



Universidad
Politécnica
de Cartagena



Máster Universitario en
Técnicas Avanzadas en Investigación y
Desarrollo Agrario y Alimentario

Estimación operacional de ET_{real} desde Landsat5 TM en zonas semiáridas

Alumno: José Ángel Martínez Pérez
Directores: Alain Baille y Sandra G. García Galiano

Cartagena, Julio de 2013

Resumen

Este trabajo presenta una metodología operacional para la estimación de evapotranspiración real (ET_{real}) en zonas semiáridas mediante el uso de índices de vegetación y parámetros de superficie (albedo, emisividad) derivados de imágenes satelitales (Lansat-5 TM). Las diferentes etapas son (i) aplicación de correcciones radiométricas (atmosféricas, topográficas, entre otras) a imágenes Landsat-5 TM (ii) y estimación de ET_{real} por medio de un método gráfico utilizando la relación entre la temperatura superficial (LST) y el índice de vegetación NDVI (diferencia normalizada). Las estimaciones de ET_{real} han sido validadas con medidas de ET_{real} llevadas a cabo con la técnica de covarianza de remolinos en dos parcelas de naranjos del Campo de Cartagena (España). Las estimaciones de ET_{real} en cada píxel se han incorporado en un Sistema de Información Geográfica. Las distribuciones espacio-temporales de ET_{real} y parámetros de vegetación resultantes, son de sumo interés para identificar zonas regadas con problemas de estrés hídrico y realizar recomendaciones de riego.

Palabras claves: Teledetección, Evapotranspiración real, SIG, Riego.

Abstract

The work presents an operational methodology for satellite retrieval evapotranspiration (ET_{real}) in semiarid areas, using vegetation indices and surface parameters (albedo, emissivity) from imagery Landsat TM-5. The different findings are (i) radiometric corrections to Landsat-5 TM images, (ii) estimation of ET_{real} by a graphical method using the relation between land surface temperature (LST) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). The results have been validated with measurements of ET_{real} from eddy covariance technique, in two parcels of orange trees in the Campo de Cartagena (Spain). The ET_{real} estimations at each pixel, have been developed by a Geographic Information System. The spatio-temporal distributions of ET_{real} and vegetation parameters are of great interest to identify water stress problems in irrigated areas and make general recommendations.

Keywords: Remote Sensing, retrieval evapotranspiration, GIS, Irrigation.

Agradecimientos.

Se agradece la financiación recibida (personal y equipos) de los siguientes Proyectos de I+D:

- "Sistema de ayuda a la decisión basado en teledetección para una gestión sostenible del riego en regiones con escasez de recursos hídricos", REDSIM. (<http://redsim.net/>). EC-DGE. Grant nº 241559
- "Uso sostenible del agua de riego en la Región Mediterránea", SIRRIMED. (<http://www.sirrimed.org/>). FP7-245159
- "Evaluación de Variabilidad Hidroclimática desde Combinaciones Multimodelo Climáticas Regionales", HYDROCLIM. CGL2012-39895-C02-01
- Agradecer también al Plan Nacional de Teledetección (Instituto Geográfico Nacional) la provisión de imágenes de satélite.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	METODOLOGIA	8
3.	ANTECEDENTES.	9
3.1.	Características de la vegetación captada por los sensores.....	9
3.2.	Estimación de ET_{real} a partir de imágenes de satélite	10
4.	DATOS Y SOFTWARE EMPLEADO.....	12
4.1.	Imágenes Landsat 5TM	12
4.2.	Producto Vapor de agua	13
4.3.	Turbidez atmosférica	13
4.4.	Temperatura del aire.....	13
4.5.	Modelo Digital de Elevaciones	14
4.6.	Información de parcelas de cultivo	15
5.	CORRECCION RADIOMÉTRICA Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS.....	16
5.1.	Corrección radiométrica.....	16
5.1.1.	Conversión de ND a reflectividades aparentes o temperatura de brillo	17
5.1.2.	Corrección óptica atmosférica.....	19
5.1.3.	Corrección de efectos de iluminación solar	20
5.1.4.	Corrección por emisividades.....	21
5.1.5.	Corrección térmica atmosférica	23
5.2.	Máscaras de nubes y nieve	25
5.3.	Máscaras de agua	26
5.4.	Obtención de otros parámetros biofísicos	26
6.	ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE ET_{REAL}	30
6.1.	Calculo de ET real instantánea.	30
6.1.1.	Cálculo de la fracción evaporativa.....	31
6.1.2.	Estimación de la Radiación Neta	32
6.1.3.	Cálculo del flujo del calor del suelo.	34
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	34
8.	CONCLUSIONES.	44
9.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	45
10.	BIBLIOGRAFÍA.	46

INDICE DE ANEXOS

Anexo I. Imágenes Landsat disponibles.....	50
Anexo II. Distribución de puntos de medida en parcelas.....	55
Anexo III. Flujo de trabajo del tratamiento de imágenes Landsat	57
Anexo IV. Ángulos cenitales, acimutales y distancias solares de imágenes Landsat procesadas	58
Anexo V. Mínimas radiancias correspondientes a las imágenes Landsat procesadas ...	60
Anexo VI. Estaciones agrometeorológicas consideradas.....	62
Anexo VII. Espacios LST-NDVI	64
Anexo VIII. Contraste de resultados medidos y estimados en parcela	66
Anexo IX. Distribuciones espaciales de ET_{real}	67
Anexo X. Análisis de clúster.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de calibración Landsat-5 TM (Chander et al., 2009).	18
Tabla 2: Coeficientes de calibración para k1 y k2 (Chander et al. 2009).....	19
Tabla 3: Fechas disponibles para la validación de datos.....	35
Tabla 4: Parámetros biofísicos obtenidos en la Ventana 2.	36
Tabla 5: Temperaturas máximas y mínimas.....	37
Tabla 6: MAE, MAPE y RMSE para ET_{real}	38
Tabla 7: Temperaturas máximas y mínimas ajustadas.....	39
Tabla 8: MAE, MAPE y RMSE ET_{real} ajustada.....	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cuenca del Río Segura: Mosaico Landsat combinación falso color, bandas 432. (Junio 2011).	7
Figura 2: Diagrama de flujo para la estimación de ET_{real}	8
Figura 3: Método para el cálculo de ET_{real} y su validación con datos de campo en la Parcela de Villa Antonia.	9
Figura 4: Firma espectral de la vegetación.	10
Figura 5: Representación del Espacio LST-NDVI.....	11
Figura 6: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de vapor de agua (28/06/2011) y (b) mapa de turbidez (Enero).	13

Figura 7: Cuenca del Río Segura: (a) distribución de las estaciones descargadas y (b) mapa de temperaturas medias (28/06/2011).....	14
Figura 8: Cuenca del Río Segura: Modelo Digital de Elevaciones.....	15
Figura 9: Imagen de torre de medidas de flujos.....	16
Figura 10: Flujo de trabajo para la corrección óptica atmosférica	20
Figura 11: Flujo de trabajo para el cálculo de emisividades.....	21
Figura 12: Cuenca del Río Segura: mapa de NDVI (Junio 2011).	22
Figura 13: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de fracción de cobertura y (b) mapa de emisividades (Junio 2011).....	23
Figura 14: Flujo de trabajo de la corrección térmica atmosférica.	24
Figura 15: Mapa de temperaturas superficiales. (28/06/2011).....	25
Figura 16: Esquema de tareas para la realización de máscara de nubes.....	26
Figura 17: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de albedo y (b) mapa EVI (Junio 2011)..	27
Figura 18: Espacio LST-NDVI (28/06/2011).	31
Figura 19: Cuenca del Río Segura: mapa de radiación de solar (Junio 2011).	33
Figura 20: Ventana 1: (a) Parcela A y (b) Parcela B.....	34
Figura 21: Ventana 2: (a) Parcela A y (b) Parcela B.....	35
Figura 22: Gráfico de correlación para Parcela A: LST-Temperatura cubierta vegetal...	36
Figura 23: Gráfico de correlación para Parcela A: (a) radiación de onda corta incidente y (b) radiación neta.	37
Figura 24: Cuenca del río Segura: Mapa de ET_{real} (a) fecha 10/09/2009 y (b) fecha 28/06/2011.	40
Figura 25: Histogramas de frecuencias para la Parcela A: (a) NDVI y (B) Fc para las fechas 08/05/2010 y 28/06/2011.....	41
Figura 26: Gráfico de dispersión para la Parcela A: LST-NDVI. (29/09/2010).	41
Figura 27: Gráfico de tendencias de ET_{real} para la Parcela A (29/09/2010).....	42
Figura 28: Mapa de hot spots y cold spots de ET_{real} para la Parcela A (29/09/2010)....	43
Figura 29: Mapas de polígonos Voronoi de ET_{real} de estadísticos para la Parcela A (a) media y (b) desviación típica. (29/09/2010)	44

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Río Segura, localizada en el Sureste de España, se caracteriza por sus fuertes contrastes climáticos que la convierten en una zona mayormente semiárida. El aumento progresivo de las demandas hídricas asociadas a la actividad económica y a la transformación del territorio junto con el impacto del cambio climático, contribuye a las frecuentes situaciones de escasez hídrica en esta región. La deficiencia hídrica por tanto, constituye una seria restricción en el desarrollo sostenible de la región. La Figura 1 presenta un mosaico en falso color de imágenes Landsat para la zona de estudio. Esta combinación de bandas 432, permite presentar la vegetación en colores rojizos y es posible identificar parcelas de cultivos en regadío con un color rojo intenso, tal y como se observa desde la figura de detalle del Campo de Cartagena.

