

# Especiación acuosa de cianuro y componentes derivados en lavados de colas de minerales de oro

**M. Benavente<sup>1\*</sup> y J. Martínez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)  
PO Box 5595, Managua, Nicaragua  
e-mail: martha.benavente@fiq.uni.edu.ni

<sup>2</sup>Dept. of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology (KTH)  
S-100 44 Stockholm, Sweden  
e-mail: jmc@ket.kth.se

## RESUMEN

En este trabajo se simuló la especiación del cianuro y componentes relacionados en soluciones de lavado de colas cianuradas de minerales de oro de la Mina El Limón, utilizando el programa geoquímico PHREEQC. Se consideró un modelo de especiación iónica formado por un conjunto de reacciones químicas y de especies principales en fase acuosa (hierro, cobre, cinc, calcio y aluminio, cloruro y cianuro), en distintas condiciones de pH, Eh y concentraciones de cianuro. Las simulaciones muestran que las concentraciones de las especies iónicas y complejas dependen principalmente del pH de la solución y de la concentración de cianuro disponible en el sistema, reproduciéndose en forma satisfactoria los valores de pH y solubilidad de metales medidos en el sistema. El cianuro forma complejos de alta estabilidad química con los metales disueltos, observándose que las especies de Fe-CN son altamente estables incluso a pH ácido donde prácticamente no existe el ión cianuro libre (CN<sup>-</sup>) producto de la formación del componente gaseoso HCN.

Palabras claves: cianuro, colas, especiación

## ABSTRACT

In this work, the speciation of cyanide and related components in washing solutions for golden ore tailings from Limon Mine was simulated using the geochemical PHREEQC program. An ionic speciation model, which consisted of a set of chemical reactions and major species (iron, copper, zinc, calcium, aluminium, chloride and cyanide) in an aqueous phase, was considered under different conditions of pH, Eh and cyanide concentrations. These simulations show that ionic and complex species concentrations depend mainly on the pH of the solution and the concentration of cyanide available in the system, thus reproducing the values of pH and the solubility of the measured metals in the system satisfactorily. The cyanide forms complexes of high chemical stability with the dissolved metals, thus observing that the species of Fe-CN are highly stable even in an acidic pH where the free cyanide ion (CN<sup>-</sup>) practically does not exist as a result of the formation of the gaseous component HCN.

Keywords: cyanide, tailings, speciation

---

\*Autor para la correspondencia

## INTRODUCCIÓN

En el distrito de El Limón, al noroeste de Managua, existen hasta el momento 36 hectáreas afectadas con grandes cantidades de desechos mineros de diferentes edades y con diferentes características físicas y químicas, produciéndose además nuevos desechos cada día (Calderón, 2001). Una gran preocupación, en cuanto al manejo de las colas, es la contaminación de las aguas subterráneas y el impacto que puedan tener en el agua de pozos y fuentes de aguas superficiales (Ritcey, 1989).

El proceso de lixiviación con cianuro produce daños ambientales a largo y/o a corto plazo. A largo plazo debido a los desechos cianurados inyectados en las escombreras, la movilización de metales pesados o la generación de drenajes ácidos. Y a corto plazo debido a accidentes que pueden producirse durante las operaciones o derrames que pueden filtrarse a cauces de agua en forma impredecible.

El cianuro se presenta en los efluentes como cianuro libre ( $\text{CN}^-$  y  $\text{HCN}$ ) y en forma compleja en asociación con varios metales que tienen variada solubilidad y toxicidad. Estas incluyen cianuros simples, cianuros complejos débiles, cianuros complejos moderadamente fuertes y cianuros complejos fuertes (Smith y Mudder, 1996). Dada la naturaleza de estos relaves es importante conocer sus características físico-químicas, su comportamiento ante las variaciones del pH, Eh, temperatura y factores externos como precipitaciones fluviales.

Actualmente, se han desarrollado técnicas de laboratorio que permiten determinar la concentración de especies en diferentes tipos de matriz, a niveles de trazas y ultra trazas. Sin embargo, dada la cantidad de material existente y su heterogeneidad, es imposible determinar por métodos analíticos la concentración y distribución de cada especie. Por consiguiente, para establecer la especiación de la solución en condiciones reales, se debe hacer uso de una combinación de mediciones experimentales y modelos termodinámicos.

