

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES VEGETALES E HIDROGEOMORFOLOGÍA DE CRIPTOHUMEDALES SEMIÁRIDOS MEDITERRÁNEOS MEDIANTE SIG Y LIDAR.

Martínez, J., Carreño, M.F., Palazón, J.A., González, J.C. y Esteve, M.A.

Departamento de Ecología e Hidrología. Universidad de Murcia.

RESUMEN

Se han estudiado once criptohumedales semiáridos mediterráneos localizados en la Región de Murcia mediante el uso de cartografía digital procedente de un vuelo LiDAR de 2008 (Laser Imaging Detection and Ranging) con el fin de caracterizar los humedales en función de sus comunidades vegetales y su hidrogeomorfología. Las comunidades vegetales se han caracterizado mediante técnicas de análisis de imágenes. En el presente trabajo se aplica una nueva metodología basada en la clasificación supervisada de imágenes mediante aleatorización en la selección de las áreas de entrenamiento. La validación de las clasificaciones se ha hecho mediante muestreos de campo. La caracterización de la hidrogeomorfología se ha realizado mediante un estudio de la mesotopografía de los humedales. Se han calculado, mediante SIG, diversos parámetros e índices hidrogeomorfológicos y a su vez se han identificado y caracterizado alteraciones del terreno. Este estudio ha sido financiado por el proyecto I+D N°: CGL2006-08134.

Palabras clave: LiDAR, SIG, humedales, vegetación, hidrogeomorfología.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este estudio trata de evaluar la aplicabilidad de los datos obtenidos mediante un vuelo LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) para el estudio y caracterización de humedales semiáridos mediterráneos localizados en la Región de Murcia (SE España).

Los once humedales objeto de estudio están catalogados como criptohumedales en el Inventario Regional de Zonas Húmedas de la Región de Murcia (Vidal-Abarca et al., 2001) y son: el humedal de Ajauque, Derramadores, Boquera de Tabala, Playa de la Hita, Marina del Carmolí, Lo Poyo, Rasall, Alcanara, Sombrerico, Matalentisco y Cañada Brusca.

Son humedales carentes de lámina de agua libre en la mayor parte de su superficie, que se desarrollan sobre zonas llanas o de escasa pendiente y drenaje difuso, receptoras de escorrentías y descargas laterales y subterráneas, pero topográfica y funcionalmente independientes de la red hidrográfica asociada. Entre sus valores ambientales se encuentran sus comunidades de vegetación halófila (saladares, juncales y estepa salina), la presencia de aves acuáticas invernantes y nidificantes, aves esteparias, invertebrados acuáticos y terrestres, así como de fauna piscícola endémica puntualmente. Su interés paisajístico y los diversos usos tradicionales que en ellos se han ido realizando son también valores que justifican su conservación.

El estudio de las comunidades vegetales en base a análisis de imagen se ha realizado en el humedal de la Marina del Carmolí, mientras que la caracterización hidrogeomorfológica en base al modelo de elevaciones LIDAR se ha aplicado a los once humedales.

En el humedal de la Marina del Carmolí las comunidades vegetales presentes han sido caracterizadas estadísticamente a partir de una representación de las mismas obtenida mediante muestreos de campo sistemáticos con información de presencia y cobertura de especies en el humedal. Posteriormente y mediante técnicas de análisis de imagen han sido cartografiadas las comunidades así obtenidas en toda la superficie del humedal. En el presente trabajo se compara una nueva metodología basada en la clasificación supervisada de imágenes mediante remuestreo (aleatorización en la selección de las áreas de entrenamiento). Se ha realizado a su vez una clasificación no supervisada usando las mismas bandas e índices espectrales.

La caracterización de la hidrogeomorfología se ha realizado mediante un estudio de las altitudes y pendientes de los humedales en base al modelo digital de elevaciones proporcionados por los datos LIDAR.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Establecimiento de las comunidades vegetales

Para la caracterización de las comunidades vegetales del humedal de la marina del Carmolí se ha partido de muestreos de campo de unidades de vegetación de 4 m² georreferenciadas en las cuales se ha medido la cobertura de cada especie vegetal inventariada, así como del suelo desnudo presente. Un total de 550 unidades de muestreo sistemáticamente distribuidas dentro del humedal han sido caracterizadas de esta manera y se han introducido en una base de datos. El análisis estadístico de los datos de campo para establecer comunidades vegetales se ha realizado mediante el software estadístico R (R Development Core Team, 2009) y se ha hecho sobre la matriz de datos de unidades de muestreo y cobertura de especies. Previamente al análisis estadístico y como primer filtrado de los datos se han eliminado las especies presentes en menos del 5% del total de unidades de muestreo, y con ellas las unidades de muestreo en las que aparecen.

