

## Estudio de mercado para el cromo presente en los residuales de la minería del níquel

**Yazdani Reinoso Rodríguez**

[yreinoso@ismm.edu.cu](mailto:yreinoso@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa

**Amauris González Martínez**

[agonzalez@cerconi.moa.minen.cu](mailto:agonzalez@cerconi.moa.minen.cu)

Empresa de Servicios de Computación al Níquel (SERCONI)

**Marcos Miguel Medina Arce**

[mmedina@ismm.edu.cu](mailto:mmedina@ismm.edu.cu)

Universidad de Moa (Cuba)

**Resumen:** Se realizó un estudio de mercado de los minerales presentes en las presas de colas niquelíferas del municipio de Moa, basándose en el modelo diseñado por Philip Kotler para realizar estas investigaciones utilizando técnicas estadísticas de pronósticos para el análisis de sus precios en el mercado, que permita plantear estrategias bien fundamentadas sobre la posibilidad de su explotación e iniciar nuevas inversiones en Cuba. En los resultados obtenidos del estudio se evidencia que el cromo es uno de los minerales presentes en los residuales con amplias posibilidades de explotación, lo que permite contribuir a sustituir importaciones y proporcionar el ahorro de algunas empresas en inversión en materias primas.

**Palabras clave:** mercado del cromo; presa de colas; producto residual.

## Market study for chromium present in nickel mining waste

**Abstract:** A market study of the minerals present in the nickel-bearing tailings dams of the municipality of Moa was carried out, based on the model designed by Philip Kotler to carry out these investigations using statistical forecasting techniques for the analysis of their prices in the market. that allows to propose well-founded strategies on the possibility of its exploitation and initiate new investments in Cuba. In the results obtained from the study, it is evident that chromium is one of the minerals present in the residuals with wide possibilities of exploitation, which allows it to contribute to substitute imports and provide savings for some companies in investment in raw materials.

**Keywords:** chrome market; tail dam; residual product.

## Introducción

La minería es una actividad en la cual se explotan recursos no renovables. El desarrollo sustentable propugna la necesidad de asumir modelos de producción que garanticen la satisfacción de las necesidades de las generaciones actuales, sin comprometer esa misma posibilidad para el futuro.

Si se sigue la lógica de los planteamientos teóricos de este concepto, las poblaciones que viven en las regiones donde se explotan recursos no renovables, cuando estos se agoten, entrarían en una suerte de muerte social comunitaria, de ahí surge la urgente necesidad de repensar este concepto para la minería.

La explotación minera, con las tecnologías actuales, provoca la existencia de grandes volúmenes de residuales, almacenados principalmente en presas de colas, que no pueden ser explotados por diversas causas, especialmente por problemas tecnológicos, pero principalmente por decisiones de políticas basadas en lógicas empresariales fundamentadas en problemas básicamente de carácter financiero.

La minería que se hace en los países subdesarrollados, incluyendo la que se realiza en Cuba, explota solamente el mineral principal, incluso en las exploraciones mineras no se tienen en cuenta los minerales acompañantes. De ahí que no existen estrategias para realizar inversiones para explotarlos, esto constituye evidentemente una barrera para el desarrollo sustentable en la minería.

La minería del níquel se desarrolla en Cuba desde hace más de 60 años, con el inicio del conocido Proyecto minero Lengua de Pájaro de Nicaro, ello ha generado millones de toneladas de residuales de los cuales no existe suficiente información sobre el valor comercial de algunos de estos minerales que lo componen que permita plantear estrategias bien fundamentadas sobre la posibilidad de su explotación.

Estos yacimientos, las presas de colas, están bien estudiadas, desde el punto minero y geológico, sin embargo, no se han estudiado desde el punto de vista comercial; solo se han realizado estudios sobre el hierro, como el trabajo de Cutiño (2015). De existir un estudio riguroso del comportamiento de los valores de estos minerales en el mercado mundial, se podrían generar estrategias para su explotación que informarían a los tomadores de decisiones sobre la posibilidad de iniciar nuevas inversiones en Cuba. Estas son ideas que se imbrican perfectamente con los Lineamientos del VII Congreso

del PCC (66, 67, 68, 74, 86, 87 y 143), con las líneas estratégicas de la economía cubana hasta el 2030 y con la política económica y social de la Revolución en este campo, en armonía con la posibilidad real de lograr un desarrollo que ofrece [...] nuevas oportunidades de compensación económica al producir conocimientos que sirven para fundamentar nuevos proyectos de desarrollo en la minería y en otras actividades. Esta es una vía que tiene que generar empleos (Montero, 2006). Es apreciable la importancia de asumir una investigación con estas características.

El objetivo de esta investigación fue: realizar un estudio de mercado del cromo que está presente en las presas de colas níquelíferas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara del municipio de Moa para su posible explotación y sustitución de importaciones.

El proceso que implica elaborar un estudio de mercado, requiere una planificación en la que se enumerarán y detallarán los objetivos, las acciones y recursos que se van a destinar a ello. Varios especialistas han descrito procesos para realizar un estudio de mercado que facilite la ruta a aquellos empresarios y/o emprendedores que deseen realizar uno a su medida.