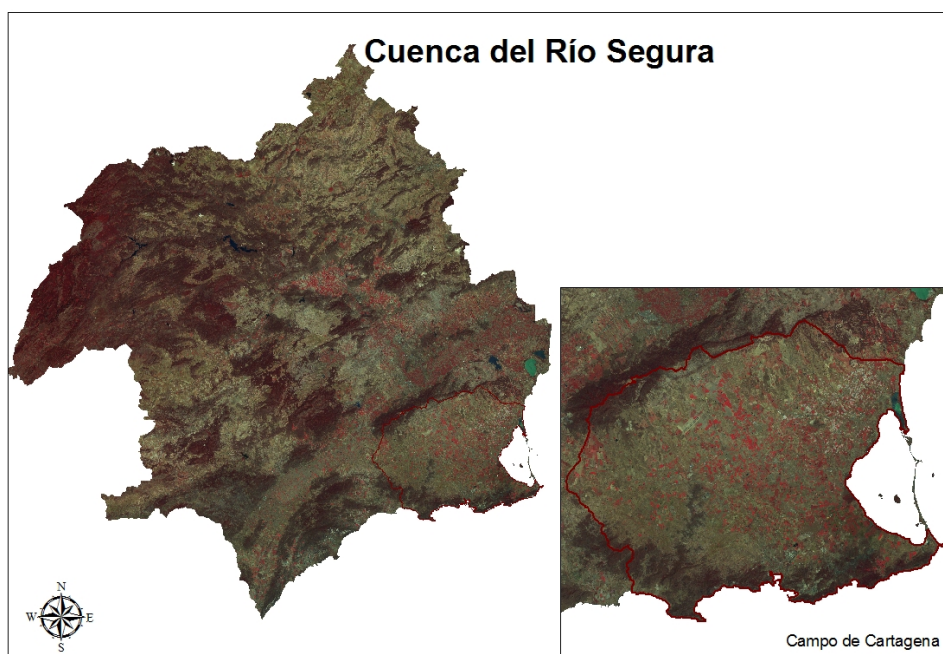


Figura 1: Cuenca del Río Segura: Mosaico Landsat combinación falso color, bandas 432. (Junio 2011).

En el seguimiento del estado de la vegetación y humedecimiento del suelo, la estimación de la evapotranspiración real (ET_{real}) juega un papel importante en la gestión eficiente del agua para regadíos. La teledetección permite la obtención operacional de la distribución espacial de ET_{real} , evitando equipar así a las parcelas de cultivo de estaciones de medida con sensores de alto coste económico.

En el presente trabajo, se plantea una metodología que permite una estimación de ET_{real} desde imágenes de satélite (sensor Landsat5 TM), que requiere un mínimo de datos *in situ*. Este tipo de imágenes, presenta una resolución espacial adecuada para

abordar trabajos a escala de parcelas de cultivo. La Figura 2 presenta el diagrama de flujo empleado para la estimación de la ET_{real} .

La metodología propuesta permite optimizar factores de producción agrícola, y proveer información de especial interés en planificación y gestión del agua a escala de parcela y de cuenca.

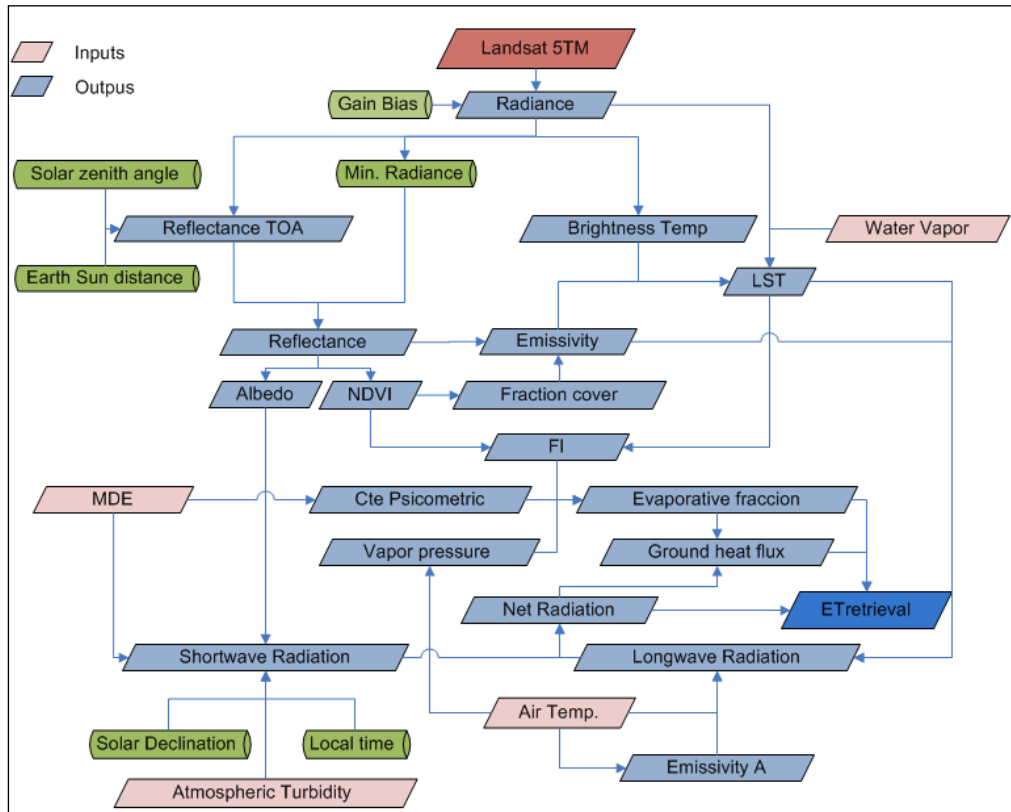


Figura 2: Diagrama de flujo para la estimación de ET_{real} .

2. METODOLOGIA

Para el cálculo de ET_{real} , el algoritmo utilizado ha sido el propuesto por Jiang e Islam (2001), basado en la interpretación del espacio LST vs NDVI, ambas variables obtenidas mediante teledetección. Este espacio, con forma triangular (o trapezoidal), presenta una relación lineal con los flujos superficiales de energía.

Para tal fin se realizan una serie de correcciones radiométricas a las imágenes Landsat-5 TM: atmosféricas, emisividades, y corrección topográfica en base a un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y sus atributos topográficos derivados para la corrección de efectos de iluminación solar.

Se obtienen LST (temperatura superficial), NDVI (índice de vegetación normalizada) y demás variables requeridas (albedo, fracción de cobertura vegetal y

emisividad, entre otras). Se emplean como datos auxiliares vapor de agua, temperatura del aire, turbidez atmosférica y atributos topográficos.

Las componentes del balance de energía, obtenidas a escala instantánea se han validado con observaciones de torres de medidas de flujos, en dos parcelas de cultivo del Campo de Cartagena (Villa Antonia y Casa Mulero). Así mismo, se han derivado distribuciones espaciales de distintos índices de vegetación y variables biofísicas. La Figura 3 presenta un esquema del método empleado y su validación con observaciones de torres de medidas de flujos, para la parcela de Villa Antonia.

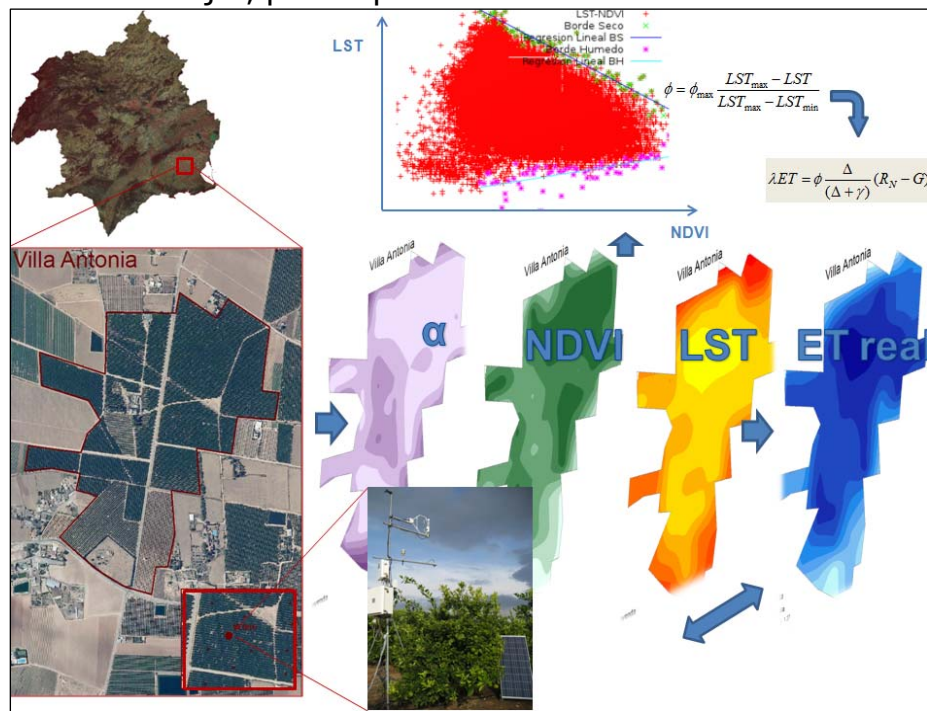


Figura 3: Método para el cálculo de ET_{real} y su validación con datos de campo en la Parcela de Villa Antonia.

3. ANTECEDENTES.

3.1. Características de la vegetación captada por los sensores

En teledetección pueden destacarse tres componentes principales: el sensor, el objeto observado y los flujos de energía. En particular, la fracción de energía radiativa reflejada (reflectancia) es de especial relevancia para las aplicaciones prácticas.

El flujo de energía reflejada depende entre otros, de variables atmosféricas y de las características espectrales del suelo y de la vegetación. Las propiedades espectrales de la vegetación dependen de (Pinilla, 1999):

- la cubierta vegetal: índice foliar, orientación de las hojas, distribución y tamaño.

- las propiedades ópticas de los elementos reflectantes (tallos, hojas, flores y frutos),y
- la geometría de la observación (orientación relativa sol-superficie y de la situación del sensores con respecto a esta).

No obstante, son las hojas las responsables de la respuesta espectral de las cubiertas vegetales. En el alto porcentaje, serán las determinantes de la signatura espectral de la cubierta.