Hoy en día se utilizan Modelos Geoquímicas, tales como el programa geoquímico PHREEQC (Parkhurst, 1995; Morel y Hearing, 1993; Allison *et al.*, 1991; Parkhurst *et al.*, 1980), CHEMesp y HSC Chemistry, que permiten determinar la concentración y distribución de especies químicas en el tiempo y en el espacio en soluciones acuosas que interactúan con minerales. Estos modelos consideran diferentes fenómenos tales como disolución y reacciones de precipitación, complejación, adsorción, intercambio iónico, transporte de soluto, difusión y convección (Casas, 1996). La especiación o distribución específica dependerá de la concentración total de cada metal, de la acidez, del potencial redox y de la temperatura (Nguyen y Tran, 2001).

El modelo para simular la especiación de cianuro y especies relacionadas, tales como hierro, cobre y zinc, con el programa PHREEQC, podrá ser utilizado como herramienta en el área hidrometalúrgica para el procesamiento de minerales, específicamente en la predicción de especies presentes en el sistema bajo diversas condiciones ambientales y de operación, y en base a esta caracterización definir mejores condiciones de operación para así obtener un mayor rendimiento en la producción. Así como también, permitirá evaluar la estabilidad química de los residuos mineros y el impacto que pueden causar estos desechos en el medio ambiente.

Con una adecuada caracterización y especiación de los diferentes componentes presentes, se pueden establecer aquellos materiales o residuos que presenten un riesgo para la salud y el ambiente. En base a lo anterior, se podrán definir estrategias de control para las impurezas y se podrá establecer tecnologías de remediación aplicables y condiciones económicamente convenientes, que permitan disminuir o anular las contaminantes presentes en los efluentes líquidos.

## METODOLOGÍA

La metodología desarrollada incluye trabajo experimental y simulaciones computacionales para la especiación del cianuro y componentes

relacionados, utilizando el programa PHREEQC versión 2.

Para el trabajo experimental se utilizaron residuos cianurados de la Mina El Limón, de León, Nicaragua (Ver Fig. 1). Los experimentos de lavado del relave cianurado se realizaron en una columna; el flujo de salida se recolectó cada cierto tiempo para medir pH, Eh, temperatura, conductividad, sólidos totales disueltos y análisis químico de la solución (Ver Fig. 2).



Fig. 1 Depósito de relaves cianurados, Santa Rosa, El Limón.



Fig. 2 Columna de lixiviación para experimentos de lavado.

La caracterización química involucró el análisis de cianuro, hierro, cobre, cinc, sodio, aluminio, y calcio (APHA, 2001).

Las simulaciones para la especiación del cianuro y componentes relacionados, con el programa PHREEQC, se realizaron a distintas condiciones de pH, Eh y diferentes concentraciones de ión cianuro en la solución.

Para la simulación de la especiación del cianuro y especies relacionadas se consideraron cuatro casos de estudio: (1) a diferentes valores de pH manteniendo constante el potencial, la temperatura y la concentración de cianuro en la solución; (2) a diferentes concentraciones de ión cianuro a potencial, temperatura y pH constantes; (3) a diferentes valores de potencial (pe) manteniendo constantes el pH, la temperatura y concentración de cianuro y, (4) simulación de la especiación utilizando datos experimentales. Los valores de los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros utilizados para las simulaciones.

Elementos	Caso (1)	Caso (2)	Caso (3)
Al(III) [mol/kg Agua]	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
Na(I) [mol/kg Agua]	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^{-1}$
Ca(II) [mol/kg Agua]	$3.2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$4.4 \times 10^{-3}$
Cu(II) [mol/kg Agua]	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	-
Zn(II) [mol/kg Agua]	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	-
Fe <sub>Total</sub> [mol/kg Agua]	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
Cl [mol/kg Agua]	$5 \times 10^{-2}$	$7.6 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-4}$
Cianuro [mol/kg]	$1 \times 10^{-2}$	$0.1-1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$

Agua]			
pH	4 – 13	8	8
$pe = F E^\circ / [RT \cdot \ln(10)]$	4	4	-8 – 8
Densidad	1.023	1.023	1.023
Actividad del H <sub>2</sub> O	0.999	0.995	1.0
Fuerza Iónica	$9.24 \times 10^{-2}$	$1.06 \times 10^{-1}$	$1.41 \times 10^{-2}$
Alcalinidad Total [eq/Kg]	$5.7 \times 10^{-2}$	$4.18 \times 10^{-2}$	$3.88 \times 10^{-2}$
Temperatura [25 °C]	25	25	25

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se reflejan los datos experimentales obtenidos de una solución de lavado de colas cianuradas, utilizando diferentes técnicas analíticas: polarografía, absorción atómica y espectrofotometría UV-Visible (APHA, 2001).