Boxwell (1998) recomienda cinco pasos:

1. Determinar el objetivo del estudio de mercado: donde se identifican los clientes, sus necesidades, y por último, diagnosticar el proceso de estudio de mercado.
2. Formación de un equipo de especialistas internos o externos: pueden ser equipos interfuncionales, interdepartamentales, e interorganizacionales.
3. Identificación de socios: donde se establece una red de información propia y se identifican recursos de información u otras fuentes.
4. Recopilar y analizar la información sobre el estudio de mercado.
5. Elaborar un informe de estudio de mercado: presentar los resultados de los clientes, identificar posibles mejoras de productos y procesos, y una mejor visión del proyecto en su totalidad.

Kotler y Armstrong (2003) plantean que un estudio de mercado debe estar estructurado por seis tareas:

1. Definición del problema y los objetivos de la investigación: donde el investigador debe ser capaz de ayudar a definir el problema y recomendar cambios de investigación y establecer los objetivos de la investigación.
2. Desarrollo del plan de investigación de acuerdo con las necesidades específicas de información. Se basa en la definición del procedimiento a seguir y las técnicas de trabajo a utilizar en el estudio de mercado.
3. Implantación del plan de investigación: incluye el análisis de la mezcla del marketing, del consumidor, la competencia, sobre los factores que inciden sobre la actividad propuesta y de las estrategias que se diseñen.
4. Interpretación de los resultados: consiste en formular conclusiones a partir de la información recabada. El investigador tabula los datos, desarrolla tablas de distribución de frecuencias y extrae medias y medidas de dispersión de las variables más significativas. Posteriormente, intentará aplicar algunas de las técnicas estadísticas más avanzadas y modelos de decisión, con la intención de descubrir información adicional.
5. Informe de los resultados: el investigador presenta los resultados que tienen relevancia para los problemas que enfrenta la dirección en cuanto a la toma de decisiones.
6. Toma de decisiones: Es en donde los directivos plantean las conclusiones y determinan si es factible o no el resultado de la investigación. También podrían optar por estudiar más la situación y ampliar la investigación. La decisión es suya, pero sin duda la información que han recibido les ayudará a ver el problema con mayor claridad.

Cutiño (2015) confeccionó un procedimiento que integra nuevas variables a la investigación del mercado: tecnología e impacto socioeconómico y ambiental, la cual consta de seis pasos:

1. Determinar la necesidad de información y plantear los elementos de la metodología de la investigación que responda a los objetivos que se pretenden alcanzar.
2. Identificar y recomendar la tecnología más apropiada para la producción propuesta, que cumpla con los requisitos de sustentabilidad y eficiencia productiva deseados.

3. Implementar o analizar la mezcla del marketing o 4P en función de la actividad o producto propuesto, recomendando alternativas de comercialización que se adecuen a las condiciones socio-económicas y políticas del país y la región donde se desarrolle la actividad propuesta.
4. Analizar el entorno donde se desarrolla la actividad propuesta, para determinar la influencia de los factores de la competencia y los consumidores, y así trazar estrategias para insertar, mantener o desarrollar el producto en nuevos mercados.
5. Evaluar el impacto socio-económico que la producción y/o comercialización propuesta tendrá sobre la sociedad y la economía nacional, de manera que proporcione un mejor y más complejo conocimiento de los posibles beneficios y ventajas que conlleva su implementación.
6. Evaluar el impacto ambiental de la nueva actividad propuesta, a través de consultas a especialistas y la evaluación del marco legal que la rodea, que favorezca la aplicación de medidas de protección o mitigación efectivas.

En las metodologías expuestas por los diferentes autores se puede apreciar que concuerdan con que el punto primario para la investigación de mercados lo constituye la definición clara de los objetivos, de esta manera se puede orientar la dirección que seguirá el estudio y qué tareas realizar para su cumplimiento exitoso.

### **Metodología**

La metodología que se utilizó en esta investigación fue la de Kotler y Armstrong (2003) debido a que resulta más abarcadora en términos de mercadotecnia y ofrece una evaluación económica más integral, garantizando un proceso de toma de decisiones por parte de directivos para aprobar una apertura de negocio.

### **Caracterización del proceso CARON**

Los antecedentes históricos del proceso hidrometalúrgico en la tecnología carbonato-amoniaco y su conocimiento tecnológico se consideran suficientemente extensas, teniendo en cuenta que dicha tecnología tiene sus inicios prácticos en la década de los años 30 del pasado XX, aspecto que tributa a la obsolescencia tecnológica, dado que su implementación a nivel comercial ocurrió en 1943 en Nicaro, Cuba.

El proceso comienza con un cribado y beneficio, donde se desechan las rocas de serpentina dura. Luego se trituran las piedras menores de 150 mm y se secan a 36 % de humedad.

La reducción se realiza en unos hornos de 17 hogares, donde en diez cámaras de combustión incompleta se calienta el mineral hasta los 700-750 °C, y se reduce del óxido de níquel a níquel metálico. El hierro y otras pequeñas impurezas se oxidan formando compuestos de hierro insolubles-lixiviación.

