



Monitorización de emisiones de CO₂ en un análogo natural mediante correlación con Índices de Vegetación

Jorge Gutiérrez del Olmo Miguel⁽¹⁾, Rafael García Rodríguez⁽¹⁾, Luis Iglesias Martínez⁽²⁾, Rogelio de la Vega Panizo⁽²⁾ y Miguel Ángel Rincones Salinas⁽²⁾

⁽¹⁾ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid. Av. Complutense s/n. 28040. Madrid. Emails: jorgegutierrezdelolmo@gmail.com, rafael.garcia@upm.es

⁽²⁾ESTI de Minas, Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid. Emails: luis.iglesias@upm.es, rogelio.delavega@upm.es, miguel_rincones@yahoo.com

Resumen: Entre las soluciones más satisfactorias al problema de las emisiones de CO₂ está la captura y almacenamiento de este gas de efecto invernadero en reservorios profundos. Esta técnica implica la necesidad de monitorizar grandes extensiones de terreno. Utilizando una zona de vulcanismo residual, en la provincia de Ciudad Real, se han monitorizado las emisiones de CO₂ utilizando imágenes de muy alta resolución espacial. Se han generado índices de vegetación, y estos se han correlacionado con medidas de contenido de CO₂ del aire en los puntos de emisión. Los resultados han arrojado niveles de correlación significativos (p. ej.: SAVI = -0,93) y han llevado a descubrir un nuevo punto de emisión de CO₂.

Palabras clave: teledetección, CO₂, vegetación, satélite

Monitoring CO₂ emissions in a natural analogue by correlating with vegetation indices

Abstract: Among the most satisfactory solutions for the CO₂ emissions problem is the capture and storage of this greenhouse gas in deep reservoirs. This technique involves the need to monitor large areas. Using a volcanic area with residual activity, in the province of Ciudad Real, CO₂ emissions were monitored through very high spatial resolution imagery. Vegetation indexes were generated and correlated with measurements of the air's CO₂ content at the emission points. The results yielded significant correlation levels (e.g.: SAVI = -0.93) and led to the discovery of a new CO₂ emission point.

Keywords: remote sensing, CO₂, vegetation, satellite

1. OBJETIVOS Y ZONA DE INVESTIGACIÓN

Uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta nuestra civilización es la transformación necesaria de los métodos de producción y de consumo hacia un modelo más sostenible. Dentro de esa transformación, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es uno de los grandes retos. Las últimas tendencias, hasta que los combustibles fósiles puedan ser reemplazados totalmente como fuente energética, apuntan hacia las técnicas de captura y enterramiento de CO₂ en grandes reservorios naturales profundos.

En este contexto resulta fundamental la monitorización de esas grandes extensiones para garantizar que el almacenamiento sea efectivo y no presente fugas (IEAGHG, 2012). La investigación sobre técnicas de monitorización del emplazamiento de almacenamiento resultan cruciales para garantizar su viabilidad (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, 2005).

El trabajo que se expone se ha llevado a cabo en la provincia de Ciudad Real, en la zona de actividad volcánica residual de Campo de Calatrava (Figura 1). En esta zona, en la que se pueden encontrar diversos puntos de emisión continua de CO₂, se ha complementado la utilización de técnicas de teledetección con el apoyo de mediciones de campo para la detección de puntos de emisión (Bateson *et al.*, 2008, y Zarco-Tejada *et al.*, 1998).



Figura 1. Situación de la zona de investigación.

La zona de investigación está conformada principalmente a lo largo del valle del río Jabalón, con orientación NO-SE. Es un área de zócalo cuarcítico hercínico (Paleozoico Superior) que, afectado por los posteriores episodios de deformación y degradación-agradación, desemboca en un paleorrelieve de tipo apalachiano parcialmente fosilizado por la sedimentación terciaria. A todo esto se añaden, de forma reciente, una importante actividad volcánica entre el Mioceno y el Pleistoceno, y los posteriores episodios cuaternarios de incisión y sedimentación fluvial de la cuenca.

El enfriamiento del magma, perteneciente a la actividad volcánica en un estadio remanente, es el responsable de las actuales emisiones residuales de CO₂ y otros gases

(IGME, 1991). Actualmente se pueden observar en la región más de trescientos puntos de emisión de CO₂ (Quintana, 2011).

El uso principal del suelo es el cultivo de secano. Las especies vegetales predominantes que se pueden encontrar son la vid y el olivo, con menor presencia de trigo, centeno y otros cultivos extensivos.

