

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES QUE OFRECEN LANDSAT Y DEIMOS PARA OPTIMIZAR EL MANEJO DEL RIEGO EN PARCELAS

Autor: Ofelia Eito Mirasol

***Director: M^a Auxiliadora Casterad Seral(CITA)
Ángel Pueyo Campos (UZ)***

**Máster Universitario en
Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Diciembre de 2013



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

Investigadores del Grupo de investigación Riego Agronomía y Medio Ambiente quieren incorporar la teledetección como fuente de datos en sus ensayos agronómicos de riego, para dar apoyo y seguimiento al manejo de riego en parcelas. A petición de dichos investigadores se estudian las posibilidades de utilización de imágenes Landsat y Deimos para la detección de variabilidad, dentro de una parcela, asociada a las prácticas de riego. Se determina la variabilidad espacio-temporal del desarrollo de los cultivos y de su temperatura analizando su relación con el riego. Para ello, en tres parcelas con diferente tipo de riego por aspersión se obtienen los índices espectrales NDVI, GNDVI y NDWI para los años 2011, 2012 y 2013; se analiza su variabilidad espacio-temporal; y se relacionan, cuando están disponibles, con datos de producción del cultivo y del suelo. En otras dos parcelas en la que se disponen de medidas de temperatura del aire y de la cubierta tomadas durante el riego, se analiza la relación entre dichas temperaturas y los niveles digitales de la banda térmica de Landsat para algunas imágenes de 2010 y 2011. Se constata la limitación en el estudio de la resolución espacial y temporal de las imágenes en unas parcelas en las que la uniformidad de riego es alta. La variabilidad de desarrollo del cultivo detectada se debe más a la influencia del suelo que al riego. Sería aconsejable realizar el estudio en parcelas con baja uniformidad de riego. En cuanto a la temperatura, se detecta concordancia entre las variaciones de los niveles digitales y la temperatura de la cubierta vegetal, y una sensibilidad adecuada a los cambios de temperatura de la banda térmica utilizada. A la vista de los resultados, se recomienda para los fines perseguidos por los investigadores utilizar imágenes de mayor resolución espacial, adquiridas cuando el cultivo todavía no ha alcanzado su máximo desarrollo, así como utilizar vecino más próximo en la asignación de valores a los píxeles cuando se realizan operaciones de corrección geométrica y remuestreo.

Palabras Clave: *teledetección, agricultura de precisión, índices espectrales, riego.*

Abstract

Members of the Research Group for Irrigation Agronomy and Environment want to incorporate remote sensing as a data source in their agronomic irrigation test in order to support and monitor the irrigation management plots. At the request of such researchers the possibilities of using Landsat and Deimos images to detect variability within a plot, linked to irrigation practices, are being studied. The spatial temporal variability of crop development and its temperature is being determined by the analyzing of their relationship to irrigation. To this end, in three plots with different kinds of sprinkler irrigation, the spectral indices NDVI, GNDVI and NDWI in the years 2011, 2012 and 2013 are obtained; their spatial temporal variability is analysed, and relate, when available, with crop production and soil data. In two other plots provided with air and deck temperature measurements taken during irrigation, the relationship between these temperatures and digital levels of Landsat thermal bandare analysed for some images of 2010 and 2011. The limitation in the study of spatial and temporal resolution of the images in plots with high irrigation uniformity is confirmed. The crop growing variability detected is due ,by far, to the influence of soil, rather than that of irrigation. It would be advisable to conduct the study in plots with low irrigation uniformity. Regarding temperature an agreement is detected between the variation of digital level and the temperature of the vegetal cover, and a correct sensitivity to temperatura changes of the thermal band used. In view of the results, it is recommended for the purpose aimed by the researchers, to use high spatial resolution images, acquired when the crop has not yet reached its peak, and to use the. nearest neighbor in assigning values to pixels when operations of geometric correction and resampling are performed.

Key Words: *remote sensing, precision agriculture, spectral index, irrigation.*

Índice

1. Introducción	pág.1
1.1. Objetivos.....	pág.2
2. Enclave geográfico.....	pág.3
2.1. Localización de las parcelas de estudio	pág.3
2.2. Geología.....	pág.5
2.3. Climatología.....	pág.5
2.4. Cultivos.....	pág.8
3. Fuentes de información	pág.9
3.1. Materiales.....	pág.9
3.2. Software utilizado.....	pág.10
4. Metodología	pág.11
4.1. Generación de cartografía.....	pág.11
4.1.1 Parcelario.	pág.11
4.1.2 Generación de mapas de rendimiento.	pág.12
4.1.3 Mapa de capacidad de retención de agua disponible.....	pág.12
4.2 Extracción de información de las imágenes	pág.13
4.2.1. Selección de imágenes	pág.13
4.2.2. Pretratamientos de las imágenes	pág.18
4.2.3. Obtención de índices espectrales	pág.21
4.2.4. Variabilidad intraparcelar.....	pág.22
4.3 Comparación de información agronómica de los ensayos con información derivada de las imágenes	pág.24
4.3.1. Rendimiento	pág.24
4.3.2. CRAD	pág.24
4.3.3. Temperatura.....	pág.24
5. Resultados.....	pág.25
5.1. Variabilidad espacio-temporal del desarrollo de los cultivos y su relación con el riego	pág.25
5.1.1.Pívor.....	pág.25
5.1.2. Ranger.....	pág.30
5.1.3.Cobertura fija.....	pág.34
5.2. Variabilidad espacio-temporal de la temperatura y su relación con el riego	pág.37
6. Conclusiones y recomendaciones.....	pág.41
7. Referencias consultadas:	pág.43

Índice de figuras

Fig. 1. Localización de las parcelas para el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la temperatura	pág. 3
Fig. 2. Localización de las parcelas para el estudio de la variabilidad espacio-temporal del desarrollo de cultivo	pág. 4
Fig. 3. Climogramas de la estación meteorológica de Tardienta para el periodo enero 2011-agosto 2013.....	pág. 6
Fig. 4. Climogramas de la estación meteorológica de Montañana para 2010 y 2011	pág. 7
Fig. 5. Ejemplo de modificaciones en el parcelario	pág. 11
Fig. 6. Ubicación en la parcela con cobertura fija de los puntos de muestreo para el análisis gravimétrico.....	pág. 13
Fig. 7. Imágenes disponibles para el año 2011	pág. 14
Fig. 8. Imágenes disponibles para el año 2012	pág. 15
Fig. 9. Imágenes disponibles para el año 2013	pág. 16
Fig. 10. Histograma banda 1 de la imagen del 1 de Junio 2013 de Landsat 8	pág. 19
Fig. 11. Modelo utilizado para la corrección radiométrica de Landsat 8	pág. 19
Fig. 12. Rasterización de parcelas y eliminación de bordes.....	pág. 23
Fig. 13. Evolución de los índices espectrales en el pívot de maíz.....	pág. 26
Fig. 14. Cartografía de los índices de vegetación en el pívot.....	pág. 27
Fig. 15. Rendimientos en el pívot de maíz	pág. 28
Fig. 16. Relación entre índices de vegetación y el rendimiento de maíz	pág. 29
Fig. 17. Localización de los píxeles del pívot con menor rendimiento y bajos valores de NDVI	pág. 29
Fig. 18. Evolución de los índices espectrales en el ranger	pág. 31
Fig. 19. Cartografía de los índices de vegetación en el ranger	pág. 32
Fig. 20. Rendimiento de la cebada en el ranger	pág. 33
Fig. 21. Relación entre índices de vegetación y el rendimiento de la cebada para la muestra de píxeles del ranger	pág. 33

Fig. 22. Localización de los píxeles del ranger con menor rendimiento y bajos valores de NDVI	pág. 34
Fig. 23. Evolución de los índices en la cobertura fija	pág. 35
Fig. 24. Cartografía de los índices de vegetación en la cobertura fija	pág. 36
Fig. 25. Capacidad de retención de agua disponible en el suelo el año 2011, en la cobertura fija	pág. 37
Fig. 26. Evolución de la temperatura media de la cubierta vegetal y del aire en las parcelas lisimétricas a la hora de paso del satélite	pág. 38
Fig. 27. Niveles digitales de la banda térmica de Landsat 5 en las parcelas lisimétricas	pág. 40

Índice de tablas

Tabla 1. Cultivos por parcela y año de estudio	pág. 8
Tabla 2. Imágenes utilizadas para el estudio	pág. 16
Tabla 3. Fechas de riego en parcelas lisimétricas a la hora de paso de Landsat TM, indicando coincidencias de disponibilidad de imagen	pág. 17
Tabla 4. Características y tratamientos de las imágenes	pág. 20
Tabla 5. Comparación de las temperaturas (°C) entre las parcelas lisimétricas y con los niveles digitales de la banda térmica del satélite Landsat (ND TM6) al paso del satélite (Tiempo Universal Coordinado)....	pág. 39

1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura, la búsqueda constante de un aumento de la producción y el rendimiento generó la modernización de las prácticas agrícolas. La integración de sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS) en la maquinaria agrícola y el uso de la teledetección y los Sistemas de Información geográfica (SIG), supuso la creación de una nueva forma de agricultura, llamada Agricultura de Precisión (AP), la cual permite detectar y manejar la variabilidad espacial para aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental (Casterad, 2010).

La implantación de posicionamiento global por satélite en la maquinaria permite la obtención y uso de datos localizados en el terreno, no sólo en el momento de la cosecha sino también a lo largo del ciclo fenológico del cultivo (como puede ser la siembra, el riego, abonado...), para la optimización de la producción y si a ello le añadimos el uso de la Teledetección que proporciona una cobertura global, exhaustiva, sinóptica y repetitiva de la superficie terrestre; una gran homogeneidad en la toma de datos; la posibilidad de obtenerlos en regiones no visibles de espectro; y la disponibilidad de los mismos en formato digital (Chuvieco 2010), tenemos a nuestra disposición gran cantidad de información de utilidad para analizar y poder estudiar las causas de la variabilidad en campo.

El regadío, según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, aporta más de la mitad de la producción agraria, pero el hecho de que el agua sea un bien escaso hace que se empiece a trabajar conjuntamente con la teledetección la gestión de los regadíos, pudiendo mejorar los aprovechamientos mediante el seguimiento de superficies regadas, permitiendo la detección de anomalías y así poder planificar estrategias de uso ayudando a la mejora de la productividad.

El presente estudio, realizado como Trabajo Final de Máster en el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria bajo la dirección de Dra. M^a Auxiliadora Casterad, investigadora de la Unidad de Suelos y Riegos del centro, se realiza a petición de investigadores del Grupo de investigación Riego Agronomía y Medio Ambiente (RAMA), grupo reconocido por el Gobierno de Aragón, que quieren incorporar la teledetección como fuente de datos en sus ensayos agronómicos de riego, para dar apoyo y seguimiento al manejo de riego en parcelas. Para esto, se plantea un estudio exploratorio utilizando las imágenes de media resolución espacial disponibles libremente (abiertamente, sin gasto alguno) en el Plan Nacional de Teledetección (PNT) o en otros servidores, e información recabada en algunos de sus ensayos agronómicos desarrollados en el periodo 2010-2013, analizando la utilidad que pueden tener dichas imágenes en aplicaciones orientadas al regadío dentro de dos líneas de trabajo: variabilidad espacio-temporal de la evolución de los cultivos y variabilidad espacio-temporal de la temperatura.

1.1. Objetivos

- **Objetivos académicos**

- 1.Desarrollar y profundizar los conceptos teóricos adquiridos en los diferentes módulos del curso académico y poder llevarlos a la práctica para conseguir unos fines específicos.*
- 2.Colaborar en un equipo multidisciplinar y asimilar las rutinas dentro de un equipo de investigación.*
- 3.Familiarizarse y conocer procedimientos, protocolos, equipamiento y software relacionado con tecnologías de información geográfica aplicadas en los proyectos en los que se participa.*

- **Objetivos en relación a la demanda realizada**

- 1.Ver las posibilidades de utilización de imágenes Landsat y Deimos para la detección de variabilidad, dentro de una parcela, asociada a las prácticas de riego.*
- 2. Determinar la variabilidad espacio-temporal del desarrollo de los cultivos y su relación con el riego.*
- 3. Determinar la variabilidad espacio-temporal de la temperatura de la cubierta vegetal y su relación con el riego.*

Para llevar a cabo dichos objetivos se van a utilizar parcelas de estudio e información del proyecto Riego por aspersión: aplicación del agua, agronomía y flujos de retorno (AGL2010-21681-C03-01). Concretamente se han seleccionado tres parcelas con diferente tipo de riego por aspersión que servirán para llevar a cabo los objetivos 1 y 2 en relación a la demanda realizada y dos parcelas en las que se tiene información sobre la variación de la temperatura en el momento del riego, parcelas que se utilizarán para desarrollar los objetivo 1 y 3 en relación a la demanda realizada.

2. ENCLAVE GEOGRÁFICO

2.1. Localización de las parcelas de estudio

Las parcelas elegidas para el estudio de la variabilidad espacio temporal del desarrollo del cultivo han sido un pívot de 17 ha y un ranger de 95 ha, de la Finca “San Pedro” en el término municipal de Lupiñén-Ortilla; y una parcela de regadío (transformada en 2009 de riego por inundación a riego por aspersión bajo cobertura fija) de 36 ha perteneciente a EACRA (Explotación Agrícola de Riegos de Almudevar) y localizada en el Polígono de riego “La Violada”, término municipal de Almudevar. Ambos términos municipales pertenecen a la comarca de la Hoya de Huesca, provincia de Huesca.

Las parcelas elegidas para el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la temperatura son dos parcelas lisimétricas bajo riego por aspersión (cobertura fija) localizadas en la Finca “Soto Lezcano” en Montañana, término municipal de Zaragoza, provincia de Zaragoza. La superficie total de dichas parcelas es de 2 ha.