Respecto a la clasificación de las comunidades vegetales se ha realizado un análisis clásico combinando técnicas multivariantes. En primer lugar se ha realizado un análisis de correspondencias (AC) (Benzécri et al., 1973) sobre la matriz de coberturas para proceder a nuevo un filtrado de los datos. La matriz de coordenadas de los diez primeros ejes, resultante del análisis AC, se ha sometido a una clasificación no jerárquica en diez grupos por el método de k-means (Lloyd, 1982). Estos grupos a su vez se han clasificado con una técnica de ordenación jerárquica mediante el método de Ward (McQuitty, 1966) en 5 comunidades o clústers.

Para conocer las especies que caracterizan las comunidades obtenidas se ha realizado un análisis IndVal - Dufrene-Legendre Indicator Species Analysis (Dufrene and Legendre, 1997) sobre los datos de abundancia originales en base a la agrupación de las mismas en las 5 comunidades obtenidas. Este análisis calcula el valor indicador de las distintas especies (fidelidad y abundancia relativa) clasificadas en los clusters. Para realizar este análisis en R se ha usado el paquete *labdsv* (Roberts, 2010).

2.2 Análisis de imagen

Las imágenes y el modelo de elevaciones resultantes de la información del vuelo LIDAR usados para las clasificaciones se han obtenido del Servicio de Información e Integración Ambiental (SIGA) de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia (Proyecto NATMUR 08). La pasada del vuelo corresponde a junio de 2008. Todas las capas han sido procesadas y analizadas con el uso de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), mediante el uso del software de distribución libre GRASS GIS 6.4 - Geographic Resources Analysis Support System (GRASS Development Team 2010).

Se han usado las cuatro bandas radiométricas disponibles. Estas se corresponden con los tres colores básicos: rojo (R), verde (G) y azul (B), así como con el infrarrojo cercano (IRC). Las imágenes tienen 2 metros de resolución espacial. Con esta información se han realizado los cálculos para determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), por ser un claro indicador de la actividad fotosintética (Bannari et al, 1995), y se ha usado en el análisis de clasificación junto con las 4 capas citadas. Su cálculo es mediante la ecuación:

$$NDVI = (IRC - R) / (IRC + R)$$

Debido a la presencia en el área de estudio de usos de suelo distintos a los naturales o no ocupados por vegetación, previamente a las clasificaciones de comunidades vegetales se realizó primero una clasificación automática (no supervisada) en base a 20 categorías para diferenciar claramente las categorías que no son comunidades vegetales de las que sí, encontrándose categorías identificadas como cuerpos de agua, infraestructuras y grandes superficies de suelo desnudo, que quedaban bien diferenciadas mediante esta clasificación. Estas categorías se excluyeron de los análisis posteriores de clasificación de vegetación enmascarando los lugares donde se encontraban. Posteriormente se ha realizado otra clasificación no supervisada en el área estrictamente ocupada por comunidades vegetales.

Respecto a la clasificación supervisada se ha realizado una clasificación usando como áreas de entrenamiento aproximadamente el 50% de las unidades de muestreo pertenecientes a cada comunidad vegetal obtenida. Esta selección se ha hecho al azar. El resto de unidades han sido utilizadas para la posterior validación de la clasificación obtenida. Las unidades de muestreo han sido ampliadas a 16 m² para corregir posibles errores de exactitud en su geolocalización mediante GPS en campo. Un total de 217 unidades de muestreo (0,33 ha en total) pertenecientes a cada comunidad vegetal se han utilizado como áreas de entrenamiento y 234 como áreas de validación (0,36 ha). La distribución en las distintas categorías queda resumida en la tabla 1.

Clúster	Comunidad	Áreas de entrenamiento	Áreas de validación
1	Carrizal	37	51
2	Saladar A	16	11
3	Saladar B	102	96
4	Estepa salina	62	76
Total		217	234

Tabla 1. Áreas de entrenamiento y validación usadas para las distintas comunidades contrastadas.

Fuente propia.