La firma espectral de una masa de hojas, Figura 4, presenta tres zonas diferenciadas del espectro electromagnético: el visible, el infrarrojo próximo y el infrarrojo medio.

- En el visible la reflectancia es baja y también la transmitancia, debido la absorción de pigmentos fotosintéticos (clorofila, xantofila, antocianinas y carotenos).
- En el infrarrojo próximo, las hojas presentan una meseta alta de reflectancia (alrededor de 50%). El resto de energía es transmitida
- En el infrarrojo medio, el agua marca su presencia en las hojas produciendo fuertes bandas de absorción en la signatura resultante.

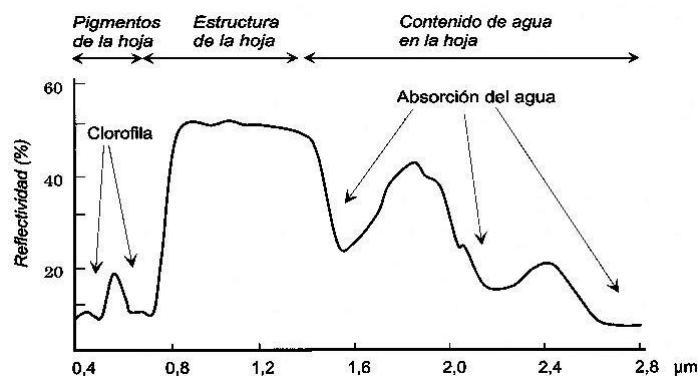


Figura 4: Firma espectral de la vegetación.

3.2. Estimación de ET_{real} a partir de imágenes de satélite

Entre los diferentes métodos para estimar ET_{real} basándose en datos de teledetección, se distinguen los modelos llamados "residuales" y los métodos gráficos. Los algoritmos residuales determinan ET como el término residual del balance de energía superficial. Este balance se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_N = \lambda ET + H + G + PH \quad (1)$$

Siendo R_N la radiación neta, λET el flujo de calor latente o evapotranspiración (siendo λ el calor latente de vaporización y ET el flujo de agua evaporada), H el flujo de calor sensible G el flujo del calor por conducción a la superficie (o flujo de calor del suelo) y PH la energía utilizada en el proceso la fotosíntesis. El orden de magnitud de PH es generalmente muy pequeño, por lo que se puede despreciar.

Con el fin de estimar el término de flujo de calor latente o evapotranspiración (Choudhury *et al*, 1994), se utiliza la "ecuación residual":

$$\lambda ET = R_N - G - H \quad (2)$$

que permite estimar la evapotranspiración como el residuo de la ecuación del balance de energía superficial. Dentro de los algoritmos derivados del *método residual*, destacan el método simplificado (SM), modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), modelo TSEB (Two Source Energy Balance)

Los métodos gráficos estiman directamente la fracción evaporativa $EF = \lambda ET / (R_N - G)$, permite obtener la evapotranspiración real con la siguiente relación:

$$\lambda ET = EF \cdot (R_N - G) \quad (4)$$

Son algoritmos basados en el diagnóstico del espacio LST vs NDVI, ambas variables obtenidas mediante teledetección.

El método empleado en este trabajo es método gráfico propuesto por Jiang and Islam (JIC, 2001). Se asume que el interior de espacio LST vs NDVI con forma del triangular (o trapezoidal), Figura 5, delimitado por la distribución de los píxeles en ese espacio, tiene una relación lineal con los flujos superficiales de energía. El análisis de este espacio, permite identificar dos rectas delimitando (i) condiciones de suelo seco (LSTmax), y (ii) otra correspondiente a condiciones no limitantes de agua (LSTmin).

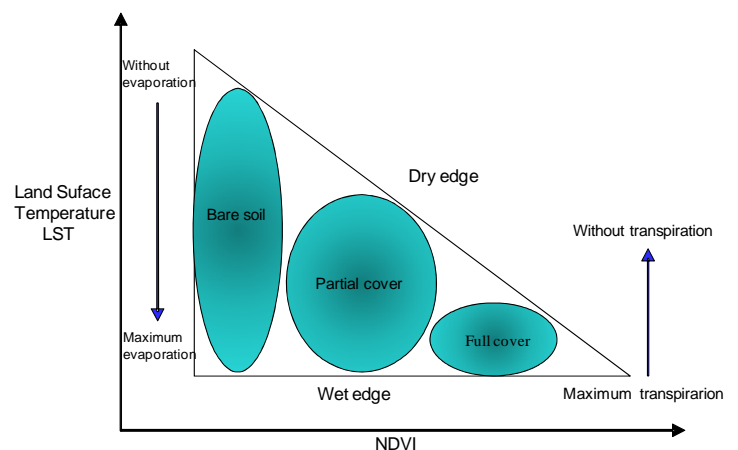


Figura 5: Representación del Espacio LST-NDVI (Sandholt *et al.*, 2002)

La magnitud relativa de los píxeles dentro del espacio triangular/trapezoidal refleja la variación de la fracción evaporativa superficial como resultado de la variación espacial de la humedad superficial del suelo y de la vegetación.

4. DATOS Y SOFTWARE EMPLEADO

En este estudio se ha trabajado con la siguiente información:

- Imágenes del satélite Landsat 5TM para los años 2009-2011.
- Producto Vapor del agua desde TERRA MODIS (MOD05 L2).
- Datos de temperatura del aire desde estaciones agrometeorológicas.
- Imágenes de turbidez atmosférica desde el proyecto SoDa.
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
- Información de parcelas de cultivo de torres de medidas de flujo.

Esta información ha sido integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando el software GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) versión 6.4.2, bajo licencia GPL (software libre). Los algoritmos presentados, se han integrado en la herramienta SORPRESA (Sistema Operacional Regional de PRevisión de Efectos de Sequías Agudas, García Galiano *et al.*, 2007), embebida en dicho sistema, desarrollada para el seguimiento de zonas de riego y condiciones de sequía mediante teledetección.

4.1. Imágenes Landsat 5TM

Las imágenes Landsat se han descargado del Plan nacional de Teledetección (PNT) coordinado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), vía ftp (<http://www.ign.es/PNT/index.html>) procedentes de los servidores U.S. Geological Survey (USGS) y EURIMAGE. Estas imágenes están corregidas geométricamente en el sistema referencia ETRS-89 UTM Huso 30. Poseen 6 bandas multispectrales con una resolución espacial de 30 m, una banda térmica de 120 m de tamaño de celda, una resolución espacial de 16 días, y remuestreadas a 25 m. (por convolución cúbica o vecino más próximo). Las Escenas empleadas correspondientes a la cuenca son: 199-33, 199-34, 200-33, y 200-34 y la 199-35. Se han procesado 90 imágenes, pero debido a problemas de diferente índole (nubes, errores de captura...), finalmente se ha

trabajado con 10 imágenes correspondiente a la escena 199-34 para la validación con datos de campo.

4.2. Producto Vapor de agua

El producto TERRA MODIS de vapor de agua Level 2, MOD05_L2, (Gao y Kaufman, 1998), está considerado muy preciso y disponible desde el año 2000. El modelo empleado para su estimación (*algorithm near-infrared*) ofrece datos de vapor de agua diarios, con una resolución temporal de 1km, que serán empleados para la corrección atmosférica de imágenes Landsat, ya que pasa sobre la Península a una hora similar. La Figura 6(a) presenta un ejemplo de imagen de vapor agua (gr/cm^2) para la fecha 28/06/2011.

4.3. Turbidez atmosférica

En el modelo utilizado para el cálculo de la radiación solar incidente, se emplean medias mensuales del factor de turbidez de Linke del mapa mundial (Remund *et al.*, 2003) generado en el proyecto SoDa (Integration and exploitation of networked Solar radiation databases for environment monitoring). La Figura 6(b) presenta un mapa del factor de turbidez de Linke correspondiente al mes de enero.

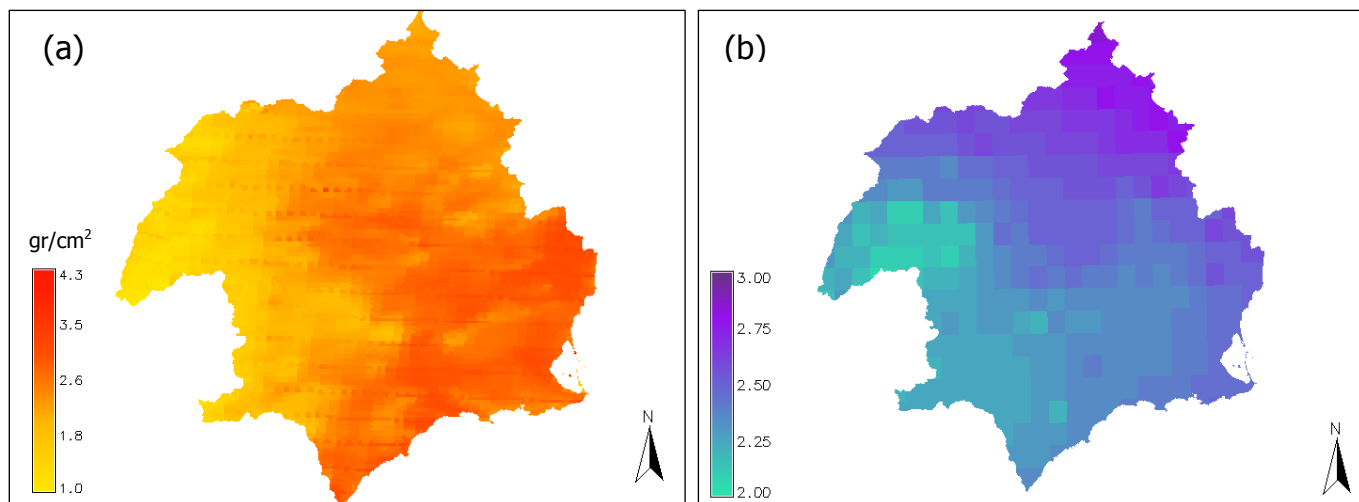


Figura 6: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de vapor de agua (28/06/2011) y (b) mapa de turbidez (Enero).

