

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL**



**“EVALUAR EL USO DE HIPOCLORITO DE SODIO Y PEROXIDO DE  
HIDRÓGENO EN EL TRATAMIENTO DE UN EFLUENTE  
CIANURADO”**

**INFORME DE SUFICIENCIA  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACION POR CONOCIMIENTOS**

**PRESENTADO POR:  
LUCY MARIA NESTARES ROJAS**

**LIMA – PERÚ**

**2010**

## **RESUMEN**

**El presente trabajo se basa en las pruebas a nivel de planta piloto utilizando el método de Oxidación mediante una solución de 50% Peróxido de Hidrógeno ( $H_2O_2$ ) e 8% Hipoclorito de Sodio ( $NaClO$ ) para el tratamiento de un efluente cianurado. El método utilizado nos permitirá reducir la presencia de Iones Cianuro ( $CN^-$ ) en el efluente cianurado, con la finalidad de cumplir con los límites máximos permisibles de emisiones para las unidades minero-metalúrgicos emitido por el Ministerio de Energía y Minas en la Resolución Ministerial N° 315-96-EM/VMM y luego ser evacuado a un cuerpo receptor.**

**Durante las pruebas se han realizado análisis de: Cianuro Total, Cianuro DAD y Tiocianatos, características importantes del efluente en estudio. Los análisis presentaron interferencia por la presencia de cloro producto del uso de 8% Hipoclorito de Sodio.**

## INDICE

Pág.

CARATULA .....	i
RESUMEN .....	ii
INDICE .....	iii
I. INTRODUCCIÓN .....	4
II. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS.....	6
2.1. Conceptos básicos sobre destrucción de Ion Cianuro .....	6
2.2. Química de las Soluciones de Cianuro .....	9
2.3. Métodos de destrucción del Ion Cianuro .....	13
2.4. Métodos de Análisis de Cianuro Total y DAD.....	27
2.5. Interferencias en los Análisis.....	28
III. DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS.....	31
3.1 Caracterización del Efluente Cianurado .....	31
3.2 Monitoreo y Toma de Muestra .....	32
3.3 Desarrollo de las Pruebas Experimentales.....	32
3.4 Costo de Tratamiento.....	52
3.5 Comparación de Resultados Comparados con Limite Máximo Permisible (L.M.P.) .....	53
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
V. BIBLIOGRAFIA.....	55
VI. APENDICE.....	58

## **I.- INTRODUCCIÓN**

El Perú, a través de los años se ha constituido como uno de los principales productores de oro en el mundo, producto de las nuevas inversiones realizadas en el sector durante los últimos 15 años. Durante el año 2008 nos consolidamos como el quinto país productor de oro en el mundo con 180 toneladas. Este importante crecimiento de la producción minera ha tenido un importante efecto en los ingresos generados por las exportaciones del oro, los cuales durante el año 2008 alcanzaron los US \$ 5,588.4 millones (29.9% de las exportaciones mineras y 17.7% de las exportaciones totales), siendo de esta manera el segundo producto de exportación minera después del cobre<sup>(1)</sup>.

El oro es sin duda una de las potencialidades geológicas con que cuenta nuestro país, por ello resulta importante propiciar la inversión y ejecución de proyectos auríferos, con el fin de mantener nuestro status como importante productor de oro, y a través de ellos, aportar al desarrollo del país.

Desde hace más de un siglo, el cianuro ha sido el principal reactivo químico utilizado por la industria minera para la producción de oro. Es una sustancia química peligrosa que requiere de cuidadosas prácticas de manejo. Las minas de oro continúan utilizando por cuanto no existen otras alternativas que sean al mismo tiempo comercialmente viables y sanas para el medio ambiente.

En enero del 2000 en Rumania, la descarga por accidente de grandes cantidades de soluciones de cianuro y colas de la mina Aurul resultó en una alta contaminación del sistema del río que recibió. Este incidente tuvo el efecto de concientizar dramáticamente a los gobiernos, los organismos internacionales, la industria y al público en general sobre el peligro que representa para el medio ambiente la utilización del cianuro en la extracción del oro. Para atender las inquietudes que existen acerca del uso y manejo del cianuro en mayo del 2000 consideran desarrollar un código de prácticas de carácter voluntario para el uso del cianuro, entonces se desarrollo el Código Internacional del Manejo del Cianuro<sup>(2)</sup> para: la Producción, el Transporte y la Utilización del Cianuro en la explotación del oro, este código fue formulado bajo la dirección de un comité

directivo integrado por las distintas partes directamente interesadas y cuyos miembros fueron elegidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Consejo Internacional de Metales y el Medio Ambiente.

El presente trabajo está dirigido a evaluar, el uso al 8% Hipoclorito de Sodio y el 50% Peróxido de Hidrógeno para el tratamiento de un efluente cianurado para luego ser evacuados al medio ambiente (Ver Anexo 1 y 2) de acuerdo a las regulaciones para los límites máximos permisibles de emisiones para las unidades minero-metalúrgicos emitido por el Ministerio de Energía y Minas en la Resolución Ministerial N° 315-96-EM/VMM<sup>(3)</sup> (Ver Anexo 3).

### **1.1. - Objetivos**

- Evaluar las pruebas en el tratamiento de un efluente cianurado mediante la oxidación del ión cianuro ( $\text{CN}^-$ ) con el uso del 8% de Hipoclorito de Sodio y 50% de Peróxido de Hidrógeno.

## II.- DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TECNICAS

### 2.1. - Conceptos básicos sobre destrucción del Ion Cianuro.

En todo efluente cianurado existe tres tipos de cianuro <sup>(4, 5, 6)</sup>: cianuro libre, cianuro débilmente complejado y cianuro fuertemente complejado. Juntos los tres componentes de cianuro

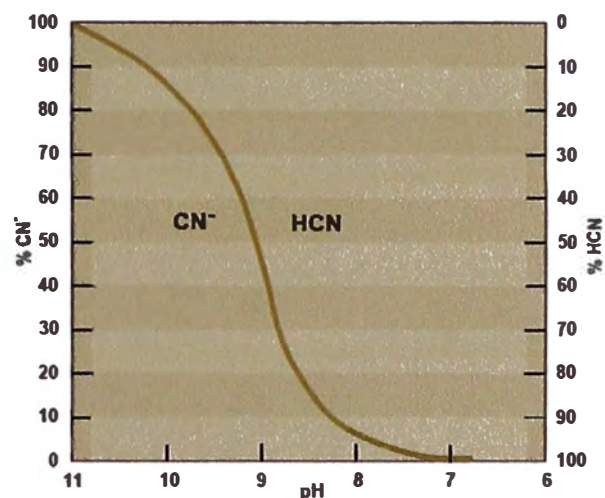
constituyen el Cianuro Total. Al conocer la química de estos tres tipos de cianuro se puede comprender su comportamiento respecto de la seguridad y al ambiente.

#### 2.1.1.- Cianuro libre

Es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro ( $\text{CN}^-$ ) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier

cianuro de hidrógeno (HCN) que se forma en la solución. Los pelets sólidos de cianuro de sodio se disuelven en el agua para formar el ion de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y el anión de cianuro ( $\text{CN}^-$ ). El anión de cianuro se combina luego con el ion de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) para formar HCN molecular. La concentración del ion de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) en el agua del proceso se expresa mediante el conocido parámetro pH. En la Figura 2.1, se muestra el equilibrio de  $\text{CN}^-$  y HCN, casi todo el cianuro libre esta presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrógeno presentes es decir, a un valor de pH de 8 ó menos. Este HCN entonces puede volatilizarse y dispersarse en el aire. Cuando el pH es superior a 10.5 hay pocos iones de hidrógeno presentes y casi todo el cianuro libre esta presente como  $\text{CN}^-$ . En condiciones normales de temperatura y presión las concentraciones de HCN y  $\text{CN}^-$  son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9.4.

Fig. 2.1.-Equilibrio de pH entre  $\text{CN}^-$  /HCN



Fuente: Logsdon M., Hageslstein K. and Mudde F. El manejo del Cianuro en la Extracción del Oro<sup>(4)</sup>. Pág.17.

Estas formas de cianuro libre son importantes porque se consideran como los cianuros más tóxicos. Sin embargo, también son las formas que se eliminan más fácilmente de las soluciones mediante elaborados procesos de tratamiento y mecanismos naturales de atenuación.

Los procesos biológicos, químicos y físicos que afectan a las concentraciones de cianuro en el agua, el suelo y el aire han sido extensamente estudiados durante las dos décadas pasadas, de modo que su comportamiento en el ambiente es bien conocido.

Una de las reacciones más importantes que afectan a la concentración de cianuro libre es la volatilización de HCN, que, al igual que la mayoría de los gases, se separa del agua y escapa al aire. El cianuro libre no es persistente en la mayoría de las aguas superficiales porque el pH de dichas aguas generalmente es de 8, de modo que el HCN se volatiliza y dispersa. La volatilidad del cianuro de hidrógeno y su posterior transformación en compuestos benignos en el aire son importantes porque actúan como un mecanismo natural que controla las concentraciones de cianuro libre en los efluentes residuales y de los procesos en las minas.

Los procesos naturales pueden reducir por sí solos a valores muy bajos la concentración de cianuro libre de las soluciones en lugares al aire libre en las instalaciones de producción de oro, tales como estanques para procesamiento y depósitos de relave, a menudo a niveles por debajo de los establecido en los reglamentos o incluso por debajo de los límites de detección.

Sin embargo, los operadores en la planta de extracción de oro, mantienen el pH de la solución a valores cercanos a 10.5 con el fin de impedir la volatilización. Esto preserva el cianuro en el sistema de extracción de oro, donde es necesario y al mismo tiempo limita el tiempo de inhalación por parte de los trabajadores de altas concentraciones de HCN gaseoso en un espacio cerrado.

### **2.1.2.- Complejos débiles y fuertes de Cianuro**

Aunque las soluciones que contienen cianuro se utilizan en minería porque reaccionan con el oro, también reaccionan con otros metales. El mineral aurífero casi siempre contiene otros metales, entre ellos hierro, cobre, zinc, níquel y plata,

así como otros elementos, como el arsénico. En la mayoría de los cuerpos mineralizados, las concentraciones de otros metales típicamente son mayores que la concentración de oro en varios órdenes de magnitud. Por ejemplo, un mineral aurífero de baja ley apropiado para lixiviación con cianuro podría contener 0.5 a 1 gramo de oro por tonelada (0.5 a 1 parte por millón [ppm] de oro); por el contrario, la concentración de hierro de las rocas cristalinas promedio es de aproximadamente 3.5% (35,000 ppm). Los metales como el cobre, el zinc y el níquel pueden estar presentes en concentraciones que varían entre decenas y miles de partes por millón. Los análisis químicos de las soluciones utilizadas en los procesos y de los efluentes residuales derivados del procesamiento indican que la mayor parte del cianuro en solución está químicamente ligado a metales distintos de las pequeñas cantidades de oro o plata.

Cuando los elementos químicos se combinan en una solución para formar especies solubles, los químicos se refieren a ellas como “complejos”. Existe una amplia gama de interacciones químicas y físicas entre los componentes de los complejos. Algunos complejos son muy estables, mientras que otros se destruyen fácilmente. Los químicos analíticos pueden definir la estabilidad relativa de los complejos de cianuro de diferentes metales con gran precisión. La evaluación de la cantidad y los tipos de cianuro es importante para todos los aspectos del uso del cianuro. Es particularmente importante poder distinguir tanto con exactitud como con precisión entre los distintos compuestos de cianuro para asegurar la elección de una metodología eficaz de destrucción del ion cianuro.

Los complejos débiles de cianuro, con frecuencia denominados cianuros “disociables en ácidos débiles” o cianuros DAD (WAD), pueden disociarse en solución y producir concentraciones ambientalmente significativas de cianuro libre. Los complejos débiles incluyen complejos de cianuro de: cadmio, cobre, níquel, plata y zinc. El grado al cual se disocian estos complejos depende en gran medida del pH de la solución.

Por otra parte, los complejos fuertes de cianuro se degradan mucho más lentamente que el cianuro DAD en condiciones químicas y físicas normales. Los complejos de cianuro como: oro, cobalto y hierro son fuertes y estables en



solución. Esta estabilidad del complejo oro-cianuro es un factor clave en el uso del cianuro para la extracción del oro del mineral. Una vez que el oro entra a la solución ligado al cianuro, permanece complejado con el cianuro hasta que las condiciones del proceso se cambian con el fin de removerlo de la solución. El cobalto está presente únicamente en trazas, pero el hierro está virtualmente presente en todos los materiales geológicos. Para la mayoría de las situaciones mineras, los complejos fuertes de cianuro son predominantemente cianuros de hierro.

La velocidad a la cual los complejos se disocian y liberan cianuro libre en la solución depende de varios factores, entre ellos, la concentración inicial del complejo de cianuro, la temperatura, el pH de la solución y la intensidad de la luz, especialmente de la radiación solar.

## **2.2. - Química de las Soluciones de Cianuro.**

Las sales de cianuro, tales como, las sales de cianuro de potasio y sodio, se disuelven y se ionizan en agua para formar su respectivo catión de metal e iones de cianuro libre según la reacción:



La selección del tipo de cianuro depende del método de aplicación, el costo y disponibilidad.

El cianuro libre forma complejos con muchas especies de metales principalmente del grupo de metales de transición, que varían ampliamente en estabilidad y solubilidad.

### 2.2.1.- Complejos presentes en la Soluciones de Cianuro de Oro y Plata.

De acuerdo a Scott (1981) en la Tabla 2.1, se presentan los principales compuestos presentes en un efluente cianurado<sup>(7,8,9)</sup>.

**Tabla 2.1.** Principales Compuestos Complejos en las Soluciones de Cianuro de Oro y Plata.

CARACTERISTICAS	PRINCIPALES COMPUESTOS
Cianuro Simple	CN <sup>-</sup> , HCN
Compuesto Simples	NaCN, KCN, Ca(CN) <sub>2</sub> , Hg(CN) <sub>2</sub>
Fácilmente Solubles	Zn(CN) <sub>2</sub> , CuCN, Ni(CN) <sub>2</sub> , AgCN
Relativamente Solubles	
Complejos Débiles	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , Cd(CN) <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cd(CN) <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
Complejos Moderadamente Fuertes	Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup> , Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , Ag(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>
Complejos Fuertes	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>-4</sup> , Co(CN) <sub>6</sub> <sup>-4</sup> , Au(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>

**Fuente:** Da Costa A. Degradacao De Cianetos por Hipoclorito de Sodio<sup>(9)</sup>, Rio de Janeiro, 1992, Pág. 8 Cortesía de Centro de Tecnología Mineral.

Los metales cianurados presentan una alta estabilidad en la Tabla 2.2, se ilustra algunas constantes de estabilidad de algunos metales:



Los complejos metálicos que forma el cianuro pueden formar sales dobles con una variedad de cationes, tales como: Na, K, Ca, NH<sub>4</sub> y muchos otros iones.