En las Figuras 1 y 2 se presenta la localización de dichas parcelas

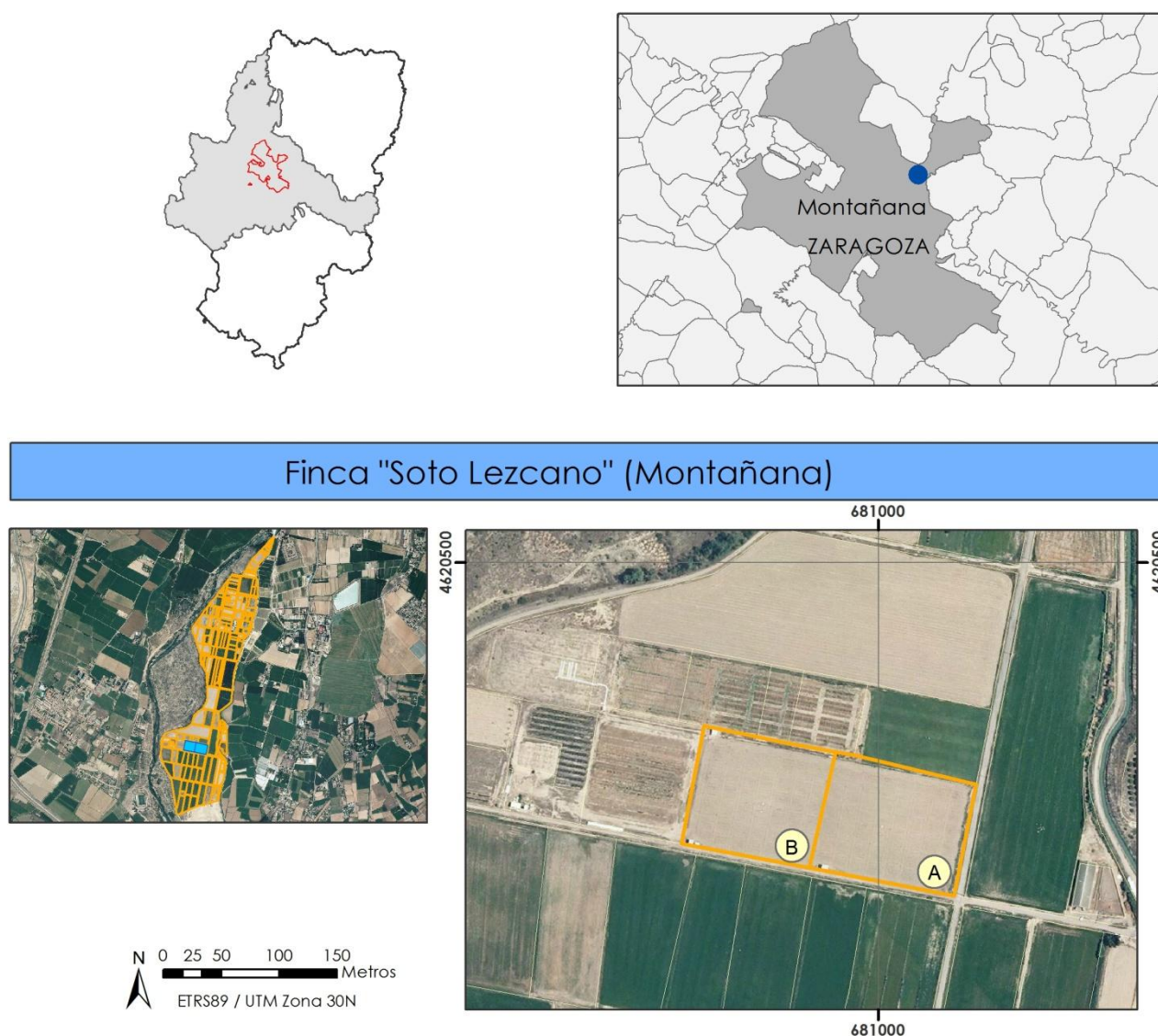
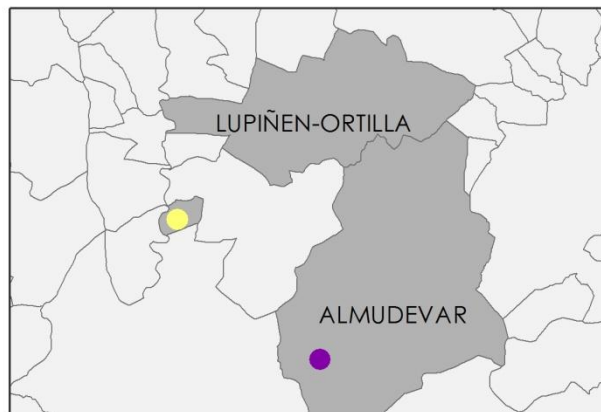
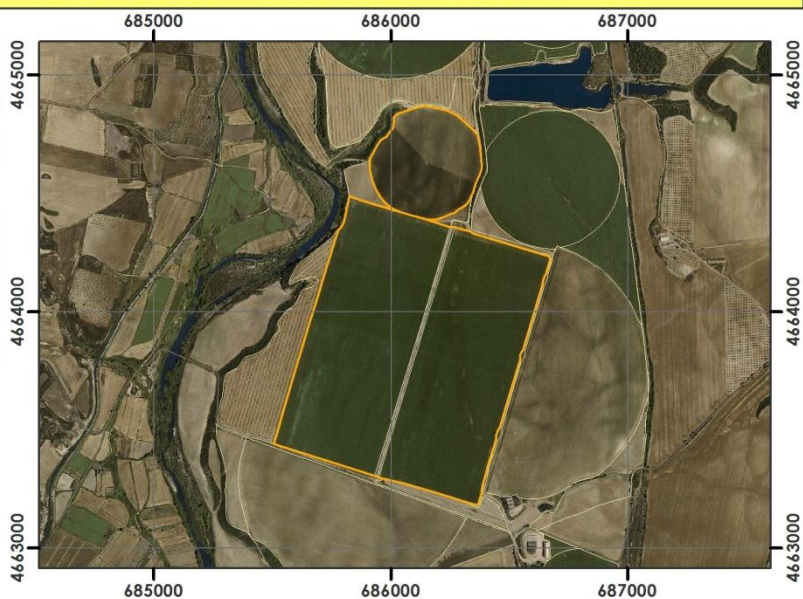


Figura 1. Localización de las parcelas para el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la temperatura, sobre ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2009.



Parcelas de la Finca "San Pedro" (Lupiñen-Ortilla)



Parcela en Polígono de Riego "La Violada" (Almudevar)



Figura 2. Localización de las parcelas para el estudio de la variabilidad espacio-temporal del desarrollo del cultivo, sobre ortofoto del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 2006.

2.2. Geología

Para la caracterización geológica de las parcelas de estudio se toma como fuente el Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja 285 para la finca "San Pedro" y para el polígono de riego "La Violada"; y la hoja 355 para la finca "Soto Lezcano".

▪ Finca San Pedro

Ubicada en las terrazas del Gállego, predominan conglomerados de bloques, cantos y gravas bien redondeados de procedencia pirenaica, con algunos niveles de arenas y limos y cemento calcáreo. Los bloques, cantos y gravas son de composición ígnea y metamórfica. En las parcelas de estudio la pedregosidad es relevante superando el 20% de pedregosidad media.

▪ Polígono de riego "La Violada"

En la zona donde se ubica la parcela de estudio dominan depósitos ligados al lavado de las vertientes y acumulación en fondos de valles y pies de ladera y coluviones, que tienen una composición limo-arcillosa con algún nivel de gravas y algo de arena.

Los suelos son muy profundos, bien drenados, de textura fina, con pocos elementos gruesos, con capacidad de retención de agua de 245mm y con pendientes suaves entre 2 y 5% (Jiménez, 2013).

▪ Finca Soto Lezcano

Situada también en las terrazas de río Gállego, presenta conglomerados con cantos redondeados de cuarcitas, calizas y cantos bastantes alterados de granito. La matriz es arenosa y limosa. Los depósitos que suelen aparecer son fundamentalmente arenas, limos e hiladas de cantos de origen pirenaico. Concretamente el suelo de las parcelas de estudio se clasifica según Soil Taxonomy System (Soil Survey Staff, 1999) como Typic Xerofluvent, limo arenoso, mixto (calcáreo) y régimen mésico (Martínez-Cob et al., 2008).

Las características geológicas y de los suelos de las zonas donde se ubican las parcelas de estudio junto con un relieve suave facilitan las labores agrícolas, siendo aptas para los cultivos extensivos habitualmente presentes.

2.3. Climatología

El clima se considera un factor importante a analizar debido a su influencia sobre otros factores. La climatología condiciona en gran medida el tipo de suelo, el tipo de formación vegetal, la hidrología, la orografía e incluso la forma de vida y los usos del suelo por parte del hombre, actuando como un factor limitante o favorecedor de sus actividades.

El clima de la zona donde se localizan las parcelas de estudio se ha caracterizado mediante dos estaciones de la red SiAR cercanas a dichas parcelas (serie climática existente en la Oficina del Regante del Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón, <http://servicios.aragon.es/oresa/>). Concretamente se trata de la estación de Tardienta (361 m de altitud) utilizada para caracterizar el clima en la finca San Pedro y el Polígono de La Violada y la estación de Montañana (222 m de altitud) en la finca Soto Lezcano.

El clima es Mediterráneo con rasgos continentales. Según la clasificación de Köppen es del tipo Csa. En los años de estudio las temperaturas medias anuales están cercanas a los 14°C. En invierno suelen aparecer las inversiones térmicas, con nieblas frecuentes. Los veranos son más calurosos y secos. Las mayores precipitaciones se dan entre los meses de marzo y octubre.

Atendiendo al ombroclimograma se constata una marcada definición de la estación cálida y seca, con temperaturas medias superiores a 20°C en Junio, Julio y Agosto y precipitaciones menores en estos mismos meses, con lo que el periodo de déficit hídrico (periodo árido) coincide con la totalidad del periodo estival. En la Figura 3 y Figura 4 se muestran los diagramas ombrotérmicos de Gaussen de las dos estaciones meteorológicas de interés para los periodos de estudio seleccionados.

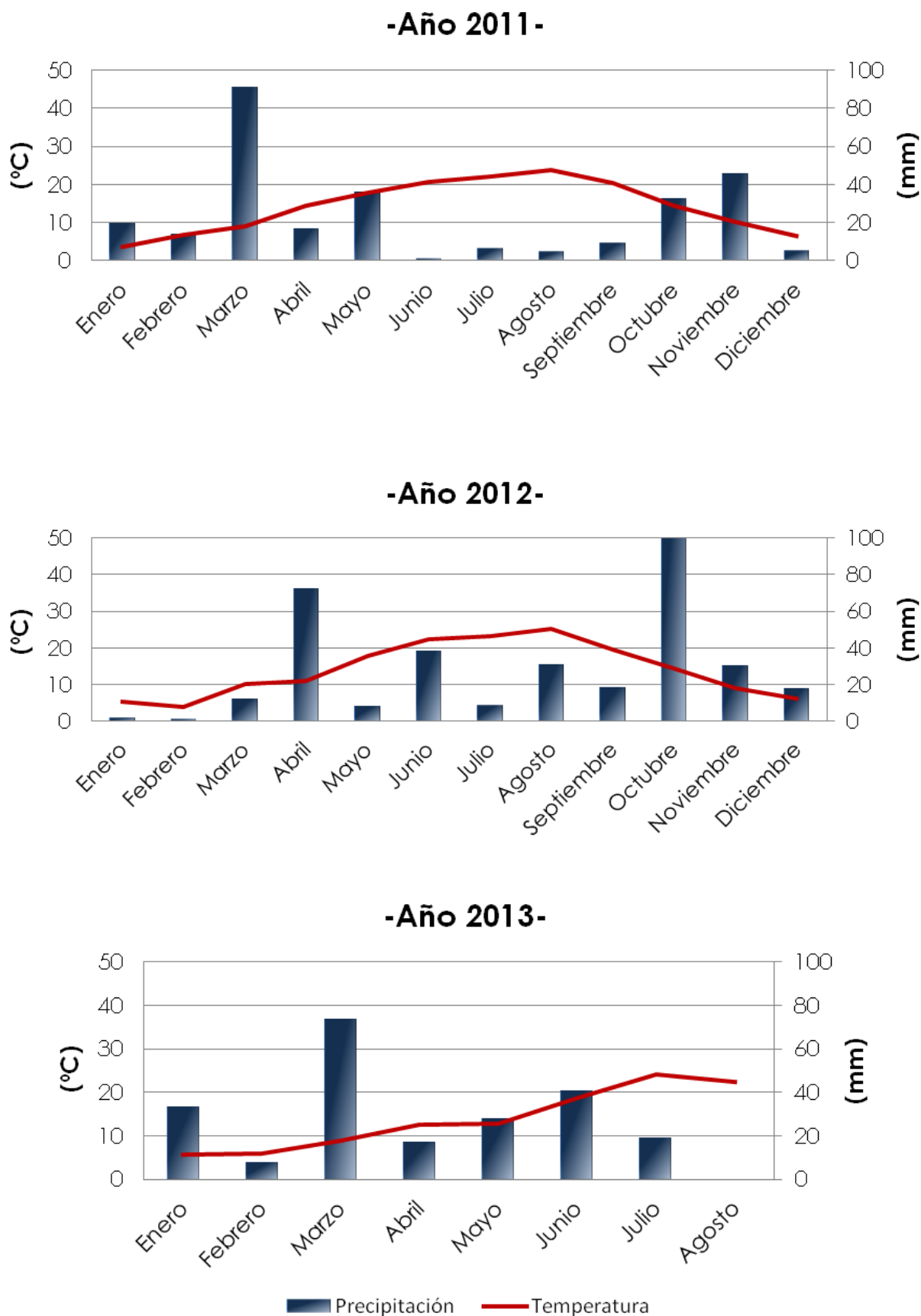


Figura 3. Climogramas de la estación meteorológica de Tardienta para el periodo enero 2011-agosto 2013.

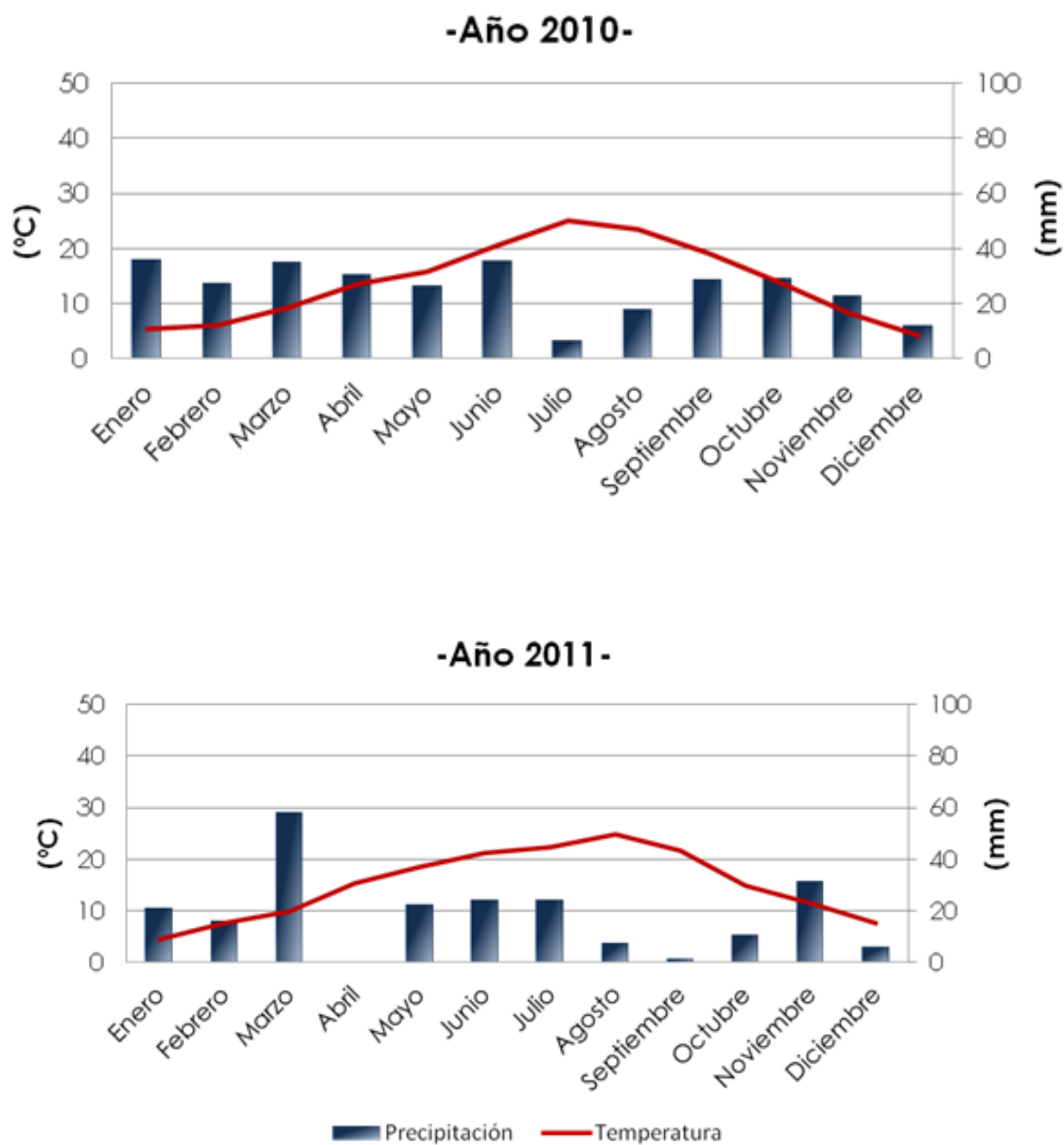


Figura 4. Climogramas de la estación meteorológica de Montañana para 2010 y 2011.

2.4. Cultivos

Las parcelas destinadas a la observación de la variabilidad espacio temporal del desarrollo del cultivo están dotadas de cultivos extensivos de regadío, entre los que destacan principalmente el maíz y la cebada (Tabla 1).

En total suponen 148 ha, de las cuales se tienen datos de rendimiento del pívot para los años 2011 y 2012 y del ranger para el año 2011, ya que han sido manejadas con tecnología avanzada (GPS diferencial, maquinaria de siembra directa, sistema de guiado, monitor de rendimiento, riego automatizado, etc.).

Tabla 1. Cultivos por parcela y año de estudio

PARCELA ESTUDIO	2010	2011	2012	2013
Pívot	-	Maíz	Maíz	Maíz
Ranger	-	Cebada	Cebada	Guisante y Maíz
Cobertura fija	-	Cebada	Doble cosecha (raigrass y maíz)	Maíz rastrojero
Parcelas lisimétricas	Alfalfa	Alfalfa	-	-

En las parcelas lisimétricas se cultivó alfalfa durante los dos años de estudio.

3. FUENTES DE INFORMACIÓN

La Unidad de Suelos y Riegos del Centro de Investigación Tecnológica Agroalimentaria de Aragón (CITA) ha facilitado la bibliografía consultada así como la información necesaria para el desarrollo de este trabajo. Además de dicha unidad, investigadores del grupo RAMA pertenecientes a la Estación Experimental Aula Dei del Consejo Superior de Investigaciones Científicas han facilitado información y bases de datos de los ensayos agronómicos experimentales desarrollados en las parcelas objeto de estudio.

3.1. Materiales

Se detalla a continuación el repositorio digital utilizado para la elaboración del estudio, indicando la procedencia, formato y sistema de proyección de la información recogida.

- Parcelario

Se trata de la cobertura de polígonos en formato vectorial del SIGPAC del año 2013 con Sistema de Proyección European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) UTM 30, suministrada por el Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón. Se utiliza para la delimitación y obtención de máscaras de las parcelas de estudio.

- Ortofotos del año 2006 y 2009

Disponibles en el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), formato raster (ecw) y tamaño de píxel 0,5 x 0,5 m, con Sistema de Proyección European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) UTM 30. Utilizadas para la presentación gráfica de los resultados.

