



## Estudio de áreas degradadas mediante imágenes obtenidas con un UAV (dron) y con el satélite Sentinel de la Agencia Espacial Europea<sup>1</sup>

María del Pilar García Rodríguez<sup>2</sup>; Almudena Sánchez Pérez de Évora

Recibido: 23 de noviembre del 2017 / Enviado a evaluar: 6 de diciembre del 2017 / Aceptado: 4 de marzo del 2020

**Resumen.** Se analiza, mediante imágenes de satélite, fotografías aéreas e imágenes tomadas con un dron, un sector protegido dentro del Parque Regional del Guadarrama (Madrid) afectado por importantes procesos de degradación. Este área se caracteriza por la presencia de fuertes cárcavas que, aunque carentes de vegetación en su mayor parte, en algunos puntos más estables, sustentan un denso bosque mediterráneo. La acción del hombre ha provocado un importante sellado del suelo con la construcción de urbanizaciones en áreas próximas que incrementan los procesos de escorrentía y, por lo tanto, afectan a la evolución de las cárcavas. El objetivo de este trabajo es hacer una cartografía detallada de estas áreas degradadas utilizando las fuentes disponibles y actualizadas: fotografía aérea, imágenes de los satélites Landsat, Spot y Sentinel e imágenes tomadas con un dron con cámara visible y de infrarrojos próximos. Son especialmente novedad, las imágenes tomadas por el satélite Sentinel y por el dron.

**Palabras clave:** Dron; Sentinel; cárcavas; teledetección; sellado suelos.

### [en] Study of degraded areas through images obtained from a UAV (drone) and the ESA Sentinel satellite

**Abstract.** The aim of this paper is to analyse by satellite images, aerial photographs and images taken with a UAV (drone), a protected sector within the Guadarrama Regional Park (Madrid) affected by important degradation processes. This area is characterized by the presence of significant gullies that, although lacking vegetation for the most part, in some more stable points, support a dense Mediterranean forest. Human action has caused an important sealing of the soil with sitting residential areas nearby that increases the processes of runoff and, therefore, affects the evolution of the gullies. The objective of this paper is to make a detailed cartography of these degraded areas using available and updated sources: aerial photography, images of the Landsat, Spot and Sentinel satellites and images taken with a UAV with visible camera and near infrared. They are absolute novelty, the images taken by the Sentinel satellite and the UAV.

**Keywords:** UAV; Sentinel; gullies; remote sensing; soil sealing.

<sup>1</sup> Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto PIMCD nº 54 de la UCM, 2015-16.

<sup>2</sup> Departamento de Geografía. Universidad Complutense de Madrid.

E-mail: [mpgarcia@ucm.es](mailto:mpgarcia@ucm.es)

## [fr] Etude de zones dégradées a travers des images obtenues avec un UAV (drone) et avec le satellite Sentinel de L'Agence Spatiale Europeenne

**Résumé.** Il est analysé, au moyen d'images satellites, des photographies aériennes et des images prises avec un drone, un secteur protégé dans le Parc Régional du Guadarrama (Madrid) affecté par d'importants processus de dégradation. Cette zone est caractérisée par la présence de ravins forts qui, bien que dépourvus de végétation pour la plupart, dans certaines zones plus stables, soutiennent une dense forêt méditerranéenne. L'action de l'homme a causé une importante imperméabilisation du sol avec la construction d'urbanisations dans les zones voisines qui augmentent les processus de ruissellement et, par conséquent, affectent l'évolution des ravins. L'objectif de ce travail est de réaliser une cartographie détaillée de ces zones dégradées en utilisant les sources disponibles et mises à jour: photographie aérienne, images des satellites Landsat, Spot et Sentinel et images prises avec un drone avec des caméras visibles et infrarouges proches. Les images prises par le satellite Sentinel et par le drone sont particulièrement nouvelles.

**Mots clés:** Drone; Sentinel; ravins; télédétection; sol imperméabilisé.

**Cómo citar.** García Rodríguez, P. y Sánchez Pérez de Évora, A. (2020): Estudio de áreas degradadas mediante imágenes obtenidas con un UAV (dron) y con el satélite Sentinel de la Agencia Espacial Europea. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 40(1), 55-71.

**Sumario.** 1. Introducción. 2. Área de estudio. 3. Material y métodos. 4. Resultados y discusión. 5. Conclusiones. 6. Bibliografía.

### 1. Introducción

El trabajo aquí planteado trata de aprovechar la fuerte inversión de los diferentes países europeos en la observación de la Tierra a través de la Agencia Espacial Europea (ESA) y, contribuir a que este esfuerzo revierta en aplicaciones útiles para la planificación y gestión del territorio. Por ello se utilizan las imágenes del satélite Sentinel para estudiar un pequeño sector situado dentro de un espacio protegido, cerca de la ciudad de Madrid, con fuertes procesos de degradación por acarcavamiento y con la presencia de una importante actividad humana. Se comparan las fotografías aéreas más antiguas de las que disponemos, obtenidas a partir de la página oficial de la comunidad de Madrid ([www.madrid.org](http://www.madrid.org)) y que datan de 1956, con ortofotografías actuales, imágenes de los satélites Landsat, Spot y Sentinel e imágenes obtenidas en un pequeño sector mediante el vuelo programado de un dron (UAV).

La degradación de suelos es un grave problema ambiental en toda Europa, con especial incidencia en las áreas mediterráneas (Ramos et al. 2000; Montanarella, 2007; Romero et al. 2011). El rápido crecimiento de las ciudades afecta a la conservación de los suelos provocando importantes procesos de degradación, entre los que destaca especialmente por su gravedad e incidencia, el sellado del suelo (Jacobson, 2011; Barbero et al. 2013; Chen et al., 2013; Xiao et al., 2013).

