

FIGURA 12. Modelo lineal.

experimental, un modelo imbricado es la suma de modelos teóricos independientes.

Como el ajuste de los modelos teóricos al variograma experimental, se realiza de forma visual o interactiva, es conveniente validar el modelo seleccionado y los parámetros meseta y alcance escogidos, al respecto se discute en Journel, y Huijbregts, 1978; Armstrong, y Carignan, 1997; Bacchi, y Kottegoda, 1995; Myers, 1991; Deutsch, y Journel, 1992 la validación cruzada. Este procedimiento consiste en eliminar temporalmente el valor de un punto de la información inicial, y reestimar el valor de esta localización a partir de la información restante por Krigeage, repitiendo el procedimiento para cada localización, obteniéndose errores de estimación por la diferencia de los valores reales y los estimados, donde es razonable esperar que la media de los errores y de los errores estandarizados sean cero y la varianza de los errores estandarizados sea uno.

CONCLUSIONES

La realización adecuada del análisis estructural en todo estudio geoestadístico es, sin lugar a dudas, la base que justifica una correcta estimación. En correspondencia con la variabilidad espacial de la información disponible, se obtendrán las estimaciones en las localizaciones no muestreadas de modo que se minimice la varianza del error de estimación. Si el análisis estructural realizado responde a las características de variabilidad del fenómeno estudiado, entonces podemos estar seguros de que la estimación realizada por los métodos geoestadísticos es correcta.

Un estudio de este tipo implica entonces, un cálculo adecuado del semivariograma experimental, del análisis de anisotropía, y de un ajuste de modelos teóricos, el cual puede ser validado, de modo que se refleje lo mejor posible el comportamiento espacial del fenómeno estudiado. Los elementos presentados se ofrecen como una guía para la interpretación tanto teórica como práctica de la realización del análisis estructural de la información disponible, en la cual la ecuación del semivariograma experimental es el elemento primario y fundamental de todo el estudio. Finalmente podemos plantear que, si

somos capaces de obtener un modelo que represente fielmente la continuidad espacial del fenómeno estudiado, podremos predecirlo en todo su dominio.

BIBLIOGRAFÍA

- ARMSTRONG, M.: "Common Problems Seen in Variograms", en *Mathematical Geology*, vol. 16, no. 3, 1984, pp. 305-313.
- _____: "Notas de clases del curso Geoestadística lineal" en Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-1998, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia, 1997.
- ARMSTRONG, M., y J. CARIGNAN: *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier*, École de Mines de Paris, France, 1997, pp. 112.
- BACCHI, B. y N.T. KOTTEGODA: "Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns Of Rain Fall", en *Journal of Hydrology* 165, 1995, pp. 311-348.
- CHAUVET, P.: "The Variogram Cloud, 17th Apcom Symposium", 19-23 April 1982, Colorado School of Mines, Golden, 1982, pp. 757-764.
- CHAUVET, P.: *Aide-Memoire de Géostatistique Minière*, École des mines de Paris, France, 1994, 210 pp.
- CHICA-OLMO, M.: "Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 1987, 387 pp.
- DEUTSCH, C.V., y A.G. JOURNEL: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Second Edition, Oxford University Press, 1998, 340 pp.
- FRYKMAN, P., y T.A. ROGON: "Anisotropy in Pure Networks Analysed with 2D autocorrelation (Variomaps)", en *Computers and Geosciences*, vol. 9, no. 7, 1993, pp. 887-930.
- GALLI, A.: "Stochastic models for reservoir characterization: a user-friendly review", en *Fifth American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition held in Rio de Janeiro, Brazil*, 1997, 11p.
- JOURNEL, A., y CH. HUIJBREGTS: *Mining Geoestatistic*, Ed. Academic Press New York, 1978, 600 p.
- KRAJEWSKI, S. A. y B.L. GIBBS: *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 1993, 93 p.
- LAMOREY, G. y E. JACOBSON: "Estimation of Semivariogram Parameter and Evaluation of the Effects of Data Sparsity", en *Mathematical Geology*, vol. 27, no. 3, 1995, pp. 327-358.
- MYERS, D. E.: "Multivariable Geostatistical Analysis for Environmental Monitoring, Geomathematical and Geostatistics Analysis Applied to Space and Time Dependent Data", en *Sci. de la Terre, Sér. Inf.* 27, Nancy, France, 1988, pp. 411-427.
- MYERS, D. E.: "Interpolation and Estimation with Spatially Located Data", en *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 11, Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam, 1991, pp. 209-228.
- WACKERNAGEL, H.: *Multivariate Geostatistic, an Introduction with Applications*, Berlin: Springer, 1995, 256 pp.

