

Estimación del riesgo de colapso por dolinas con datos hiperespectrales DAIS 7915

Asunción Riaza⁽¹⁾, Eduardo Garcia-Meléndez⁽²⁾, Mercedes Suarez⁽³⁾, Andreas Müller⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto Geológico y Minero de España, La Calera 1, 28760 Tres Cantos, (Madrid). a.riaza@igme.es.

⁽²⁾ Area de Geodinámica Externa, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24071 – León. dimegm@unileon.es

⁽³⁾ Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Pza. de la Merced s/n, 37008 Salamanca. msuarez@usal.es

⁽⁴⁾ DLR_ German Aerospace Research Establishment, Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Oberpfaffenhofen, Postfach 1116, 82230 Weßling, Alemania. Andreas.Mueller@dlr.de.

Resumen

Las regiones en las que abundan yeso o carbonatos tienden a desarrollar cavidades por disolución de las sales con el agua de lluvia que se denominan dolinas. Se producen colapsos repentinos que dejan huecos en el suelo con un diámetro de hasta varios metros. Contribuyen a este fenómeno la pluviometría, la escorrentía y la humedad del suelo. Tales colapsos han dificultado seriamente el desarrollo de las obras públicas.

En este estudio se ha usado el espectrómetro hiperespectral aeroportado DAIS 7915 para localizar las zonas susceptibles de colapso por dolinas en una región muy carbonatada de la Mancha. Las zonas con aumento del contenido de arcillas respecto a carbonatos se han cartografiado en superficie en el campo y en las imágenes. Para ello se han usado espectros tomados en el campo con un espectrómetro GER que han servido de miembros extremos en el tratamiento digital con el algoritmo Cartógrafo de Angulos Espectrales. La resolución espacial influye de manera selectiva en la sensibilidad espectral de las imágenes hiperespectrales para estas mezclas de minerales.

1. Introducción

Las calizas se meteorizan por disolución de los carbonatos con el agua de lluvia, dejando un depósito de arcillas de decalcificación. En el área de estudio en la llanura de la Mancha, las calizas Pliocenas no consolidadas recubiertas parcialmente por costras desarrollan dolinas. El intenso cultivo de cereales ha destruido las formas, pero quedan en la superficie fragmentos de costras en cantos. Las superficies con cantos de distintos tamaños y las arenas se disponen en varias superficies topográficamente superpuestas desarrolladas en distintas condiciones climáticas (Duchaufour, 1984;

Riaza et al, 2002). En las rocas pliocenas, las superficies superiores abundan en carbonatos, y las dolinas se rellenan con suelos de arcillas muy lavados y pobres en materia orgánica. El desarrollo de suelos en las calizas arcillosas depende fundamentalmente del clima (Duchaufour, 1984). El lavado superficial no se produce uniformemente en toda la roca expuesta, sino que se dirige a las depresiones cerradas de las dolinas. Algunas dolinas están drenadas en el fondo por un torrente, pero la mayor parte drenan subterráneamente. El lixiviado por aguas subterráneas produce un depósito de arcillas en el fondo de las depresiones.

Las propiedades espectrales de los carbonatos se han descrito profusamente en las espectroscopías convencionales (Hunt and Salisbury, 1971) sobre muestras de roca molidas hasta distintos tamaños de grano. También se han estudiado los cambios espectrales por variaciones mineralógicas, químicas y estructurales en rocas calizas (Gaffey, 1985, 1986; Crowley, 1986), usando la espectrometría como instrumento petrográfico.

Las arcillas abundan en la superficie de la tierra y su mineralogía depende fundamentalmente de las condiciones climáticas reinantes en el momento de su formación. Se ha descrito el comportamiento espectral de mezclas de arcillas (Crowley and Vergo, 1988) que pertenecen a grupos de minerales con estructura en capas muy conocidos. Algunas arcillas se expanden en contacto con el agua, y su presencia en los suelos es crítica para las obras públicas. Los suelos expansivos (Chabrilat et al, 2002) se han estudiado espectralmente con sensores hiperespectrales e imágenes con una resolución espacial alta, intentado relacionar sus propiedades espectrales con índices de expansión (Kariuki et al, 2003).

La presencia de hierro está generalizada donde hay una superficie expuesta a la atmósfera. Las calizas, los carbonatos y los suelos que se desarrollan sobre

ellos integran el hierro en sus estructuras mineralógicas. Se ha descrito cómo influye la presencia de hierro en el comportamiento espectral de los carbonatos en la serie isomorfa dolomita-ankerita (Farmer and Warne, 1978).