- Imágenes de los satélites Landsat y Deimos

En formato raster, descargadas del Plan Nacional de Teledetección y del USGS (servidor Glovis) con varios Sistemas de Proyección y tamaño de píxel dependiendo de la procedencia, tal y como se detalla más adelante en Metodología. Utilizadas para obtención de índices espectrales y comparación con los datos térmicos.

- Información meteorológica

Procedente de la Red de estaciones meteorológicas de SiAR del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Datos de la estación de Tardienta y de la estación de Montañana en formato hoja de cálculo Excel. Utilizada para la caracterización climática de las parcelas.

- Información agronómica del rendimiento de los cultivos para parcelas de la Finca San Pedro

Datos facilitados por el propietario de la finca y convertidos a cobertura de puntos vectorial con información del rendimiento. Utilizada para la generación de mapas de rendimientos y su validación con los índices de vegetación.

- Información de suelos procedente de muestras tomadas en campo a distintas profundidades para la parcela en el polígono de riegos "La Violada"

En formato hoja de cálculo Excel. Utilizado para la obtención de la Capacidad de retención de agua disponible (CRAD) en la parcela de cobertura fija.

- Información recopilada en las parcelas lisimétricas durante los ensayos de riego

Las fechas y el horario de los riegos junto a datos meteorológicos, en formato hoja de cálculo Excel. Utilizado para la determinación de la variabilidad espacio temporal de la temperatura.

3.2. Software utilizado

- **ERDAS IMAGINE 2010**

Software que ha permitido el procesamiento de imágenes de satélite. Utilizado principalmente para los pretratamientos de las imágenes y la aplicación de los distintos índices de vegetación, así como para extracción de información en la zona de estudio sobre los cultivos y su desarrollo.

- **ARCGIS 10.1**

Software utilizado para la extracción de estadísticas en las parcelas de la zona de estudio, generación y presentación de cartografías.

- **EXCEL**

Aplicación de Microsoft que ha facilitado la creación de gráficos y análisis matemáticos estadísticos.

4. METODOLOGÍA

La metodología empleada consta de tres partes: generación de cartografía, extracción de información de las imágenes y comparación de la información agronómica de los ensayos con información derivada de las imágenes. A continuación se describen las diferentes labores realizadas en cada parte.

4.1. Generación de cartografía

A partir de los materiales descritos en el apartado 3.1 Materiales se genera diferente cartografía temática necesaria para el desarrollo del trabajo.

4.1.1 Parcelario

Se comprueba que los límites de las parcelas que incluye la cobertura de polígonos SIGPAC no siempre coinciden con las parcelas uso, es decir puede darse el caso de que una parcela del SIGPAC tenga su superficie repartida con diferentes cultivos. Lo primero es revisar las lindes de las parcelas con las que se trabaja y modificarlas según sea la realidad y el uso en cada fecha de estudio. Para ello, han servido de ayuda las ortofotos, composiciones en falso color de las imágenes de satélite y los datos tomados en campo. Así las parcelas obtenidas del SIGPAC se modifican añadiendo o eliminando las líneas necesarias para reflejar los cambios recientes e identificar cada parcela-uso. En la Figura 5 puede verse un ejemplo de dichas modificaciones.



Figura 5. Ejemplo de modificaciones en el parcelario. En verde parcelario original SIGPAC de 2013 y en azul nueva delimitación parcelaria.

Estas nuevas delimitaciones parcelarias son las que se rasterizan para la extracción de los datos de cada parcela, obteniendo de cada parcela de estudio una capa ráster con tamaño de píxel de 25m que servirá como máscara usada en los procesos de extracción de información de las imágenes. El parcelario se va a utilizar, además de para la delimitación visual de las parcelas de estudio, para la extracción geo-espacial de datos e información de las mismas.

El nuevo parcelario obtenido se reproyecta del Sistema de Proyección European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) UTM 30 al European Datum 50 (ED50) UTM 30, sistema adoptado en este trabajo a petición de los investigadores.

4.1.2 Generación de mapas de rendimiento.

En la finca San Pedro se obtienen a partir de GPS y monitores de rendimiento instalados en la cosechadora mapas de rendimientos en 2011 y 2012 para el pívot y en 2012 para el ranger. El Grupo de investigación Riego Agronomía y Medio Ambiente (RAMA) había generado una cobertura shape de puntos con los datos de rendimiento que ha facilitado para el desarrollo de este trabajo.

Dichos datos, tomados por la máquina cosechadora en campo en el sistema de proyección es GCS_WGS94, deben convertirse a coordenadas proyectadas, PCS_WGS84, y de estas al sistema de coordenadas adoptado, el ED50_30.

Una vez que se tiene la información en el sistema de proyección adoptado, el siguiente paso es la depuración de los datos. La máquina cosechadora con monitor de rendimiento va registrando datos desde que se pone en funcionamiento y no todos estos datos son válidos, puesto que hay zonas con capturas más abundantes debido a la menor velocidad de la maquinaria, giros, momentos de parada de la máquina, etc. Por ello se registra en algunas zonas una densidad de datos mayor de lo habitual que pueden repercutir en los resultados. Una vez revisados todos los datos registrados por el monitor de rendimiento, se toma el criterio de desechar aquellos puntos registrados con una velocidad inferior a 3 mph (3 millas por hora según registro de la máquina) o lo que es lo mismo 4.8 km/h.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la información del rendimiento proporcionada por la maquinaria es rendimiento húmedo en el momento de la cosecha y se almacena en lb/ac (libras/acre). Este dato se convierte a kg/ha mediante la expresión:

$$\text{Rendimiento (lb/ac)} \times 0,45359237 / 0,40468564224 = \text{Rendimiento (kg/ha)}.$$

Una vez depurada la información, se pasa la cobertura de puntos a una cobertura raster de 25m para poder realizar comparaciones píxel a píxel con la información derivada de las imágenes de satélite. El valor de rendimiento asignado a cada píxel es la media del valor de todos los puntos de rendimiento que habían sido registrados dentro de ese píxel. Para facilitar la interpretación del mapa de rendimiento, este se reclasifica en categorías, variables según el rango de producción obtenido.

Los mapas ráster de rendimiento generado se utilizaran para el estudio de la variabilidad espacio-temporal del desarrollo de los cultivos y su relación con el riego. Se combinan en ArcGIS las capas de información ráster relativas a rendimiento e índices espectrales, extrayéndose para cada parcela (sin considerar los píxeles de borde) y píxel, mediante la función Sample, los datos de rendimiento, las coordenadas de cada píxel y los valores de los índices para las diferentes fechas.

4.1.3 Mapa de capacidad de retención de agua disponible

La capacidad de campo (CC) de un suelo representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad después de un riego o lluvia que ha humedecido todo el suelo y depende del tipo y contenido de arcillas y materia orgánica. El punto de marchitamiento permanente (PMP) se define como la cantidad de agua del suelo en el que las hojas de las plantas que en él crecen se marchitan y no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera casi saturada de agua durante una noche. En la práctica, se utiliza este concepto para indicar el límite inferior del intervalo de agua disponible en el suelo.

La cantidad de agua fácilmente accesible o humedad aprovechable es el agua retenida en un suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La CC representa el límite superior o 100% de disponibilidad de la humedad del suelo. El PMP es el límite inferior de esta disponibilidad o 0%. Los suelos de textura fina tienen límites más amplios de agua disponible que los suelos de textura gruesa.

La capacidad de retención de agua disponible (CRAD) es la cantidad de agua retenida por el suelo que puede ser absorbida por las plantas. La diferencia entre los valores de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente representa la capacidad de retención de agua disponible.

Para la parcela de cobertura fija se disponen de 19 puntos (Figura 6) donde se muestreó el suelo en 2011. Mediante análisis gravimétrico de dichas muestras se obtuvo información como la capacidad de campo, el punto de marchitez y el tanto por ciento del agua útil a 120 cm de profundidad que se ha facilitado por parte de los investigadores.

Con el agua disponible e información de calicatas realizadas en la zona (Jiménez, 2013) se calcula la CRAD en los puntos de muestreo, realizándose posteriormente una interpolación mediante kriging, para conocer la CRAD de la parcela y así poder contrastar esta información con los resultados obtenidos de los índices y determinar si es un factor condicionante de la variabilidad intraparcelar observada.

Toda esta información se utilizará en el análisis de la variabilidad intraparcelar de la parcela de cobertura fija.



Figura 6. Ubicación en la parcela con cobertura fija de los puntos de muestreo para análisis gravimétrico.

4.2 Extracción de información de las imágenes

4.2.1. Selección de imágenes

Una de las condiciones puestas por los investigadores, dado que se trata de un estudio exploratorio, fue utilizar imágenes a las que tuvieran acceso libre, aspecto a considerar en la elección de las imágenes.

- Seguimiento espacio-temporal de la variabilidad del desarrollo del cultivo

A petición de los demandantes, este estudio se realiza para los años 2011, 2012 y 2013. Se analiza por tanto la disponibilidad de imágenes durante las campañas agrícolas del 2011 2012 y 2013 para los meses de abril a septiembre coincidiendo con el periodo en que los cultivos presentes en las parcelas de estudio están vegetando, con el fin de ver la evolución del cultivo en sus distintas etapas. En la elección de las imágenes se tiene en cuenta la disponibilidad de las mismas, la presencia de nubes en la zona de estudio y las limitaciones de los satélites, primando el criterio, siempre que sea posible y representativo, de coger imágenes del mismo satélite para un mismo periodo.

Para el año 2011 los satélites que nos ofrecen imágenes para nuestra zona de estudio en las fechas indicadas son Deimos, Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ (Figura 7).

De todas ellas se decide trabajar con las 6 imágenes Landsat 5 que hay disponibles y sin nubes en el área de estudio (Tabla 2). Las especificaciones técnicas de estas imágenes son Sistema de proyección WGS84 UTM 30, corregidas geométricamente con convolución cúbica y tamaño de pixel 30m para las 2 imágenes, 9 de abril y 16 de septiembre disponibles en USGS, y Sistema de proyección ETRS89 UTM 30, corregidas geométricamente con Interpolación Bicúbica y tamaño de pixel 25m para las otras 4 imágenes procedentes del Plan Nacional de Teledetección.

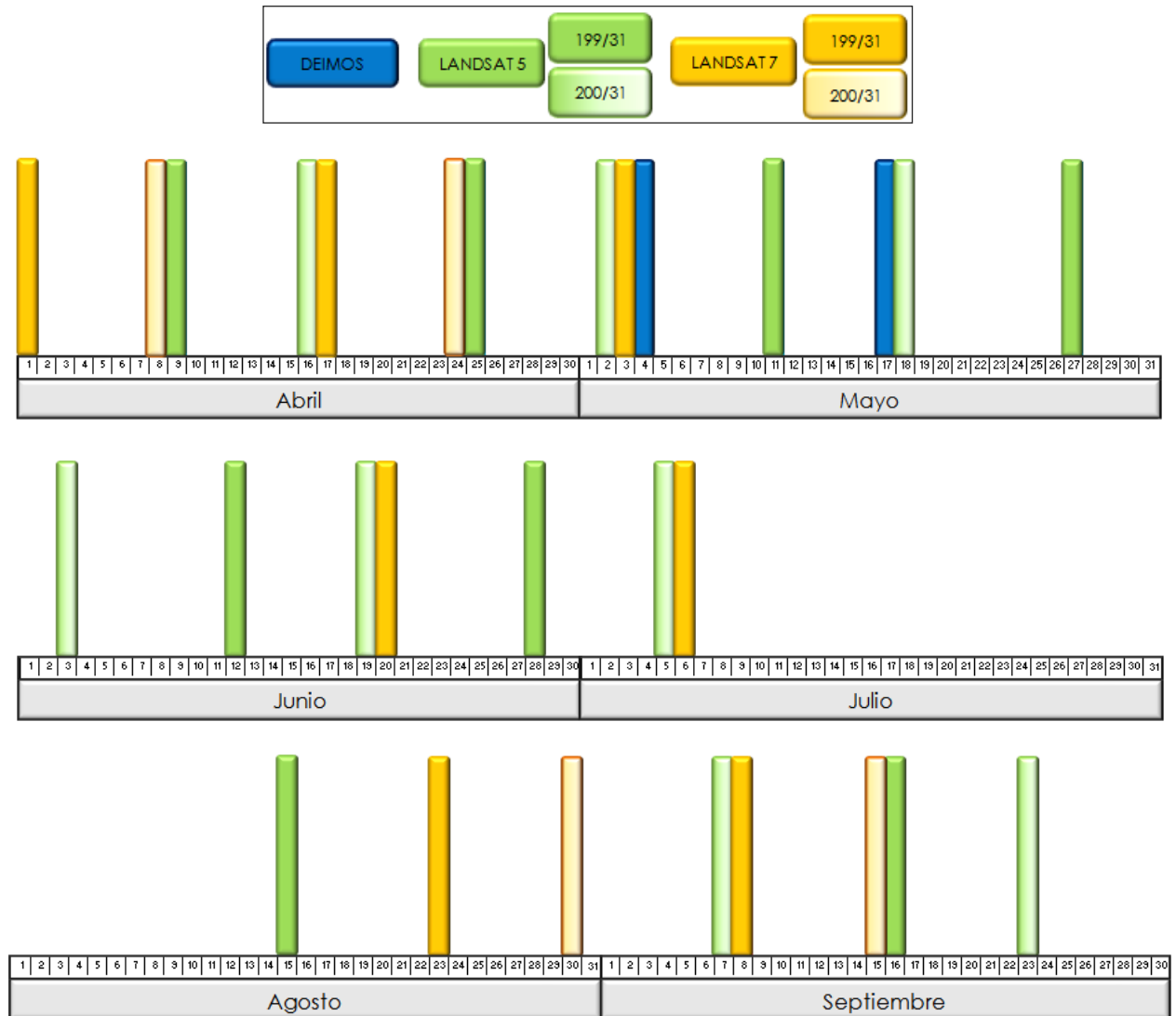


Figura 7. Imágenes disponibles para el año 2011.

En el año 2012 no hay imágenes de Landsat 5 TM y las Landsat 7 ETM+, si bien presentan una buena resolución temporal, tienen el inconveniente de la falta de información sistemáticamente cada varias líneas de píxeles de la imagen, siendo esta falta de información más acusada en la zona de estudio, puesto que se encuentra en el extremo de la escena. Por ello, se decide trabajar con las imágenes DEIMOS facilitadas por el Plan Nacional de Teledetección ya que cubre nuestras expectativas de trabajo (Figura 8), consiguiendo 7 imágenes para este año, una para cada mes de interés (salvo el mes de abril que se sustituye por la última de marzo) y dos para el mes de julio (Tabla 2).

Las especificaciones técnicas de estas imágenes son imágenes corregidas geométricamente en UTM ETRS89 a 20 m de pixel y método de remuestreo interpolación bicúbica.

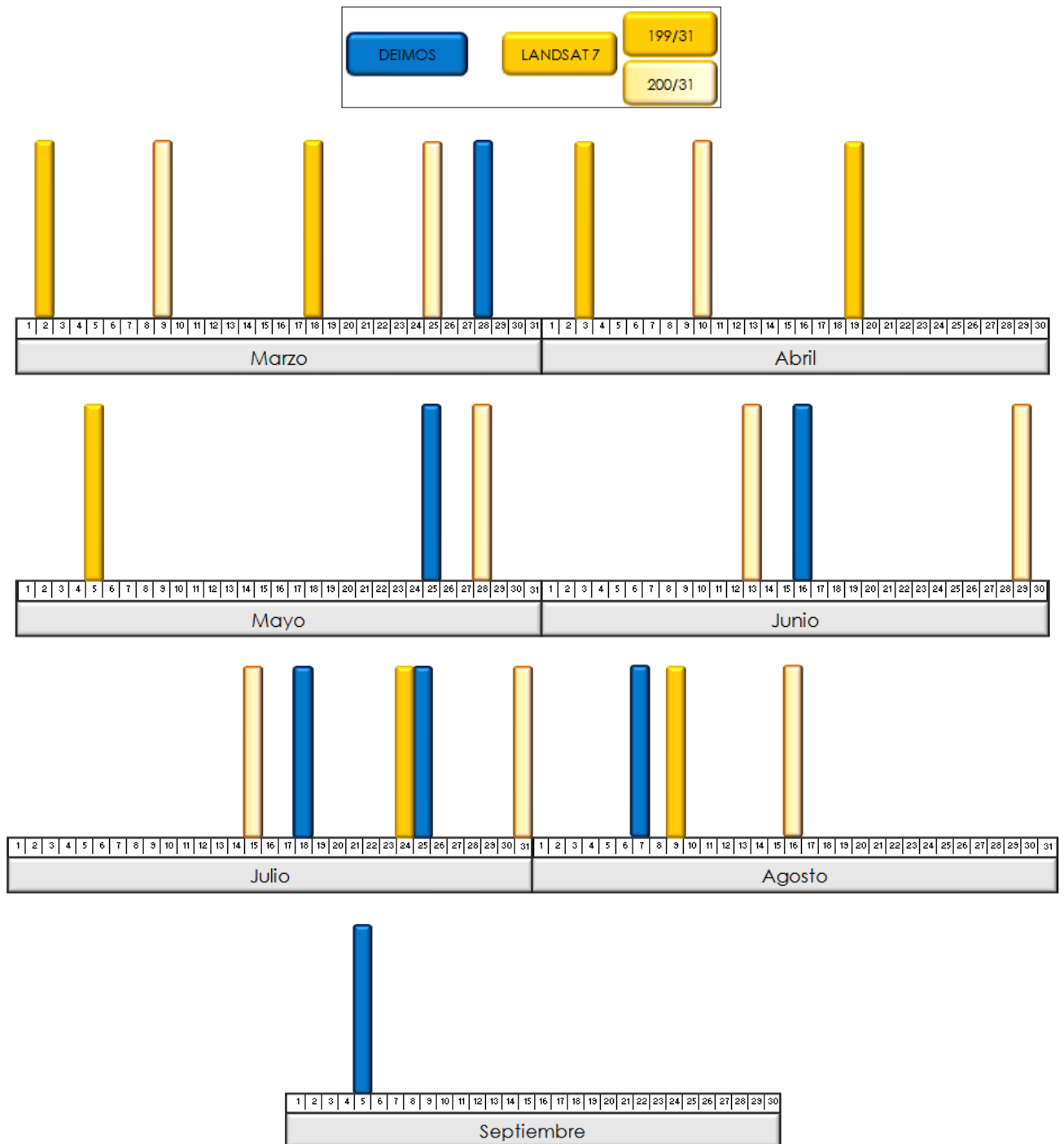


Figura 8. Imágenes disponibles para el año 2012.

