 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-2}$
	PULMON	$3,4 \times 10^{-1}$	-----	$3,4 \times 10^{-2}$
	GI(IGI)	-----	$2,8 \times 10^1$	-----
^{235}U	RINON	1,2	3,0	$1,2 \times 10^{-1}$
	PULMON	$3,2 \times 10^{-1}$	-----	$3,2 \times 10^{-1}$
	GI(IGI)	-----	$2,2 \times 10$	-----
^{234}U	PULMON	$3,0 \times 10^{-1}$	-----	$3,0 \times 10^{-2}$
	GI(IGI)	-----	$2,6 \times 10$	-----
^{232}Th	PULMON	$2,9 \times 10^{-2}$	-----	$2,9 \times 10^{-2}$
	GI(IGI)	-----	$3,0 \times 10$	-----
^{222}Rn	PULMON	$7,3 \times 10^2$	-----	$7,3 \times 10$
^{220}Rn	PULMON	$7,3 \times 10^2$	-----	$7,3 \times 10$
^{210}Bi	SOL. GI(IGI)	-----	$3,3 \times 10$	-----
	RINON	$1,6 \times 10$	-----	1,6
	INSOL. PULMON	$1,5 \times 10$	-----	1,5
^{212}Bi	SOL. GI(E)	-----	$2,8 \times 10^2$	-----
	RINON	$2,4 \times 10^2$	-----	$2,4 \times 10$
	PULMON	$5,0 \times 10^2$	-----	$5,0 \times 10$
	INSOL. GI(E)	-----	$2,8 \times 10^2$	-----
^{31}Si	SOL. GI(E)	$1,4 \times 10^4$	$7,0 \times 10^2$	$1,4 \times 10^3$
	INSOL. GI(IGS)	$2,5 \times 10^3$	$1,5 \times 10^2$	$2,5 \times 10$

ABREVIATURAS

GI	: TRACTO- GASTRO-INTESTINAL	E	: ESTOMAGO
IGI	: INTESTINO GRUESO INFERIOR	SOL.	: SOLUCION
IGS	: INTESTINO GRUESO SUPERIOR	INSOL.:	INSOLUBLE (SOLIDO)

FUENTE: REGLAMENTO DE PROTECCION RADIOLOGICA-IPEN

10.6.1 ROPA PROTECTORA

En toda planta de procesamiento de mineral radiactivo, se facilita a los trabajadores, ropa de faena (mamelucos, gorros, guantes, botas, lentes protectores, etc) para reducir la contaminación cutánea. Las ropas de trabajo se recomienda lavarlas regularmente dentro de la instalación.

10.6.2 PROTECCION DE LA INHALACION DE POLVO RADIACTIVO.

Es muy importante comprender concienzudamente que los respiradores no pueden considerarse un sustituto de las medidas apropiadas de control de la contaminación por inhalación. Lo que se debe preocupar siempre es evitar la contaminación del aire con polvos radiactivos, en las zonas de procesamiento del mineral de uranio. Este dispositivo se debe emplear siempre y cuando se realicen trabajos como: trituración, molienda, cribado, homogenizado, cuarteado, etc. y en las etapas de secado, envasado de YELLOW CAKE (pasta amarilla), también las operaciones de mantenimiento de equipos, manipulación de productos químicos tóxicos y realización de limpieza de la zona de procesamiento del mineral de uranio.

Estos respiradores a usar deben estar aprobados por la autoridad competente. Es importante el

correcto mantenimiento de los respiradores para evitar la contaminación por inhalación de polvos radiactivos.

10.7 **BIOENSAYO**

Al margen de medir la concentración de los radionúclidos en el aire, es imprescindible llevar a cabo un programa de muestreo regular de la orina de los trabajadores **expuestos** para detectar las incorporaciones del uranio.

El análisis de orina para detectar la presencia del uranio es de mucha importancia, ya que es probable que el daño al riñón sea más grave que la radiolésion de los tejidos corporales. Dentro de las 24 horas después de la entrada de uranio, se elimina por la orina entre la mitad y las tres cuartas partes de la cantidad total de entrada. Por tanto, el análisis de orina es una forma fácil de comprobar si ha habido recientemente contaminación interna. Estos análisis de orina se realizan por la técnica fluorimétrica.