Además se ha realizado una clasificación partiendo de las mismas áreas de entrenamiento pero usando una técnica de remuestreo, mediante un algoritmo de aleatorización en la selección de las mismas. La técnica se basa en una forma de remuestreo de tal manera, que se realicen distintas clasificaciones tomando distintas combinaciones de áreas de entrenamiento, y así pueda evaluarse finalmente que conjunto de píxeles pertenecen siempre a una clase y cual es el conjunto de ellos que varían en función de las áreas de entrenamiento utilizadas. La pertenencia a la clase puede medirse como número mayoritario de veces que las distintas clasificaciones coinciden (González Rojas J.C., sin publicar).

El algoritmo de clasificación empleado es el de *máxima verosimilitud*, muy usado en el campo de la teledetección y reconocido por su robustez y ajuste a la disposición original de los datos (Foody, 2004; Chuvieco, 2006), y el cual se encuentra implementado en el entorno del SIG GRASS.

Los resultados de la validación se han analizado mediante el análisis del estadístico Kappa (Congalton, 1991) y el porcentaje de fiabilidad para las comunidades vegetales.

2.3 Análisis de la mesotopografía en base al modelo de elevaciones LIDAR

El sensor LIDAR utilizado en el vuelo es un Leica ALS50-II. Los datos han proporcionado un mapa del modelo digital de elevaciones (MDE) de 4 metros de resolución horizontal, del cual se ha obtenido el mapa de pendientes dentro de los humedales. En ambos mapas se han calculado estadísticos descriptivos para caracterizar y comparar su topografía, así como para identificar y cuantificar la presencia de posibles alteraciones de origen antrópico. Se ha calculado la superficie relativa del rango de pendientes en cada humedal y en base a ésta información se ha realizado un análisis jerárquico en 4 categorías para clasificar los humedales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comunidades vegetales

La tabla 2 recoge la composición específica de las comunidades vegetales resultante del análisis de clasificación jerárquico según el análisis IndVal.

Comunidad	Carrizal	Saladar A	Saladar B	Estepa salina	Mixta
Clúster	1	2	3	4	5
Anuales/alóctonas	0,62%	4,32%	3,55%	85,13%	6,37%
<i>Arthrocnemum glaucum</i>	0,00%	82,34%	4,14%	0,73%	12,79%
<i>Suaeda vera</i>	0,76%	16,15%	50,01%	23,07%	10,01%
<i>Halimione portulacoides</i>	0,80%	15,08%	61,91%	16,74%	5,47%
<i>Sarcocornia fruticosa</i>	0,82%	32,43%	64,15%	2,60%	0,00%
<i>Frankenia corimbosa</i>	0,00%	15,31%	8,11%	76,58%	0,00%
<i>Phragmites australis</i>	86,21%	9,67%	2,44%	1,67%	0,00%
<i>Lygeum spartum</i>	0,88%	0,65%	5,07%	79,90%	13,50%
<i>Juncus maritimus</i>	5,79%	31,93%	9,95%	1,58%	50,76%
<i>Limonium cossonianum</i>	0,14%	1,67%	0,71%	0,49%	96,99%
<i>Plantago crassifolia</i>	0,00%	0,00%	5,60%	94,40%	0,00%
Suelo desnudo	0,81%	43,84%	7,08%	40,04%	8,24%

Fuente propia.

Tabla 2. Resultados del análisis IndVal de la composición de las comunidades obtenidas por clasificación. Las especies en negrita son especies indicadoras a un valor de significación menor de 0.05 y su proporción en negrita es la representativa de la comunidad a la que caracterizan.

Los clústers obtenidos se corresponden con comunidades de carrizal (1), saladares (2 y 3), estepa salina (4) y una comunidad mixta (5). Aparecen dos tipos de saladar, uno con un predominio claro de *Arthrocnemum glaucum* (2 - Saladar A) y otro con predominio de *Sarcocornia fruticosa*, *Suaeda vera* y *Halimione portulacoides* (3 - Saladar B). La comunidad mixta sólo se presenta en 3 unidades de muestreo, por lo que no ha sido tomada en cuenta para el estudio de análisis de imagen posterior.

3.2 Análisis de imagen

Los mapas resultantes de las clasificaciones supervisadas en base a 4 comunidades obtenidas mediante el uso de un único set de áreas de entrenamiento y mediante el método de remuestreo de las mismas, pueden verse en las figuras 1 y 2, respectivamente. En rojo se representa la

comunidad de estepa salina, en amarillo la comunidad de carrizal, en verde la comunidad de saladar A y en azul la comunidad de saladar B. La superficie cuantificada de las tres categorías que no son comunidades vegetales corresponde a 0,78 ha para cuerpos de agua, 12 ha para suelo desnudo y 10 ha para infraestructuras. Estas categorías no aparecen coloreadas en los mapas.

