

# EXPERIENCIAS DE TELEDETECCIÓN PASIVA Y ACTIVA EN EL ESTUDIO ARQUEOLÓGICO DE LA CIUDAD CELTIBÉRICA DE SEGEDA (MARA, ZARAGOZA)

## EXPERIENCES OF PASSIVE AND ACTIVE REMOTE SENSING IN THE ARCHAEOLOGICAL STUDY OF THE SEGEDA CITY (MARA, ZARAGOZA)

Raúl López Romero (1) / Juan Gregorio Rejas Ayuga (2) / Francisco Burillo Mozota (3) / M.<sup>a</sup> Ascensión Cano Díaz (1) / M.<sup>a</sup> Esperanza Saiz Carrasco (1) / Mercedes Farjas Abadía (4) / Teresa Mostaza Pérez (5) / Julio J. Zancajo Jimeno (5)

(1) Centro de Estudios Celtibéricos de Segeda

(2) Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

(3) Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales de Ternel, Universidad de Zaragoza

(4) E.T.S.I. de Topografía, Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid

(5) Escuela Politécnica Superior de Ávila, Universidad de Salamanca

**RESUMEN:** En la siguiente comunicación se presenta los diferentes resultados obtenidos tras cuatro años ininterrumpidos de aplicación de diferentes técnicas y metodologías de teledetección con imágenes hiperespectrales y multiespectrales térmicas en la Zona Arqueológica de Segeda (Mara – Belmonte de Gracián, Zaragoza) y su entorno, como herramientas útiles para el descubrimiento de estructuras o rupturas arqueológicas soterradas. En el presente se resumen las diferentes campañas de adquisición de datos, la metodología utilizada en el tratamiento digital de los datos y las posibilidades de integración de esta información en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para un posterior análisis geoespacial de la configuración del yacimiento.

**SUMMARY:** In the next article, is the review the different results obtained after four consecutive years of application of different techniques and methodologies of remote sensing techniques and methodologies applied to the study of the archaeological site of Segeda (Mara – Belmonte de Gracián, Zaragoza) and their environment, as tools useful for the discovery of buried archaeological structures or ruptures. In this summarizes is the review the various data acquisition campaigns, the methodology used in digital processing of data and the possibilities of integrating this information into a Geographical Information Systems (GIS) for further spatial analysis of the configuration of the site.

**PALABRAS CLAVE:** Hiperespectral, SAR, anomalías espectrales, teledetección, estructuras arqueológicas, SIG, Segeda.

**KEY WORDS:** Hyperspectral, SAR, spectral anomaly, remote sensing, archaeological structures, GIS, Segeda.

## I. INTRODUCCIÓN

La Zona Arqueológica de Segeda se extiende entre los términos municipales de Mara y Belmonte de Gracián, ambos pertenecientes a la provincia de Zaragoza, a escasos 15 km de la ciudad de Calatayud, en la cuenca del río Perejiles. Los trabajos arqueológicos que se vienen desarrollando desde 1998 están confirmando su correspondencia con las distintas fases de la homónima ciudad celtibérica (Burillo 2001-2, 215-238). Las fuentes clásicas nos relatan la importancia que tuvo dicha urbe siendo una ampliación de la ciudad y sus fortificaciones la que conllevó al enfrentamiento con la emergente Roma en el año 153 a.C. (Apiano Iber., 45) en plena expansión por el Noroeste de la Pe-

nínsula Ibérica, trasladándose su población a la vecina ciudad de Numancia conllevando su entrada en el conflicto bélico.

Sin embargo, no serán los datos aportados por los autores clásicos, ni la abundante numismática emitida (Gomis 2001) y tampoco los materiales arqueológicos recuperados por el equipo de investigación lo que le confiera a esta yacimiento como importante para la investigación arqueológica, sino serán sus características topográficas y las condiciones geomorfológicas que configuraron este yacimiento arqueológico. La Zona Arqueológica de Segeda se configura con la unión de dos fases distintas de la ciudad de Segeda. La fase celtibérica, denominada por el equipo de excavación

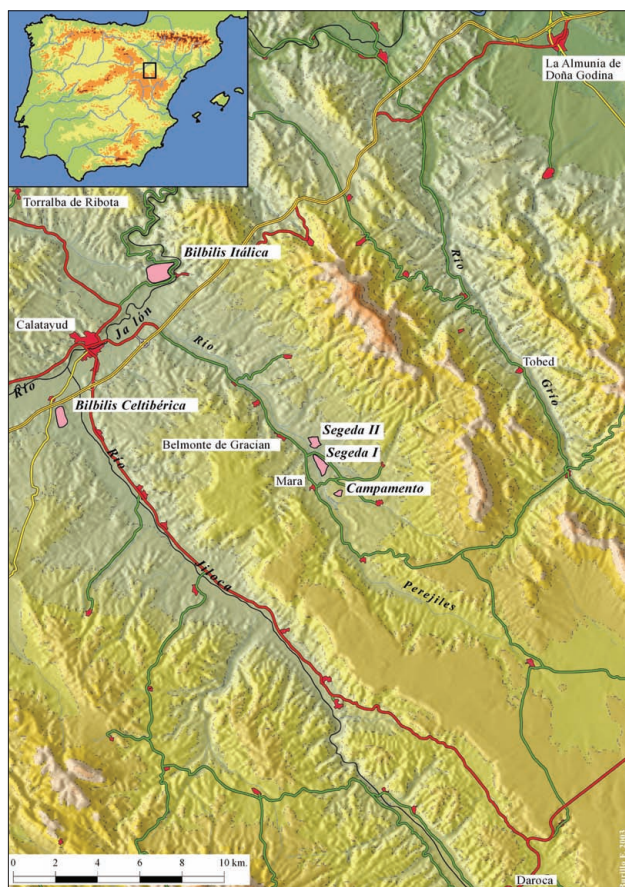


Fig. 1. Mapa de situación de la Zona Arqueológica de Segeda.