En unos tanques llamados sedimentadores se realiza el proceso de sedimentación y lavado a contracorriente, donde la pulpa formada por los licores de níquel y cobalto y los sólidos compuestos de hierro van decantándose en cada sedimentador. En el último de estos se descarga una pulpa con 57 % sólido de compuestos de hierro (colas) que solo tienen entre 0,08 g/L-0,15 g/L y 0,01 g/L de níquel y cobalto, respectivamente.

Del proceso de destilación de colas se produce un efluente de colas de 45 % de hierro aproximadamente, y de la destilación del licor un efluente líquido con bajo amoníaco y otras sales que se envían a la presa.

Las presas de colas generadas como resultado de la tecnología carbonato amoniacal (CARON) poseen contenidos apreciables de hierro, magnesio, silicio, aluminio y otros materiales valiosos.

### **Caracterización de las presas de colas níquelíferas de Moa**

Rojas y Turro (2003) exponen el análisis realizado a diez muestras tomadas de las colas de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, cinco en la Planta de Lixiviación y Lavado y cinco en la de Recuperación de Amoníaco.

En la Tabla 1 se exponen los resultados del análisis químico de las muestras analizadas. Estas son esencialmente ferrosas, y alcanzan alrededor de un 67 %; presentan, además, contenidos significativos de sílice, alrededor de 12 %, mientras que los óxidos de Mg, Cr y Al alcanzan, como promedio, 7,11; 5,03 y 3,45, respectivamente. Desde el punto de vista químico no existen diferencias notables entre las colas de una y otra etapa.

Tabla 1. Composición química de las colas obtenidas en las etapas de lixiviación y recuperación de amoníaco. Tomado de Rojas y Turro (2003)

Muestras	Contenido de los óxidos de los componentes en %							
	NiO	CoO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO
R-1	0,38	0,10	68,02	7,13	12,45	3,37	5,11	0,97
R-2	0,36	0,10	68,02	7,13	12,44	3,45	4,78	0,97
R-3	0,36	0,10	68,02	6,88	11,29	3,44	5,00	0,85
R-4	0,36	0,10	68,02	6,96	11,91	3,42	5,20	0,89
R-5	0,37	0,10	67,31	7,31	11,42	3,34	4,89	0,92
L-1	0,33	0,09	68,31	6,88	11,89	3,45	5,04	0,79
L-2	0,41	0,10	68,31	7,96	12,15	3,50	5,03	1,28
L-3	0,37	0,09	68,31	6,88	10,64	3,49	4,79	0,79
L-4	0,22	0,03	55,87	6,86	11,87	3,44	5,42	0,89
L-5	0,36	0,10	68,31	7,10	12,15	3,62	5,04	0,96
Promedio	0,36	0,09	66,85	7,11	11,82	3,45	5,03	0,93

Según estos autores las colas del proceso CARON poseen una granulometría esencialmente fina (alrededor del 66 % están en <math>-0,044\text{ mm}</math>).

Turro, Garcell & Izquierdo (2010) analizaron muestras a las cuales les realizó ensayos reológicos con variación de la concentración de sólido en suspensión (desde 30 % a 60 % en peso), temperaturas desde los 230 °C a 900 °C y pH de acuerdo a las condiciones del proceso productivo. En la Tabla 2 se muestra la composición química porcentual obtenida.

Tabla 2. Composición química del residuo lixiviado en la planta de recuperación de amoníaco. Tomado de Turro, Garcell & Izquierdo (2010)

	Ni	Co	Fe	Mn	Mg	Al	Cr	SiO <sub>2</sub>
Promedio	0,29	0,078	47,7	0,78	4,39	2,05	3,42	12,23

En el municipio de Moa se registran cuantitativamente las deposiciones de residuos sólidos derivados del proceso productivo para la obtención de níquel + cobalto, cuyo valor total alcanza los 61,34 MMT al cierre del mes de diciembre de 2017 (un incremento anual promedio de 1 979,0 MT). Como se observa en la Tabla 2 el mayor porcentaje está representado por el hierro (Fe: 47,7 %), lo que equivale a 29,26 MMT, el resto de los metales tienen un porcentaje que varía de 12,23 % hasta 0,078 %.

Cutiño (2015) realizó el estudio de mercado para la explotación del hierro con fines siderúrgicos. En este estudio se propone, entre otras, la utilización del Fe para la obtención de acero inoxidable que contiene cromo, sin embargo, no se realiza un análisis ni propuesta de la posible explotación del Cr (cromo) como componente esencial para la fabricación de este tipo de acero que se utiliza en la elaboración de piezas para vehículos, equipamiento hospitalario y utensilios de cocina.

Le sigue en porcentaje al hierro el SiO<sub>2</sub>, sin embargo, según especialistas de la Universidad de Moa, el porcentaje de este no es significativo para su explotación, al igual que el del magnesio (Mg).