El estadístico kappa es igual a 0,53 y la fiabilidad global del 66% en la clasificación basada en un único set de áreas de entrenamiento.

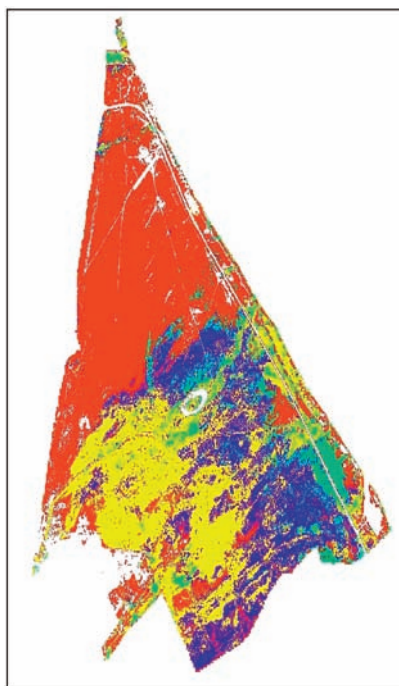
El estadístico kappa es igual a 0,55 y la fiabilidad global del 68% en la clasificación basada en el remuestreo de las áreas de entrenamiento. Estos resultados, siendo bajos, pueden considerarse relativamente buenos debido al gran número de píxeles en relación al pequeño tamaño de las áreas de entrenamiento y validación usadas. Más aún teniendo en cuenta la alta resolución espacial a la que se lleva a cabo la clasificación, lo que aumenta el efecto borde del píxel. La superficie que ocupa cada una de las comunidades en las distintas clasificaciones puede verse en la tabla 3.

Los resultados obtenidos en este estudio de clasificación pueden, a su vez, ser comparados con otro estudio previo de clasificación de comunidades vegetales mediante teledetección, como es el de Carreño et. al 2008, que caracterizó en base a 3 comunidades vegetales el humedal del Carmolí en el año 2001, usando imágenes del satélite Landsat. La superficie del humedal estimada que ocupaba la comunidad de carrizal en ese año era de 64,13 ha, la comunidad de saladar 81,56 ha y la de estepa salina 122 ha. Estos resultados son coherentes con las tendencias de expansión y decrecimiento a la que están sometidas dichas comunidades vegetales según ese mismo estudio, debidas principalmente a cambios en la humedad y salinidad dentro del humedal.

La clasificación automática de las comunidades vegetales se ha hecho en base a 4 categorías. El mapa resultante de la misma puede verse en la figura 3. Las categorías encontradas, representando potencialmente comunidades vegetales, se han comparado con las obtenidas mediante clasificación supervisada mediante el método de remuestreo. Así, en la tabla 4 se puede ver cómo se relacionan ambas clasificaciones según la superficie común que ocupan las clases resultantes.

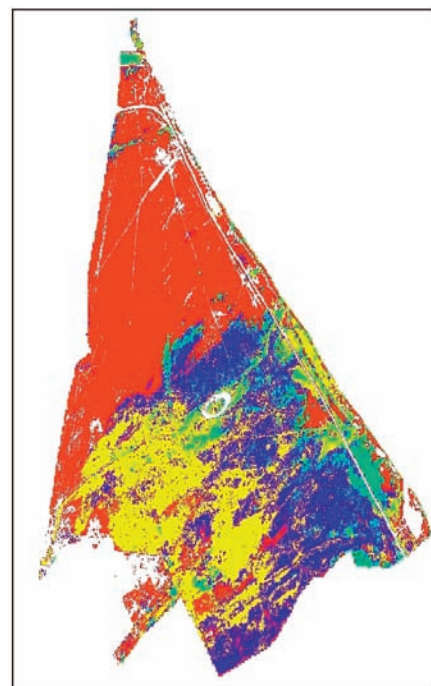
Dos comunidades distintas de estepa salina se ven diferenciadas mediante clasificación automática, mientras que las comunidades de carrizal y saladar B se incluyen conjuntamente en dos categorías distintas.

Figura 3. Mapa resultante de la clasificación no supervisada a 4 clases. En amarillo se representa la clase 1, en verde la clase 2, en azul la clase 3 y en rojo la clase 4.



Fuente propia.

Figura 1. Mapa resultante de la clasificación supervisada obtenida mediante el uso de un único set de áreas de entrenamiento.