La constante de estabilidad (Kest), tienen una razón de equilibrio entre los iones disociados y los componentes complejos;

$$\text{Kest} = \frac{[\text{Me}^{y+}][\text{CN}^-]^x}{[\text{Me}(\text{CN})_x]^{y+}}$$

## CONSTANTES DE ESTABILIDAD DE LOS COMPLEJOS CIANURADOS

**Tabla 2.2.-Constantes de Estabilidad de los Complejos Cianurados.**

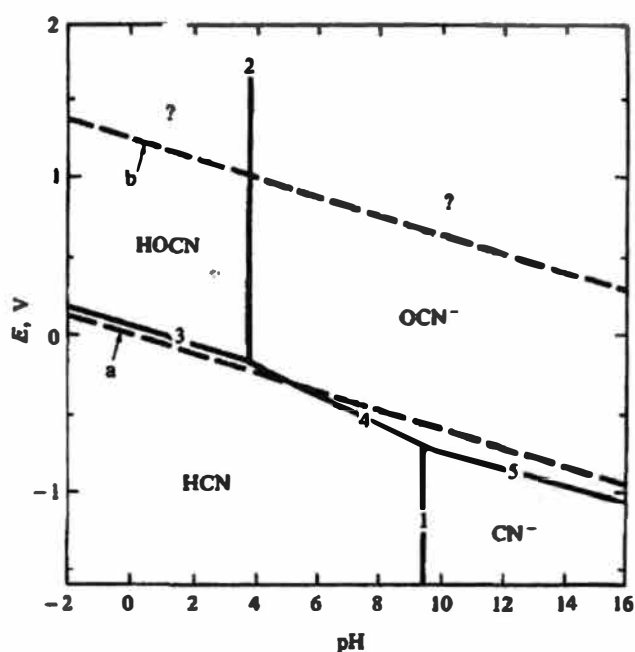
ION COMPLEJO	CONSTANTE DE ESTABILIDAD
$\text{Cr}(\text{CN})_6^{-3}$	$10^{33}$
$\text{Cr}(\text{CN})_6^{-4}$	$10^{21}$
$\text{Fe}(\text{CN})_6^{-4}$	$10^{35.4}$
$\text{Co}(\text{CN})_6^{-4}$	$10^{50}$
$\text{Ni}(\text{CN})_4^{-2}$	$10^{30}$
$\text{Pd}(\text{CN})_4^2$	$10^{42}$
$\text{Pt}(\text{CN})_6^{-4}$	$10^{40}$
$\text{Cu}(\text{CN})_2^-$	$10^{23.9}$
$\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$	$10^{29.2}$
$\text{Cu}(\text{CN})_4^{-2}$	$10^{30.7}$
$\text{Ag}(\text{CN})_2^-$	$10^{20.5}$
$\text{Ag}(\text{CN})_3^{-2}$	$10^{21.9}$
$\text{Au}(\text{CN})_2^-$	$10^{37}$
$\text{Au}(\text{CN})_4^-$	$10^{85}$
$\text{Zn}(\text{CN})_4^-$	$10^{21}$
$\text{Cd}(\text{CN})_4^-$	$10^{19}$
$\text{Hg}(\text{CN})_4^-$	$10^{39}$

**Fuente:** Vitarte J. Manejo Responsable del Cianuro.2006, Curso de especialización en cierre de minas<sup>(7)</sup>. [WWW.minem.gob.pe/minem/archivos](http://WWW.minem.gob.pe/minem/archivos).

**2.1.2.- Diagrama de equilibrio de potencial versus pH para el sistema  $\text{CN}^- \text{H}_2\text{O}$  a  $298^\circ\text{F}$ .**

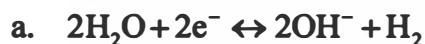
En la Figura 2.2, la oxidación de cianuro a cianato es termodinámicamente favorable a temperatura ambiente <sup>(10)</sup>.

**Figura 2.2.-Diagrama de equilibrio de potencial pH /  $\text{CN}^- \text{H}_2\text{O}$ .**

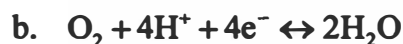


**Fuente:** Adams M.D. The chemical behaviour of cyanide in the extraction of gold<sup>(10)</sup>. Pág. 38.

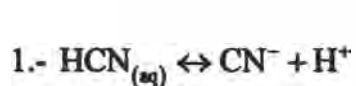
Reacciones:



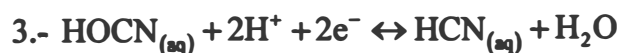
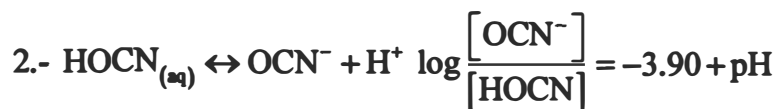
$$E = -0.0591\text{pH} - 0.0295 \log p\text{H}_2$$



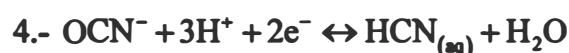
$$E = -1.228 - 0,0591\text{pH} + 0.0147 \log p\text{O}_2$$



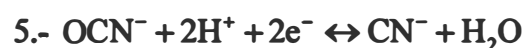
$$\log \frac{[\text{CN}^-]}{[\text{HCN}]} = -9.39 + \text{pH}$$



$$E = \frac{0.021 - 0.0591\text{pH} + 0.0295 \log [\text{HOCN}]}{[\text{HCN}]}$$



$$E = \frac{0.136 - 0.0885\text{pH} + 0.0295 \log [\text{OCN}^-]}{[\text{HCN}]}$$



$$E = \frac{0.141 - 0.0591\text{pH} + 0.0295 \log [\text{OCN}^-]}{[\text{CN}^-]}$$

? Reacción no identificada por Bard<sup>(10)</sup>

### 2.3. - Métodos de destrucción del Cianuro.

El proceso que disminuye la concentración de cianuro en solución, ya sea en el ambiente natural o en instalaciones creadas a tal fin, se denomina “atenuación”. La volatilización de HCN, que reduce la concentración de cianuro libre en solución, es el principal proceso de atenuación natural. Durante las dos décadas pasadas, las industrias química y minera lograron grandes avances en la manipulación de soluciones residuales de cianuro para que no perjudiquen a la salud pública ni al ambiente en el Anexo 4 se detallan los impactos de algunos metales en la salud humana.

Se emplean los siguientes tratamientos de la solución de cianuro:

- Regeneración del cianuro
- Degradación natural
- Oxidación química
- Precipitación y
- Biodegradación

Además, existen varias tecnologías que permiten la reutilización del cianuro mediante el reciclado.

### **2.3.1.- Regeneración del Cianuro**

El proceso de regeneración del cianuro, consiste en la adición de ácido sulfúrico a los efluentes cianurados, con lo que se consigue la liberación de ácido cianhídrico que, una vez en estado gaseoso, es absorbido en una solución de hidróxido de sodio. La reacción química que tiene lugar es:



El cianuro de sodio formado puede ser recirculado al proceso de cianuración, a la solución detoxificada (Solución con contenido pobre de iones de cianuro  $\text{CN}^-$  Total) por otra parte, se le añade cal en forma de caliza para promover la precipitación de los metales pesados que pueda contener la solución. El proceso es completamente cerrado, provisto de un ambiente de trabajo seguro, libre de contaminación atmosférica por el gas cianuro.

La gran ventaja del proceso es la de reciclar el reactivo y los costes de operación reducidos.

La mayor limitación es la manipulación en grandes cantidades del más letal de las especies cianuradas, el ácido cianhídrico.

### **2.3.2.- Degradación natural**

El principal mecanismo de degradación natural es la volatilización con posteriores transformaciones atmosféricas a sustancias químicas menos tóxicas.

Otros procesos como la oxidación biológica, la precipitación y los efectos de la luz solar también contribuyen a la degradación del cianuro.

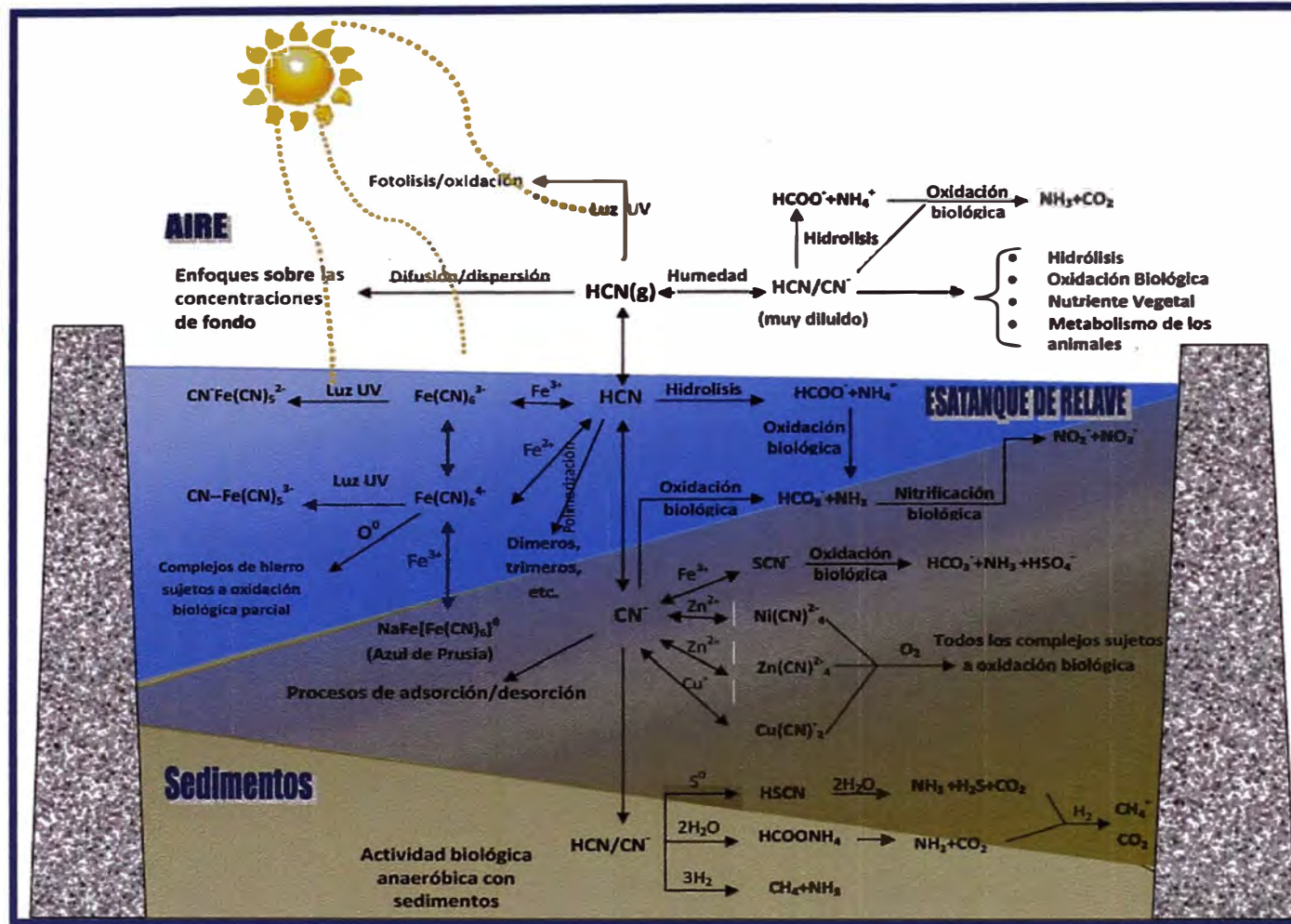
Las especies de cianuro pueden ser adsorbidas sobre las superficies de los minerales o del desecho de carbono orgánico en los suelos de un estanque, en un recubrimiento de arcilla o a lo largo de una vía de agua subterránea. En los suelos, las bacterias asimilan el cianuro mediante diversas reacciones aeróbicas y anaeróbicas. En algunos casos, la combinación de estos procesos de degradación

natural son suficientes para satisfacer los requisitos que reglamentan la descarga de soluciones que contienen cianuro.

En los depósitos de relaves, la gran superficie permite la descomposición del cianuro DAD, como se ilustra en Figura 2.3. Ciclo del Cianuro en un Estanque.

Las velocidades reales de degradación deben determinarse mediante ensayos basados en la especificidad del emplazamiento y empleando condiciones que imiten, tanto como sea posible, los tipos de soluciones y los procesos naturales que probablemente ocurran en ese lugar.

Figura 2.3.-Ciclo del Cianuro en un Estanque



Fuente: Logsdon M., Hageslstein K. and Mudde F. El manejo del Cianuro en la Extracción del Oro <sup>(4)</sup>. Pág. 21 Cortesía de

Medio Ambiente Australia



### 2.3.3.- Oxidación Química

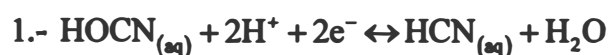
Es el método más utilizado para la degradación de cianuro, los procesos de oxidación química son <sup>(11, 12, 13)</sup>:

- Carbón Activado
- Clorinación Alcalina
- Proceso INCO ( SO<sub>2</sub>/Aire)
- Peróxido de Hidrógeno
- Ácido de Caro
- Peróxido de Hidrógeno-Hipoclorito de Sodio

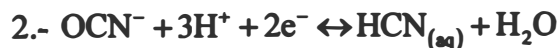
Estos métodos de oxidación química son capaces de producir concentraciones residuales de cianuro que pueden satisfacer exigentes normas de descarga. Estos procesos exigen la realización de pruebas en muestras representativas antes del diseño final de la planta.

#### 2.3.3.1.- Carbón Activado

El uso del carbón activado por muchos años es usado para remover el cianuro de los efluentes cianurados y ha sido reportado como catalizador para la oxidación del ion cianuro a cianato según las siguientes reacciones:



$$E = \frac{0.021 - 0.0591\text{pH} + 0.0295 \log [\text{HOCN}]}{[\text{HCN}]}$$



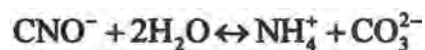
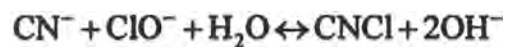
$$E = \frac{0.136 - 0.0885\text{pH} + 0.0295 \log [\text{OCN}^-]}{[\text{HCN}]}$$

La concentración del carbón activado, su naturaleza, superficie específica, granulometría y grupos funcionales, son factores claves en el proceso de oxidación catalítica <sup>(14)</sup>.

### 2.3.3.2.- Clorinación Alcalina

El proceso de clorinación alcalina utilizando hipoclorito de calcio y/o hipoclorito de sodio como agentes químicos en la destrucción de cianuro de efluentes líquidos. El proceso trabaja rápido y eficientemente tanto con cianuro libre como en complejos fácilmente disociable en ácidos débil, se utiliza rara vez en la industria minera en la actualidad.

La química del proceso se basa de acuerdo a las siguientes reacciones:



Para evitar la vaporización de la reacción intermedia cloruro de cianógeno (CNCl), el proceso tiene que operar a un pH=12. El cloruro de cianógeno se hidroliza a cianato, para posteriormente hidrolizarse y formar iones carbonato y amonio.

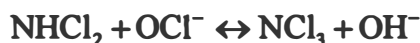
También el tiocianato es oxidado, y los metales pesados son precipitados como hidróxidos (a pH=9) excepto por el complejo de hierro-cianuro que precipita al final como una sal insoluble.

El equipo requerido es básicamente un tanque abierto agitado con la finalidad de conseguir una buena mezcla dentro del efluente, y evitar la acumulación de precipitado en el reactor.

En años recientes, este proceso ha venido siendo sustituido en muchas plantas por su riesgo de operación, y la formación de compuestos tóxicos orgánicos y cloroaminas, productos que causan serios impactos en el ambiente acuático.

Además la cloruración alcalina no es competitiva con ningún otro método de eliminación de cianuros.

Las siguientes reacciones corresponden a la formación de cloro aminas:

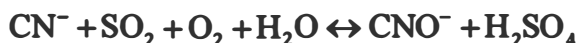


La clorinación puede remover los hidróxidos excepto los cianuros estables de cianuro de hierro.

### 2.3.3.3.- Proceso INCO

El proceso INCO con  $\text{SO}_2$ /Aire, ha sido reportado por la INCO METALS <sup>(15,16)</sup>, el cianuro libre y el cianuro DAD se oxidan y el cianuro de hierro se precipita como un sólido insoluble. El proceso puede aplicarse a soluciones o a lodos y la reacción es rápida. Las posibles limitaciones son la necesidad de obtener una licencia para utilizar el proceso, el costo de construcción de una planta procesadora, la necesidad de realizar ensayos empíricos para optimizar el sistema y la incapacidad del proceso para oxidar subproductos intermedios del cianuro.

