

# Procesamiento hidrometalúrgico de minerales sulfurados del Complejo Marañón para la obtención del níquel y sus sales

SULPHIDE ORE HYDROMETALLURGICAL PROCESSING OF THE MARAÑÓN GEOLOGICAL COMPLEX FOR RECOVERY OF NICKEL AND ITS SALTS

D. Lovera<sup>1</sup>, J. Arroyo<sup>1</sup>, C. Landauro<sup>2</sup>, V. Arias<sup>1</sup>, J. Quiñones<sup>1</sup>, M. Pillaca<sup>2</sup>, L. Puente<sup>1</sup>, L. Sánchez<sup>1</sup>, M. Terrel<sup>1</sup>, J. Medina<sup>2</sup>, J. Diego<sup>1</sup>, H. Chilon<sup>1</sup>

RECIBIDO: 14/10/2013 – APROBADO: 20/12/2013

## RESUMEN

El Perú mantiene un posicionamiento en la minería mundial, en la extracción y producción de minerales de Cobre, Zinc, Plata, Oro, entre otros. Las prospecciones geológicas efectuadas nos indican un futuro promisorio en cuanto a nuestros minerales mencionados pero van apareciendo leyes de Níquel (Millerita) interesantes en algunos yacimientos del Complejo Marañón, lo que nos permite realizar investigaciones para su procesamiento hidrometalúrgico y de ese modo podamos construir una tecnología metalúrgica adecuada a nuestros minerales sulfurados y que redunden en ingresos económicos significativos a la inversión efectuada y al Estado Peruano. Mostramos los resultados de pruebas efectuadas en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica en la obtención de láminas de níquel metálico, así como también de subproductos en forma de cemento de níquel y cristales de sulfato de níquel.

**Palabras clave:** Metalurgia Extractiva, Rayos X, Procesos Metalúrgicos, Complejo Marañón, Níquel Metálico.

## ABSTRACT

Peru maintains a leading position in the world mining in connection to production and extraction of metals like copper, zinc, silver, gold among others. Geological exploration and prospecting already carried out, show us a promissory future for the above mentioned minerals and other interesting findings like nickel in millerite ore which was proved in some ore deposits of the Marañón geological complex.

This occurrence allowed us to carry out metallurgical investigation, specifically hydrometallurgical processing for the Peruvian sulphide ore aimed to the development of profitable mining operations for both private sector and the Peruvian state. We showed the metallurgical test results carried out at the metallurgical engineering school related to obtaining metallic nickel plates and its by products like cement and sulphate crystals.

**Key words:** Extractive metallurgy, X rays, metallurgical processes, Marañón geological complex, metallic nickel.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. E-mail: dloverad@unmsm.edu.pe

<sup>2</sup> Laboratorio de Difracción de Rayos X, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

## I. INTRODUCCIÓN

Estudios desarrollados en las últimas décadas tratan de procesar minerales sulfurados de níquel (Hubli, Mulak, Habashi) en distintos sistemas químicos sean ácidos o alcalinos, sea presión atmosférica o en autoclaves a alta presión con buenos resultados industriales y alta rentabilidad económica. El proyecto Trapiche presentan mantos mineralizados de Ni-Co con disseminaciones, venillas o concentraciones variables de millerita, pentlandita, asociados a la pirita, localmente calcopirita (Soto, 2010). La recuperación hidrometalurgia del cobre-níquel se sustentan en tecnologías existentes a nivel mundial (Proceso Moa), Proceso INCO-Lixiviación a Presión (Argentia – Canadá), de gran aplicación industrial, pero en nuestro medio nacionales de poca aplicación (Habashi, 2010). En el 2011 en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica-UNMSM nuestro equipo de Investigación (Lovera, Puente, Quiñones, Arias, Landauro, Soto, Pillaca, entre otros) desarrollamos pruebas exitosas en la obtención de Níquel Metálico con minerales nacionales y que debe ser profundizado en pruebas posteriores. (Lovera, 2010, 2011, 2012)

En cuanto a los precios internacionales el níquel es mucho mayor que el cobre y zinc lo que le hace atractivo desde el punto de vista económico y la parte tecnológica es la que debemos desarrollar para que la diversidad de minerales nacionales pueda ser aprovechada. (Minería al Día, 2013)