como *Segeda I*, surge en el núcleo del cerro del Poyo de Mara y se extiende por los campos del entorno; posteriormente aparecerá la urbe celtiberrmana de *Segeda II*, un asentamiento creado tras la destrucción por Roma del primer núcleo y caracterizada por ser una ciudad de las denominadas en “llano”, encontrándose inmediata al núcleo original (Burillo 2006).

La gran extensión (entorno a las 40 ha) y la ubicación en la que se encuentran estos asentamientos configurará un área de test idónea para la aplicación de nuevas metodologías de teledetección por su accesibilidad a diferentes espectros de estructuras arqueológicas. A ello se debe sumar la variedad tipológica de los restos materiales existentes, tanto por los materiales empleados (yesos, calizas, cuarcitas, adobes, etc.), como en sus dimensiones y edificación (murallas, muros perimetrales, muros divisores, mosaicos, enlosados, etc.) y a la posibilidad de la comprobación de estos resultados con las continuas campañas de excavación que en ella se desarrollan. Sin embargo, el mayor aporte para la evaluación de estas técnicas proviene de las notables diferencias del espesor de sedimentos bajo los que se encuentran enterradas las estructuras arqueológicas, localizando en entornos próximos restos arqueológicos a menos de 30 cm de la superficie (Burillo *et al.* 2008), frente a otras áreas donde las evidencias arqueológicas son documentadas a profundidades mayores de los 2 m como es el caso del Área 3 de *Segeda I* (Burillo 2001-2002).

Por tanto, a efectos de teledetección, este enclave arqueológico tiene la relevancia de ser un área de test idóneo donde poder desarrollar y validar las diferentes metodologías de prospección, debido a su estado de excavación, que si bien es secuencial y riguroso, podríamos calificar de incipiente, lo que permite ir contrastando los resultados según se desarrollan los trabajos arqueológicos.



Fig. 2. Las dos imágenes muestran el diferentes espesor de sedimentos que cubren los restos de la Zona Arqueológica de Segeda. La imagen izquierda correspondiente al Área 3 con sedimentos a más de 1,60 m y la imagen derecha, Área 4, a menos de 50 cm.



Esta experimentación en el uso de estas nuevas técnicas busca evaluar la posibilidad de su integración dentro de las diferentes líneas de investigación arqueológica que se aplican en la actualidad. En los últimos años, los nuevos sensores de teledetección, tanto los pasivos como los activos, aplicados en la prospección arqueológica han demostrando su potencial como importantes instrumentos para la localización de subsidencias o estructuras arqueológicas, como indican recientes publicaciones científicas (Belvedere *et al.* 2001; Emmolo *et al.* 2004; Weller 2006). Sin embargo, son escasas las veces que se pretende localizar estos elementos arqueológicos a partir del estudio de las respuestas que emite la superficie del terreno en longitudes de onda más allá del espectro visible. Los estudios que estamos desarrollando demuestran que el análisis de la respuesta de la superficie en longitudes de onda del espectro reflectivo (VIS-SWIR) y emisor (TIR) puede representarnos información de estructuras o formaciones creadas por el hombre y enterradas en la actualidad. En este caso el estudio se ha centrado en las bandas térmicas, por ser aquí donde en principio, y en base a experiencias previas (Farjas *et al.* 2003) es posible discriminar fenómenos que correspondan a estructuras enterradas.

## II. MARCO DE TRABAJO: ESTRATEGIA MULTIFUENTE Y MULTIESCALA

La metodología empleada siguió una estrategia de trabajo multi, micro, media y macro escala, afectando a los hallazgos y artefactos, al yacimiento y a la región, respectivamente. Los datos empleados en este trabajo han respondido a este planteamiento. Por ello, desde 2005 se adquirieron un conjunto de imágenes de distintos sensores y desde distintas plataformas que representamos en la siguiente tabla:

DATO	SENSOR	PLATAFORMA	AÑO
Multiespectral	ETM+	Landsat 7	2002
Hiperespectral	AHS	Aérea	2005
SAR	ASAR	ENVISAT	2004 y 2006
SAR	Prototipo-INTA	Aérea(*)	2006
Térmico	Thermacam	Terrestre	2006
Láser 3D	Trimble GX 3D	Trípode	2007
Fotografía	Nikon D70	Terrestre	2007
Fotografía	Cámara Digital	UAV(*)	2008

Tabla 1. Origen y características de los datos utilizados en la investigación.

