

Elementos de las tierras raras y del grupo del platino en el proceso CARON de extracción de níquel y cobalto en Cuba

Rare earth and platinum group elements in the CARON nickel and cobalt extraction process in Cuba

Sorangel Rivas-Romero^{1*}<https://orcid.org/0000-0003-3884-8149>

¹ Centro de Investigaciones del Níquel, Holguín, Cuba

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: srivas@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

Con el objetivo de identificar la presencia de elementos que conforman el grupo de las tierras raras y del grupo del platino en el flujo productivo de extracción de níquel y cobalto de la empresa cubana Comandante Ernesto Che Guevara, fueron tomadas muestras en diferentes secciones del esquema tecnológico. Para la selección de las muestras a estudiar se tuvo en cuenta los puntos del proceso donde el material sufre transformaciones físicas y/o químicas. Para la caracterización química se utilizaron como métodos analíticos: la fusión con borato de litio, seguido de la medición por ICP-OES para los óxidos mayoritarios y por ICP-MS los elementos trazas, en el caso de las tierras raras; y la concentración por ensayo al fuego con sulfuro de níquel, con la posterior medición por activación neutrónica, para los del grupo del platino. Se concluyó que el elemento mayoritario

es el escandio y que la tecnología no extrae los elementos raros y los platinoides, pasando estos en mayor cuantía al residuo sólido del proceso.

Palabras clave: tierras raras; elementos del grupo del platino; escandio; CARON.

ABSTRACT

In order to identify presence of the elements that belonging to the rare earth and the platinum group in the extraction process of nickel and cobalt from Commander Ernesto Che Guevara Cuban enterprise, samples were taken in different sections of the technological scheme. For the sample selection that was studied, were taken into account those process points where the material has undergone physical and / or chemical transformations. For the chemical characterization the following analytical methods were used: in the case of rare earths, lithium borate fusión, followed by measurement by optical ICP for major oxides, and trace elements by mass ICP; using the concentration by fire test with nickel sulphide for those of the platinum group, with the subsequent measurement by neutron activation. It was obtained that the scandium is majority element and that the technology does not extract rare elements and platinoids, passing these in greater quantity to the solid residue of the process.

Keywords: rare earth; platinum group elements; scandium; CARON

Recibido: 15/01/2023

Aceptado: 18/04/2023

Introducción

Las tierras raras (ETR) constituyen un grupo compuesto por 17 elementos (cerio- Ce, lantano- La, praseodimio- Pr, neodimio- Nd, prometio- Pm, samario- Sm,

europio- Eu, gadolinio- Gd, terbio- Tb, disprosio- Dy, holmio- Ho, erbio- Er, tulio- Tm, iterbio- Yb, lutecio- Lu, escandio- Sc e itrio- Y). Son muy cotizados por su uso en las nuevas tecnologías, que van desde la utilización en los reactores nucleares a tecnología láser, pasando por baterías, combustibles, filtradores de radiación, equipos de iluminación, autos eléctricos y misiles teledirigidos.^(1,2)

Los elementos del grupo del platino (EGP) se componen de seis metales preciosos: platino- Pt, paladio- Pd, rodio- Rh, rutenio- Ru, iridio- Ir y osmio- Os. Estos elementos además de sus usos tradicionales en la joyería y la industria monetaria, tienen especial y creciente demanda para la electrónica, las tecnologías de súper-conductividad, en la automovilística de alto rendimiento, catalizadores químicos y en la medicina para la cura del cáncer.⁽³⁾

Diversos autores afirman que existe presencia de elementos de las tierras raras y del grupo del platino en las lateritas ferruginosas, en concentraciones de hasta 0,640 gramos de ETR y 0,600 miligramos de EGP por kilogramo de material laterítico; ^(4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14) sin embargo, en Cuba la explotación de estos minerales ha estado centrada en la extracción del níquel y el cobalto. La industria niquelífera cubana se enfrenta en la actualidad al agotamiento de los yacimientos existentes en el nordeste holguinero, por lo que se hace necesario el aprovechamiento integral de los recursos minerales.

Teniendo en cuenta esta premisa, es necesario un estudio más profundo de identificación de estos elementos en los minerales en cuestión, así como su comportamiento a través del flujo productivo de las plantas cubanas productoras de níquel y cobalto, que sirvan de base para futuras propuestas de tecnologías de recuperación de los mismos; pudiendo ser esta una de las soluciones para lograr la sostenibilidad de las industrias ya existentes.