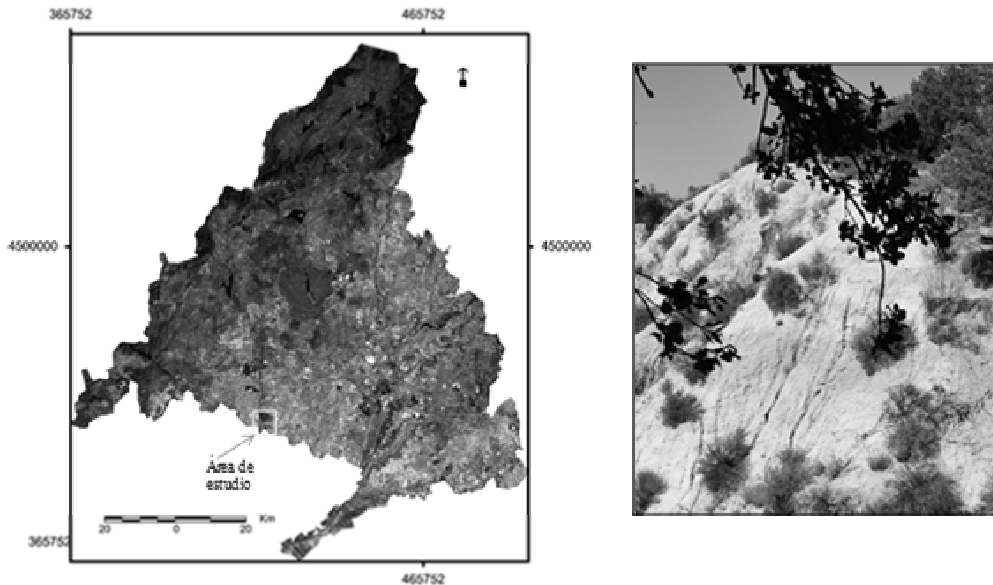
En los estudios de degradación de suelos resultan muy útiles las imágenes de satélite ya que permiten medir el área afectada y analizar la evolución de la misma

(Ridd, 1995; Dwivedi et al. 1997; Mathieu et al. 1997; Zhang et al. 2002; King et al. 2005; Carpintero et al. 2007; García et al. 2007, 2011, 2014, 2016; Alatorre y Beguería, 2009; Liberti et al. 2009; Moeller, 2015; Pérez et al. 2016, 2017).

## 2. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector meridional del Parque Regional del Guadarrama (Fig.1). Este parque se creó en 1999, según Ley 20/1999, de 3 de mayo (B.O.C.M. 24/05/1999), que ha tenido varias modificaciones en años posteriores.

Figura 1. Área de estudio y detalle de una cárcava. Imagen Landsat 8, 5-4-3 (R-V-A) del 16-06-2013 y fotografía del 26-9-2016.



Fuente: Elaboración propia.

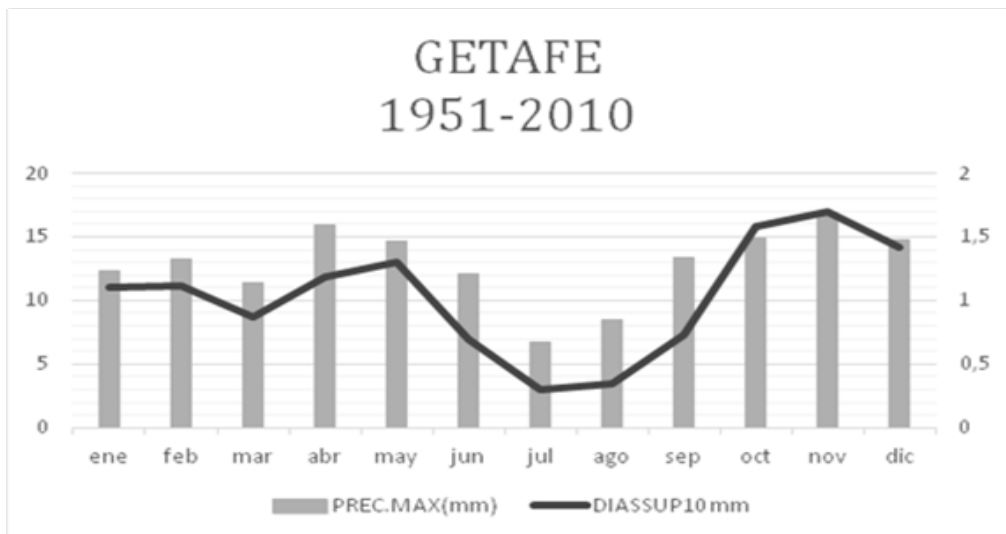
Este sector está muy afectado por la acción del hombre con un importante sellado del suelo que lleva a una marcada degradación del área. Aunque con menor valor ecológico que el norte del Parque Regional, los alrededores del municipio de Batres tienen dos enclaves de gran valor, la Cárcava del Arenal y el Monte de Batres. Este valor se debe tanto a su geomorfología característica, al bosque mediterráneo que sustenta y, especialmente, a la fauna avícola con especies como el águila imperial, el águila perdicera, el águila real, el aguilucho pálido, el milano real, el buitre negro, el halcón peregrino, etc.

La zona estudiada se localiza en el tramo medio del río Guadarrama, que transcurre por sedimentos terciarios constituidos por arenas arcósicas con algunos niveles de

gravas y arcillas, con importantes aportes de ladera y removillización del material por los abanicos laterales,. (Garzón y Alonso, 1996). Los procesos de erosión subsuperficial en las orillas favorecido por su composición arenosa y las intercalaciones de material arcilloso, así como por la eliminación de la protección vegetal favorece la de cárcavas de varias decenas de metros de longitud sobre las que se asientan numerosas urbanizaciones (Sanz et al. 2014).

El clima de este área, según la clasificación climática de Köppen que define el clima a partir de valores medios de precipitación y temperatura (Atlas climático ibérico 1971-2000) es un Csa, clima templado con verano seco y caluroso. Este clima presenta un reparto de las precipitaciones irregular, con máximos equinociales y valores mínimos en verano, y es causa de erosión en nuestro país junto con otros factores como la pendiente, el tipo de suelo y la gestión que se hace de este territorio. Concretamente este tipo de clima esconde precipitaciones máximas de hasta 50 mm en primavera y otoño y valores superiores a 45 mm en tormentas de verano. Los valores medios que muestra el gráfico nos indica que parte de las precipitaciones máximas caen en un corto periodo de tiempo siendo un factor de riesgo en el avance de las cárcavas del área de estudio. Los suelos dominantes son arenosos y regosoles, con alto grado de permeabilidad. Además hay luvisoles, cambisoles y antrosoles. La textura es arenosa, con pH neutros y bajo contenido en materia orgánica (Monturiol y Alcalá, 1990 a; Pérez y García, 2016, 2017). Su capacidad potencial de uso agrícola es baja (Monturiol y Alcalá, 1990 b).

Figura 2. Gráfico de las medias de cincuenta años de precipitaciones máximas en milímetros y días con precipitaciones superiores a 10 milímetros de la estación meteorológica de Getafe.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando la cartografía existente ([www.madrid.org](http://www.madrid.org)) al comparar los mapas de la Comunidad de Madrid sobre áreas urbanizadas se observa que de 1975 a 1980 se extendió la urbanización de Cotorredondo, construyendo incluso en áreas con fuerte desnivel. Se siguió urbanizando ocupando casi todo el Monte de Batres hasta 1991. A partir de esta fecha apenas se ha urbanizado nada más ya que solo quedaban sin sellar pequeñas áreas muy escarpadas. Estas áreas mantienen un bosque estable de encinas que impide el desarrollo y derrumbe de las cárcavas por lo que permite mantener una cierta estabilidad a las viviendas próximas, aún con el peligro que representa la posible movilidad de estas cárcavas. La creación del Parque Regional del Guadarama en 1999 ha incrementado la protección del área, por lo que se ha prohibido la edificación de nuevas urbanizaciones. El núcleo urbanizado más próximo está al sureste y corresponde a la pequeña urbanización de Los Olivos que ya existía en 1975.