10.8 **REGLAS PARA EVITAR LA CONTAMINACION EN EL PROCESAMIENTO DEL MINERAL DE URANIO.**

a) **CONTAMINACION INTERNA**

La penetración de sustancias radiactivas en el interior del cuerpo ocasiona la irradiación interna de una parte o de todo el organismo. Para "evitar" la

contaminación interna debe tenerse en cuenta las siguientes reglas:

- 1. No fumar, beber, ni comer dentro de las zonas de procesamiento de mineral.*
- 2. No manipular el mineral lixiviado, concentrado de uranio con las manos desnudas.*
- 3. No pipetear líquidos que contienen uranio por aspiración bucal.*
- 4. Lavarse las manos con frecuencia, con abundante agua y jabón.*
- 5. No introducir a las zonas de procesamiento, alimentos, bebidas, cigarros ó cosméticos*
- 6. Los residuos radioactivos deben depositarse en recipientes proveídos para estos casos.*
- 7. Las vestimentas de faena no deben transponer jamás los límites del lugar en que se emplean.*
- 8. El cambio de la ropa de faena por el trabajador se debe realizar en vestuarios adecuados o designados para tal fin.*

b) **CONTAMINACION EXTERNA**

1. *Limitación del tiempo de exposición al mineral radiactivo, concentrado del producto, etc.*
2. *Permanecer a distancia razonable de la fuente de radiación beta y gamma.*
3. *En algunos casos se puede usar blindajes plomo, hormigón, agua, etc.*

10.9 **SIMBOLOS**

Las áreas controladas se delimitaran con claridad y se colocarán avisos en las puertas de entrada y en aquellos otros lugares en que se considere conveniente dentro de ellas.

Estos avisos llevarán:

- a. *El símbolo básico que señale la posibilidad o la presencia de radiaciones ionizantes de color magenta y amarillo (Fig.Nº 10 - 2).*
- b. *Cualquier otra inscripción, color o símbolo que se estime necesario, para indicar de modo comprensible los riesgos de exposición (fig.Nº10-3).*