En este año, aprovechando la oportunidad de trabajar con el nuevo sensor OLI presente en Landsat 8 se decide usar este satélite. Se utilizan todas las imágenes disponibles desde abril hasta finales de agosto (Figura 9), siempre y cuando no exista presencia de nubes en las zonas de estudio. Finalmente se trabaja con las imágenes que se indican en la Tabla 2.

Todas ellas están disponibles en el USGS, con Sistema de proyección WGS84 UTM 30, corregidas geométricamente con convolución cúbica y tamaño de pixel 30m.

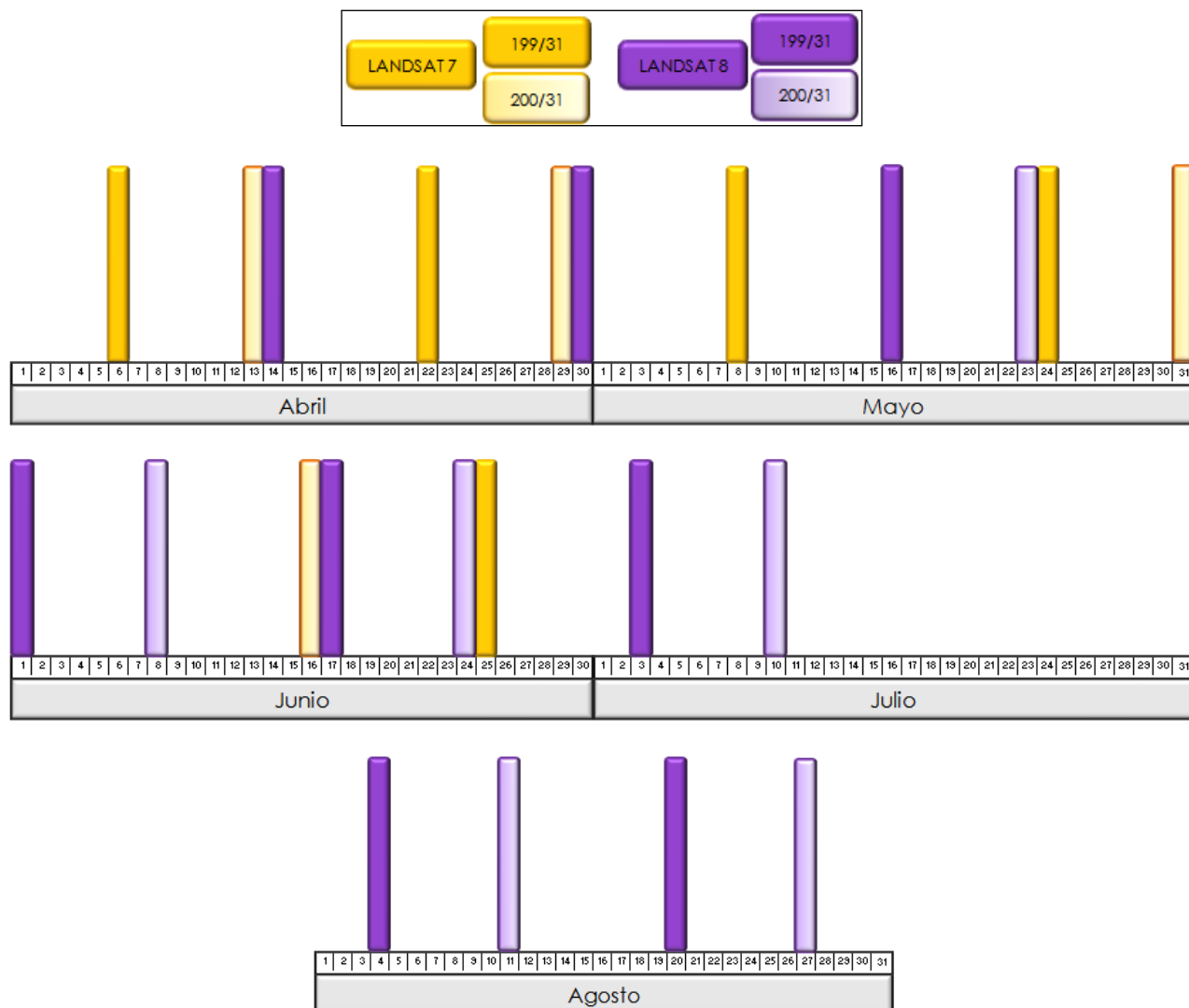


Figura 9. Imágenes disponibles para el año 2013.

Así, en total se trabaja con 20 imágenes de tres satélites diferentes (Tabla 2).

Tabla 2. Imágenes utilizadas para el estudio.

Imágenes Landsat 5 (año 2011)	Imágenes Deimos (año 2012)	Imágenes Landsat 8 (año 2013)
09 Abril 2011	28 Marzo 2012	14 Abril 2013
25 Abril 2011	25 Mayo 2012	16 Mayo 2013
11 Mayo 2011	16 Junio 2012	01 Junio 2013
05 Julio 2011	18 Julio 2012	03 Julio 2013
15 Agosto 2011	25 Julio 2012	19 Julio 2013
16 Septiembre 2011	07 Agosto 2012	04 Agosto 2013
	05 Septiembre 2012	20 Agosto 2013

- Seguimiento espacio-temporal de la variabilidad de la temperatura

En este caso la selección de imágenes es muy específica. Se buscan imágenes de fechas concretas en las que se realizó el riego de las parcelas lisimétricas coincidiendo con el paso del satélite, para así poder comparar los datos de temperatura obtenidos en campo mientras se efectúa el riego con los que se extraerán de las imágenes disponibles.

En la Tabla 3 se indican las fechas y se detallan las horas de inicio y finalización de los riegos de las parcelas de estudio. Al comparar éstas fecha con las imágenes Landsat 5 para el año 2010 y el año 2011, se encuentra en el PNT dos imágenes para el año 2010 y una para el año 2011 que sirven para los propósitos del estudio. Las imágenes de 2010 están ya corregidas geométricamente (usando convolución cúbica y vecino más próximo) y remuestreadas a 25m. La de 2011 está en formato original. Sin embargo, para otros trabajos desarrollados en el CITA ya se había corregido geométricamente esta imagen usando convolución cúbica y vecino más próximo y sin aplicarle ningún remuestreo, es decir quedando con tamaño de píxel de 30m. Es con esta imagen corregida es con la que se trabaja en 2011.

Tabla 3. Fechas de riego en parcelas lisimétricas a la hora de paso de Landsat TM indicando la disponibilidad de imagen (resaltado en gris).

FECHA RIEGO	HORA INICIO	HORA FINAL	SECTOR PARCELA
19 Mayo 2010	08:00	10:35	B
04 Junio 2010	09:35	12:30	A
30 Junio 2010	07:00	10:30	A
28 Julio 2010	06:20	10:45	B
12 Agosto 2010	06:40	10:10	B
18 Agosto 2010	09:40	10:15	B
27 Agosto 2010	08:55	10:00	B
09 Septiembre 2010	07:10	09:40	B
13 Septiembre 2010	10:30	13:00	B
05 Mayo 2011	09:00	12:30	B
17 Mayo 2011	09:50	12:50	B
21 Junio 2011	10:15	13:15	A
23 Junio 2011	10:00	13:00	A
28 Junio 2011	10:00	13:00	A
29 Junio 2011	10:05	11:05	A
11 Julio 2011	10:30	13:30	A
12 Julio 2011	09:50	13:00	B
15 Julio 2011	07:40	10:50	B
18 Julio 2011	10:00	13:00	A
20 Julio 2011	10:00	13:00	A
2 Agosto 2011	10:00	13:00	A
19 Septiembre 2011	10:00	13:00	A
21 Septiembre 2011	10:00	13:00	A
26 Septiembre 2011	10:15	13:15	A
3 Octubre 2011	10:20	13:15	A

4.2.2. Pretratamientos de las imágenes

Las imágenes de satélite presentan alteraciones en la localización y en la radiometría de los píxeles que las componen, provocadas por la rotación y la curvatura terrestre, distorsiones originadas por la plataforma, el sensor o por condiciones ambientales. Por ello, se hace necesario realizar pretratamientos a las imágenes para solventar estas alteraciones. Estos pretratamientos se realizan a todas las imágenes utilizadas para seguimiento espacio-temporal de la variabilidad del desarrollo del cultivo.

- Corrección geométrica

La corrección geométrica es el proceso que elimina los errores de localización de los píxeles sin modificar los niveles digitales de los mismos, sólo su posición o coordenadas (Ballarin-Ferrer, 2012)

Las imágenes seleccionadas para el estudio ya están disponibles georreferenciadas con las especificaciones indicadas en la Tabla 4, si bien en un sistema de proyección diferentes al solicitado por los demandantes del estudio, el Sistema de proyección UTM ED 50. Por lo tanto, ha sido necesario realizar una reproyección y remuestreo de los píxeles de todas las imágenes. Previamente, se verificó visualmente la calidad de la corrección en las zonas donde se ubican las parcelas de estudio.

Con fines formativos, se participó durante el desarrollo del presente trabajo en la corrección geométrica de otras imágenes Landsat 5, aprendiendo la utilización del módulo AUTOSYNC implementado en ERDAS.

- Corrección radiométrica

La señal que recoge el sensor no es función exclusiva de las propiedades reflectivas de la superficie. Existen anomalías en la radiancia captada y para corregirlas, se aplica la corrección radiométrica de la imagen. (Pérez-Cabello, 2012)

Existe un conjunto de técnicas que se aplican para modificar los niveles digitales (ND) originales de una imagen de satélite con objeto de acercarlos a los que se registrarían si la recepción fuera ideal (Chuvieco, 2010). Dicha corrección es necesaria para poder desarrollar modelos empíricos de estimación de parámetros biofísicos continuos, para realizar estudios multitemporales o mejorar la calidad en la clasificación digital.

Para calcular el parámetro físico reflectividad de las cubiertas presentes en la imagen se han aplicado los siguientes procesos de cálculo a todas las bandas excepto para la banda térmica de Landsat:

Corrección atmosférica

Se elimina el efecto de la dispersión atmosférica mediante el método del objeto oscuro de Chávez (1996). Para aplicar este modelo se requieren cubiertas con valores de radiancia espectral cero o próximas a cero que corresponden a zonas de aguas muy profundas y sombras. A cada banda de la imagen se le resta el ND de dichas cubiertas.

Cálculo de reflectividad aparente

Se calcula la radiancia espectral ($L\lambda$), definida como la energía recogida por el sensor por metro cuadrado, por ángulo sólido de medida y por longitud de onda, mediante la expresión $L\lambda = G \cdot ND + B$. Los ND junto con los Gain y Bias propios de cada sensor (proporcionados en los archivos de cabecera de las imágenes) nos permiten "reescalar" los ND originales a radiancia.

Posteriormente se obtiene la reflectividad aparente de la superficie terrestre mediante el modelo simplificado, indicado en Chuvieco (2010). En este trabajo no se aplica normalización topográfica al considerarse que no es relevante para la zona de estudio puesto que las parcelas de laboreo son planas y están localizadas en zonas llanas.

Para modelar estas correcciones se utiliza el módulo Model maker de Erdas Imagine.

En las imágenes Landsat 8 se vio que los ND mínimos de cada banda no están registrados con valores cero o próximos a cero como en el caso de Landsat 5 (Figura 10). Por tanto, al aplicar el método del objeto oscuro se desplazan los histogramas según ND del objeto oscuro (NDdark) a los ND mínimos de cada banda (NDimg) y no a cero, debiendo considerarse este aspecto en el Model Maker implementado (Figura 11).

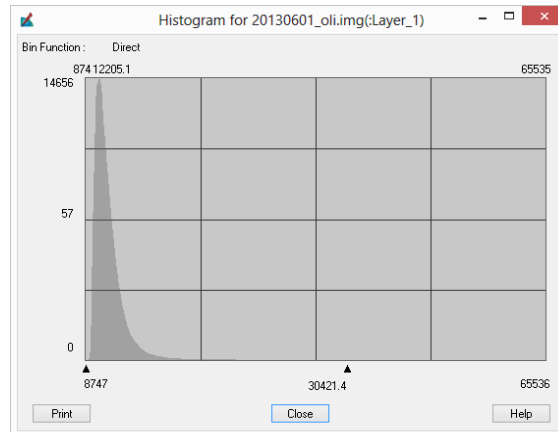


Figura 10. Histograma banda 1 de la imagen del 1 Junio 2013 de Landsat 8.

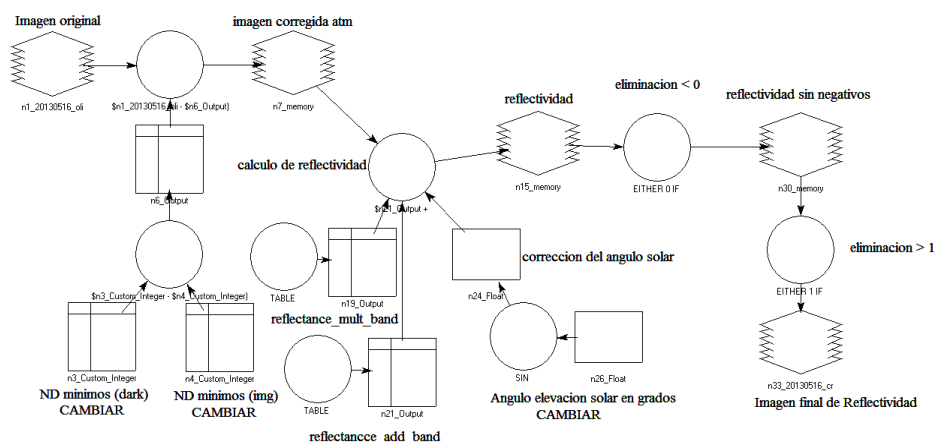


Figura 11. Modelo utilizado para la corrección radiométrica de Landsat 8.

- **Reproyección y remuestreo de píxeles a 25m**

El sistema de coordenadas final en el que se solicitan los datos es European Datum 1950 UTM Zona 30, por lo que se realiza un reproyección del sistema de proyección original de las imágenes.

Al tener imágenes con diferentes tamaños de pixel se toma la decisión de remuestrear todas a píxeles de 25 m, resolución intermedia entre lo píxeles de 30 m de Landsat y los de 20 de Deimos. Todo ello se realiza para tener uniformidad en los datos a utilizar y para conseguir un solapamiento total de todas las imágenes en el área de estudio.

En la Tabla 4 se muestra un resumen de las características y tratamientos de cada imagen dependiendo de su procedencia, ya que varía el tamaño de pixel y la proyección.

Tabla 4. Características y tratamientos de las imágenes.