## II. MARCO CONCEPTUAL

El gobierno de Barack Obama, en estrecha colaboración con instituciones científicas y tecnológicas, está trabajando en el diseño de una estrategia para garantizar el desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energías renovables (solar, eólica, biomasa) y componentes industriales libres de polución, para lo cual requiere el suministro continuo de quince materiales estratégicos. (Departamento de Energía-USA, 2011). Son considerados para la estrategia ambiental: 1) indio, 2) galio, 3) telurio, 4) disprosio, 5) praseodimio, 6) neodimio, 7) lantano, 8) cobalto, 9) manganeso, 10) níquel, 11) litio, 12) cerio, 13) terbio, 14) europio, 15) ytrio.

El Perú es productor importante de telurio del cual es tercer productor mundial (30 toneladas en el 2010). El indio metal que es refinado en la Refinería de Cajamarquilla, por la brasileña Votorantim Metals, y del cual somos el sexto productor mundial.

En ese sentido para alcanzar otro material crítico como es el caso del níquel, el Instituto de Investigación a través de proyectos metalúrgicos viene desarrollando pruebas experimentales para que a partir de minerales con Millerita por procesos hidrometalúrgicos puedan obtener soluciones PLS de sulfato de níquel que serán purificadas por Extracción por solventes LIX 84-INS (OXIMA) (COGNIS, 2009). Finalmente desarrollar una precipitación química conchatarra de hierro y/o zinc (cemento de níquel) y/o por precipitación electrolítica obtener cátodos de níquel de buena calidad.

## III. EXPERIMENTACIÓN

### 3.1 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica de esta muestra indica todos los minerales que han sido observados, de los cuales algunos no han intervenido en el análisis modal, el motivo de esta no intervención es porque están en el orden de trazas; en la Tabla N.º 1 se muestran esos minerales:

Tabla N.º 1. Caracterización mineralógica.

Minerales	Fórmula	Abreviaturas
Pirrotita	$Fe_{1-x}S$	Po
Millerita	NiS	Mi
Calcopirita	$CuFeS_2$	Cp
Esfalerita	ZnS	Ef
Arsenopirita	FeAsS	Apy
Pirita	$FeS_2$	Py
Goetita	FeO.OH	Gt
Magnetita	$Fe_3O_4$	Mt
Covelita	CuS	Cv
Gangas		GGs

Fuente: Quiñones-UNMSM; 2009-2010.

### 3.1.2 Distribución volumétrica

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal y se muestra en la Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2. Distribución volumétrica.

Minerales	Volumen porcentual
Pirrotita	98,94
Millerita	0,10
Calcopirita	0,01
Esfalerita	Trazas
Arsenopirita	Trazas
Pirita	Trazas
Goetita	Trazas
Magnetita	Trazas
Covelita	Trazas
Gangas	0,05

Fuente: Quiñones. 2009. 2010.

En las Figuras N.º 1, 2, 3 y 4 se puede apreciar las partículas libres de Millerita asociada a Pirrotita y Goetita.

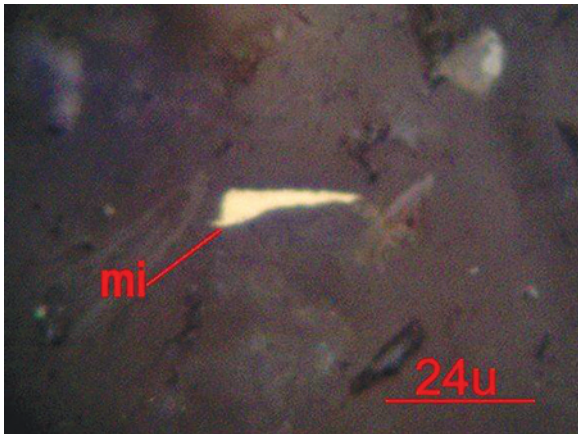


Figura N.º 1. Partícula libre de Millerita. Magnificación: 500X.