Estudio del comportamiento de la continuidad espacial del quimismo en el acuífero cársico costero de la península de Guanahacabibes

Study of Spatial Continuity Behaviour of Chemical Elements in the Karstic Coastal Aquifer of Guanahacabibes Peninsula

Rebeca Hernández Díaz¹
José Quintín Cuador Gil²
Arsenio González Martínez³
Emilio Romero Macías³
Robert Ramírez Hernández²

¹Profesor instructor. Especialista en Hidrogeología. Universidad de Pinar del Río.
²Universidad de Pinar del Río.
³Universidad de Huelva, España.

RESUMEN: Actualmente los recursos del acuífero de Guane se explotan para satisfacer las necesidades del plan de riego, las turísticas, y el consumo urbano de las poblaciones cercanas. Todo ello ha hecho descender los niveles potenciométricos de forma paulatina en el último decenio en todo el sector y consecuentemente el aumento de la zona de mezcla. En este estudio discutimos el proceso de salinización en el área para el cual las variables conductividad, cloruros, bicarbonatos y sodio fueron estudiadas en el campo y el laboratorio. Diferentes variogramas direccionales fueron calculados para cada una de las variables estudiadas, detectándose una anisotropía zonal en la dirección 75°-165° y un comportamiento bastante variable en el origen. Como resultado se obtuvo que la región más afectada es la parte central-inferior donde los valores de las variables medidas llegan a alcanzar niveles alarmantes.

Palabras claves: Salinización, carso, variabilidad.

ABSTRACT: Nowadays, the water resources in Guane town are exploited to satisfy the irrigation plans and water demands of neighboring zones and tourism industry. All this has caused a gradual falling of potentiometric level during the last decade. In this study, the salinization process in the area is discussed by means of several variables, such as electrical conductivity, chlorides, bicarbonates and sodium. Were analyzed in the field and in the laboratory. Different directional variograms were calculated for all variables, and it was found a zonal anisotropy in the 75°-165° direction and a behaviour so variable in its origin. As a result it was shown that the most affected area is located in the central-lower part where values of measured variables reached critical levels.

Key words: Salinization, Karst, Variability.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la hidrogeología unos de los problemas que se plantea frecuentemente concierne a la inferencia estadística o estimación de valores de un parámetro físico en un dominio o volumen cualquiera, definido en un espacio P^1 , P^2 , P^3 .

Este problema se presenta de manera cotidiana en las investigaciones relacionada con la gestión de los recursos hidráulicos, en específico, donde es necesario calcular, por ejemplo, la lámina de escurrimiento caída sobre una cuenca en un período de tiempo, por consiguiente este valor servirá para cuantificar el volumen total de agua caída. Pero también podría tratarse de la estimación del valor de la conductividad, el cloruro o cualquiera de las variables tipo de una zona de mezcla. El objetivo del trabajo es precisamente el estudio de la salinización a través de las variables de conductividad, cloruros, bicarbonato y sodio a partir de criterios geoestadísticos.

Obviamente, si se desea una evaluación correcta del objetivo propuesto se debe conceder especial

importancia al método de estimación a utilizar, el cual permitirá un uso óptimo de la información disponible.

Para el hidrogeólogo los métodos más utilizados son aquellos que por sus características presentan información gráfica, por ejemplo: Inverso a la distancia, Triangulación, Interpolación lineal, Regresión polinómica, etc. Todos estos métodos si bien proporcionan una estimación insesgada del parámetro en el ámbito regional, no consideran en el cálculo la función de variabilidad o de correlación espacial del parámetro (variograma o covarianza). Por estas razones es cada vez más frecuente que los problemas relacionados con la estimación de variables espaciales y temporales tienda a ser tratada por métodos geoestadísticos, específicamente el Krigeage, el cual tiene como punto de partida el análisis de la variabilidad del fenómeno estudiado, obteniéndose una mayor bondad de los resultados obtenidos.

En este trabajo se presenta una síntesis del estudio de variografía realizado a un acuífero costero fuertemente afectado por la intrusión salina.