IMAGEN ORIGINAL				TRATAMIENTOS		
FECHA	FUENTE	SISTEMA PROYECCION	TAM. PIXEL	CORR. RADIOMÉTRICA	REPROYEC.	REMUESTREO
9/4/2011	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
25/4/2011	PNT	ETRS89	25m	SI	ED50_h30	NO
11/5/2011	PNT	ETRS89	25m	SI	ED50_h30	NO
5/7/2011	PNT	ETRS89	25m	SI	ED50_h30	NO
15/8/2011	PNT	ETRS89	25m	SI	ED50_h30	NO
16/9/2011	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
28/3/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
25/5/ 2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
16/6/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
18/7/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
25/7/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
7/8/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
5/9/2012	PNT	ETRS89	20m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
14/4/2013	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
16/5/2013	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
1/6/2013	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo
3/7/2013	Glovis	WGS84	30m	SI	ED50_h30	25m, vecino próximo

- Recorte y ajuste espacial de la imagen

Una vez proyectadas las imágenes al mismo sistema de coordenadas, con la misma resolución espacial y corregidas radiométricamente se realiza, para agilizar los procesos sucesivos de la generación de los datos, un recorte de las mismas que incluye todas las zonas de estudio. Además de esto, al trabajar a escala de parcela es muy importante un buen ajuste entre las diferentes imágenes y el parcelario digital. Para conseguir que todos los píxeles casen exactamente igual cuando provienen de diferentes imágenes o coberturas ráster, se realiza un ajuste del recorte realizado a las imágenes a múltiplos de 25m, es decir el primer píxel de todas las subimágenes tienen como cifra en las unidades de las coordenadas UTM asignadas el valor 0 o múltiplo de 25. Además, se comprueba que las imágenes encajan correctamente con el parcelario digital, moviéndose las mismas si es necesario para asegurar un ajuste bueno al contorno de la parcela.

Las subescenas recortadas tienen 1132 filas y 1131 columnas y corresponden a la superficie comprendida entre las coordenadas X-UTM 681100 Y UTM 4671975 de la esquina superior izquierda y X UTM 709375 Y-UTM 4643725 de la inferior derecha.

4.2.3. Obtención de índices espectrales

En teledetección, una herramienta muy útil para el seguimiento de la vegetación es la obtención de índices de vegetación que según Gilabert et al. (1997) son parámetros calculados a partir de valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas.

Las características para que un índice de vegetación sea ideal son que debe ser sensible a la cubierta vegetal e insensible al brillo, al color del suelo, a la perturbación atmosférica y a las geometrías de iluminación y observación (Jackson et al., 1983).

En este trabajo se eligen dos índices para mostrar el desarrollo o vigor vegetal como son el NDVI y GNDVI. Además se elige otro más relacionado con la humedad de la planta, el NDWI.

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)

Índice propuesto por Rouse et al. (1974), que como la mayoría de los índices de vegetación combina la banda roja y la infrarroja cercana y se basa en el contraste espectral que la vegetación sana presenta en la banda del rojo, donde se da baja reflectividad, y la del infrarrojo cercano, donde la reflectividad es alta (Chuvienco, 2010). Cualquier estrés en la vegetación modifica este contraste espectral y hace variar el índice de vegetación.

Es un índice de cálculo sencillo y fácil interpretación que presenta alta correlación con diversos parámetros de interés agronómico, de ahí que sea el más utilizado en aplicaciones agronómicas de teledetección (Sobrinho 2000).

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R}$$

Dónde:

IRC: banda del infrarrojo cercano

R: banda del rojo

Toma valores entre -1 y 1. En general puede decirse que la nieve, agua y nubes suelen presentar valores próximo o menores a 0; el suelo valores entre 0 y 0,2 y la vegetación valores entre 0,2 y 0,8.

- Índice de vegetación verde de diferencia normalizada (GNDVI, Green Normalized Difference Vegetation Index).

El índice GNDVI (Gitelson et al, 1996) relaciona la reflectividad en el infrarrojo cercano con la banda del verde. Este índice varía también entre -1 y 1 y se calcula mediante la ecuación:

$$GreenNDVI = \frac{IRC - G}{IRC + G}$$

Dónde:

IRC: banda del infrarrojo cercano

G: banda del verde

Es más sensible que el NDVI a los parámetros biofísicos cuando los niveles de los mismos son elevados. Este índice tiene un mayor rango dinámico que el NDVI.

- Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI, Normalized Difference Water Index)

Índice propuesto por Gao et al. (1996), que se define como:

$$NDWI = \frac{R_{0,860\mu m} - R_{1,24\mu m}}{R_{0,860\mu m} + R_{1,24\mu m}}$$

Donde R es la reflectividad en la longitud de onda señalada.

La absorción por la vegetación cerca del 0,86µm es insignificante pero en la región de 1,24 µm la absorción es notable. La dispersión en la cubierta vegetal mejora con la absorción de agua. Como resultado de esto, el NDWI es sensible a los cambios en el contenido de agua líquida en la vegetación. Los efectos de dispersión de aerosoles atmosféricos en la región de 0,86 µm -1,24 µm son débiles, con lo que el NDWI es menos sensible a los efectos atmosféricos que el NDVI, pero el NDWI no elimina completamente la línea de suelo. Es un índice complementario los dos anteriores, no sustitutivo.

Este índice se calcula para las imágenes disponibles de Landsat 5 y Landsat 8, pero al no disponer de una banda específica para estas longitudes de onda se ha realizado como se indica a continuación, utilizando las bandas que más se asemejan a las propuestas por Gao et al. (1996).

Para Landsat 5: $NDWI = \frac{B4(0.76 - 0.90 \mu m) - B5(1.55 - 1.75 \mu m)}{B4(0.76 - 0.90 \mu m) + B5(1.55 - 1.75 \mu m)}$

Para Landsat 8 : $NDWI = \frac{B5(0.845 - 0.885 \mu m) - B6(1.560 - 1.660 \mu m)}{B5(0.845 - 0.885 \mu m) + B6(1.560 - 1.660 \mu m)}$

Los tres índices indicados se van a utilizar para el seguimiento espacio-temporal de la variabilidad del desarrollo del cultivo. Por tanto, dichos índices se obtiene para las tres parcelas en las que se realiza dicho seguimiento: pivot, ranger y cobertura fija. Los índices NDVI y GNDVI se obtiene para todas las imágenes seleccionadas (Tabla 4). La resolución espectral de las imágenes Deimos no permite obtener el NDWI, por lo que este índice sólo se determina de las imágenes Landsat.

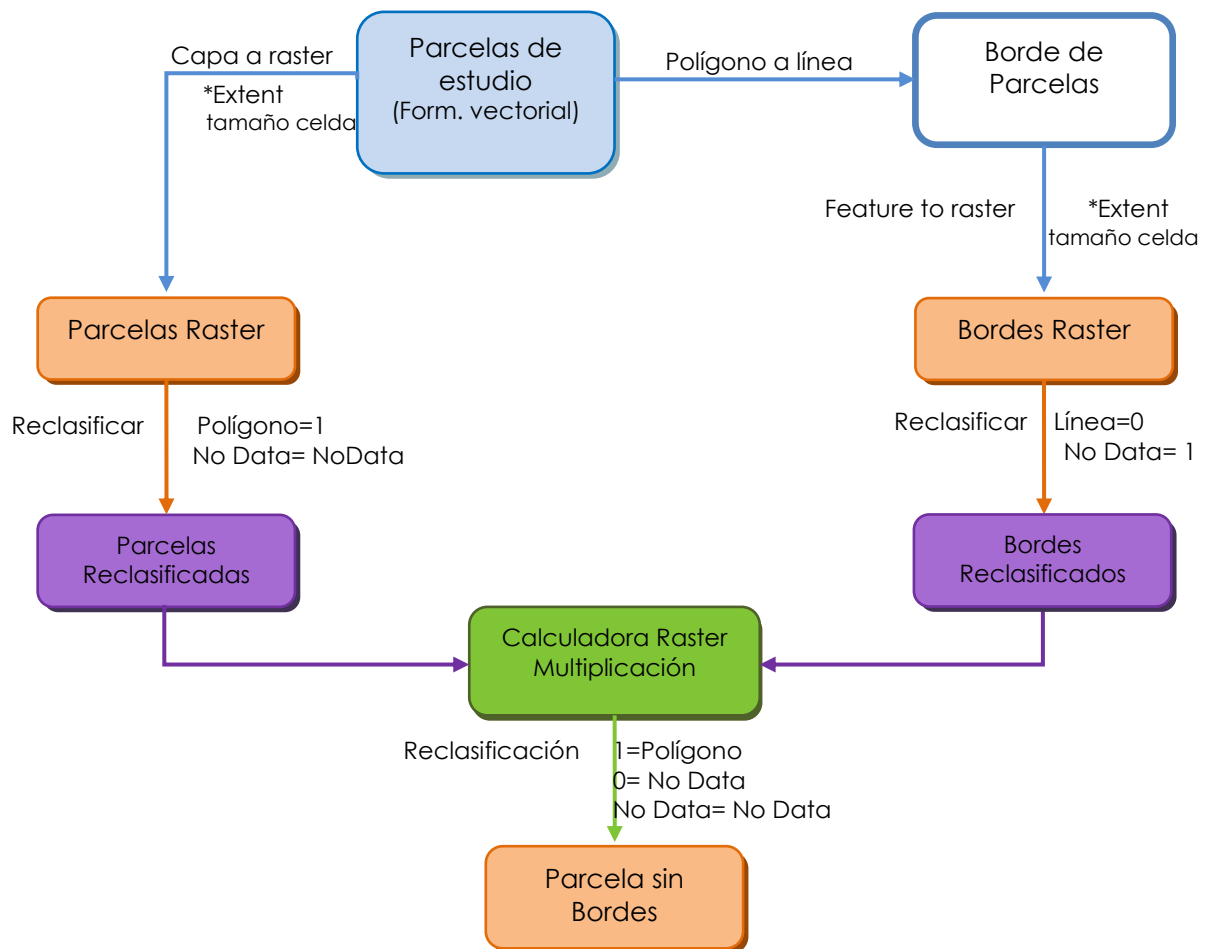
4.2.4. Variabilidad intraparcelar

- Del desarrollo del cultivo

Se analiza en las tres parcelas de estudio mencionadas la variabilidad intraparcelar de los tres índices indicados. Para ello, se les aplica a las imágenes de los índices espectrales una máscara ráster de cada parcela (Ver Apartado 4.2.1) que no incluye los bordes de las mismas, ya que los píxeles de borde de las parcelas tienen una respuesta espectral que no es sólo de la respuesta del cultivo (Portero, et al 1999).

El procedimiento para la eliminación de los píxeles de borde de la parcela es el que muestra la Figura 12, utilizándose el software ArcGIS 10.1. para llevarlo a cabo.

Para cada ráster de cada índice y usando la máscara de las parcelas sin bordes, se extrae con ayuda de las herramientas de análisis espacial de ArcGIS (Spatial Analyst Tools – Zonal – Zonal Statistics as Table) estadísticas zonales por parcelas. Se obtienen estadísticos de cada índice que permiten estudiar la evolución y la variabilidad de cada parcela. Además, usando las indicadas máscaras sin bordes, se extrae el valor del índice de cada píxel de la parcela. Esta información se contrastará con datos de rendimiento.



*Extent: asegurar el extent igual que las imágenes con las que se van a extraer los datos para que los píxeles casen exactamente y que el tamaño de pixel de las parcelas rasterizadas sea de 25m.

Figura 12. Rasterización de parcelas y eliminación de bordes.

- De la temperatura

Esta parte del estudio se realiza, como ya se ha indicado, en las parcelas lisimétricas. Se aplica la máscara de las parcelas a la banda térmica para realizar un análisis visual en el que se valora la cantidad de píxeles que caen dentro de las parcelas lisimétricas, ya que estas no son de gran tamaño así como la viabilidad de la resolución espacial de la banda térmica de Landsat 5 que es de 120m. Teniendo en cuenta que se cuenta con las imágenes corregidas geométricamente usando asignación de ND por vecino más próximo y por convolución cúbica, se analiza la variabilidad del valor digital dentro de estas parcelas en cada caso y su relación con los datos de temperatura capturados en el momento de paso del satélite.

4.3 Comparación de información agronómica de los ensayos con información derivada de las imágenes

4.3.1. Rendimiento

A partir de los mapas de rendimiento obtenidos en campo mediante cosechadora con monitor de rendimiento en 2011 y 2012 para el pívot y en 2012 para el ranger, y de los tres índices calculados de cada imagen, se realiza una extracción de los datos de todas estas capas ráster con la herramienta de análisis espacial de ArcGIS. Se generan tablas que recogen todos estos datos mostrando para cada píxel el valor del rendimiento y de los índices. Estas tablas nos permiten realizar los análisis de los resultados obtenidos, como se muestra en el apartado de resultados.

4.3.2. CRAD

Con los datos de los puntos de muestreo para el análisis gravimétrico recopilados en 2011 en la parcela de cobertura fija, se realiza a partir de técnicas geoestadísticas, concretamente mediante Kriging el mapa de la disponibilidad de agua. Visualmente se compara este mapa con las imágenes de los índices espectrales en dicha parcela para comprobar hasta qué punto la CRAD influye en la variabilidad intraparcelar.

4.3.3. Temperatura

Se comparan los ND de la banda térmica de Landsat 5 y las temperaturas en las parcelas lisimétricas en el momento en que fueron regadas para ver si hay una relación entre la variación de la temperatura y el riego.

5. RESULTADOS

5.1. Variabilidad espacio-temporal del desarrollo de los cultivos y su relación con el riego

5.1.1. Pívor

En los tres años de estudio, 2011, 2012 y 2013 el cultivo implantado en el pívor fue maíz de ciclo largo. Normalmente en la zona de estudio el maíz suele sembrarse a mediados de abril y se cosecha en octubre, alcanzando el máximo desarrollo en julio.

▪ Evolución de los índices espectrales

La evolución a lo largo de la campaña agrícola de los índices NDVI, GNDVI y NDWI va ligada a la evolución del desarrollo vegetativo del cultivo. Los tres índices suelen tener unas curvas de evolución parecidas, ligadas al vigor vegetal y densidad de la vegetación. Cuando el cultivo alcanza buen grado de desarrollo los índices NDVI y GNDVI tienden a saturarse. Sin embargo, el GNDVI es más sensible que el NDVI a parámetros biofísicos cuando los niveles de los mismos son elevados. El NDWI está ligado con el contenido de agua de la vegetación por eso aumenta conforme el cultivo se desarrolla y está bien regado.

El maíz, suele alcanzar los valores máximos de los índices en el mes de julio puesto que es el mes de máximo desarrollo y vigor vegetativo (Figura 13). En los meses anteriores los índices aumentan conforme se desarrolla la planta y a partir de septiembre van disminuyendo como consecuencia de la maduración del cultivo en la fase final de su ciclo vegetativo. El desarrollo del cultivo varía de un año a otro principalmente según fechas de siembra y condiciones meteorológicas.

En la Figura 13 se observa que en las fechas en las que aún no se ha sembrado el maíz o está poco desarrollado (marzo-mayo) los valores medios de los índices están próximos a los valores mínimos, ya que la mayoría de los píxeles del pívor corresponden a suelo desnudo o prácticamente desnudo. Los valores más altos que se presentan en estas mismas fechas corresponden a píxeles localizados en el borde de la parcela en donde se evidencia la presencia de malas hierbas.

De mayo a julio el maíz va desarrollándose cubriendo cada vez más el suelo desnudo del pívor. En este periodo los valores medios se van acercando cada vez más a los máximos. A diferencia de lo que ocurría en el periodo anterior, es en píxeles del borde donde se presentan los valores más bajos. Conforme el cultivo alcanza su pleno desarrollo los valores medios de los índices en el pívor se aproximan cada vez más a los máximos.



Figura 13. Evolución de los índices espectrales en el pivó de maíz.

Las curvas de evolución de los índices muestran diferencias en el ciclo del cultivo de un año a otro. Mientras que a primeros de julio de 2011 el cultivo ya prácticamente había alcanzado el máximo desarrollo con NDVI y GNDVI superiores a 0,8, en el año 2012, año más seco, dichos valores no se alcanzan en todo el ciclo produciéndose el máximo a partir de mediados de julio. En 2013 se puede comprobar una clara diferencia en cuanto a la fecha del máximo desarrollo de la planta frente a los años anteriores. Las suaves temperaturas de este año en mayo-junio hacen que el cultivo vaya retrasado. Si en años anteriores el máximo desarrollo de la planta se producía en julio, en este año se ve que el 19 de julio todavía no se ha alcanzado. Se ha producido un retraso del desarrollo del maíz y como consecuencia una cosecha más tardía que años anteriores. La lástima es que no se disponen, a la fecha de preparación de este documento, de datos de cosecha para esta temporada pero sería interesante poder comparar este año con los previos para ver si la evolución más lenta del cultivo también se refleja en los rendimientos obtenidos. En general, los valores de GNDVI lógicamente son menores que los del NDVI, si bien presentan tendencias similares.

En cuanto al NDWI, se tienen valores negativos en el inicio del ciclo vegetativo por la influencia del suelo desnudo y/o poco cubierto. El comportamiento de este índice en los meses de pleno desarrollo del cultivo de 2011, prácticamente con valores muy similares de julio a septiembre, denota un buen estado hídrico del cultivo. En 2012 no se tiene información espectral para calcular este índice y en 2013, si bien no se ha completado el estudio para todo el ciclo del cultivo, en las fechas disponibles el comportamiento del índice es similar al de 2011.