Una de las plantas metalúrgicas en explotación para la producción de concentrados de níquel y cobalto en Cuba, es la Comandante Ernesto Che Guevara (ECG), que utiliza la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal o proceso CARON. El esquema tecnológico de este proceso consta de seis partes fundamentales:

- sección de secado y molienda de las menas lateríticas,
- reducción de las menas,
- lixiviación atmosférica del material reducido, utilizando como agente lixivante una solución carbonato amoniacal,
- recuperación de amoníaco y producción de sulfuro de Ni + Co, mediante precipitación;
- calcinación y sinterización, donde se obtienen el sinter de Ni que es el producto líder y óxidos de Ni como subproductos,
- producción de sulfuro de Ni, como parte del tratamiento aplicado a un residual.

En este proceso fabril fue desarrollada la investigación, que tuvo como objetivo identificar y definir la concentración de los elementos de las tierras raras y del grupo del patino a lo largo del esquema tecnológico.

Materiales y métodos

Materiales

Las menas lateríticas alimentadas a la planta, en el período en que se realizó el muestreo, procedieron de los yacimientos Camarioca Este, Yagrumaje Sur, Yagrumaje Norte y Punta Gorda.⁽¹⁵⁾

Métodos

Las muestras fueron tomadas en las diferentes etapas del proceso; para la selección de los puntos de muestreo (figura 1) se tuvo en cuenta las transformaciones físicas y/o químicas a que son sometidas las menas lateríticas a lo largo del esquema tecnológico. La recolección de muestras fue replicada tres

(3) veces, realizándose el análisis de los resultados con los promedios de los valores de las concentraciones de cada elemento, en cada una de las muestras.

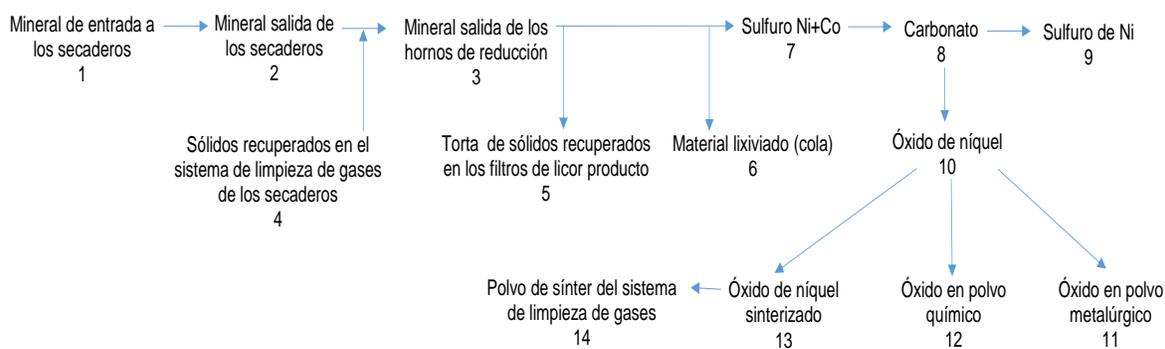


Fig. 1- Puntos de muestreo

Las muestras de pulpas fueron filtradas y lavadas con agua desionizada ^(5, 6, 8); las muestras 1, 2, 3 y 4 (materiales sólidos), además de la 5 y 6, se fraccionaron por tamaño de partículas mediante el tamizado por vía húmeda, las partículas inferiores a 0,074 mm fueron fraccionadas utilizando densogrametría; el resto de las muestras sólidas ^(7, 9, 10, 11, 12, 13 y 14) no tuvieron tratamiento específico.

En la separación densogramétrica se le denominó arena a la fracción retenida en el cono del elutriador; partículas con densidades iguales o superiores a: 1,5 t/m³ en la mena laterítica alimentada al proceso, en la mena laterítica luego del proceso de secado y en los sólidos recuperados en el sistema de limpieza de los gases del secado; 1,53 t/m³ en el material reducido; 1,56 t/m³ en el material lixiviado y 1,44 t/m³ en los sólidos recuperados en el filtrado del licor producto de la lixiviación.⁽¹⁵⁾ Los denominados finos son las partículas obtenidas por el rebose del elutriador con densidades inferiores a las declaradas anteriormente.

