

28. PIOTROWSKA K.: "Nappe structures in the Sierra de los Organos, western Cuba". *Acta Geol. Pol.*, V. 28, No. 1, p. 97-170, 1978.
29. PIOTROWSKA J.: "First manifestations of volcanism in the Cuban geosyncline". *Bull. Acad. Pol. des Scienc.*, Ser. Scienc. de la Terre, V. XXIV, No. 314.
30. PSZCZOLKOWSKI A., et al.: Texto explicativo al mapa geológico 1:250 000 de la provincia de Pinar del Río. (inéd), I.G.P., La Habana.
31. _____: "Nappe structure of Sierra del Rosario (Cuba)". *Bull. Acad. Pol. des Scienc.*, Ser. Scienc. de la Terre, V. XXIV, No. 314, 1977.
32. _____: "Geosynclinal sequences of the Cordillera de Guaniguanico in western Cuba; their lithostratigraphy, facies development and paleogeography". *Acta Geol. Pol.*, V. 28, No. 1, p. 1-96, 1978.
33. _____: "Cretaceous sediments and paleogeography in the western part of the Cuban miogeosyncline". *Acta Geol. Pol.*, V. 32, No. 1-2, p. 135-161, 1982.
34. _____, Y ALBEAR J. F.: "Subzona estructuro-facial de Bahía Honda, provincia de Pinar del Río, Cuba; su tectónica y datos sobre la sedimentación y paleografía del Cretácico superior y del Paleógeno". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 5, 1982.
35. _____: "La secuencia vulcanógeno sedimentaria de la Sierra del Rosario. Provincia de Pinar del Río". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 6, 1983.
36. _____: "Tectónica del miogeosinclinal cubano en el área limítrofe de las provincias de Matanzas y Villa Clara". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 6, 1983.
37. _____: "La edad del metamorfismo y la tectónica de la Faja Cangre en la Sierra de los Organos". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 5, 1985.
38. RIGASSI D.: "Sur la géologie de la Sierra de los Organos, Cuba". *Ext. des. Arch. de Scienc.* Gênevê. V. 16, p. 339-350, 1963.
39. RODRIGUEZ P.: "División estratigráfica de la Fm. Esperanza y comparación de los cortes de las subzonas Esperanza y Sierra del Rosario". Mem. III Encuentro Cient. Téc. de Geol., S.C.G. Pinar del Río, p. 46-49, 1987.
40. RODRIGUEZ R. Y LOPEZ J. G.: "Nuevos datos sobre la tectónica de Pinar del Río a partir de la prospección petrolera". *Bol. de Geoc.*, V. 2, No. 1, p. 56-71, 1987.
41. SITTE L. U.: *Geología estructural*. Barcelona, Omega, 1962.
42. SOLOVIEV O. N., et al.: "Comentarios sobre el mapa gravimétrico de la Isla de Cuba". *Rev. Téc.*, V. 2, No. 2, 1964.
43. SOMIN M. L.: "Tectónica de Cuba: ideas basadas en el estudio de sus complejos metamórficos". VIII Jorn. Cient. I.G.P., La Habana.
44. _____, Y MILLAN G.: *Geología de los complejos metamórficos de Cuba* (en ruso). Ed. Nauka, Moscú, 1981.
45. STANIK E., MANOOUR J., CHING R.: "Informe Escambray I." (inéd.), Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, 1981.
46. TRUITT P.: "Preliminary report of the Viñales are (inéd)", Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, 1955.
47. _____ Y BRONNIMANN, P.: "Geology of Pinar del Río province and Pinos Island (inéd)". Centro Nacional del Fondo Geológico, La Habana, 1956.
48. TURNER L. W. J.: *Petrología ígnea y metamórfica*. Barcelona, Omega, 1963.
49. VERMUT L. W. J.: "Geology of the province of Pinar del Río, Cuba". *Congr. Geol. Med., Phys. Geol. Reeks*, No. 13, p. 1-60, 1937.
50. VUAGNAT M.: Report on the investigations of ultramafic rocks in Cuba. I.C.C.C., La Habana, p. 35, 1959.
51. VUAGNAT M.: "Report on the investigations of ultramafic rocks in Cuba." I.C.C.C., La Habana, p. 35, 1959.
52. WASSAL H.: The relationship of oil and serpentine in Cuba. XX Internat. Geol. Congress., México, p. 67-77, 1956.

CUBANIQUEL

Empresa Cubana Exportadora de Minerales
y Metales

CUBANIQUEL
Cuban Mineral and Metal
Exporting Enterprise

ESTUDIO PRELIMINAR DE LA LIXIVIACION ACIDA EN LOS RESIDUOS SOLIDOS DE LA LIXIVIACION ALCALINA DE LAS LATERITAS

Ing. Eulicer Fernández Maresma,
Ing. Luis Mora Cervantes

Instituto Superior Minero Metalúrgico

RESUMEN: En el presente trabajo se analiza la influencia de la lixiviación alcalina de los minerales lateríticos previa al proceso de lixiviación ácida, con el objetivo de incrementar la recuperación de níquel y cobalto, por ello se trataron de forma paralela el mineral sin tratamiento alcalino y al tratado previamente.

Los aspectos analizados fueron: Tiempo de lixiviación; temperatura y relación ácido mineral. En todos los casos se obtuvieron resultados positivos, fundamentalmente en lo relacionado con la extracción de níquel y cobalto y la disminución del consumo de ácido de aproximadamente 82,797 a 57 321 t de ácido/año, que según el costo actual de producción asciende a un valor de 1 930 378,80 - 1 336 476,2 pesos por año.