La reacción total para la oxidación del cianuro es la siguiente:



Extensos estudios en un amplio número de efluentes han sido reportados previamente. Estos estudios mostraron que la reacción es catalizada por iones cobre en solución como  $\text{Cu}^{++}$  en presencia de  $\text{CN}^-$ . La alcalinidad necesaria de catalizador es un tanto variable del efluente específico a ser tratado.

Los complejos ferro-cianuros no son oxidados pero son removidos como sales insolubles de Fe, Cu, Zn o Ni. El ácido producido puede ser neutralizado manteniéndola a un pH entre 8-10.

El tiocianato también es oxidado, de acuerdo a la siguiente reacción:



El proceso trabaja en el rango de pH de 6 a 11, pero un rango de pH de 9 a 10 es preferido para las aplicaciones prácticas. Una temperatura para el rango de 4 a 60°C no tiene efecto significativo en el proceso. Concentraciones de dióxido de azufre entre 0.5 – 10% en volumen han mostrado que trabajan bien, pero para una eficiencia óptima de oxidación de un rango de 1-3% en volumen de SO<sub>2</sub> en el aire es recomendado.

#### **2.3.3.4.- Peróxido de Hidrógeno**

Se han desarrollado dos procesos los cuales utilizan el peróxido de hidrógeno para la destrucción oxidante del cianuro libre y los complejos de cianuro. El primer proceso conocido como proceso kastone fue originalmente propuesto por la Dupont, 1974 y por Mathre y Devries, 1981. Este proceso utiliza una solución de peróxido de hidrógeno, formaldehído y cobre. El segundo proceso fue desarrollado por Degussa Corporation<sup>(17)</sup>, empleando una solución de peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre en varias concentraciones, aunque es común no emplear las sales de cobre, debido a la presencia de este metal en los minerales, el peróxido de hidrógeno es un producto químico muy limpio y un potente oxidante, sin la formación de tóxicos intermedios, oxida el cianuro libre y el cianuro DAD y los convierte en amonio y carbonato. Los cianuros de hierro no se oxidan mediante el peróxido, pero precipitan como sólidos insolubles y estables. Algunas veces es necesario añadir sustancias químicas para controlar la concentración de cobre en las soluciones con el fin de cumplir con las normas ambientales.

El sistema con peróxido no se adapta bien al tratamiento de lodos debido a los irregulares requerimientos de peróxido de hidrógeno cuando hay sólidos presentes.

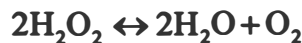
- **Oxidación del ion cianuro (CN<sup>-</sup>)**



- **Hidrolisis del ion cianato (CNO<sup>-</sup>)**



Dependiendo del pH. Si existe exceso de peróxido de hidrógeno en el tratamiento del agua, rápidamente esta se descompone:



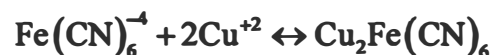
El peróxido de hidrógeno oxida al cianuro libre y también los complejos de cianuro débilmente ligados.

Por ejemplo:



Por el contrario el aurocianuro y ferrocianuro no son oxidados o destruidos por el peróxido de hidrógeno.

El ión ferrocianuro puede ser precipitado con los iones fierro, cobre y zinc;



El peróxido de hidrógeno es un compuesto ideal para la destrucción del cianuro, puesto que también tiene excelentes propiedades para la preservación del medio ambiente, el mal uso o exceso solo causa descomposición en oxígeno y agua.

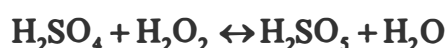
Este proceso opera normalmente en tanques agitados. Aunque la reacción es homogénea (la cinética no se ve afectada por la agitación) un agitador es necesario para lograr una buena mezcla del oxidante dentro del efluente para evitar la acumulación de los precipitados dentro del reactor.

La cinética de reacción se ve marcadamente afectada por la presencia de pequeñas concentraciones de iones cobre los cuales actúan como catalizadores. En caso de ausencia se puede adicionar como sulfato de cobre (CuSO<sub>4</sub>).

### 2.3.3.5.- Ácido de Caro

El peróxido de ácido sulfúrico  $H_2SO_5$  es conocido como **Ácido de Caro** pues lleva el nombre de su inventor Heinrich Caro (1834 – 1910) quien fue el primero que lo preparó en 1898 <sup>(11)</sup>.

El Ácido de Caro es fabricado como producto de la reacción espontánea y exotérmica entre el  $H_2SO_4$  y el  $H_2O_2$ ; de la cual, resulta una solución clara e incolora de una sola consistencia cuyas propiedades físicas se presentan en la Tabla 2.3. Debido a su inestabilidad, el Ácido de Caro es generado en el mismo punto de uso bajo la siguiente reacción:



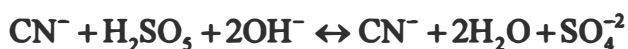
**Tabla 2.3.-Propiedades físicas del Ácido de Caro:**

Ácido de Caro	Propiedades Físicas
Punto de fusión	-30.1°C
Punto de congelamiento	-32.1F
Punto de ebullición	< 281°C (537 F)
Estado físico	Claro, incoloro, aceitoso
Olor	Fuerte
Solubilidad en agua	100%
pH	<1
Densidad	1.5 g/ml a 25°C

**Fuente;** Gavidia A. Meza L. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del Municipio de Segovia <sup>(11)</sup>, Pág. 35.

El Ácido de Caro posee una alta velocidad de oxidación, no necesita la adición de un catalizador, siendo rápida y eficiente tanto en soluciones de efluentes claras como en pulpas. Siendo un ácido requiere de una base como NaOH ó  $Ca(OH)_2$ , el cual debe de ser agregado simultáneamente al efluente para mantener el pH 9- 9.5.

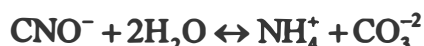
La oxidación del cianuro libre es de acuerdo a la siguiente reacción:



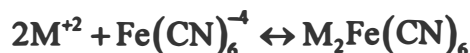
y la oxidación de complejos (Cu, Zn) disociables en ácido débil procede de acuerdo a:



El cianato hidroliza espontáneamente produciendo carbonato y amonio:



Los complejos ferro-cianuro no son oxidados pero precipitan a través de combinaciones con iones de: Cu, Zn y Fe



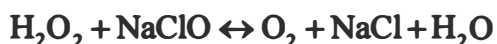
El Ácido de Caro es capaz de oxidar niveles de tiocianatos los cuales no pueden hacerse eficientemente con  $\text{H}_2\text{O}_2$  por sí mismo:



Esta característica es especialmente importante para el reciclaje de los efluentes que retornan a biolixiviación de los minerales de matriz sulfhídrica donde el  $\text{SCN}^-$  no debe de estar presente ya que este es nocivo para las bacterias. Además es conocido que la presencia de tiocianatos en los efluentes impide la precipitación de los hidróxidos de los metales pesados debido a su poder de acomplejamiento.

### 2.3.3.6.- Peróxido de Hidrógeno-Hipoclorito de Sodio

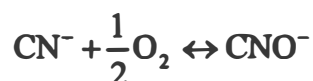
La reacción del peróxido de hidrógeno sobre el hipoclorito de sodio dentro de las condiciones definidas de pH, da origen a un oxígeno particularmente muy reactivo según la reacción:



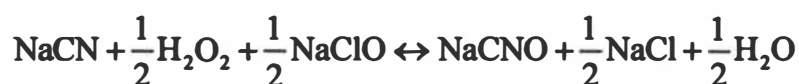
El par  $\text{H}_2\text{O}_2 - \text{NaOCl}$  no es el único en permitir la formación de este oxígeno reactivo, que también puede ser obtenido, por ejemplo por acción de otros compuestos de bromo o de cloro sobre el peróxido de hidrógeno o por ciertos mecanismos fotoquímicas.

No obstante esta generación a partir de  $\text{H}_2\text{O}_2$  -  $\text{NaOCl}$  es más interesante en el tratamiento de aguas residuales, porque emplea dos productos químicos clásico de fácil manipulación y ellos mismos tienen una función de oxidantes.

La reacción de este oxígeno reactivo (oxígeno "S" Singlet) sobre los cianuros proporciona una formación de cianatos según reacción:



Con el par  $\text{H}_2\text{O}_2$  -  $\text{NaOCl}$  la reacción global es la siguiente:



Para generar el oxígeno "S" la adición de los agentes puede ser hecha en cualquier orden. No obstante, en el tratamiento de soluciones cianuradas, es necesario introducir en primer lugar el peróxido de hidrógeno. La adición de hipoclorito de sodio antes del peróxido en un pH inferior a 11 se producirá la formación de cloruro cianógeno, compuesto muy tóxico.



La Figura 2.4. la Mina de oro Marlin propiedad de Montana Explorada de Guatemala S.A. subsidiaria de Goldcorp Inc. actualmente utiliza el proceso de oxidación del Ion Cianuro con el uso de los reactivos de Peróxido de Hidrógeno y Hipoclorito de Sodio, y la etapa final es el uso del carbón activado.

**Figura 2.4.-Mina de Oro MERLIN - Guatemala**



**Fuente:** Howell and D. Christophersen. Three-Phase Mining Effluente Treatment Plant to Meet Stringent Standards. E&MJ ENGINEERING AND MINING JOURNAL. Pág. 47 a 50 <sup>(18)</sup>

#### **2.3.4.- La Precipitación de Cianuro**

La precipitación de cianuros estables se puede obtener mediante el agregado deliberado de complejantes tales como el hierro. Esto reduce la concentración de cianuro libre y también es eficaz para controlar los elevados niveles de otros metales que pueden estar presentes. Los cianuros de hierro pueden reaccionar con otras sustancias químicas en solución y producir precipitados sólidos, que pueden contener una docena de sales insolubles de cianuro, removiendo de esta manera el cianuro de la solución. Parte del cianuro de las soluciones de los procesos reaccionará con otros componentes químicos que se encuentren dentro del sistema y formarán concentraciones mucho menos tóxicas de compuestos tales como el amoníaco, el nitrato y el dióxido de carbono.

#### **2.3.5.- La Biodegradación del Cianuros**

La biodegradación del cianuro es la base de los sistemas de tratamiento de los efluentes residuales industriales, como los utilizados por Homestake Mining Company en los Estados Unidos e ICI Bioproducts en el Reino Unido. Durante más de una década, se ha empleado un proceso biológico para tratar el cianuro en la Mina Homestake en Lead, Dakota del Sur, con el fin de satisfacer los criterios ambientales de descarga. Las condiciones aeróbicas son mucho más favorables para la degradación del cianuro que las condiciones anaeróbicas, aunque los organismos anaeróbicos pueden ser eficaces para tratar el cianuro en concentraciones de hasta varios miligramos por litro. Se han creado tanto sistemas activos como sistemas pasivos de tratamiento biológico; estos sistemas remueven el cianuro empleando microorganismos aeróbicos o anaeróbicos.

En Homestake, la solución estéril del molino aurífero se canaliza a través de recipientes para reacciones que contienen bacterias. Las bacterias utilizan el oxígeno del aire para descomponer los compuestos de cianuro en nitratos, bicarbonatos y sulfatos. Este proceso microbiano es capaz de oxidar los complejos de cianuro metálico, los iones metálicos de las especies de cianuro DAD y los subproductos intermedios de la oxidación del cianuro.

Las ventajas del proceso de tratamiento biológico son su diseño simple y el control del proceso operativo, los bajos costos de las sustancias químicas y la capacidad para tratar todas las formas del cianuro y sus subproductos. Las posibles limitaciones de los sistemas de tratamiento biológico son su reducido rendimiento con temperaturas frías y con concentraciones muy altas de cianuro.

#### **2.4. - Métodos de Análisis de Cianuro Total y Cianuro DAD**

Existen varias normas internacionales que son utilizadas para la determinación de cianuros<sup>(19, 20, 21)</sup>; sin embargo, se resumen los siguientes métodos como los más usados:

- **Destilación con NaOH:**

Un procedimiento común es la destilación para medir el cianuro total, que consiste en volatilizar todas las formas de cianuro para luego condensarlas con NaOH.

- **Método Espectrofotométrico:**

Este método es usado para determinar la concentración de cianuros inorgánicos en aguas residuales, potables y naturales. El método detecta los cianuros tanto en forma de sales simples solubles como de radicales complejos.

- **Método Potenciométrico:**

Los cianuros son determinados potenciométricamente en el destilado alcalino del tratamiento preliminar usando un electrodo selectivo de ión específico para cianuros, en combinación con un electrodo de referencia y un potenciómetro que cuente con una escala expandida en mili-voltios o un medidor específico de iones.

- **Método Volumétrico:**

El ion cianuro ( $\text{CN}^-$ ) presente en la muestra se valora con nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) en presencia de yoduro de potasio (KI) como indicador, para formar el complejo de cianuro de plata soluble ( $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ ). En cuanto se halla acomplejado

todo el ion cianuro ( $\text{CN}^-$ ) y exista un pequeño exceso de plata ( $\text{Ag}^+$ ) añadido, este exceso es detectado por el indicador de yoduro de potasio (KI), sensible a la plata y ocasiona un viraje en la solución.



## **2.5. - Interferencias en los Análisis**

La presencia de diferentes elementos o compuestos en la solución puede interferir de una manera positiva o negativa en el resultado del análisis químico de cianuro, según la técnica utilizada. Las principales sustancias que causan interferencias<sup>(20)</sup> en el análisis de cianuro son: Turbidez de la solución, agentes oxidantes, sulfuros, tiocianatos, nitritos, carbonatos y metales.

### **2.5.1.- Turbidez de la Solución**

La turbidez de la solución puede afectar las técnicas de análisis colorimétricas. Normalmente, una destilación de la solución es suficiente para eliminar todo color.

### **2.5.2.- Agentes Oxidantes**

Los agente oxidante ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) son una interferencia negativa en el análisis porque pueden oxidarse o continuar la oxidación del cianuro entre la toma de muestra y el análisis. Se puede detectar la presencia de oxidantes con papel indicador de yoduro de potasio-almidón humedecido con un solución tampón de acetato,  $\text{pH} = 4$ ; si el papel se torna azul existe oxidantes en la solución. Para eliminar la interferencia se puede adicionar un agente reductor como el ácido ascórbico (un exceso que no pase de 30 mg/l ) o bien 0.1g de arsenito de sodio ( $\text{NaAsO}_2$  hasta que el papel no cambie de color) También puede utilizarse tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  cuidando de no tener un exceso de más de 0.1 g/l). Se prefiere el uso de arsenito de sodio porque no afecta los análisis.

### **2.5.3.- Sulfuros**

Los sulfuros son una interferencia habitual en los efluentes mineros con un pH elevado y un contenido deficiente de oxígeno. El sulfuro puede ser destilado junto

con el ácido cianhídrico, colorear la solución y alterar el resultado. También puede reaccionar con el cianuro para formar tiocianatos especialmente a valores elevados de pH y disminuir la cantidad de cianuro medida. El sulfuro destilara con el cianuro y afectara también la lectura del electrodo específico. Se puede verificar la presencia de sulfuros colocando una gota la muestra en papel de acetato de plomo previamente humedecido con solución.

#### **2.5.4.- Tiocianatos**

Los tiocianatos pueden transformarse en cianuro bajo las condiciones ácidas de la destilación y aumentar la cantidad original de cianuro. El mecanismo de transformación no esta claro y no se puede controlar ni predecir la cantidad de tiocianato que se descompone. Para evitar la interferencia del tiocianato se utiliza en la destilación el acido clorhídrico en vez del cloruro de magnesio. Si la concentración de tiocianatos es la solución es muy elevada. La interferencia puede disminuirse añadiendo acido sulfúrico y cloruro de magnesio.