Para la determinación de Ni, Co, Fe, Al, Cr, Si, Mn y Mg se utilizó la fusión de 0,2 g de muestra con 2 g de fundente borato y lectura por espectrometría de absorción atómica (equipo modelo contrAA 300 Analytikjena). Los ETR se determinaron mediante la fusión de 0,2 g de muestra con 2 g de borato de litio, realizando la medición por ICP-OES (Inductively coupled plasma mass

spectroscopy) para el caso de los óxidos mayoritarios (equipo de la firma Varian - marca Vista 735) y por ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectroscopy) los elementos trazas (equipo de la firma Perkin Elmer-marca Nexion). Para determinar los EGP se procedió a la concentración por ensayo al fuego utilizando 10 g de muestra, carbonato de sodio, bórax, níquel y azufre en polvo, fundiendo en un crisol de cerámica a 900 °C, obteniéndose un botón de sulfuro de níquel; realizando la medición por activación neutrónica (equipo con detector Ge con resolución superior a 1,7 KeV para el fotopico Co-60 de 1 332 KeV).

Los resultados obtenidos fueron procesados con las herramientas computacionales Microsoft Excel 2013 y STATGRAPHICS Centurion, utilizadas para el cálculo de promedios, máximos, mínimos, masa por corriente y correlación entre elementos (afinidad); esta última mediante el análisis multivariado.

Para el cálculo estimado de la cantidad de toneladas de estos elementos que es alimentada anualmente a la planta y la cantidad contenida en cada una de las muestras objeto de análisis, fueron utilizados los datos de producción de un año de dicha industria.⁽¹⁶⁾ En los casos que las muestras fueron fraccionadas en varios tamaños de partículas, se tuvo en cuenta el porcentaje de participación de cada fracción (ecuación 1), dato utilizado posteriormente para el cálculo de la masa anual de cada fracción (ecuación 2). Para el cálculo de la masa de cada elemento se utilizó la ecuación 3 y la masa de cada elemento en una corriente se determinó utilizando la ecuación 4.

$$FR = \frac{M_{retenida}}{M_{inicial}} * 100 \dots\dots\dots(1)$$

$$M_{fraccional} = \frac{FR}{100} * M_{corriente} \dots\dots\dots(2)$$

$$M_m = M_{fraccional} * C_m / 100 \dots\dots\dots(3)$$

$$M_{total} = \sum M_m \dots\dots\dots(4)$$

donde:

FR: porcentaje que representa cada fracción granulométrica del total de la muestra, %

M_{retenida} : masa seca retenida en el tamiz, g

M_{inicial} : masa seca inicial de la muestra, g

$M_{\text{fracción anual}}$: masa anual de una granulometría determinada, presente en una corriente dada, t

$M_{\text{corriente}}$: masa seca anual de una corriente dada, t

C_m : concentración del elemento en la muestra, %

M_m : masa anual del elemento en una granulometría determinada, presente en una corriente dada, t

M_{total} : masa total del elemento en una corriente dada, t

Resultados y discusión

Para el análisis de los resultados de la caracterización química de las muestras se tuvo en cuenta la concentración de cada elemento, con el objetivo de definir cuál es mayoritario y en que muestra se concentra la mayor cantidad, así como la cantidad en toneladas de cada uno en las diferentes corrientes y la correlación entre los mismos. La presentación y análisis de la concentración de los elementos se realizará por separado, tierras raras de los platinoides.

Distribución de los elementos de las tierras raras

De los elementos de las tierras raras, el escandio resultó ser el elemento mayoritario en todas las muestras (promedios en la tabla 1), con el mayor valor en la muestra de torta que se obtiene en el filtrado del licor producto de la lixiviación (84,0 mg/kg en la fracción inferior a 0,074 mm) y el menor valor reportado 7,0 mg/kg en la muestra de sulfuro de Ni + Co. Valores similares a los reportados por

Proenza de depósitos del Caribe y Australia ⁽¹²⁾, y por Aiglsperger ⁽⁷⁾ en lateritas cubanas.

De manera general, los elementos del grupo de las tierras raras aparecieron en las muestras estudiadas en el siguiente orden:

Sc > Ce > Nd > La > Y > Pr > Sm > Gd > Dy > Er > Yb > Eu > Ho > Tb > Lu > Tm.

La concentración de los ETR mayoritariamente es superior en las fracciones más finas (menores de 0,074 mm) y de estas en las más densas; en los casos que la concentración es mayor en otras fracciones los valores no difieren significativamente de los reportados en el resto de las granulometrías.