El porcentaje de cromo en los residuos, según estudios realizados por los autores anteriormente mencionados, es de 3,42 %, lo que equivale aproximadamente a 2,1 MMT de material aprovechable para el procesamiento y comercialización como materia prima para las industrias, en estado natural en las colas residuales; sin embargo, existen tecnologías para la explotación del cromo que permite concentrar el mineral y se incrementa el porcentaje del mismo hasta un 30 %.

### **Caracterización de las posibles tecnologías para la explotación del cromo**

El concentrado de cromita, obtenido por el beneficio de las colas, puede ser procesado en ferrocromo alto en carbono que requiere una producción más fácil y el consumo de energía eléctrica más baja en comparación con la obtención de cromo puro, ferrosilicromo o cromo bajo en carbono. Con la relación baja de Cr/Fe en el concentrado, el contenido de cromo en la aleación obtenida puede ser menos de 60 % pero satisfará las demandas a muchas marcas de ferrocromo alto y medio en carbono, así como las demandas del llamado charge-cromo la aleación con bajo contenido de cromo.

El esquema principal de la producción desarrollada se expone en la Figura 1 (CONTRATO No 620n de 13.12.2011 con la Recuperación de Metales S.A.). La tecnología incluye las siguientes etapas fundamentales:

- Preparación de las materias primas (molienda, pulverización)
- Fabricación de las peletas del concentrado de cromo y del reductor sólido (con la introducción en la materia de carga el polvo del sistema de depuración de gas)
- Secado y calcinación reductora de las peletas en la parrilla de cadena
- Fundición eléctrica de la caliza caliente en el horno cerrado en presencia del reductor y silicio fundente. Los humos de muchas calorías se dirigen a la máquina de tostación.

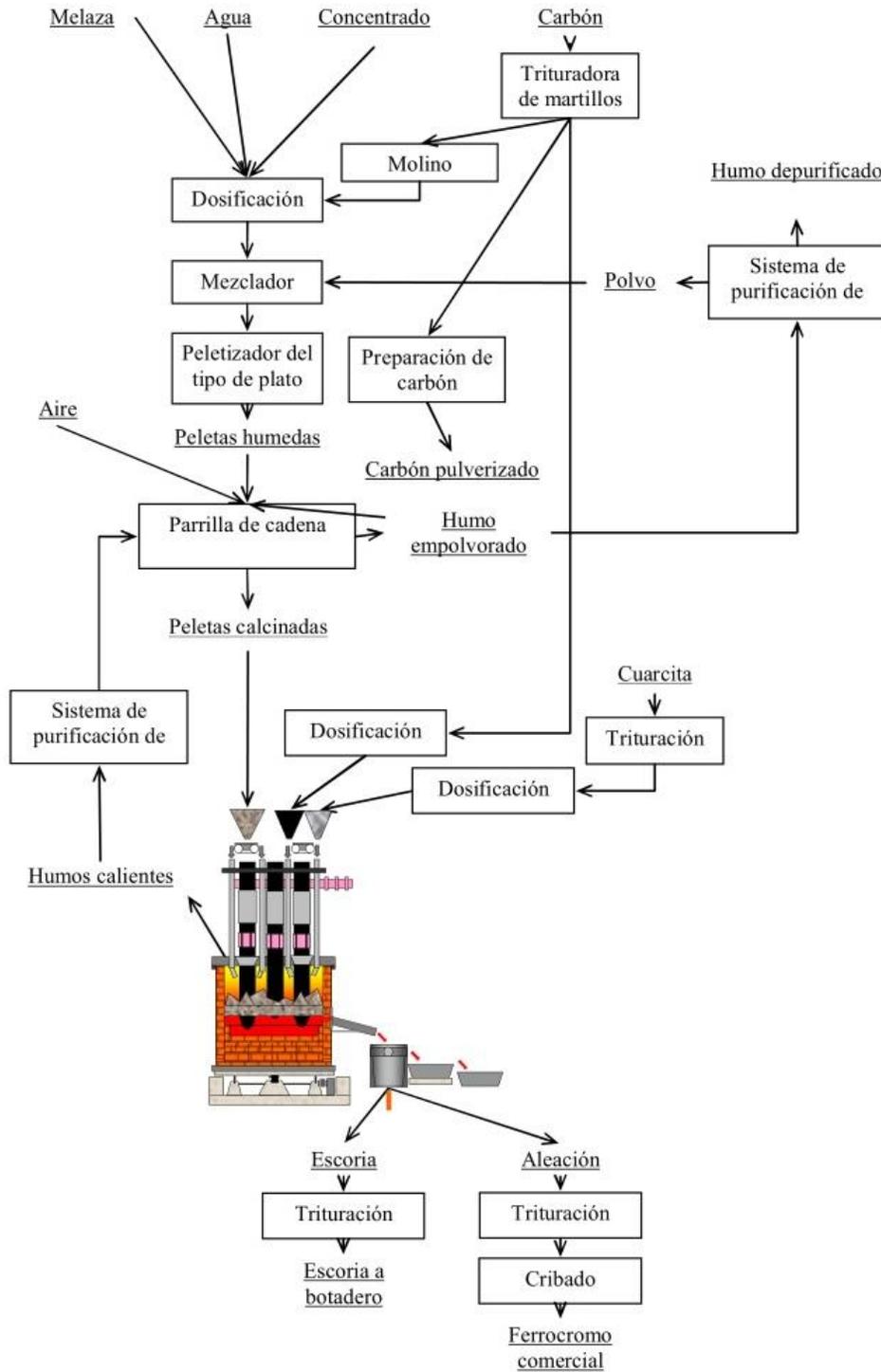


Figura 1. Esquema de producción de la tecnología. (CONTRATO No 620n de 13.12.2011 con la Recuperación de Metales S.A. (REMET S.A.))