Para aumentar el conjunto de datos se obtuvieron dos pases ascendentes ASAR (ENVISAT), correspondientes a las fechas del 31 de agosto de 2004 y del 5 de septiembre de 2006. Estas escenas fueron seleccionadas porque abarcaban una gran área, 100 x 100 km, entorno a la actual ciudad de Calatayud, englobando así lo que sería la Zona Arqueológica de Segeda, y su probable área de captación de recursos. Dichas imágenes fueron procesadas con el programa RAT (HUhttp://srv-43-200.bv.tuberlin.de/rat/UH), transformándolas a formato Simple Look Complex y posteriormente a imágenes de amplitud. La georreferenciación de la escena del año 2004 se realizó por método polinómico a partir de 55 GCP's, corrigiendo a su resultado la correspondiente al año 2006.

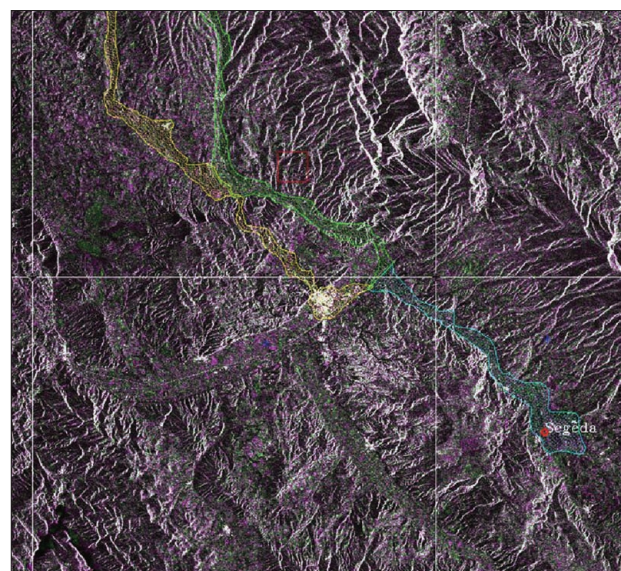


Fig. 3. Imagen ASAR multitemporal (2004-2006) correspondiente al entorno de la Zona Arqueológica de Segeda, superpuesta a vectores (cyan, verde y amarillo) de posibles rutas en dirección a Numancia.

Junto a la adquisición de estas imágenes, se completaron los datos con la realización de una campaña de radiometría de campo, cuyo objetivo era obtener una biblioteca espectral de los materiales más representativos de los enclaves arqueológicos para lo cual se utilizó el espectrorradiómetro GER 1500. A las medidas obtenidas se añadió una serie de medidas radiométricas realizadas en laboratorio con el espectrorradiómetro ASD con la intencionalidad de obtener una caracterización espectral de diferentes muestras de minerales recogidas y la obtención de firmas espectrales de las superficies medidas.

La amplitud y diversidad del origen de los datos utilizados conllevó necesariamente a una transformación de los parámetros de las imágenes a una escala absoluta, tanto de forma espacial como espectral, para permitir su procesamiento de forma conjunta, de tal manera que podamos referir las medidas extraídas a otras procedentes de los distintos sensores o tomadas en distintas fechas. Con esto se preparó el conjunto de los datos para su posterior análisis que permitiesen correlacionar espacialmente los elementos correspondientes a estructuras o elementos arqueológicos (murallas, muros, estructuras arqueológicas, restos de origen orgánico, etc) con la temperatura emitida por la superficie en el momento que fueron registrados por los sensores y otros parámetros clásicos extraídos mediante técnicas de tratamiento de imagen.

### III. PREPROCESADO DE LAS IMÁGENES HIPERESPECTRALES. CORRECCIONES RADIOMÉTRICAS Y CORRECCIONES GEOMÉTRICAS

En el inicio del análisis de las imágenes y datos auxiliares obtenidos es preciso realizar una serie de tareas con la funcionalidad de corregir dos tipos de distorsiones que sufren estas imágenes en su momento de adquisición, las distorsiones radiométricas y las geométricas.

En primer paso fue la aplicación del algoritmo MNF (*Minimum Noise Fraction*) en las imá-

genes hiperespectrales, que permitió reducir el ruido. Para las bandas térmicas, se han desechado los canales 55 a 64 y canal 70 por presentar una relación señal/ruido elevada en este caso, y se ha aplicado una interpolación lineal utilizando el nivel digital registrado y la temperatura asignada a los cuerpos negros de referencia (10 y 50 °C) del AHS.

Para el caso de las bandas reflectivas del sensor (hasta los 2,5  $\mu\text{m}$ ) los niveles digitales originales se calibraron a radiancias mediante coeficientes de calibración obtenidos utilizando la "esfera integradora" de calibración USS 400 (<http://www.labsphere.com/>) cubierta con Spectralect. Para las bandas térmicas se aplicó una interpolación lineal utilizando el nivel digital registrado y la temperatura asignada a los cuerpos negros de referencia (10 y 50 °C) situados antes y después de cada línea escaneada.