Tabla 1- Concentración de elementos de las tierras raras por muestras, mg/kg

Muestra	Fracción, mm	Sc	Lu	Yb	Tm	Er	Ho	Dy	Tb	Gd	Eu	Sm	Nd	Pr	Ce	La	Y
Mena laterítica alimentada al proceso	10	21,0	0,09	0,57	0,09	0,57	0,20	0,93	0,20	0,10	0,28	1,00	5,10	1,20	12,00	4,60	2,70
	+0,15	42,3	0,15	1,10	0,16	1,03	0,33	1,80	0,30	1,77	0,50	1,90	7,30	1,96	40,0	7,00	4,30
	+0,074	47,0	0,25	1,70	0,28	1,67	0,57	3,10	0,50	2,95	0,90	3,30	13,60	3,34	30,00	11,20	8,50
	-0,074 arena	62,5	0,22	1,50	0,19	1,30	0,47	2,20	0,37	2,17	0,70	2,20	10,10	2,53	14,00	8,30	5,50
Mena laterítica alimentada al proceso luego del proceso de secado	-0,074 finos	78,30	0,23	1,60	0,22	1,70	0,57	2,50	0,47	2,55	0,80	2,80	11,30	2,79	14,00	9,60	6,50
	10	21,00	0,10	0,53	0,13	0,90	0,30	1,65	0,30	17,50	0,50	1,50	3,50	1,28	5,00	5,60	10,5
	+0,15	33,70	0,14	0,90	0,14	0,93	0,33	1,60	0,30	1,70	0,50	1,60	7,50	1,84	23,00	6,70	6,30
	+0,074	37,50	0,25	1,57	0,23	1,57	0,53	2,95	0,43	2,57	0,70	3,00	12,40	3,07	27,00	10,40	8,50
	-0,074 arena	65,00	0,23	1,43	0,21	1,47	0,47	2,47	0,40	2,43	0,70	2,40	10,90	2,63	14,00	8,80	8,00
	-0,074 finos	77,00	0,25	1,57	0,23	1,57	0,53	2,70	0,43	2,60	0,80	2,70	11,10	2,70	14,00	9,70	6,50
Sólidos recuperados en el sistema de limpieza de los gases de secado	+0,074	36,00	0,24	1,50	0,23	1,50	0,53	2,57	0,47	2,57	0,80	3,00	12,20	2,97	31,00	10,20	8,50
	-0,074 arena	57,00	0,24	1,53	0,22	1,47	0,50	2,47	0,43	2,53	0,80	2,60	10,40	2,73	13,00	9,40	7,00
	-0,074 fino	74,00	0,27	1,70	0,24	1,70	0,60	2,05	0,50	2,90	0,80	3,10	12,20	3,04	13,00	10,20	7,50
	+0,15	64,00	0,23	1,63	0,21	1,60	0,50	2,35	0,43	2,67	0,70	2,50	10,70	2,70	27,00	10,40	6,50
Material reducido	+0,074	64,30	0,25	1,63	0,22	1,60	0,57	2,55	0,47	2,50	0,70	2,50	10,70	2,71	26,00	10,90	7,00
	-0,074 arena	70,00	0,23	1,63	0,21	1,57	0,57	2,40	0,47	2,40	0,70	2,40	10,70	2,66	19,00	10,30	4,50
	-0,074 fino	83,00	0,25	1,80	0,24	1,65	0,63	2,65	0,50	2,60	0,80	2,70	11,90	2,93	20,00	10,60	7,50
	+0,15	68,30	0,24	1,60	0,22	1,53	0,50	2,67	0,47	2,80	0,90	2,40	12,20	3,02	26,00	10,50	6,00
Material lixiviado	+0,074	66,00	0,22	1,45	0,23	1,55	0,50	2,55	0,40	2,65	0,70	2,40	10,30	2,55	22,00	9,40	9,50
	-0,074 arena	81,00	0,28	1,75	0,26	1,80	0,60	2,95	0,50	2,85	0,80	3,00	13,00	3,12	19,00	11,10	7,00
	-0,074 fino	83,00	0,31	1,95	0,30	1,95	0,70	3,30	0,60	3,35	0,90	3,40	13,00	3,48	21,00	12,60	10,50
	+0,074	-	0,70	-	0,55	3,20	1,00	4,70	0,70	3,90	1,20	3,70	14,60	3,36	23,00	11,40	23,00
Sólidos recuperados en el filtrado del licor producto de la lixiviación	-0,074 arena	84,00	0,38	2,35	0,35	2,15	0,75	3,45	0,60	3,60	1,00	3,70	14,70	3,61	23,00	12,70	12,00
	-0,074 fino	83,00	0,37	2,20	0,33	2,20	0,80	3,80	0,60	3,80	1,10	3,70	15,00	3,60	24,00	12,20	13,00
	Sulfuro de Ni + Co	-	7,00	-	0,15	-	0,10	-	0,20	-	0,15	0,10	0,20	0,17	1,00	0,60	0
Carbonato de Ni	-	23,70	0,26	1,45	0,19	0,73	0,17	0,57	-	0,17	0,10	0,20	0,33	0,07	0,30	0,10	7,00
Sulfuro de Ni	-	7,50	0,05	0,20	0	0,15	0	0,15	-	-	-	-	0,20	0,05	0,30	0,20	0
Óxido de Ni	-	26,00	0,44	-	0,24	1,45	0,30	0,90	0,10	0,30	0,10	0,27	0,57	0,09	0,53	0,33	10,50
Óxido de Ni en polvo químico	-	27,50	0,43	-	0,25	1,20	0,30	0,87	0,10	0,33	0,08	0,23	0,50	0,08	0,40	0,27	6,00
Óxido de Ni en polvo metalúrgico	-	29,50	0,43	2,40	0,23	1,40	0,30	0,90	0,10	0,3	0,08	0,20	0,53	0,08	0,40	0,23	8,50
Óxido de Ni sinterizado	-	67,00	0,55	3,20	0,41	2,13	0,53	1,77	0,23	0,83	0,20	0,60	2,10	0,51	4,30	2,10	16,70
Óxido de Ni sinterizado (polvo recuperado en el sistema de limpieza de gases)	-	53,00	0,54	3,00	0,36	1,80	0,40	1,50	0,17	0,73	0,20	0,60	1,80	0,47	3,80	2,00	17,00