Al estudiar la cartografía del área protegida se observan discrepancias entre las distintas fuentes. Así el mapa de usos de suelos de la Comunidad de Madrid que se puede descargar en su servidor cartográfico ([www.madrid.org](http://www.madrid.org)) considera todo el área como un encinar, salvo las orillas del río que tienen vegetación de ribera (si bien en la leyenda la señalan como “vegetación de rivera”). Dejan sin cartografiar las parcelas de cultivos situadas en la orilla del río.

Según la cartografía del Siose que recoge la misma página de la CAMse considera forestal a todo el área arbolada independientemente de que las especies sean frondosas o caducifolias. En unamisma clase incluye el arbolado de encinas y la vegetación higrófila. La urbanización está clasificada como “urbano mixto”.

La información del Siose que se puede descargar en la página del IGN ([www.ign.es](http://www.ign.es)) considera que todo el área corresponde a una “combinación de arbolado, matorral y pastizal” y las parcelas cultivadas las incluye como “cultivos herbáceos”.

En ningún caso, en ninguno de estos mapas se distinguen las áreas acarcavadas con apenas vegetación, ni las pistas forestales. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es hacer una cartografía detallada de estas áreas degradadas utilizando las fuentes disponibles y actualizadas: fotografía aérea, imágenes de los satélites Landsat, Spot y Sentinel e imágenes tomadas con un dron con cámara visible y de infrarrojos próximos. Son especialmente novedad, las imágenes del satélite Sentinel y las del dron.

### **3. Material y métodos**

Se han seleccionado varias imágenes obtenidas por distintas plataformas aeroespaciales y con diferentes resoluciones espaciales y espectrales con el fin de comparar qué información se puede extraer de cada una de ellas. Para su tratamiento se ha utilizado el programa Erdas Imagine 2015.

Tabla 1. Imágenes utilizadas.

<b>Imágenes</b>	<b>Fecha</b>	<b>Resolución espacial y escala</b>	<b>Resolución espectral</b>
Fotografías aéreas	1956	1:25,000	Pancromático
Fotografías aéreas	1961-1967	1:30,000	Pancromático
Imagen PNOA	30/08/2016	0,25 m	Tres canales del visible
Satélite Landsat 8	16/06/2013	15 m 30 m	Pancromático Multiespectral: 7 canales del visible, Infrarrojo cercano, medio y térmico
SatéliteSpot 5	08/08/2013	2,5 m 10 m/20 m	Pancromático Multiespectral: 4 canales del visible, infrarrojo cercano y medio
SatéliteSentinel 2	23/07/2016	10 a 60 m	Trece canales del pancromático visible e infrarrojos próximos y medios
Imagen dron (UAV)	12/03/2015	0,03m	Tres canales: Color natural y multiespectral con canales del visible e infrarrojo próximo
MDT dron	Dic2015	0,06 m	Pancromático

Fuente: Elaboración propia.

La imagen del satélite Sentinel se ha mezclado con la fotografía aérea obtenida del PNOA de forma que la imagen resultante tiene una resolución espacial de 0.25 m y mantiene la resolución espectral de los 13 canales del satélite Sentinel. En esta imagen se ha realizado una clasificación supervisada con la regla de la mínima distancia.

Con el satélite Spot se ha mezclado su imagen multiespectral con la imagen pancromática obteniéndose una nueva imagen que tiene una resolución espacial de 2.5 m y una resolución espectral de cuatro canales.

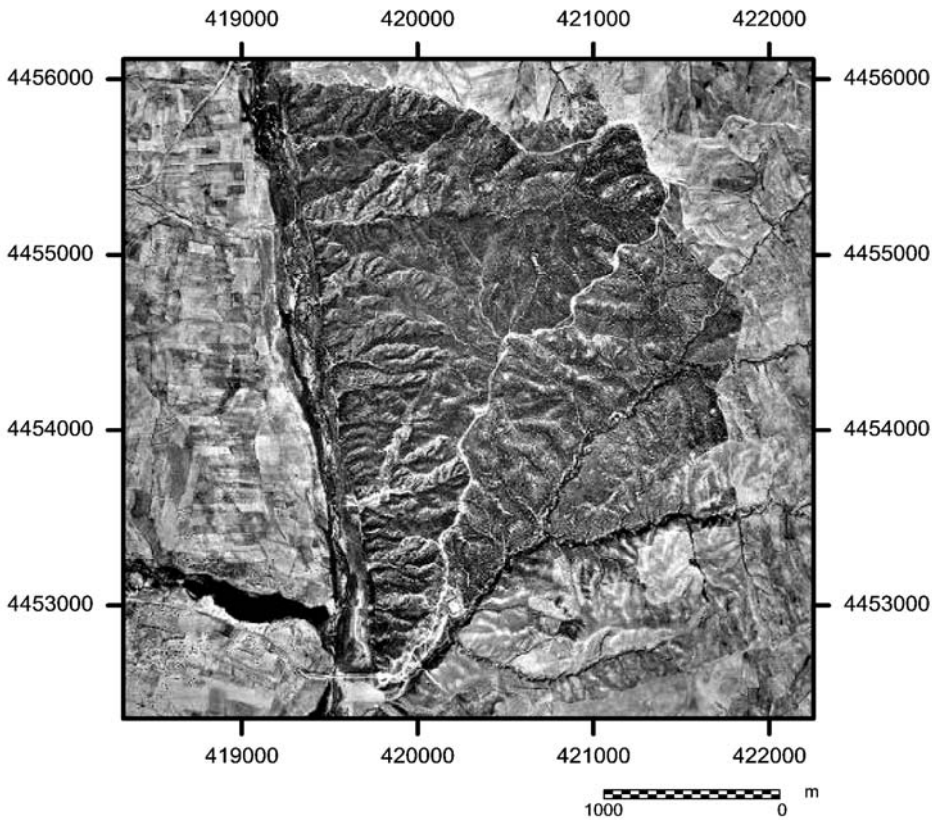
Todas las imágenes se han sometido a distintos tratamientos digitales que incluyen mejoras espaciales, espectrales y radiométricas con el fin de mejorar su visualización. De todas ellas se han seleccionado aquellas que aportan más información y que se detallan en el capítulo de resultados.