4.4. Temperatura del aire

Los datos de temperatura del aire han sido descargados de las web de los sistemas de información agrometeorológicos correspondientes a la porción de cada Comunidad Autónoma que pertenece a la Cuenca:

- Instituto de Investigaciones Agrarias de la Generalitat Valenciana (IVI)
- Sistema de Información Agraria de Murcia (SIAM)
- Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla la Mancha (SIAR)
- Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de la Junta de Andalucía.

El Anexo VI presenta el listado de estaciones consideradas y sus coordenadas UTM. Estos datos serán empleados para el cálculo de la presión de vapor saturado a temperatura ambiente, y emisividad atmosférica.

En la Figura 7(a) se presenta la distribución espacial de las estaciones meteorológicas procesada y en la Figura 7(b) un mapa de temperaturas diarias calculado mediante interpolación por splines.

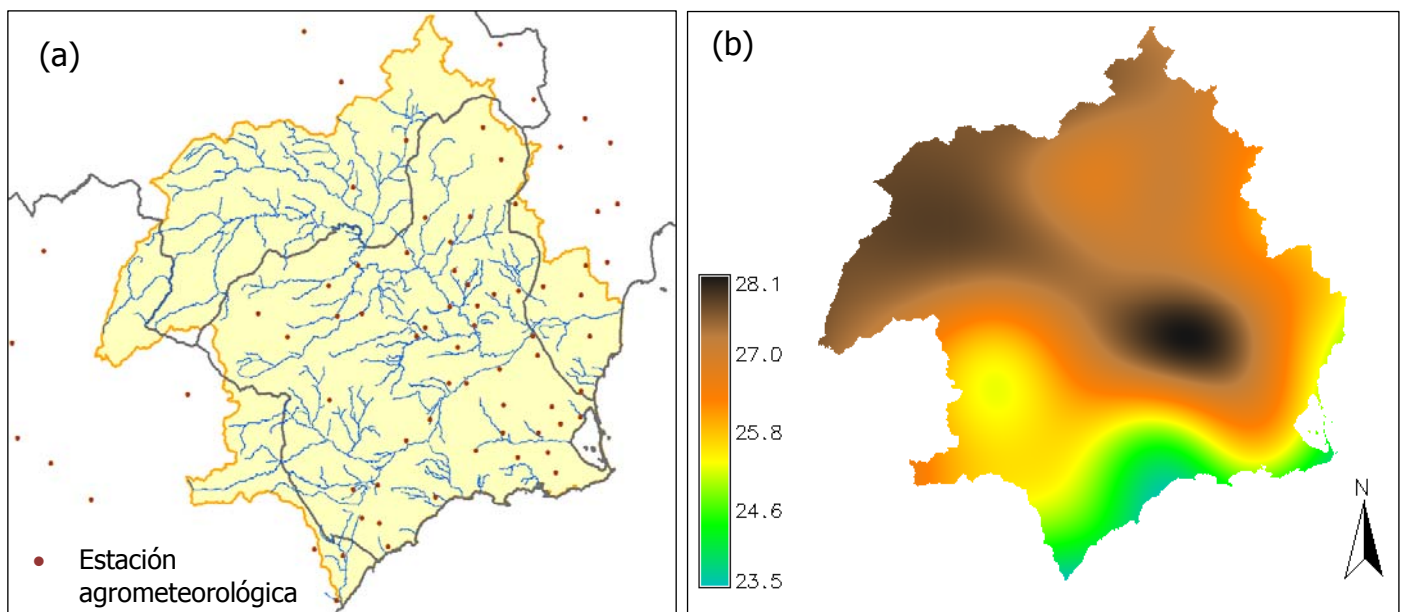


Figura 7: Cuenca del Río Segura: (a) distribución de las estaciones descargadas y (b) mapa de temperaturas medias (28/06/2011).

4.5. Modelo Digital de Elevaciones

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con un tamaño de píxel de 20 m., remuestreado a un tamaño de 25 m. (Figura 8), se han calculado el mapa de pendientes y el de orientaciones de pendientes (mapa de aspecto). Estos datos serán "inputs" en el cálculo de la radiación neta de onda corta.

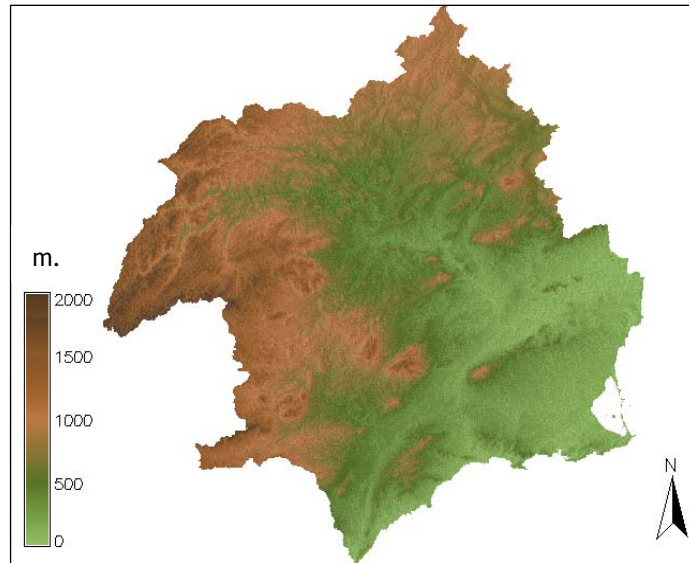


Figura 8: Cuenca del Río Segura: Modelo Digital de Elevaciones.

4.6. Información de parcelas de cultivo

Se dispone de dos parcelas experimentales situadas en la comarca agraria del Campo de Cartagena: Villa Antonia (Parcela A) y Casa Mulero (Parcela B). A continuación se presentan algunas de las características de las parcelas:

- En la parcela A, los árboles son naranjos (*Citrus sinensis* cv. Navelate), de 30 años de edad, regados por goteo, con marco de plantación de 6 m x 4 m, e índice de área foliar (IAF) del orden de 5.
- En la Parcela B, los árboles son naranjos (*Citrus sinensis* cv. Navel Powell) de 6 años de edad, regados por goteo con marco de plantación de 4,5 m x 3 m, e IAF del orden de 3.

En el Anexo III se presenta una imagen aérea de las parcelas.

Los árboles son regados al 100% de la evapotranspiración estándar del cultivo, ET_c , a lo largo de todo el año. ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración de referencia, ET_o , y el coeficiente de cultivo para naranjos propuesto por la FAO (Allen et al., 1998).

Ambas parcelas están equipadas con torres de flujos que miden directamente y en continuo ET_{real} a escala de 30 minutos con la técnica de covarianza de remolinos (eddy-covariance), además de otras variables de superficie como flujo de calor sensible, intercambio de CO_2 , radiación neta y temperatura superficial de la vegetación y del suelo

- Variables microclimáticas (medidas a 1,5 m por encima de las copas de los árboles): temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar (RG, Kipp & Zonen pyranometer CMP3, Delft, the Netherlands) y temperatura de la cubierta vegetal (Tc, Apogee infrared thermometer (IRT), Logan, Utah, USA).
- Flujo de energía. El flujo de calor del suelo se mide por medio de dos placas de flujo de calor (REBS, model HFT-3.1, Seattle, WA, USA) enterrados a 5 mm por debajo de la superficie cerca de un gotero (bulbo húmedo) y en medio de la fila (suelo seco) respectivamente. Los flujos de calor sensible, latente y CO₂ se midieron a 1,5 m por encima de los árboles por el sistema eddy-covariance que comprende un Campbell Scientific Inc. (Logan, UT, EE.UU.)



Figura 9: Imagen de torre de medidas de flujos.

- Velocidad del viento mediante anemómetro sónico de alta frecuencia CSAT-3 (10 Hz) de medición velocidad del viento 3D y temperatura virtual sónica.
- Porcentaje mezcla de CO₂ y H₂O mediante analizador de infrarrojo de gases LICOR (Lincoln, NE, EE.UU.) LI-7500 de camino abierto de forma absoluta a 10 Hz.

Estas medidas se emplean para validar los resultados obtenidos desde imágenes de satélite.

5. CORRECCION RADIOMÉTRICA Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS.

5.1. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica tiene como finalidad obtener la radiancia y reflectancia planetaria ya que la energía electromagnética (emitida o reflejada) observada por el sensor no coincide con la energía emitida o reflejada del mismo objeto observado. Esto es debido a distorsiones radiométricas debidas a la elevación del Sol, a

las condiciones atmosféricas tales como la niebla o aerosoles, a la respuesta del sensor que influyen la energía observada, etc., por lo que deben ser corregidas.

Para el tratamiento de las imágenes Landsat-5 TM, se han seguido las especificaciones del documento desarrollado por Chuvieco y Hantson (2010). De forma resumida el trabajo llevado a cabo se podría estructurar en los siguientes bloques:

- Conversión de niveles digitales (ND) en reflectividades aparentes o temperaturas de brillo.
- Corrección óptica atmosférica: paso de reflectividades a nivel de suelo.
- Corrección por iluminación solar de reflectividades.
- Corrección por emisividades.
- Corrección térmica atmosférica.

5.1.1. Conversión de ND a reflectividades aparentes o temperatura de brillo

Esta tarea se compone de tres pasos:

- Transformación de ND a radiancias: se aplica a todas las bandas.
- Transformación de radiancias a reflectividades aparentes (excepto banda 6).
- Transformación de radiancias a temperatura de brillo.
- ***Paso de niveles digitales a radiancias.***

Se calculan las radiancias a partir de los coeficientes de calibración del sensor, empleando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times ND + B_{rescale} \quad (5)$$

donde:

- L_{λ} : radiancia espectral obtenida por el sensor ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).
- ND : niveles digitales de la imagen.
- $G_{rescale}$: ganancia.
- $B_{rescale}$: sesgo.