El concentrado no requiere de pulverización adicional antes de preparación del material de carga.

El carbón para la carga de peletización se somete a molienda y pulverización hasta la dimensión de 100 % -0,1 mm.

El carbón utilizado como el combustible después de molienda, se pulveriza y pasa al sistema de transporte neumático a los quemadores de la parrilla (máquina de tostación).

El carbono utilizado como el reductor en el horno de reducción debe tener la dimensión 5-20 mm, la fracción fina (-5 mm) se tamiza, las piezas gruesas (+20 mm) se someten a la molienda.

La melaza que se utiliza como el ligante está en la fábrica en forma de líquido viscoso, si es necesario, se hace hasta la densidad necesaria mediante la dilución por agua.

La cuarcita empleada como fundente debe tener la dimensión de 5-20 mm, las piezas más gruesas se someten a trituración.

El concentrado, el carbón molido, el polvo reversible del sistema de depuración de gas, el ligante, y, si es necesario el agua adicional, se mezclan en el mezclador y pasan al peletizador del tipo de discos. Las peletas se descargan del peletizador con la dimensión 10-20 mm. Las peletas húmedas entran a calcinación en la parrilla de cadena, donde se secan y se calientan hasta  $\sim 1\ 350\ ^\circ\text{C}$ , con eso procede la reducción parcial de metales. La fuente básica de calor para la parrilla es el proceso de combustión adicional de los humos de muchas calorías del horno eléctrico; como el combustible auxiliar se utiliza el carbón pulverizado.

Las peletas calcinadas calientes entran al horno de arco eléctrico sumergido con el forro de magnesita; ahí se carga el carbón, cuarcita, los desechos propios de aleación. Después del consumo de la cantidad de energía proyectada para la obtención de la cantidad reglamentada de la masa fundida, el metal y la escoria se vierten en la cuchara de colada. El ferrocromo se vierte de la cuchara colocada en la grúa por la boca de colada inferior en las lingoteras de acero, llenada con cribas formadas al triturar los lingotes de ferrocromo. El metal se vierte hasta la aparición de los índices de escoria, después siguen vertiendo la escoria en la matriz separada para el enfriamiento y su trituración posterior. Los lingotes de ferrocromo enfriados se someten a la trituración en la trituradora de mandíbula y al cribado en la criba con la tela 10x10 mm (en función de las demandas del cliente, el ferrocromo se puede

descargar en la forma de pedazos con una masa no más de 20 kg o por la clase de dimensión de 100-315 mm a 5-20 mm).

Los resultados de dicha tecnología aportan un ferrocromo con la siguiente composición química (Tabla 3):

Tabla 3. Composición química del ferrocromo %. Tomado de Contrato N° 620n

Ni	Co	Fe	Cu	Si	Cr	S	P	C
0,36	0,09	35,07	0,02	3,97	53,91	0,05	0,04	6,50

## **Análisis de la competencia y los posibles consumidores**

### **Análisis de la competencia (Actualitix)**

Los principales productores de cromo a nivel mundial son Sudáfrica, Turquía, Kazajastán, India y Pakistán, en este mismo orden se presentan en el ranking de las estadísticas como países exportadores. Estos países responden a casi el 76 % de la producción mundial (Tabla 4).

Tabla 4. Ingresos anuales de los principales productores de Cr

	Sudáfrica	Turquía	Kazajastán	India	Pakistán
2004	95 936 892	60 936 840	58 482 841	2 203 820	20 892 814
2005	167 746 759	103 568 439	122 506 383	255 490 018	30 426 569
2006	307 223 870	120 239 521	134 248 134	194 561 192	30 922 540
2007	559 765 766	253 243 841	218 227 000	292 856 000	91 400 382
2008	913 586 293	498 412 342	428 740 995	237 595 912	160 582 638
2009	647 238 907	267 800 452	178 570 280	144 799 689	75 522 936
2010	1 097 863 382	471 455 910	211 440 442	116 674 315	150 857 417
2011	1 556 865 828	465 388 718	366 713 594	75 553 608	102 189 455
2012	1 136 783 334	418 070 103	297 260 560	77 098 252	115 859 552
2013	1 341 931 783	453 594 092	267 266 220	75 496 155	113 707 669
2014	1 073 708 916	342 845 754	215 346 676	26 543 869	87 171 794

Sudáfrica posee el 84 % de la reserva del planeta, sin embargo, produce solo el 43 % de la producción mundial originando más de 12 millones de toneladas métricas al año y ha sido el proveedor mayor de cromo en forma de mineral y ferrocromo a países occidentales industrializados.