#### **4. Resultados y discusión**

Para analizar la evolución y estado de las cárcavas se han seleccionado imágenes de distintas fechas. Comparando la fotografía aérea de 1956 (Fig.3) y las imágenes de

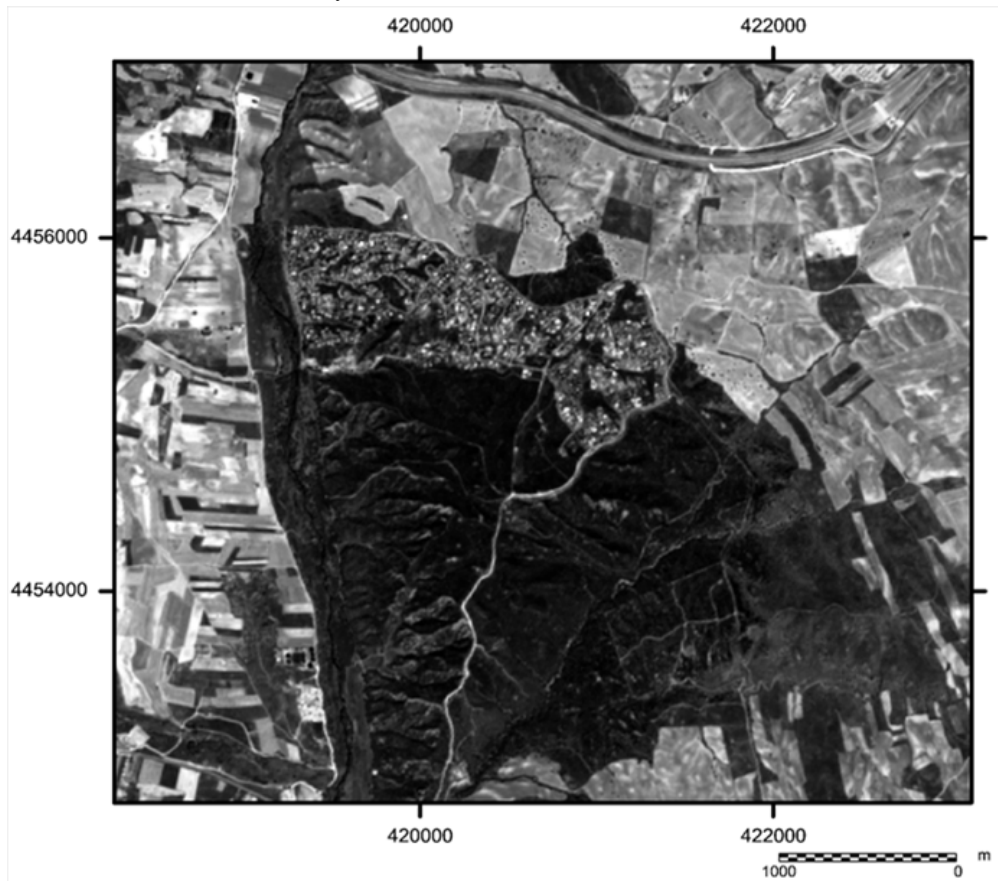
2016, tanto del satélite Sentinel (Fig.4 ) como la ortofoto del PNOA, se observa un incremento en la superficie de las cárcavas, más acusado en el sector comprendido entre el río y la pista forestal. Estas cárcavas tienen una cubierta vegetal muy escasa por lo que al tener una textura muy arenosa los procesos de escorrentía superficial aceleran su desarrollo. Sin embargo, al otro lado de la pista forestal hay un estrato arbóreo de encinas con un sotobosque denso y maduro lo que indica una estabilización de las cárcavas.. Se observa, incluso, un incremento de la masa forestal. Estas diferencias también se observan si se analizan las imágenes de 2013 de los satélites Landsat y Spot, si bien su menor resolución frente al Sentinel hace que la comparación sea menos precisa.

Figura 3. Fotografía aérea de 1956. Se observa un denso bosque de encinas sin ninguna construcción. La acción antrópica solo se refleja en la existencia de pistas forestales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Imagen Sentinel 2 (8-2-3, R-V-A) del 23 de julio de 2016 en la que se aprecia la urbanización de Cotorredondo y numerosas infraestructuras viarias.

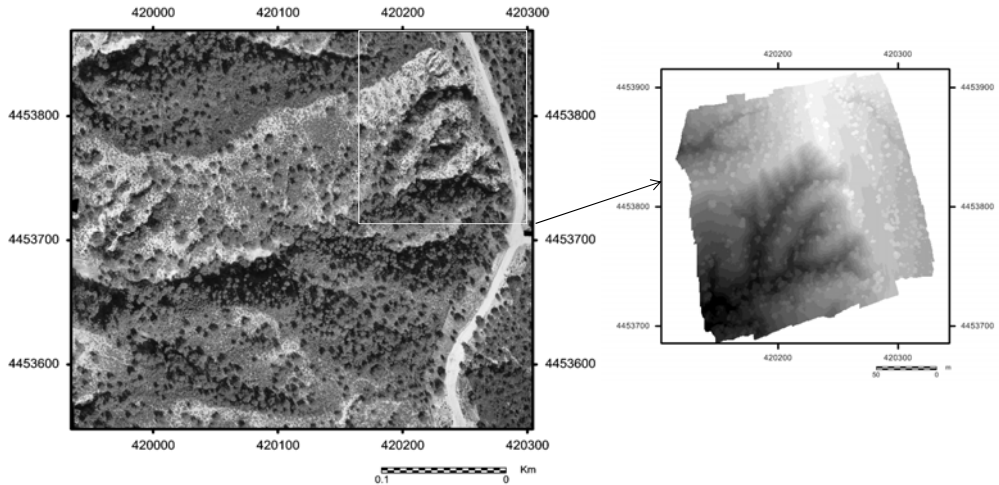


Fuente: Elaboración propia.

La variación entre los años 2013 y 2016 no es apreciable. La profundidad de las cárcavas se observa también en la imagen del Modelo Digital del Terreno obtenido con el dron con unas altitudes que oscilan entre los 577 m en los puntos más bajos y 626 en los más altos (Fig. 5).



Figura 5. Imágenes obtenidas con el dron del área acarcavada :color natural y Modelo digital del terreno.