Tabla 2 Resultados de análisis físico-químico de una solución de lavado de colas cianuradas.

Análisis	mg/L	Análisis	
Al <sub>Total</sub>	7.40	pH	7.80
Zn <sub>Total</sub>	0.001	Temperatura [°C]	25.8
Ca <sub>Total</sub>	131.29	$pe = F E^\circ / [RT \cdot \ln(10)]$	-1.3
Cl <sub>Total</sub>	0.92	Sólidos Totales Disueltos [mg/L]	376
Cu <sub>Total</sub>	0.0015	Conductividad [μs]	762
CN <sup>-</sup>	0.25		
Fe <sub>Total</sub>	0.05		

### Simulación a distintas condiciones de pH

En las Figs. 3 al 7, se muestran los resultados de la simulación para un rango de pH de 4 a 13. Estas figuras muestran los gráficos de los iones metálicos considerados: aluminio, calcio, cinc, cobre, hierro (II) y hierro (III); y del ión cianuro. Para un mejor análisis de los resultados se utilizó en el eje “y” la concentración relativa, es decir, la concentración de cada una de las especies

relativa a la concentración total del ión en la solución.

Los resultados muestran que la distribución de las especies en el sistema depende grandemente del pH de la solución, de la disponibilidad de iones cianuro y de la constante de formación de la especie.

En el caso del aluminio (Fig. 3), dado que este metal no forma complejos con el ión cianuro, la distribución de la concentración relativa de las especies en la solución depende únicamente de la disponibilidad de los iones hidróxido o sea del pH. El calcio no forma complejos directamente con el ión cianuro por lo que prácticamente se encuentra como ión libre en la solución hasta un pH de 11 donde se comienza a formar la especie CaOH<sup>+</sup>. Los iones complejo Ca-Fe-CN se discutirán más adelante.

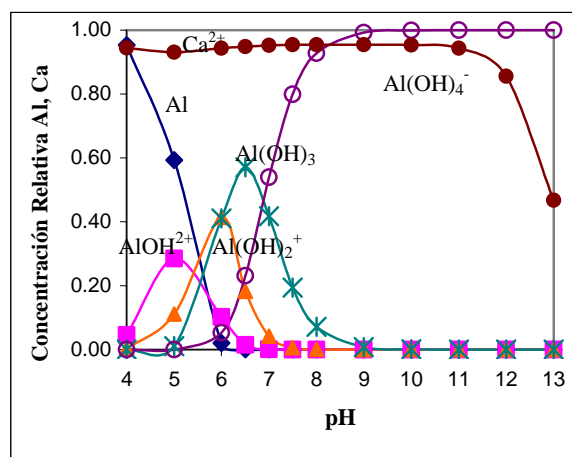


Fig. 3 Diagrama de especiación del aluminio y calcio a diferentes pH, concentración de cianuro de 0.01 mol/kgw y temperatura de 25 °C (PHREEQC).

Por otra parte, a pesar de que los complejos Zn-CN son estables, la poca disponibilidad de iones cianuro en la solución no permitió que se formaran estos complejos por lo que los iones cinc (II) se encuentran libres o formando complejos Zn-OH (Fig. 4).

El cobre, en un rango de pH de 4 a 7, coexiste como ión libre y formando complejos Cu-CN.

Sin embargo, a medida que el pH de la solución incrementa, el cobre se asocia con los iones hidróxido para formar especies Cu-OH (Fig. 5).

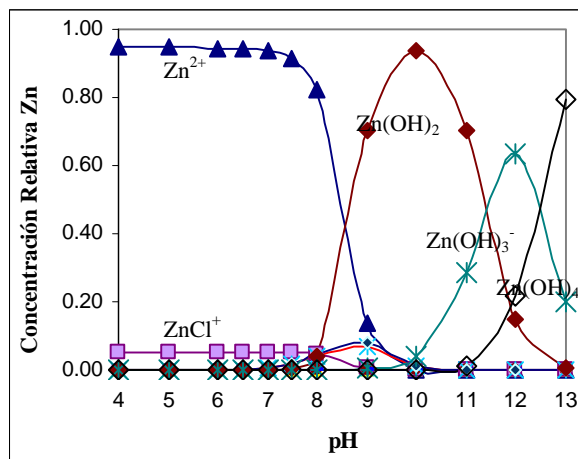


Fig. 4 Diagrama de especiación del cinc a diferentes pH, concentración de cianuro de 0.01 mol/kgw y temperatura de 25 °C.