Para las imágenes procedentes de USGS se aplican los parámetros dados en los metadatos, que coinciden con los aportados por Chander *et al.* (2009), obtenidos a partir de las nuevas curvas de calibración radiométricas temporales (Tabla 1).

Tabla 1: Parámetros de calibración Landsat-5 TM (Chander et al., 2009).

L5 TM Sensors (LPGS) Q calmin =1 Q calmax=255							
Bands	Spectral Range	Center Wavelength	LMIN λ	LMAX λ	Grescale	Brescale	ESUN λ
Units	μm	μm	W/(m ² sr μm)		(W/m ² sr μm)/DN	W/(m ² sr μm)	W/(m ² μm)
1	0.452-0.518	0.485	-1.52	169	0.671339	-2.19	1983
2	0.528-0.609	0.569	-2.84	333	1.32205	-4.16	1796
3	0.626-0.693	0.660	-1.17	264	1.043976	-2.21	1536
4	0.773-0.904	0.840	-1.51	221	0.876024	-2.39	1031
5	1.567-1.784	1.676	-0.37	30.2	0.120354	-0.49	220
6	10.45-12.42	11435	1.2378	15.303	0.055376	1.18	N/A
7	2.097-2.349	2.222	-0.15	16.5	0.65551	-0.22	83.44

- **Paso de radiancias a reflectividades aparentes .**

Una vez obtenidas las radiancias espectrales por el sensor se puede calcular la reflectividad aparente (TOA) con la siguiente fórmula (Chander et al., 2009):

$$\rho_{\lambda TOA} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (6)$$

donde:

- d : distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresado en unidades astronómicas (ua)¹.
- L_{λ} : radiancia espectral, calculada como en el punto anterior.
- $ESUN_{\lambda}$: irradiancia espectral exoatmosférica solar².
- θ_s : ángulo cenital solar.

$ESUN_{\lambda}$ está recogido en la Tabla 1 previa, y los parámetros d y el ángulo cenital solar se definen en los metadatos de la propia imagen (presentados en el Anexo IV).

- **Paso de radiancias a temperatura de brillo.**

La temperatura de brillo, se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{sensor} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{sensor}} + 1\right)} \quad (7)$$

siendo:

- L_{sensor} : radiancia obtenida en el sensor.
- T_{sensor} : temperatura de brillo (en K).
- K_1 : constante de calibración 1 (W·m⁻²·sr⁻¹· μm^{-1}).

¹ ua: unidad de longitud que equivale aproximadamente a la distancia media entre el planeta Tierra y el Sol

² corregida de las variaciones inter-anales de la distancia Tierra-Sol

- K_2 : constante de calibración 2 (en K).

En la Tabla 2 se exponen los coeficientes de calibración Landsat-5 TM:

Tabla 2: Coeficientes de calibración para k_1 y k_2 (Chander et al. 2009)

Constant	K1	K2
Units	W/(m ² sr μm)	Kelvin
L5 TM	607.76	1260.53

5.1.2. Corrección óptica atmosférica

En primer lugar, se calculan las mínimas radiancias, que es la radiancia recibida por el sensor en un área donde sólo hay contribución de la atmósfera (área de sombra o agua según la región espectral). Para su estimación, se utiliza el valor mínimo de ND del histograma, eligiéndose el primero que supere la cantidad de 200 píxeles. Las mínimas radiancias (L_a), calculadas para cada banda, se recogen en el Anexo V.

Con esa radiancia se corrige la señal recibida por el sensor de la influencia y distorsiones radiométricas causadas por la atmósfera. Se ha optado por el modelo del objeto oscuro, desarrollado por Chavez (1996).

El modelo considera la transmisividad de la atmósfera en el camino Sol-Tierra y la dispersión atmosférica, pero ignora la irradiación difusa y la transmisividad de la atmósfera en el camino tierra-sensor. Su expresión es la siguiente:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot [L_\lambda - L_a] \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cos \theta_s \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} \quad (8)$$

donde:

- ρ : reflectividad.
- $ESUN_\lambda$: irradiancia exoatmosférica solar (en $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$).
- τ_1 : coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Sol-Tierra.
- τ_2 : coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Tierra-sensor.
- L_a : radiancia recibida por el sensor en un área donde sólo hay contribución de la atmósfera (área de sombra o agua según la región espectral).
- L_λ : radiancia del píxel a corregir.
- θ_s : ángulo cenital solar y d la distancia Tierra-Sol, en unidades astronómicas.

Para τ_1 se emplean los valores estándar (0.70, 0.78, 0.85 y 0.91) dados por Chavez (1996) para las bandas 1-4, respectivamente, y (0.95 y 0.97) para banda 5 y 7,

propuestos por Gilabert *et al.* (1994). Se trata de una estimación de transmisión atmosférica con valores estándar. Para los valores de τ_2 se considera $\cos \theta_s$, siendo θ_s el ángulo cenital del sensor. Sería 1 para imágenes Landsat, ya que la observación es siempre vertical.

La Figura 10, presenta el flujo de trabajo seguido para la corrección óptica atmosférica.

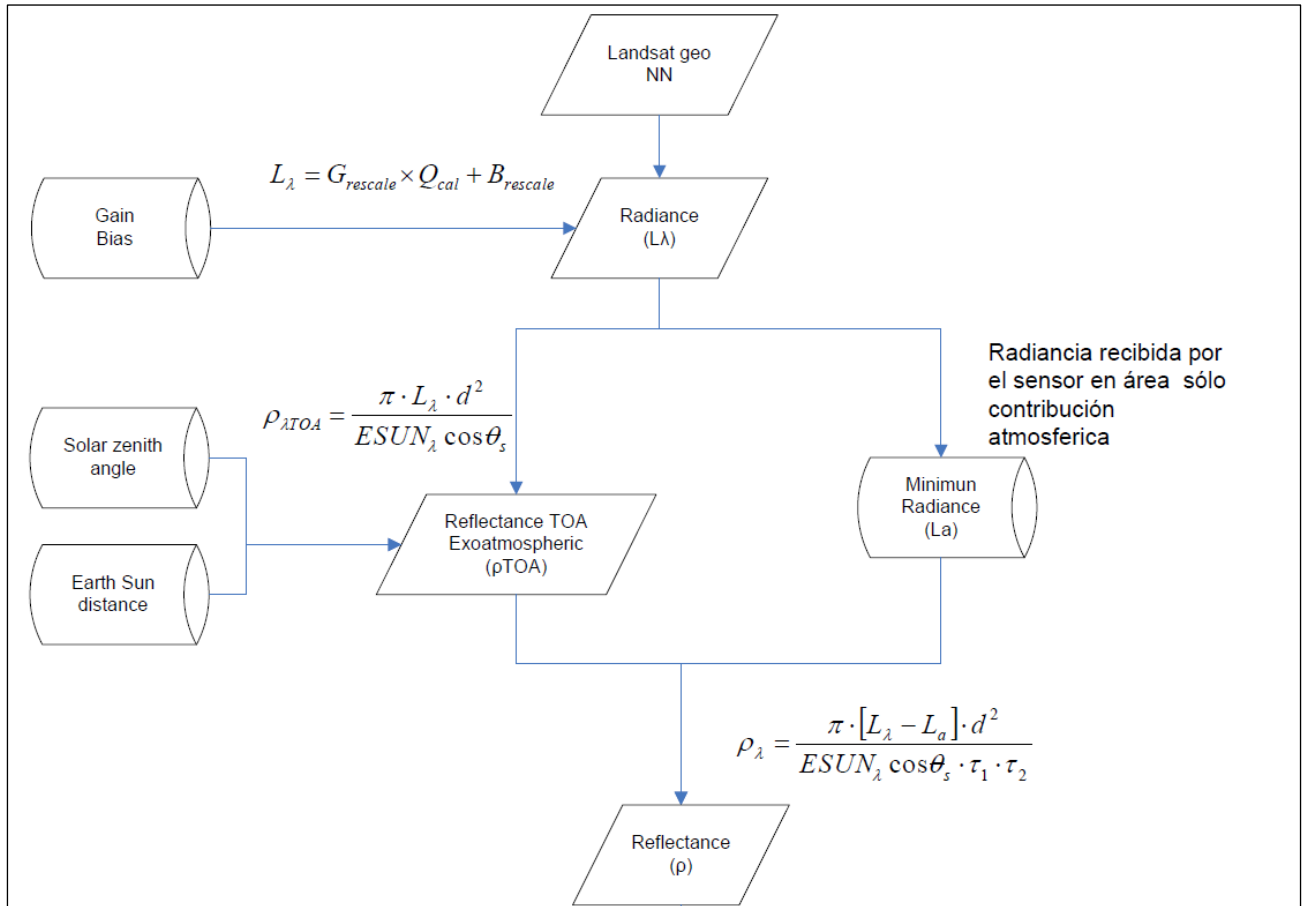


Figura 10: Flujo de trabajo para la corrección óptica atmosférica

5.1.3. Corrección de efectos de iluminación solar

El método a aplicar es un método solamente estadístico, pero que no sobrecorriga las imágenes. El método empírico estadístico está descrito por el siguiente algoritmo (Chuvieco y Hantson, 2010):

$$\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \cos \gamma_i m_\lambda - b_\lambda + \bar{\rho}_{\lambda,i} \quad (9)$$

donde:

- $\rho_{\lambda,h,i}$: reflectividad de un píxel en terreno horizontal.