Los autores han cartografiado anteriormente mezclas minerales producidas por meteorización de minerales ferruginosos y arcillosos formadas en función del clima según sus propiedades espectrales (Riaza et al, 2000). Para hacer este estudio se usaron datos con el espectrómetro aeroportado hiperspectral DAIS 7915 de Julio del año 2000, con resolución espacial de 5m. El DAIS 7915 posee 72 canales en el visible y el infrarrojo cercano (4-2,5 μm) y siete en el infrarrojo térmico (8-12,5 μm) (Müller and Oertel, 1997).

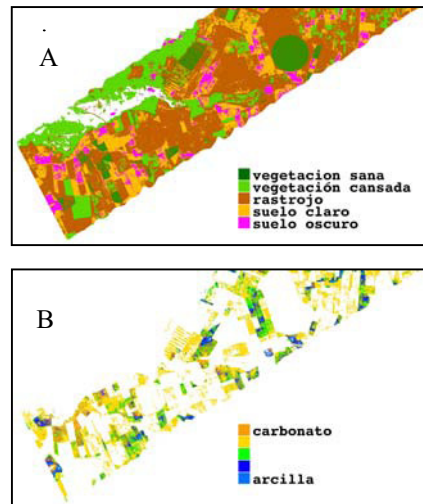


Figura 1: A. Mapa de uso de suelo elaborado con imágenes DAIS. B: Mapa mineralógico elaborado con imágenes DAIS indicando contenidos relativos de carbonatos y arcillas. El color azul indica el fondo de las dolinas.

El tratamiento hiperspectral de imágenes se ha iniciado con Análisis De Componentes Principales en los 72 canales del visible y el infrarrojo cercano y transformadas de Fracciones De Ruido Mínimo para estimar la separabilidad de las distintas coberturas en la superficie terrestre. Se elaboraron máscaras para zonas con vegetación densa tomando los canales 17 y 13 para calcular un cociente entre el rojo y el infrarrojo. También se construyeron máscaras para el agua usando como umbral el valor 26 en el primer canal. Las Transformadas de

Fracciones de Ruido Mínimo, el Índice de Pureza de Píxeles y el Análisis n-dimensional se utilizaron sucesivamente para aislar distintas formaciones geológicas (Riaza et al, 2002).

Previamente se realizó un mapa de uso de suelo en el que se reflejan distintas densidades y estados fenológicos de vegetación (fig.1A). Las áreas sin vegetación presentan diferencias espectrales en las zonas deprimidas, sea por la presencia de materia orgánica o por los procesos de desarrollo de dolinas.

Se tomaron espectros en el campo con un espectrómetro GER a lo largo de varios cortes atravesando las depresiones. Se seleccionó una espectroteca de cinco espectros que representan un contenido progresivamente cambiante en carbonatos y arcillas para calcular con el Cartógrafo de Angulos Espectrales (Kruse et al, 1993) en los 72 canales del visible y infrarrojo cercano (Riaza et al, 2004). De esta manera se reflejaron en un mapa las áreas carbonatadas topográficamente altas, y las zonas deprimidas ricas en arcillas (fig.1B). Esta cartografía se ha confirmado con observaciones de campo y análisis cualitativos y semi-cuantitativos de difracción de rayos X en muestras tomadas en puntos de las dolinas sugeridos por las imágenes.

2. Comportamiento espectral de rocas no consolidadas en el visible y el infrarrojo cercano

2.1. Espectros de campo

Los espectros tomados en el campo con un espectrómetro GER a lo largo de un perfil que atraviesa una dolina muestran tendencias espectrales constantes en el infrarrojo cercano (fig.2A). Los espectros de las superficies topográficamente altas ricas en carbonatos muestran una absorción en 2.33 μm . Esta absorción es estrecha donde abundan los carbonatos, y desarrolla un hombro a medida que aumenta el contenido en arcilla.

Por el contrario, los espectros tomados en el fondo de las depresiones, ricas en arcilla, muestran una amplia absorción asimétrica en 2.2 μm que se convierte en un hombro suave al aumentar el contenido en carbonato. En los espectros donde abundan las arcillas también hay una absorción estrecha en 2.07 μm . Ningún mineral conocido en la muestra puede explicar esta absorción. Puede deberse a grados de humedad de las arcillas (Lindberg and Snyder, 1972).