ABSTRACT: In the present work the analysis of the influence of the alkaline lixiviation of the lateritic minerals is being carried out with reference to the process of acid lixiviation with the aim of increasing the recovery of nickel and cobalt, for that it was made of parallel form the mineral without the alkaline treatment and the already treated.

The analysed aspects were as follows: Time of lixiviation, temperature and relation acid-mineral. In all cases, it resulted positive especially in the case of extraction of nickel and cobalt, and the decrease of consumption of acid of approximately 82,797 a 57 321 ton of acid/year; that following the actual cost of production rises to a value of 1930 378,80 - 1336 476,2 pesos per year.

INTRODUCCION

En la actualidad se realizan diversos trabajos encaminados a aumentar la producción de níquel y cobalto y disminuir sus costos de producción. Dentro de estos se incluye el presente trabajo, el cual tiene como objetivo analizar la influencia que sobre la eficiencia de extracción de níquel y cobalto, así como en el consumo de agente lixivante, tiene el tratamiento del mineral laterítico mediante una lixiviación alcalina antes del proceso de lixiviación ácida.

La fábrica "Comde Pedro Sotto Alba" en Moa es uno de los centros dedicados al tratamiento del mineral laterítico y uno de los más importantes para la economía del país. La misma tiene como objetivo fundamental la producción de sulfuros de níquel y cobalto, producto semielaborado que se obtiene al someter el mineral a diversos procesos físicos y físico-químicos a través de las diferentes plantas.

La lixiviación es uno de los procesos a que es sometido el mineral, la cual tiene como objetivo lograr una alta extracción de níquel y cobalto con el menor consumo de agente lixivante (ácido sulfúrico) y la perfecta separación de estos del hierro, cromo y aluminio, en el mismo inicio del esquema tecnológico esto garantiza una alta economía del proceso en comparación con otros esquemas tecnológicos de elaboración de minerales oxidados de níquel.

El ácido sulfúrico es un factor que determina el costo de producción del concentrado sulfuroso de níquel y cobalto. En los últimos años se ha observado un incremento en el consumo de ácido en tanto que las extracciones de níquel y cobalto se mantienen inferiores a las diseñadas.

En trabajos realizados [4, 5] se ha podido conocer que el aluminio consume del 45 - 50 % del ácido alimentado al proceso, además de ser uno de los componentes principales de las costras que se forman durante la lixiviación, de las cuales la mayor parte (99,9 % aproximadamente) se precipita en la superficie de las partículas de mineral formando una película de 0,4 - 0,6 micrones de espesor, disminuyendo la difusión del reactivo lixivante (ácido sulfúrico) hacia el centro de las partículas de mineral y con ello la velocidad de lixiviación de las combinaciones nativas de níquel y cobalto, provocando pérdidas de estos metales [4].

Los principales componentes minerales de las menas níquelíferas que se procesan en la empresa "Comde Pedro Sotto Alba" son [4]

- Hidroghetita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
- Hematita ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$)
- Maghemita ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$)
- Magnetita (Fe_3O_4)
- Asbolana [$(\text{Co}, \text{Ni})\text{O} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$]
- Hidrargilita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)
- Cuarzo (SiO_2)
- Serpentina ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- Espinelas [$(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}, \text{Mg})\text{O} \cdot (\text{Fe}, \text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$]

La mena está representada fundamentalmente por una fracción muy fina (gohetita, arcilla, espinelas) y una fracción gruesa (serpentina).

La mayor parte del níquel (70-80 %) está relacionada con la gohetita, la misma se disuelve fácil y rápidamente durante el tratamiento con ácido sulfúrico. El resto (20-30 %) está relacionado con la fracción más resistente, o sea la maghemita y las espinelas [4].

La muestra seca contiene como promedio 1,35 % de níquel; 0,13 % de cobalto; 0,024 % de cobre; 0,040 % de zinc; 47 % de hierro; 0,76 % de manganeso; 1,0 % de magnesio; 5,0 % de aluminio; 1,9 % de cromo y 3,7 % de sílice [4].

Según los estudios realizados por Carlson y Simons [2] las lateritas de Moa contienen de 10-15 % de espinelas complejas. Durante las investigaciones realizadas por Sobol [5], se demostró la pertenencia de estos minerales a las espinelas en las cuales la masa principal del mineral está compuesta por maghemita (γ -Fe₂O₃) y una pequeña parte de magnetita (Fe₃O₄). R. Shredrer y Q. Butnner [3] plantean en investigaciones que la maghemita (γ -Fe₂O₃) puede ser estable sólo en el caso de que en su red cristalina entren pequeñas cantidades de moléculas de agua (hasta 1 %) o hasta 0,5-1,8 % de FeO, estos autores consideran además que iones de Ni y otros elementos pueden ser estabilizadores de la red cristalina de maghemita. En el trabajo [5] se demostró que en la red cristalina de maghemita entran Ni⁺², Co⁺², Al⁺³.

En la empresa la mena es tratada con ácido sulfúrico a temperatura de 245-250 °C y una relación ácido mineral 0,225 - -, 245.

Del estudio realizado por Sobol [4] se demostró que las costras están formadas fundamentalmente por aluminio (producto de la hidrólisis del sulfato de aluminio) y que la mayor parte de estas se depositan sobre la superficie de las partículas del mineral dificultando la lixiviación tanto del mineral de fácil lixiviación (no magnético) como la maghemita. La destrucción de la maghemita en condiciones de

lixiviación ácida es el resultado de la acción de factores químicos [5], esta descomposición ocurre en condiciones desfavorables debido al recubrimiento de las partículas de mineral por las costras que crea una resistencia de difusión considerable a la penetración de la solución de ácido sulfúrico.