- $\rho_{\lambda,i}$: reflectividad de un píxel en terreno en pendiente.
- $\bar{\rho}_{\lambda,i}$: reflectividad promedio de todos los $\rho_{\lambda,i}$.
- γ_i : ángulo de incidencia en un píxel i .
- b_λ : ordenada en el origen de la regresión lineal en entre γ_i y $\rho_{\lambda,i}$.
- m_λ : pendiente de la regresión lineal entre γ_i y $\rho_{\lambda,i}$.
- **Cálculo del ángulo de incidencia**

Para los algoritmos de corrección topográfica avanzadas se necesitan como datos de entrada el ángulo de incidencia de cada píxel. Este ángulo se calcula a partir del MDE, y los ángulos cenital y azimutal, utilizando los pixeles vecinos con la fórmula estándar (Colby, 1991):

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_s \cos \eta_i + \text{sen} \theta_s \text{sen} \eta_i \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (10)$$

siendo:

- ϕ_a : ángulo acimutal solar.
- ϕ_o : ángulo de orientación de la pendiente.
- θ_s : ángulo cenital solar.
- η_i : pendiente del terreno en un píxel i .
- γ_i : ángulo de incidencia en un píxel i .

5.1.4. Corrección por emisividades.

La Figura 11 siguiente presenta el flujo de trabajo en el cálculo de emisividades.

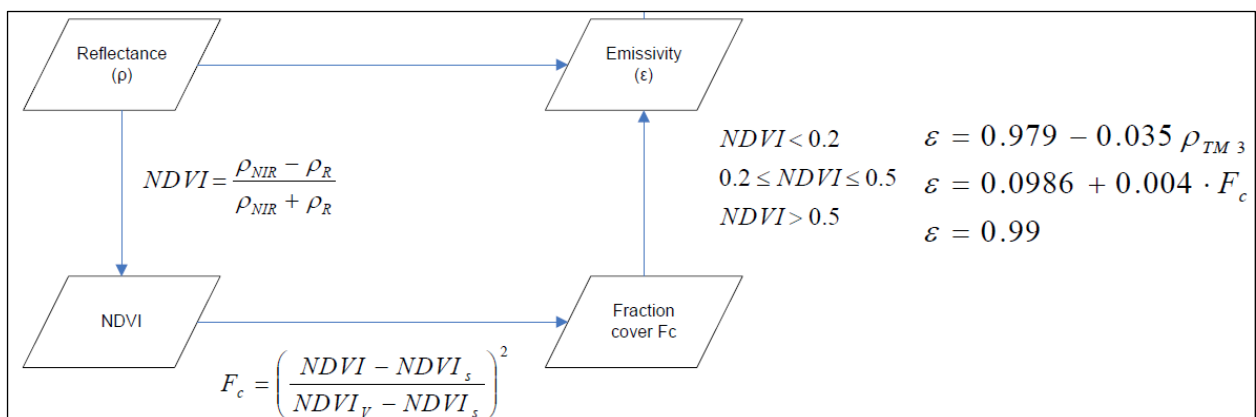


Figura 11: Flujo de trabajo para el cálculo de emisividades.

La corrección por emisividades se puede dividir en los siguientes pasos:

- Cálculo del NDVI

- Cálculo de la proporción de la cubierta vegetal
- Cálculo de emisividades.
- **Cálculo del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)**

NDVI es un índice derivado de las medidas de los valores de la reflectancia en la banda roja (banda 3) y el infrarrojo próximo (banda 4) del espectro electromagnético que describe la cantidad relativa de biomasa de una región a otra (Rouse *et al.*, 1974). Se calcula mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \quad (11)$$

donde:

- ρ_{NIR} : reflectancia en la banda 4 (Infrarrojo Cercano)
- ρ_R : reflectancia en la banda 3 (Rojo)

El NDVI puede adquirir valores comprendidos entre -1 y 1. El valor 0 corresponde a suelo completamente desnudo sin vegetación y el valor 1 (suelo con una cubierta de biomasa máxima. Valores negativos indicaría la presencia de lámina de agua. Un ejemplo de la estimación de NDVI desde imágenes Landsat se presenta en la Figura 12, para la Cuenca del río Segura, como un mosaico para el mes de Junio.

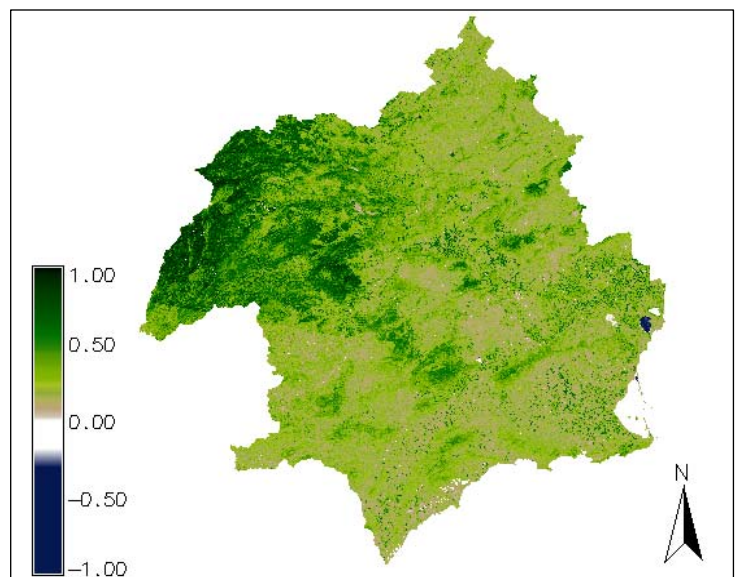


Figura 12: Cuenca del Río Segura: mapa de NDVI. Mosaico Landsat (Junio 2011).

- **Cálculo de la fracción de cubierta vegetal**

La fracción de cubierta vegetal (F_c), se puede estimar a partir de NDVI con la siguiente ecuación (Sobrino *et al.*, 2008):

$$F_c = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (12)$$

donde los valores de $NDVI_v = 0.5$ and $NDVI_s = 0.2$ fueron propuestos por Sobrino y Raissouni (2000) para una aplicación global. Para obtener valores consistentes de F_c , se tiene que dar el valor 0 en el caso que $NDVI < NDVI_s$ y darle el valor 1 en el caso de píxeles donde $NDVI > NDVI_v$. Las zonas urbanas se tratarán como si fuera un suelo desnudo. Un ejemplo de la estimación de F_c , se presenta en la Figura 13 (a) para la Cuenca del Río Segura.

- **Cálculo de emisividad.**

Para el cálculo de la emisividad, se emplea la reflectividad en la banda 3 y la proporción de cubierta vegetal obtenida a partir del NDVI, considerando las siguientes formulaciones (Sobrino *et al.*, 2008):

$$\begin{aligned}
 NDVI < 0.2 & \quad \varepsilon = 0.979 - 0.035\rho_{TM3} \\
 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 & \quad \varepsilon = 0.0986 + 0.004 \cdot F_c \\
 NDVI > 0.5 & \quad \varepsilon = 0.99
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

donde:

- ρ_{TM3} : reflectancia en la banda 3
- F_c : proporción de la cubierta vegetal

Ejemplo del cálculo de la emisividad es mostrado en la Figura 13 (b).

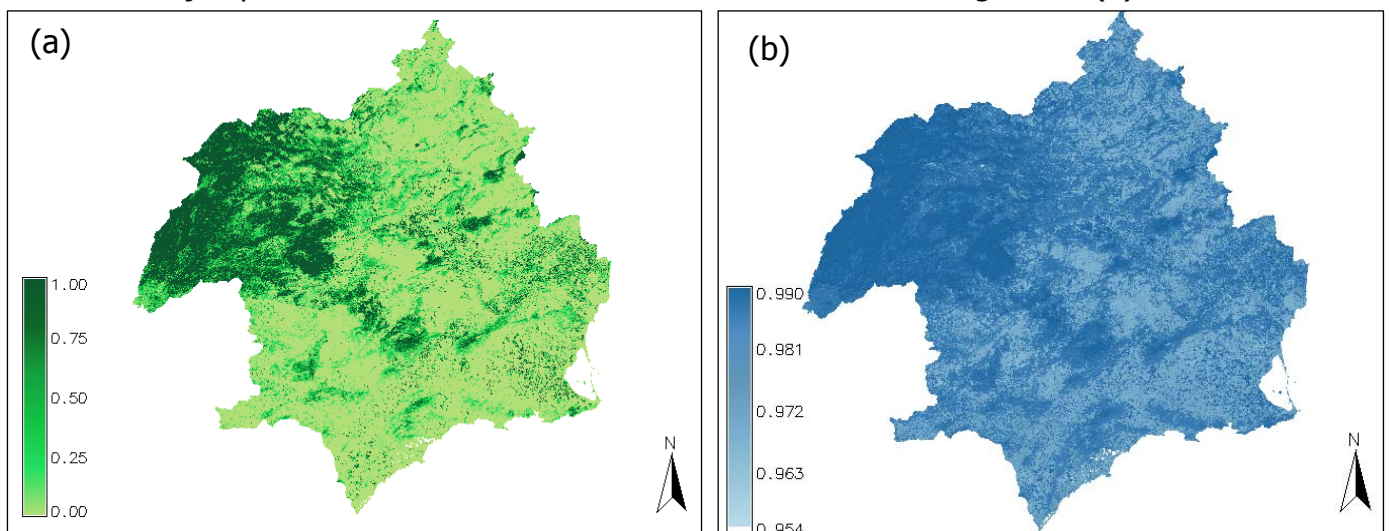


Figura 13: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de fracción de cobertura y (b) mapa de emisividades (Junio 2011). Mosaico Landsat.

5.1.5. Corrección térmica atmosférica

Para acometer la corrección atmosférica térmica los pasos a realizar son los siguientes:

- Cálculo de funciones atmosféricas para corrección por vapor de agua.
- Estimación de la temperatura de superficie.

El flujo de trabajo se esquematiza en la Figura 14 siguiente.