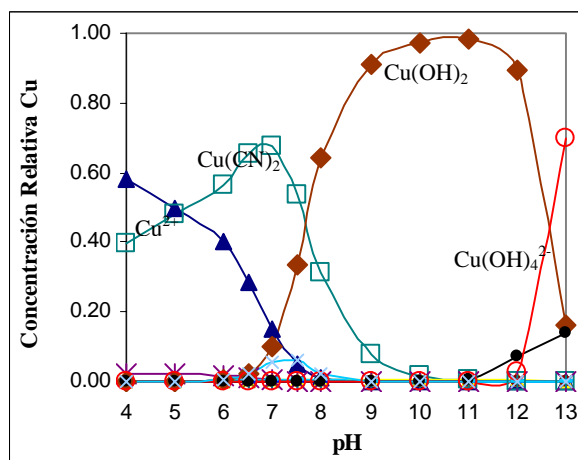


Fig. 5 Diagrama de especiación de cobre a diferentes pH, concentración de cianuro de 0.01 mol/kgw y temperatura de 25 °C.

El cianuro forma complejos de alta estabilidad química con los iones metálicos Fe (II) y Fe (III), observándose que los complejos Fe (III)-CN son altamente estables incluso a pH ácido (Fig. 6). Sin embargo, al aumentar el pH de la solución se ven favorecidas las especies Ca-Fe (II)-CN (Fig. 7), debido a que el Fe (III) se

asocia con los iones hidróxido formando las especies Fe (III)-OH.

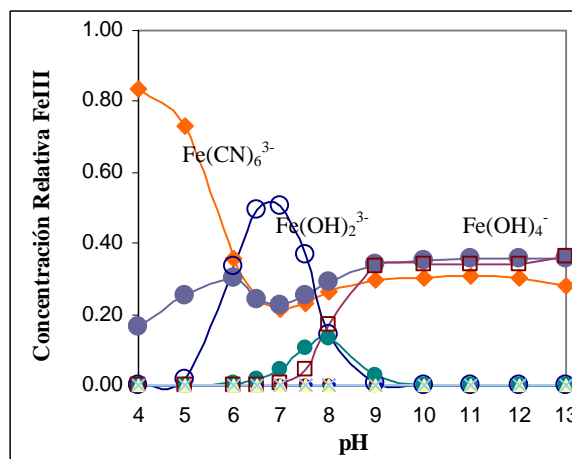


Fig. 6 Diagrama de especiación del hierro (III) a diferentes condiciones de pH, concentración de cianuro de 0.01 mol/kgw y temperatura de 25°C.

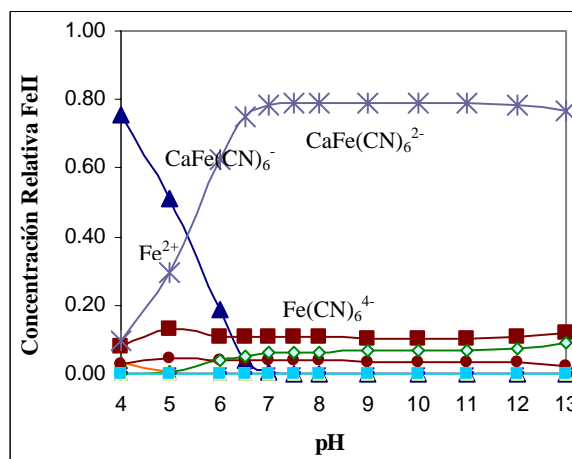


Fig. 7 Diagrama de especiación del hierro (II) a diferentes condiciones de pH, concentración de cianuro de 0.01 mol/kgw y temperatura de 25°C.

*Simulación a distintas concentraciones de iones cianuro*

La simulación se llevó a cabo en un rango de concentración de iones cianuro de  $1 \times 10^{-1}$  a  $1 \times 10^{-5}$  ( $pCN = -\log a_{CN} = 1-5$ ). El resto de los parámetros utilizados se puede observar en la Tabla 1. En las Figs. 8 al 12 se muestran los resultados de la especiación del caso 2.