En los minerales lateríticos de Moa el aluminio se encuentra fundamentalmente en forma de hidrargilita, siendo esta forma mineralógica [1] la de mayor velocidad de disolución en álcalis, lo cual facilita el tratamiento del mineral laterítico por este método.

La lixiviación del mineral laterítico con álcalis fue estudiada anteriormente obteniéndose para las condiciones de temperatura de 225 °C y concentración de álcalis 200 g/dm³ extracciones de 78,85 %; y un efecto económico (ganancia) de 638,6 pesos/t de lateritas. En este trabajo se realizaron algunas pruebas de tratamiento de las colas de la lixiviación alcalina mediante lixiviación ácida a presión; los resultados evidenciaron la posibilidad de aumentar la extracción de níquel y cobalto. Tomando como base estos resultados nos dimos a la tarea de realizar un trabajo más detallado y profundo sobre la lixiviación ácida de las colas del procedimiento alcalino.

Una muestra del efecto de la lixiviación alcalina sobre el mineral aparece en la tabla 1. Como se aprecia durante estos se extrae aproximadamente el 57 % del aluminio presente en el mineral.

TABLA 1. Composición química de las muestras antes de la lixiviación

Muestras	Contenido en %			
	Ni	Co	Fe	Al
Antes de la lixiviación básica (alcalina)	1,19	0,119	46,91	5,34
Después de la lixiviación básica	1,41	0,239	49,15	2,7

DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE MINERAL Y ACIDO

Para la experimentación se utilizaron autoclaves de titanio cuyo volumen total es de 0,065 dm³; para garantizar un régimen hidrodinámico de movimiento de la pulpa con un Reynolds de 1 300 - 1 500, son rellenados a un 75 - 85 % de su volumen total.

Para conocer la cantidad de mineral y ácido se procedió a preparar una pulpa con un contenido aproximado de 45 % de sólido a la cual se le determinó la densidad (1,39 kg/dm³) al llenar las autoclaves hasta un volumen de 45 cm³ se determina la masa de la pulpa según:

$45 \cdot 1,39 = 62,55$ g de pulpa, de estos 45 % corresponde al sólido por tanto:

$62,5 \cdot 0,45 = 28,15$ g de mineral

Conociendo que en la empresa la relación ácido mineral utilizada actualmente oscila entre 0,235 - 0,245, la cantidad de ácido necesaria (tomando 0,24 como relación ácido mineral) sería:

$28,15 \cdot 0,24 = 6,76$ g de ácido sulfúrico

Para las relaciones ácido mineral 0,14 y 0,18 sería

$28,15 \cdot 0,14 = 3,94$ g de ácido sulfúrico

y $28,15 \cdot 0,18 = 5,067$ g de ácido sulfúrico

La cantidad de agua sería

$62,55 \cdot 0,55 = 34,4$ g de agua

Los experimentos fueron realizados por el método tradicional de investigación. Para todos los experimentos se montaron dos autoclaves con las colas de lixiviación alcalina y dos con el mineral, efectuándose para cada condición de trabajo tres pruebas como mínimo; los resultados tabulados son los promedios de estas, excepto para el experimento No. 1 que aparecen las tres.

a. Experimento No. 1: Se realizaron tres pruebas preliminares de lixiviación para las condiciones de temperatura (presión) y relación ácido mineral iguales a los utilizados en la planta de lixiviación actualmente. La pulpa obtenida se llevó a filtración, el licor se envió a análisis del níquel y cobalto. Los resultados aparecen en la tabla 2. Este experimento se realizó con el objetivo de tener una idea de la dirección de la investigación.

TABLA 2. Resultados de la lixiviación

	No. de pruebas	Temperatura °C	Relación A/M kg/kg	Tiempo min	Composición del licor g/dm ³	
					Ni	Co
MINERAL	1	250	0,24	90	6,6	1,088
	2	250	0,24	90	7,54	1,12
	3	250	0,24	90	7,3	1,16
COLAS	1	250	0,24	90	7,92	1,39
	2	250	0,24	90	8,1	1,25
	3	250	0,24	90	7,92	1,15

b. Experimento No. 2: En este experimento nos dimos a la tarea de analizar la cinética de lixiviación para las colas de lixiviación alcalina y el mineral, manteniendo constante la temperatura (presión) y relación ácido-mineral, variando el tiempo en el rango de 15, 30, 45, ..., 120. La pulpa obtenida en cada caso se somete a

filtración, luego se lava en seis etapas, se seca a una temperatura de 110 °C, y se envía a análisis químico, al igual que el filtrado.

Los resultados aparecen en las tablas 3, 4, (figura 1, 2, 3) para el mineral y las colas de lixiviación alcalina respectivamente.