ANÁLISIS DE VARIABILIDAD

El semivariograma experimental

El semivariograma es la herramienta usada para el análisis de variabilidad o continuidad espacial, que se define como la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia h . (Journel y Huijbregts, 1978).

Los parámetros estudiados, están en función vectorial que cuantifica probabilísticamente la variabilidad espacial de los parámetros y que está definida por su incremento cuadrático medio (Matheron, 1965, 1970).

Esta función constituye el útil de base para la realización de cualquier estudio geoestadístico de estimación, al que posteriormente es necesario ajustar modelos teóricos al variograma experimental o empírico.

La función $g(h)$ es el semivariograma, y puede ser calculado por la expresión:

$$g(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

donde:

- $Z(x_i)$ son los valores observados del fenómeno en estudio.
- h es el paso para el cálculo del semivariograma.
- $Np(h)$ es el número de pares de valores $Z(x_i)$ en contrados a la distancia h .
- x_i son las localizaciones de los valores observados.

Después de calculado el semivariograma de presentan en una gráfico los valores de g contra h (Journel y Huijbregts, 1978). La forma gráfica de $g(h)$ según (Armstrong y Carignan, 1997; Krajewski y Gibbs, 1993) es creciente con los valores de h hasta cierto límite co-

nocido como meseta, el valor de h en este límite es el alcance, como se muestra en la Figura 1.

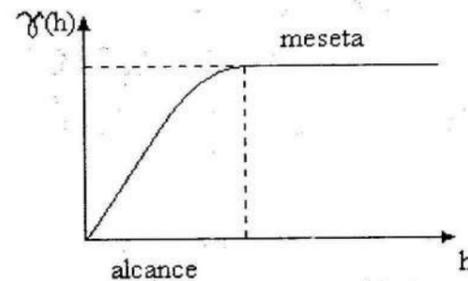


FIGURA 1. Aspecto del semivariograma.

UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El macizo hidrogeológico Guane se encuentra ubicado geográficamente en la Península de Guanahacabibes, zona más occidental de la Isla, en las siguientes coordenadas Lambert 150000,200000; 230000,270000. La geología de esta región está dada por una zona emergida (área de desarrollo de las formaciones jurásicas) y una plataforma carbonatada (área de la cuenca Guane) y con una zona arrecifal mar afuera (península actual de Guanahacabibes).

La superficie del terreno en la zona es eminentemente llana, ligeramente diseccionado. En el área están presentes varios tipos característicos de relieve, tanto emergidos como sumergidos de edad Pleistoceno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el análisis de los datos se pudo demostrar que la pérdida de la calidad de las aguas subterráneas de este acuífero está motivado por la intrusión salina. La red de muestreo hidrogeoquímico se muestra en la Figura 2.

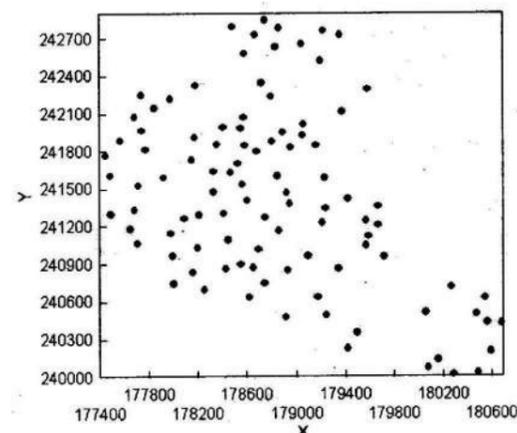


FIGURA 2. Distribución de los datos hidroquímicos en el sector de estudio. Mapa base.

La moderna hidrogeología estocástica no presenta solución de continuidad en lo referente al estudio de los efectos de las heterogeneidades del medio natural sobre el flujo subterráneo y el transporte de solutos. Entre los métodos inversos (combinan el análisis geoestadístico con una descripción numérica de la dinámica del flujo subterráneo) tienen gran interés los referentes a régimen no estacionario de cara a la optimización de redes hidrogeológicas de observación y muestreo, con el consiguiente ahorro en tiempo y dinero, además de la mayor precisión, aspectos que por sí solos justifican su aplicación (González, 1997).

OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE CONTROL

La optimización de la red de control se refiere a la existencia de un número de puntos a ser muestreados de manera que se obtenga el máximo de información con el menor número de puntos posibles, todo ello sobre la base de un objetivo a cubrir.