Para convertir los valores de radiancia obtenidos en el sensor a valores de reflectividad del terreno, parámetro este indicativo del estado de los materiales y comparable con otras firmas espectrales procedentes de librerías, se utilizaron las medidas radiométricas realizadas en campo así como las tomadas en el laboratorio. Con este método se consiguieron dos objetivos en un solo paso, la transformación de radiancia en el sensor a reflectancia del terreno y la corrección de la distorsión radiométrica producida por la atmósfera, al absorber y dispersar parte de la radiación que

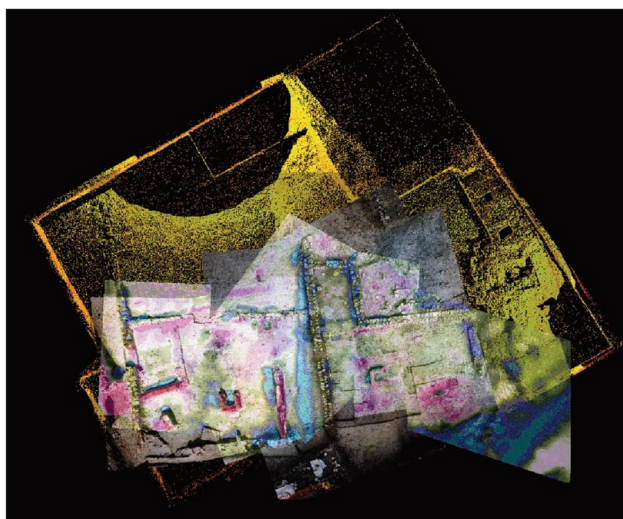


Fig. 4. Ejemplo de fichero multifuente empleado para el estudio del Área 4 del yacimiento de Segeda I (Mara, Zaragoza).

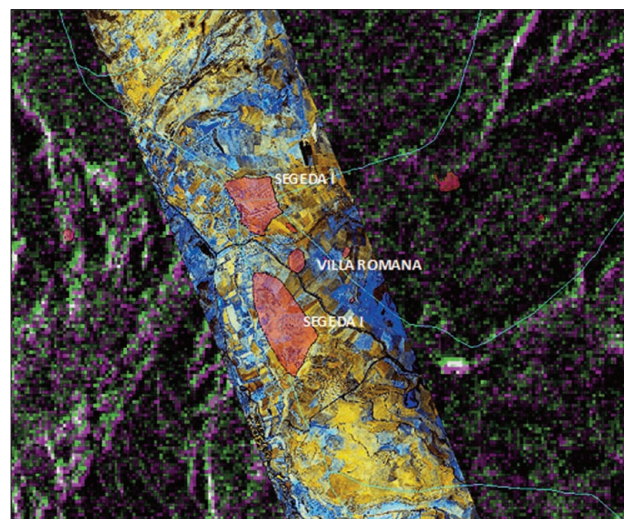


Fig. 5. Imagen multitemporal ASAR combinada con la imagen hiperespectral y los límites del área arqueológica de Segeda.



llega a la superficie. Para ello se aplicó al puerto 1 del AHS el algoritmo "Empirical Line" (Smith y Milton 1999) mediante firmas espectrales de superficies "brillantes" y "oscuras" dentro de la zona de estudio, adquiridas en la campaña de espectroradiometría de campo anteriormente descrita.

La segunda gran tarea que se abordó durante el preprocesado de los datos concernía a las necesarias correcciones geométricas y georreferenciación de las imágenes. Para el caso de la imagen hiperespectral se aplicó un método paramétrico de georreferenciación, conocido como *georreferenciación directa*, que a partir de datos de posición y orientación medidos por un sistema inercial GPS/IMU en el momento de adquisición de estas imágenes, permitirá corregir las distorsiones geométricas producidas por los movimientos de la plataforma y georreferenciar cada píxel de la imagen en un único proceso automático. También fue indispensable transformar los parámetros del resto de imágenes y datos auxiliares a una escala absoluta, tanto espacial como espectral, con el fin de que pudiéramos referir las medias extraídas de las imágenes a otras procedente de otros sensores o fuentes de información.

La última fase fue la fusión de estas imágenes con fotografías área mediante Imgfuse (Geomática), generándose una nueva subescena a 0.5 m de resolución espacial, manteniendo la información espectral original.

#### IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS

##### **Análisis de datos térmicos: Anomalías térmicas y reducción de la dimensionalidad (PCA)**

Para el análisis de datos térmicos se siguieron dos técnicas. En primer lugar se calcularon anomalías aplicando una combolución mediante un filtro de mediana, para posteriormente establecer un índice térmico (Rejas *et al.* 2006) basado en la separabilidad de clases que presentan los canales 74 y 80 del puerto térmico del AHS. La función diseñada se ha corregido en base a la relación de los parámetros de ganancia de ambos canales, resultando la siguiente expresión:

$$(\text{Conv}(\text{AHS74}) - \text{Conv}(\text{AHS80})) / (\text{Conv}(\text{AHS74}) + \text{Conv}(\text{AHS80})) * 0,24$$

Conv = image convolution

La búsqueda de estas anomalías térmicas se basa en la hipótesis conocida de que cuerpos enterrados pueden inducir una temperatura superficial diferente para un mismo material envolvente.