TABLA 3. Resultados de la lixiviación ácida del mineral laterítico en función del tiempo

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)				Extracción %	
				Ni	Co	Fe	Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co
1	250	15	0,24	0,72	0,7	6,88	1,15	0,049	50,82	3,04	10,80	61,99
2	250	30	0,24	4,48	0,87	-	0,95	0,018	51,66	3,21	27,51	86,26
3	20	45	0,24	5,36	1,0	1,16	0,455	0,0091	50,54	3,88	64,51	92,90
4	250	60	0,24	7,48	1,0	0,16	0,14	0,0002	47,75	4,62	88,44	99,84
5	250	75	0,24	7,56	1,01	1,4	0,11	0,0003	49,71	4,72	91,28	99,76
6	250	90	0,24	7,68	1,05	0,64	0,107	0,0002	48,87	4,62	91,37	99,84
7	250	105	0,24	7,36	1,05	0,20	0,115	0,00016	48,59	4,50	90,67	99,87
8	250	120	0,24	7,36	1,0	1,88	0,11	0,00025	49,15	3,05	91,18	99,80

TABLA 4. Resultados de la lixiviación ácida de las colas de la lixiviación alcalina en función del tiempo

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)				Extracción %	
				Ni	Co	Fe	Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co
1	250	15	0,24	3,24	1,51	13,4	1,019	0,022	49,71	2,98	28,54	90,90
2	250	30	0,24	5,0	1,66	8,2	0,837	0,0075	49,99	2,76	41,64	96,91
3	250	45	0,24	8,9	1,76	1,8	0,11	0,00025	50,82	3,65	92,45	99,89
4	250	60	0,24	9,32	1,77	3,2	0,081	0,00024	50,82	3,65	94,44	99,90
5	250	75	0,24	9,32	1,80	0,6	0,0675	0,0002	51,38	3,65	95,42	99,91
6	250	90	0,24	9,36	1,80	1,0	0,067	0,0002	51,66	3,65	95,48	99,92
7	250	105	0,24	8,96	1,84	0,44	0,07	0,0002	51,38	3,60	95,25	99,92
8	250	120	0,24	8,52	1,88	0,55	0,084	0,0003	50,82	3,71	94,25	99,90

c. Experimento No. 3: Se realizó la lixiviación variando la temperatura en 150, 200, 225, 250 y una relación ácido mineral de 0,14 con un tiempo de lixiviación de 90 min. A la pulpa obtenida se le realiza

el mismo tratamiento que en b. Los resultados aparecen en las tablas 5 y 6 (figura 4, 5 y 6) para el mineral y las colas de lixiviación alcalina respectivamente.

TABLA 5. Resultados de la lixiviación ácida del mineral laterítico en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,14	0,37	0,134	0,08	0,017	1,17	0,071	51,24	9,99	45,38
2	200	90	0,14	1,67	0,67	0,20	0,017	0,95	0,0105	49,43	24,24	91,62
3	225	90	0,14	2,46	0,77	0,21	0,025	0,79	0,006	49,15	36,64	95,19
4	250	90	0,14	4,66	1,0	0,09	0,027	0,49	0,003	48,39	61,71	97,56

TABLA 6. Resultados de la lixiviación ácida de las colas de lixiviación alcalina en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,14	1,34	0,69	0,96	0,016	0,98	0,043	48,45	29,29	81,75
2	200	90	0,14	2,87	0,82	0,45	0,016	0,77	0,0045	48,73	44,92	98,10
3	225	90	0,14	3,79	0,96	0,44	0,027	0,63	0,0027	49,32	55,47	98,87
4	250	90	0,14	6,84	1,02	0,25	0,029	0,22	0,002	48,88	84,31	99,16

d. Experimento No. 4: La lixiviación se realiza igual que en el experimento anterior; pero con relación ácido mineral de 0,18. Los resultados aparecen en las tablas 7 y 8.

TABLA 7. Resultados de la lixiviación ácida del mineral laterítico en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,18	0,66	0,464	1,19	0,018	0,97	0,059	52,78	27,55	55,93
2	200	90	0,18	2,27	0,716	0,40	0,014	0,86	0,0095	49,15	31,02	92,38
3	225	90	0,18	5,82	0,794	0,75	0,028	0,56	0,003	49,71	55,59	97,62
4	250	90	0,18	6,88	1,03	0,10	0,033	0,19	0,0015	49,43	84,85	98,80

TABLA 8. Resultados de la lixiviación ácida de las colas de lixiviación alcalina en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,18	1,9	0,8	2,1	0,017	0,96	0,039	49,84	32,86	83,91
2	200	90	0,18	3,64	0,98	0,96	0,013	0,68	0,0035	48,88	51,51	98,53
3	225	90	0,18	7,74	1,14	0,68	0,030	0,28	0,0013	48,17	79,74	99,45
4	250	90	0,18	8,22	1,28	0,48	0,034	0,122	0,0005	48,31	92,20	99,79

e. Experimento No. 5: Este se realizó al igual que en los dos anteriores variando la temperatura con una relación ácido mineral de 0,24. Los resultados aparecen en las tablas 9 y 10.

TABLA 9. Resultados de la lixiviación ácida del mineral laterítico en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,24	1,06	0,664	3,80	0,018	0,91	0,05	53,05	32,58	62,85
2	200	90	0,24	3,65	1,00	4,74	0,027	0,77	0,0011	48,88	37,90	99,11
3	225	90	0,24	7,3	1,01	0,42	0,031	0,32	0,0003	49,15	74,33	99,75
4	250	90	0,24	7,68	1,05	0,64	—	0,107	0,0002	48,87	91,37	99,84

TABLA 10. Resultados de la lixiviación ácida de las colas de lixiviación alcalina en función de la temperatura

No. de pruebas	Temperat. (°C)	Tiempo (min)	Relación A/M kg/kg	Composición de la solución g/dm ³			Composición del sólido (%)			Extracción %		
				Ni	Co	Fe	Al	Ni	Co	Fe	Ni	Co
1	150	90	0,24	2,77	0,844	5,4	0,019	0,86	0,015	49,15	39,01	93,72
2	200	90	0,24	6,6	1,19	10,9	0,029	0,47	0,0009	48,59	66,28	99,62
3	225	90	0,24	8,25	1,26	1,89	0,032	0,25	0,0003	48,87	82,17	99,87
4	250	90	0,24	9,36	1,8	1,0	—	0,067	0,0002	51,66	95,48	99,92

VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

a. Estudio de la cinética de lixiviación para el mineral y las colas de lixiviación alcalina.