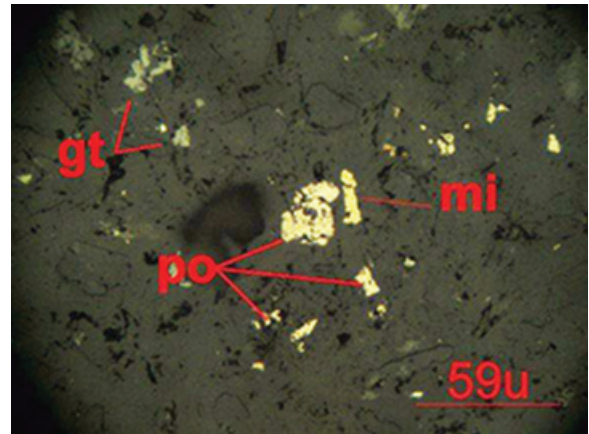


Figura N.º 2. Partículas libres de Millerita (mi), de Pirrotita (po), y también están las partículas libres de goetita. Magnificación: 200X.

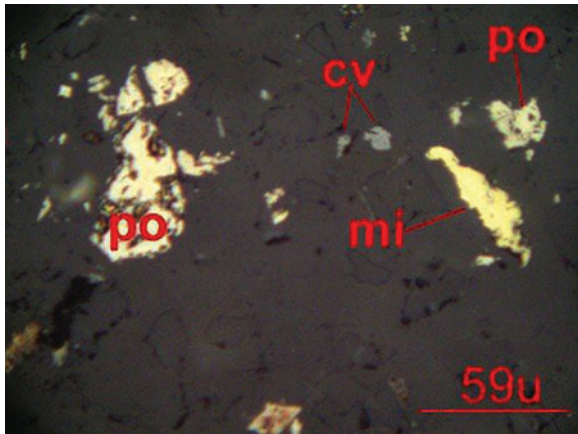


Figura N.º 3. Partículas libres de Pirrotita (po), de Millerita (mi), y también están las partículas libres de covelita (cv). Magnificación: 200 X

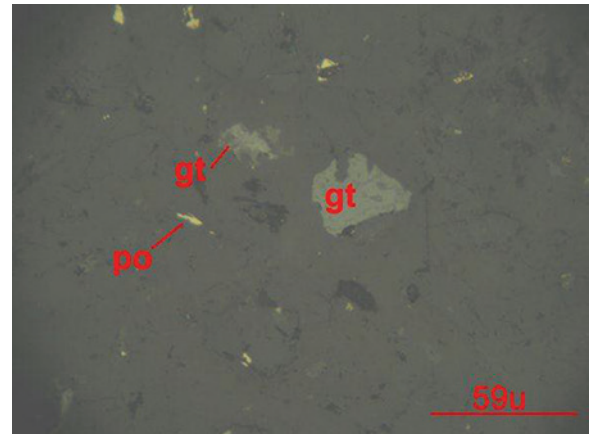


Figura N.º 4. Partículas libres de goetita (gt), de Pirrotita (po). Magnificación: 200X.