(-): no determinados por encontrarse por debajo de los límites de detección

En las muestras del material de alimentación, tanto húmedo como seco, así como en el que es recolectado en el sistema de limpieza de los gases generados en el proceso de secado; en las partículas inferiores a 0,074 mm las concentraciones reportadas son muy superiores a lo contenido en las fracciones de más de 10 mm, ejemplo: el Sc en el material de alimentación húmedo es de 74,0 vs 21,0 mg/kg, en el material de alimentación seco de 77,0 vs 21,0 mg/kg y en el material

recolectado en el sistema de limpieza de los gases de 74,0 vs 36,0 mg/kg, este último valor en la fracción superior a 0,15 mm.

Por otra parte, en las muestras del material a la salida del horno de reducción y en la muestra del desecho sólido del proceso (cola) también es notable como la concentración en las fracciones inferiores a 0,074 mm supera a las fracciones más gruesas, en la muestra de material reducido el Sc en la fracción más fina es de 83,0 mg/kg y en la mayor de 0,15 mm es de 64,0 mg/kg; en el caso de la muestra de cola en la fracción fina es de 83,0 mg/kg y en la de más 0,15 mm, 68,3 mg/kg.

Distribución de los elementos del grupo del platino

En el caso de los elementos del grupo del platino las concentraciones están muy por debajo de los valores reportados de las tierras raras (promedios en la tabla 2). El Os es el elemento que menos presencia tuvo en las muestras, no pudiendo ser identificado en 22 de los 32 tipos de muestras caracterizadas, el elemento mayoritario por muestra es el Ru (se corrobora lo expuesto por Legrá ⁽¹⁷⁾, con la mayor concentración en el óxido de Ni sinterizado, con un valor de 198,3 mg/t. El orden de aparición de estos elementos por muestras es de: Ru>Pt>Pd>Ir>Rh>Os. En las muestras de las menas lateríticas alimentadas al proceso las mayores concentraciones se reportan en la fracción superior a 0,15 mm para el Os, Ir, Rh y Pt; el Ru y el Pd se concentraron en la fracción inferior a 0,074 mm, confirmándose lo mostrado por Legrá ⁽¹⁷⁾; en esta misma fracción, en las muestras del material recuperado en la limpieza de los gases de los secaderos, en el material reducido y en el lixiviado, se identificaron las mayores concentraciones de todos los elementos del grupo.