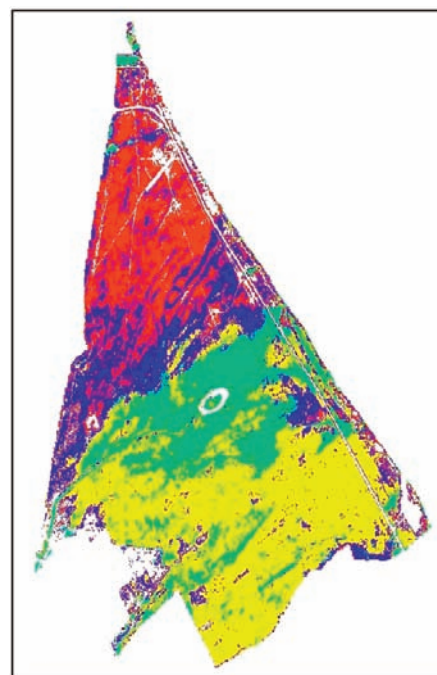
Fuente propia.

Figura 2. Mapa resultante de la clasificación supervisada obtenida mediante remuestreo de las áreas de entrenamiento.

Cluster	Comunidad	Sin remuestreo	Con remuestreo
1	Carrizal	87,15	77,24
2	Saladar A	26,98	25,42
3	Saladar B	59,92	74,27
4	Estepa salina	112,32	109,44

Fuente propia.

Tabla 3. Superficie (ha) ocupada por las distintas comunidades contrastadas mediante clasificación supervisada en base a los dos métodos usados.



Fuente propia.

3.3 Análisis de la mesotopografía en base al modelo de elevaciones LIDAR

Los datos descriptivos de los once humedales objeto de estudio en base al Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y al mapa de pendientes se resumen en las tablas 5 y 6.

La clasificación jerárquica de humedales en base a la superficie relativa que ocupan sus diversas pendientes nos da una idea de la rugosidad del terreno dentro de cada humedal. Los resultados pueden verse en la tabla 7. Se han diferenciado 4 grupos: (1) un humedal costero de origen aluvial con pendientes medias-altas, (2) humedales de interior y costeros con rugosidad alta del terreno, en su mayoría asociados a redes de drenaje tipo rambla; (3) humedales costeros de origen salinero o/y en llanuras aluviales con pendientes bajas y (4) un humedal de interior en una planicie.

Clase no supervisada	Área (ha)	Clase supervisada	Área (ha)
1	116,81	Carrizal	50,72
		Saladar A	8,66
		Saladar B	50,32
		Estepa salina	7,11
2	53,20	Carrizal	25,75
		Saladar A	8,42
		Saladar B	19,03
		Estepa salina	0,00
3	63,90	Carrizal	0,73
		Saladar A	7,62
		Saladar B	4,80
		Estepa salina	50,74
4	52,45	Carrizal	0,04
		Saladar A	0,71
		Saladar B	0,12
		Estepa salina	51,59

Fuente propia.

Tabla 4. Superficie coincidente entre las distintas clases obtenidas mediante clasificación supervisada y no supervisada.

Altitud (m)	Cañada Brusca	Matelentisco	Alcanara	Carmolí	Lo Poyo	Ajaque	Derramadores	Boquera de Tabala	Playa de la Hita	Sombrerico	Rasall
Mínimo	-0,2	0,1	178,9	-0,3	-0,2	89,5	139,2	56,6	0,0	0,1	-0,2
Máximo	18,6	11,2	190,6	9,0	7,8	142,6	169,5	67,7	5,8	3,7	8,4
Rango	18,8	11,1	11,6	9,3	8,0	53,2	30,4	11,1	5,8	3,6	8,6
Media	7,4	4,3	6,5	3,9	1,9	23,3	10,5	3,2	2,1	1,5	1,5
Desviación estándar	3,8	1,4	2,7	1,4	1,2	8,5	4,8	2,4	1,2	0,5	1,1
Varianza	14,4	2,0	7,5	1,9	1,4	72,9	22,8	5,7	1,4	0,3	1,1
Coefficiente de variación	52%	33%	42%	35%	62%	37%	45%	75%	55%	34%	71%

Fuente propia.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de los humedales en base al MDE.