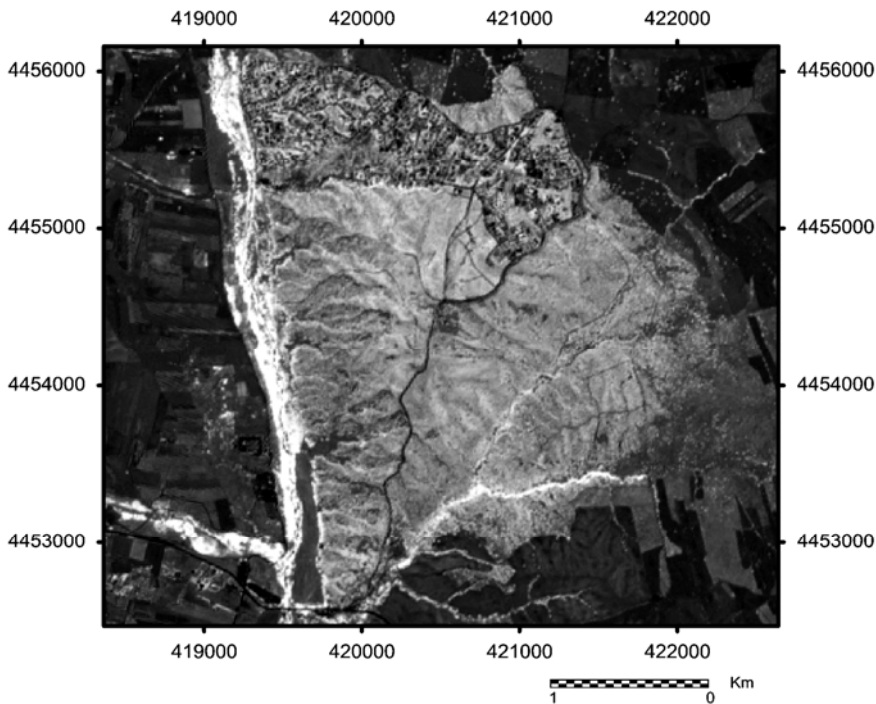
Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de mejorar la cartografía de las áreas degradadas y de los suelos sellados y dado que la imagen del satélite Sentinel es la que muestra una mayor precisión en la detección de las cárcavas, se ha seleccionado para realizar varios tratamientos digitales. Los que ofrecen mejoras más significativas son:

- Mejora espectral mediante combinaciones de bandas: Para diferenciar las áreas con vegetación (natural o cultivos) frente a los suelos urbanizados son muy útiles las combinaciones de bandas 1-6-5, 2-3-8, 1-3-8. También los suelos sellados se distinguen bien en las combinaciones 2-4-8, 5-4-7, 1-6-5, 3-5-10, 4-3-2 y 1-5-8; ésta última facilita la delimitación de las parcelas con jardín dentro de las áreas urbanizadas. Para separar los distintos tipos de vegetación son muy útiles las combinaciones 1-9-12 (discrimina bien los cultivos), 5-6-7 y 4-13-12 (destacan la vegetación asociada a los cursos de agua y las frondosas) y 1-11-8 y 1-5-8 que distinguen muy bien la vegetación con actividad clorofílica muy activa (frondosa y cultivos) de la menos activa (bosque mediterráneo). Para discriminar las áreas erosionadas y con cárcavas profundas es aconsejable utilizar las combinaciones 8-3-2, 8-4-3, 8-2-1, 2-9-12, 2-6-8.
- Análisis mediante componentes principales: se distinguen muy bien las áreas urbanizadas y las pequeñas parcelas de cultivos, pero no se pueden discriminar las áreas más erosionadas.
- Transformación RGB a IHS: se discriminan los pequeños cursos de agua y el patrón espacial de las áreas acarcavadas. Por el contrario en la transformación de IHS a RGB no se diferencian bien los distintos usos.

- Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI). Este índice ha sido utilizado por numerosos autores para distinguir áreas erosionadas sin apenas vegetación de áreas con una cubierta densa (Yengoh et al. 2016). En el área de estudio se distinguen perfectamente las frondosas y, dentro del bosque de encinas, las áreas con arbolado y/o matorral más denso (Fig. 6).

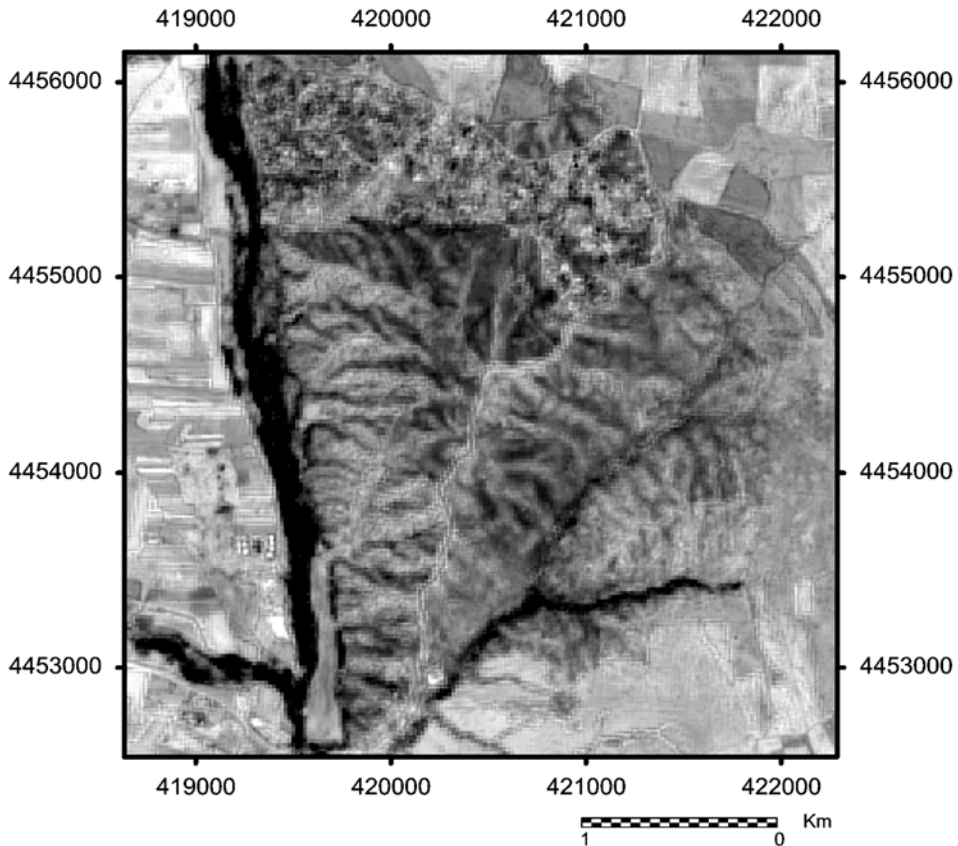
Figura 6. NDVI Imagen Sentinel, 23-07-2016. En tonos blancos la vegetación de frondosas. En tono gris el bosque de encinas. En los tonos más oscuros las áreas construidas y los suelos erosionados.



Fuente: Elaboración propia.

- Índice de Edificación de la Diferencia Normalizada (NDBI). Creado con el fin de discriminar las áreas urbanizadas (Zhaa et al. 2003; Xu 2008; Varshey, 2013) sirve también para identificar áreas con fuerte erosión. En el área estudiada discrimina muy bien el patrón espacial de las áreas acarcavas, incluso mejor que el Modelo Digital del Terreno. Se ven en color blanco las áreas con menos vegetación, más erosionadas (fig. 7).