En el intervalo de longitudes de onda del visible, los espectros de zonas arcillosas muestran una suave y amplia depresión entre 0.8-1.00 μm por

la presencia de minerales ferruginosos, que está ausente en los espectros de zonas ricas en carbonatos. Sin embargo, el suelo oscuro en el fondo de las dolinas no presagia la presencia de minerales

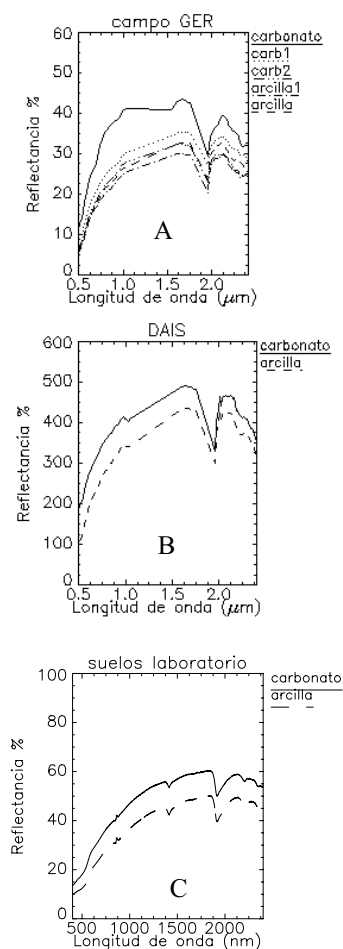


Figura 2: A: Espectros de campo tomados con un espectrómetro GER en el visible y el infrarrojo cercano (0.4-2.4 μm) en puntos a lo largo de un corte atravesando una dolina. B: Espectros en imágenes DAIS para los 72 canales del visible y el infrarrojo cercano en zonas respectivamente con abundancia en arcillas y carbonatos. C: Espectros de laboratorio en el visible y el infrarrojo cercano (0.4-2.4 μm) tomados en el laboratorio en muestras de suelo procedente de puntos a lo largo de un corte que atraviesa una dolina según las imágenes.

ferruginosos. Esto confirma estudios anteriores realizados en sedimentos terciarios no consolidados, constatando la inhibición de los rasgos espectrales típicos de los minerales ferruginosos cuando coexisten con carbonatos (Riaza et al, 2000).

2.2. Imágenes DAIS

Las imágenes DAIS no reflejan con tanta claridad las propiedades espectrales descritas en los espectros de campo (fig. 2B), pero sí manifiestan absorciones amplias en 2.2 μm y formas débiles en 2.3 μm . Al contrario que en los espectros de campo, las zonas ricas en carbonato despliegan los rasgos espectrales típicos de los minerales ferruginosos. Las imágenes DAIS registran espectralmente una zona amplia en la que los cantos de carbonato no influyen estadísticamente tanto como en los espectros de campo. De este modo, el material no consolidado del suelo, oxidado por exposición a la atmósfera, es espectralmente más notorio en las imágenes que en los espectros tomados en campo. Se confirma así la incompatibilidad espectral entre la respuesta de los carbonatos en el infrarrojo cercano y la de los minerales ferruginosos en el visible (Riaza et al, 2000).

2.3. Espectros de laboratorio

Las muestras de suelos tomadas en el campo en puntos sugeridos por las imágenes se han secado por exposición a la atmósfera y tamizado, antes de tomar medidas espectrales con un espectrómetro con esfera integradora Perkin Elmer Lambda 9.

Los espectros de laboratorio muestran las absorciones en 2.2 μm por presencia de arcillas y en 2.33 μm típicas de los carbonatos (Fig.2C). Los suelos de zonas carbonatadas topográficamente altas tienden a mostrar una reflectancia global más alta, absorciones relacionadas con arcillas suavizadas y absorciones relacionadas con carbonatos pronunciadas. Por el contrario, los suelos arcillosos del fondo de las dolinas producen espectros con una reflectancia global más baja, rasgos espectrales de arcillas acentuados, y rasgos de carbonatos suavizados o ausentes. Los espectros tomados en laboratorio se asemejan en sus respuestas espectrales de las imágenes DAIS.

5. Conclusiones

Los datos hiperespectrales en el visible y el infrarrojo cercano permiten cartografiar el desarrollo de dolinas en zonas calcáreas. El

tratamiento de imágenes hiperespectrales refleja las cantidades relativas de carbonatos y arcillas en el suelo. Así, los sensores hiperespectrales aeroportados se muestran apropiados para definir las áreas en las que existe riesgo de colapso por la formación de dolinas en el suelo.