La capacidad de producción anual de Turquía de más de un millón de toneladas de mineral de cromo hace que sea un productor líder a nivel mundial.

En América, el mineral de cromo (cromita) solamente se explota en Brasil constituyendo poco más del 1 % de la producción mundial.

Los principales yacimientos de cromo en Cuba, en forma de cromita, se encuentran en Potosí, Cayo Guam y Yamanigüey, en Oriente. Cuba tiene una de las mayores reservas de cromitas del continente americano. Estas cromitas corresponden, fundamentalmente, al tipo refractario, producto de los minerales que lo acompañan y no se les puede dar el destino para la producción de acero inoxidable. Sin embargo, el cromo proveniente de los residuos del proceso productivo de Ni + Co se encuentra en su estado metalúrgico, y es idóneo para esta actividad.

Con los datos anteriormente mencionados y basándose en la cantidad del mineral cromo que se podría explotar de las presas de colas, se puede llegar a la conclusión de que esta cantidad resulta insignificante en comparación a las grandes productoras de cromo mundial, por lo que su explotación en Cuba no sería con carácter exportable sino con el objetivo de sustituir importaciones a empresas que en el país se dedican a la fabricación de aceros inoxidables.

Los posibles clientes del producto analizado serían las principales empresas productoras de aceros inoxidables en el país: Cubana de Acero, Antillana de Acero y ACINOX Las Tunas, tres empresas creadoras de productos para el consumo nacional y que necesitan de materias primas del mineral de cromo para desarrollar sus aleaciones de aceros.

Cubana de Acero: fabrica productos metálicos a solicitud de los clientes. Realiza diferentes estructuras metálicas y realiza trabajos de pailería y soldadura, transformado y maquinado del acero.

Antillana de Acero: produce cabillas y acero líquido, fabrica palanquillas, semiproducto para producir cabillas y barras.

ACINOX Las Tunas: elabora productos largos de aceros inoxidables y aleados.

### **Análisis de la tendencia de los precios del ferrocromo en el mercado internacional**

Los precios del ferrocromo se buscaron en la página InfoMine.com, los cuales se muestran en la Figura 2 y Tabla 5, como se puede observar, osciló entre 1,75 USD/kg y 2,90 USD/kg, con un promedio de 2,20 USD/kg, aproximadamente. Además, se puede decir que el precio tiene un comportamiento bastante estable en el mercado.

Tabla 5. Precios del Ferrocromo USD/kg

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2014	2,37	2,30	2,08	2,51	2,49	2,54	2,29	2,20	2,15	2,28	2,26	2,21
2015	2,25	2,22	2,19	2,18	2,12	2,10	2,12	2,00	1,95	1,80	1,80	1,78
2016	1,77	1,75	1,79	1,90	1,92	1,88	1,83	1,82	1,83	1,85	1,97	2,05
2017	2,15	2,25	2,34	2,45	2,49	2,60	2,70	2,70	2,80	2,89	2,90	2,81



Figura 2. Precios del ferrocromo en el período enero/2014 a diciembre/2017.

### Análisis de la tendencia por el método de redes neuronales

Para determinar la tendencia del precio se utilizó el método de redes neuronales apoyadas por el software MATLAB, el cual constituye una herramienta útil en la aplicación de los métodos estadísticos matemáticos.

Primeramente, se normalizaron los precios a una escala entre cero y uno, esto se realiza dividiendo todos los precios entre el valor máximo de precio; y se enumeraron los meses de los cuatro años desde 1-48. Estos datos constituyen las dos variables de la red neuronal: los meses (tiempo) es la variable de entrada y el precio la variable de salida.

Una vez definidas las variables se procede a crear la red neuronal, para la cual se utilizaron dos capas: una primera capa oculta definida con la función logsig (logarítmica) compuesta por 10 neuronas y una capa definida con una función lineal

para determinar las salidas (Figura 3). Los 48 datos se dividieron en tres partes: *Training* (70 %), *Validation* (15 %) y *Test* (15 %).

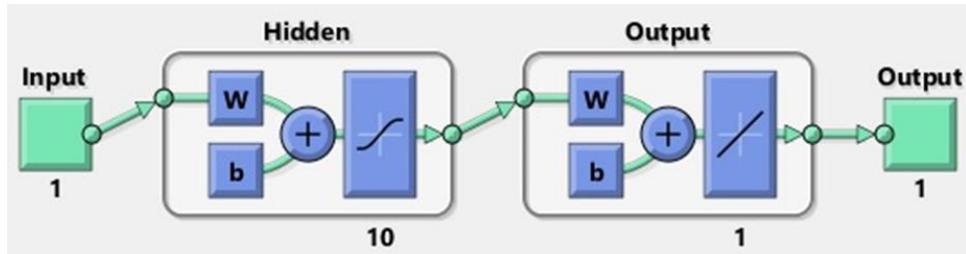


Figura 3. Red neuronal.

Los resultados de la utilización del software se muestran en la Figura 4.