El resultado obtenido con esta técnica fue una imagen en la que se detectaban píxeles con respuestas anómalas térmicas con respecto al resto del territorio. El análisis de estas imágenes nos permitió localizar algunas de estas anomalías como sería el caso de una disposición circular concéntrica correspondiente a una estructura soterrada ubicada en la margen derecha de la rambla de Orera y sita entre los restos de ambas urbes (Fig. 6.3). En 2008 se confirmó mediante prospección arqueológica su correspondencia con un yacimiento de cronología romana altoimperial, correspondiente a una villa en la que existen restos de un área de producción cerámica. Del mismo modo, en el interior de los restos de la fase de *Segeda II*, se documentan rupturas y líneas que parecen indicar su correspondencia con estructuras soterradas internas (Fig. 6.2) o el caso del patrón geométrico de la Fig. 6.1, que la comprobación arqueológica demostró su correspondencia con una edificación agrícola de época moderna (s. XVII-XVIII).

Otra línea de trabajo que hemos seguido respecto a los canales térmicos ha sido la reducción de la dimensionalidad, mediante el Análisis de Componentes principales (PCA). El objetivo es obtener una nueva variable que exhiba el mayor contraste térmico, principalmente entre las longitudes de onda de 10,16 micrómetros y 12,89 micrómetros. Experiencias previas han mostrado resultados satisfactorios de PCA en datos hiperespectrales para arqueología (Traviglia 2006).

En nuestro caso, el PCA se focalizó para los canales térmicos del AHS fusionados con fotografía aérea. Los cuatro primeros PC permitieron detectar y extraer una alineación que presentaba en un punto de inflexión del terreno un giro brusco

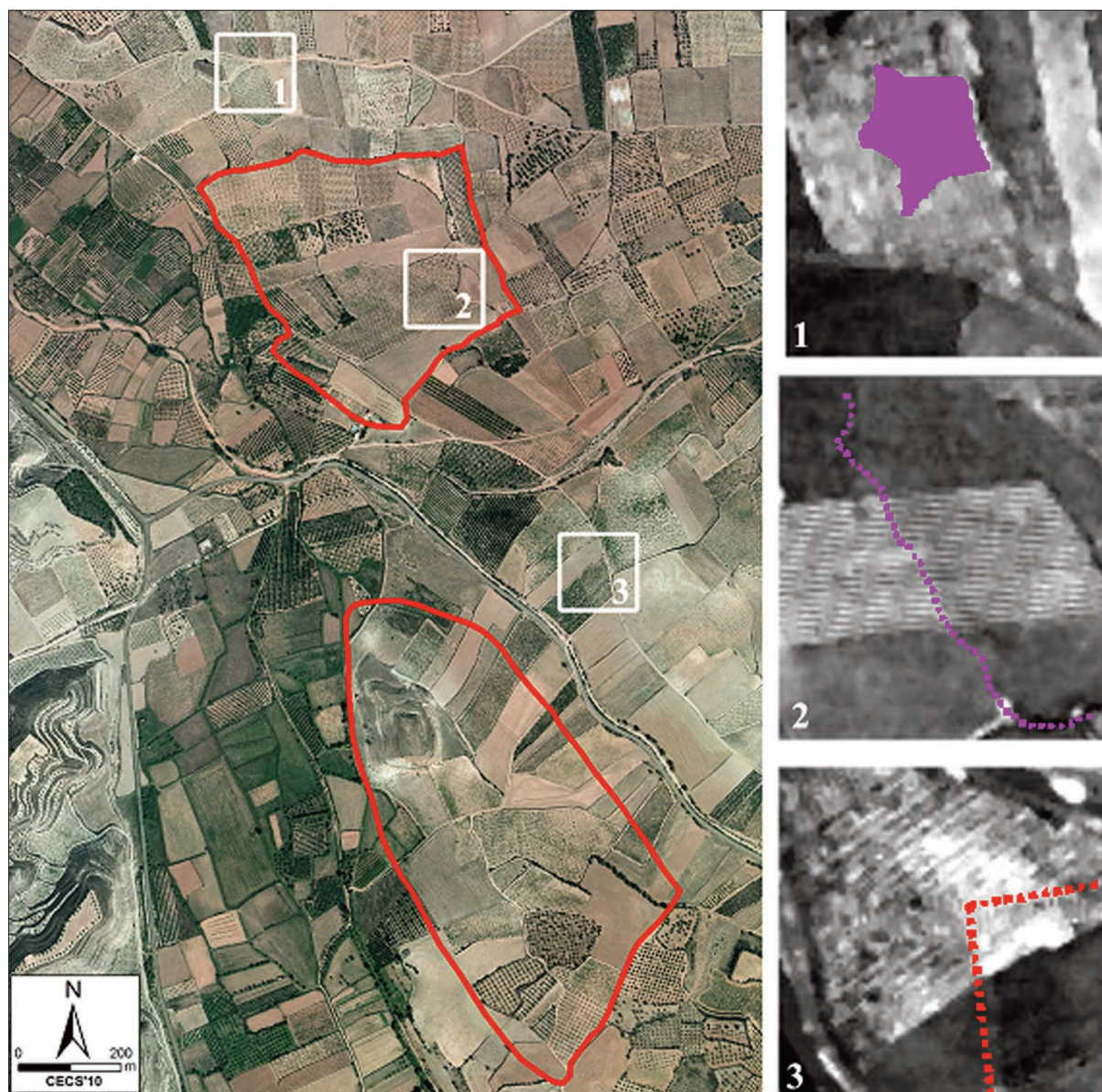


Fig. 6. Zonas caracterizadas por anomalías calculadas a partir de los canales térmicos del AHS.