La variabilidad intraparcelar (Figura 14) para los tres índices en los tres años estudiados es muy escasa cuando el cultivo está presente, lo que indica que no hay factores abióticos o bióticos que alteren el desarrollo del cultivo. El riego en el pívot es bueno e uniforme (coeficiente de uniformidad medio en torno el 85%) y así se refleja en el desarrollo del cultivo (índices espectrales).

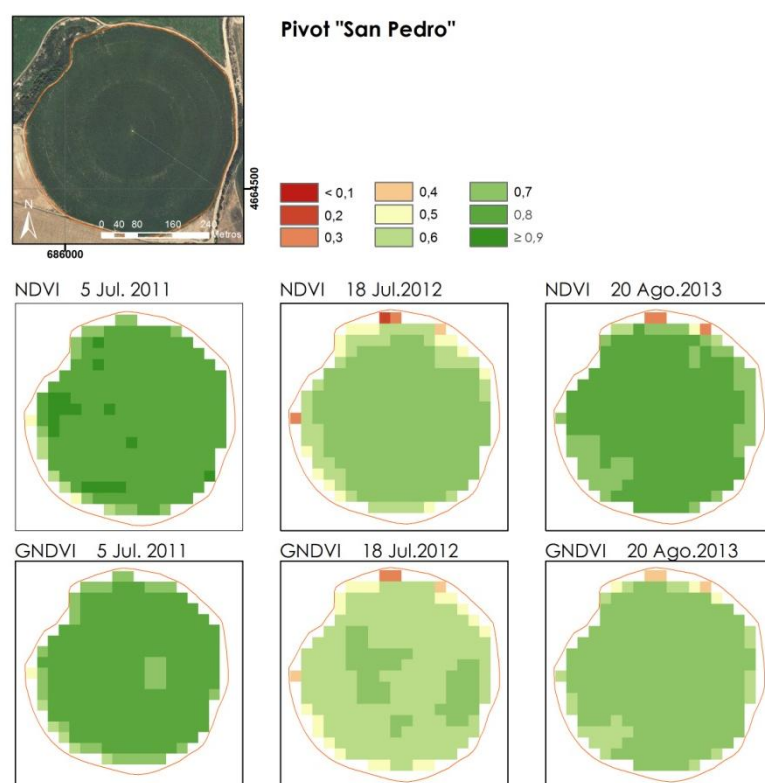


Figura 14. Cartografía de los índices de vegetación en el pívot.

- Índices de vegetación frente al rendimiento

Atendiendo a los dos índices de vegetación estudiados y según las curvas de evolución representadas anteriormente, se compara el valor de NDVI y GNDVI frente al mapa de rendimiento obtenido las fechas en las que el cultivo presenta desarrollo vegetativo (Figura 14). Sólo se tienen en cuenta estos índices ya que el rendimiento en cosecha no guarda relación con el contenido de humedad de la planta durante el ciclo, ya que no se ha producido un estrés hídrico relevante y continuado en el pívot.

En el año 2011 la producción media en el pívot fue 14376,90 kg/ha al 22% de humedad, variando de unas zonas a otras del pívot entre desde 7685 a 17675 kg/ha. En 2012 la producción media fue menor 13436,20 kg/ha al 19% de humedad, variando entre desde 7253 a 16771 kg/ha. En la Figura 15 se presenta el rendimiento reclasificado en 6 categorías para facilitar su interpretación.

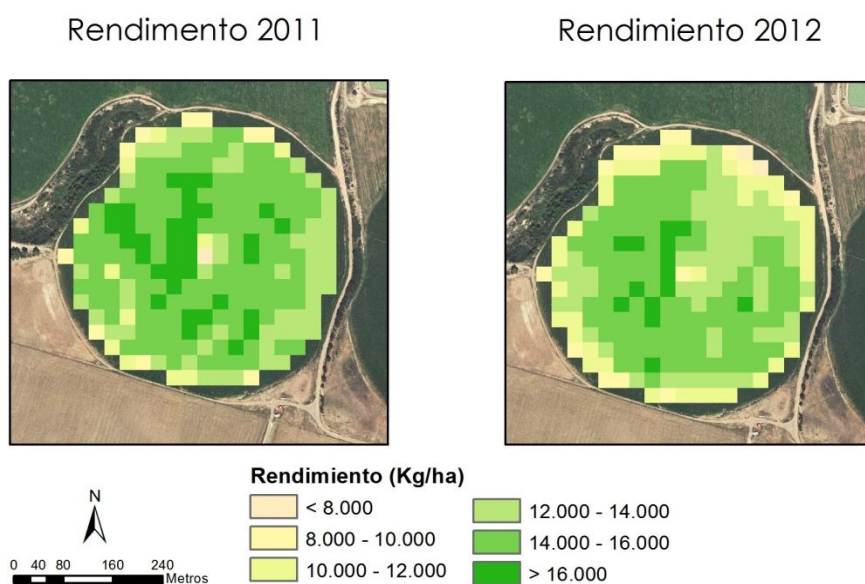


Figura 15. Rendimientos en el pívot de maíz al 22% de humedad en 2011 y 19% en 2013.

Los valores de rendimiento y los índices están acordes, dándose los menores rendimientos en el borde del pívot que es también donde se localizan los valores más bajos de los índices (Figura 15). En 2012 se aprecia en el cuadrante noreste rendimientos ligeramente menores pero debe tenerse en cuenta que son rendimientos ya altos, mayoritariamente superiores a 13000 incluso a 13500kg/ha.

En la Figura 16 se presentan gráficos de dispersión para la muestra de los píxeles del pívot, tomando como variables el rendimiento (eje X) y los índices de vegetación (eje Y). En 2012 se observa que cuando aumenta el valor del índice aumenta el rendimiento, hasta aproximadamente los 12000Kg/ha donde el valor del índice alcanza el máximo y no varía aunque el rendimiento aumente. Los puntos con rendimientos inferiores a 12000 Kg/ha y con bajos valores en los índices corresponden a píxeles localizan en el borde del pívot y en el centro que es donde se encuentra el anclaje de la máquina de riego (Figura 17). En 2011, el comportamiento es similar si bien la nube de píxeles con rendimientos menores de 12000Kg/ha no presenta la tendencia observada en 2012, encontrándose píxeles con bajos rendimientos y altos valores de los índices.

Las fechas disponibles de imágenes no son las más adecuadas para esta parte del estudio pues o bien tenemos imágenes donde el cultivo todavía tiene poco desarrollo, y por tanto la respuesta espectral se debe mayoritariamente al suelo, o tenemos imágenes cuando el cultivo ya está bien desarrollado y los índices se han saturado. Sería interesante ver la relación entre índices y rendimiento en fecha intermedias, cuando el cultivo todavía no está desarrollado del todo pero ya tiene un desarrollo notable ya que son las fechas más adecuadas para este tipo de estudio.

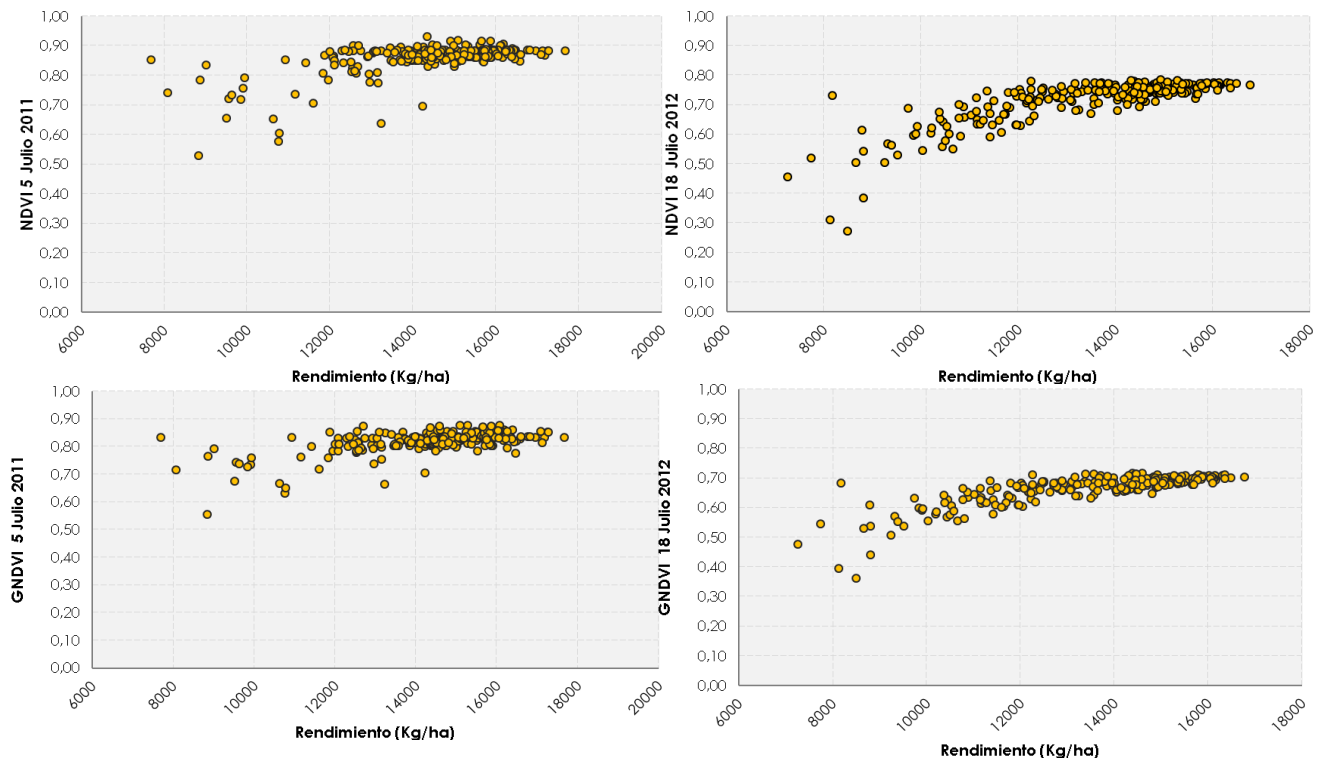


Figura 16. Relación entre índices de vegetación y el rendimiento de maíz para la muestra de píxeles del pívot.

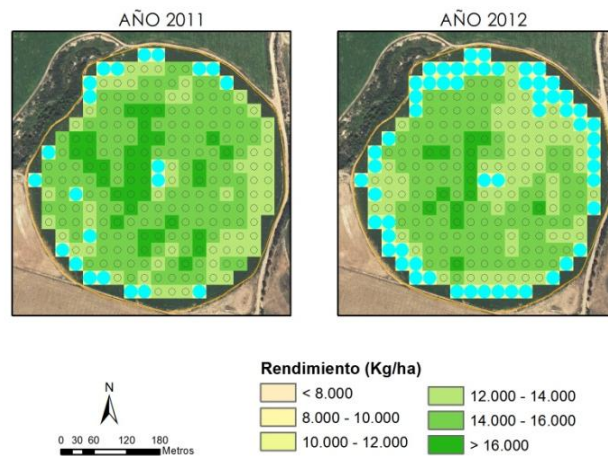


Figura 17. Localización de los píxeles del pívot con menor rendimiento y bajos valores de NDVI (puntos azul claro).

5.1.2. Ranger

El cultivo presente en el ranger los años de estudio fue cebada en 2011 y 2012 y doble cosecha de guisante y maíz en 2013. La cebada suele sembrarse en octubre y se cosecha hacia mediados de junio alcanzando el máximo desarrollo en abril y mayo. En el caso del guisante la época de siembra variará un poco en función de la variedad de guisante, pero de forma general es un cultivo de invierno-primavera que puede sembrarse en otoño, prolongándose su ciclo hasta finales de primavera; y también puede sembrarse en enero-febrero, llegando su ciclo hasta el comienzo del verano como es el caso. Alcanza su máximo desarrollo en mayo y permite, si se desea, combinarse con una siembra de maíz rastrojero, cultivo que se desarrolla de principios de julio hasta septiembre, alcanzando el máximo desarrollo en agosto.

- Evolución de los índices espectrales

En los años 2011 y 2012 la cebada presenta máximos de NDVI, GNDVI y NDWI en los meses de abril y mayo puesto que son los meses de máximo desarrollo y vigor vegetativo. En los meses anteriores los índices aumentan conforme se desarrolla la planta y en los posteriores van disminuyendo como consecuencia de la maduración del cultivo ya en la fase final de su ciclo vegetativo, lo que se manifiesta por un amarillamiento de la planta.

Al igual que ocurría en el pívot, los tres índices presentan en general curvas de evolución parecidas a pesar de que la escala temporal entre los años de estudio no es comparable ya que las imágenes tomadas no corresponden a las mismas fechas (Figura 18).

La evolución del NDVI y GNDVI ligados al desarrollo del cultivo muestra que las curvas son similares si bien, para la misma fecha, el NDVI presenta valores más altos que el GNDVI.

En la Figura 18 se observa que en 2011 la cebada ya presentaba un máximo desarrollo en la imagen del 25 de abril. En 2012, la falta de imágenes de abril y primeros de mayo no permite conocer en que momento se produce el máximo desarrollo, si bien se ve que éste ha sido bueno por los valores del NDVI y GNDVI alcanzados en la imagen del 25 de mayo.

De abril a julio en el año 2011 y de marzo a julio en el 2012, la cebada ya presenta un buen cubrimiento del suelo. Al igual que ocurría en el pívot, mientras el cultivo está presente y cubre el suelo los valores medios del NDVI y GNDVI se aproximan a los máximos. A partir de que el cultivo alcanza su pleno desarrollo, los valores medios de los índices en el ranger se van aproximando a los mínimos consecuencia de su maduración y/o cosechado del cultivo.

Además, en 2012, se observan así mismo valores inferiores a los de la mayor parte de la parcela en una franja con orientación noroeste sureste en la parte derecha del ranger (Figura 19).

La no disponibilidad de imágenes desde el 28 de marzo hasta el 25 de mayo en 2012, hace que no sea posible establecer hasta que punto el ciclo del cultivo de la cebada ha sido diferente en 2011 y 2012.

En el año 2013 las curvas de evolución son típicas de un doble cultivo, guisante y maíz en el ranger. Se aprecia que para el cultivo del guisante los valores medios no se aproximan en pleno desarrollo ni a los valores mínimos ni a los valores máximos, tal y como ocurría para los otros cultivos, y que las desviaciones típicas (barritas verticales sobre el valor medio en la Figura 18) son mayores. En este año la parcela se dividió en dos mitades cultivándose guisante sólo en una de las dos y dejando la otra mitad con el suelo desnudo (Figura 19). El maíz en cambio sí se cultivo en todo el ranger, y sigue un comportamiento similar al observado en el pívot en cuanto a evolución de los índices, si bien al tratarse de una segunda cosecha se siembra más tarde y alcanza el máximo desarrollo ya en agosto (Figura 18).



Figura 18. Evolución de los índices espectrales en el ranger.

El NDWI también alcanza los máximos valores cuando el cultivo presenta máximo desarrollo y valores negativos o próximos a cero cuando no está presente. Atendiendo a los valores medios de este índice cuando se cultiva cebada, se comprueba que están próximos a los valores máximos de NDWI, lo que nos indica que el cultivo tiene un buen estado hídrico. En 2012, no se tiene información espectral para calcular este índice y en 2013 se aprecia una desviación típica elevada (Figura 18) de los valores debido a que únicamente la mitad del ranger está cultivado con guisante y a que cuando está cultivado con maíz, se tiene imágenes del periodo en el que todavía no está bien desarrollado.

La Figura 19 muestra la variabilidad intraparcelar para los índices de vegetación en los tres años. Pese a que el riego en el pívot es bueno e uniforme con un coeficiente de uniformidad medio en torno el 85%, en 2012 y 2013 se aprecia como ya se ha indicado anteriormente una zona en la que se evidencia un menor desarrollo del cultivo, con lo que indica algún factor abiótico o biótico que altera el desarrollo que no tiene que ver con el riego sino con el suelo (com. pers.).