Las simulaciones se realizaron a pH 8 y por lo tanto aproximadamente el 30 % del cianuro total se encuentra como  $\text{CN}^-$ . Dado que el pH permanece constante, la distribución de la concentración relativa de las especies se deberá principalmente a la disponibilidad de iones cianuro en el sistema y las constantes de formación de las especies.

Dado que el aluminio no forma complejos con el ión cianuro, la concentración de las especies relacionadas con este ión metálico no se ve afectada por la variación de la concentración iones cianuro en la solución. Esto lo podemos observar en el primer gráfico de la Fig. 8, donde el calcio presenta un comportamiento similar.

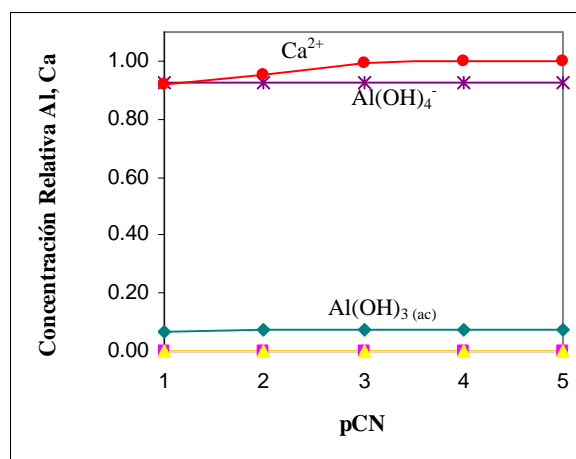


Fig. 8 Diagrama de especiación del aluminio y calcio a diferentes concentraciones de  $\text{CN}^-$ , a pH de 8 y temperatura de 25 °C.

A un pCN igual 1, la concentración relativa del ión  $\text{Zn}(\text{CN})_3^-$  es alta (Fig. 9), debido a la disponibilidad de iones cianuro en la solución; sin embargo, a medida que decrece la concentración del ión cianuro la concentración del ión complejo también decrece liberándose el ión Zn. En este mismo gráfico no se observan especies Zn-OH debido a que el pH es ligeramente básico y la formación de las especies Zn-OH es despreciable ( $< 0.05$  de concentración relativa).

En el gráfico del cobre (Fig. 10) se observa que a concentraciones altas de ión cianuro se forman

los complejos correspondientes Cu-CN pero a medida que disminuye la concentración del ión cianuro se observa la formación de los hidróxidos de cobre, siendo el  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  la especie más estable.

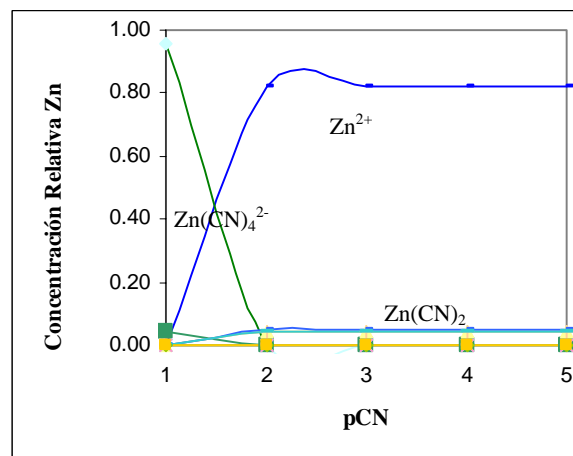


Fig. 9 Diagrama de especiación del cinc a diferentes concentraciones de  $\text{CN}^-$ , a pH de 8 y temperatura de 25 °C.

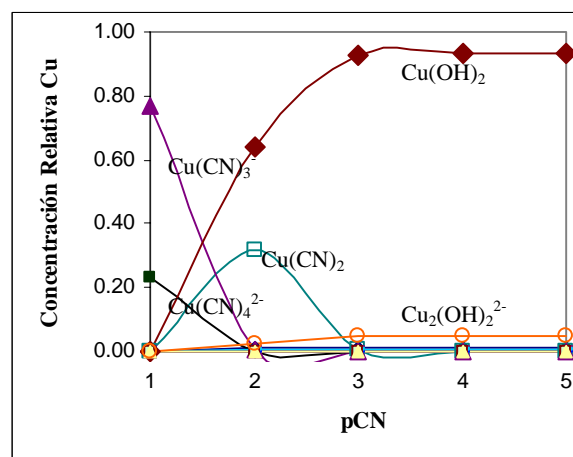


Fig. 10 Diagrama de especiación de cobre a diferentes concentraciones de  $\text{CN}^-$ , a pH de 8 y temperatura de 25 °C.