La optimización de los parámetros de muestreo se realiza sobre la base de los resultados del análisis multivariable, mientras que la de la red de muestreo se aplica a la optimización de la red de cloruros, a partir de los métodos que proporciona la Geoestadística. Para este último caso, el tratamiento se ha realizado con el paquete informático Variowin, 2.2 (1995).

OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE MUESTREO

Se parte de las similitudes calculadas mediante el análisis de clusters y los coeficientes de correlación, para conocer qué parámetros no precisan ser determinados por guardar un elevado grado de relación con otros de más fácil obtención. La matriz de correlación es muy expresiva al respecto; en ella se muestra la similitud existente entre las variables conductividad eléctrica, cloruro y sodio, de manera que conocida cualquiera de ellas se puedan determinar las otras, el cual es de 0.97 para dichas variables, de forma que se podría ahorrar la determinación de dos de ellas. Quiere esto decir que, por ejemplo, en la red de control no habría por qué determinar la conductividad eléctrica y el contenido en cloruros, puesto que con una de las dos sería suficiente para conocer la otra.

TABLA.1 Matriz de correlación entre las variables identificadoras del fenómeno de intrusión marina.

	Continuidad	Cloruro	Bicarbonato	Sodio
Conductividad	1	0.97	0.24	0.95
Cloruro		1	0.03	0.97
Bicarbonato			1	0.01
Sodio				1

Dado que la conductividad es de medida más rápida, este es el parámetro que puede ser retenido para estudio futuros. En resumen, la red de control de la intrusión puede mantenerse con un único parámetro a determinar: la conductividad. En cuanto a la red hidroquímica general se puede alternar en las determinaciones aquellos parámetros que tienen con otros coeficientes de correlación superiores a 0.9; de esta forma se puede reducir las determinaciones y, por tanto, los costos en cada muestreo.

METODOLOGÍA EMPLEADA

El método citado (estudio variográfico, Krigeage) se ha aplicado al estudio del contenido en cloruros como parámetro más representativo de la calidad del agua del acuífero. De entre los muestreos disponibles se ha seleccionado el correspondiente a una serie de años, de 1968 hasta abril de 1998, por ser la que ofrece mayor fiabilidad y el que tiene mayor número de determinaciones de Cl^- .

En síntesis se ha empleado el siguiente método:

1. Verificación estadística inicial de los datos de contenido en cloruro disponibles, con el fin de conocer los estadísticos principales.
2. Estudio variográfico, estableciendo variogramas teóricos con la finalidad de interpretar los rasgos direccionales del fenómeno (aumento de la variabilidad, o disminución de la correlación), en el contenido en cloruros, conductividad, sodio, bicarbonatos, cuando crece la distancia entre los puntos.

RESULTADOS OBTENIDOS

Tratamiento teórico: Los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología geoestadística descrita se refieren a cada punto empleado en el muestreo.

Análisis estructural: Se han calculado los variogramas experimentales del contenido en cloruros, sodio, bicarbonato, conductividad para diversas direcciones. Los cálculos se han desarrollado para un periodo de 30 años (1968-1998) para lo que se han dispuesto los valores hidrogeoquímicos medios anuales. Inicialmente le mostraremos el mapa de distribución de la red de muestreo: mapa base.

Los variogramas calculados en las distintas direcciones pueden ser observados en la Figura 3. Las aguas cloruradas cálcicas y sódico-cálcicas y conductividad eléctrica mostraron una anisotropía zonal en dirección 75-165°. No fueron ajustados los variogramas experimentales a modelos teóricos con el objetivo de seguir estudiando el comportamiento de las variables. El comportamiento de los variogramas en el origen es no continuo, y caracterizan a las variables cloruros, conductividad y sodio, lo que significa que las variables bajo estudio pueden presentar una aleatoriedad alta o que la red de

muestreo no es lo suficientemente densa como para describir la microvariabilidad de cada una de ellas. Todo ello parece caracterizar a un fenómeno como el de intrusión salina (Hernández, 1997), con gran variabilidad del contenido salino en la zona de mezcla. Esta discontinuidad puede deberse, además, a errores de medición, o a la aleatoriedad del proceso. Como el variograma es función de la distancia h y de la dirección θ , con la finalidad de detectar anisotropía (direcciones particulares de variabilidad) se procedió a calcular variogramas en diferentes direcciones del espacio con una tolerancia angular de 22.5° , por lo que se abarca todas las direcciones posibles.