Durante el proceso de lixiviación, realizado para los diferentes tiempos se puede observar (figura 1 y 2) que la extracción de níquel y cobalto para el mineral y las colas de lixiviación alcalina se comporta en forma de una curva exponencial creciente en el tiempo, hasta un valor en el cuál se estabiliza; en ambos casos se aprecia que la estabilidad para las colas de lixiviación alcalina se alcanza en un tiempo menor que para el mineral y además las extracciones de Ni y Co son mayores.

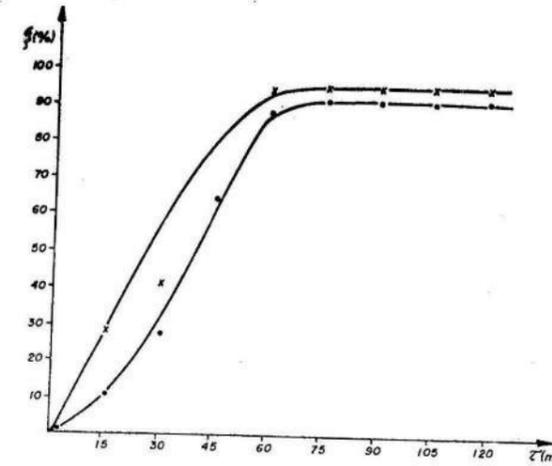


FIGURA 1. Extracción de Ni vs. τ
• mineral laterítico
x colas alcalinas

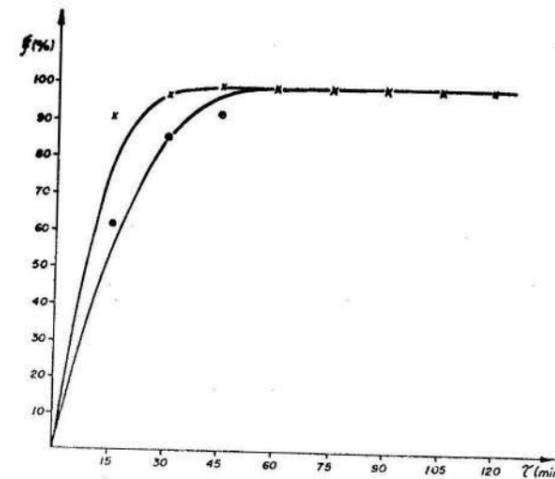


FIGURA 2. Extracción de Co vs τ
• mineral laterítico
x colas alcalinas

El hierro (figura 3) durante el proceso en ambos casos se comporta de forma similar, en los primeros momentos aumenta su contenido en el licor para disminuir luego al

aumentar el tiempo de lixiviación, lo que corrobora los aspectos teóricos de la hidrólisis del hierro lixiviado [4].

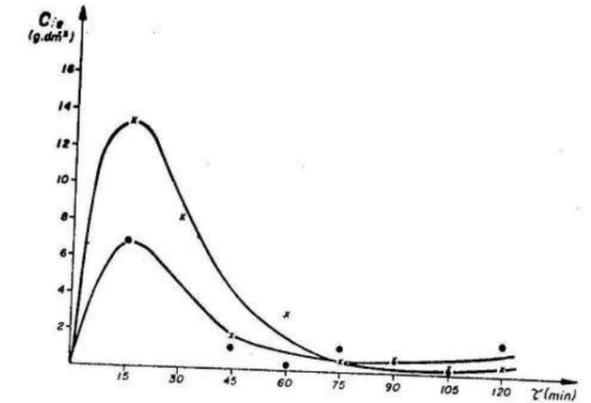


FIGURA 3. Concentración de Fe vs τ
• mineral laterítico
x colas alcalinas

b. Influencia de la temperatura en la lixiviación, para diferentes relaciones ácido mineral.

Durante los experimentos realizados se pudo observar que al aumentar la temperatura (figura 4, 5, 7, 9, 10 y 11) aumenta la extracción del Ni y Co, en todos los casos es superior para las colas de lixiviación alcalina. Analizando la influencia de la relación ácido mineral se observa (para la misma condición de temperatura y tiempo) que a medida que aumenta esta, aumenta también la extracción de Ni y Co, de eso lo más significativo es el hecho de que para la relación ácido mineral 0,18, temperatura 250 °C y 90 min de lixiviación (tabla 8), en las colas de lixiviación alcalina se alcanza una extracción de Ni mayor en 0,83 % que la del mineral para las condiciones de relación ácido mineral 0,24, temperatura 250 °C y 90 min de lixiviación (tabla 3).