SIMBOLO DE LAS RADIACIONES IONIZANTES

Dimensiones y Proporciones

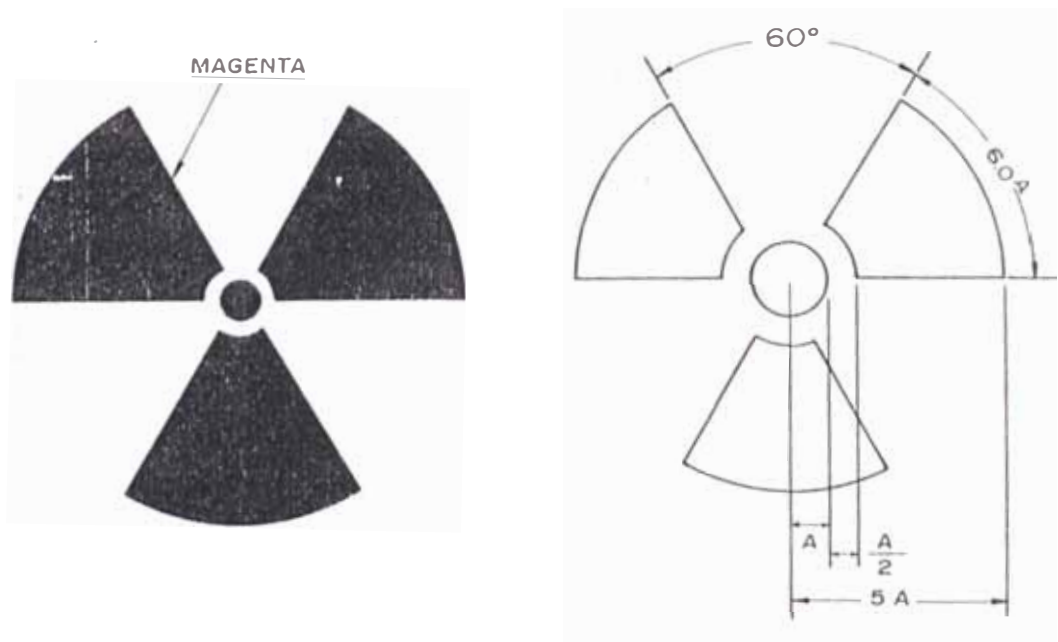


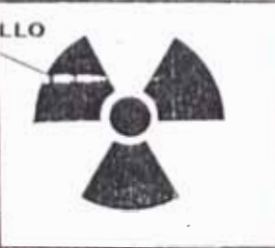




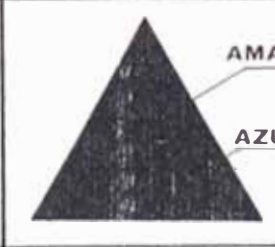


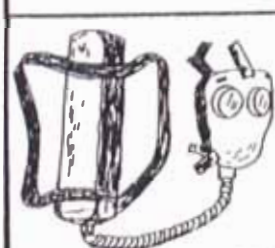



FIG. 10.2

FIG. 10-3
CODIGO DE SENALAMIENTO

AMARILLO

	ACCESO REGLAMENTADO PELIGRO DE IRRADIACION		MAGENTA ACCESO PROHIBIDO PELIGRO DE IRRADIACION
	ACCESO REGLAMENTADO PELIGRO DE CONTAMINACION		MAGENTA ACCESO PROHIBIDO PELIGRO DE CONTAMINACION
	ACCESO REGLAMENTADO PELIGRO DE IRRADIACION Y CONTAMINACION		MAGENTA ACCESO PROHIBIDO PELIGRO DE IRRADIACION Y CONTAMINACION
	LUGAR U OBJETOS DEBEN PROTEGERSE DE TODA IRRADIACION O CONTAMINACION		AMARILLO AZUL ZONA SOSPECHOSA RIESGO A DETERMINAR
	PASAJE REGLAMENTADO BALIZAMIENTO		MAGENTA PROHIBIDO PASAR BALIZAMIENTO
	USO OBLIGATORIO DE EQUIPO AUTONOMO		USO OBLIGATORIO DE MASCARA FILTRANTE

CAPITULO XI

CONCLUSIONES

- ANEXO
- BIBLIOGRAFIA

11. CONCLUSIONES

11.1 GENERALES

Las conclusiones generales son resumidas como sigue:

El interés que se ha demostrado con respecto a la lixiviación bacteriana del mineral de uranio procedente del yacimiento de Chapi - Macusani, conducirá a más intentos por parte del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), en aplicar el conocimiento alcanzado en ésta primera fase de investigación.

*La comprensión adecuada del rol que juega la célula bacteriana *Thiobacillus Ferrooxidans*, con la optimización de la reacción electroquímica en el proceso de lixiviación de uranio permitirá realizar la optimización de los parámetros del proceso químico - biológico.*

Es de suma importancia adquirir conocimientos profundos sobre la clasificación, comportamiento de la bacteria y las respectivas técnicas para su estudio. Esto permitirá tener un criterio acertado en la interpretación de resultados en el proceso de lixiviación y en el cultivo de la bacteria a diferentes condiciones de trabajo.

El mineral de uranio procedente del yacimiento de Chapi - Macusani es lixiviable con la parti-

cipación de la bacteria del genero *Thiobacillus Ferrooxidans*, dando como resultado un alto porcentaje de extracción de uranio con el menor consumo de acido respecto a la lixiviación sin bacteria.

La seguridad y protección radiológica del trabajador en el procesamiento (tratamiento) y extracción del mineral en el yacimiento de uranio, en nuestro pais (IPEN), tendrá que ir tomando conciencia para aplicar reglamentos, técnicas, métodos, etc. que reduzcan los riesgos radiológicos.

La demanda de uranio en el mundo, continua siendo mas elevado que la producción del uranio, la cual continua su declinación. La diferencia entre la producción y la demanda es llenada por los inventarios en exceso de la WOCA y no WOCA, la cantidad de uranio disponible en el mundo no es conocida.