En las Figs. 11 y 12 se puede observar que a concentraciones de iones cianuro mayor que 0.01 (pCN  $> 2$ ) los iones Fe (II) y Fe (III) se encuentran como iones complejos cianurados. La especie compleja que predomina será la que tiene mayor estabilidad química.

Al decrecer la concentración de iones cianuro disminuye también la concentración de los iones complejo, liberándose el ión Fe (II) y por tanto, se encuentra como ión  $\text{Fe}^{2+}$  en solución. El Fe (III) se comporta de manera diferente ya que al pH de trabajo se forman las especies complejas Fe-OH, la formación de estas especies depende de su estabilidad química.

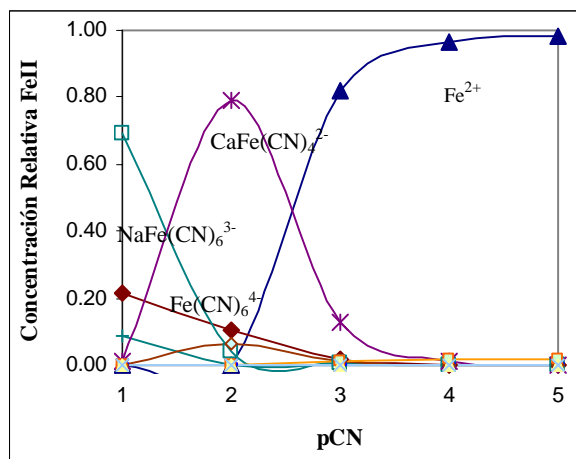


Fig. 11 Diagrama de especiación del hierro (II) y hierro (III) a diferentes concentraciones de  $\text{CN}^-$ , a pH de 8 y temperatura de 25 °C.

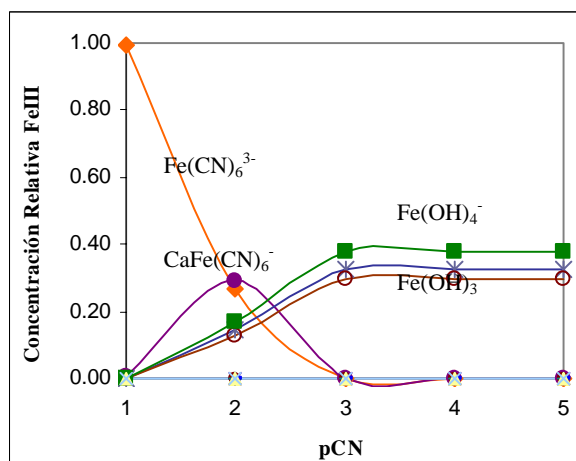


Fig. 12 Diagrama de especiación del hierro (II) y hierro (III) a diferentes concentraciones de  $\text{CN}^-$ , a pH de 8 y temperatura de 25 °C.

*Simulación de la especiación a diferentes potenciales (pe)*

Los datos utilizados para la simulación se reflejan en la Tabla 1, y los resultados se pueden observar en la Fig. 9.

En el diagrama de la Fig.13 se puede apreciar que la especie del par redox Fe (II) / Fe (III), que predomina en casi todo el rango de potencial (-8 a 6 pe) es el  $\text{Fe}^{2+}$ , en forma de iones complejos:  $\text{CaHFe(CN)}_6^-$ ,  $\text{CaFe(CN)}_6^{2-}$ ,  $\text{Fe(CN)}_6^{4-}$ ,  $\text{Ca}_2\text{Fe(CN)}_6$ . A partir, de  $\text{pe} > 6$ , se observa una disminución del  $\text{Fe}^{2+}$  y por lo tanto, se incrementa el  $\text{Fe}^{3+}$ , en forma de iones complejos cianurados. En este caso, las especies complejas que predominan son  $\text{Fe(CN)}_6^{3-}$  y  $\text{CaFe(CN)}_6^-$ , por tener mayor constante de formación.