Dentro del área de investigación del Campo de Calatrava se seleccionaron tres zonas de interés que incluían la presencia de ocho puntos de emisión de CO₂ para concentrar los trabajos sobre ellas (Figura 2).

Los puntos de emisión se pueden agrupar en dos. Un primer tipo corresponde a emisiones de tipo húmedo o hervideros. En esos puntos la emisión de gases va acompañada de fluidos, principalmente agua, y precipitaciones. Se producen cuando los gases magmáticos interceptan acuíferos en su ascenso. El segundo tipo corresponde a puntos de emisión secos, o fumarolas, con emisión solo de gases. En la zona de investigación hay presentes siete hervideros y una fumarola.



Figura 2. Delimitación de las tres áreas de interés dentro de la zona de investigación y ubicación de los hervideros y fumarolas dentro de ellas.

2. DATOS Y PREPROCESAMIENTO

Para el desarrollo de los trabajos se seleccionaron cuatro imágenes de muy alta resolución de los satélites *WorldView-2* y *QuickBird* de años sucesivos y recientes. Las características de estas imágenes se encuentran en la Tabla 1.

Además de estas imágenes se han obtenido otros datos de apoyo como el modelo digital del terreno, cartografía geológica, mapa tectónico, usos del suelo tomados en campo, medidas de campo de reflectividad sobre el terreno, etc.

Las imágenes de muy alta resolución se han corregido y convertido a valores de reflectividad sobre el terreno para obtener valores absolutos que puedan ser comparados entre ellos.

Tabla 1. Características de las imágenes de satélite utilizadas

	QB30 0108	QB11 1009	WV22 10810	WV2211211	
Componentes	1	1	2	2	
Dimensión (píxeles)	4.630 x 7.871	4.630 x 7.871	5.557 x 7.645	5.557 x 3.287	5.557 x 6.829
Bandas	Pan + 4 MS	Pan + 4 MS	Pan + 8 MS	Pan + 8 MS	Pan + 8 MS
Hora inicio toma	11:23:55 GMT	11:10:48 GMT	11:18:54 GMT	11:33:28 GMT	11:33:02 GMT
Fecha toma	30/01/ 2008	11/10/ 2009	21/08/ 2010	21/12/ 2011	21/12/ 2011
Cobertura nubosa	0%	0%	0%	0%	0%

Este proceso incluyó la corrección geométrica, que se ha realizado utilizando las ortoimágenes del vuelo del PNOA como referencia (Arozarena *et al.*, 2005), la conversión a radiancia espectral, realizada según las indicaciones de los documentos de calibración de los sensores publicados por *Digital Globe*, empresa propietaria de ambos satélites (Krause, 2005 y Updike *et al.*, 2010), la corrección topográfica, siguiendo el modelo de reflexión Lambertiana, para contrarrestar las diferencias de reflectividad provocadas por las diferentes orientaciones del terreno, la conversión a reflectividad, según los documentos de calibración mencionados, y la corrección atmosférica, realizada siguiendo el método *Dark Object Subtraction Method* (Chavez *et al.*, 1988).

Las imágenes fueron remuestreadas a 2,5 m de tamaño de pixel y se mantuvieron durante todo el proceso en 16 bits/pixel para conservar el rango dinámico en toda su amplitud. Para validar el preprocesamiento llevado a cabo se obtuvieron firmas espectrales en campo mediante un espectrorradiómetro de mano ASD FieldSpec 3 y se compararon con las firmas espectrales extraídas de las imágenes para diferentes tipos de suelos y de cultivo, obteniendo resultados significativos. A partir de las imágenes corregidas se ha procedido al cálculo de índices de vegetación.

3. CÁLCULO DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

En primer lugar se seleccionaron doce índices de vegetación de entre más de treinta posibles como los más propicios para la investigación sobre detección de emisiones de CO₂. Estos índices fueron los siguientes: *Simple Ratio* (SR), *Modified Simple Ratio* (MSR), *Normalized Pigment Index* (NPI), *Simple Ratio Pigment Index* (SRPI), *Greenness* (G), *Plant Water Index* (PWI), *Red Edge*, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Photochemical Reflectance Index 1* (PRI1), *Photochemical Reflectance Index 2* (PRI2), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) y *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Batkhuyag, 2008).