en dirección SW, pudiéndose corresponder con algún tipo de estructura enterrada o muro de fortificación existente en la ciudad de *Segeda* I (Rejas *et al.* 2006). Su aplicación en los restos de la ciudad celtiberorromana de *Segeda* II, mostró como el Componente Principal 14 (CP14), en las áreas de mayor concentración de humedad se correspondía con el perímetro amurallado de la ciudad, o a estructuras internas que podrían corresponder a las calles principales de la ciudad romana. Este resultado fue relevante, ya que nos permitió detectar en las zonas del espectro electromagnético mencionado estructuras arqueológicas enterradas o semienterradas del área arqueológica de *Segeda*.

#### Interferometría SAR (InSAR). Cálculo de subsidencias del terreno

Otra de las líneas de investigación que se están explorando es la aplicación de interferometría SAR para el cálculo de subsidencia en el terreno. Se ha generado un par interferométrico a partir de las imágenes ASAR de 2004 y 2006, obteniéndose una baja coherencia, porque aunque las imágenes correspondían a la misma estación del año, en esos años no se daban las mismas condiciones de humedad, y por ello existía un distinto estado de las coberturas terrestres. Para solucionar este inconveniente se han adquirido nuevos



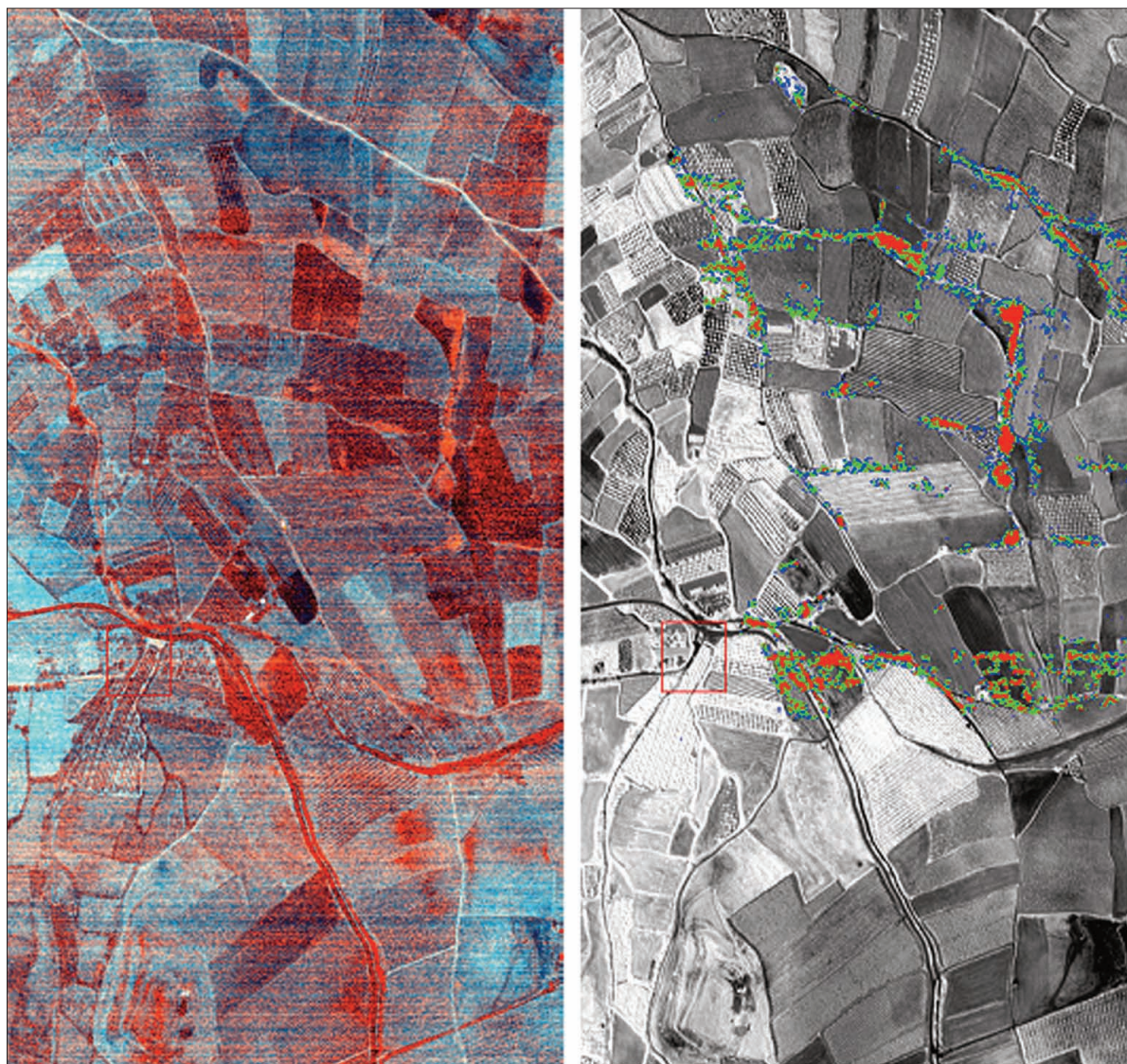


Fig. 7. Combinación de RGB PC14 más PC3 (izquierda) y canal AHS 8 con estructuras localizadas (derecha).

pares de imágenes ASAR comprendidos entre 2004 y 2006, que actualmente están siendo analizados e integrados en un SIG, junto con el resto de capas de información generadas y superpuestas a distintos yacimientos arqueológicos, con el objetivo de explorar las capacidades para su interconexión con estructuras o evidencias de actividad humanas como antiguos caminos, explotaciones mineras, etc. y que en la actualidad no sean visibles.

