

CARTOGRAFÍA DEL VERTIDO DE LODOS DE LA MINA DE AZNALCÓLLAR MEDIANTE IMÁGENES DAEDALUS ATM

C. Antón-pacheco (*), J.C. Gumiel (*), E.de Miguel (**), J. A. Gómez (**), O. Gutiérrez (**), J.G. Rejas (**),
J.Arránz J. E. (*), López (*), D. Baretino (*) y Giménez, M (**)
c.pacheco@itge.mma.es

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas 23. 20003 Madrid.

(**) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Crtra de Ajalvir, k.4. 28850 Torrejón de Ardoz. (Madrid).

RESUMEN

A raíz del accidente de la mina de Aznalcollar, se han realizado varias campañas de vuelos multiespectrales Daedalus-1268 sobre las áreas afectadas. El objeto de estos vuelos ha sido tanto el control y seguimiento de los trabajos de limpieza de los lodos vertidos en el cauce del río Guadiamar, como la detección de la contaminación remanente una vez finalizadas estas tareas. Se han efectuado correcciones geométricas a partir de fotografía aérea ortorectificada y correcciones radiométricas aplicando distintos modelos basados en transferencia radiativa y en medidas in situ de radiometría. Los análisis químicos, mineralógicos y de reflectividad de muestras de lodos y alteraciones han permitido interpretar el comportamiento espectral de estos materiales y los datos multiespectrales. Los mapas generados a partir de la clasificación digital de las imágenes han permitido controlar la progresión de la limpieza de los lodos y la localización precisa de las costras de sales.

Palabras clave: imágenes Daedalus ATM, lodos piríticos, eflorescencias, suelos, Aznalcóllar, Guadiamar.

ABSTRACT

The failure of the Aznalcóllar mine's impoundment, holding several million tons of pyrite, flotation tailings and acid water produced a flood along the Agrio river, a tributary of the Guadiamar which drains Doñana National Park. The fine-grained sulfide deposit covered 2600 ha of riverbanks and adjacent farmlands, extending to the upper Entremuros area, 40 km downstream from the mine. Removal of the pyritic sludge has been carried out by mechanical methods. Several airborne Daedalus-1268 surveys were performed over the affected area. Geometric and radiometric corrections were applied. Chemical, mineralogical and spectral reflectance analysis on sludge and efflorescence samples have permitted to interpret multispectral data. Digital classification maps have allowed to monitor the progression of the pyritic sludge removal as well as the precise location of the highly soluble efflorescence salts.

Key words: Daedalus images, pyritic sludge, efflorescences, soils, Aznalcóllar, Guadiamar.

INTRODUCCIÓN

La rotura del dique de la balsa de estériles de la mina de Aznalcóllar, en abril de 1998, originó una enorme riada de lodos piríticos y agua ácida en el cauce del río Agrio, tributario del río Guadiamar, que drena al Parque Nacional de Doñana y vierte en el Guadalquivir cerca de su desembocadura. La construcción de varios diques de contención en la zona conocida como Entremuros evitó la entrada del agua contaminada en el perímetro del Parque Nacional. Sin embargo, el depósito de lodos cargados de metales pesados arrastrados por la riada anegó una franja de hasta 600 metros de ancho y más de 40 km de longitud, cubriendo una superficie de 2616 ha, en su mayor parte vegetación de ribera y campos agrícolas. Las labores de retirada de los lodos por métodos mecánicos, y el tratamiento del agua embalsada en Entremuros por métodos químicos se realizaron a lo largo de 1998.

A instancias de la Secretaría de Estado de aguas y Costas del Ministerio de Medio Ambiente, el ITGE realizó en los días siguientes al accidente

una cartografía, a escala 1:10.000, de la distribución espacial de los lodos, así como varias campañas geoquímicas para la caracterización química y mineralógica de los lodos, el estudio de su evolución temporal, y la afección de los suelos cubiertos por los lodos mineros (ITGE, 1998). Así mismo, se creó un grupo de trabajo, integrado por el ITGE, INTA y CEDEX, con el fin de adquirir y utilizar imágenes multiespectrales registradas por el sensor aeroportado Daedalus-1268 en el estudio del impacto ambiental y seguimiento de los trabajos de limpieza de los lodos.

MARCO GEOLÓGICO Y MINERO

El distrito minero de Aznalcóllar se localiza en el borde meridional de la Faja Pirítica Ibérica (FPI), a unos 25 km al oeste de Sevilla. La FPI es una extensa provincia metalógena que comprende el mayor y más importante conjunto de yacimientos de sulfuros polimetálicos de Europa occidental. De los 90 yacimientos conocidos, se ha estimado un total de 1.700 Mt de mineral, del que el 20% ha sido

explotado y entre un 10% y un 15% se ha perdido por erosión. Esta enorme masa mineral representa una importante anomalía geoquímica en S, Fe, Zn, Cu, Pb, Sn, As y otros metales. Las explotaciones mineras han generado un gran volumen de escombreras con alto contenido en minerales ricos en pirita y otros compuestos de azufre. Los metales contenidos en las masas piriticas son liberados por la oxidación de los sulfuros y transportados por las aguas ácidas en las cuencas de los ríos, en cuyos aluviales precipitan, generalmente asociados a hidróxidos y sulfatos de Fe, dando lugar a una importante contaminación metálica. Un estudio, previo al accidente, de la cuenca del Guadiamar y el estuario del Guadalquivir ha puesto de manifiesto la existencia de contaminación de metales pesados en este área (Cabrera et al., 1987).