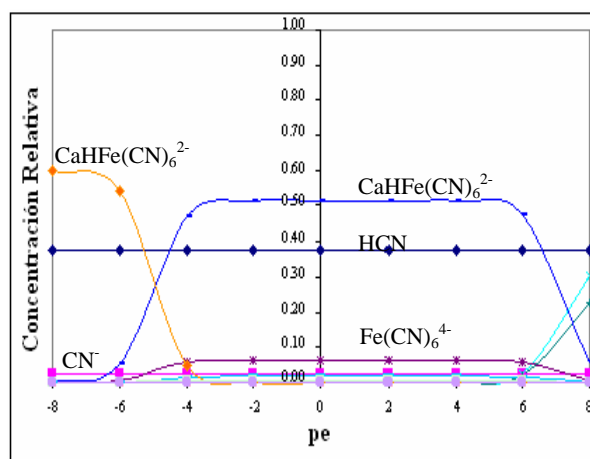


Fig. 13 Diagrama de especiación del hierro (II) y hierro (III) en función del potencial (pe), pH de 8 y temperatura de 25 °C.

*Simulación de la especiación utilizando datos experimentales*

Para esta simulación se utilizaron datos experimentales de una muestra de lavado de residuos cianurados de oro de la Mina El Limón. En la Tabla 2 se reflejan los datos experimentales que se utilizaron para la simulación y en la Tabla 3, los resultados de la especiación.

Los resultados muestran que las especies cianuradas que predominan son el complejo  $[\text{Fe(CN)}_6^{4-}]$  y el complejo  $[\text{CaFe(CN)}_6^{2-}]$  ya que estos tienen la mayor estabilidad química. Al pH de trabajo, el hierro (III), el aluminio y el cobre

se encuentran principalmente como complejos M-OH. Sin embargo, el cinc se encuentra como ión libre en la solución.

Tabla 3 Resultados de la especiación de una solución de lavado de residuos mineros cianurados.

Especie	mol/kg Agua	Composición relativa
<b>Fe(2)</b>	<b>8,76E-07</b>	-
Fe+2	8,18E-13	0,00
CaFe(CN)6-2	7,67E-07	0,88
FeOH+	1,33E-14	0,00
Fe(CN)6-4	8,39E-08	0,10
Ca2Fe(CN)6	2,41E-08	0,03
CaHFe(CN)6-2	2,55E-10	0,00
Fe(OH)2	7,00E-18	0,00
HFe(CN)6-3	1,73E-11	0,00
Fe(OH)3-	1,81E-20	0,00
H2Fe(CN)6-2	4,86E-17	0,00
<b>Fe(3)</b>	<b>4,30E-15</b>	-
Fe(OH)4-	1,22E-17	0,00
Fe(OH)3	1,76E-17	0,00
Fe(OH)2+	2,61E-17	0,01
FeOH+2	1,72E-21	0,00
Fe(CN)6-3	2,42E-15	0,56
CaFe(CN)6-	1,83E-15	0,42
Fe+3	5,86E-27	0,00
FeCl+2	2,87E-30	0,00
Fe2(OH)2+4	1,63E-40	0,00
FeCl2+	2,20E-34	0,00
Fe2(CN)6	9,13E-38	0,00
Fe3(OH)4+5	0,00E+00	0,00
FeCl3	4,64E-40	0,00
<b>Zn</b>	<b>1,50E-08</b>	-
Zn+2	1,37E-08	0,91
Zn(OH)2	4,82E-10	0,03
ZnOH+	7,74E-10	0,05
ZnOHCl	4,62E-13	0,00
ZnCl+	6,78E-13	0,00
Zn(OH)3-	1,06E-13	0,00
Zn(CN)2	2,47E-11	0,00
Zn(CN)3-	3,74E-13	0,00
ZnCl2	1,50E-17	0,00
Zn(OH)4-2	1,39E-18	0,00
ZnCl3-	4,28E-22	0,00
Zn(CN)4-2	3,40E-19	0,00
ZnCl4-2	6,50E-27	0,00
<b>Cu(2)</b>	<b>2,31E-08</b>	-
Cu(OH)2	3,43E-09	0,15
Cu(CN)2	1,89E-08	0,82

Cu+2	6,08E-11	0,00
CuOH+	2,86E-11	0,00
Cu(CN)3-	6,29E-10	0,03
Cu(OH)3-	1,44E-14	0,00
Cu2(OH)2+2	4,66E-16	0,00
CuCl+	2,93E-15	0,00
Cu(OH)4-2	2,38E-19	0,00
Cu(CN)4-2	3,98E-15	0,00
CuCl2	3,33E-20	0,00
CuCl3-	3,04E-27	0,00
CuCl4-2	4,48E-34	0,00

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que el programa PHREEQC, con la base de datos Minteql.txt, describe adecuadamente la especiación de las soluciones cianuradas. Por consiguiente, puede ser utilizado en combinación con datos experimentales, para determinar la concentración y distribución de especies a distintas condiciones de pH, temperatura, concentración total de iones y del potencial redox. Además, puede ser una herramienta muy útil en el área hidrometalúrgica para el procesamiento de minerales, específicamente en la predicción de especies presentes en el sistema bajo diversas condiciones ambientales y de operación.