#### **Aplicación de la técnica de Crosta. Estudio de materiales de alteración hidrotermal**

Por último, otra de las líneas de experimentación para la aplicación de la teledetección en la

arqueología, es la aproximación a las posibles variables geológicas de la ciudad celtibérica de *Segeda* y su entorno de captación próximo. Para ello estamos aplicando la denominada Técnica de Crosta, que nos está permitiendo detectar materiales de alteración hidrotermal, en concreto, dos grandes grupos, materiales arcillosos y compuestos de óxidos de hierro.

La aplicación de esta técnicas se esta realizando sobre las imágenes ETM+ y en las imágenes hiperespectrales, destacando en ella agrupaciones de arcillas, que se podrían encontrar en relación con talleres de alfarería, y agrupaciones de óxidos de hierro, buscando en ello rupturas antrópicas que nos indiquen que han sido en el pasado objeto



de explotaciones metalúrgicas. La hipótesis de partida es la posibilidad de combinación de técnicas descritas, junto a la información de enclaves arqueológicos para intentar deducir si existe una relación de estos recursos humanos con posibles actividades antrópicas.

## V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha buscado presentar una revisión crítica de las diversas aplicaciones de técnicas y metodologías de teledetección activa y pasiva que se están usando en la Zona Arqueológica de *Segeda* como área de Test de pruebas para la experimentación en el uso de estas nuevas herramientas.

Tras cinco años de trabajos podemos afirmar que los datos hiperspectrales y térmicos multiespectrales aportados por estos sensores poseen un gran potencial para la determinación de parámetros que indiquen, en condiciones favorables, la localización de estructuras arqueológicas. En este caso, el Análisis de Componentes Principales (PCA) que se realizó permitió corroborar alineamientos y anomalías indicativos de posibles restos arqueológicos. La integración de estos resultados permitió establecer relaciones entre puntos de inflexión del terreno y variabilidad térmica, que combinados con nuevos análisis (Técnica de Costra) permitirán localizar evidencias de actividades económicas en el entorno de los yacimientos.