Tabla 2- Concentración de elementos del grupo del platino por muestras, mg/t

Muestra	Fracción, mm	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
Mena laterítica alimentada al proceso	10	-	5,60	46,00	2,90	11,50	11,33
	+0,15	-	12,77	21,00	4,30	26,70	17,00
	+0,074	13,00	32,47	66,50	8,70	52,50	28,00
	-0,074 arena	-	27,60	67,50	7,40	41,00	27,00
	-0,074 finos	-	20,53	59,50	6,50	35,70	39,00
Mena laterítica alimentada al proceso luego del proceso de secado	10	-	4,90	26,00	1,80	7,00	7,33
	+0,15	-	9,37	14,50	3,40	21,00	15,33
	+0,074	20,00	29,00	47,70	8,70	47,30	24,67
	-0,074 arena	19,00	25,43	57,00	7,60	40,00	33,00
	-0,074 finos	16,00	21,67	82,70	7,10	37,70	37,00
Sólidos recuperados en el sistema de limpieza de los gases de secado	+0,074	-	18,37	76,00	7,20	39,30	25,67
	-0,074 arena	-	24,23	79,50	8,30	40,30	31,67
	-0,074 fino	-	20,05	84,50	6,80	36,00	34,50
Material reducido	+0,15	-	18,63	53,00	6,20	35,00	31,33
	+0,074	20,50	19,73	90,50	6,70	34,00	31,67
	-0,074 arena	-	20,05	76,70	7,30	21,20	32,00
	-0,074 fino	15,00	23,27	66,50	7,40	40,00	36,00
Material lixiviado	+0,15	-	17,63	69,50	4,97	31,00	27,50
	+0,074	23,00	18,65	82,00	5,10	30,00	28,50
	-0,074 arena	12,00	18,80	60,50	4,45	28,50	18,00
Sólidos recuperados en el filtrado del licor producto de la lixiviación	-0,074 fino	8,00	21,30	57,00	5,35	34,50	35,50
	+0,074	-	11,80	146,00	3,30	23,00	23,00
	-0,074 arena	-	15,10	108,00	3,80	28,00	25,00
	-0,074 fino	-	11,80	85,00	3,50	24,00	22,00
Sulfuro de Ni + Co	-	-	26,60	61,00	45,25	148,00	587,00
Carbonato de Ni	-	-	35,25	144,50	44,50	13,70	2,50
Sulfuro de Ni	-	-	3,05	89,50	21,35	67,50	41,50
Óxido de Ni	-	-	23,85	55,50	29,83	12,50	-
Óxido de Ni en polvo químico	-	-	19,45	54,00	23,95	10,50	-
Óxido de Ni en polvo metalúrgico	-	-	24,05	62,50	25,65	6,00	-
Óxido de Ni sinterizado	-	12,00	49,23	198,30	78,90	26,30	4,00
Óxido de Ni sinterizado (polvo recuperado en el sistema de limpieza de gases)	-	-	23,23	144,00	33,80	10,70	-

(-): no determinados por encontrarse por debajo de los límites de detección

El análisis integral de los resultados arroja que el elemento mayoritario es el escandio (Sc), con concentraciones en el material de entrada, en las partículas más finas, superiores a 75 mg/kg, valores que fueron obtenidos también en las partículas más finas presentes en el sólido que es recuperado en los electrofiltros de los secaderos de mineral. Según el comportamiento de este elemento, durante todas las operaciones a que es sometido el material en el proceso CARON, el

mismo no es extraído de las menas lateríticas, siendo desechado por el proceso, obteniéndose concentraciones en las colas superiores a los 80 mg/kg.

Balance de masa (cálculo estimado)

Las masas fueron calculadas para un procesamiento anual de 2 051 382 t base seca de menas lateríticas.⁽¹⁶⁾

El balance de masa se realizó de manera integral para cada muestra (figura 2), por fracción granulométrica y por elemento, teniendo en cuenta la concentración de ETR y EGP en cada fracción.