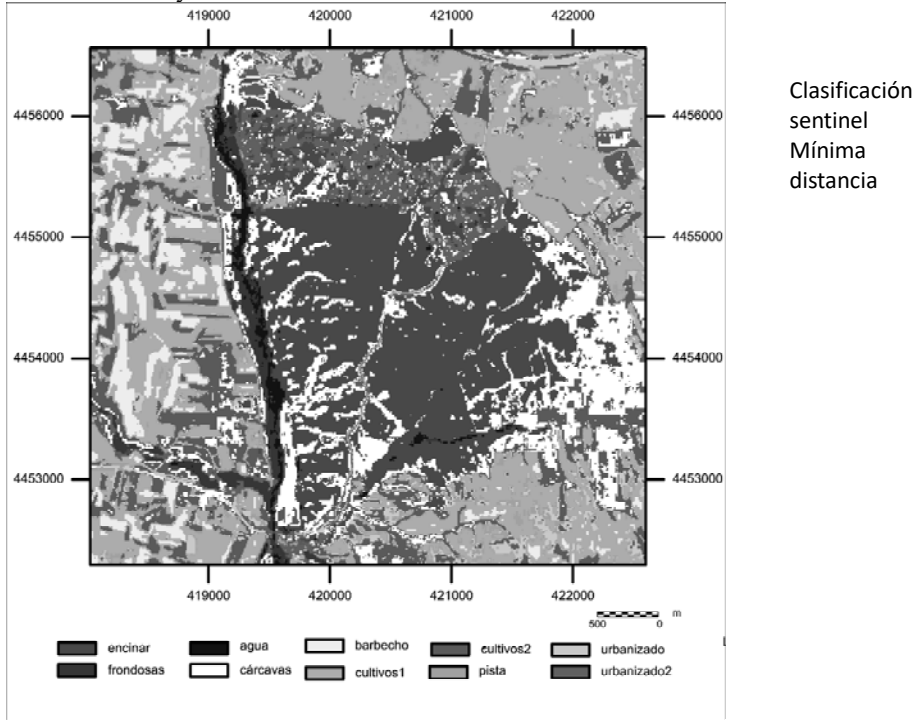
Fig 7. NDBI. Imagen Sentinel, 23-07-2016. En tonos claros los suelos más degradados. Se distingue bien el patrón espacial de las áreas acarcavadas.



Fuente: Elaboración propia.

- Un último tratamiento antes de realizar las clasificaciones ha sido mezclar la imagen del satélite Sentinel con la ortofoto del PNOA. Al mejorar la resolución espacial es mejor la discriminación de los distintos elementos del terreno, resultando muy útiles la combinación de canales 1-11-8 y el índice NDBI<sub>ya</sub> que destaca el patrón espacial de las áreas acarcavadas, frente al NDVI que no diferencia apenas todo el bosque mediterráneo.
- Una vez efectuados los distintos tratamientos de mejora de las imágenes se hizo una clasificación para el total del área estudiada con los satélites Landsat, Spot y Sentinel. De todas ellas la que ofrece un mejor resultado es la obtenida a partir de la imagen del satélite Sentinel debido a su mayor resolución espectral y espacial (Fig.8).

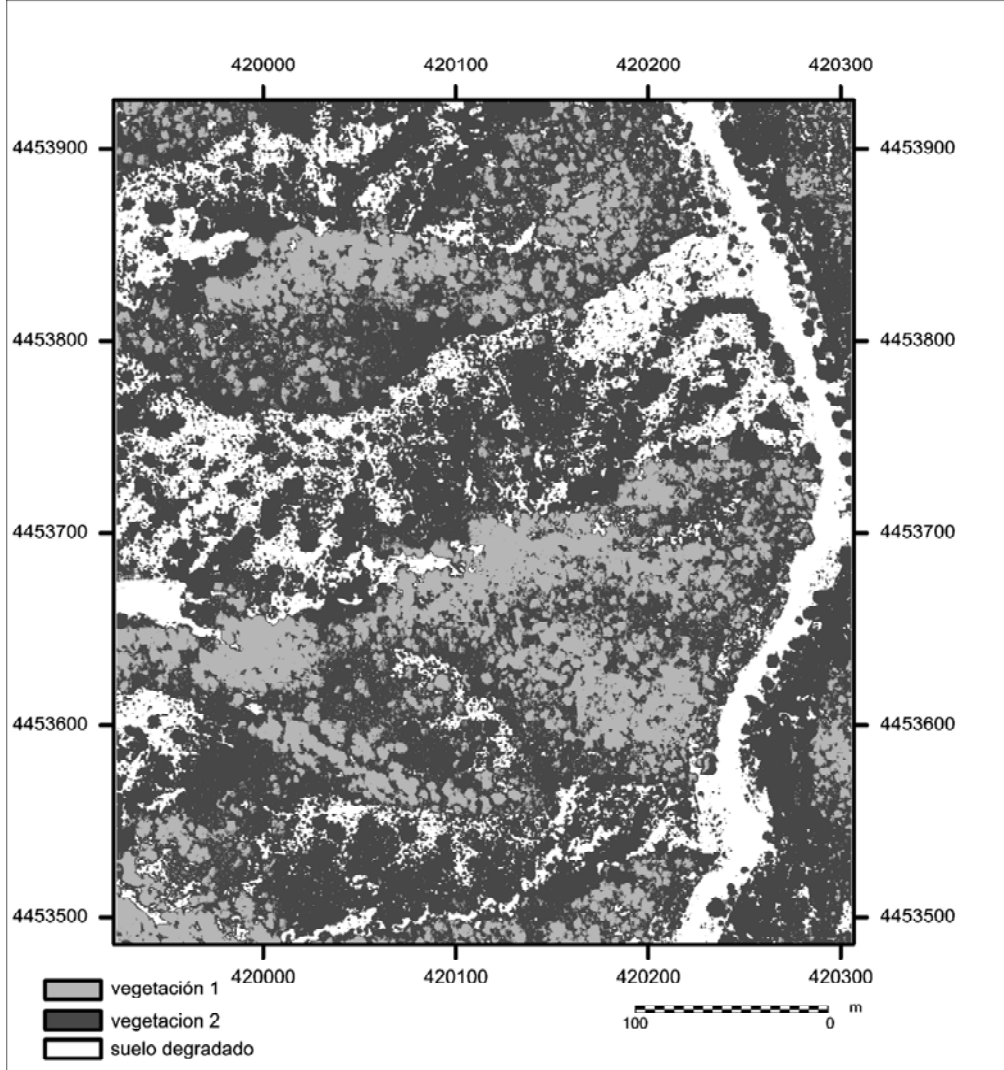
Figura 8. Clasificación de la imagen Sentinel 2, 23 jul, 2016. Resaltan en tonos blancos las áreas acarcavadas y los suelos desnudos.