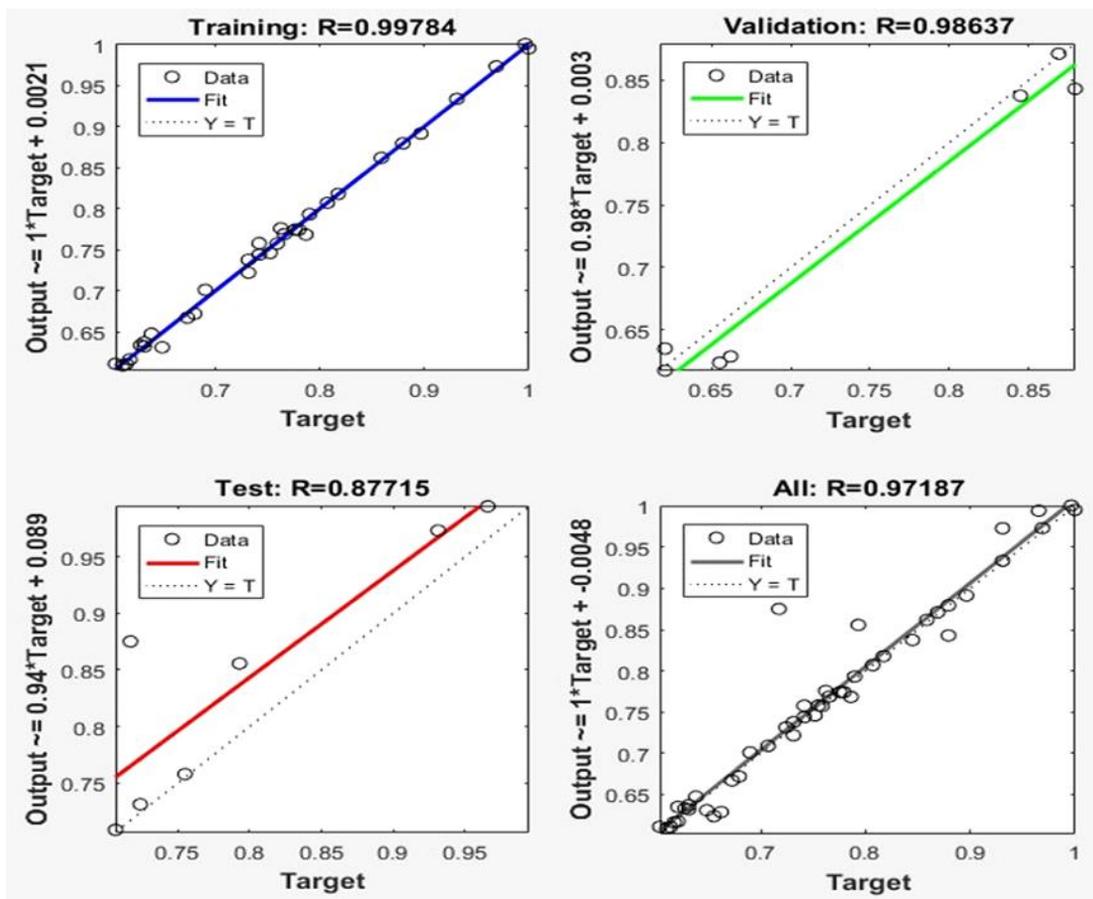


Figura 4. Resultado de las redes neuronales según el software MATLAB.

Según se observa el último gráfico (All), el modelo para la simulación del precio del ferrocromo es:

$$Output \cong 1 * Target - 0,0048.$$

Donde:

Ouput: Es el resultado de la predicción del precio entre cero y uno, debe ser multiplicado por el valor máximo para obtener el valor real.

Target: Es el valor simulado por el software para el tiempo futuro.

El modelo tiene un coeficiente de correlación de 0,9719, que significa que la correlación entre Ouput y Target es fuerte y positiva, es decir, que las estimaciones que se realizan mediante el modelo 1 son confiables.

Además, se realizó mediante el software, la estimación de los errores para cada etapa de la simulación, la cual se muestra en el gráfico de la Figura 5.