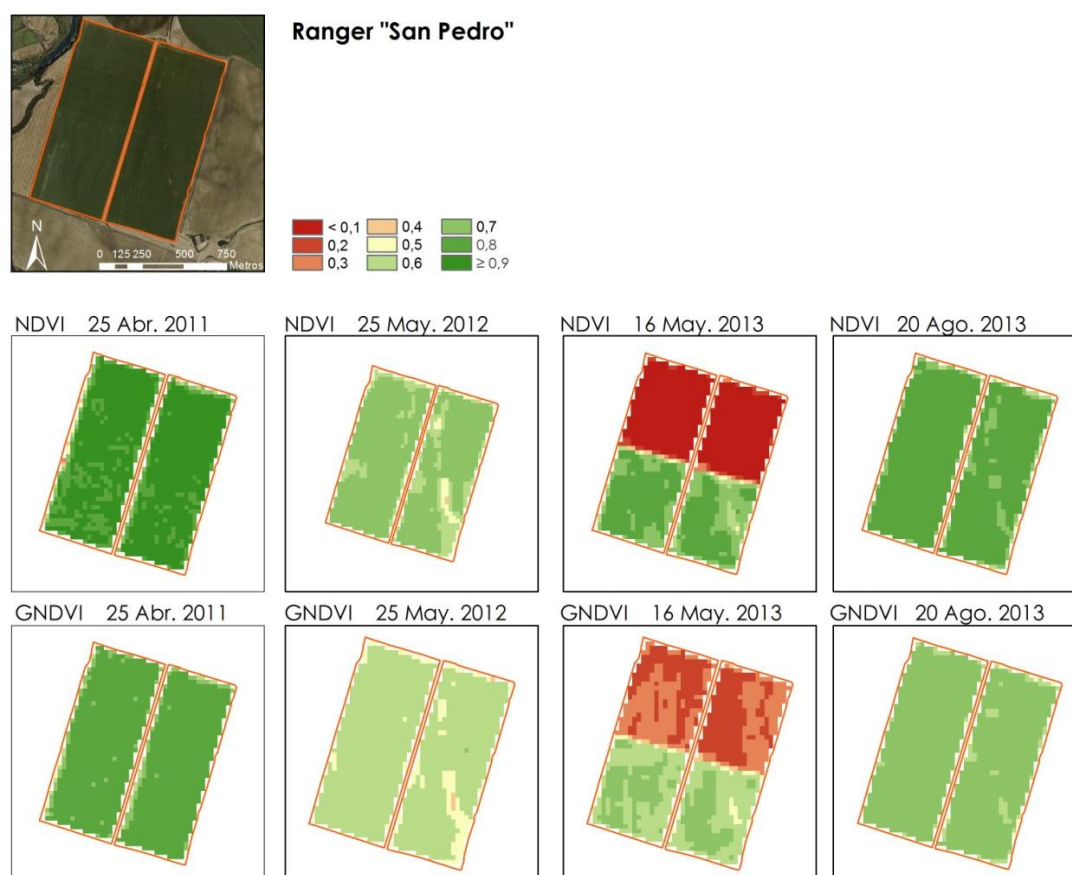


Figura 19. Cartografía de los índices de vegetación en el ranger.

▪ Índices de vegetación frente al rendimiento

En el ranger sólo se dispone de información de cosecha para la cebada el año 2012. Las fechas en las que se dispone imágenes no son las idóneas para analizar la relación entre índices y rendimiento. Una imagen de abril sería la más adecuada (Martínez, 2011). De cualquier forma se realiza el estudio con la imagen del 25 de mayo en la que el cultivo está bien desarrollado y todavía los índices de vegetación presentan altos valores (Figura 19). La producción media de la cebada del ranger en 2012 fue de 3994,15 kg/ha con humedad del 10%, variando la misma de unas zonas a otras entre desde 1685 a 6472,19 kg/ha. En la Figura 20 se presenta el rendimiento reclasificado en 6 categorías para facilitar la interpretación.



Figura 20. Rendimiento de la cebada en el ranger para una humedad del 10%.

Los valores de rendimiento y los índices están acordes, presentándose los menores rendimientos en el borde del ranger y en la franja con orientación de noroeste a sureste, que es también donde se dan los valores más bajos de los índices (Figura 19). Estos píxeles corresponden a los puntos que en las gráficas de dispersión aparecen a la izquierda, hasta valor de rendimiento de 3.500kg/ha (Figura 21).

En la Figura 22 se localizan en el ranger los píxeles con NDVI menores a 0,65 que como puede verse tienen bajos rendimientos. Así mismo, se aprecia que en la mitad inferior del ranger los rendimientos son en general inferiores a los de la mitad superior. Debe tenerse en cuenta que algunos píxeles son rendimientos que corresponderían al rango entre 4.000-5.000kg/ha, teniendo valores de entre 3.700 y 3.800kg/ha. En este caso los puntos que corresponden a estos píxeles de la mitad inferior del ranger son los situados en el centro de la gráfica de dispersión y los de la parte superior del ranger en la derecha de la gráfica. La saturación de los índices en el ranger para la fecha elegida no permite sacar ninguna conclusión acerca de su relación con el rendimiento.



Figura 21. Relación entre índices de vegetación y el rendimiento de la cebada para la muestra de píxeles del ranger.



Figura 22. Localización de los píxeles del ranger con menor rendimiento y bajos valores de NDVI (puntos azul claro).

5.1.3. Cobertura fija

En la parcela de cobertura fija se realizó en 2009 la transformación de riego por inundación a riego por aspersión bajo cobertura fija. Es bastante habitual que tras una transformación de este tipo se siembren los primeros años cebada, ya que la cebada tiende a estabilizar el suelo. En 2011 la cebada fue el cultivo presente en esta parcela. En el año 2012 se realiza una doble cosecha de raigrass y maíz y en el año 2013 se siembra maíz.

La cebada, como ya se ha indicado, suele sembrarse en octubre y se cosecha hacia mediados de junio alcanzando el máximo desarrollo en abril y mayo. La siembra de raigrass ha de realizarse desde finales de febrero hasta mediados de marzo, de tal manera que el primer aprovechamiento sea entre el 15 de abril y el 15 de mayo. Este cultivo puede combinarse con la siembra posterior de maíz a principios de junio que alcanza el máximo desarrollo a finales de julio y se cosecha a partir de octubre.

▪ Evolución de los índices espectrales

En el 2011 la cebada presenta máximos de NDVI, GNDVI y NDWI en el mes de abril, siendo el mes de máximo desarrollo y vigor vegetativo del cultivo, hecho que se constata en las imágenes de este año (Figura 23). En este caso, a diferencia de lo que ocurría en el ranger cuando había cebada, los niveles medios de los índices no están tan próximos a los valores máximos ya que hay una zona de la parcela en la que el cultivo no se desarrolla bien este año (Figura 24). Consecuencia de ello son las altas desviaciones típicas encontradas respecto al valor medio de los índices en las fechas de abril y mayo. A partir de agosto ya solo se evidencia la presencia de suelo desnudo.

En el año 2012 se diferencia claramente en las gráficas de evolución de los índices la doble cosecha existente, con el fin de ciclo del guisante e inicio del maíz en junio. A partir de esta fecha la respuesta espectral corresponde al ciclo vegetativo del maíz, encontrándose los valores más altos de los índices y por tanto máximo desarrollo en la imagen del 18 de julio.

En el año 2013 las curvas de evolución pertenecen al maíz. Los valores medios de los índices al comienzo están próximos a los valores mínimos puesto que corresponden a suelo desnudo salvo los píxeles de borde que poseen valores altos de los índices. Conforme el cultivo se va desarrollando a comienzos de junio, los valores medios se aproximan a los valores máximos hasta alcanzar el máximo desarrollo. Como ya se ha indicado anteriormente, en este año las temperaturas suaves en los meses de mayo a junio provocan que el cultivo vaya retrasado sin poder alcanzar a ver con las imágenes estu-
diadas, el momento en el que se llega al máximo desarrollo de la planta y su posterior maduración.



Figura 23. Evolución de los índices en la cobertura fija.

La uniformidad de riego en la cobertura fija es alta, del 80%, sin embargo la Figura 24 muestra los cambios de la variabilidad intraparcelar a lo largo de los tres años de estudio. En esta parcela la variabilidad intraparcelar es más acusada en el año 2011, algo menor en el año 2012 y escasa en el año 2013, consecuencia del cambio de riego que se produjo y de la estabilización del terreno. Las obras realizadas en la parcela implican un factor condicionante al desarrollo del cultivo los primeros años tras su puesta en marcha. Hay que tener en cuenta que habitualmente el primer año de cultivo tras un cambio de riego de este tipo la variabilidad intraparcelar en las parcelas es más acusada por el movimiento de tierras realizado al implantar el riego por aspersión. Por este motivo se siembra cebada ya que tiende a estabilizar el suelo. El primer año de estudio, 2011, es el que presenta mayor variabilidad intraparcelar, siendo menos acusada al siguiente y siendo muy escasa en 2013, año en el que el cultivo presenta buen desarrollo en toda la parcela. En 2011 todavía se aprecia la tendencia a la disposición de los bancales existentes en la parcela antes de la implantación del riego, dejándose notar mucho menos en 2012 y no apreciándose en 2013.

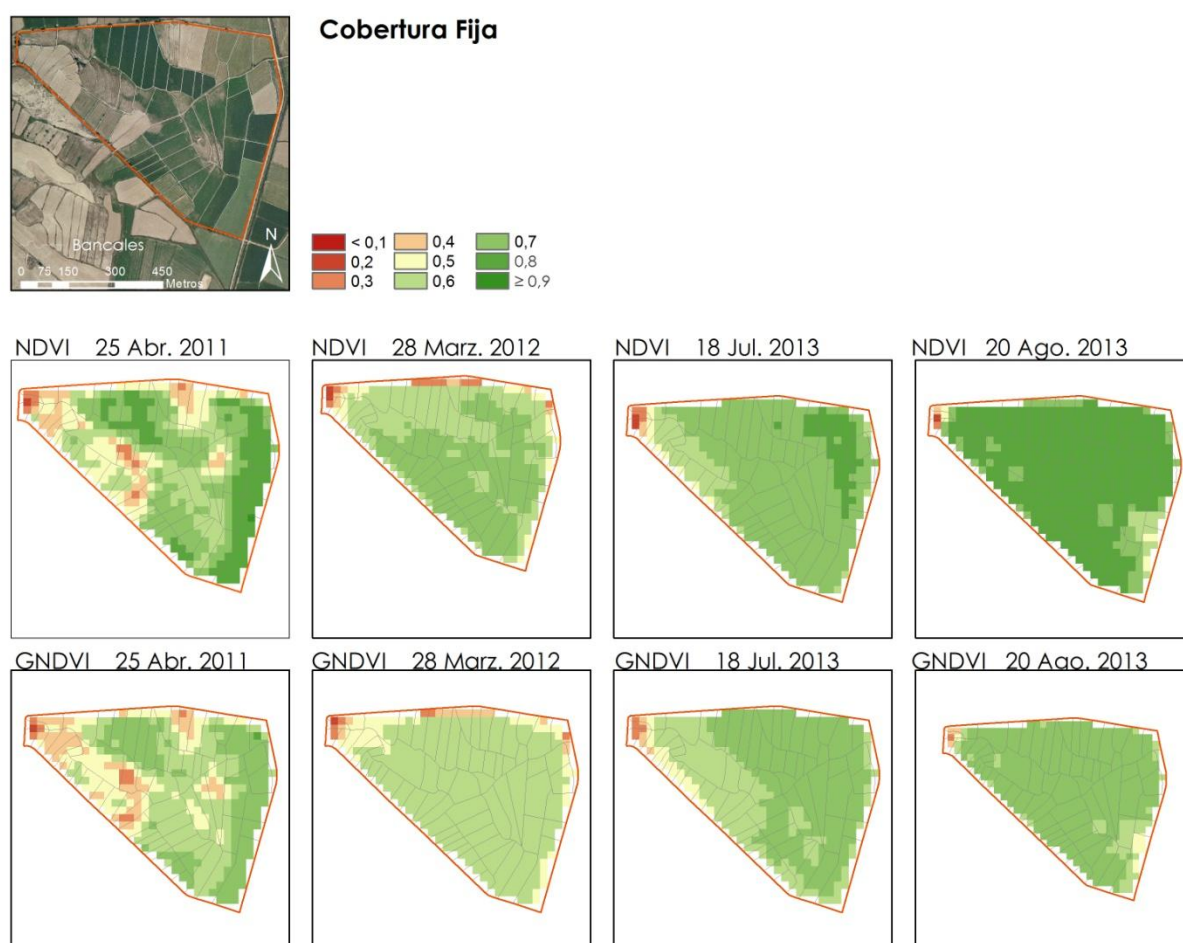


Figura 24. Cartografía de los índices de vegetación en la cobertura fija. Las líneas grises corresponden a la distribución de los bancales antes del paso a riego por aspersión.

Los valores de CRAD entre 132-26 (Figura 25), indica que hay suficiente agua disponible para las plantas, no siendo actualmente un factor influyente en la variabilidad intraparcelar.

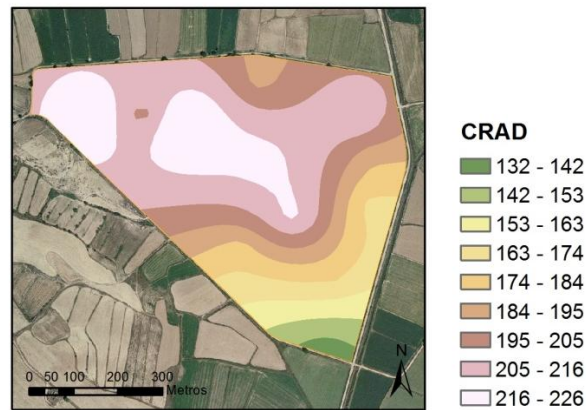


Figura 25. Capacidad de retención de agua disponible en el suelo el año 2011, en la cobertura fija.

5.2. Variabilidad espacio-temporal de la temperatura y su relación con el riego

Esta parte del estudio se ha llevado a cabo en las parcelas lisimétricas. En la Figura 26 se presentan los datos de temperatura media del aire (aproximadamente, 1.0 m por encima del cultivo) registrados en las parcelas lisimétricas con sonda Vaisala y de la temperatura media de la cubierta vegetal (sensor 0.8 m por encima del cultivo, 45° sobre la normal a la superficie del cultivo y mirando hacia el norte), entre las 10h y 11h UTC (Universal Time Coordinated). El paso del satélite que se produce entre las 10:30 y 10:35 horas para las tres fechas de estudio.

El 12 de agosto de 2010, a partir de las 10:30 h, momento en que finaliza el riego de la parcela lisimétrica B y comienza el de la parcela lisimétrica A se observa un aumento paulatino de la temperatura del aire y de la cubierta vegetal en la parcela B mientras que la A desciende más acusadamente al inicio de la puesta en riego que después. La diferencia entre la temperatura de ambas parcelas es más acusada para la temperatura de la vegetación que para la del aire. El 13 de septiembre de 2010, comienza a regarse la parcela B a las 10:30h permaneciendo la parcela A sin regarse entre las 10 y las 11h. El riego provoca un descenso de la temperatura en la parcela B respecto a la temperatura de la A, descenso mucho más evidente para la temperatura de la vegetación que para la del aire. Por último el 28 de junio de 2011, la parcela que se riega a partir de las 10:05h es la A mientras que la B permanece sin regar. Igual que en las anteriores fechas anteriores se produce un descenso de la temperatura en la parcela que se está regando, siendo más acusada la diferencia de temperaturas para la temperatura vegetal que para la del aire.

La temperatura de la cubierta es la variable a comparar con los datos derivados de la banda térmica de las imágenes. Se aprecia alta concordancia entre la información obtenida de las imágenes (ND) con temperaturas de la cubierta vegetal adquiridas in situ (Tabla 5). La banda térmica de Landsat es capaz de reflejar las diferencias de temperatura entre las dos parcelas lisimétricas, así como la magnitud de dicha diferencia.