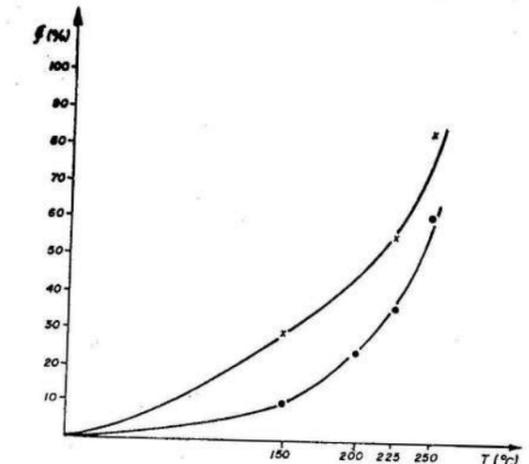


FIGURA 4. Extracción de Ni vs τ
• mineral laterítico
x colas alcalinas
 $\tau = 90 \text{ min}$
 $A/M = 0,14$

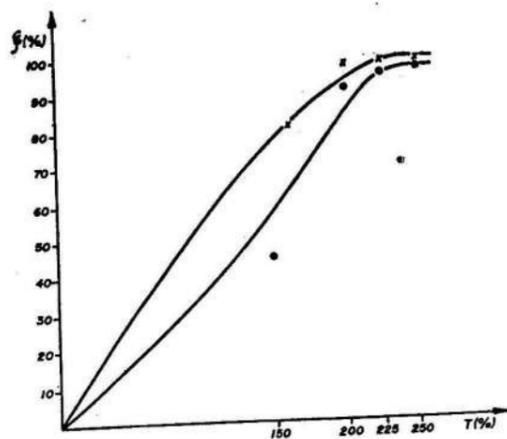


FIGURA 5. Extracción de Co vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,14
x colas alcalinas

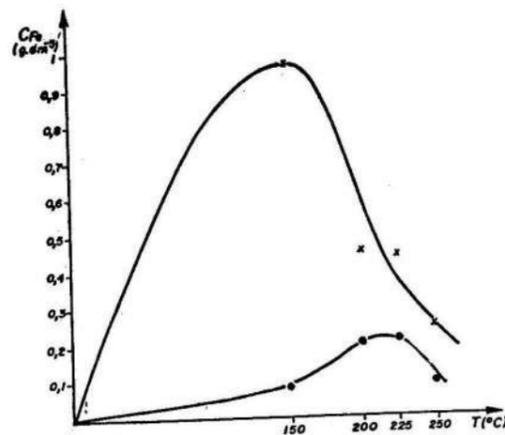


FIGURA 6. Concentración de Fe vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,14
x colas alcalinas

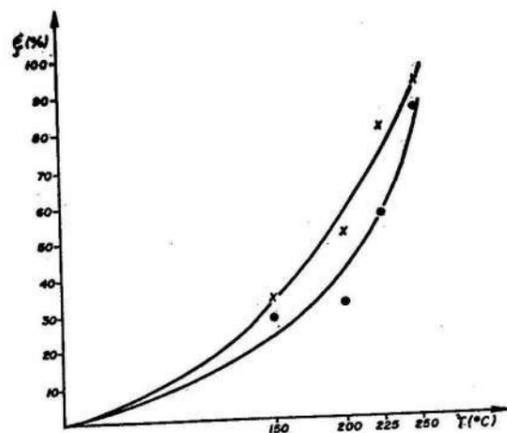


FIGURA 7. Concentración de Ni vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,18

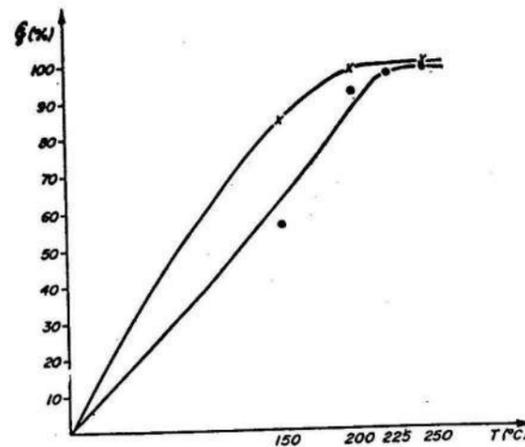


FIGURA 8. Concentración de Co vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,18
x colas alcalinas

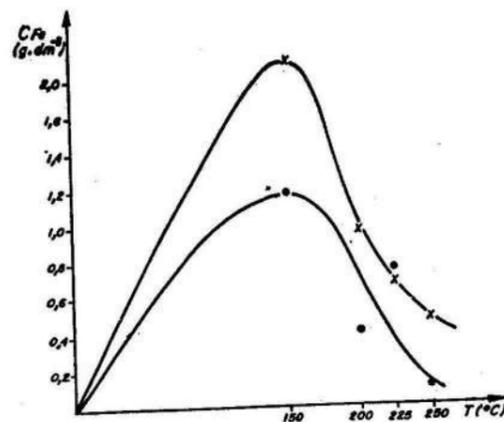


FIGURA 9. Extracción de Fe vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,18
x colas alcalinas

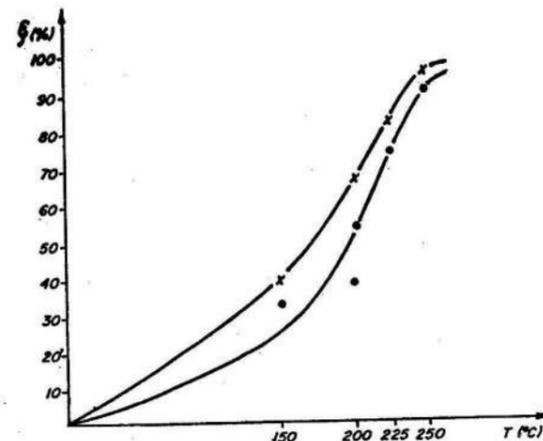


FIGURA 10. Extracción de Ni vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,24
x colas alcalinas