Con ello se pretende interpretar los rasgos direccionales principales del fenómeno y revelar la estructura del mismo. La mayor variabilidad aparece para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste; estas coinciden normalmente con las direcciones de mayor permeabilidad en el acuífero y a favor de ellas se suele producir la intrusión.

La anisotropía que caracteriza el área de estudio es zonal y puede observarse en la Figura 3.

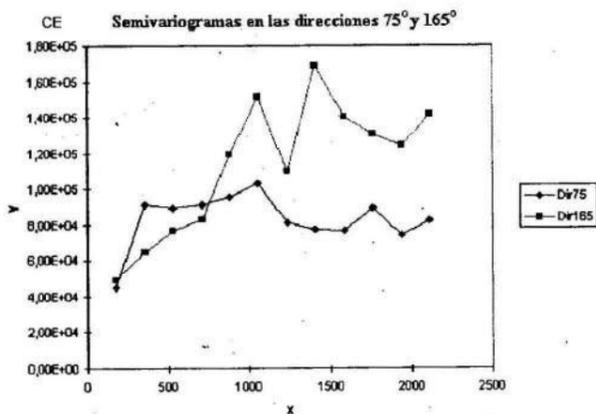


FIGURA 3. Semivariogramas

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Si la estadística proporciona métodos para la optimización de los parámetros de muestreo, la geoestadística aporta un conjunto de métodos y técni-

cas propias, de gran interés en el estudio ya que ha permitido estimar parámetros y optimizar red de adquisición de datos, con lo que se reduce el costo de muestreo y de los análisis de laboratorio sin pérdida significativa de información. La dificultad del método radica en que necesita un número importante de datos de partida con la finalidad de validar la robustez del estimador del mismo.

CONCLUSIONES

- La variabilidad de los parámetros cloruro, bicarbonato, conductividad y sodio mostró que las zonas más afectadas están localizadas en los puntos que aparecen pozos utilizados para el abasto.
- Se evidenció que las zonas altamente salinizadas coinciden con áreas donde tiene el carso su mejor manifestación.
- La Geoestadística aplicada es una herramienta importante en el estudio de los procesos de salinización de acuíferos.
- Los variogramas de las aguas cloruradas cálcicas y sódico-cálcicas y de la conductividad eléctrica mostraron una anisotropía zonal en dirección 75-165°.

BIBLIOGRAFÍA

- ARMSTRONG, M., y J. CARIGNAN: *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier*, École de Mines de Paris, 1997, 112 pp.
- GONZÁLEZ, A.: *Problema de salinización en el acuífero litoral del occidente de Huelva*, Ser, Publicaciones Universidad de Huelva, 1997.
- HERNÁNDEZ R.: "Caracterización hidrodinámica e hidroquímica del acuífero neógeno-Cuaternalio de Cuenca Guane". Tesis de Maestría, 1997.
- JOURNEL, A., y CH. HUIJBREGTS: *Mining Geoestatistic*, Ed. Academic Press, 1978, 600 pp.
- KRAJEWSKI, S. A. y B. L. GIBBS: *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 1993, 93 pp.
- MATHERON, G.: "Traite de géostatistique appliquée", I, II, en Memor. Bur. Rech. Geol. Min. Edit. Technip, París, 1962.
- ROMERO, E.: "Caracterización de la salinidad en el parque norte del Parque Nacional de Doñana", Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 1998.

Estudio de la lixiviación de la serpentinita niquelífera con ácidos orgánicos

Study of the Leaching of the Nickeliferous Serpentinite with Organic Acid

Noel Bruguera Amaran¹
 Juan Rodríguez Gamboa¹
 Orquídea Coto Pérez²
 Neicis Capote Flores³
 Pedro Rafael Bassas Noa³

¹ Departamento de Metalurgia. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa.

² Departamento de Microbiología. Facultad de Biología. Universidad de La Habana.

³ Centro de Investigaciones de la Laterita, Moa.

RESUMEN: En el trabajo se realiza un estudio sobre la lixiviación de la serpentinita niquelífera del yacimiento Punta Gorda, empleando para ello los siguientes ácidos orgánicos: acético, oxálico, cítrico, tartárico, tánico y salicílico. El ácido sulfúrico fue el reactivo de control.