#### **2.5.5.- Nitritos**

Los Nitritos pueden formar ácido cianhídrico con los compuestos orgánicos durante la destilación para evitar interferencias de los nitritos se adiciona acido sulfámico antes de la destilación (2 g. a la muestra antes de la destilación).

#### **2.5.6.- Carbonatos**

Una concentración elevada de carbonatos en la solución puede provocar la formación excesiva de gas durante la destilación. El  $\text{CO}_2$  formado reduciría la concentración de NaOH en la solución de absorción dificultando la absorción del cianuro destilado. Se puede verificar la presencia de carbonatos por medio de un análisis de alcalinidad.

#### **2.5.7.- Tiosulfato, sulfatos y otros compuestos de Azufre**

Estos compuestos de azufre pueden reaccionar con el cianuro y formar tiocianatos disminuyendo la cantidad de cianuro medida. Durante la destilación estos

productos desprenden  $\text{SO}_2$ , lo que afecta el color final de la solución y complica el análisis por colorimetría. Para minimizar la interferencia de los compuestos de azufre, se destila una cantidad mínima de la solución y se precipita los sulfuros adicionando una sal de plomo.

#### **2.5.8.- Metales**

La presencia de metales tales como el hierro, el cobalto y el mercurio puede disminuir la cantidad de cianuro presente en la muestra a causa de la formación de complejos muy estables que no pueden ser detectados por las técnicas de análisis habituales.

### III.- DESARROLLO DE LOS CONCEPTOS Y TÉCNICAS

#### 3.1.- Caracterización del Efluente Cianurado

El efluente cianurado para el tratamiento es producto, de la cianuración del mineral con contenido en mayor proporción de: pirita, tetraedrita, galena y en menor proporción de: esfalerita, sulfosales de cobre etc.

En la Tabla 3.1 se detalla la composición del efluente contiene: tiosulfatos, cianuro total y cianuro dad en mayor concentración.

Se ha determinado cualitativamente que no existe ferrocianuro de fierro, la presencia de fierro se encuentra como tiocianato de fierro.

**Tabla 3.1.- El efluente contiene los siguientes complejos de cianuro**

COMPLEJOS DE CIANUROS EN EFLUENTE	
COMPLEJOS SIMPLES RELATIVAMENTE INSOLUBLES	$Zn(CN)_2, CuCN, Ni(CN)_2, AgCN$
COMPLEJOS DEBILES	$Zn(CN)_4^{-2}$
COMPLEJOS MODERADAMENTE FUERTES	$Cu(CN)_2, Cu(CN)_2^{-2}, Ni(CN)_4^{-2}, Ag(CN)_2^{-2}$
COMPLEJOS FUERTES	$Fe(CN)_6^{-4}, Au(CN)_2^{-}$

### **3.2.- Monitoreo y Toma de Muestra**

Existen medidas y recomendaciones para preservar las muestras, en las que se desea determinar la concentración de cianuro, entre las más destacadas se tienen:

- Recolectarse un mínimo de 1 Litro de muestra en recipientes de plástico o vidrio.
- Las muestras deben preservarse por adición NaOH hasta que el pH de la muestra sea mayor o igual a 12 en el momento de la colecta.
- Las muestras deben refrigerarse a 4°C hasta el análisis.
- El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 14 días.
- También deben considerarse las interferencias que pueden causar el ácido sulfhídrico, sulfuros metálicos, etc.

Con el fin de asegurar la calidad de la información disponible y tomar decisiones, son necesarios rigurosos protocolos de muestreo y procedimientos analíticos. Esto exige una estricta planificación y un desempeño excelente por parte del personal entrenado para trabajar con sistemas bien diseñados y bien administrados.

### **3.3.- Desarrollo de la Pruebas Experimentales**

El desarrollo de las pruebas se realizaron a nivel de laboratorio en dos etapas, la primera etapa es la de conocer el comportamiento de cada reactivo teniendo en cuenta la Tabla 3.2 propiedades físicas de los reactivos a utilizar con el efluente a ser tratado y la segunda etapa es el uso de los reactivos y el uso de carbón activado, el tratamiento del efluente con un pH de 8.64 y con un flujo de 2 L/min, utilizando los siguientes equipos, materiales y reactivos:

- Agitador magnético
- Vasos de precipitados de 2 L
- Jeringas hipodérmicas de 1 mL
- Tubo de vidrio (H=50cm y D=5cm aprox.)
- Carbón activado
- Cronometro
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50 %
- NaClO 8 %



**Tabla 3.2.- Propiedades Físicas de 50% Peróxido de Hidrógeno y 8% Hipoclorito de Sodio**

Propiedades	Peróxido de sodio	Hipoclorito De sodio
Peso molecular	34.0	74.5
Composición %	8	50
Estado físico	Incoloro, líquido	Líquido amarillo verdoso.
Olor	Ligeramente picante	Sofocante, parecido al cloro.
Solubilidad en agua	Total	Total
Densidad gr/ml	1.2	1.155

### 3.3.1.- Comportamiento del los reactivos

En la Tabla 3.3, se detalla las concentraciones del efluente cianurado en estudio.

**Tabla 3.3.-Propiedades Físicas de Peróxido de Hidrógeno**

CN <sup>-</sup> Total ppm	CN <sup>-</sup> DAD ppm	Cu ppm	Fe ppm	Pb ppm	Zn ppm	Mn ppm
43.75	38.75	33.32	1.596	0.0645	0.2335	0.069

#### 3.3.1.1 .- Degradación con 50% Peróxido de Hidrógeno

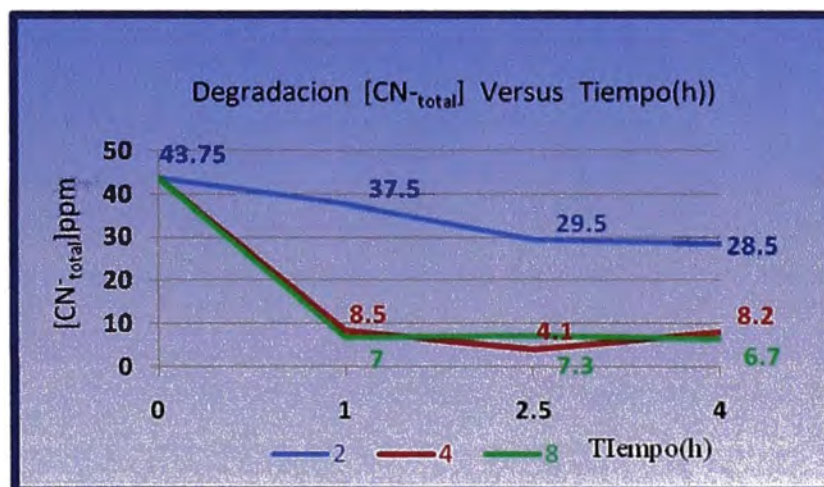
En la Tabla 3.4 y Figura 3.1 se observa los resultados obtenidos utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/kg de CN<sup>-</sup> Total considerando la siguiente reacción:



**Tabla.3.4.- Resultados de Cianuro Total obtenidos usando 50% Peróxido de Hidrógeno**

Kg de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Kg de CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
2	37.5	29.5	28.5	12	12
4	8.5	4.1	8.2	12	12
8	7	7.3	6.7	12	12

**Figura 3.1.- Degradación del CN<sup>-</sup><sub>Total</sub> utilizando 50 % Peróxido de Hidrógeno**

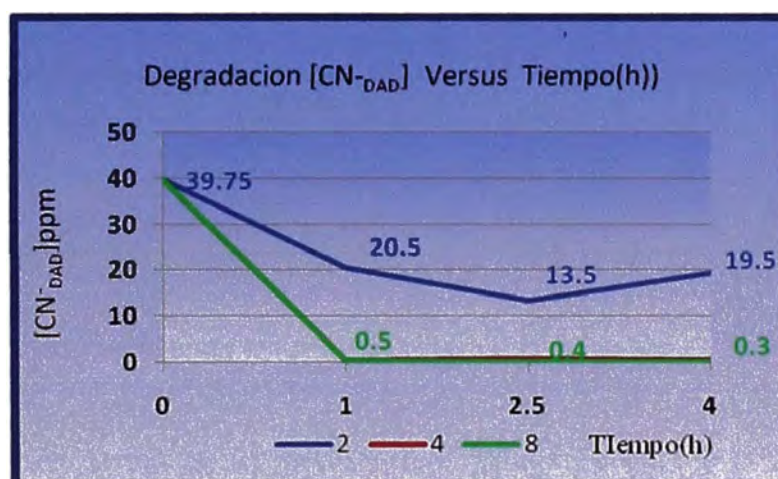


En la Tabla 3.5 y Figura 3.2 se observa los resultados de las concentraciones de cianuro DAD, obtenidos utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/kg de CN<sup>-</sup><sub>Total</sub>.

**Tabla 3.5.-Resultados de Cianuro DAD obtenidos utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno**

Kg de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Kg de CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
2	20.5	13.5	19.5	12	12
4	0.4	0.6	0.5	12	12
8	0.5	0.4	0.3	12	12

**Figura 3.2.-Degradación del CN<sup>-</sup><sub>DAD</sub> utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno**

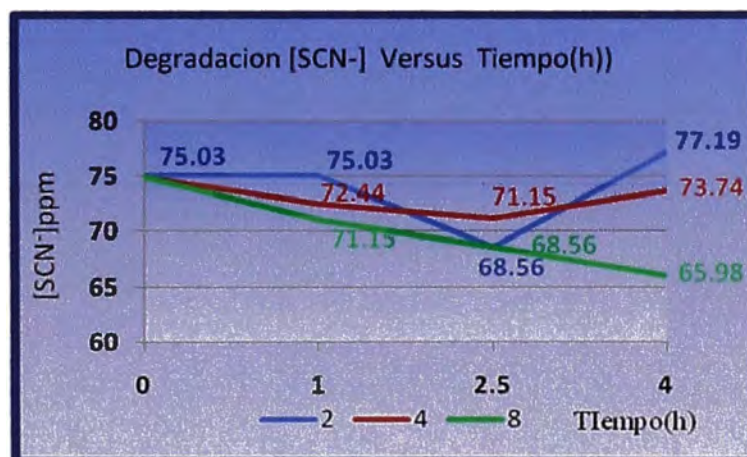


En la Tabla 3.6 y Figura 3.3 se observa los resultados de las concentraciones de tiocianatos, obtenidos utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/kg de CN<sup>-</sup><sub>Total</sub>.

**Tabla 3.6.-Resultados de Tiocianatos obtenidos usando 50% Peróxido de Hidrógeno**

Kg de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Kg de CN <sub>Total</sub> <sup>-</sup>	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
2	75.03	68.56	77.19	12	12
4	72.44	71.15	73.74	12	12
8	71.15	68.56	65.98	12	12

**Figura 3.3.-Degradación del SCN<sup>-</sup> utilizando 50% Peróxido de Hidrógeno**



### 3.3.1.2.- Degradación con 8% Hipoclorito de Sodio

En la Tabla 3.7 y Figura 3.4 se observa los resultados obtenidos utilizando 8% Hipoclorito de Sodio realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de NaOCl/kg de CN<sub>Total</sub><sup>-</sup> considerando la siguiente reacción:

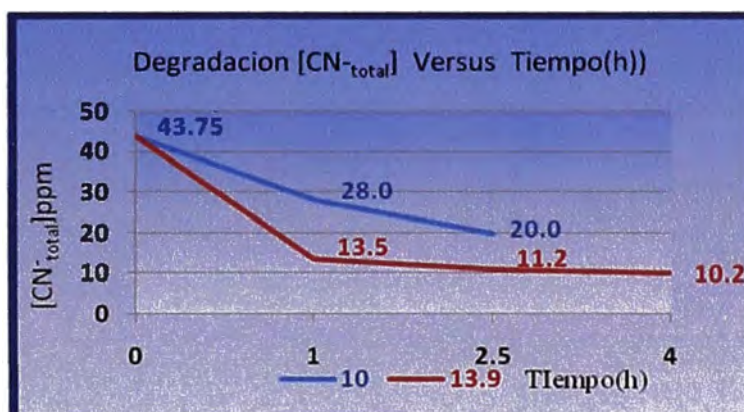




**Tabla 3.7.-Resultados de Cianuro Total obtenidos usando 8%Hipoclorito de Sodio**

Kg de NaOCl Kg de $\text{CN}^-_{\text{total}}$	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
10.0	-	20.0	-	12	12
13.9	13.5	11.2	10.2	12	12

**Figura 3.4.-Degradación del  $\text{CN}^-_{\text{Total}}$  utilizando 8% Hipoclorito de Sodio**

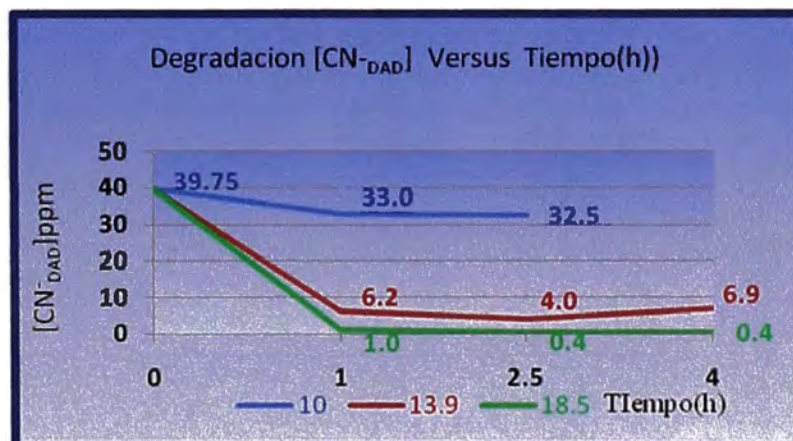


En la Tabla 3.8 y Figura 3.5 se observa los resultados de las concentraciones de cianuro DAD, obtenidos utilizando 8% Hipoclorito de Sodio realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de NaOCl/kg de  $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ .

**Tabla 3.8.-Resultados de Cianuro DAD obtenidos utilizando 8% Hipoclorito de Sodio**

Kg de NaOCl Kg de CN <sub>Total</sub>	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
10.0	33.0	32.5	-	12	12
13.9	6.2	4	6.9	12	12
18.5	1	0.4	0.4	12	12

**Figura 3.5.-Degradación del CN<sub>DAD</sub><sup>-</sup> utilizando 8% Hipoclorito de Sodio**

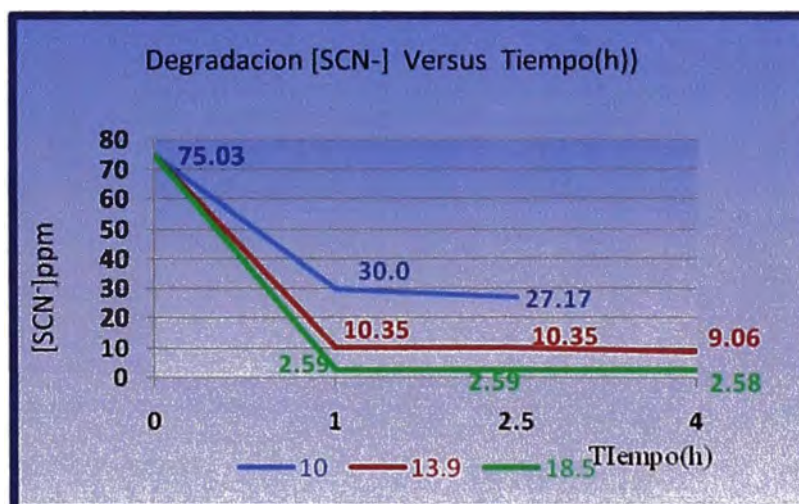


En la Tabla 3.9 y Figura 3.6 se observa los resultados de las concentraciones de tiocianatos, obtenidos utilizando 8% Hipoclorito de Sodio realizando variaciones en el tiempo y la relación de kg de NaOCl/kg de CN<sub>Total</sub><sup>-</sup>

**Tabla 3.9.-Resultados de Tiocianatos obtenidos utilizando 8% Hipoclorito de Sodio**

Kg de NaOCl Kg de CN <sup>-</sup> <sub>total</sub>	Tiempo (h)			pH	
	1	2 ½	4	Inicial	Final
10.0	30.0	27.17	---	12	12
13.9	10.35	10.35	9.06	12	12
18.5	2.59	2.59	2.58	12	12

**Figura 3.6.-Degradación del SCN<sup>-</sup> utilizando 8% Hipoclorito de Sodio**



### 3.3.1.3.- Carbón Activado

El efluente a ser tratado con el uso de carbón activado, utilizando los siguientes equipos, materiales:

- Vasos de precipitados de 2 L
- Tubo de vidrio (H=50cm y D=5cm aprox.)
- Carbón activado
- Cronómetro

**Condiciones:**

Volumen del tanque 2 L

Flujo de ingreso=285 mL/min

Tiempo de residencia en la columna de carbón activado = 18 seg

En la Tabla 3.10 se observa los resultados obtenidos con el uso de carbón activado.