11.2 PARTICULARES

El mineral de uranio en estudio, proveniente del Departamento de Puno, tiene la propiedad de ser muy frágil, llegando muy fácilmente a particulas finas, obligando a la realización de la preparación física con sumo cuidado, en ambientes adecuados que cuenten con una buena ventilación (extractores) para evitar la contaminación interna y externa.

La bacteria *thiobacillus ferrooxidans* se adapta con suma facilidad, su desarrollo y reproducción en

agua de proceso (agua potable) manteniendo un control adecuado de acidez, nutrientes y aereación, etc. Esto implica que el medio de cultivo bacterial se puede realizar sin esterilización.

Para nuestro caso se logró una población de 42 millones de células bacterianas por cada mililitro de cultivo (laboratorio hidrometalúrgico del IPEN)

Al añadir 33 gr. de $Fe_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$ (5,0 g. de Fe^{3+}) a la columna C3 en el proceso de lixiviación después de la etapa de Neutralización en 10 días de reciclaje se logra obtener una extracción de Uranio en un 20% más que las columnas C2 y C4. Con éste resultado queda demostrado que el proceso de transferencia de masa sólido - líquido puede ser acelerado con mayor concentración del oxidante. Esto implica que a mayor cantidad de bacteria generadora de Fe^{S+} es mayor la solubilización del Uranio.

A medida que la concentración de uranio (g/l) disminuye, en el proceso de lixiviación bacteriana, la presencia de impurezas (fierro) es más notorio. Esto se debe fundamentalmente a que la actividad bacterial no cesa hasta que las condiciones de vida de la célula sea satisfactoria. Dicho de otra manera, el Fe^{S+} se incrementará debido a que la bacteria sigue generando dicho oxidante, acompañado de un consumo muy bajo de ión Férrico por parte del uranio tetravalente que se halla en cantidades muy pequeñas a medida que transcurre el

tiempo de lixiviación.

El consumo de ácido en el proceso de lixiviación sin bacteria es mucho mayor que en las columnas de lixiviación bacteriana, esto debido a que la cinética de la reacción:



es muy lento; requiriéndose alta concentración de lixivante para solubilizar el uranio.

El mejor diseño de proceso de lixiviación bacteriana para el mineral de uranio de Chapi - Macusani (Puno) es la columna C4, cuyas condiciones se muestran en el cuadro de planificación de ensayo (8.5.5.2), donde se observa un consumo de ácido sulfúrico en cantidad mucho menor acompañado de menor impureza (fierro) en comparación de las columnas C2 y la columna C3. El diseño de la columna en referencia nos conduce a comprobar, que la actividad bacterial resulta satisfactoria a un pH de 1,8 coincidiendo con los reportes de otras investigaciones realizadas por DUCAN y BRUYNES-TEYN (Canadá).

El retiro del licor en las columnas de lixiviación se debe realizar como máximo dos veces durante el tiempo de tratamiento del mineral de uranio Chapi-Macusani; esto es para una ley del mineral de 0,4 % , si la ley del mineral es < 0,36 % el reciclaje del

licor después de la neutralización es hasta el final del proceso.

11.3 RECOMENDACIONES

1. Siendo necesaria la definición a nivel de gobierno de la política Nuclear en estos momentos de crisis muy dura en el País en todo los niveles, es necesario reiniciar los contactos con empresas internacionales que han mostrado mucho interés en la inversión y comercialización de nuestro Uranio en condiciones favorables para nuestro País .

2. Tener al alcance un microscópio que cuente con contraste de fases, para realizar el conteo de células bacterianas en el momento que sea requerido, durante el proceso de lixiviación.

3. Durante el desarrollo de la investigación lixiviación bacteriana del mineral de uranio, mantener una estrecha relación con instituciones como INGEMMET, CENTROMIN PERU, y los Centros de Investigaciones de las Universidades (UNI, UNMSM, Cayetano Heredia, etc.)