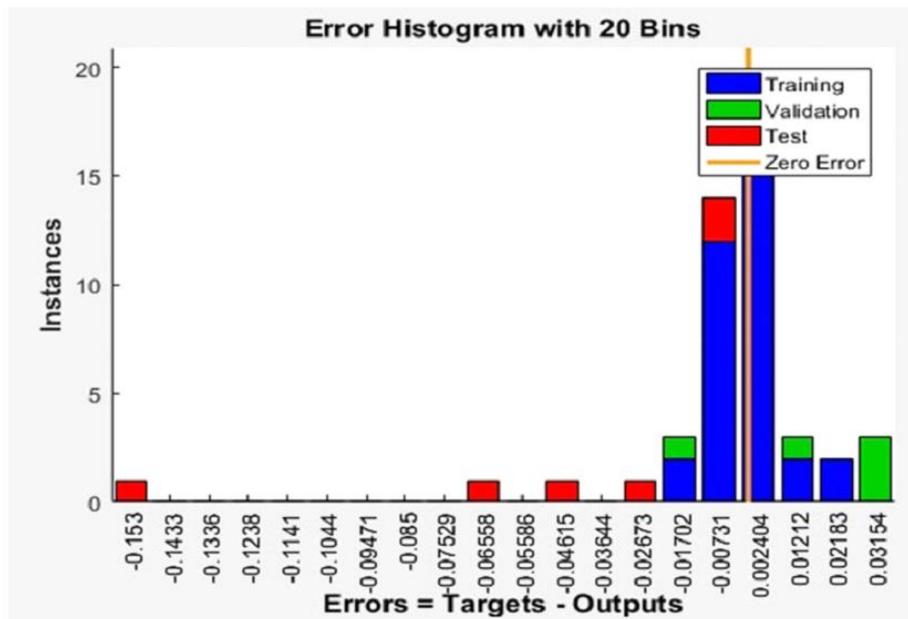


Figura 5. Histograma de los errores en la utilización del modelo.

Como se puede observar en el gráfico los errores oscilan entre -0,153 y 0,03154 pero la mayor concentración, Training (70 %), están concentrados entre -0,01702 y 0,02183, se puede concluir que las estimaciones a través del modelo de simulación son buenas.

Una vez ya creada la red neuronal, y comprobando de que su resultado es eficiente, se podrá predecir el precio del ferrocromo para cualquier mes de los próximos años.

Para realizar el pronóstico del precio del ferrocromo se debe utilizar el software MATLAB utilizando la red creada para la obtención del modelo de simulación.

### **Impacto medio ambiental**

Toda actividad minera modifica el medio ambiente, la minería del níquel mediante el proceso CARON no queda exenta a esta modificación, además se debe tener en cuenta que los residuales se almacenan en las llamadas presas de cola que también modifican el medio ambiente.

Estos residuales tienen una granulometría menor que 0,04 mm, lo que constituye un riesgo de contaminación para la población en tiempos de sequía y viento, producto de la nube de polvo que se levanta y contamina todo el municipio.

Con la propuesta, además de beneficio que se logra para el país, se contribuye a la disminución del riesgo y recuperación del medio ambiente.

La investigación responde a las tareas 3, 5 y 6 del proyecto Tarea Vida aprobado por el Consejo de Ministro el 25 de abril del 2017 (CITMA, 2017).

### **Impacto social**

Aunque existen reservas de níquel para otros 40 años (Cutiño, 2015), la aplicación de esta investigación generaría nuevos empleos o al menos permitiría mantener la condición de zona minera al municipio de Moa, con toda la estructura que lleva aparejada. Además, como se planteó anteriormente, eliminaría el riesgo de contaminación ambiental, mejorando la calidad de vida de la población.

### **Impacto económico**

En el análisis de la tendencia por el modelo de simulación se planteó que el precio estimado para junio 2018 es de 2,18 USD/kg, al convertirlo en toneladas, se obtendría un precio de 2.180,00 USD/t.

Anteriormente se estimó la cantidad del cromo en 2,1 MMT que al ser multiplicado por el precio arrojaría un resultado de 4 578 MMUSD en ahorro por la sustitución de importaciones en el país.

## Conclusiones

La disposición del cromo es aproximadamente de 2,1 millones de toneladas en los residuales del níquel; su aleación con el hierro y el níquel es altamente resistente a la corrosión y al calor, lo cual constituye la base para la propuesta de creación de una infraestructura.

La explotación de cromo-hierro, para el consumo nacional, constituye una actividad necesaria para la sustitución de importaciones.

La propuesta de esta investigación permite un ahorro por sustitución de importaciones por un monto de 4 578,0 MMUSD.

## Referencias bibliográficas

- BOXWELL, R. J. 1998. *Benchmarking para competir con ventajas*. McGraw-Hill, New York.
- CONTRATO No 620n de 13.12.2011 con la Recuperación de Metales S.A. (REMET S.A.). Desarrollo de tecnología para el procesamiento de los desechos industriales sólidos de la fábrica en Nicaro con la extracción de níquel, cobalto, hierro y cromo.
- CUTIÑO, E. 2015. *Aprovechamiento sustentable de las colas de la Empresa Ernesto Che Guevara, para su comercialización con fines siderúrgicos*. Tesis de maestría. ISMM. Moa.
- MINISTERIO DE CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE (CITMA). 2017. *Enfrentamiento al Cambio Climático en la República de Cuba. Tarea Vida*.
- KOTLER, P. Y ARMSTRONG, G. 2003. *Administración de la información de marketing. Disponible en Fundamentos de marketing*. 6 ed. Prentice Hall, México. 160 p.
- MONTERO, J. M. 2006. *El desarrollo compensado como alternativa a la sustentabilidad en la minería (aprehensión ético-cultural)*. Tesis doctoral. Universidad de La Habana.
- ROJAS, A. L. & TURRO, A. 2003. Composición mineralógica de las colas del proceso Caron en Moa, Holguín, Cuba. *Minería y Geología* 19(3-4): 8.

Turro, A.; Garcell, L. G. & Izquierdo, R. 2010. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso industrial CARON. *Tecnología Química* 23(2): 45-54.