**Tabla 3.10.-Resultados obtenidos con el uso de Carbón Activado**

Muestra	T (min)	CN <sub>DAD</sub> <sup>-</sup> ppm	CN <sub>Total</sub> <sup>-</sup> ppm	SCN <sup>-</sup> ppm	Cu ppm	Fe ppm	Pb ppm	Zn ppm	Mn ppm
CABEZA	0	44.00	53.00	83.67	35.000	2.954	<0.05	0.273	0.110
P-1/2	8	0.65	1.75	0.91	<0.20	2.054	<0.05	0.033	<0.10
P-2/2	16	2.75	5.25	2.18	<0.20	2.348	<0.05	<0.03	<0.10
P-3/2	24	4.15	8.75	14.55	<0.20	2.548	<0.05	<0.03	<0.10
P-4/2	32	4.30	10.00	38.20	<0.20	2.430	<0.05	<0.03	<0.10
P-5/2	40	6.00	13.00	61.85	0.316	2.460	<0.05	<0.03	<0.10
P-6/2	48	6.25	13.50	72.76	0.471	2.454	<0.05	<0.03	<0.10
P-7/2	56	7.15	14.25	76.40	0.949	2.467	<0.05	<0.03	<0.10
P-8/2	64	7.50	14.75	78.82	1.223	2.601	<0.05	0.031	<0.10
P-9/2	72	8.75	15.00	82.46	1.566	2.199	<0.05	<0.03	<0.10
P-10/2	80	10.20	17.50	83.07	2.417	2.626	<0.05	0.042	<0.10

### **3.3.1.4.- Discusión de Resultados**

- En todas las pruebas el balance estequiométrico para la oxidación del ion cianuro para el uso de los oxidantes son cantidades mínimas que en la práctica su uso es de mayor proporción.
- El tratamiento con el 50% de Peróxido de Hidrógeno la concentración de cianuro Total son reducidos considerablemente en comparación con el uso al 8% de Hipoclorito de Sodio, esto se observa en las concentraciones del cianuro Total, por ende también en las concentraciones del cianuro DAD de acuerdo a la Figura 3.1 y Figura 3.4.4.
- El tratamiento con el 50% Peróxido de Hidrógeno la concentración de los tiocianatos no existe oxidación pero con el uso del 8% Hipoclorito de Sodio existe reducción de la concentración de los tiocianatos de acuerdo a la Figura 3.3 y Figura 3.6.
- En el tratamiento con carbón activado se observa en la Tabla 3.10 que a los 8 minutos la reducción de: concentración de cianuro Total, concentración de cianuro DAD, concentración de los tiocianatos y la concentración de los metálicos. Al incrementar el tiempo el carbón activado es saturado y empieza la reacción de oxidación reversible como consecuencia la concentración de cianuro Total, cianuro DAD y de tiocianatos, la concentración de fierro permanecen iguales durante la prueba.

### **3.3.2.- Pruebas y Análisis de Laboratorio**

Se realizaron dos pruebas en el laboratorio para el tratamiento del efluente con un pH de 8.64 y con un flujo de 2 L/min, utilizando los siguientes equipos, materiales y reactivos:

- Agitador magnético
- Vasos de precipitados de 2L
- Jeringas hipodérmicas de 1mL
- Tubo de vidrio (H=50cm y D=5cm aprox.)
- Carbón activado

- Cronómetro
- Aire comprimido
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 50 %
- NaClO 8 %

### 3.3.2.1.- Resultados de Laboratorio

Se realizaron pruebas de acuerdo a la Tabla 3.11, en cada tanque, en la primera prueba no se utilizó la columna de carbón activado.

**Tabla 3.11.-Dosificación de reactivos utilizados en la pruebas 1 y prueba2.**

Tanques	PRUEBA 1		PRUEBA 2	
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50% (mL/min)	NaClO 8% (mL/min)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 50 % (mL/min)	NaClO 8% (mL/min)
TK – 1	1.20	-	1.54	-
TK – 2	0.33	0.17	0.33	0.17
TK – 3	0.33	0.17	0.33	0.17
TK – 4	1.15	0.52	0.8	0.52
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>0.86</b>	<b>3</b>	<b>0.86</b>

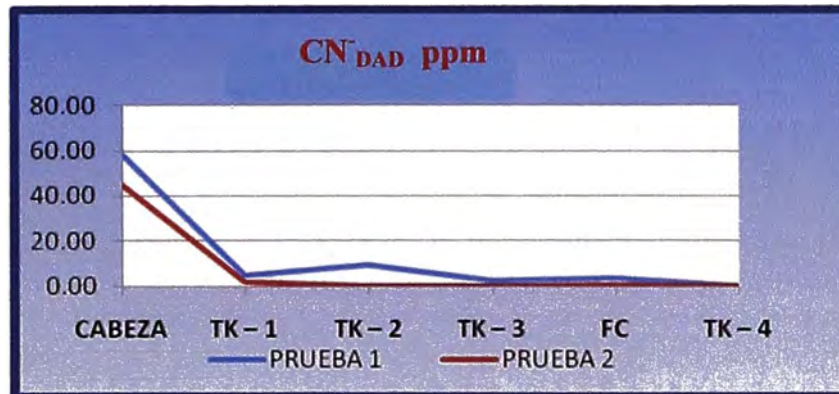
En la Tabla 3.12, se presentan los resultados de las concentraciones de CN<sup>-</sup> DAD, CN<sup>-</sup> total y tiocianatos de las pruebas 1 y 2.

**Tabla 3.12.-Resultados de Análisis pruebas 1 y prueba2.**

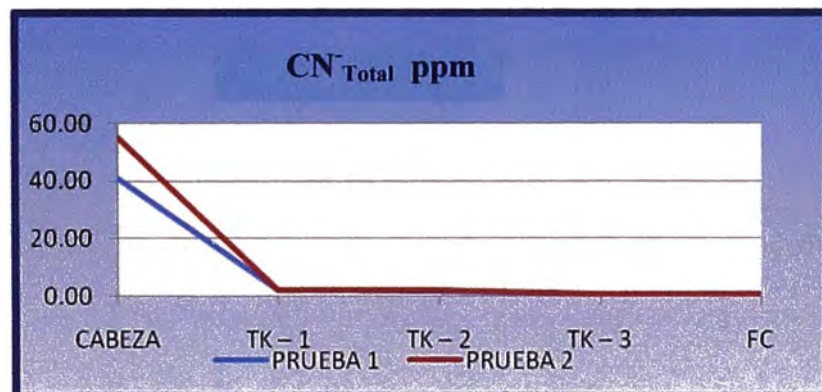
MUESTRA	CN <sup>-</sup> DAD (ppm)		CN <sup>-</sup> total ( ppm)		SCN <sup>-</sup> ( ppm)	
	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA	PRUEBA
	1	2	1	2	1	2
<b>CABEZA</b>	<b>58.50</b>	<b>45.00</b>	41.00	55.00	<b>65.97</b>	<b>63.05</b>
TK – 1	4.85	1.55	2.00	2.10	60.80	58.20
TK – 2	9.65	0.35	1.50	1.70	56.92	50.93
TK – 3	2.30	0.25	0.60	0.50	50.45	49.71
FC	3.25	0.41	0.75	0.50	34.93	0.96
TK – 4	-	0.06	-	0.15	-	1.21

En la Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9 se observa los resultados de las concentraciones de tiocianatos, concentraciones de  $\text{CN}^-_{\text{DAD}}$ ,  $\text{CN}^-_{\text{Total}}$  y tiocianatos de las pruebas 1 y 2.

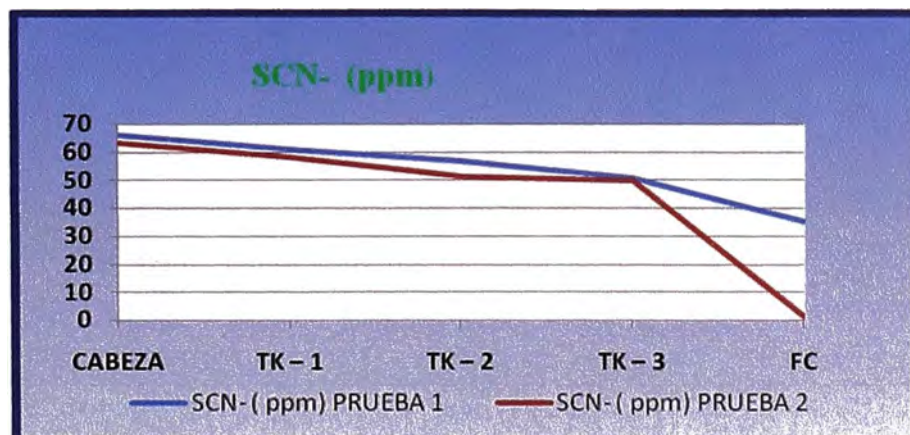
**Figura 3.7.-Comparación de resultados Cianuro DAD.**



**Figura 3.8.-Comparación de resultados Cianuro Total**



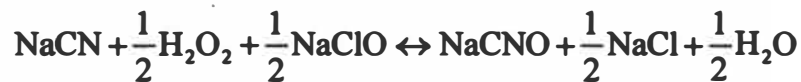
**Figura 3.9.-Comparación de resultados Tiocianatos.**



### 3.3.2.2.- Cinética de la Reacción

En la Tabla 3.13, se observan los resultados óptimos obtenidos en la prueba 2, y en la Figura 3.10, detalla la secuencia de la prueba 2, con estos resultados se evalúa la cinética de la reacción.

#### 3.3.2.2.1.- Cinética de la Reacción



$$-\frac{d[\text{CN}^-_{\text{Total}}]}{dt} = k[\text{CN}^-_{\text{Total}}][\text{H}_2\text{O}_2][\text{NaClO}]$$

Considerando que los oxidantes reaccionan uno a uno con el  $[\text{CN}^-_{\text{Total}}]$

$$[\text{CN}^-_{\text{Total}}] = [\text{H}_2\text{O}_2] = [\text{NaClO}]$$

#### 3.3.2.2.2.- Reacción de Primer Orden

$$-\frac{d[\text{CN}^-_{\text{Total}}]}{dt} = k[\text{CN}^-_{\text{Total}}]$$

$$-\int_{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_0}^{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_t} \frac{d[\text{CN}^-_{\text{Total}}]}{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]} = k \int_0^t dt$$

$$-\ln \left[ \frac{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_t}{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_0} \right] = kt$$

#### 3.3.2.2.3.- Reacción de Segundo Orden

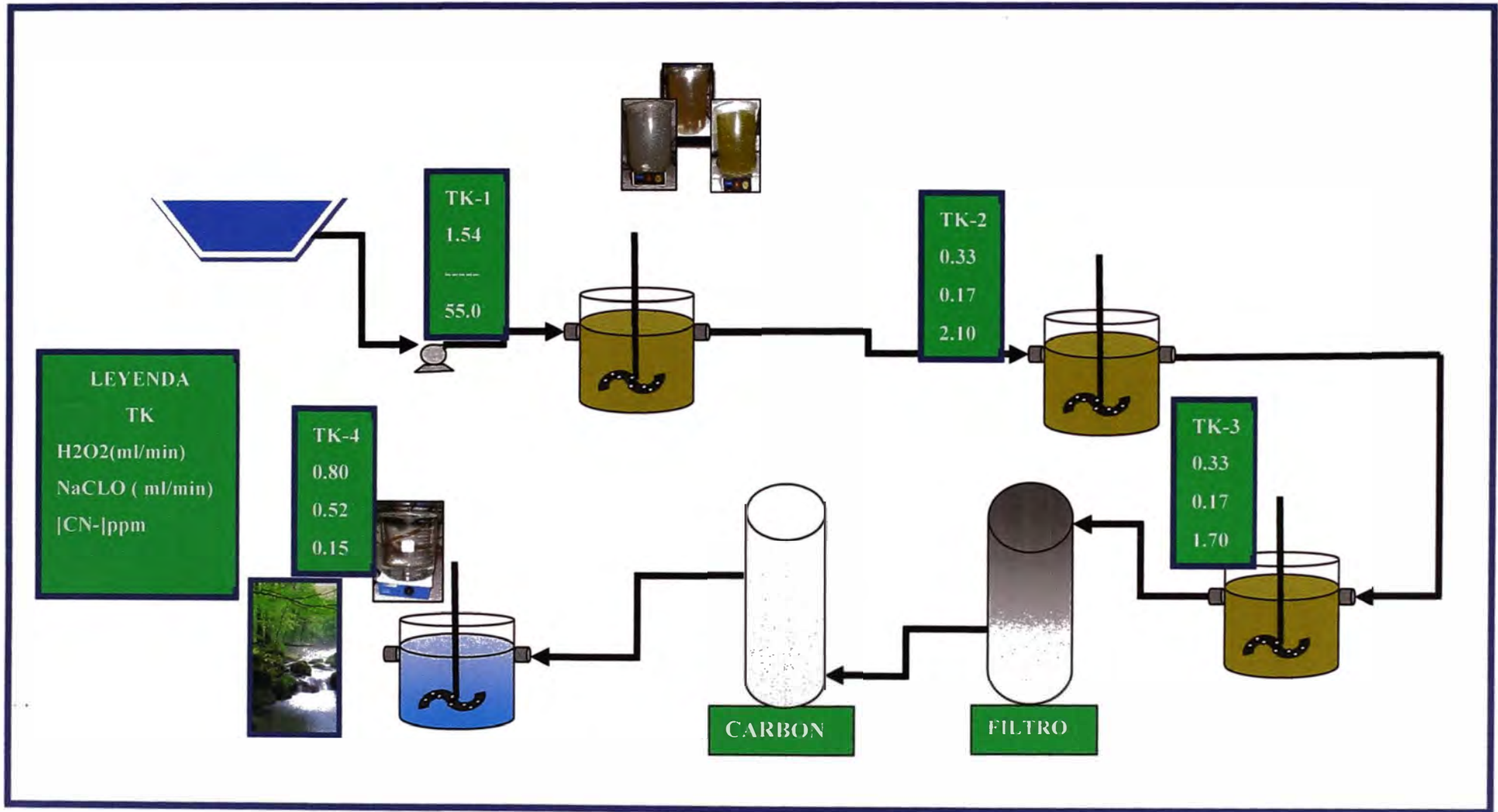
$$-\frac{d[\text{CN}^-_{\text{Total}}]}{dt} = k[\text{CN}^-_{\text{Total}}]^2$$

$$-\int_{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_0}^{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_t} \frac{d[\text{CN}^-_{\text{Total}}]}{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]^2} = k \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_t} = kt + \frac{1}{[\text{CN}^-_{\text{Total}}]_0}$$