Las mineralizaciones de sulfuros se alojan en el denominado Complejo Volcanosedimentario (CVS), conformado por un conjunto heterogéneo de rocas volcánicas y sedimentarias. El distrito de Aznalcóllar incluye varios yacimientos, con unas reservas totales de más de 130 Mt de sulfuros masivos. La mineralización está constituida principalmente por pirita con esfalerita, galena, arsenopirita, calcopirita, boumonita, bolangerita, estannita y casiterita.

La balsa de estériles de la mina contenía varios millones de metros cúbicos de residuos piriticos procedentes de la planta de tratamiento. Desde 1995, se utilizaba para la nueva explotación del yacimiento de Los Frailes. Se ubica en la margen derecha del río Agrio, 2 km aguas arriba de la confluencia con el Guadiamar. Geológicamente se localiza en el borde norte de la cuenca terciaria del Guadalquivir, donde sedimentos transgresivos pliocenos cubren materiales paleozoicos del zócalo hercínico. Los materiales terciarios están formados por una unidad inferior de areniscas y carbonatos, una unidad intermedia de margas y una unidad superior de arcillas. Los depósitos aluviales cuaternarios del valle del Guadiamar, afectados por la riada de lodos, están constituidos por conglomerados, gravas y arenas. De las dos terrazas reconocidas en el tramo afectado, la superior solo se preserva al norte, en el área de confluencia del Agrio y el Guadiamar. El perfil longitudinal del río Guadiamar presenta un gradiente muy suave aguas abajo del Vado del Quema, donde los sedimentos de marisma son dominantes y aparecen parcialmente cubiertos por depósitos eólicos.

ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la obtención de imágenes se ha utilizado un instrumento Daedalus-1268 (sensor multispectral con doce canales entre 0.42 y 13 μm), operando desde un avión C-212 del INTA. Se ha

cubierto la zona afectada por el vertido en tres fechas (mayo, julio y noviembre de 1998). Simultáneamente, se ha registrado fotografía aérea convencional como apoyo a los trabajos de campo y a la corrección geométrica de las imágenes. En las mismas fechas se han adquirido datos de espectroradiometría de campo con un instrumento GER-1500, como soporte a la caracterización radiométrica de las superficies observadas. Las imágenes correspondientes a mayo no se han procesado por su alta nubosidad, sí bien se encuentran disponibles para un posible uso posterior.

CORRECCIONES GEOMÉTRICAS Y RADIOMÉTRICAS

Se ha corregido geométricamente la imagen correspondiente al valle del Guadiamar, utilizándose para ello una transformación polinómica (orden 3) basada en puntos de control. Estos puntos se han obtenido tanto de cartografía convencional como de fotografía aérea ortorectificada (corrección de la actitud de la cámara y el efecto del relieve), para lo que se utilizó un modelo digital del terreno generado a partir de la altimetría 1:25000 del IGN. La imagen se dividió en diferentes subescenas, y las transformaciones se derivaron independientemente para cada una (error cuadrático medio < 2 pixels tanto en x como en y), realizándose un mosaico para obtener la imagen final.

Para optimizar la comparación de las imágenes adquiridas en las distintas fechas, es conveniente transformar los niveles digitales originales a reflectividad. Para esta conversión, y basándonos en la hipótesis del comportamiento lambertiano de las superficies observadas, se puede optar por dos procedimientos: aplicación de un modelo analítico de transferencia radiativa, o mediante un modelo empírico, a partir de datos de reflectividad medidos en el terreno con correspondencia en la imagen. En este caso se dispone de los datos registrados con el instrumento GER-1500 en unos 15 puntos distribuidos por la zona de estudio y cubriendo en un amplio rango de cubiertas. Estos datos se han utilizado para derivar las reflectividades para $\lambda < 1 \mu\text{m}$. Para el canal 9 (1.55 -1.75 μm), que se encuentra fuera del rango del GER 1500, se ha utilizado el código 6S (Vermote et al., 1995).

CARTOGRAFÍA DE LODOS PIRÍTICOS Y EFLORESCENCIAS

Los métodos convencionales para estudiar la distribución de metales en suelos y rocas se basan en estudios geoquímicos que son procedimientos caros y lentos. Durante la última década, se han desarrollado métodos de teledetección que permiten

identificar minerales específicos y cartografiar su distribución en áreas mineras. Estas nuevas técnicas se basan en la detección de los rasgos de absorción diagnósticos que presentan los minerales con Fe en su composición en la región entre 0.4 y 1.2 μm , y en los de los minerales con grupos hidroxilos entre 1.5 y 2.5 μm . La identificación de óxidos, hidróxidos y sulfatos de Fe es particularmente importante en áreas mineras porque a ellos se asocian los metales pesados (King, 1995). La identificación de los sulfatos complejos hidratados que se forman por meteorización de los lodos, y que contienen así mismo un elevado contenido metálico, es también crítica.