Pendiente (grados)	Cañada Brusca	Matelentisco	Alcanara	Carmolí	Lo Poyo	Ajaque	Derramadores	Boquera de Tabala	Playa de la Hita	Sombrerico	Rasall
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Máximo	40,0	32,7	16,5	24,3	26,6	45,4	30,7	32,4	12,5	11,0	21,9
Rango	40,0	32,7	16,5	24,3	26,6	45,4	30,7	32,4	12,5	10,9	21,9
Media	3,0	3,4	0,5	1,0	1,8	2,9	3,0	2,7	1,6	2,4	2,3
Desviación estándar	3,8	3,0	0,6	1,1	1,9	3,2	3,4	3,4	1,3	1,8	2,8
Varianza	14,2	8,8	0,4	1,3	3,5	10,3	11,6	11,6	1,8	3,3	7,6
Coefficiente de variación	125 %	89 %	126 %	114 %	103 %	112 %	114 %	127 %	82 %	75 %	121%

Fuente propia.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de los humedales en base al mapa de pendientes.

Humedales	Categoría HGM
Carmolí	1
Derramadores, Ajauque, Boquera, Sombrerico, Matalentisco, Cañada Brusca	2
Playa de la Hita, Lo Poyo, Rasall	3
Alcanara	4

Fuente propia.

Tabla 7. Resultados de la clasificación de los humedales en base al análisis de sus pendientes.

El humedal del Carmolí, aún teniendo el mismo origen y localización que la mayoría de humedales de la clase 3, se ve clasificado como un tipo aparte debido a que ha sufrido alteraciones en su topografía de origen antrópico, como son canalizaciones e infraestructuras. En el caso de los humedales de la clase 2 la presencia de pendientes elevadas responde más a la rugosidad natural del terreno debido a ramblas asociadas o a la morfología general de la zona donde se encuentran. El humedal de la Alcanara se encuentra en un amplio valle aluvial y su morfología es claramente distinta del resto de humedales de interior y costeros.

4. CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite identificar con gran fiabilidad y a gran resolución espacial distintas comunidades vegetales de humedales semiáridos definidas objetivamente. A su vez, permite estudiar y caracterizar parámetros de su topografía. Esto permite la caracterización y el estudio detallado de dichos ecosistemas en base a sus comunidades vegetales e hidrogeomorfología partiendo de muestreos de campo y cartografía digital LIDAR. Por otra parte, esta metodología se basa en el uso de capas espaciales de dominio público y de programas informáticos de código abierto y distribución gratuita, lo que la hace especialmente apta para ser usada en el estudio y gestión de estos espacios naturales por parte de administraciones públicas y privadas.

Al seleccionar aleatoriamente subconjuntos de las áreas de entrenamiento el remuestreo disminuye la incertidumbre en la clasificación debida a unidades de muestreo mal georreferenciadas, por lo que aumenta ligeramente la fiabilidad global y el valor kappa de la clasificación super-visitada.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Bannari, A., D. Morin, F. Bonn y A. Huete (1995): "A review of vegetation indices", *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, 95-120.
- Benzécri, J. P. (1973): *L'analyse des données*, Paris-Bruxelles-Montréal, Dunod.
- Carreño, M.F., M.A. Esteve, J. Martínez, J.A. Palazón y M.T. Pardo (2008): "Habitat changes in coastal wetlands associated to hydrological changes in the watershed", *Estuarine. Coastal Shelf Science*, vol. 77, 475-483.
- Chuvieco, E. (2006): *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*, Barcelona, Ariel.
- Congalton, R. (1991): "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 37, 35-46.
- Dufrene, M. y P. Legendre (1997): "Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach", *Ecol. Monogr.*, vol. 67, nº 3, 345-366.
- Foody, G. (2004): "Sub-Pixel Methods in Remote Sensing", en *Remote Sensing Image Analysis*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- González Rojas J.C. (2011): *Propuesta de un método eficiente y de bajo coste para la elaboración de mapas de cultivos mediante imágenes Landsat - El caso de los cítricos en la Región de Murcia (SE España)*. Tesis doctoral en elaboración, Universidad de Murcia.
- GRASS Development Team (2010): *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 6.4.0*. Open Source Geospatial Foundation, <http://grass.osgeo.org>
- Lloyd, S. P. (1982): "Least squares quantization in PCM", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, 128-137.
- McQuitty, L.L. (1966): "Similarity Analysis by Reciprocal Pairs for Discrete and Continuous Data", *Educational and Psychological Measurement*, vol. 26, 825-831.
- R Development Core Team (2009): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org>
- Roberts, D. W. (2010): *labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology*. R package version 1.4-1, <http://CRAN.R-project.org/package=labdsv>
- Vidal-Abarca, M. R., M. A. Esteve y M. L. Suarez (2001): *Revisión y actualización del Inventario Regional de Zonas Húmedas*. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, Murcia.