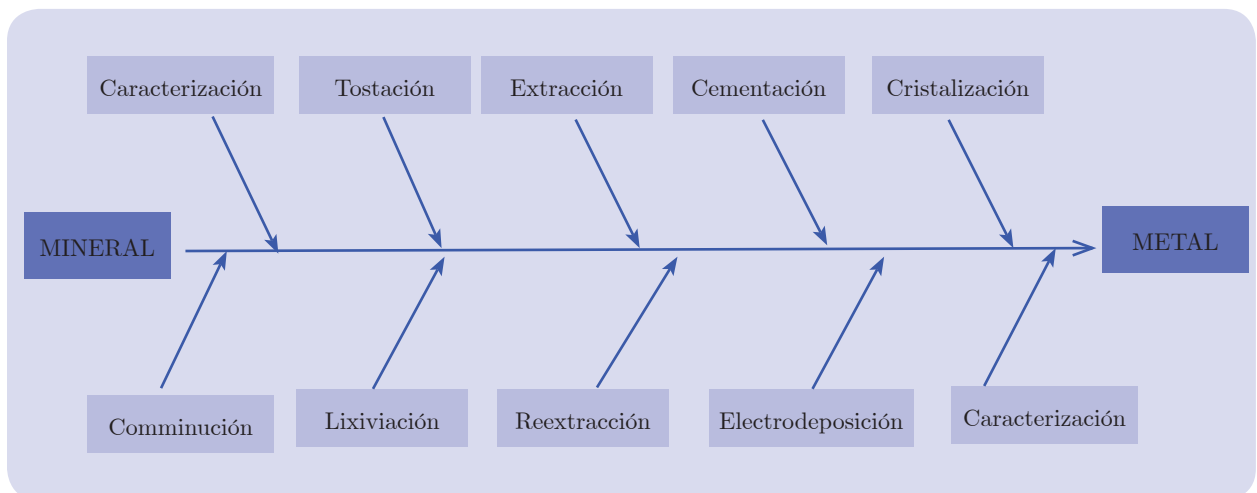


Figura N.º 5. Diagrama de Ichikawa de los Procesos Unitarios involucrados

### 3.2 Caracterización química

El mineral en estudio es una millerita que contiene 1284 ppm de níquel y va acompañado de otras especies químicas como se pueden apreciar en la Tabla N.º 3.

Tabla N.º 3. Análisis químico de la muestra mineral.

Elemento	Composición
Mg	7.22 %
Mo	3 ppm
Ni	1284 ppm
Sr	141.2 ppm
Zr	43.9 ppm

Fuente: SGS

## IV. PRUEBAS HIDROMETALÚRGICAS

### 4.1 Procesos unitarios de lixiviación, extracción por solventes y electrodeposición

Las pruebas metalúrgicas se basan en a partir del mineral a través de una serie de procesos unitarios llegar a obtener el metal base níquel. Como se puede apreciar en la Figura N.º 5. Actualmente a nivel industrial se tiene experiencias exitosas en la obtención de níquel como el caso de la Planta de Argentina-Canadá, Moa-Cuba, Colombia, República Dominicana y Noruega, China y Rusia.

Se muestra en la Figura N.º 6 el Diagrama de Flujo del Proceso de Electrodeposición, Extracción por Solventes de soluciones lixiviadas de Níquel cuando van acompañadas de Cobre y Zinc. Soto (2009, 2011)

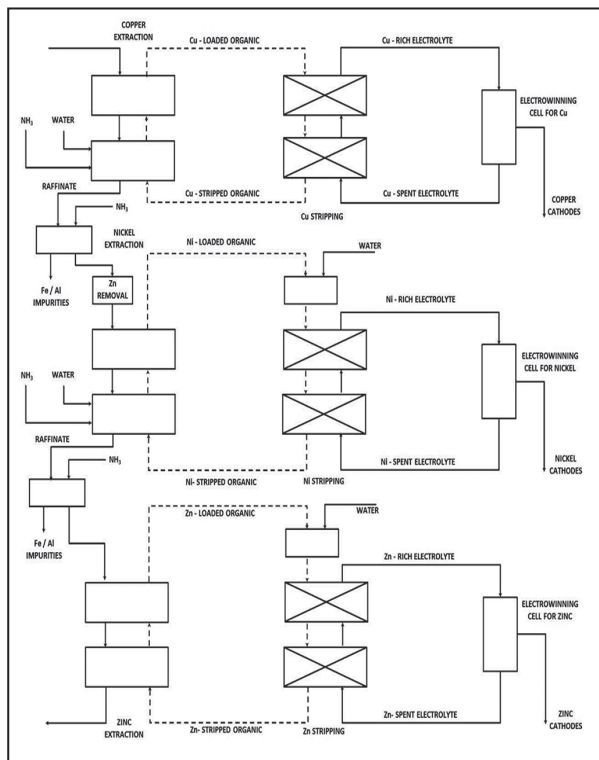


Figura N.º 6. Diagrama de flujo de los procesos de lixiviación, electrodeposición y extracción por solventes de soluciones lixiviadas de cobre, zinc y níquel.

En las Figuras N.º 7 y 8 siguientes se muestran las condiciones de la electrodeposición del níquel y el reporte del análisis de la lámina de níquel emitido por la Facultad de Ciencias Físicas-UNMSM.