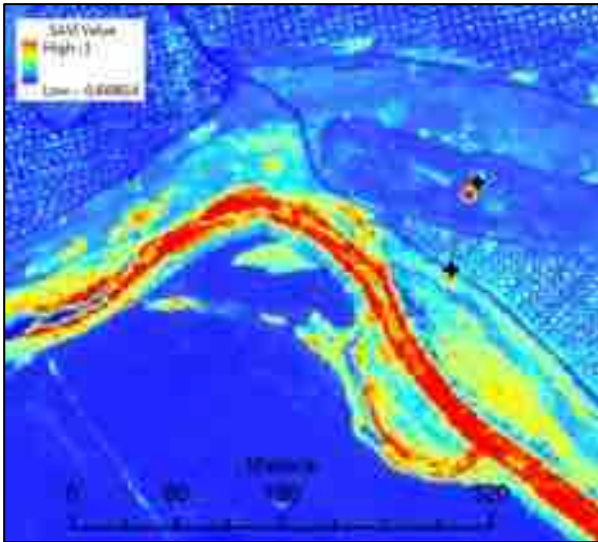


Figura 3. Localización de dos hervideros sobre índice SAVI de la zona del río Jabalón obtenida a partir de la imagen WV2210810

Se procedió a aplicar sobre las imágenes de reflectividad los algoritmos correspondientes a estos doce índices de vegetación en las imágenes WorldView-2, y a ocho de ellos en las imágenes QuickBird. Sobre las imágenes resultantes se realizó un análisis exploratorio (Gutiérrez del Olmo *et al.*, 2013). Este análisis incluyó la elaboración de una escala subjetiva de capacidad de detección de anomalías para cada índice. Según esta evaluación se seleccionaron cinco índices como los más capaces para la detección de puntos de emisión de CO₂ en la zona de estudio: NDVI, SR, MSR, SAVI y EVI.

En los puntos de emisión húmedos o hervideros las anomalías en los índices de vegetación son positivas, detectándose en general altos valores (Figura 3). Los puntos de emisión secos o fumarolas van acompañados de bajos valores de índices de vegetación.

Con los resultados del procesamiento de los índices de vegetación y atendiendo a criterios de forma, ubicación e intensidad de las anomalías se ha realizado una predicción de posibles puntos de emisión de CO₂ en las tres áreas de interés. Posteriormente se han inspeccionado sobre el terreno estos puntos y se han tomado mediciones de contenido de CO₂ sobre ellos. La metodología aplicada ha llevado al descubrimiento de un nuevo punto de emisión, no descrito en la bibliografía previamente consultada ni en las bases de datos de inicio de las investigaciones.

4. CORRELACIÓN DE IV CON EMISIONES DE CO₂

Para el cálculo de correlaciones se han tomado las medidas de contenido de CO₂ en el aire sobre los puntos de emisión, realizadas con un medidor de mano Onset Telaire 7001. Posteriormente se han confrontado estas medidas con los valores máximos, para hervideros húmedos, y mínimos, para puntos de emisión secos, obtenidos de cada uno de los cinco índices de vegetación seleccionados.

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Para realizar esta confrontación se ha utilizado el coeficiente de correlación de Pearson (ec. 1) entre el contenido de CO₂ en el aire y los valores de los índices de vegetación.

Tabla 2. Tabla de correlación de las mediciones de campo de flujos de CO₂ con los índices de vegetación

IV	QB 300108	QB 111009	WV2 210810	WV2 211211
EVI	-0,88	-0,72	-0,59	-0,78
SR	-0,84	-0,51	-0,48	-0,86
MSR	-0,90	-0,58	-0,54	-0,90
SAVI	-0,93	-0,71	-0,66	-0,99
NDVI	-0,97	-0,69	-0,65	-0,97

En la Tabla 2 se presentan los resultados que se han obtenido de la correlación.