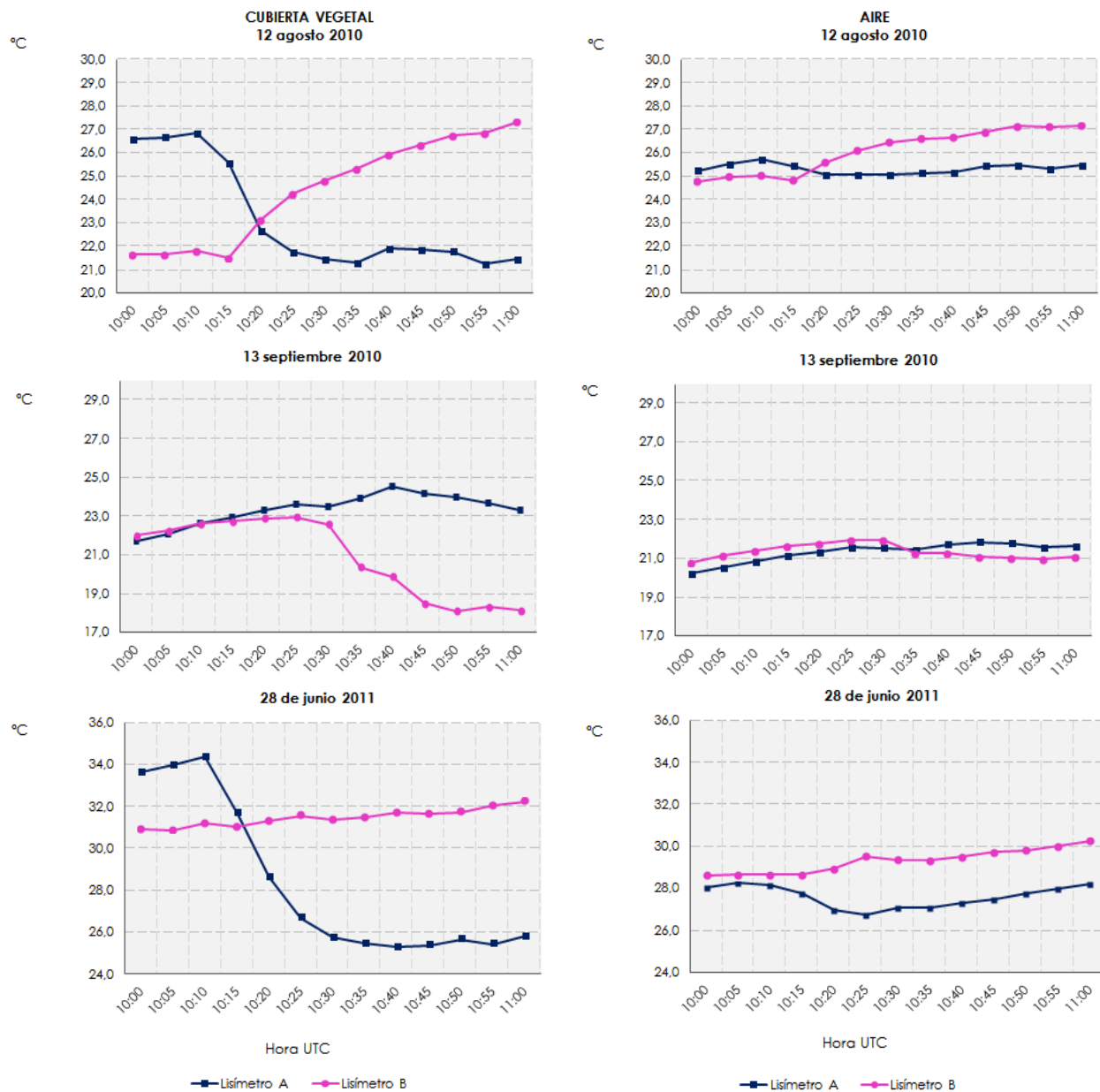


Figura 26. Evolución de la temperatura media de la cubierta vegetal y del aire en las parcelas lisimétricas a la hora de paso del satélite.

Tabla 5. Comparación de las temperaturas (°C) entre las parcelas lisimétricas y con los niveles digitales de la banda térmica del satélite Landsat (ND TM6) al paso del satélite (Tiempo Universal Coordinado)

Fecha	Hora UTC	Lisímetro A			Lisímetro B			Lisímetro B –Lisímetro A		
		T ^a cubierta	T ^a aire	ND TM6	T ^a cubierta	T ^a aire	ND TM6	T ^a cubierta	T ^a aire	ND TM6
12/08/2010	10:30	21.4	25.1	125	24.8	26.5	128	3.4	1.4	3
	10:35	21.3	25.1		25.3	26.6		4.0	1.5	
13/09/2010	10:30	23.5	21.5	132	22.6	22.0	128	-0.9	0.5	-4
	10:35	24.0	21.4		20.4	21.3		-3.6	-0.1	
28/06/2011	10:30	25.7	27.1	144	31.4	29.4	152	5.7	5.7	8
	10:35	25.5	27.1		31.5	29.4		6.0	6.0	

En cuanto a la variabilidad espacial de la temperatura en las parcelas lisimétricas (Figura 27), información de interés para los investigadores demandante del trabajo, la resolución de la banda térmica de Landsat no resulta suficiente pues difícilmente se tiene un píxel puro por parcela lisimétrica (120m de resolución espacial la banda térmica de Landsat 5). Sin embargo, la banda térmica sí presenta sensibilidad adecuada a los cambios de temperatura, tal y como puede apreciarse en la Figura X, cuando se comparan los ND de las parcelas lisimétricas con el que presentan otras parcelas colindantes a ellas que tienen diferentes coberturas.

En las imágenes disponibles, la banda térmica se presenta remuestreada a píxel de 25m para las imágenes de 2010 y de 30m para la de 2011. La variabilidad de valores de ND en las parcelas lisimétricas es muy diferente si el remuestreo se realiza por convolución cúbica o por vecino más próximo. En el primer caso encontramos más valores diferentes de ND que en el segundo, si bien el rango en el que se mueven es similar en ambos casos. La variabilidad observada en las imágenes obtenidas por convolución cúbica no corresponde con la variabilidad real de la temperatura en la parcela, sino que es fruto del modelo de asignación de los ND al remuestrear. Por el contrario, las imágenes obtenidas aplicando vecino más próximo son más fieles al valor real de ND antes del remuestreo (Figura 27).

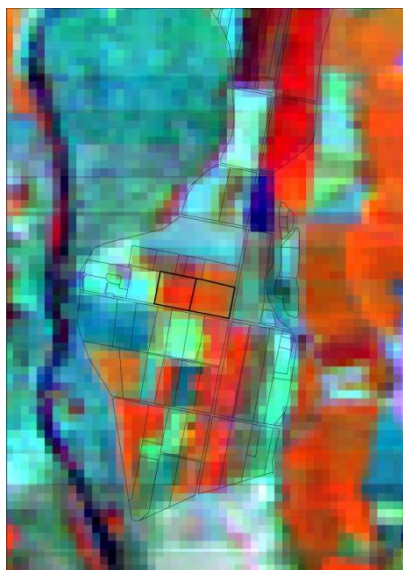
12 de agosto de 2010

13 de septiembre de 2010

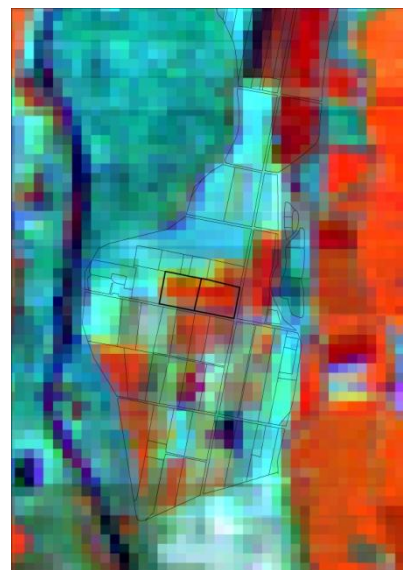
28 de junio de 2011



Píxel 25m

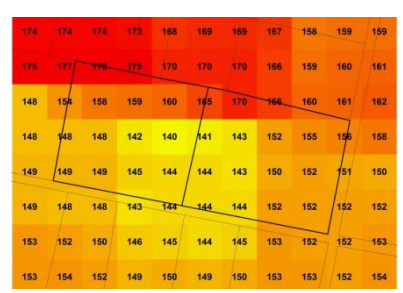
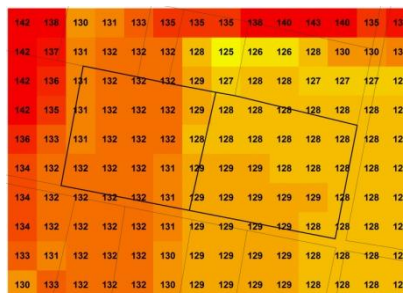
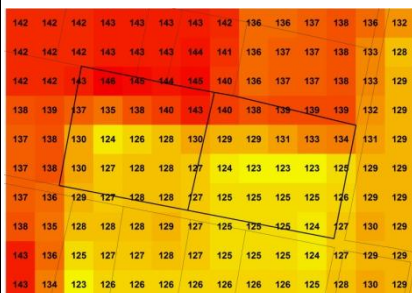


Píxel 25m

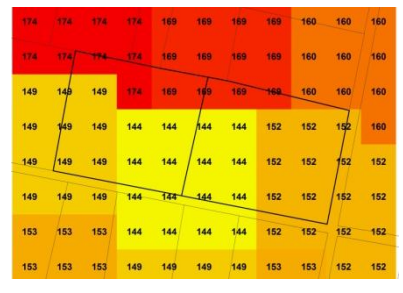
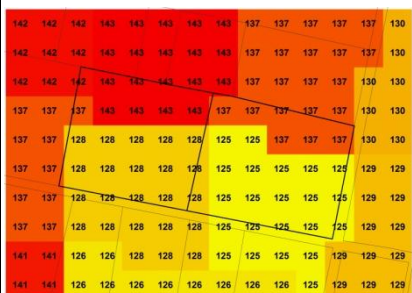


Píxel 30m

Landsat 5 RGB:453



Remuestreo por convolución cúbica



Remuestreo por vecino más próximo

Figura 27. Niveles digitales de la banda térmica de Landsat 5 en las parcelas lisimétricas (parcela A derecha y B izquierda).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las imágenes de satélite proporcionan información espacial y temporal actualizada del territorio de gran utilidad en la agricultura, ya que permite obtener información sobre condiciones estables y variables estacionalmente del cultivo, ayudando a la toma de decisiones sobre las prácticas a desarrollar para alcanzar mayor rentabilidad.

Las imágenes Landsat 5TM, Deimos y Landsat 8 utilizadas en este estudio, ya corregidas geométricamente y disponibles en el Plan Nacional de Teledetección y en el servidor Glovis, han supuesto un ahorro tanto en coste económico como en tiempo de tratamiento. Las imágenes han sido útiles para reconocer diferentes estados de desarrollo en los cultivos, así como para mostrar cuando se da, la variabilidad interparcelar y las variaciones de temperatura de la cubierta. Sin embargo, se han detectado algunas limitaciones que se detallan a continuación de cara a su incorporación como fuente de datos en ensayos agronómicos de riego en parcela.

La resolución temporal de las imágenes (16 días para Landsat) y disponibilidad para Deimos (mensual) unido a los problemas de nubosidad y huecos sin información en Landsat 7 supone una limitación en cuanto a disponibilidad deseable de imágenes, tanto en número como en fechas óptimas. Con un número mayor de imágenes de las utilizadas sería posible un estudio multitemporal más exhaustivo y una mejor discriminación y determinación de estados de desarrollo de los diferentes cultivos, permitiendo un seguimiento de la evolución del cultivo más continua, así como contar con información en periodos clave para los propósitos que se persiguen. Se recomienda por tanto, trabajar con una constelación de satélites, es decir aprovechar para una misma campaña de cultivo las imágenes útiles de los satélites Landsat y Deimos, así como otras de características similares a las que se tuviera acceso.

Otro aspecto a considerar es la resolución espacial de los satélites utilizados. Se constata que la resolución espacial de las bandas ópticas (20-30m) puede ser suficiente para el seguimiento del cultivo en parcelas con superficie mayor de 10ha. Sin embargo, resultan insuficientes cuando las parcelas son pequeñas, como es el caso de las parcelas lisimétricas (1 ha cada una), donde la muestra de píxeles incluye una proporción relevante de píxeles de borde. La resolución espacial de la banda térmica de Landsat 5 (120m) es insuficiente para los propósitos perseguidos. Además del tamaño de las parcelas, para el caso de estudio en cuestión donde los riegos presentan una uniformidad tan elevada, también se necesitarían imágenes de mayor resolución espacial que permitieran detectar cambios en la eficiencia de los aspersores.

Respecto a la resolución espectral, las imágenes utilizadas son adecuadas para el análisis de la variabilidad espacio-temporal del desarrollo del cultivo y de la variación de la temperatura de la cubierta vegetal.

Los índices espectrales utilizados permiten ver la variabilidad espacio-temporal del cultivo. Sin embargo, la saturación que tanto el NDVI como el GNDVI experimentan cuando el cultivo alcanza cierta cobertura foliar limita, al disponer en ocasiones únicamente de imágenes en fechas en las que el cultivo no está desarrollado y/o cuando el cultivo ya presenta buen desarrollo, las posibilidades de detección de la variabilidad del desarrollo del cultivo. Por su parte, el NDWI no es operativo para relacionar humedad del cultivo y riego pues al ser parcelas de regadío, si no hay problemas de suministro de riego que lleven a un estrés hídrico considerable, el cultivo presenta siempre buen estado hídrico.

A la vista de los resultados obtenidos sería interesante utilizar satélites con mayor resolución espacial y frecuencia orbital o imágenes provenientes de vuelos tripulados y/o no tripulados (UAV). Además de proporcionar mayor resolución espacial permitiría tener imágenes del momento que se desease, aunque el coste económico se incrementaría por la compra de las mismas. Así mismo, resultaría muy interesante probar otros índices espectrales y/o combinaciones de bandas que guardasen relación con estado hídrico de la planta, estrés, temperatura, etc. siendo conveniente en este caso contar con información hiperespectral.

En cuanto a la preparación de las imágenes, y dado que en este tipo de estudios se establecen relaciones a nivel de píxel entre variables derivadas de teledetección y variables agronómicas, se aconseja trabajar con imágenes en las que se haya aplicado el método del vecino más próximo en la corrección geométrica y remuestreo para variar lo menos posible la información original (niveles digitales) proporcionada por las imágenes.

La uniformidad del riego en las parcelas de estudio no ha permitido ver hasta qué punto las imágenes pueden mostrar variaciones e irregularidades debidas al riego. Para sacar conclusiones al respecto sería conveniente plantear ensayos específicos con diferentes uniformidades de riego en las que otras variables como manejo, suelo etc. fueran lo más homogéneas posible. Ello permitiría generar en las parcelas del ensayo una fuente de variabilidad debida principalmente al riego.

7. REFERENCIAS CONSULTADAS:

- Ballarin-Ferrer, D. (2012): Material didáctico de la asignatura "*Georreferenciación de imágenes de teledetección*". Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza. 112pp.
- Casterad, M.A. (2010): "1.8 Nuevas tecnologías de la información para la obtención de datos del territorio". pp.157-166. En Usón et al. (Ed.) *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Colección de casos docentes. Prensas Universitarias de Zaragoza. Lérida : Edicions de la Universitat de Lleida, 513 pp.
- Casterad, M.A. (2010): "Caso II.5.1. Teledetección en agricultura de precisión". pp.499-509. En Usón et al. (Ed.) *Tecnología de suelos: estudio de casos*. Colección de casos docentes. Prensas Universitarias de Zaragoza. Lérida : Edicions de la Universitat de Lleida, 513 pp.
- Chavez, P. S. (1996): "Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62 (9), pp.1025-1036.
- Chuvieco, E. (2010): *Teledetección ambiental*, 3ª edición revisada, Barcelona, Editorial Ariel 2010.
- Gao, B.C. (1996): "*NDWI- A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space*". *Remote Sensing of Environment*, 58, pp. 257-266.
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997): "Acerca de los índices de vegetación". *Revista de Teledetección*, Vol. 8, pp. 1-10.
- Gitelson, A., Kaufman, Y. y Merzlyak, M. (1996): "Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS". *Remote Sensing of Environment*, 58, pp. 289-298.
- Jackson, R.D., Slater, P.N. y Pinter, P.J. (1983): "*Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices thorough clear and turbid atmospheres*". *Remote sensing of the Environment*, Vol. 13, pp. 187-208.
- Jiménez Aguirre, M.T. (2013): "*Cartografía de suelos de la zona regable de Almudévar (Huesca) para la evaluación hidrológica de la modernización del regadío*". Trabajo final del Máster Universitario en Iniciación a la Investigación en Ciencias Agrarias y del Medio Rural, Universidad de Zaragoza. 63pp.
- Martínez, L. (2011): "*Incorporación de tecnologías de información territorial en una explotación agraria de secano para definición de unidades de manejo diferencial en las parcelas de cultivo*". Trabajo fin del Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección. Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. 69 pp.
- Martínez-Cob, A. Playán, E., ASCE M., Zapata N., Cavero J., Medina E. T., Puig M. (2008): "*Contribution of Evapotranspiration Reduction Turing Sprinkler Irrigation to Application Efficiency*". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6):745-756
- Pérez-Cabello, F. (2012): Material didáctico de la asignatura "*Tratamiento digital de las imágenes de satélite*". Máster en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza. 108pp.
- Portero, C. y Casterad, M.A. (1999): Influencia del tamaño de pixel en la definición de áreas de entrenamiento. *VIII Congreso Nacional de Teledetección*. Albacete-España, pp. 411-414.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. y Harlan, J.C. (1974) *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation*. Type III, Final Report, NASA/GSFC, Greenbelt, 371 pp.
- Sobrino, J.A. (2000). *Teledetección*. Guada impresiones S.L. Universidad de Valencia. 460 pp.
- Soil Survey Staff (1999): *Soil taxonomy Agriculture Handbook 436*, 2nd Ed., Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, D.C.

- Páginas Web:

Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). Ministerio de Fomento:
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Oficina del Regante del Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón:
<http://servicios.aragon.es/oresa/>

Sistema de Información Territorial de Aragón (SITAR): <http://sitar.aragon.es/>

USGS Gloval Visualization Viewer: <http://www.usgs.gov/>