**Figura 3.10.-Tratamiento de Efluente Cianurado**



### 3.3.2.4.- Reacción de Tercer Orden

$$-\frac{d[\text{CN}_{\text{Total}}^-]}{dt} = k[\text{CN}_{\text{Total}}^-]^3$$

$$-\int_{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]_0}^{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]} \frac{d[\text{CN}_{\text{Total}}^-]}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]^3} = k \int_0^t dt$$

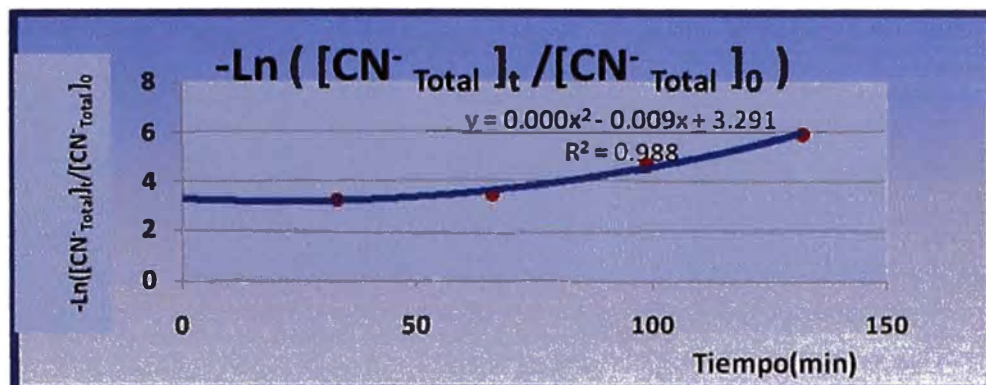
$$\frac{1}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]^2} = kt + \frac{1}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]_0^2}$$

Reemplazando en las ecuaciones la cinética, en la Tabla 3.14, se realizan los cálculos de cinética por tipo de reacción, la Figura 3.11, se observan la reacción de primer orden, la Figura 3.12, se observa la reacción de segundo orden y la tercera Figura 3.13, se observa la reacción de tercer orden.

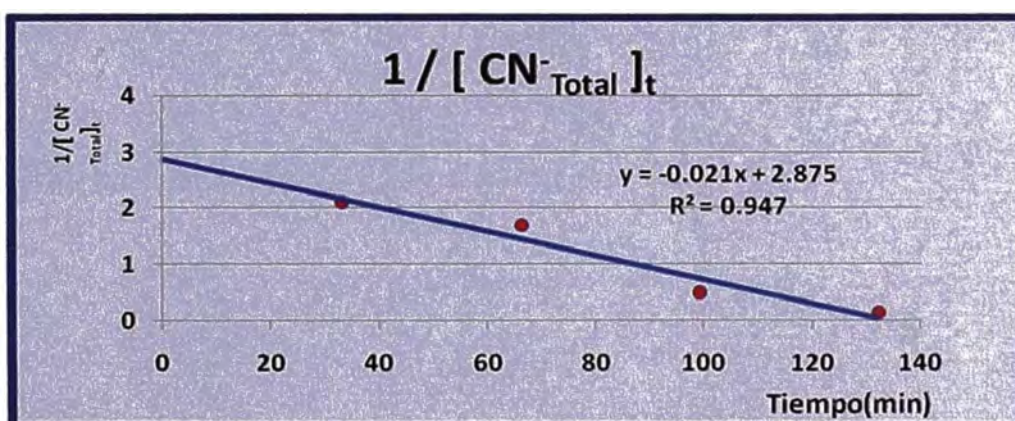
**Tabla 3.14.-Cálculos de la cinética de reacción por tipo de reacción.**

Tiempo (min)	$\text{CN}_{\text{Total}}^-$	$-\text{Ln} \left( \frac{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]_0} \right)$	$\frac{1}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]_t}$	$\frac{1}{[\text{CN}_{\text{Total}}^-]_t^2}$
0	55			
33	2.1	3.265	2.1	2.1
66	1.7	3.477	1.7	1.7
99	0.5	4.7	0.5	0.5
132	0.15	5.904	0.15	0.15

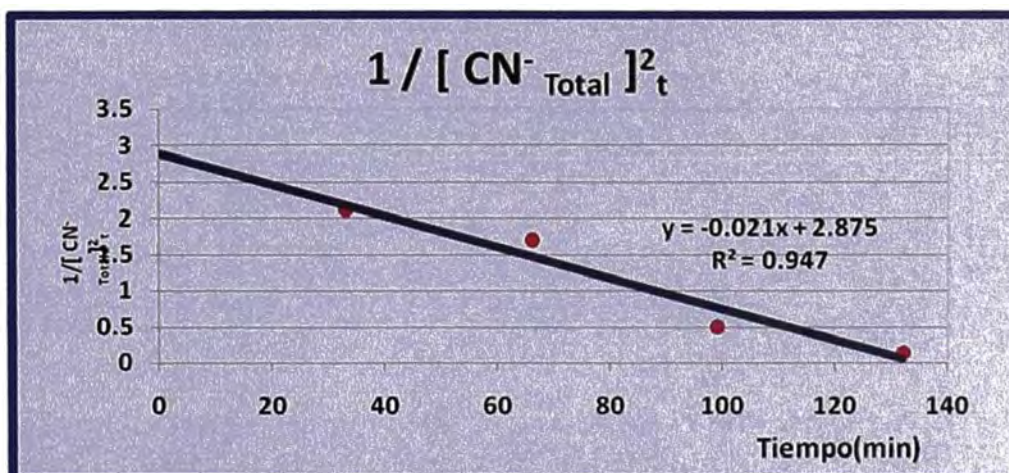
**Figura 3.11.-Reacción de Primer Orden**



**Figura 3.12.-Reacción de Segundo Orden**



**Figura 3.13.-Reacción de Tercer Orden**







**Tabla 3.13.-Resultados de análisis de la Prueba 2.**

Descripción de Muestra	<b>CN<sup>-</sup> DAD</b> ppm	CN <sup>-</sup> Total ppm	<b>SCN<sup>-</sup></b> ppm	Fe ppm	Cu ppm	Mn Ppm	Zn ppm	Pb ppm	Ag ppm	Au ppm	Cl- ppm
<b>CABEZA</b>	<b>45.00</b>	<b>55.00</b>	<b>63.05</b>	<b>2.36</b>	<b>38.99</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.07</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.25</b>	<b>0.16</b>	<b>ND</b>
<b>TK-1</b>	<b>1.55</b>	<b>2.10</b>	<b>58.20</b>	<b>0.12</b>	<b>1.99</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.03</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.07</b>	<b>0.16</b>	<b>0.2</b>
<b>TK-2</b>	<b>0.35</b>	<b>1.70</b>	<b>50.93</b>	<b>0.38</b>	<b>0.88</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>ND</b>	<b>0.15</b>	<b>0.2</b>
<b>TK-3</b>	<b>0.25</b>	<b>0.50</b>	<b>49.71</b>	<b>0.26</b>	<b>10.76</b>	<b>0.24</b>	<b>0.11</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.13</b>	<b>0.16</b>	<b>ND</b>
<b>FC</b>	<b>0.41</b>	<b>0.50</b>	<b>0.96</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>2.37</b>	<b>0.35</b>	<b>0.72</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0.4</b>
<b>TK-4</b>	<b>0.06</b>	<b>0.15</b>	<b>1.21</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>0.94</b>	<b>0.25</b>	<b>0.23</b>	<b>&lt;0.10</b>	<b>ND</b>	<b>ND</b>	<b>0.3</b>

Nota. ND, No detectable  
**FC, filtro carbón**

### **3.3.2.3.- Discusión de Resultados**

- De las dos pruebas realizadas existe diferencia en los resultados debido al incremento de consumo del 50% Peróxido de Hidrógeno en el primer tanque y en el cuarto tanque se reduce el consumo del mismo de tal manera que permanezca constante el consumo total de la primera prueba. Se observa en la Figura 3.7, que el primer tanque los iones de cianuro DAD de la prueba 1 son reducidos en la prueba 2.
- La cinética de reacción de oxidación para el tratamiento del efluente cianurado en estudio es de primer orden, en la Figura 3.11, es el mejor factor de correlación.
- En la Tabla 3.13, el uso de la columna de carbón activado en la prueba 2, se logra reducir las concentraciones de los iones de cianuro, tiocianatos, y los iones metálicos. Porque el carbón activado actúa como catalizador de las reacciones.

### 3.4.- Costo de Tratamiento

Se realizaron cálculos teóricos y práctica para tratar  $1\text{m}^3/\text{h}$  de efluente cianurado de acuerdo a las tablas 3.15 y 3.16.

#### 3.4.1.- Cálculo Teórico

Cálculo para tratar  $1\text{m}^3/\text{h}$  de efluente cianurado de un contenido de 100 ppm de cianuro sodio.

**Tabla 3.15.-Cálculo teórico**

Reactivo	Relación	Conc. %	kg/m <sup>3</sup> de solución	US\$/kg	\$/m <sup>3</sup>
Peróxido de Hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /NaCN	50%	0.139	0.864	0.12
Hipoclorito de Sodio	NaClO/NaCN	8%	1.901	0.350	0.67

#### 3.4.2.- Cálculo Práctico

Cálculo para tratar  $1\text{m}^3/\text{h}$  de efluente cianurado con un contenido de 100 ppm de cianuro de sodio.

**Tabla 3.16.-Cálculo práctico**

Reactivo	Relación	Conc. %	kg/m <sup>3</sup> de solución	US\$/kg	\$/m <sup>3</sup>
Peróxido de Hidrógeno	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /NaCN	50%	1.800	0.864	1.56
Hipoclorito de Sodio	NaClO/NaCN	8%	0.497	0.350	0.17
				<b>Total</b>	<b>1.73</b>

### 3.5.- Comparación de Resultados Comparados con el Limite Máximo Permisible (L.M.P.)

En la Tabla 3.17, se observan la comparación de análisis del efluente cianurado con los Límites Máximos Permisibles emitido por el Ministerio de Energía y Minas y los Estándares de Calidad de Agua.

En el Anexo 5 se observa la comparación de Límites Máximos Permisibles internacionales.

**Tabla 3.17.-Comparación de resultados del efluente cianurado con los Límites Máximos Permisibles y Estándares de Calidad de Agua.**

Elemento	Unid.	L.M.P	E.C.A	E.I	E.F
Aluminio	mg/l.	--	5	0.13	--
Arsénico	mg/l.	1	0.1	0.05	--
Cadmio	mg/l.	--	0.01	0.0006	--
Cobre	mg/l.	1	0.5	43.36	0.94
Cromo Total	mg/l.	--	1.0	0.003	--
Hierro	mg/l.	2	1	2.02	<0.10
Manganeso	mg/l.	--	0.2	0.02	0.25
Plata	mg/l.	--	0.05	0.28	<0.10
Plomo	mg/l.	0.4	0.05	0.0014	<0.10
Selenio	mg/l.	--	0.05	0.53	--
CN TOTAL	mg/l.	1	--	53.03	0.15
CN DAD	mg/l.	0.2	0.1	45.22	0.06

**Fuente:** L.M.P. Límites Máximos Permisibles de emisión para Unidades Mineras Metalúrgicas. Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13 ene.1996).

E.C.A. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua. Decreto Supremo N°002-2008-MINAN (Categoría 3 :Riego de vegetales y bebidas de animales).

E.I. y E.F. Resultados de análisis del efluentes cianurado antes y después del tratamiento de oxidación.

-- No definido.

#### **IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- 4.1.- De las pruebas realizadas se concluye que de la prueba 2, se obtuvieron resultados óptimos, llegando a disminuir la concentración del ion cianuro total de a 55.00 ppm a 0.15 ppm, la concentración del ion cianuro DAD de 45.0 ppm a 0.05 ppm y la concentración de los iones tiocianatos de 63.05 ppm a 1.21 ppm, utilizando 3 mL/min al 50% de Peróxido de Hidrógeno y 0.86 mL/min al 8% de Hipoclorito de Sodio.
- 4.2.- Para evitar que el carbón activado se sature rápidamente por la presencia de hidróxidos es la de utilizar un filtro antes del ingreso a la columna del carbón activado, para reactivar el carbón activado se utilizan soluciones ácidas con la finalidad de retirar los hidróxidos de los metales precipitados y los cianatos.
- 4.3.- El costo de tratamiento de un efluente cianuro con contenido de aprox. 100 ppm de NaCN es de 1.73 \$/m<sup>3</sup>.
- 4.4.- En la Tabla 3.17, se observa los resultados comparados con los límites máximos permisibles, de los resultados de la prueba 2 se logra que el efluente cianurado se encuentren debajo de los límites máximos permisibles de emisión para Unidades Mineras Metalúrgicas. Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13. ene.1996).
- A partir de mes de abril del 2010, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), es el organismo quien evalúa y autoriza los vertimientos, los estándares de calidad de agua se evalúa de 50 a 100 metros aguas abajo de la mezcla del efluente y el cuerpo receptor, el efluente cianurado en estudio es clasificado en la categoría 3: Riesgo de vegetales y bebidas de animales.



## **V.- BIBLIOGRAFIA**

- 1. Sociedad Nacional de MINERIA PETROLEO Y ENERGIA**  
[http://www.snmpe.org.pe/estudios\\_economicos/EST\\_EXTRANET/EST\\_Graficos/EST\\_Gra\\_Principal.asp?x=698548&parCodIndicador=3&parCodRubro=2](http://www.snmpe.org.pe/estudios_economicos/EST_EXTRANET/EST_Graficos/EST_Gra_Principal.asp?x=698548&parCodIndicador=3&parCodRubro=2)  
. Consultada el 13 de octubre 2009
- 2. INTERNATIONAL CYANIDE MANAGEMENT INSTITUTE. The Internacional Cyanide Management Code. Septiembre 2006**  
[www.cyanidecode.org](http://www.cyanidecode.org)
- 3. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Resolución Ministerial N° 315-96-EM/VMM.”.Edición en Internet.**  
<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/guias/rm011-96.pdf> Consultada el 13 de octubre 2009
- 4. Logsdon M., Hageslstein K. and Mudde F. El manejo del Cianuro en la Extracción del Oro, Traducido de la publicación en Ingles titulada The Management of Cyanide in Gold Extraction**
- 5. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro”.Edición en Internet.**  
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/cianuro.pdf>  
Consultada el 13 de octubre 2009.
- 6. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Curso de Especialización en Cierre de Mina y Pasivos ambientales”. Proyecto PERCAN -2006. Edición en Internet**  
[http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso\\_cierreminas/01\\_Gerencial/11\\_Cianuro/GerCianuro\\_Presentación.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso_cierreminas/01_Gerencial/11_Cianuro/GerCianuro_Presentación.pdf)  
Consultada el 13 de octubre 2009
- 7. Vidarte J. Manejo Responsable del Cianuro. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Curso de Especialización en Cierre de Mina y Pasivos ambientales”. Proyecto PERCAN-2006.Edición en Internet**  
[http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso\\_cierreminas/02\\_Técnico/11\\_Cianuro/TecCian\\_Presentación.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/dgaam/publicaciones/curso_cierreminas/02_Técnico/11_Cianuro/TecCian_Presentación.pdf)  
Consultada el 13 de octubre 2009

8. Bonelli J. Ministerio de Energía y Minas. Manejo Ambiental en Plantas de Cianuración. Dic. 2002.
9. Da Costa A Degradacao de Cianetos por Hipoclorito de Sodio. Centro de Tecnología Mineral (CETEM).Rio de Janeiro. Julio 1992.
10. Adams M.D. The chemical behaviour of cyanide in the extraction of gold. 1. Kinetics of cyanide loss in the presence and absence of activated carbon. Institute Minerals Metal. Vol. 90N°2 Feb.1990 Pág.37-44.
11. Gavidia A., Meza L. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del Municipio de Segovia, Atioquia y en la Planta de beneficio de la Empresa Mineros Nacionales, Municipio de Marmato, Caldas. Dyna, Año 73, Nro. 149, Pág. 31-44. Medellin. Julio 2006.
12. Berastein A. Consorcio Minero Horizonte S.A. Destrucción del Cianuro en Efluentes Mineros.
13. James S. Scout A. Overview of Cyanide Treatment Methods for Gold Mill Effluents Conference on Cyanide and The Environmet.
14. De la Torre E., Guevara A., Pilco Y. Alternative methods for the treatment of cyanide effluents by air and activated carbon, II International Workshop on Process Hydrometallurgy,May.14-16,2008.
15. Devuyt E.A., Conard B.R. and Hudson W. Commercial Operation of INCO'S SO<sub>2</sub>/Air Cyanide Removal Process. Conference on Cyanide and The Environment.
16. U.S Environmental Protection Agency. Cyanide Detoxification Sulfur Dioxide/Air Process. August 1993.
17. Knorre H. and Griffinths A., Degussa AG. Cyanide Detoxification with Hydrogen Peroxide Using the DEGUSSA process
18. C. Howell and D. Christophersen. Three-Phase Mining Effluente Treatment Plant to Meet Stringent Standards. E&MJ ENGINEERING AND MINING JOURNAL. April 2009. Pág. 47 a 50
19. Norma Mexicana. Análisis de agua –Determinación de Cianuros Totales en aguas Naturales – Métodos de Prueba. 1984.