La imagen ATM971 (Figura 1A), registrada en Julio de 1998, muestra el sector principal del valle del río Guadiamar, desde la balsa de estériles, al norte de la imagen, al Vado del Quema, al sur. La interpretación visual de la misma permite discriminar las áreas cubiertas por el lodo, que dan una respuesta muy baja, tanto en las bandas del visible como en el infrarrojo próximo. Las costras de sales que exhiben valores altos en todas las bandas, se localizan preferentemente en la balsa y en varias graveras ubicadas en el tramo norte del valle. La disolución de estas eflorescencias ha sido considerada como una de las principales vías de contaminación de los suelos, ya que los procesos de lavado de estas sales en épocas de lluvia movilizan los metales pesados.

Durante el trabajo de campo realizado en la misma fecha de la realización de los vuelos, se han tomado muestras de lodos, sales y suelos de referencia. El análisis mineralógico muestra que el lodo se compone de pirita (75-80%), esfalerita y galena (5%), y un componente silicatado compuesto por clinocloro, cuarzo, y algo de yeso. El análisis químico da concentraciones elevadas de Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, As, Cd, Sb, Tl y Hg. La presencia mayoritaria de pirita en el lodo explica la baja reflectividad de este material en todo el rango espectral considerado. Las sales originadas por la progresiva oxidación de los lodos piríticos son sulfatos complejos hidratados, formados principalmente por rozenita, boyleita, szomolnokita, halotrichita, hexahedryta y starkeyita. Estas fases sulfatadas presentan un elevado contenido en Zn (hasta un 10%), Cu, As, Sb y Cd. Sobre las mismas muestras analizadas se han realizado medidas en laboratorio de reflectividad en el rango de 0,4 a 2,5 μm . Las curvas espectrales confirman la baja reflectividad y ausencia de rasgos significativos en los lodos. Los sulfatos hidratados muestran una reflectividad general alta, con picos de absorción característicos a 1,4 y 1,9 μm que indican la presencia de agua molecular en estos compuestos.

Con objeto de clasificar los datos registrados en el vuelo de Julio, se seleccionaron varias áreas correspondientes a superficies bien expuestas de lodos y eflorescencias a lo largo del valle del Guadiamar. Una vez establecidas las firmas espectrales para estas dos categorías, se procedió a clasificar la imagen mediante un algoritmo de máxima probabilidad. La Figura 1B corresponde a la clasificación de la imagen de julio, en la que el color amarillo corresponde a las áreas todavía cubiertas por lodo pirítico (en esta fecha ya se había retirado un 30% del lodo), y el color rojo a las costras formadas por sulfatos hidratados. Del mismo modo se ha procedido con las imágenes registradas en noviembre (Figuras 1C y 1D), fecha en la que los trabajos de limpieza estaban en su fase final. En la imagen clasificada, las sales se restringen a pequeñas áreas en el interior de la balsa; el lodo todavía aparece en algunas parcelas, generalmente en relación con áreas ya limpias en las que han quedado restos, y con los caminos utilizados en las labores de limpieza

CONCLUSIONES

Las imágenes multispectrales registradas por el sensor aeroportado Daedalus-1268 han demostrado ser una herramienta muy eficaz para cartografiar la extensión superficial de la riada de lodos a lo largo del valle del río Guadiamar así como para la detección de costras de sulfatos solubles cuyo control es crítico por su potencial contaminante. Se ha previsto la realización de un vuelo adicional, a principios del verano de 1999, con objeto de controlar la contaminación remanente y la formación de nuevas eflorescencias después de periodos húmedos

BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera, F. et al., 1987, Heavy metal pollution in the Guadiamar river and the Guadalquivir estuary (South West Spain). *Chemosphere*, vol.16, 2/3, pp. 463-468.
- I.T.G.E., 1998, Cartografía y cubicación de lodos mineros en la cuenca del río Guadiamar. Aznalcóllar-Entremuros. *Internal Report. RM-001-98*. 103 p. 11 maps. 1 c-drom.
- King, T. V. V., 1995, Environmental considerations of active and abandoned mine lands: U. S. *Geological Survey, Bulletin 2220*, 38p.
- Vermote, E., Tanre, D., Deuze, J. L., Herman, M. Y Morcrette, J.J., 1995, *6S Users Guide, version 1* (http://loasy.unin-lille1.fr/informatique/sixs_qb.html)

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a L. Rowan y J. Crowley del U.S. Geological Survey (Reston, VA, USA), la realización de la espectrometría de laboratorio.

Figura 1.- **A.** Imagen ATM 971 de la cuenca del Río Guadamar , 07/07/98. **B.** Lodos y sales clasificados a partir de la imagen A. **C.** Imagen ATM 971, 25/11/98. **D.** Lodos y sales remanentes clasificados a partir de la imagen C.