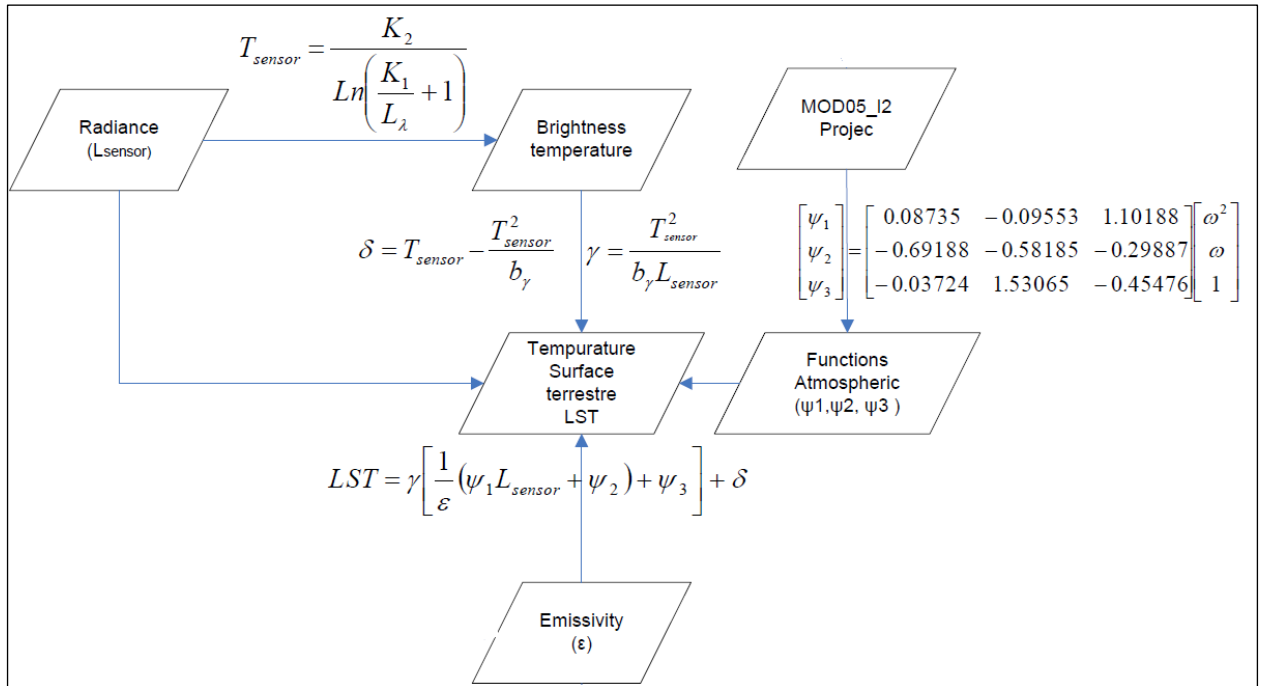


Figura 14: Flujo de trabajo de la corrección térmica atmosférica.

- **Corrección por vapor de agua**

Debido a que Landsat presenta una banda térmica, se lleva a cabo la corrección atmosférica por influencia de vapor de agua (necesaria para obtener LST). Pero se tiene que recurrir a datos externos para la estimación del vapor de agua, en este caso se emplea el producto MOD05_L2 provista por el sensor MODIS TERRA.

Los coeficientes para la estimación de las funciones atmosféricas, que se aplican en la fórmula para el cálculo de LST para la banda térmica de Landsat-5 (Jiménez-Muñoz *et al.* 2009), corresponde a:

$$\begin{aligned}
 \psi_1 &= 0.08735w^2 - 0.09553w + 1.10188 \\
 \psi_2 &= -6.9188w^2 - 0.58185w - 0.29887 \\
 \psi_3 &= -0.03724w^2 + 1.53065w - 0.45476
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

- **Cálculo de la Temperatura de la Superficie Terrestre**

El algoritmo para el cálculo de LST, se basa en la inversión de una ecuación de transferencia radiactiva (Jiménez-Muñoz *et al.* 2009). La Figura 15 presenta un mapa de temperaturas correspondiente a la fecha 28/06/2011.

LST se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$LST = \gamma \left[\varepsilon^{-1} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + \delta \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad \delta = T_{sen} - \frac{T_{sen}}{b_\gamma}$$

donde:

- ε : emisividad del suelo.
- ψ_1, ψ_2, ψ_3 : funciones atmosféricas.
- L_{sen} : radiancia obtenida en el sensor.
- T_{sen} : temperatura de brillo (K).
- γ y δ : parámetros para la estimación de LST.
- b_γ : 1256 para Landsat 5-TM.

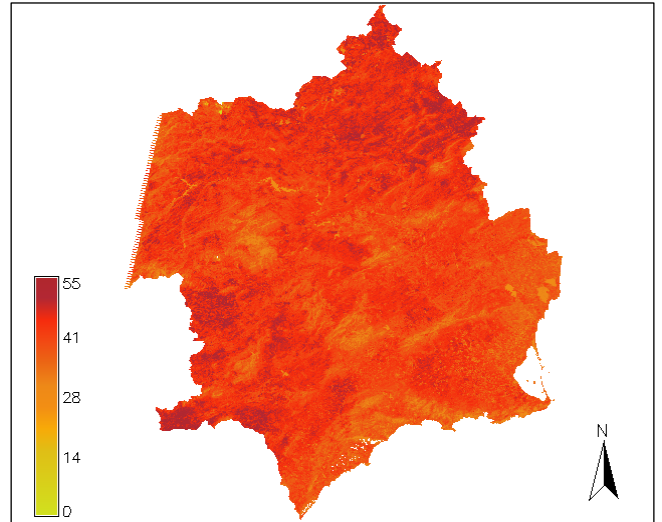


Figura 15: Mapa de temperaturas superficiales. Mosaico Landsat (28/06/2011).

5.2. Máscaras de nubes y nieve

La metodología seguida para la elaboración de máscaras de nubes y nieve ha consistido en los siguientes pasos (Chuvienco y Hantson, 2010):

- A partir de las reflectancias aparentes se calcula la diferencia entre la banda 1 de imagen de referencia y la banda a analizar. Si la diferencia es mayor que 0.08 se considera posiblemente una nube.
- Desde la banda térmica si la temperatura de brillo es menor a 290K (17°C) en verano y en invierno inferior a 272-274K (1°C).

Ambas capas se combinan con una máscara de nieve, calculada a partir del algoritmo desarrollado por Cea *et al.* (2007) y basado en el Normalized Difference Snow Index (NDSI):

$$NDSI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} > 0.4 \quad (16)$$

Por último, se obtiene una capa vectorial resultado de la suma de las tres capas ráster anteriores. Se eliminan aquellos polígonos cuya superficie sea semejante a 3 píxeles (1200m²) y polígonos que representen nubes falsas.

De este modo, se ha eliminado la cobertura nubosa, dando lugar a imágenes con cielo despejado. La Figura 16 ilustra esquemáticamente las tareas realizadas para la realización de máscaras de nubes.

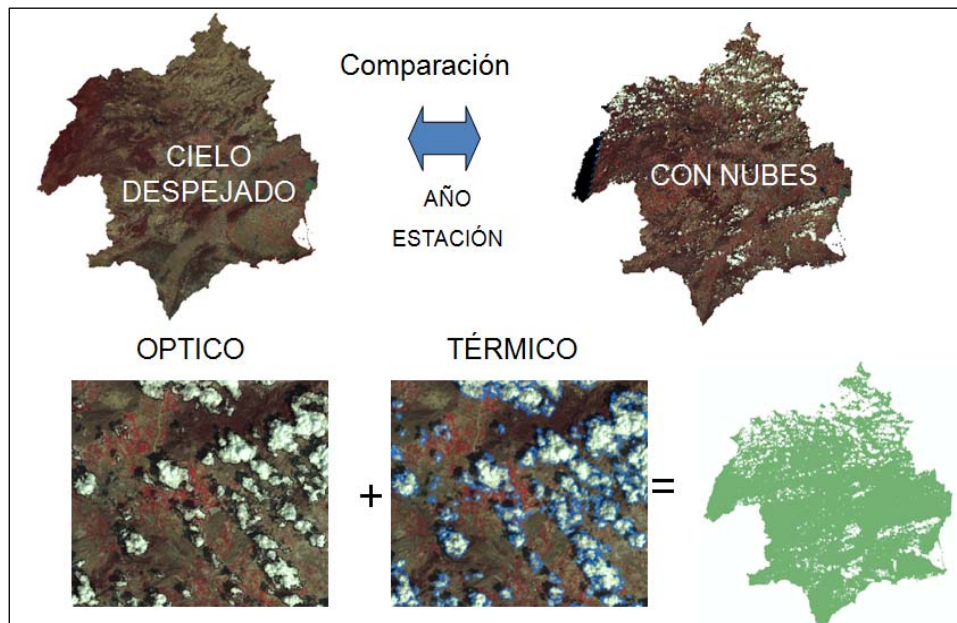


Figura 16: Esquema de tareas para la realización de máscara de nubes.

5.3. Máscaras de agua

Para la elaboración de máscaras de agua se ha empleado un inventario de humedales y embalses de la cuenca.

5.4. Obtención de otros parámetros biofísicos

- **Albedo**

En el cálculo del albedo, se ha empleado la siguiente fórmula, que utiliza las reflectancias de todas las bandas Landsat-5 TM:

$$\alpha = 0.2212 \cdot \rho_{TM1} + 0.2569 \cdot \rho_{TM2} + 0.1787 \cdot \rho_{TM3} + 0.2295 \cdot \rho_{TM4} + 0.0815 \cdot \rho_{TM5} + 0.0322 \cdot \rho_{TM7} \quad (17)$$

La Figura 17(a) presenta un ejemplo de mapa de albedo calculado para la cuenca.

- **Otros índices de vegetación**

Los índices espectrales de vegetación son transformaciones desarrolladas para caracterizar las cubiertas vegetales reforzando la contribución espectral debida a la cubierta vegetal, en tanto que minimizan la influencia de factores distorsionantes como el suelo, la irradiancia solar, el ángulo de elevación solar y la propia atmósfera (Pinilla

1995). Estos índices son utilizados para la discriminación de cubiertas del suelo, en virtud de los distintos comportamientos espectrales de aquellas.