20. Nava F., Rodriguez E., Uribe A., Perez R. Análisis químico de cianuro en el proceso de Cianuración: revisión de los principales métodos. Revista Metalúrgica 43. Enero 2007. Pág. 20-27.
21. De Vried F.W. and Mature O.B. Modified Free Cyanide –Field Test Electrode Method Without Distillation. Conference on Cyanide and The Environment. Diciembre 1984
22. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Ley GENERAL DEL AMBIENTE”(Ley28611)”  
<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/publicaciones/compendio99/128611.pdf>
23. MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS “Decreto Supremo N°002-2008-MINAM. Aprueban los estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua”  
[http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/DS\\_002\\_2008.pdf](http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/DS_002_2008.pdf)
24. Ibarra Angel, Gonzales Luis y Erzinger Florian. La Minería Aurífera en el Salvador. Unidad Ecológica Salvadoreña.

## **VI.- APENDICE**

### **ANEXO 1**

#### **CONGRESO DE LA REPUBLICA**

#### **Ley General del Ambiente**

#### **LEY N° 28611**

**EL PRESIDENTE DEL CONGRESO DE LA REPUBLICA**

**POR CUANTO:**

**EL CONGRESO DE LA REPÚBLICA;**

**Ha dado la Ley siguiente:**

#### **LEY GENERAL DEL AMBIENTE**

##### **TITULO PRELIMINAR**

##### **DERECHOS Y PRINCIPIOS**

##### **Artículo I.- Del derecho y deber fundamental**

Toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país.

**Fuente: Ley general del Ambiente<sup>(22)</sup> ley N° 28611. 2005.**

## ANEXO 2

## CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES DE TALLO BAJO Y TALLO ALTO		
PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR
<b>Fisicoquímicos</b>		
Bicarbonatos	mg/L	370
Calcio	mg/L	200
Carbonatos	mg/L	5
Cloruros	mg/L	100-700
Conductividad	(uS/cm)	<2 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	15
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40
Fluoruros	mg/L	1
Fosfatos - P	mg/L	1
Nitratos (NO3-N)	mg/L	10
Nitritos (NO2-N)	mg/L	0,06
Oxígeno Disuelto	mg/L	> =4
pH	Unidad de pH	6,5 - 8,5
Sodio	mg/L	200
Sulfatos	mg/L	300
Sulfuros	mg/L	0,05
<b>Inorgánicos</b>		
Aluminio	mg/L	5
Artenico	mg/L	0,05
Bario total	mg/L	0,7
Boro	mg/L	0,5-6
Cadmio	mg/L	0,005
Cianuro Wad	mg/L	0,1
Cobalto	mg/L	0,05
Cobre	mg/L	0,2
Cromo (6+)	mg/L	0,1
Hierro	mg/L	1
Litio	mg/L	2,5
Magnesio	mg/L	150
Manganeso	mg/L	0,2
Mercurio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,2
Plata	mg/L	0,05
Plomo	mg/L	0,05
Selenio	mg/L	0,05
Zinc	mg/L	2
<b>Orgánicos</b>		
Aceites y Grasas	mg/L	1
Fenoles	mg/L	0,001
S.A.A.M. (detergentes)	mg/L	1
<b>Plaguicidas</b>		
Aldicarb	ug/L	1
Aldrin (CAS 309-00-2)	ug/L	0,004
Clordano (CAS 57-74-9)	ug/L	0,3
DDT	ug/L	0,001
Dieldrin (N° CAS 72-20-8)	ug/L	0,7
Endrin	ug/L	0,004

## CATEGORÍA 3: RIEGO DE VEGETALES Y BEBIDAS DE ANIMALES

PARÁMETROS PARA RIEGO DE VEGETALES			
PARÁMETROS	Unidad	Vegetales Talle Bajo	Vegetales Talle Alto
		Valor	Valor
<b>Biológicos</b>			
Coliformes Termotolerantes	UFP/100mL	1000	2000(3)
Coliformes Totales	UFP/100mL	5000	5000(3)
Enterococos	UFP/100mL	20	100
<i>Escherichia coli</i>	UFP/100mL	100	100
Huevos de Helminchos	huevos/litro	<1	<1(1)
<i>Salmonella</i> sp.		Ausente	Ausente
<i>Vibrio cholerae</i>		Ausente	Ausente
<b>PARÁMETROS PARA BEBIDAS DE ANIMALES</b>			
PARÁMETROS	UNIDAD	VALOR	
<b>Fisicoquímicos</b>			
Conductividad Eléctrica	(µS/cm)	<=5000	
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	<=15	
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	40	
Fluoruro	mg/L	2	
Nitrato (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	50	
Nitrito (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	1	
Oxígeno Disuelto	mg/L	>5	
pH	Unidades de pH	6,5 - 8,4	
Sulfatos	mg/L	500	
Sulfuros	mg/L	0,05	
<b>Inorgánicos</b>			
Aluminio	mg/L	5	
Arsénico	mg/L	0,1	
Bario	mg/L	0,1	
Boro	mg/L	5	
Cadmio	mg/L	0,01	
Cianuro WAD	mg/L	0,1	
Cobalto	mg/L	1	
Cobre	mg/L	0,5	
Cromo (6+)	mg/L	1	
Hierro	mg/L	1	
Litio	mg/L	2,5	
Magnesio	mg/L	150	
Manganeso	mg/L	0,2	
Mercurio	mg/L	0,001	
Níquel	mg/L	0,2	
Plata	mg/L	0,05	
Plomo	mg/L	0,05	
Selenio	mg/L	0,05	
Zinc	mg/L	24	
<b>Orgánicos</b>			
Acidos y Grasas	mg/L	1	
Fenoles	mg/L	0,001	
S.A.A.M. (detergentes)	mg/L	1	
<b>Fitofármacos</b>			
Aldicarb	ug/L	1	
Aldrin (CAS 309-00-2)	ug/L	0,03	
Clordano (CAS 57-74-9)	ug/L	0,3	
DDT	ug/L	1	
Dieldrin (N° CAS 72-20-8)	ug/L	0,7	
Endosulfán	ug/L	0,02	

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS "Decreto Supremo N°002-2008-MINAM. Aprueban los estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua<sup>(23)</sup>

## ANEXO 3

NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA  
LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS

PARAMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
ph	Mayor que 6 y Menor que 9	Mayor que 6 y Menor que 9
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25
Plomo (mg/l)	0.4	0.2
Cobre (mg/l)	1.0	0.3
Zinc (mg/l)	3.0	1.0
Fierro (mg/l)	2.0	1.0
Arsénico (mg/l)	1.0	0.5
Cianuro total (mg/l) *	1.0	1.0

\* CIANURO TOTAL, equivalente a 0.1 mg/l de Cianuro Libre y 0.2 mg/l de Cianuro fácilmente disociable en ácido.

## FRECUENCIA DE MUESTREO Y PRESENTACION DE REPORTE

VOLUMEN TOTAL DE EFLUENTE	FRECUENCIA DE MUESTREO	FRECUENCIA DE PRESENTACIÓN DE REPORTE
Mayor que 300 m <sup>3</sup> /día	Semanal	Trimestral (1) y
50 a 300 m <sup>3</sup> /día	Trimestral	Semestral (2)
Menor que 50 m <sup>3</sup> /día	Semestral	Anual (3)

**Nota :** (1) Ultimo día hábil de los meses de marzo, junio, setiembre y diciembre

(2) Ultimo día hábil de los meses de junio y diciembre

(3) Ultimo día hábil del mes de junio

Los reportes del mes de junio estarán contenidos en el Anexo 1 del Decreto Supremo N° 016-93-EM.

## FRECUENCIA DE ANALISIS QUIMICO

PARAMETRO	EFLUENTE MAYOR QUE 300 m <sup>3</sup> /día	EFLUENTE DE 50 A 300 m <sup>3</sup> /día	EFLUENTE MENOR QUE 50 m <sup>3</sup> /día
PH	Semanal	Trimestral	Semestral
Sólidos suspendidos	Semanal	Trimestral	Semestral
Pb, Cu, Zn, Fe, As	Mensual	Trimestral	Semestral
CN total	Semestral	Quincenal	Trimestral

**Fuente:** L.M.P Limites Máximos Permisibles de emisión para Unidades Mineras Metalúrgicas<sup>(3)</sup>. Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13. ene.1996)

## ANEXO 4

### IMPACTOS EN LA SALUD HUMANA

Principales propiedades e impactos de algunos elementos importantes en la salud humana como cianuro, arsénico, mercurio y metales pesados.

#### Cianuro

El cianuro es una sustancia química extremadamente tóxica (toxicidad aguda: 1-2 mg/kg de peso (oral), letal después de unos minutos), potencialmente letal, que actúa como tóxico a través de la inhibición de ciertas proteínas mitocondriales, bloqueando el Ciclo de Krebs, sistema central del proceso de respiración celular.

Si bien su efectividad a bajas concentraciones es fulminante, si una persona ingiere cianuro, el individuo muere bajo dolorosos espasmos y convulsiones que pueden tardar entre 10 segundos a unos minutos.

Las dosis letales para humanos son, en caso de que sean ingeridas, de 1 a 3 mg/kg del peso corporal, en caso de ser asimilados, de 100-300 mg/kg, y de 100-300 ppm si son aspirados. Esto significa que una porción de cianuro unos cuatro granos de arroz sería suficiente para matar a un adulto. La exposición a largo plazo a una dosis sublethal podría ocasionar dolores de cabeza, pérdida del apetito, debilidad, náuseas, vértigo e irritación de los ojos y del sistema respiratorio. Hay que tener mucho cuidado al manejar el cianuro, para efectos de prevenir el contacto dañino de parte de los trabajadores. En el caso de la intoxicación super-aguda se produce un síntoma inmediato en 2 ó 3 minutos. La hipoxia de las células bulbares de los centros respiratorio, cardiaco y vasopresor genera parálisis respiratoria, rigidez muscular, convulsiones, midriasis, coma y finalmente la muerte. En el caso de la intoxicación aguda, si esa es leve, los síntomas se producen a dosis bajas de ácido cianhídrico y consisten en cefaleas, vértigos, debilidad muscular, ángor, dificultad respiratoria, e incluso



**Tóxico**



**Inflamable**



**Peligros para el medio Ambiente**

convulsiones. El caso de una intoxicación aguda grave es muy similar, con cefaleas, vértigos, vómitos, dolor precordial, palpitaciones, disnea con respiración lenta e irregular, pérdida de conciencia, convulsiones, midriasis y enfriamiento progresivo. Generalmente el fallecimiento acaece entre 30 y 50 minutos tras la ingestión o inhalación, por parálisis respiratoria. Si el paciente sobrevive, la recuperación es rápida, aunque pueden quedar secuelas, como parálisis o Parkinson. La intoxicación crónica consiste en un cuadro de cefaleas, faringitis, sialorrea, alteraciones de la marcha, problemas cutáneos, pérdida de apetito y adelgazamiento.

El cianuro de hidrógeno, bajo el nombre de Zyklon B, se utilizó como agente genocida por los alemanes durante la Segunda Guerra Mundial. También es conocido por su denominación militar AN (para el cianuro de hidrógeno) y CK (para el cloruro de cianógeno). Para las plantas y los animales, el cianuro es extremadamente tóxico. Derrames de cianuro pueden impactar la fotosíntesis y las capacidades reproductivas de las plantas y matar la vegetación. En cuanto a los animales, el cianuro puede ser absorbido a través de la piel, ingerido o aspirado. Concentraciones en el aire de 200 partes por millón (ppm) de cianuro de hidrógeno son letales para los animales, mientras que concentraciones tan bajas como 0.1 miligramos por litro (mg/l) son letales para especies acuáticas sensibles. Concentraciones sub letales también afectan los sistemas reproductivos, tanto de los animales como de las plantas.

### **El Arsénico**

El arsénico y sus compuestos son extremadamente tóxicos (toxicidad aguda: 1.4- 2.4 mg/kg de peso (oral), letal después de unas horas), especialmente el arsénico inorgánico. El arsénico se encuentra en forma nativa y, principalmente, en forma de sulfuro en una gran variedad de minerales que contienen cobre, plomo, hierro (arsenopirita o mispickel), níquel, cobalto y otros metales. La presencia de arsénico muy tóxico en el agua potable puede ser el resultado de la disolución del



**Muy  
Tóxico**



mineral presente en el suelo por donde fluye el agua antes de su captación para uso humano, por contaminación industrial o por pesticidas.

La ingestión de pequeñas cantidades de arsénico puede causar efectos crónicos por su acumulación en el organismo. Envenenamientos graves pueden ocurrir cuando la cantidad tomada es de más de 100 mg. Se ha atribuido al arsénico propiedades cancerígenas. En el medieval se utilizaba arsénico para matar clandestinamente a gente enemiga con su comida o sus tragos.



Peligros para  
el medio  
Ambiente

Por la exposición a corto plazo, el arsénico es irritante para los ojos, la piel y el aparato respiratorio. Puede ocasionar efectos sobre el aparato gastrointestinal, sobre el sistema cardiovascular, sobre el sistema nervioso central y sobre los riñones, causando gastroenteritis, pérdida de fluidos y electrolitos, desórdenes cardíacos, choque, convulsiones y disfunción renal.

La exposición a concentraciones superiores puede llevar a la muerte. Los efectos pueden ser retardados.