Fuente: Elaboración propia.

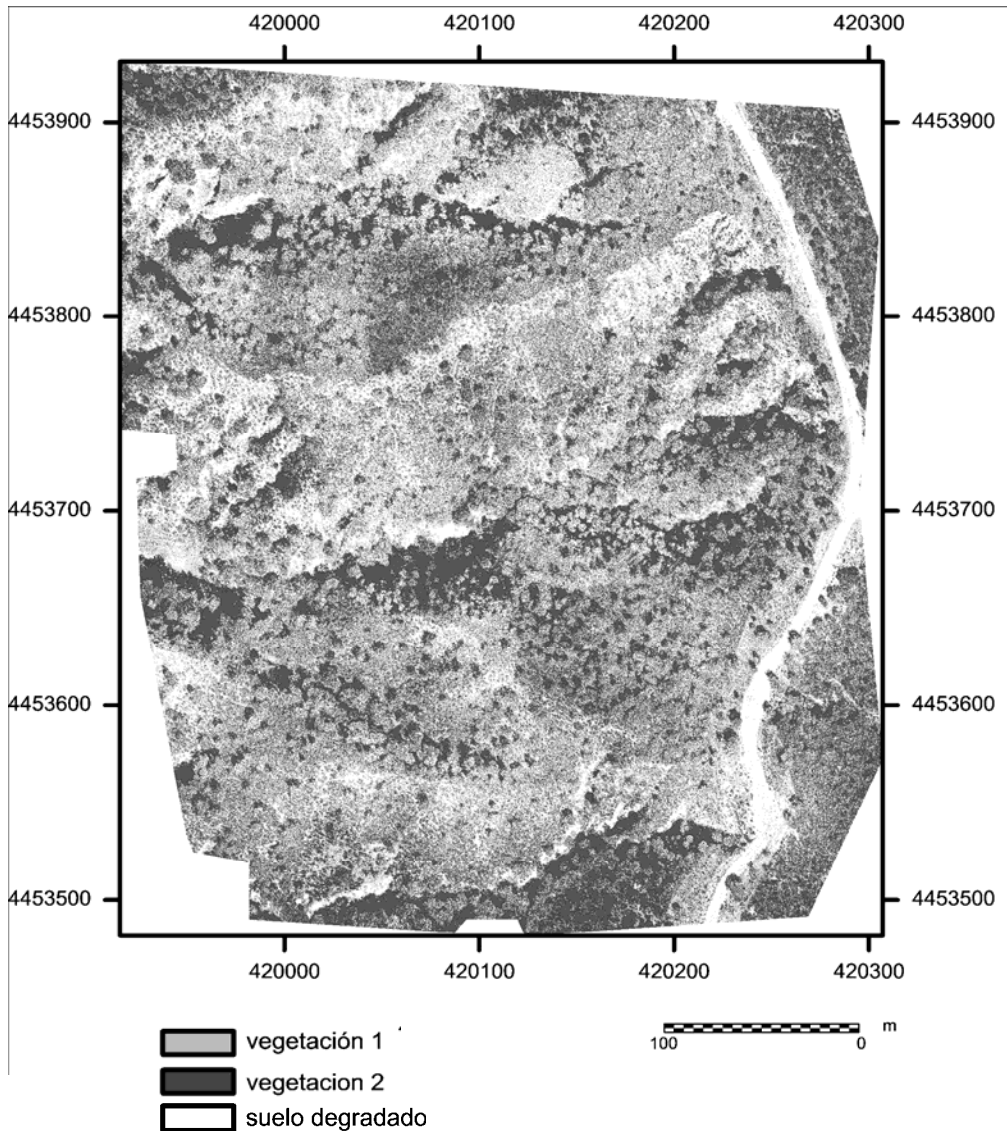
Además se ha seleccionado el área del vuelo del dron realizando una clasificación con la imagen obtenida con el avión y otra con el mismo área recortada de la imagen mezcla del Sentinel y el PNOA (Fig. 9). Las dos clasificaciones dan resultados muy parecidos, si bien el porcentaje de suelo desnudo es algo más alto en la clasificación de la imagen del dron, ya que su mayor resolución espacial permite discriminar pequeñas superficies y contabilizar como suelo desnudo algunas áreas que, en la imagen del satélite, se mezclan con vegetación. Así el porcentaje de suelo desnudo (cárcava y pista) es del 29,47% en la imagen Sentinel-PNOA y del 31,64 en la del dron (Fig.10).

Figura 9. Detalle del área de estudio. Clasificación obtenida a partir de la imagen mezcla del satélite Sentinel 2 y la ortofoto del PNOA.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Clasificación de la imagen obtenida con el vuelo del dron.



Fuente: Elaboración propia, a partir de Pérez y García (2017)

Aunque la precisión del dron sea mayor, sin embargo su menor resolución temporal (dada la imposibilidad de realizar vuelos muy periódicos) hacen que sea aconsejable realizar el seguimiento de las cárcavas con la imagen Sentinel y, siempre que sea posible, con las imágenes del PNOA.

## 5. Conclusiones

El área estudiada está muy afectada por la acción antrópica con un importante sellado del suelo localizándose viviendas incluso en áreas con fuerte desnivel. Se ha urbanizado en zonas actualmente protegidas hasta 1991. Dada la alta permeabilidad de los suelos afectados, arenosos y regosoles, el proceso de sellado conduce a un incremento de la escorrentía superficial, con el riesgo que ello conlleva.

Este área se caracteriza por la marcada degradación de los suelos con importantes procesos de acarreamiento que afectan a la estabilidad de las formaciones vegetales.

Las cárcavas se pueden discriminar tanto visual como digitalmente por su distribución espacial, su grado de erosión y por la falta de cubierta vegetal. Los sectores con erosión activa se han podido clasificar debido a los altos valores espectrales del suelo desnudo.

Del análisis multitemporal realizado con las fotografías aéreas y las imágenes de satélite se deduce un aumento de los suelos erosionados sin apenas vegetación en detrimento de los suelos con cubierta vegetal poco densa. Estos suelos tienen importantes procesos erosivos entre 1956 y 2016. Sin embargo, en las áreas donde ya existía una densa vegetación, tanto arbórea como arbustiva, se observa una estabilización de los sedimentos que mantienen un bosque maduro, denso y estable, que frena la evolución de las cárcavas ralentizando la erosión hídrica.