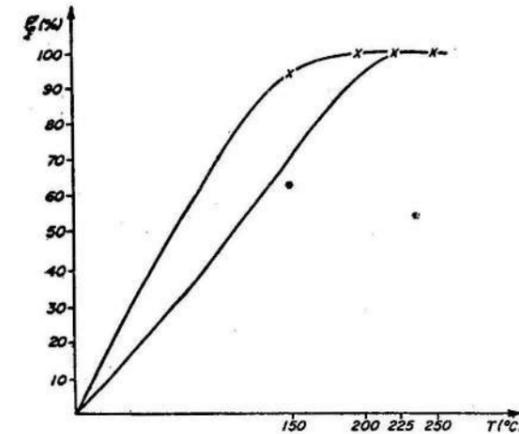


FIGURA 11. Extracción de Co vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,24
x colas alcalinas

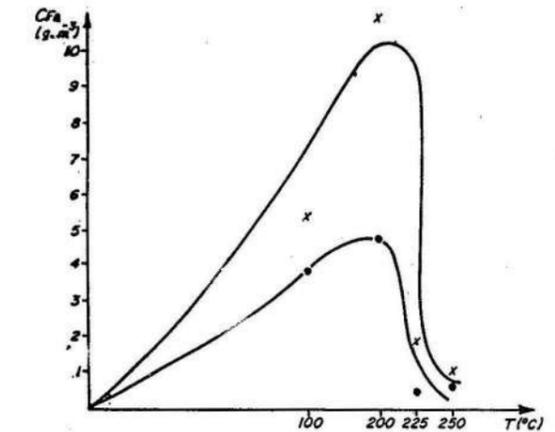


FIGURA 12. Concentración de Fe vs T $\tau = 90$ min
• mineral laterítico A/M = 0,24
x colas alcalinas

En las figuras 6, 9, 12 se aprecia que las concentraciones máximas de Fe en la solución se registran para las temperaturas de 150 - 225 °C; siendo esta superior en las colas de lixiviación alcalina en todos los casos; para

la temperatura de 250 °C, la concentración de Fe en la solución de las colas de lixiviación alcalina y del mineral varía entre 0,2 y 0,3 en valor absoluto; pero en todos los casos por debajo de 1 g/dm³.

VALORACION ECONOMICA DE LOS RESULTADOS

Actualmente a la planta de lixiviación llegan como promedio 3 860 t/d de mineral seco, el consumo de ácidos es de 0,245 t/d de mineral seco, lo que implica un consumo de 9 445,7 t/d. Si la planta trabaja 330 días al año serían 312 081 t, que de acuerdo al costo de producción de una tonelada representa 7 276 043,68 pesos/año.

Al lixiviar las colas de la lixiviación alcalina con una relación ácido mineral 0,18, se alcanzan extracciones de níquel similares a la del mineral puro con relación ácido mineral 0,24 por lo que se necesitaría 229 284 t/año de ácido, que representa un ahorro de 82 797 t/año, equivalente a 1 930 378,9 pesos.

CONCLUSIONES

El tratamiento de los minerales lateríticos con lixiviación alcalina (NaOH) antes del proceso de lixiviación ácida permite:

a. Realizando la lixiviación ácida a una temperatura de 250 °C y relación ácido mineral 0,24 y disminuyendo el tiempo de lixiviación hasta 60-75 min, se obtienen extracciones mayores, incluso para las condiciones actuales de 90-120 min. Esto posibilita el aumento de la capacidad de la planta.

b. Realizando la lixiviación ácida para las condiciones de temperatura 250 °C y tiempo de 90 min, disminuyendo el consumo específico de ácido sulfúrico en 82 797 - 57 321 t/año lo que representa entre 1 930 378,9 - 1 336 416,2 pesos por año y lograr extracciones similares a las existentes.

Durante la lixiviación ácida de las colas alcalinas, el Fe se lixivia con mayor facilidad que para el mineral no tratado lo que puede estar dado por la transformación durante la lixiviación alcalina de una forma mineralógica a otra, pero al aumentar el tiempo de lixiviación, así como la temperatura (225-250 °C) ocurre un descenso brusco de este en el licor lo cual corrobora los resultados alcanzados en el trabajo [4].

El aumento de las extracciones de níquel y cobalto durante la lixiviación ácida de las colas alcalinas se puede explicar de las siguientes formas:

Durante la lixiviación alcalina puede ocurrir que el aluminio presente en la red cristalina de la maghemita reaccione con el hidróxido de sodio (NaOH), lo cual trae como resultado la destrucción de la misma, con la consiguiente liberación de su estructura del Ni y Co que serán posteriormente lixivado con facilidad por el ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Durante la lixiviación alcalina se extrae (para las condiciones temperatura 150 °C y C = 150 g/L) alrededor del 57 % de aluminio; esto evidentemente debe conllevar a la disminución de las costras en el proceso de lixiviación ácida, facilitando la destrucción de la maghemita por el ácido sulfúrico, lixivando el Ni y Co presente en esta.

c. El incremento de las extracciones de níquel y cobalto puede estar dado también por la acción conjunta de las dos vías antes explicadas, es decir, la lixiviación de parte del aluminio de la red cristalina de la maghemita y la liberación del níquel y el cobalto y la disminución de las costras en la lixiviación ácida facilitando a su vez la destrucción de la maghemita y la lixiviación del níquel y el cobalto de la parte que no se descompone durante la lixiviación alcalina.