**Electrodeposición del níquel**

- Se prepara una solución de 2 litros que contiene por litro: 200g NiSO<sub>4</sub>, 30g NiCl<sub>2</sub>
- 15 g ácido bórico, este ácido funciona como solución buffer
- pH de la solución: 3 - 3.5
- Área cátodo sumergido: 14 cm<sup>2</sup>
- Peso cátodo inicial: 17.04 g
- Peso cátodo final: 17.04 g
- Peso electrodepositado: 0.58 g
- Tiempo electrodeposición: 1 hora
- AMPERAJE: 0.56 A
- VOLTAJE: 4.2 - 3.5 V
- Densidad Corriente: 200 A/m<sup>2</sup>
- Peso teórico electrodepositado: 0.61 g
- Eficiencia corriente: 95 % aprox.

Figura N.º 7. Condiciones de la electrodeposición del níquel y el reporte del análisis de la lámina de níquel emitido por la Facultad de Ciencias Físicas-UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
 Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA  
 FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS  
 LABORATORIO DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Lima, 27 de Junio de 2011

**REPORTE DEL ANÁLISIS DE UNA LÁMINA METÁLICA BLANCA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

MUESTRA: lámina metálica blanca

**INFORMACIÓN EXPERIMENTAL:**

**Condiciones de la medición:**

- El análisis se realizó en un Difractómetro marca BRUKER, modelo D8-FOCUS
- Se empleó un tubo de Cu, cuya longitud de onda correspondiente a K<sub>α1</sub>-Cu es λ=1.5406Å.
- Rango angular de análisis (2θ) :  
 Inicio: 20°  
 Final: 110°  
 Paso: 0,04
- Generador Rayos-X:  
 Voltaje de ánodo del tubo= 40 kV  
 Corriente de salida del tubo = 40 mA.

**Características de la muestra analizada:**  
 Se analizó una lámina metálica delgada de dimensiones 2,5cm x 2,5cm aprox., codificada como "lámina metálica blanca"

**ANÁLISIS**  
 Al realizar la comparación del difractograma de la muestra, codificada como "lámina metálica blanca", con los difractogramas de la base de datos ICDD-2007 se determinó la presencia de la siguiente fase:

JCPDS-ICDD	Nombre	Fórmula Química	Descripción
73-0826	Níquel	Ni	Níquel

El difractograma correspondiente a la fase encontrada se observa en la figura 1.

Landauro, 2011

Figura N.º 8. Reporte del Análisis de la lámina de níquel emitido por la Facultad de Ciencias Físicas- UNMSM.



#### 4.2 Cristalización del Sulfato de Níquel

Mostramos resultados de volúmenes evaporados de PLS de sulfato de níquel. Ver Figura N.º 9. La formación de cristales de sulfato de níquel sigue una cinética de primer orden con perfil como se muestra en la Figura N.º 10.

### V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1 Cementos de cobre y níquel

Las soluciones lixiviadas pasan a ser purificadas y luego precipitadas químicamente con hierro metálico, lo que nos

permite precipitar el cobre. Del modo análogo se precipita de sus respectivas soluciones el níquel electrolítico. Ver Figura N.º 11.

#### 5.2 Cristales de sulfato de cobre y níquel

Aplicando la operación unitaria de cristalización a las soluciones lixiviadas purificadas podemos obtener cristales de sulfatos de cobre y níquel respectivamente. Ver Figura N.º 12