En el caso de la exposición a largo plazo. Contactos repetidos o prolongados del arsénico con la piel pueden causar dermatitis. La sustancia puede tener efecto sobre las membranas mucosas, sobre la piel, sobre el sistema nervioso periférico, sobre el hígado y sobre la médula ósea, causando problemas de la pigmentación, hiperqueratosis, perforación del tabique nasal, neuropatía, daños hepáticos, anemia. Esta sustancia es cancerígena para el hombre. Pruebas sobre animales indican la posibilidad que esta sustancia pueda causar problemas en la reproducción y el desarrollo humano (Fuente OMS)

### **Mercurio**

El mercurio es altamente tóxico, afectando los sistemas nerviosos, el sistema gastro intestinal y renal, produciendo temblores, pérdida de equilibrio corporal, ceguera parcial y otros efectos en caso de intoxicación aguda. La exposición fetal produce aborto espontáneo y malformación congénita. Los efectos inmediatos que puede



Muy Tóxico



producir por inhalación son: escozor de garganta, dolor de cabeza, náuseas, pérdida del apetito y debilidad muscular. Por contacto con ojos y piel se pueden provocar enrojecimiento y irritación y por ingestión causa vómitos, diarrea, pérdida del apetito y debilidad muscular.

El mercurio es bio-acumulable y su vía principal de exposición es por la cadena alimenticia. La exposición prolongada o repetida puede provocar lesiones en riñones, cerebro y sistema nervioso. La ingestión prolongada de alimentos contaminados con mercurio provoca la enfermedad conocida como de Minamata. En algunos casos puede provocar pérdida de la vista. El mercurio se alea fácilmente con muchos otros metales como el oro o la plata produciendo amalgamas, salvo con el hierro y existe en la naturaleza naturalmente en diferentes tipos de minerales (Sulfuro de mercurio o cinabrio (HgS)).



**Peligros  
para  
el medio  
ambiente**

### **Metales Pesados**

La gran mayoría de los metales pesados son tóxicos y eco-tóxicos en concentraciones elevadas, aun que unos entre ellos, para el ser humano, también cumplen la función de oligoelementos o elementos trazas, quiere decir que son necesarios para la salud humana en concentraciones muy bajas. La gran mayoría de ellos son cancerígenos (provocan el cáncer) o teratígenos (provocan mutaciones genéticas).

Un hecho fundamental de entender en los metales pesados es el hecho que son residuales o con otra palabra bio-acumulantes. Eso significa que se desplazan a lo largo de la cadena alimenticia.

Es decir que si el agua tiene un determinado metal este puede pasar a las plantas, después si un animal consume esta planta, se encontrará el metal en el tejido animal, si después el hombre consume carne de este animal o un derivado (como la leche) estos metales llegan al hombre y se acumulan en sus tejidos (ver dibujo a lado). Esto hace de los metales pesados uno de los mayores responsables de la contaminación residual a nivel mundial y uno de los peligros mayores por la salud humana siempre a nivel global.

Los metales pesados más comunes e importantes en respecto a la salud humana y el medio ambiente son: plomo, cadmio, hierro, cobre, cromo, manganeso, aluminio y selenio.

- **Plomo**

El plomo no cumple ninguna función esencial en el cuerpo humano, este puede principalmente hacer daño después de ser tomado en la comida, aire o agua. El plomo puede causar varios efectos no deseados en cierto tipo de individuos, como son: Perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, Incremento de la presión sanguínea o taquicardia, daño a los riñones y en el sistema urinario, abortos y abortos sutiles o leves, perturbación del sistema nervioso y en el parasimpático, daño al cerebro, cerebelo, tallo encefálico, aparato digestivo, aparato urinario, aparato reproductor y aparato respiratorio inferior, disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños, jóvenes y adultos, gastritis, acidez o pesadez estomacal, causadas por las partículas no degradables plúmbicas, debilidad, estreñimiento y parálisis en las articulaciones, problemas en la audición y equilibrio, debilitamiento del tejido óseo por la depositación de las partículas plúmbicas no degradables en huesos y alteraciones en el ARN y en casos terminales o avanzados en el ADN. En fetos puede producir mutaciones leves y mutaciones severas.



**Muy Tóxico**



**Peligros para  
el  
Medio  
ambiente**

Por la exposición a largo plazo, el plomo puede causar numerosas enfermedades: rotura de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, aumento en la presión sanguínea, daños a los riñones, abortos, daños al sistema nervioso, daños cerebrales, disminución de fertilidad en los hombres con daños a la producción de esperma, daños en la capacidad de aprendizaje en los niños, molestias conductuales en los niños como agresividad, comportamiento impulsivo e hiperactividad.

El plomo puede transmitirse al feto y transmitirse a la placenta de la madre. A causa de eso puede causar serio perjuicio del sistema nervioso y del cerebro en los

niños nacidos. Es probada la relación entre el plomo tragado con el agua potable y el retraso mental y físico infantil. El plomo contenido en el agua potable bebido por una mujer embarazada puede atravesar la placenta y depositarse en el cerebro del feto. Acerca del 90% del plomo almacenado en el cuerpo de la madre puede atravesar la placenta. Niveles irregularmente altos han sido encontrados en los niños muertos por el síndrome de la muerte en cuna. El efecto del saturnismo pasa por una intoxicación crónica de plomo ocurre por la inspiración o la absorción por vía cutánea y mucosa o por el aparato digestivo de plomo metálico y orgánico. El plomo se adhiere a los glóbulos rojos en la sangre y luego se deposita, desplazando el calcio en los huesos, el cual puede circular nuevamente en situaciones de estrés. en caso de infecciones o acidosis. Se deposita también en el hígado y en los riñones. En una breve fase inicial, caracterizada por una elevada cantidad de plomo en círculo, son presentes señales de anemia saturnina por la alterada síntesis de la hemoglobina y los glóbulos rojos a causa de la inactivación de las enzimas del metabolismo porfirínico. Siguen síntomas a nivel del sistema nervioso central como encefalopatía y parálisis, síntomas de la circulación periférica, con encarnado térreo, la así llamada tez saturnina, del aparato osteomuscular. con dolor articular, la gota saturnina y lesiones óseas. Causa enfermedades de los riñones, con lesión renal y riñón saturnino atrófico. El estadio final es la caquexia.

Las sales de Plomo entran en el medio ambiente a través de los caños de escape (principalmente los defectuosos) de los coches, camiones, motos, aviones y casi todos los tipos de vehículos motorizados que utilicen derivados del petróleo, siendo las partículas de mayor tamaño las que quedarán retenidas en el suelo y en las aguas superficiales, provocando su acumulación en organismos acuáticos y terrestres, y con la posibilidad de llegar hasta el hombre a través de la cadena alimenticia. Con respecto a su incidencia en el medio ambiente, el Plomo se encuentra de forma natural en el ambiente, pero las mayores concentraciones encontradas en el ambiente son el resultado de las actividades humanas.

- **Cadmio**

El cadmio es uno de los metales más tóxicos, aunque podría ser un elemento químico esencial, necesario en muy pequeñas cantidades, pero esto no está claro.

Cuando la gente respira el cadmio este puede dañar severamente los pulmones.

Esto puede incluso causar la muerte. Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el cadmio son: diarreas, dolor de estómago y vómitos severos, fractura de huesos, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desordenes psicológicos y posibles daños en el ADN provocando desarrollo de cáncer.

El cadmio consiste en las industrias como inevitable subproducto de extracciones de zinc, plomo y cobre. Normalmente se encuentra en menas de zinc y se emplea especialmente en pilas. La toma por los humanos de cadmio tiene lugar mayormente a través de la comida. El cadmio es bio-persistente y, absorbido una vez por un organismo, reside por muchos años ya que se excreta muy lentamente.

Los alimentos que son ricos en cadmio pueden en gran medida incrementar la concentración de cadmio en los humanos. Ejemplos son patés, champiñones, mariscos, mejillones, cacao y algas secas.

La mitad del cadmio (en total unos 25,000 toneladas por año) es liberado en los ríos a través de la descomposición de rocas, también es liberado al aire a través de incendios forestales y volcanes. El resto es liberado por las actividades humanas, como es la manufacturación. Las aguas residuales con cadmio procedentes de las industrias mayoritariamente terminan en suelos. Las causas de estas corrientes de residuos son, por ejemplo, la producción de zinc, minerales de fosfato y las bioindustrias del estiércol. El cadmio de las corrientes residuales puede también entrar en el aire a través de la quema de residuos urbanos y de la quema de combustibles fósiles.



**Altamente inflamable**



**Muy Tóxico**



**Peligros para el medio ambiente**

- **Hierro**

El hierro puede ser peligroso para el medio ambiente. El hierro puede ser encontrado en carne, productos integrales, papas y vegetales. El cuerpo humano absorbe hierro de origen animal más rápido que el hierro de origen vegetal. El hierro es una parte esencial de la hemoglobina: es el agente colorante rojo de la sangre que transporta el oxígeno a través de nuestros cuerpos. Pero en altas dosis puede provocar conjuntivitis, corioretinitis, y retinitis si entra en contacto con los tejidos y permanece en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada Siderosis. Ningún daño físico de la función pulmonar se ha asociado con la siderosis. La inhalación de concentraciones excesivas de óxido de hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón en trabajadores expuestos a carcinógenos pulmonares.



**Facilmente  
Inflamable**

- **Cobre**

Unas de las consecuencias de la alta acumulación de cobre en el tejido hacen que se presenten activación de enzimas y destrucción de membranas, lo cual puede causar mutaciones del ADN, cirrosis hepática o enfermedades hereditarias como el mal de Wilson y Menkes, que ocasiona la retención de cantidades excesivas de cobre en el hígado; la acumulación de cobre en el sistema nervioso central produce daño neurológico y en algunos aspectos tiene cierto parecido con la enfermedad de Parkinson, la cual puede acompañarse de manifestaciones siquiátricas, y la aparición en la córnea de un anillo parduzco pericorneal. Se supone que el cobre disminuya la fertilidad en los machos y en las hembras.

- **Cromo**

Los compuestos de cromo (VI) son tóxicos si son ingeridos, siendo la dosis letal de unos pocos gramos. En niveles no letales, el Cr (VI) es carcinógeno. La mayoría de los compuestos de cromo (VI) irritan los ojos, la piel y las mucosas.

La exposición crónica a compuestos de cromo (VI) puede provocar daños permanentes en los ojos. A exposición a bajas concentraciones, el cromo produce dermatitis alérgica, ulceración de la piel y genera efectos cancerígenos. La exposición a largo plazo puede causar daño al riñón y al hígado y la exposición prolongada ocasiona problemas al sistema circulatorio y al tejido fino nervioso.



**Altamente  
Inflamable**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda desde 1958 una concentración máxima de 0.05 mg/litro de cromo (VI) en el agua de consumo. El cromo se acumula a menudo en la vida acuática, agregando el peligro de comer los pescados que pudieron haber sido expuestos a los altos niveles del cromo.



**Daños a la  
Salud  
Humana**

- **Manganeso**

El Manganeso es un compuesto muy común que puede ser encontrado en todas partes en la tierra. El manganeso es uno de los tres elementos trazas tóxicos esenciales, lo cual significa que no es sólo necesario para la supervivencia de los humanos, pero que es también tóxico cuando está presente en elevadas concentraciones en los humanos. Si no se cumple con la ración diaria recomendada la salud de los humanos puede ser afectada negativamente. Pero cuando la toma es demasiado alta, problemas de salud aparecerán.



**Facilmente  
Inflamable**

Los efectos del manganeso mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con manganeso son alucinaciones, olvidos y daños en el sistema nervioso. El manganeso puede causar parkinson, embolia de los pulmones y bronquitis. Cuando los hombres se exponen al manganeso por un largo periodo de tiempo el daño puede llegar a ser importante. Un síndrome que es causado por el manganeso tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio.



- **Aluminio**

El aluminio es uno de los metales más ampliamente usados y también uno de los más frecuentemente encontrados en los compuestos de la corteza terrestre.

Debido a este hecho, el aluminio es comúnmente conocido como un compuesto inocente. Pero todavía, cuando uno es expuesto a altas concentraciones, este puede causar problemas de salud.

La ingestión de aluminio puede tener lugar a través de la comida, sistema respiratorio y por contacto con la piel. La toma de concentraciones significantes de aluminio puede causar un efecto serio en la salud como daños al sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria, apatía, temblores severos.

El aluminio es un riesgo para ciertos ambientes de trabajo, como son las minas, donde se puede encontrar en el agua. El aluminio se encuentra en altas concentraciones en lagos ácidos y en el aire, también en aguas subterráneas y suelos ácidos como los causados por el drenaje ácido de mina.



Facilmente  
Inflamable

- **Selenio**

El selenio se encuentra muy distribuido en la corteza terrestre en la mayoría de las rocas y suelos se halla en concentraciones entre 0,1 y 2,0 ppm. Raramente se encuentra en estado nativo obteniéndose principalmente como subproducto en el refinado del cobre.

El selenio está considerado un elemento peligroso para el medio ambiente por lo que sus compuestos deben almacenarse en áreas secas evitando filtraciones que contaminen las aguas. Para el ser humano puede ser dañoso en forma de provocar caída del cabello o de las uñas, adormecimiento de dedos de las manos y pies, problemas circulatorios, fatiga, irritabilidad nerviosa, daño al tejido fino del riñón y del hígado y daño severo al sistema nervioso. El selenio es bioacumulable, causando alto contenido en el pescado y otros organismos.



Tóxico

**Fuente:** Ibarra Angel, Gonzales Luis y Erzinger Florian. La Minería Aurífera en el Salvador. Unidad Ecológica Salvadoreña<sup>(24)</sup>

## ANEXO 5

**COMPARACION DE LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES  
INTERNACIONALES**

Institución / País	L.M.P. CN(mg/L)	Estandares de calidad (mg/L)
PERU	1.0 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	0.2 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub> (Mn Salud y LGA clase I y II) 0.005 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub> ( LGA clase II,V y VI)
	0.2 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub>	
	0.1 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub>	
Cyanide Internacional Management		0.022 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub>
WHO (world Health organization)		0.07 CN <sup>-</sup> (Uso potable) no se especifica tipo CN
World Bank (Environment, Health and Safety Guidelines)	1.0 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	0.022 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub> *En ningún caso debe sobrepasar ( En mining zone)
	0.5 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub>	
	0.1 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub>	
Export Import Bank of the US(Environment guidelines)	0.5 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	
US EPA		0.2 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub> ( uso potable)
Canada	0.2 CN <sup>-</sup> <sub>Libre</sub> (promedio)	0.2 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub> ( uso potable)
Canada/Matitoba Conservation (water quality standars)		0.2 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub> ( uso potable) 0.005 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub> ( vida acuática) 0.01 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub> (vida acuática) 0.022 CN <sup>-</sup> <sub>DAD</sub> ( vida silvestre)
Alemania	0.1 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	
Finlandia	0.5 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	
Italia	0.5 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub>	
Bélgica (Ministerio Salud Publica)		0.01 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub> (uso potable)
Francia		0.05 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub> ( uso potable)
España (código alimentario Español)		0.01 CN <sup>-</sup> <sub>Total</sub> ( uso potable)



Filipinas (DENR ) Australia	0.2-0.5 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ 0.018 $\text{CN}^-_{\text{Libre}}$	0.05 $\text{CN}^-$ ( cuerpos receptores) - no se especifica tipo $\text{CN}^-$ 0.08 $\text{CN}^-_{\text{Libre}}$
El Salvador		0.05 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$
México	1.0 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ (promedio mensual) 0.07 $\text{CN}^-_{\text{Libre}}$	1.0 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ ( uso agrícola, uso público y protección vida acuática)
Chile	0.2 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ ( descarga a rio) 0.5 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ (descarga a lago) 0.5 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ (mar en zona protección) 1.0 $\text{CN}^-_{\text{Total}}$ a mar fuera zona protección)	
Bolivia	0.2 $\text{CN}^-_{\text{Libre}}$ ( diario) 0.10 $\text{CN}^-_{\text{Libre}}$ ( mensual)	

**Fuente:** Bonelli J. Ministerio de Energía y Minas. Manejo Ambiental en Plantas de Cianuración<sup>(8)</sup>. Dic. 2002.