El satélite Sentinel con su alta resolución espectral y la posibilidad de utilizar distintos intervalos del infrarrojo próximo representa un gran avance para estudiar los procesos de degradación. Discrimina muy bien las áreas con vegetación y, dentro de éstas permite diferenciar los cultivos, las frondosas y las formaciones de bosque mediterráneo de hoja perenne. También resulta muy útil para hacer un seguimiento de la erosión y de la evolución de las cárcavas.

La posibilidad de disponer de cartografía de altísima resolución espacial como son las fotografías del PNOA y su mezcla con las imágenes de satélite permite discriminar unidades pequeñas y por tanto establecer una diferenciación en las áreas urbanizadas en las que la cubierta es mixta al entremezclarse las edificaciones con parcelas ajardinadas. Esta diferenciación era más difícil de precisar con los anteriores satélites de recursos naturales, Landsat y Spot.

Las imágenes obtenidas con un dron tienen aún mayor resolución espacial, pero al tener poca resolución temporal y al sobrevolar superficies muy pequeñas solo resultan útiles para estudios muy locales como el pequeño sector analizado aquí.

Todas estas técnicas se complementan por lo que es aconsejable su uso conjunto.

## 6. Bibliografía

- Alatorre L.C y Beguería S. (2009) Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees. *Catena* 76, 182–190.
- Atlas Climático Ibérico (Temperatura del aire y precipitación 1971-2000). (2011). Departamento de Producción de la Agencia Estatal de Meteorología de España (Área de Climatología y Aplicaciones Operativas) y Departamento de Meteorología e Clima,

- Instituto de Meteorologia de Portugal (Divisão de Observação Meteorológica e Clima). Agencia Estatal de Meteorología Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Instituto de Meteorologia de Portugal. Closas-Orcoyo S. L.
- Barbero, C.; Marques, M.J.; Ruiz, M. (2013). The case of urban sprawl in Spain as an active and irreversible driving force for desertification. *Journal of Arid Environmental*, 90, 95–102.
- Carpintero-Salvo, I.; Chica Olmo, M.; Rigol Sánchez, J.P.; Pardo Iguzquiza, E. and Rodríguez Galiano, V. (2007). Aplicación de imágenes ASTER y ETM+ para el estudio de la susceptibilidad a la erosión en una zona semiárida (SE España). *Revista de Teledetección*, 2, 13-23.
- Chen, L.; Sela, S.; Svoray, T.; Assouline, S. (2013). The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. *Water Resour. Res.* 49, 5585–5599.
- Dwivedi, R.S.; Kumar, A.B. and Tewari, K.N. (1997). The utility of multisensory data for zapping eroded lands. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 2303-2318.
- García Rodríguez, M.P. and Pérez González, M.E. (2007). Changes in soil sealing in Guadalajara: cartography with Landsat images. *Science of Total Environment*, 41. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.048.
- García Rodríguez, M.P. y Pérez González, M.E. (2011). Sellado de fluvisoles en la comunidad de Madrid análisis a partir de imágenes Landsat. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 31, 125-137.
- García, M.P., Pérez, M. E. and Guerra, A. 2014. Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma*, 214-215, 135–140.
- García M.P. and Pérez M. E. (2016). Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain). *Geoderma*, 268, 100-107.
- Glovis. <http://glovis.usgs.gov/>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). <http://www.ign.es/>
- Jacobson, C.R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92, 1438–1448.
- King, C.; Baghdadi, N.; Lecomte, V. and Cerdan, O. (2005). The application of remote sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena*, 62, 79-93.
- Liberti, M.; Simonielle, T.; Carone, M.T.; Coppola, R.; D'emilio, M. and Macchiato, M. (2009). Mapping badland areas using LANDSAT TM/ETM satellite imagery and morphological data. *Geomorphology*, 106, 3-4, 333-343.
- Madrid.org. <http://www.madrid.org>
- Mathieu, R.; King, C. and Bissonnais, Y.L. (1997). Contribution of multi-temporal SPOT data to the mapping of a soil erosion index, the case of the loamy plateaux of northern France. *Soil Technology*, 10, 99-110.
- Moeller, M. Remote Sensing for the Monitoring of Urban Growth Patterns. (2015). Available online:<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/8-W27/moeller.pdf> (accessed on 17 February 2015).
- Montanarella L. (2007). Trends in land degradation in Europe. In: Sivakumar MVK, Ndegwa N, Edit. *Climate and land degradation*. Germany, Springer-Heidelberg, pp. 83-104.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990a). Mapa de asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid. Escala 1:200.000. C.S.I.C., Comunidad de Madrid, 71 pp. Madrid.
- Monturiol, F. y Alcalá, L. (1990b). Mapa de Capacidad Potencial de Uso Agrícola de la Comunidad de Madrid. Escala 1:200.000 C.S.I.C., Comunidad de Madrid pp. 31. Madrid.
- Pérez González, M.E. and García Rodríguez, M.P. (2016). Monitoring Soil Sealing in Guadarrama River Basin, Spain, and Its Potential Impact in Agricultural Areas. *Agriculture*, 6 (1), 7; doi:10.3390/agriculture6010007.
- Pérez, M. E. y García, M.P. (2017). Monitoring soil erosion by raster images: from aerial photographs to drone taken pictures. *European Journal of Geography* 7, 5, 117- 129.



- Ramos, M. C.; Nacci, S. and Pla, I. (2000). Soil Sealing and Its Influence on Erosion Rates for Some Soils in the Mediterranean Area. *Soil Science*, 165-5, 398-403.
- Ridd, M.K. (1995). Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 2165–2185.
- Romero Díaz, A., Belmonte Serrato, F., Docampo Calvo, A.M. & Ruiz Sinoga, J. D. (2011). Consecuencias del sellado de los suelos en el Campo de Cartagena (Murcia). In Gozávez Pérez, V. & Marco Molina, J.A. (Coords.): *Geografía y desafíos territoriales en el siglo XXI*, Vol. 2, 605-616.
- Varshney, A. (2013). Improved NDBI differencing algorithm for built-up regions change detection from remote-sensing data: an automated approach. *Remote Sensing Letters*, 4 (5), 504-512.
- Yengoh, G.T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A.E. and Tucker, C.J. (2016). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales. Springer.
- Xiao, R., Su, S., Zhang, Z., Qi, J., Jiang, D. and Wu, J. (2013). Dynamics of soil sealing and soil landscape patterns under rapid urbanization. *Catena*, 109, 1–12.
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (14), 4269-4276.
- Zhaa, Y., Gaob J., and Nic. S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594. DOI: 10.1080/01431160304987.
- Zhang, Q., Wang, J., Peng, X., Gong, P. and Shi, P. (2002). Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multitemporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (15), 3057–3078.
- Global Land Cover Facility. Available online: <http://www.glcf.umd.edu> (accessed on 10 Sep 2015).