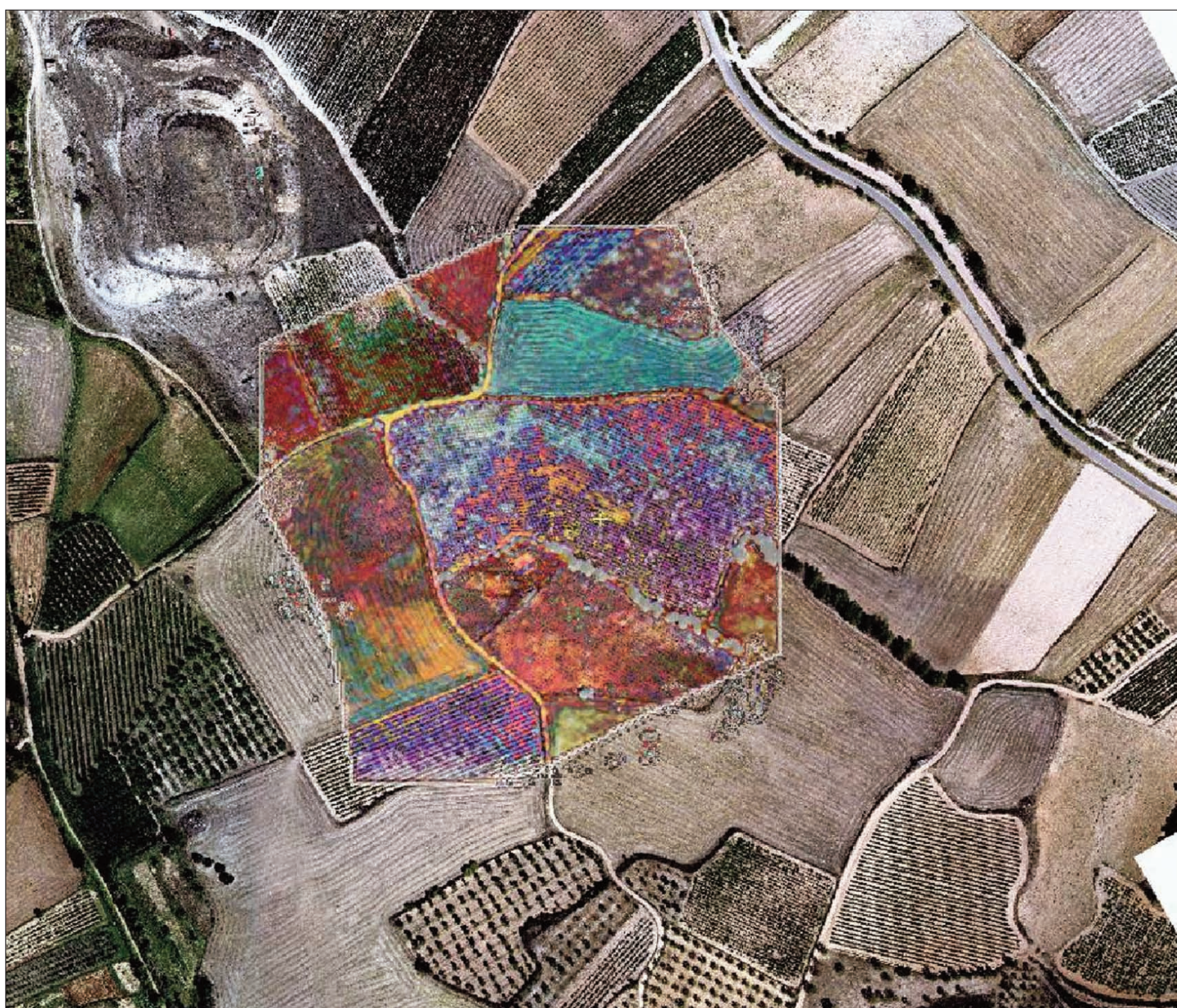


Fig. 8. Combinación de color rgb PC4, PC3 y PC2 superpuesta a ortofoto aérea, en la que se observa una estructura en codo.



El análisis de la validez para el cálculo de subsidencias mediante interferometría, han dado resultado negativo. Esto fue debido a la baja coherencia entre las imágenes ASAR, lo que ha imposibilitando su aplicación. Sin embargo, creemos que este tipo de datos tendrán un importante potencial puesto que complementarían el estudio en la región de las microondas.

Por último, la actual integración de estos datos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) nos está permitiendo analizar espacialmente amplias regiones del territorio en conjunción con otros datos del terreno, lo que está permitiendo generar modelos de predicción para la localización de estas anomalías o subsidencias que nos pre-

sentarían nuevos emplazamientos arqueológicos. Por tanto la conjunción de los trabajos multifuente, multiescala, multitemporal y multidisciplinario nos está posibilitando obtener mejores resultados para el acometido propuesto, y lo que es más importante, validarlos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Área de Teledetección del INTA por facilitar los datos térmicos e hiperespectrales necesarios para realizar este trabajo.

Este trabajo se desarrolla dentro del proyecto I+D: HAR2008-04118, financiado por el MEC y los FEDER.



## BIBLIOGRAFÍA

- BELVEDERE, O.; BURGIO, A.; CIRAOLO, G.; LA LOGGIA, G. & MALTESE 2001: "Hyperspectral MIVIS data analyses for archaeological applications". *Fifth International Airborne Remote Sensing conference and Exhibition*, San Francisco, 17-20 Sept. 2001.
- BURILLO MOZOTA, F. 2001-2002: "Indicadores cronológicos para la datación del nivel de destrucción de *Segeda I*", *Kalathos* 20-21: 215-238
- BURILLO MOZOTA, F. 2006: "*Segeda* and Rome. The historical development of a Celtiberian city-state". En L. Abad; S. Ramallo & S. Keay (eds.), *Early Roman Town in Hispania Tarraconensis. Journal of Roman Archaeology*. Supplementary Series Number 62, Portsmouth Rhode Island: 159-170.
- EMMOLO, D.; FRANCO, V.; LO BRUTTO, M.; ORLANDO, P. & VILLA, B. 2004: "Hyperspectral Techniques and GIS for Archaeological Investigation". *Geo-Imagery Bridging Continents XXth ISPRS Congress*, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey Commission 7.
- FARJAS, M.; REJAS, J.G.; GÓMEZ, J. A.; De MIGUEL, E. & FERNÁNDEZ-RENAU, A. 2003: "Airborne Multispectral Remote Sensing Application In Archaeological Areas". CAA 2003, *The E-way into the four Dimensions of Cultural Heritage*, Viena, Austria, April 2003.
- GOMIS, M. 2001: *Las acuñaciones de la ciudad celtibérica de Segeda/Sekaiza*, Teruel-Mara-Zaragoza.
- REJAS, J. G.; BURILLO, F.; LÓPEZ, R. y FARJAS, M. 2006: "Hyperspectral remote sensing application in the celtiberian city of *Segeda*". *From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology*, Rome (Italy) 4-7 December 2006, BAR International Series 1568, BAR S1568 2006.
- SMITH, G.M. & MILTON, E. J. 1999: "The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance". *International Journal of Remote Sensing*, Taylor and Francis Ltd:2653-2662
- TRAVIGLIA, A. 2006: *MIVIS Hyperspectral Sensor for Detection of Subsoil Archaeological Sites and Interpretation Support GIS: an Italian Case Study*. CAA 2006, Fargo, ND-USA.
- WELLER, E. T. 2006: "Satellites, survey and settlement: the Late Classic Maya Utilization of Bajos (Seasonal Swamps) at Tikal and Yaxha, Guatemala". *From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology*, Rome (Italy) 4-7 December 2006, BAR International Series 1568, BAR S1568 2006.