REFERENCIAS

1. BOLIARV, A. I.: *Metalurgia de los metales ligeros*. Moscú, Editorial Metalurgia, 1981.
2. CARLSON, E. T.; C. SIMMONS: *Extractive metallurgy of copper nickel and cobalt*. Editorial by Queneau intersc. Nueva York, 1960.
3. SCHREDER, R. y G. Z. BUTTGER: *Anorg. Allg. Chem.* 320, 5-6, p. 205-219, 1963.
4. SOBOL, S. I.: *Revista Tecnológica*. La Habana. 4, 4, 3-19, 1966.
5. SOBOL, S. I.: *Revista Tecnológica*. La Habana. 6, 5-6, 3-24, 1968.

TODO LO QUE USTED NECESITA SABER SOBRE PROTECCION Y USO RACIONAL DE LOS RECURSOS

En el Instituto Superior Minero Metalúrgico funciona el "Centro de Estudios de Protección y Uso Racional de los recursos naturales el cual oferta:

- Cursos de Post-Grado.
- Entrenamiento
- Consultoría
- Maestría
- Evaluación del Terreno
- Ensayos de laboratorio
- Asistencia Técnica
- Proyectos en Ingeniería Ambiental

Visitenos y disfrutará del cálido sol caribeño

Diriga su correspondencia a:
C.Dr. Rafael Guardado Lacaba
Instituto Superior Minero Metalúrgico
Vice-Rectoría de Investigaciones y Post-grado
Las Coloradas,
Moa, Holguín
Cuba
Telef.: 6 6678 - 6 4476 - 6 4214

SOBRE LA MODELACION MATEMATICA DEL PROCESO DE CALCINACION DEL CARBONATO BASICO DE NIQUEL EN EL HORNO TUBULAR ROTATORIO

Ing. Angel O. Columbié Navarro; Ing. Daniel Guzmán del Río

Instituto Superior Minero Metalúrgico

RESUMEN: En este trabajo se expone el modelo matemático del proceso de calcinación de carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio, obtenido por los autores sobre la base del análisis del proceso como objeto de regulación automática. El modelo resulta un sistema de 23 ecuaciones diferenciales a derivadas parciales y algebraicas, que relacionan los principales parámetros del objeto y describen su comportamiento en cualquier momento de tiempo y posición del horno, poniéndose de manifiesto la alta complejidad del intercambio térmico y de masa en el mismo.

ABSTRACT: In this work the mathematical model is exposed about the calcination process of the basic nickel carbonate in the rotary kiln. It was arrived at by the authors on bases of analysis of the process as automatic regulation object. This model give rise to 23 simultaneous algebraic and differential equations by partial derivatives, which relate the principal parameters of the object. This equations describe its functioning at all the time and kiln's position, bringing to light the high complexity of the heat and mass exchange within.

Para llevar a cabo la automatización integral del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel resulta necesaria la modelación matemática de dicho proceso. En un trabajo anterior [1], se realizó un detallado análisis de este proceso como objeto de regulación automática, donde se destacan los principales parámetros y su clasificación desde el punto de vista del control automático.

Por las características constructivas y tecnológicas del horno de calcinación, el modelo matemático más acertado debe conformarse a derivadas parciales, por ser éste un objeto, que puede considerarse como de parámetros distribuidos.

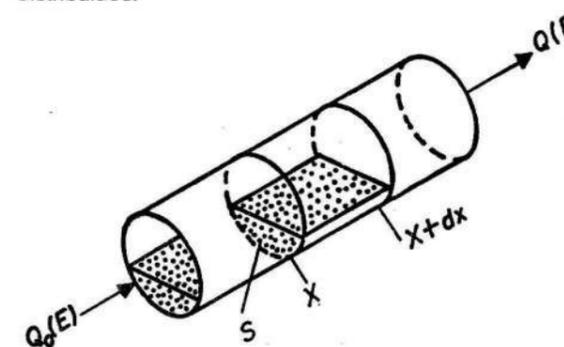


FIGURA 1. Esquema para la conformación del modelo matemático del proceso de calcinación.

El planteamiento del balance energético para un tramo diferencial del horno (figura 1) arroja.

$$\rho c S \frac{\delta \theta(x,t)}{\delta t} = \rho c [Q(x,t) \theta(x,t) + Q(x+dx,t) \theta(x+dx,t)] + K_1 dx [\theta_g(x,t) - \theta(x,t)] + K_2 dx [\theta_p(x,t) - \theta(x,t)] - Q_{quím} \quad (1)$$

Donde

ρ - densidad del sólido

c - calor específico del sólido

s - sección transversal del sólido

$\theta, \theta_g, \theta_p$ - temperaturas del sólido, gas y pared respectivamente.

$Q_{quím}$ - calor de las reacciones químicas.

K_1 - coeficiente de transferencia de calor del gas al sólido por unidad de longitud

K_2 - coeficiente de transferencia de calor de la pared al sólido por unidad de longitud.

El calor del gas al sólido se transmite por radiación y por convección [2], y resulta válida para el coeficiente de transferencia de calor la expresión:

$$\alpha_{gs} = \alpha_g + 4,96 \cdot 10^{-8} \epsilon_g (\epsilon_g \theta_g^4 - \epsilon_g''' \theta^4) / (\theta_g - \theta) \quad (2)$$

donde el segundo término de la parte derecha toma en consideración la transferencia de calor por radiación, y el coeficiente α_g tiene en cuenta la transferencia de calor por convección.

$$\alpha_g = 17,8 (\lambda_g D)^{0,7} (Vg/Cg)^{0,8} \quad (3)$$