Para la investigación se utilizó una muestra de mena serpentinita previamente seleccionada, homogeneizada y cuarteada, posteriormente dicha muestra se sometió a un proceso de molienda y clasificación. Se seleccionaron para las pruebas experimentales las partículas menores de 0.300 mm.

En el trabajo se analiza la influencia de la concentración inicial de diferentes ácidos orgánicos en disolución (0.05 - 0.5 m), la densidad de la pulpa (2 - 20 %) y la granulometría (-0.3 + 0.25 a - 0.045 + 0.0 mm) sobre la recuperación de níquel y cobalto. De los ácidos analizados, el que mejores resultados ofrece para la recuperación de níquel y cobalto a partir de la serpentinita niquelífera es el ácido cítrico.

Se demuestra que los factores estudiados influyen significativamente sobre la extracción de estos metales. Se observó que el incremento de la concentración inicial del ácido favorece la recuperación del níquel y el cobalto, alcanzándose más de un 80% de recuperación de níquel cuando la concentración inicial del ácido cítrico es de 0.5 m. El incremento en el tamaño de las partículas favorece la recuperación de los metales en estudio, en el intervalo de -0.045 + 0.0 mm hasta -0.25 + 0.2 mm. Por encima de esta última clase de tamaño no se aprecia una influencia significativa en la extracción de níquel y su valor máximo alcanza el 90%. El incremento en la densidad de la pulpa, a diferencia de los parámetros anteriores, no favorece la recuperación de níquel y cobalto. Las mejores extracciones se alcanzaron con las pulpas más diluidas.

Palabras claves: Lixiviación, serpentinita niquelífera, ácidos orgánicos, níquel, cobalto.

ABSTRACT: In the work is accomplished a study on the leaching of the nickeliferous serpentinite of the Punta Gorda deposit, employing the following organic acids: acetic, oxalic, citric, tartaric, tannic and salicylic. The sulfuric acid was the reactive of control.

For the investigation was used an serpentinite ore sample previously selected, homogenized and quartered, afterwards such sample was submitted to a grinding and classification process.

Selecting for the experimental tests the particles of less than 0.300 mm. In the work was analyzed the influence of the initial concentration of different organic acids in dissolution (0.05 - 0.5 m), the density of the pulp (2 - 20%) and the grain (-0.3 + 0.25 to - 0.045 + 0.0 mm) on the nickel and cobalt recovery.

From the analyzed acids, the citric acid was the one that offers better results for the nickel and cobalt recovery based on the nickeliferous serpentinite.

It is demonstrated that the studied factors influence significantly on the extraction of these metals. It was observed that the increase of the initial concentration of the acid favors the nickel and cobalt recovery, reached more than a 80% of nickel recovery when the initial concentration of the citric acid is 0.5 m. The increase in the size of particles favors the recovery of the metals in study, in an interval from - 0.045 + 0.0 mm to - 0.25 + 0.2 mm. Over this last class of size there is not appreciated a meaningful influence in the nickel extraction and its maximum value reaches 90%. The increase of the pulp density, on the contrary to previous parameters, does not favor the nickel and cobalt recovery. The best extractions were reached with the most diluted pulp.

Key Words: Leaching, Nickeliferous Serpentinite, Organic Acids, Nickel, Cobalt.

INTRODUCCIÓN

Los minerales lateríticos presentan en su perfil una marcada heterogeneidad mineralógica y química, debido a las transformaciones que sufren estos minerales durante los procesos de intemperización. Además, las formas de migración geoquímica de los diferentes elementos, los procesos de disolución del níquel de las capas superficiales y su precipitación en los horizontes inferiores (zona de serpentinita lixiviada o roca muy alterada), ayudan a entender el comportamiento y los cambios de fases que ocurren en los procesos industriales donde se tratan estos minerales (Rojas Purón 1996).

En trabajos experimentales sobre lateritas Capote, Rojas Purón y Bassas, 1993 plantean que solamente de un 1-3% del níquel se encuentra en forma fácilmente soluble, por lo que prácticamente el 97% del níquel está asociado a una forma mineral determinada; siendo esta una de las razones que no permiten el aprovechamiento integral de estos minerales por las tecnologías existentes.

En la actualidad, la hidrometalurgia ha dirigido sus esfuerzos hacia la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento de las lateritas niquelíferas a nivel mundial, tomando un significativo auge el uso de la biolixiviación.