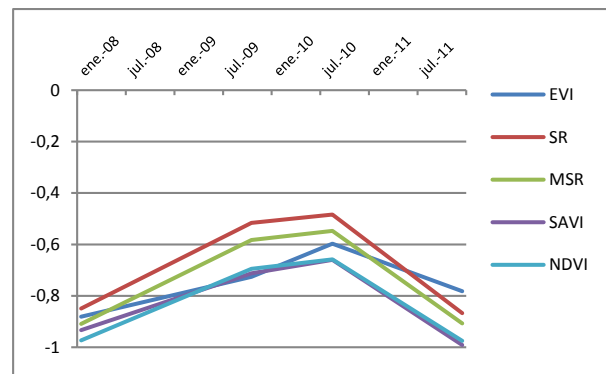


Figura 4. Gráfico de evolución temporal de los valores de correlación Contenido de CO₂-IVs

En la Figura 4 se puede ver la evolución temporal de los valores de correlación, similar para los cinco índices seleccionados.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la Tabla 2 se puede deducir que la correlación es inversa y alta. Es decir, a mayor cantidad de emisión de CO₂ los índices de vegetación decrecen todos, en mayor o menor medida. Los índices de vegetación que mayores valores de correlación inversa han obtenido fueron el SAVI y el NDVI, alcanzando respectivamente a -0,99 y -0,97.

Esto, no obstante, contrasta con las primeras impresiones que se obtienen cuando, en las imágenes de índices de vegetación, se observa que los puntos de emisión de CO₂ se diferencian por valores muy altos (p. ej.: NDVI = 0,93 en el hervidero El Chorrillo en la

imagen QB300108). Dentro de estos valores altos, el exceso de CO₂ parece implicar un menor crecimiento de la vegetación.

El descubrimiento de un nuevo punto de emisión húmedo de CO₂, ubicado en el área de interés más al sur, con morfología característica, y con NDVI = 0,852 en la imagen WV2210810, es también un hallazgo significativo que contribuye a confirmar que la línea de investigación es correcta. En este sentido se debería trabajar en la automatización del procedimiento de búsqueda de nuevos puntos de emisión. Para ello es muy importante tener en cuenta el esquema tectónico de la zona, para facilitar la localización de los focos y alineaciones, y trabajar con máscaras sobre las zonas de cultivos y humedales a fin de evitar falsos positivos.

De cara a futuros trabajos se deberían tomar registros continuos y prolongados en el tiempo de contenidos de CO₂ en los puntos de emisión. Estos se deberían correlacionar con una mayor cantidad de imágenes para poder darle más consistencia a los resultados y establecer una metodología optimizada.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Arozarena, A., Villa, G. & Valcarcel, N. 2005. *The National Aerial Orthophoto Program in Spain (PNOA)*. International Cartographic Conference. La Coruña, Spain.
- Bateson L., Vellico M., Beaubien S.E., Pearce J.M., Annunziatellis A., Ciotoli G., Coren F., Lombardi S. & Marsh S. 2008. *The application of remote-sensing techniques to monitor CO₂-storage sites for surface leakage: method development and testing at Latera (Italy) where naturally produced CO₂ is leaking to the atmosphere*.
- Batkhuuyag, O. 2008. *Spectral indicators for assessing the effect of hydrocarbon leakage on vegetation*: M.Sc. Thesis, Institute for Geo-information Science and Earth Observation. The Netherlands. 2008.
- Chavez, P. 1988. *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment 24:459-479.
- Gutiérrez del Olmo J., García R., Iglesias L., de la Vega R. & Rincones M. 2013. *Análisis exploratorio de firmas espectrales e índices de vegetación para la monitorización de emisiones de CO₂ en un análogo natural*. Medioambiente y recursos naturales. XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp. 446-451. Ed. por Alix Fernández-Renau González-Anleo y Eduardo de Miguel Llanes. Madrid, España.
- IGME. 1991. *Hoja 811. Moral de Calatrava*. Madrid : Instituto Geológico y Minero. (Mapa Geológico de España, MAGNA). Escala 1:50.000.
- IEAGHG (International Energy Agency GreenHouse Gas R&D Programme). 2012. *Informe Técnico: Quantification Techniques for CO₂ Leakage*.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. 2005. Prepared by Working Group III [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Krause, K. 2005. *Radiometric use of QuickBird imagery*. Digital Globe Inc. Technical Note.
- Quintana, E. 2011. *Detección de alteraciones que las emisiones naturales de CO₂ provocan en masas forestales mediante técnicas de teledetección*: Tesis Fin de Master, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Universidad Politécnica de Madrid, 113 pp.
- Uptdike, T. & Comp, C. 2010. *Radiometric use of WorldView-2 imagery*. Digital Globe Inc. Technical Note.
- Zarco-Tejada, P. J. 1998. *Correlations between CO₂ fluxes and high spatial resolution reflectance imagery*. Master of Science in Remote Sensing. University of Dundee (Scotland, United Kingdom).