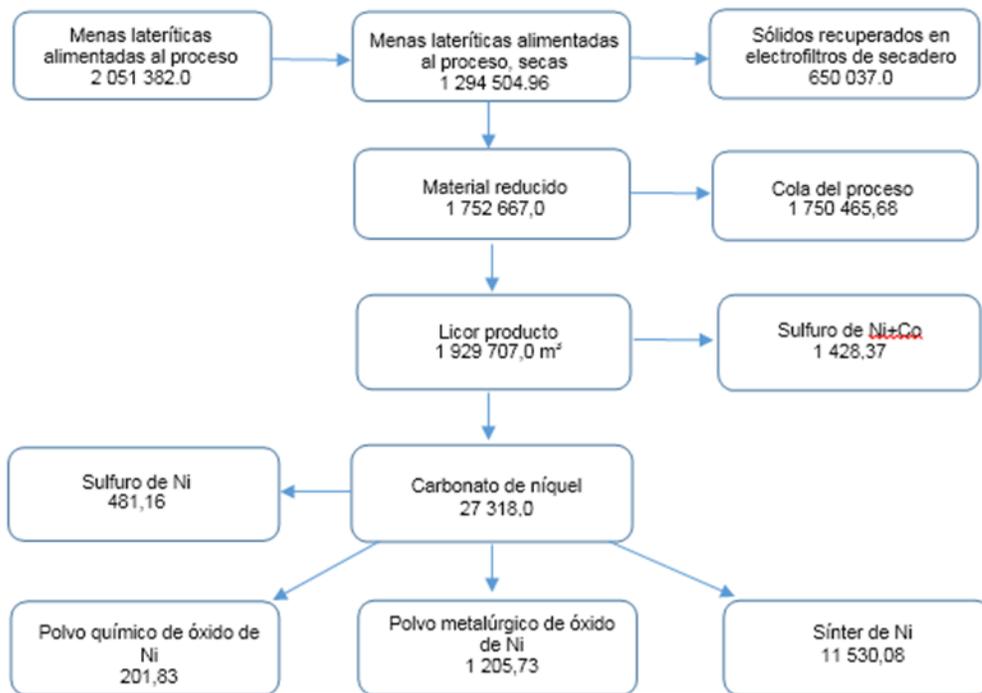


Fig. 2- Masa anual por corriente, t

Se obtuvo que de la masa de estos elementos que es alimentada a la planta, más del 70% es depositada en la presa de cola de esta empresa. La mayor masa es la de Sc con un estimado de 140 t/a en la alimentación y de ello el 99% es enviado a

las colas; le continúan en masa alimentada el Ce con 36,4 t/a y el Nd con 21,7 t/a. El Ru es el elemento de los platinoides con mayor presencia en el material de entrada, con una masa en la alimentación de cerca de 118 g/a, el Pd y Pt lo siguen en cantidad con algo más de 65 g/a en la entrada al proceso tecnológico.

En los productos comercializables no se estiman cantidades significativas de estos metales, el Sc es el de mayor cuantía no superando anualmente los 10 kg en el sulfuro de Ni + Co, en el sulfuro de Ni algo más de 3 kg, en el polvo químico 5,6 kg, en el polvo metalúrgico 35,6 kg y en el sínter la mayor masa, cercana a los 300 kg. Del resto de los lantánidos los valores más significativos los tienen: el Y que supera el kilogramo en el polvo químico, los 10 kg/a en el polvo metalúrgico y en el sínter presenta una masa anual de 121 kg; el Ce presenta en el sulfuro de Ni + Co poco más de 1 kg/a; de igual forma superan el kilogramo en el polvo metalúrgico el Dy, Er e Yb; Er en el sínter presenta 16 kg/a y el Dy 10,4 kg/a.

El Ru que es el platinoide de mayor concentración, se estima que en el sínter se recoja la mayor masa, algo más de 2 g/a, en el resto de los productos no supera el gramo, igual comportamiento deben presentar el resto de los elementos de este grupo.

Correlación entre los elementos

Se determinó la correlación existente entre los EGP y los ETR, incluyendo en este análisis los elementos Ni, Co, Fe, Al, Cr, Si, Mn y Mg. Se obtuvo que los elementos de las tierras raras: Lu, Yb, Tm, Er, Dy, Sm, Gd, Eu, Tb, Nd, Pr, La e Y correlacionan entre ellos con valores por encima de 0,90, resultado similar al obtenido por Legrá; ⁽¹⁷⁾ por otro lado correlacionan por encima de este valor el Lu, Yb e Y con el Ni y el Rh, el Ce tuvo una correlación de 0,9069 con el Si.

En el caso de los platinoides se obtuvieron correlaciones por encima de 0,90 del Rh con Ir y Ru, correlacionando a su vez con el Ni; confirmándose lo planteado por Legrá en el caso de los EGP.⁽¹⁷⁾

Poseen correlaciones negativas altas, el Rh con el Gd, Nd, Pr, La, Fe y Al; el Ru con el Gd, Sm, Nd, Pr y La; el Ni con el Gd, Nd, Pr, La, Fe y Al; y el Ir con el Fe.

Conclusiones

Se confirma lo planteado en la literatura consultada sobre la presencia de elementos de las tierras raras y del grupo del platino en las lateritas ferruginosas.

El escandio resultó ser el metal mayoritario, estimándose una masa anual en la alimentación al proceso CARON cercana a 140 t, depositándose el 99% en las colas.