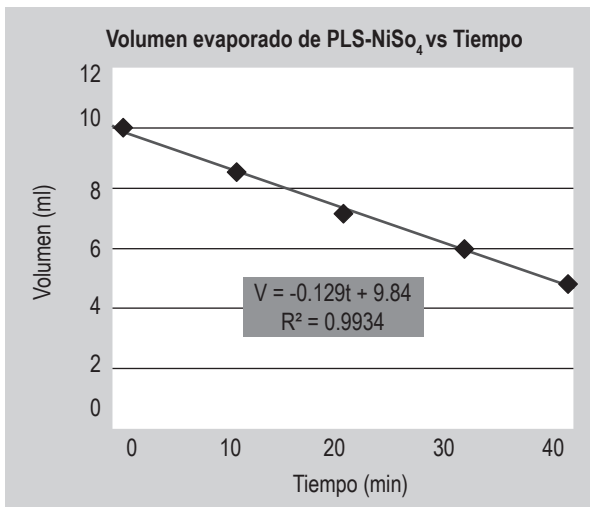


Figura N.º 9. Volumen Evaporado de PLS-NiSO<sub>4</sub> vs. Tiempo

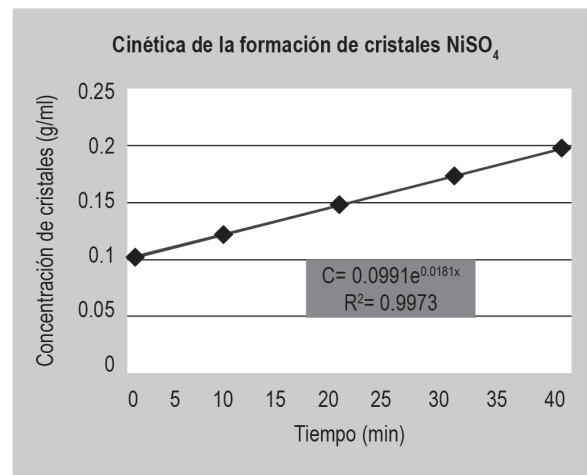


Figura N.º 10. Cinética de la formación de cristales NiSO<sub>4</sub>

### CEMENTOS DE COBRE Y NÍQUEL



Figura N.º 11. Formación de cobre y níquel metálico.

## CRISTALES DE SULFATO DE COBRE Y NÍQUEL

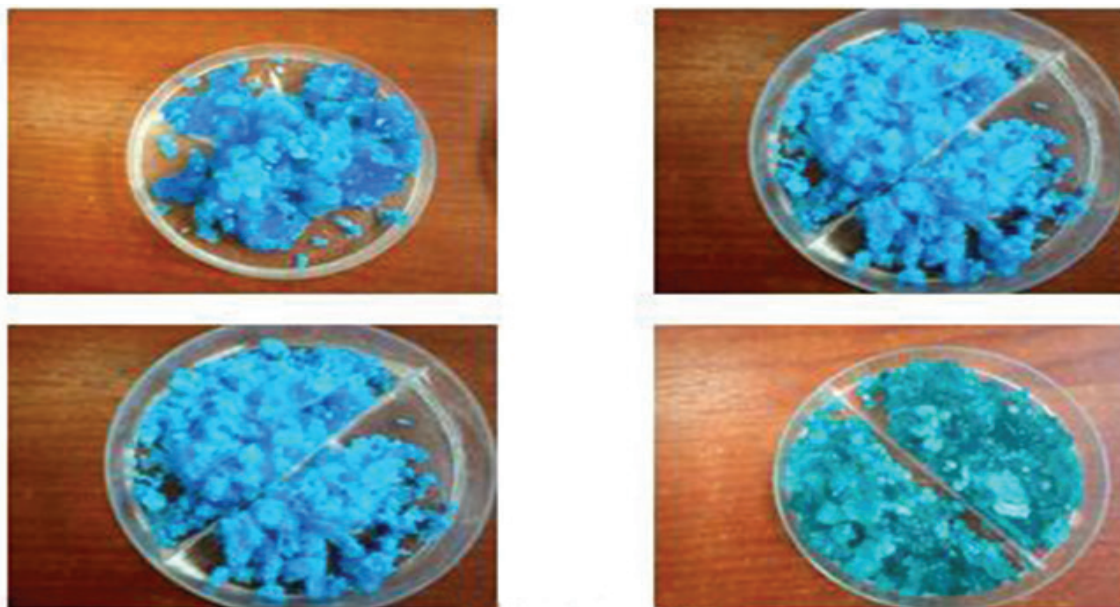


Figura N.º 12. Formación de cristales de sulfato de cobre y níquel.

## 5.3 Productos de níquel obtenidos

Mostramos los difractogramas del cátodo y cemento de Níquel en las Figuras N.º 13 y 14. (Landauro, 2011)

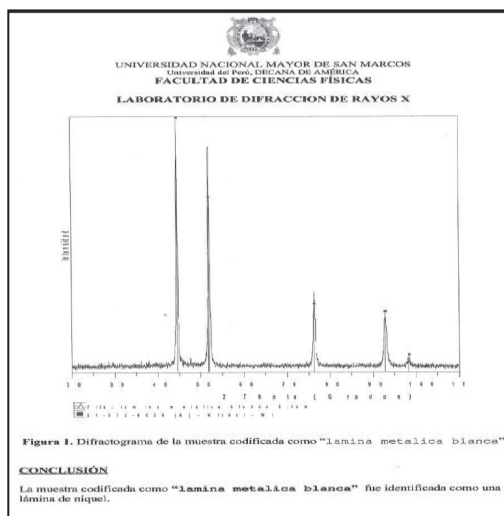


Figura 1. Difractograma de la muestra codificada como "lámina metálica blanca"

## CONCLUSIÓN

La muestra codificada como "lámina metálica blanca" fue identificada como una lámina de níquel.

Figura N.º 13. Difractograma de cátodos de cobre (Landauro, 2011)

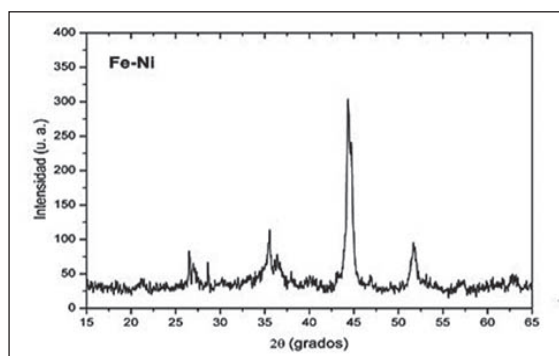


Figura N.º 14. Difractograma de rayos X de níquel.

## VI. CONCLUSIONES

- Se cuenta con minerales níquelíferos a nivel nacional. Las reservas todavía no están estudiadas, hay empresas que están trabajando en la Cordillera Oriental-Zona de Huánuco y en otras regiones como Junín entre otras.
- Se cuenta con pruebas de lixiviación, cementación y electrorrefinación en el Laboratorio de Química y Físicoquímica-Escuela de Ingeniería Metalúrgica-UNMSM
- A escala Laboratorio se logra obtener cementos de cobre y níquel, cristales de buena calidad de sulfato de cobre y sulfato de níquel y cátodos de níquel de buena calidad.

## VII. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica, al Vicerrectorado de Investigación, al Consejo Superior de Investigaciones-CSI, al Instituto de Investigación IIGEO y al Instituto de Investigaciones de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el apoyo brindado al Proyecto de Investigación IIGEO-CSI-VRI N.º 131601011. A la Minera CHAVINITA por la donación de minerales sulfurados y al apoyo técnico brindado.

## VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. Lovera. D, Bustamante. A, Quiñones. J, Puente. L (2005). Caracterización fisicoquímica y pruebas metalúrgicas en la prospección de minerales polimetálicos en el Complejo Marañón-Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*. Vol. 8, N.º 16: 44-50.
2. Lovera. D, Bustamante. A, Quiñones. J, Puente. L (2010). Cinética de la reducción carbotérmica de la

- calcopirita del complejo Marañón-Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*. Vol. 13, N.º 25: pp. 21-26
3. Landauro, C. (2011). Informe de caracterización de difracción de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectroscopia Mössbauer (EM)
  4. Proyecto de Investigación N.º 131601011-VRI-IIGEO-UNMSM. 2013.
  5. Lovera, D. (2012). “Empleo intensivo de la tecnología metalúrgica del cobre electrolítico en la producción nacional”. Congreso de Metalurgia y Materiales, Lima, noviembre
  6. Soto A. (2010). Experiencias metalúrgicas en la recuperación de níquel. Congreso Nacional de Minería, Trujillo.
  7. Habashi.F. Pressure Hydrometallurgy Update, XXII International Mineral. Processing Congress, 2006, Istanbul.
  8. Cognis, Mining Chemicals Technology (2009).
  9. Quiñones, J. Informe Microscopia óptica del mineral sulfurado del Complejo Marañón. 2009, 2010
  10. Soto, R. Solís, A. Informe de pruebas metalúrgicas de LIX-SX-EW- FIGMMG -UNMSM. 2009, 2011
  11. Lovera *et al.* (2011). Informe Hidrometalurgia de los minerales sulfurados de cobre y níquel, IIGEO-CSI-VRI-UNMSM.
  12. Departamento de Energía de USA (2011). “Estrategia sobre Materiales Críticos 2011”.