4. Realizar el estudio de diseño experimental para obtener el máximo de información con el número mínimo de pruebas de lixiviación bacteriana antes de

realizar la optimización de variables de proceso.

5. Continuar el estudio de cultivo de bacteria thibacillus ferrooxidans en un medio sólido (mineral de U malla -200).

6. Realizar la lixiviación bacteriana del mineral de uranio Chapi - Macusani por agitación.

7. Realizar el ensayo de lixiviación bacteriana en columnas con mineral de uranio del yacimiento de Chapi con granulometrías de $\frac{1}{2}$ " y 1" a pH de 1,8 y 1,5.

8. Es recomendable realizar el análisis químico cuantitativo del uranio, fierro, silicio y fósforo, cada 5 días de lixiviado.

BIBLIOGRAFIA

1. **J. PEREZ, A.E. TORMA AND I.J. ITZKOVITCH.** "Progress in Biohydrometalurgy", "Effects of *Thiobacillus Ferrooxidans* on Barium-Radium sulfate in Uranium mill Tailings" Pg 643-653 (MAY 1983).
2. **V.F. HARRISON, W.A. GOW, and M.R. HUGHSON** "Journal of Metals" , Factors influencing the application of Bacterial Leaching To a Canadian Uranium Ore, Pg 1189-1194 (1996).
3. **V.F. HARRISON, W.A. GOW and K.C. IVARSON;** "CANADIAN MINING JOURNAL", Leaching of Uranium from Elliot Lake ore in the presence of bacteria, Pg 64-67 (1965).
4. **K. FLOETER, R SADOWSKI and G. SCHOENING** "Progress in biohydrometalurgy", A quantitative evaluation of the Biological Oxidation during the leaching of Uranium ore, Pg 265-277 (1983).
5. "Estudio de base exploración de Uranio, Pampa Suyupia-Chapi", informe interno DMP-IPEN, PERU (1986).
6. **J.R. FISHER;** "The Canadian Mining and Metallurgi-

- cal", *Bacterial leaching of Elliot lake Uranium ore*, Pg 588-591 (1966).
7. **DON WADDEN** and **A. GALLANT** *Canadian Metallurgy Quarterly*", *The in-place leaching of uranium at Denison Mines* , 24, 127-134 (1985).
 8. **JORGE RODRIGUEZ V.** "De re Metallica", "La biometalurgia en el marco del desarrollo de la minería Peruana", Pg 17-21 (Enero-Abril 1987).
 9. **D.W. DUNCAN** and **A. BRUYNESTEYN**, "Canadian Mining and Metallurgical" 116-120 (May-1971).
 10. **ING. J. ZEGARRA W.**, **ING. OSCAR DELGADO** E **ING. CESAR EGUAVIL**, "Informe de la representación Peruana", *Lixiviación Bacterial de minerales marginales de cobre, Toromocho. Escala Semi-Piloto*, (Centromin Perú 1987).
 11. **ING. J. VALENCIA**, "Recursos y reservas del Uranio en el Perú ", *Informe interno IPEN-DMP* (1988).
 12. **ING. GUIDO ARROYO**, "Recursos de Uranio", *Informe interno IPEN-DMP* (Abril 1989)
 13. **DR. OMAR VALENTINUZZI** , Experto OIEA, "Ternas de

procesamiento de minerales de Uranio", Lima. (Julio-Octubre 1982).

14. **ING. FIDEL SERGIO MISARICH**, "Tecnología de la lixiviación Bacteriana de minerales"; Lima-Perú (1987).
15. **DR. KLAUS BOSECKER, DIPL. BIOLOGE**, "Procesos Microbiológicos en la recuperación de Materia prima", *De Re Metallica* (setiembre-octubre 1984).
16. **M. POZO y J. A. CAMPA**, "Estudio Comparativo de la lixiviación Química y Bacteria del Cobre en pirita masiva de reotinto ", *METAL CENIM* Pg 9,19 (1979).
17. **ING. JUAN ZEGARRA W.**, " Aspectos tecnológicos de la Lixiviación Bacteriana ", Seminario internacional sobre procesos especiales de la Metalurgia extractiva del Cobre, Trujillo-Perú (noviembre de 1979).
18. **DR DIETER HAISCH**, Experto CIME; "Bacterial Leaching a Method to win copper, VIII Jornada Metalurgica", and Different other Metals", (Diciembre 1981).
19. **L. TORO, B. PAONETTI and C. CANATALINI**; "Pricipate Formation in the oxidation of ferrous ions in