El depósito continuo de material de relave, sin ningún tratamiento previo, en la Presa de colas Santa Rosa, ocasiona un impacto ambiental en el aire por la producción del HCN gaseoso y la contaminación de suelos y aguas subterráneas por la infiltración del lecho, con cianuro y metales pesados disueltos. Es necesaria la realización de estudios complementarios para minimizar al máximo los impactos negativos al medio ambiente. Experimentalmente se ha comprobado que el lavado de colas cianuradas remueve del 50 al 90 % de cianuro. Se propone además el desarrollo de los siguientes estudios:

- La aplicación de la quitosana, un polisacárido extraído del exoesqueleto de los crustáceos, para la remoción de metales pesados en las soluciones de relaves cianurados antes de su deposición.

- Estudios de aprovechamiento de los relaves sólidos, como agregado de materiales de



construcción, cerámica avanzada o materia prima para la obtención de sílica gel.

- La fitocorrección para descontaminar suelos mediante la extracción de los contaminantes del suelo y del agua.

Sin embargo, para la aplicación de estos estudios se hace necesario una valoración cuantitativa de los contaminantes. Ahora bien, las cantidades totales presentes de estos contaminantes en el medio constituyen una medida poco representativa de la posible toxicidad de un metal pesado y su disponibilidad (según se encuentre disuelto, absorbido, ligado o precipitado). Por lo tanto, resulta fundamental conocer la forma química bajo la que se presentan estos contaminantes, es decir la especiación, tomando en cuenta las variaciones de pH, Eh, temperatura y factores externos como precipitaciones pluviales, para promover o aplicar un sistema de gestión ambiental que ayude a evitar o minimizar los riesgos de contaminación.

## AGRADECIMIENTOS

La autora agradece a la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo (Asdi/SAREC), por el apoyo y financiamiento para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

Allison, J.D., Brown, D.S. y K.J. Novo-Gradac (1991). *A. Geochemical Assessment Model for Environmental Systems*. Athens, GA, USEPA Report EPA/600/3-91/021. Version 3.0.

American Public Health Association. (2001). *Standard Methods*. USA.

Calderón, H. (2001). *Estudio del Transporte Líquido en las Colas Procedentes del Proceso de Extracción de Oro de la mina El Limón*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua.

Casas, J. M. (1996). *Modelación de Procesos de (Bio)lixiviación de Minerales de Cobre en Pilas*

y *Botaderos*. Tesis de Doctorado. Universidad de Chile. Santiago, Chile.

Morel, F. y J. Hearing (1993). *Principles and Applications of Aquatic Chemistry*. Wiley Interscience. New York, USA.

Nguyen, A.V. y T. Tran (2001). *Technical Note a Simple Method for Predicting Equilibrium Composition of Leaching Systems*. Minerals Engineering, Vol. 14, No. 03, pp. 359-364.

Parkhurst, D.L. (1995). *User's Guide to PHREEQC – A Computer Program for Speciation, Reaction-path, Advective Transport and Inverse Geochemical Calculations*. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 95-4227. USA.

[http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC\\_coupled/phreeqc](http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc)

Parkhurst, D.L., Thortenson, D.C. y L.N. Plummer (1980). *PHREEQE--A Computer Program for Geochemical Calculations*. U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations, USA.

Ritcey, G. (1989). *Tailings Management: Problems and Solutions in the Mining Industry*. Elsevier. The Netherlands.

Smith, A. y T. Mudder (1996). *Tratamiento de Residuos de Cianuración*. Mining Journal Books Ltd. England.



**Martha Benavente** se graduó de Licenciada en Química en la UNAN-León, en 1987. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mención Química en la Universidad de Chile, en 2004. Actualmente es estudiante de Doctorado en el Real Instituto Tecnológico (KTH), Suecia. Su área de investigación es Ingeniería de Procesos con énfasis en Medio Ambiente. Profesora Titular de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería.