

Aplicación del análisis multi-espectral para el reconocimiento automatizado de menas metálicas

Use of multi-spectral analysis for automatic identification of ores

Juan Carlos Catalina ⁽¹⁾, Fernando Segundo ⁽¹⁾, Carolina Brea ⁽²⁾, Laura Pérez-Barnuevo ⁽²⁾, Josefina Samper ⁽²⁾, José Antonio Espí ⁽²⁾, Lázaro Sánchez ⁽²⁾ y Ricardo Castroviejo ⁽²⁾

⁽¹⁾ AITEMIN, c/Margarita Salas, 14, Parque Leganés Tecnológico, 28918 Leganés, Madrid (Spain) fernando.segundo@aitemin.es

⁽²⁾ Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Minas, c/Ríos Rosas, 21, 28003, Madrid (Spain). Carolina.brea@alumnos.upm.es;

laura_perez_barnuevo@hotmail.com; Josefina.samper@upm.es; Joseantonio.espi@upm.es; lazaro.sanchez@upm.es; Ricardo.castroviejo@upm.es

ABSTRACT

Traditional identification of ore minerals with reflected light microscopy relies heavily on the experience of the observer. Qualified observers have become a rarity, as ore microscopy is often neglected in today's university training, but since it furnishes necessary and inexpensive information, innovative alternatives are needed, especially for quantification. Many of the diagnostic optical properties of ores defy quantification, but recent developments in electronics and optics allow new insights into the reflectance and colour properties of ores. Preliminary results for the development of an expert system aimed at the automatic identification of ores based on their reflectance properties are presented. The discriminatory capacity of the system is enhanced by near IR reflectance measures, while UV filters tested to date are unreliable. Interaction with image analysis software through a wholly automated microscope, to furnish quantitative and morphological information for geometallurgy, relies on automated identification of the ores based on the measured spectra. This methodology increases enormously the performance of the microscopist; nevertheless supervision by an expert is always needed.

Key words: Automated ore microscopy, computer vision, multispectral reflectance data, VNIR, geometallurgy

Geogaceta, 46 (2009), 47-50

ISSN: 0213683X

Introducción

Durante la segunda mitad del siglo pasado la microscopía de luz reflejada ha sido el principal método de caracterización de minerales, sin embargo, su aplicación en la industria requiere una mejora de su rendimiento a través de la automatización y del aumento de la fiabilidad en la cuantificación.

Uno de los grandes avances en la microscopía de reflexión para el estudio de menas ha sido la información espectral recogida en *Quantitative Data Files* editado por el IMA / COM, y en concreto la última versión QDF3 (Criddle & Stanley, 1993), ya que se trata de una recopilación de valores espectrales de reflectancia de minerales en luz visible. El trabajo realizado en el proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas Metálicas mediante Visión Artificial) va más allá y ha hecho posible la obtención de datos espectrales de minerales no solo en el visible sino también en el infrarrojo (VNIR, *visible and near infrared*), a través de un sistema capaz de realizar una

identificación automatizada de los minerales así como su caracterización geometalúrgica.

Proceso experimental

Materiales y métodos

Uno de los aspectos más importantes de este trabajo es la selección de las probetas pulidas de los minerales a medir ya que de su calidad dependerá la fiabilidad de los resultados obtenidos. Todas las probetas pulidas han sido estudiadas previamente, y en algunos casos repulidas para conseguir una superficie de calidad óptima; del mismo modo, se ha recurrido al análisis por microsonda electrónica en aquellos casos que así lo requirieron. Finalmente, sólo se han medido los minerales representativos presentes en probetas pulidas con superficie limpia y con tamaño de grano suficientemente grande. Las muestras empleadas provienen fundamentalmente de dos fuentes: una réplica de la colección de minerales empleada por el profesor Ramdohr (1980) en su libro, y las colec-

ciones de investigación y enseñanza de la UPM, completadas en algunos casos con aportaciones externas.

La microscopía de menas tradicional, bien documentada en la literatura (Criddle, 1998) se apoya fundamentalmente en el empleo de luz polarizada. Las observaciones realizadas mediante luz polarizada resultan de gran utilidad para la caracterización cualitativa de menas, sin embargo, la anisotropía de algunos minerales al ser observados con luz polarizada supone un grave problema para su estudio automatizado, por la imposibilidad de controlar la orientación de los granos minerales. Por ello, en este trabajo no se emplea luz polarizada, pero tal y como cabe esperar, los datos obtenidos se encuentran comprendidos entre los valores extremos de R dados por el QDF3. A pesar de que los minerales comunes pueden ser estudiados mediante imágenes en color capturadas con una cámara de video 3CCD (Berrezueta y Castroviejo, 2007), el empleo de imágenes multiespectrales es más fiable (Pirard, 2004). Para mejorar la capacidad de dis-

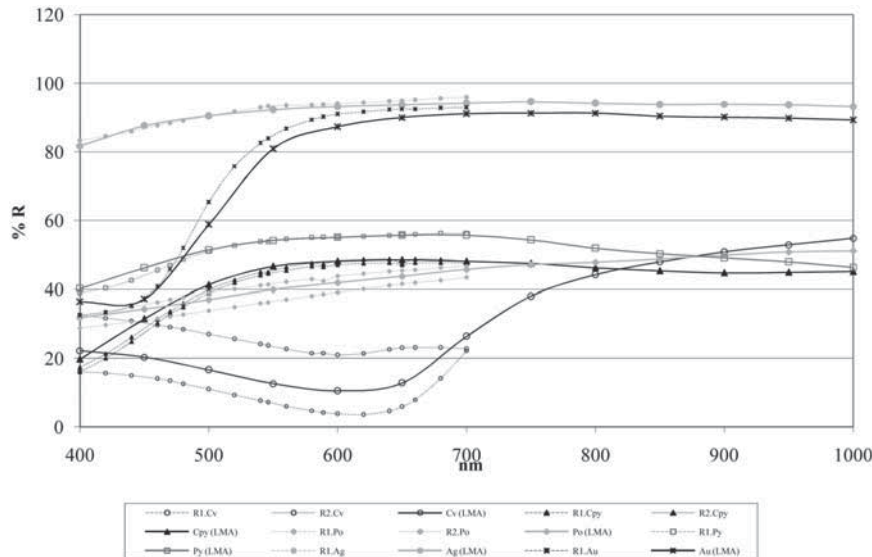


Fig. 1.- VNIR (400nm-1000nm) curvas de reflectancia espectral de algunos minerales comparadas con las curvas de luz visible (400nm-700nm, datos del QDF3) para los mismos minerales. Abreviaturas: código en Tabla I.

Fig. 1.- VNIR (400nm-1000nm) spectral reflectance curves for selected minerals from Table I, compared with the curves in visible light (400nm-700nm, data from QDF3) for the same minerals. Mineral abbreviations: code in Table I.

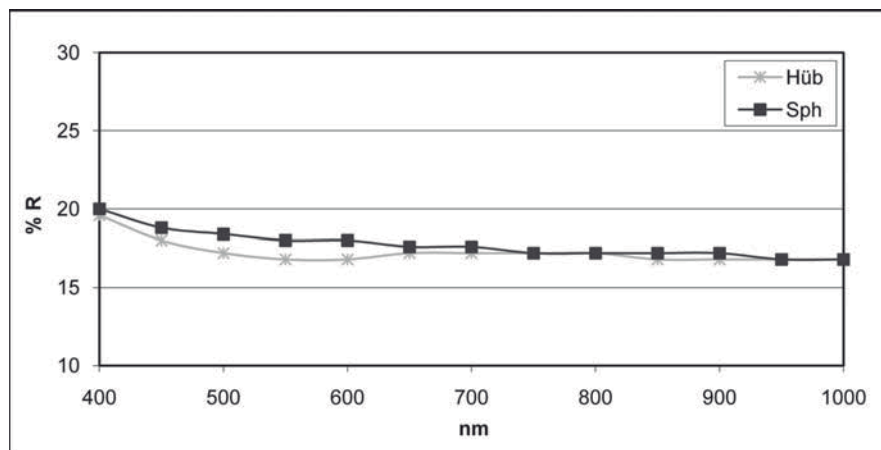


Fig. 2.- Curvas de reflectancia espectral de hübnerita y esfalerita. Abreviaturas: código en Tabla I.

Fig. 2.- VNIR spectral reflectance curves for hübnerite and sphalerite. Abbreviations: code in Table I.

criminación del sistema se han tomado valores espectrales no sólo en el rango visible (como en QDF) sino también en el infra-rojo cercano (hasta 1000 nm). Para ello ha sido necesario sustituir los filtros anticalóricos originales del microscopio por un filtro *hot mirror* para longitudes de onda superiores a 1000 nm. Esta metodología se encuentra descrita en detalle en Pirard et al. (2008), Castroviejo et al. (2008), y Catalina et al. (2008).

Los filtros ultravioleta ensayados hasta el momento (con longitudes de onda inferiores a 400 nm) no han resultado válidos ya que transmiten una parte de luz visible; por ello, los valores obtenidos para UV no han sido incluidos en este trabajo. No obstante, se están ensayando nuevos filtros que permitan obtener valores fiables de reflectancia en UV.

Instrumentación

El trabajo experimental ha sido llevado a cabo en el *Laboratorio de Microscopía Aplicada* (LMA, ETSI Minas/UPM, Red de Laboratorios de la Comunidad de Madrid rla 207) y en

AITEMIN, con la siguiente instrumentación:

Microscopio automatizado de luz reflejada (*Leica DM6000M* en LMA, *Zeiss Axioskop 2 MOT* en AITEMIN), ambos equipados con una rueda de filtros *DTA RPF16* compuesta de 13 filtros de interferencia *Melles Griot* para medir las longitudes de onda comprendidas entre 400 y 1000 nm (ambos incluidos), a intervalos de 50 nm (40 nm FWHM). Por otro lado, las imágenes han sido adquiridas con una cámara de video digital *Basler Scout sca1400fm* con interfaz IEEE-1394. Los patrones de calibración empleados son *Ocean Optics STAN-SSH* y *STAN-SSL* (de alta y baja reflectancia respectivamente).

Base de datos multispectrales VNIR y su uso

Base de datos: resultados preliminares

Con los datos espectrales medidos se está creando una base de datos VNIR. La tabla I muestra los resultados preliminares de los principales minerales presentes en la mayoría de las mineralizaciones de interés industrial. Los valores espectrales VNIR obtenidos se han comparado, en el rango visible, con los valores dados por QDF3, comprobándose en cada caso que los primeros están comprendidos entre los valores máximos y mínimos dados por QDF3. Además, las curvas obtenidas muestran tendencias similares. Los valores de NIR ponen de manifiesto que algunos minerales presentan un comportamiento peculiar para longitudes de onda superiores a 700 nm, estableciendo diferencias espectrales importantes, como en el caso de pirrotina y calcopirita, o covellina y bornita en la figura 1; en otros casos, el comportamiento en NIR no presenta cambios sustanciales con respecto a los valores espectrales del visible.

Aplicaciones

Los datos obtenidos hasta el momento deben ser completados para lograr cons-

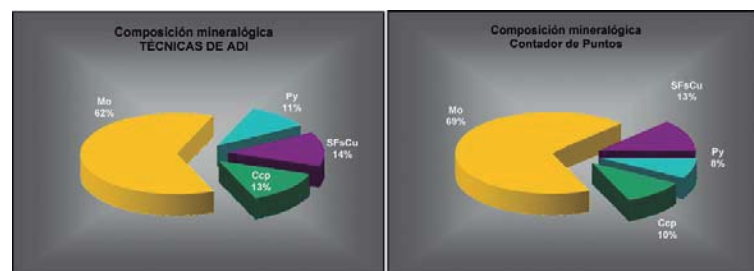


Fig. 3.- Análisis modal de la misma probeta por Análisis Digital de Imagen y Contador de Puntos.

Fig. 3.- Modal analysis of the same polished section by DIA and point counter device.

Tipo	Mineral (código)	Longitud de Onda (nm)												
		400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
1	Oro (Au)	36.4	37.2	58.8	80.9	87.3	90.0	91.1	91.3	91.3	90.4	90.1	89.8	89.3
	Platino (Pt)	60.2	63.1	65.2	66.9	68.0	69.0	70.1	70.8	71.0	71.7	72.4	72.9	73.2
	Plata (Ag)	81.7	87.6	90.5	92.3	93.2	93.7	94.2	94.6	94.2	93.8	93.9	93.7	93.2
2	Arsenopirita (Asp)	51.2	51.7	52.7	53.4	53.5	53.3	52.3	51.1	50.2	49.7	49.0	48.2	
	Bismutinita (Bm)	39.4	39.1	38.7	38.5	37.7	37.4	36.7	35.9	34.8	33.9	33.4	32.9	32.6
	Bornita (Bn)	20.7	19.4	21.0	24.3	27.2	30.3	33.2	35.3	36.9	37.8	38.6	39.2	40.0
	Calcopirita (Ccp)	19.7	31.5	41.3	46.6	48.1	48.5	48.1	47.5	46.2	45.3	44.7	44.9	45.1
	Calcosina (Ct)	36.4	36.6	34.9	32.8	31.4	30.1	29.1	28.5	28.0	27.3	27.3	27.4	27.8
	Cinabrio (Cin)	33.0	29.5	28.2	27.1	26.7	27.5	27.1	26.7	26.2	25.7	25.3	25.2	25.0
	Covellina (Cv)	22.2	20.3	16.6	12.6	10.5	12.8	26.4	38.0	44.2	47.9	50.8	52.9	54.8
	Cubanita (Cn)	23.1	31.7	36.8	39.6	41.0	42.1	43.3	43.8	43.5	43.5	43.6	43.7	43.3
	Digenita (Dig)	26.9	26.4	24.9	22.3	20.3	18.2	16.1	14.6	13.5	13.0	13.4	14.7	17.2
	Galena (Gn)	50.3	46.9	44.4	43.1	42.7	42.8	42.4	41.7	40.5	39.9	39.3	38.7	37.6
	Marcasita (Mar)	44.4	47.6	50.9	52.1	51.2	50.1	48.7	47.4	46.0	45.9	46.0	46.4	46.6
	Molibdenita (Mo)	23.1	24.7	23.2	21.9	22.1	22.5	22.6	21.8	21.4	21.1	20.9	20.9	21.0
	Niquelina (Nc)	42.8	41.5	44.9	51.3	56.2	59.7	63.1	65.8	67.2	68.8	70.2	71.3	71.6
	Pentlandita (Pn)	32.2	38.3	42.6	46.1	48.4	50.2	52.1	53.4	54.0	54.4	55.4	56.2	56.7
	Pirita (Py)	40.2	46.2	51.4	54.2	55.1	55.7	55.7	54.3	51.9	50.3	49.1	47.9	46.3
	Pirrotina (Po)	31.8	34.3	37.0	39.9	41.9	43.7	45.7	47.1	47.8	48.8	49.9	50.8	51.1
Esfalerita (Sp)	21.0	19.6	18.9	18.5	18.2	17.8	17.5	17.3	17.1	16.9	16.8	16.7	16.6	
Estibina (Stib)	35.8	34.4	33.6	33.0	32.1	32.0	31.4	30.6	29.6	29.1	28.6	28.3	28.2	
3	Tetrahedrita (Thd)	28.3	28.5	28.9	29.4	29.2	28.3	27.2	26.4	25.6	25.0	24.7	24.4	24.1
4	Casiterita (Cs)	13.8	13.4	13.0	12.9	12.6	12.7	12.5	12.4	12.2	12.0	11.9	11.8	11.8
	Cromita (Cr)	13.7	13.3	13.0	12.9	12.7	12.7	12.6	12.4	12.4	12.4	12.3	12.4	12.7
	Gohetita (Goe)	18.4	17.1	16.4	15.8	15.1	14.7	14.3	14.2	13.9	13.7	13.5	13.4	13.5
	Hematites (Ht)	28.4	28.6	27.9	27.1	25.6	24.0	22.8	22.1	21.3	20.7	20.4	20.1	19.9
	Ilmenita (Il)	21.0	19.0	18.0	17.9	18.1	18.4	18.5	18.5	18.3	18.0	17.8	17.6	17.5
	Magnetita (Mg)	20.2	19.5	19.4	19.5	19.7	19.8	19.4	18.7	17.7	16.8	16.3	16.0	15.9
	Pirolusita (Prl)	31.0	32.4	32.8	32.6	32.0	31.2	30.6	30.4	29.8	29.1	28.8	28.5	28.0
	Wolframita (Wf)	19.5	18.3	18.2	18.2	18.3	17.9	17.7	17.5	17.0	16.6	16.5	16.3	16.3

Tabla I.- Valores de reflectancia espectral VNIR para minerales comunes (1: Elementos, 2: Sulfuros, etc., 3: Sulfosales, 4: Óxidos).

Table I.- VNIR spectral reflectance values for common ore minerals (1: Elements, 2: Sulphides, etc., 3: Sulphosalts, 4: Oxides).

truir un sistema experto; no obstante el trabajo realizado hasta el momento permite constatar la utilidad del método para la caracterización automatizada de menas (Fig. 1). La caracterización automatizada es fiable en la mayoría de los minerales comunes, no obstante, el sistema puede apoyarse en criterios adicionales como paragénesis o en la realización de un estudio preliminar por un mineralogista. En algunos casos excepcionales puede ser necesario realizar análisis complementarios, como en el caso de los concentrados de la mina Pasto Bueno (Perú), en los que coexisten esfalerita y wolframita (en su variedad de alta reflectancia, hübnerita); los espectros de estos minerales no se pueden distinguir netamente por ser muy similares (Fig. 2) y fue necesario realizar análisis químicos (% W y % Zn, por Fluorescencia de Rayos X) para obtener un análisis modal más fiable.

El estudio de una misma probeta realizado en primer lugar por un mineralogista experto a través del contador de puntos, y posteriormente a través de Análisis Digital de Imagen (Pérez-Barnuevo *et al.*, 2008), puso de manifiesto una tendencia general muy similar de los resultados obtenidos con ambos métodos (Fig. 3).

Identificación automatizada

En la actualidad se está trabajando en el desarrollo de los procedimientos para la identificación automática de los minerales a partir de las medidas

multiespectrales de reflectancia en las 13 bandas VNIR cubiertas por el sistema.

Para esta fase, se dispone de una base de datos recopilada de forma manual con el sistema del LMA, que cuenta con un total de 1082 muestras procedentes de zonas representativas de 33 minerales distintos. La identificación de los minerales ha sido realizada por los expertos del LMA, tanto sobre las propias imágenes adquiridas como al microscopio, en caso de duda.

Hasta el momento, se han efectuado ensayos de la capacidad discriminatoria de cuatro técnicas estándar de clasificación: mínima distancia Euclídea, mínima distancia de Mahalanobis, *Spectral Angle Mapper (SAM)* y MOMI (Bernhardt, 1987).

En cada ensayo, las muestras de la base de datos se reparten aleatoriamente en dos grupos: uno que se emplea para entrenar los algoritmos de clasificación, y otro que se destina a evaluar la corrección de la clasificación. El porcentaje de muestras asignado al entrenamiento ha sido uno de los parámetros variables en las diversas pruebas realizadas.

Los resultados preliminares obtenidos muestran que la mínima distancia de Mahalanobis puede ser una técnica de clasificación muy adecuada para esta aplicación, ya que es capaz de clasificar correctamente muchas más muestras que las otras tres técnicas. Además, presenta un comportamiento claramente dependiente del tamaño de la muestra de entrenamiento: cuanto mayor sea ésta, me-

nor es el error cometido en la clasificación del resto de las muestras. Esta tendencia no aparece en el resto de las técnicas ensayadas.

La tabla II muestra los resultados promedio de la ejecución de diez ensayos de clasificación con cada una de las cuatro técnicas consideradas, para distintos porcentajes del total de muestras destinados al entrenamiento (40%, 60% y 80%).

Conclusiones

Actualmente, tanto la óptica como la electrónica permiten obtener de forma fiable medidas multiespectrales VNIR de reflectancias minerales, tal y como se muestra en la tabla I. Estas medidas multiespectrales de minerales coinciden con los espectros publicados en el QDF3 para el rango visible (sin tener en cuenta la anisotropía). Además, los valores espectrales obtenidos en el rango infrarrojo cercano ponen de manifiesto tendencias espectrales muy características para algunos minerales que mejoran de manera considerable las posibilidades de su identificación automatizada; sin embargo, esta discriminación mineral a través del espectro de reflexión no es siempre posible (Figs. 1 y 2). El presente trabajo pretende conseguir una automatización del proceso que permita la caracterización y cuantificación mineral, información muy valiosa en Geometalurgia. No obstante, un método fiable de uso generalizado debería incluir también datos complementarios,

como por ejemplo, asociación mineral. A pesar de la automatización, en algunos casos con paragénesis excepcionales (como en la mina de Pasto Bueno, Perú), el mineralogista debe definir el planteamiento necesario. Por tanto, este sistema no debe ser pensado para sustituir al mineralogista, sino para aumentar su rendimiento mediante la automatización y el procesamiento de los datos. Por otro lado, el coste del equipo es relativamente bajo si se compara con microscopios electrónicos y puede ser asumido por compañías pequeñas, obteniendo un mayor retorno de la inversión (Pérez-Barnuevo et al., 2008) si se compara con el trabajo de un mineralogista experto que trabaja con métodos tradicionales como el contador de puntos.

Agradecimientos

Este trabajo es fruto del proyecto CAMEVA (Código CGL2006_13688_C02_01; Ministerio de Ciencia e Innovación) y del apoyo de la Comunidad Autónoma de Madrid (programa PRICIT, 2007, 2008). Se recuerda con gratitud al profesor G. C. Amstutz (†, Univ. Heidelberg), que facilitó las muestras de menas de la colección Rehwald/Ramdohr usados en muchas de las medidas; también a J. Proenza (UB), por las de MGP. Se agradece igualmente a los profesores E. Pirard, Universidad de Lieja (Bélgica), y H.J. Bernhardt, Ruhr-Universitaet Bochum (Alemania) sus valiosas contribuciones al proyecto. Así mismo, se agradece a Manuel Toscano Macías su aportación en la revisión del texto.

Referencias

Bernhardt H.J. (1987). *Mineralogy and Petrology*, 36, 241-245.
 Berrezueta E. y Castroviejo R. (2007). *Rev. Met.* Madrid, CSIC, 43 (4), 294-309.
 Castroviejo R., Catalina J.C., Bernhardt H.J.,

Mineral	Abre.	NM	Bien clasificadas por Min. Dist. Euclidea			Bien clasificadas por Min. Dist. Mahalanobis			Bien clasificadas por Spectral Angle Mapper			Bien clasificadas por MOMI		
			Muestras de entrenam.:			Muestras de entrenam.:			Muestras de entrenam.:			Muestras de entrenam.:		
			40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%	40%	60%	80%
Plata nativa	ag	25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,2	100,0
Arsenopirita	apy	85	100,0	100,0	100,0	99,8	99,8	100,0	96,0	94,8	95,0	95,8	94,5	95,0
Argentita/Acantita	arg/ac	19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	100,0	100,0	97,9	100,0
Bismutina	bm	15	100,0	100,0	100,0	98,9	100,0	100,0	87,8	86,1	83,3	86,7	86,1	83,3
Bornita	bn	25	100,0	100,0	100,0	94,0	95,0	100,0	88,7	90,0	92,0	88,0	90,0	92,0
Cinabrio	cin	14	96,3	93,1	96,7	100,0	100,0	100,0	90,0	90,3	96,7	90,0	84,7	90,0
Cubanita	cn	49	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Calcopirita	cpy	46	76,1	75,4	77,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Cromita	er	15	52,2	50,0	56,7	95,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Casiterita	cs	10	78,3	89,6	95,0	55,0	68,8	100,0	78,3	77,1	100,0	75,0	79,2	100,0
Calcosina	ct	19	15,8	24,0	20,0	99,2	100,0	100,0	22,5	4,2	5,0	22,5	3,1	2,5
Cuprita	cup	9	32,0	50,0	35,0	80,0	81,3	80,0	92,0	83,3	80,0	92,0	83,3	80,0
Covellina	cv	249	88,0	87,5	87,5	100,0	100,0	100,0	94,2	94,3	94,5	92,0	92,2	92,4
Enargita	en	22	6,2	0,0	0,0	75,4	77,8	70,0	23,8	21,3	10,0	23,8	21,3	10,0
Galena	gn	29	95,9	95,1	96,7	95,3	93,8	96,7	69,4	78,5	75,0	70,6	79,2	75,0
Goethita	goe	14	32,5	18,1	16,7	87,5	94,4	100,0	62,5	68,1	66,7	61,3	70,8	70,0
Hematites	ht	39	95,4	91,7	92,5	95,4	92,7	97,5	97,1	93,8	97,5	97,1	93,8	97,5
Ilmenita	il	24	95,7	100,0	100,0	99,3	98,3	100,0	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Marcasita	mar	46	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Magnetita	mg	22	94,6	94,4	96,0	94,6	94,4	96,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Molibdenita	mo	19	71,7	79,2	80,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Niquelina	nc	25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pentlandita	pn	18	82,7	86,9	82,5	85,5	92,9	87,5	84,5	92,9	85,0	87,3	94,0	90,0
Pirrotita	po	43	95,0	95,8	95,6	99,6	100,0	100,0	85,0	86,6	87,8	94,2	94,4	95,6
Pirolusita	pri	10	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Psilomelana	psi	38	95,7	96,9	95,0	96,5	99,0	100,0	97,4	96,4	95,0	97,0	95,8	93,8
Platino nativo	pt	18	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Pirita	py	22	84,6	87,0	84,0	95,4	90,7	94,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Rutilo	ru	29	95,0	98,6	100,0	90,6	90,3	100,0	50,6	41,0	40,0	51,7	41,7	40,0
Esfalerita	sp	29	57,8	73,6	71,7	91,7	90,3	98,3	28,9	25,7	23,3	24,4	22,2	20,0
Estibina	stib	14	41,3	50,0	33,3	87,5	98,6	100,0	97,5	97,2	100,0	97,5	94,4	100,0
Tetrahedrita	thd	27	100,0	100,0	100,0	97,5	100,0	100,0	88,1	87,9	85,0	88,1	88,6	85,0
Wolframita	wf	14	92,5	93,1	96,7	93,8	97,2	100,0	98,8	98,6	100,0	98,8	98,6	100,0
Promedio		1082	81,0	82,7	82,1	94,2	95,6	97,6	85,8	85,1	85,2	85,9	85,0	85,2

Tabla II.- Resultados de la clasificación para diferentes algoritmos y porcentajes de muestra de entrenamiento.

Table II.- Preliminary classification results for different algorithms and training sample percentages.

Espí J.A., Pirard E., Samper J., Brea C., Segundo F., Locutura J., Pérez-Barnuevo L., Sánchez L. y Fidalgo A. (2008). *Proc. Symp. Mineralogía Apl. Geometalurgia, abs. R8, XIII Congr. Latinoamericano de Geología*, Lima.
 Catalina J.C., Segundo F., Fernández G. y Alarcón D. (2008). *Proc. Symp. Mineralogía Apl. Geometalurgia, abs. R3, XIII Congr. Latinoamericano Geología*, Lima.
 Criddle A.J. (1998). En: Cabri L.J. & Vaughan D.J., eds.. *COM/IMA, MAC Short Course Series*, vol. 27, Mineralogical Association, Canada. Ottawa, Ontario, 421 p.
 Criddle A.J. y Stanley C.J. (1993).

Quantitative Data File for Ore Minerals, 3rd ed. Chapman and Hall, London, 635 p.
 Pérez-Barnuevo L., Castroviejo R. y Berrezueta E. (2008). *Proc. Symp. Mineralogía Apl. Geometalurgia, abs. R5, XIII Congr. Latinoamericano de Geología*, Lima.
 Pirard E. (2004). *Mineralogical Mag.* 68 (2), 323-333.
 Pirard E., Bernhardt H.J., Catalina J.C., Brea C., Segundo F. y Castroviejo R. (2008). 9th Internat. Cong. Appl. Mineralogy, Brisbane, QLD, ext. abst. 1-6.
 Ramdohr P. (1980). *The ore minerals and their intergrowths*. Pergamon, 2 vols. 1205 p.