- the presence of thiobacillus ferrooxidans*", *hidrometallurgy*, Pg 20,1-9 (1988).
20. R.G.L. Mc CREADY and D. WADDEN and A. MARCHBANK. "Nutrient Requeriments for the in place leanching of uranium by thiobacillus ferrooxidans", *Hidrometallurgy*, Pg 19,61-71 (1986).
21. K.E. HAQUE and G.M. RITCEY; "Comparison of oxidants for the leaching of Uranium ores in sulfuric acid", *Hidrometallurgy. CIM* (Mayo 1982).
22. DR. DIETER HAISCH Y ING RENE DURAND Y BIOLOGA CARMELA TRONCOSO; " Numero mas probable, microscopio con contraste de fase y poder resolutivo y aumento " Informe técnico INGEMMET-LIMA/PERU (Agosto 1984).
23. BIOLOGA CARMELA TRONCOSO, "Lixiviaciones Bacteriologicas " Apunte-FIGMM/UNI (1991).
24. J.E. DUTRIZAC, Ph D.and R.J.C Mc DONALD B.SC. "Ferric ion as a leaching medium ", *minerals SCI ENG* ,6,59-95 (1974).
25. CORALE L. BRIERLEY; "Bacterial leaching CRC. critical Reviews in microbiology, Pg 207-255 (no-

viembre 1978).

26. A. **ARRIBAS** y E. **FIGUEROA**; "Uranium Deposits in volcanic rocks", International Atomic Energy Agency, VIENNA (1985).
27. **ARPAO E. TORMA** "Biotechnology of Metals" Scientific Fundamentals of Technology of Tank Leaching of uranium. Pg 267-273 (MOSCOW 1985).
28. D.C. **SEIDEL**; "Organismo Internacional de Energía Atómica", Extracción de Uranio de sus minas, 23 Pg 24-28 (1981).
29. J.U. **AHMED**. "Organismo Internacional de Energía Atómica " Seguridad Radiologica en las minas y plantas de tratamiento de Uranio. 23 Pg 29-32 Junio 1981.
30. DR **OMAR VALENTINUZZI-EXPERTO OIEA**; "Cursillo" , Técnica de procesamiento de minerales de Uranio, Julio-octubre (1982).
31. W. **FLOTTER**; "Development of projects for the production of uranium concentrates", Development status of projects for Uranium production, Pg 69-78 VIENNA, 25-28 November (1985).

32. *B.G. KOVROV; "Biogeotechnology of Metals" Methods of obtaining T. ferrooxidans Biomasa. Pg 127 (MOSCOW 1988).*
33. *SUSANA ISABEL GONSALES VILLALOBOS; "Estudio de Fijación de CO₂ por T. ferrooxidans CEPA TH-COR" Universidad Peruana Cayetano haredia, Escuela Post grado "Victor Alzamora Castro" (1986).*
34. *BS-UNI LEONCIO CISNEROS BERROCAL; "Cultivo de bacterias Thiobacillus Ferrooxidans ", Informe interno IPEN-DMP/002 , (Junio 1991).*
35. *EBERHARD MULLER-KAHLE; "The uranium situation 1989-1990", International Atomic Energy Agency, (1991-01-15).*
36. *BS-UNI LEONCIO CISNEROS BERROCAL, "Operaciones de muestreo de minerales de Uranio CHAPI-PUNO (Perú)" Informe Interno IPEN-DMP/001 (Junio 1991).*
37. *J. HAVER; "Primer seminario sobre Tecnologías Bioghidrometalúrgicas".Junta de Acuerdo de Cartagena (Lima 1989) Metabolismo, Toxicidad, Adaptación y posibilidad para la Ingeniería Genética con especies de Thiobacillus: Pg 71-86. (1989).*