Los elementos que pertenecen al grupo de las tierras raras y del grupo del platino se concentran en las partículas inferiores a 74 micras en las menas alimentadas al proceso, en el material reducido y lixiviado.

Los metales de estos grupos en mayor cuantía no son extraídos por la tecnología, pasando a formar parte de los desechos sólidos del proceso.

Correlacionan positivamente entre ellos 13 ETR (Lu, Yb, Tm, Er, Dy, Sm, Gd, Eu, Tb, Nd, Pr, La, Y) y se obtuvieron otras correlaciones elevadas (+ 0,9) entre ETR y EGP, así como con otros elementos. A su vez, se establecieron correlaciones negativas entre varios elementos.

Referencias bibliográficas

1. VEGA-CANTÚ, Y. Los de abajo: lo importante de las tierras raras. En: *El sitio de divulgación científica del Tec de Monterrey*. [Consultado 1 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://transferencia.tec.mx/2020/03/19/los-de-abajo-lo-importante-de-las-tierras-raras/>
2. VILLANUEVA, J. Las tierras raras son varios elementos químicos de gran importancia: se usan para fabricar móviles, armas o equipos médicos. En: *Boletín*

- EOM [en línea]. 11 de mayo de 2021 [consultado 1 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://elordenmundial.com/que-son-tierras-raras/>
3. Metales del grupo del platino. [Consultado 1 de diciembre de 2021]. Disponible en: https://hmong.es/wiki/Platinum_group
 4. LAZARENKOV, V. G. Platinum Group Metals and Gold in supergene Nickel ores of the Moa and Nikaro deposits (Cuba). *Lithology and Mineral Resource*. 2005, **40**, pp.521-527, ISSN 00244902.
 5. AIGLSPERGER, T. Looking for Needles in a Haystack: How to Find PGM in Laterites by Using Hydroseparation Techniques. *Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla*. 2011 (15), pp.23-24, ISSN: 1885-7264.
 6. AIGLSPERGER, T. Is Microbial Activity Causing PGM Neof ormation in Ni-Laterites?. Evidence from Falcondo (Dominican Republic). *Revista de la sociedad española de mineralogía, Macla*. 2014, (19). ISSN: 1885-7264.
 7. AIGLSPERGER, T. Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. *Ore Geolog Reviews*. 2016, **73**(1), pp 127-147. ISSN: 0169-1368.
 8. ELIOPOULOS, D. The potential of rare earth elements in Greece. 1st European Rare Earth Resources Conference. ERES 2014.
 9. CALAGARI, A. Geochemical characteristics of a laterite: the Jurassic Zan deposit, Iran. *Acta Geodyn. Geomate*. 2015, **12**, pp. 67–77, ISSN: 21862982.
 10. CHANG, A. Caracterización geoquímica del perfil litológico del yacimiento laterítico de níquel “San Felipe”, Camagüey, Cuba. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*. 2015, **16**(2), pp.134-146, ISSN 1729-3790.
 11. LAVAUT, W. Las bajas concentraciones metalíferas: reto de la actividad minero-metalúrgica cubana. VI Congreso cubano de minería. Simposio de geología. GEOCIENCIAS 2015. La Habana, Cuba, 2015. ISBN: 959-247-021-9.
 12. PROENZA, J. Mineralogía y geoquímica de Ni, Co, EGP, Sc, REE en yacimientos lateríticos. *Revista de la sociedad española de mineralogía. Macla*. 2015, (20), ISSN: 1885-7264.

13. FERIZOGLU, E. Recovery of Scandium from Lateritic Nickel Ores. UCTEA Chamber of Metallurgical & Materials Engineers. Estambul, Turquía, 2018. ISBN: 6050112584, 9786050112580.
14. AYRES, R. Material efficiency: rare and critical metals. *Philosophical transactions of the royal society*. 2018, **371**. ISSN: 2053-9223.
15. RIVAS ROMERO, S. Proyecto- 600206. Identificación de elementos del grupo del platino y tierras raras en el proceso CARON. Informe inédito. CEDINIQ 2020.
16. EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA. Registro Metalúrgico. Informe técnico. Diciembre 2019.
17. LEGRÁ, I. Identificación mineralógica de portadores de elementos del grupo del platino en lateritas de Moa. Informe inédito. CEDINIQ 2016.

Conflictos de interés

La autora declara que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Sorangel Rivas Romero: asumió todas las tareas que conllevaron al artículo