Las imágenes DAIS y los espectros de campo y laboratorio reflejan fielmente las abundancias relativas de carbonatos y arcillas por las absorciones diagnósticas de energía electromagnética en 2.2 μm y 2.3 μm correspondientemente pronunciadas o debilitadas en el infrarrojo cercano.

La resolución espacial es un parámetro crítico al evaluar el contenido de óxidos de hierro que coexisten con carbonatos. La menor resolución espacial es más favorable a expresar la presencia de minerales de hierro. Las imágenes subestiman la presencia de carbonatos en el infrarrojo cercano cuando coexiste con hierro.

3. Agradecimientos

Las imágenes DAIS usadas en este trabajo fueron financiadas con el Quinto Programa Marco, Mejora del Potencial Humano, Acceso a Infraestructuras de Investigación (contr. HPRI-CT-1999-00075, ref. HS2000-ES1), y estudios ampliados con una Ayuda en Proyectos de Investigación (CYCIT REN 002-04433-C02-01).

4. Referencias

- [1] Chabrilat, S., Goetz, A.F.H., Krosley, L., and Olsen, H.W., "Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution", *Remote Sensing of Environment* 82, 431-445, 2002.
- [2] Crowley, J. K., "Visible and Near-Infrared Spectra of Carbonate Rocks: Reflectance Variations Related to Petrographic Texture and Impurities", *Journal of Geophysical Research*, 91(B5), 5001-5012, 1986.
- [3] Crowley, J. K., and Vergo, N. "Visible and near-infrared (0.4- to 2.5 μm) reflectance spectra of selected mixed-layer clays and related minerals", *Proceedings Sixth Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Houston, Texas*, 2, 597-606, 1988.
- [4] Duchaufour, Ph., *Edafogénesis y Clasificación*, Masson Ed., Barcelona, 1984.
- [5] Farmer, V. C., and Warne, S. St. W., "Infrared spectroscopic evaluation of iron contents and excess calcium in minerals of the dolomite-ankerite series", *American Mineralogist*, 63, 779-781, 1978.
- [6] Gaffey, S. J., "Reflectance spectroscopy in the visible and near-infrared (0.35-2.55 μm): Applications in carbonate petrology", *Geology*, 13, 270-273, 1985.
- [7] Gaffey, S. J., "Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite and dolomite", *American Mineralogist*, 71, 151-162, 1986.
- [8] Hunt, G. R., and Salisbury, J. W., "Visible and Near-infrared Spectra of Minerals and Rocks: II Carbonates", *Modern Geology*, 2, 23-30, 1971.
- [9] Kariuki, P.C., Van der Meer, F., Siderius, W., "Classification of soils based on engineering indices and spectral data", *International Journal of Remote Sensing*, 24-12, 2567-2574, 2003.
- [10] Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., and Goetz, A. F. H., "The Spectral Imaging Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data", *Remote Sensing of Environment*, 44, 145-163, 1993.
- [11] Lindberg, D. and Snyder, D. G., "Diffuse reflectance spectra of several clay minerals", *American Mineralogist*, 57, 485-493, 1972.
- [12] Müller, A. and Oertel, D., "DAIS Large-Scale Facility, the DAIS 7915 Imaging Spectrometer in an European Frame", *Proceedings of the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 7-10 July 1997, Copenhagen, Denmark, vol.I, 684-691, 1997.
- [13] Riaza, A., Mediavilla, R., and Santisteban, J.I., "Mapping geological stages of climate-dependent iron and clay weathering alteration and lithologically uniform sedimentary units using Thematic Mapper imagery", *International Journal of Remote Sensing*, 21-5, 937-950, 2000.
- [14] Riaza, A., Mediavilla, R., García Meléndez, E. and Suárez, M., Hausold, A., Beisl, U., Van der Werff, H., "Mapping paleoflooded areas on evaporite playa deposits over sandy sediments (Tablas de Daimiel, Spain) using hyperspectral DAIS 7915 and ROSIS Spectrometer data", *Proceedings 1st International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Torrent, Spain, 16-20 September 2002; in *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Guada Impresores S.L. Valencia, 371-379, 2002.
- [15] Riaza, A., García-Meléndez, E., Suarez, M., Müller, A., Pascual, L., "Estimation of Doline Collapse Hazard With DAIS 7915 Hyperspectral Data", *Proceedings First Mediterranean Conference on Earth Observation- Remote Sensing (MeCEO)*, 20-24 April 2004, Belgrad (Serbia), 349-355, 2004.