Al igual que el NDVI se han calculado otros índices de vegetación (VI), que además de por su utilidad en la determinación de las características biológicas de las plantas, desempeñan un papel importante como herramienta para discernir áreas cubiertas de vegetación de otras ocupaciones del terreno, y pueden ayudar a refinar ecuaciones para poder incorporarlas en diversos estudios. Entre ellos:

- Índice de Vegetación Mejorado (EVI, Huete, 2002) que incorpora coeficientes a partir de datos experimentales para mejorar el ajuste de este índice de vegetación al porcentaje de suelo desnudo.

$$EVI = \frac{G \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + C1 \cdot \rho_{RED} - C2 \cdot \rho_{BLUE} + L)} \quad (18)$$

siendo: $G= 2.5$, $C1=6$, $C2=7.5$, $L=1$. La figura 17(b) presenta un mapa de EVI calculado para la cuenca del Río Segura.

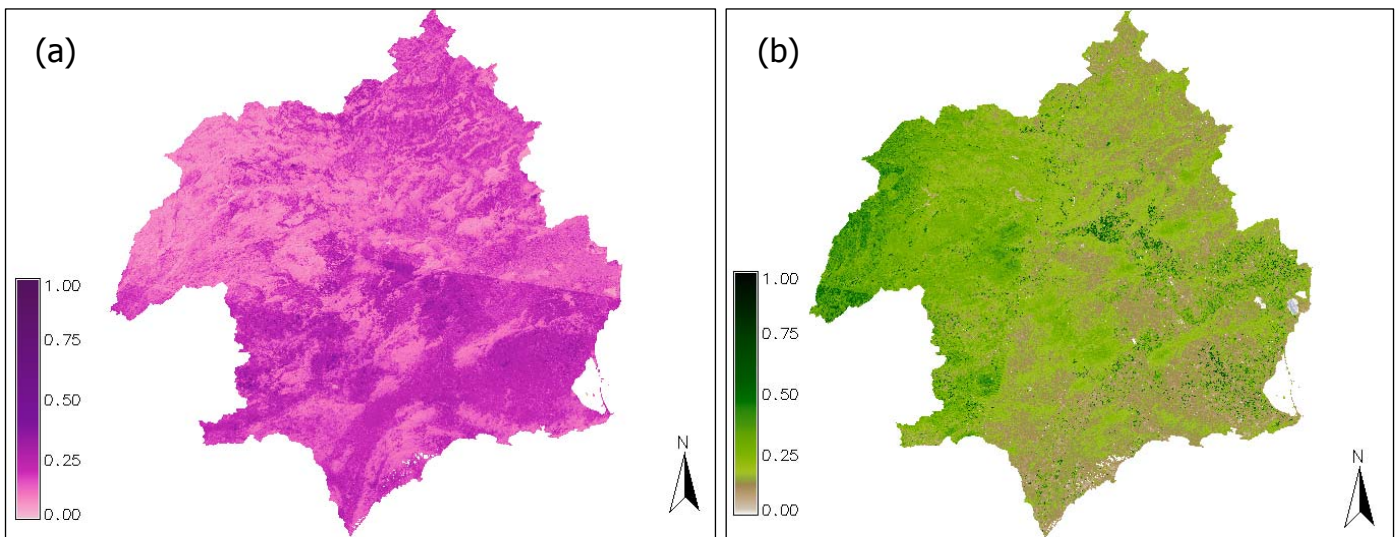


Figura 17: Cuenca del Río Segura: (a) mapa de albedo y (b) mapa EVI. Mosaico Landsat. (Junio 2011).

- Índice de diferencia de vegetación Revisado (RDVI), mejora el índice de diferencia de vegetación ($DVI=NIR-RED$, Jordan, 1969) y el NDVI.

$$RDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\sqrt{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}} \quad (19)$$

- Índice de vegetación de diferencia normalizada transformada (TNDVI, Rouse *et al.*, 1974) indicado para la comparación de la biomasa de plantas de diversas condiciones ambientales.

$$TNDVI = \frac{\sqrt{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (20)$$

- Índice del Contenido de Agua en la Vegetación de Diferencia Normalizada (NDWI, Hardisky *et al.*, 1983), permite cuantificar la cantidad de agua existente en la cubierta vegetal.

$$NDWI = \frac{\sqrt{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})} \quad (21)$$

- Índice de vegetación Ajustado al suelo (SAVI, Huete ,1988) introduce el valor de una constante en la ecuación L (factor de corrección de brillo del suelo), que está en función de la densidad de la vegetación del suelo, para lo que se requiere un conocimiento previo del estado de desarrollo del cultivo. Pero es necesario especificar L a través de prueba y error basado en la cantidad de vegetación en el área de estudio. Esto conduce en la mayoría de los casos a utilizar el valor por defecto de L=0,5.

$$SAVI = (1 + L) \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (22)$$

- Índice de vegetación ajustado al suelo modificado (MSAVI, Qi *et al.* 1994a) y su posterior revisión, MSAVI2 (Qi *et al.* 1994b), son índices ajustados suelo que pretenden abordar algunas de las limitaciones de NDVI. El MSAVI2 para mayor fiabilidad elimina la necesidad de encontrar la línea del suelo de una parcela característica, o incluso especificar explícitamente el factor de corrección de brillo del suelo.

$$MSAVI = \frac{2 \cdot \rho_{NIR} + 1 - \sqrt{(2 \cdot \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}}{2} \quad (23)$$

- Índice de Sequedad Temperatura-Vegetación (TVDI, Sandholt *et al.*, 2002) Está inversamente relacionada con la humedad del suelo, donde los valores altos indican condiciones secas y valores bajos condiciones húmedas.

$$TVDI = \frac{(LST_{NDVI} - LST_{NDVI\min})}{(LST_{NDVI\max} + LST_{NDVI\min})} \quad (24)$$

- Índice de Condición Temperatura-Vegetación (VTCI, Vegetation Temperature Condition Index) propuesto por Wang *et al.* (2001), y aplicado para el seguimiento de sequías, se define como

$$VTCI = \frac{(LST_{NDVI\max} + LST_{NDVI})}{(LST_{NDVI\max} - LST_{NDVI\min})} \quad \begin{array}{l} LST_{NDVI\max} = a + bNDVI \\ LST_{NDVI\min} = a' + b'NDVI \end{array} \quad (25)$$

LSTNDVImax y LSTNDVImin, las rectas de regresión que definen el «borde seco» y «borde húmedo» del triángulo LST-NDVI, respectivamente. El borde seco representa la tasa de evapotranspiración mínima (zonas secas), mientras que el borde húmedo da su máximo valor (zonas sin restricción de agua).

- **Índice de área foliar (LAI).**

La mayoría de los VI presentan una dependencia exponencial con respecto al LAI o índice de área foliar del tipo (Gilavert *et al.*; 1996):

$$IV = A - B \exp(-C \cdot LAI) \quad (26)$$

en donde *A* representa el valor del índice cuando el LAI tiende a infinito (el valor de saturación), *B* es la diferencia entre *A* y el valor del índice correspondiente al suelo desnudo y *C* está relacionado con la extinción de la radiación a través de la cubierta vegetal. En algunos casos, el valor del LAI a partir del cual se produce la saturación del índice no se encuentra dentro del rango de valores estudiado, por lo que la relación entre el índice y el LAI se puede considerar, aproximadamente lineal. El NDVI es un índice desde el que se observa claramente la saturación. Por ello, mediante otros índices (como MSAVI, RDVI) con menor sensibilidad a la variación de parámetros externos que afectan a la reflectancia espectral de la cubierta y las condiciones atmosféricas, se ha calculado el Índice de área foliar (LAI), empleando ecuaciones de regresión (Haboudane *et al.*, 2004):

$$RDVI: LAI = 0.0918 \exp(6.0002RDVI)$$

$$MSAVI: LAI = 0.1663 \exp(4.2731MSAVI) \quad (27)$$

- **Fracción de cobertura vegetal**

En el mismo contexto se pueden expresar formulaciones para determinar la fracción vegetal a partir de VI. La siguiente ecuación es una de las formas más comunes para calcular la fracción de cobertura:

$$[1 - F_c]^? = \left(\frac{VI_{max} - VI}{VI_{max} - VI_{min}} \right) \quad (28)$$

Donde VI_{min} corresponde a los valores de VI para suelo desnudo y VI_{max} a una superficie con una fracción de cubierta de vegetal de 100%. El exponente (?) representa la relación entre el coeficiente de amortiguación en la relación exponencial entre el VI versus LAI, y la función de distribución del ángulo de la hoja (González-Dugo *et al.*, 2008).

Si se asume que para VI, el exponente ?=1 entonces se puede llegar a una relación lineal del tipo:

$$F_c = m \cdot IV + n \quad (29)$$

pudiendo aplicar formulaciones en función del cultivo y contrastar con la ecuación propuesta por Sobrino *et al.* (2008), y aplicada en el presente trabajo.

6. ALGORITMO PARA LA ESTIMACIÓN SIMPLIFICADA DE ET_{REAL}

6.1. Cálculo de ET real instantánea.

ET_{real} se obtiene mediante una modificación de la ecuación Priestley-Taylor que se desarrolló a partir de la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965), asumiendo que el término aerodinámico transferencia de masa puede ser sustituido por un parámetro ϕ (Priestley y Taylor, 1972), que conduce a la forma simplificada siguiente:

$$\lambda ET = \phi (R_n - G) \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \quad (30)$$

donde:

- λET : flujo de calor latente o evapotranspiración (siendo λ el calor latente de vaporización y ET el flujo de agua evaporada) (Wm^{-2}).
- R_n : radiación neta (Wm^{-2}).
- G : flujo del calor por conducción a la superficie (Wm^{-2}).

- Δ : pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en función de la temperatura [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$].
- γ : constante psicrométrica [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$].

Jiang e Islam (2001) parametrizaron ϕ de Priestley-Taylor en planicies, utilizando datos NOAA-AVHRR, a partir de la interpretación del espacio LST– NDVI.

El cálculo se puede descomponer en los siguientes pasos:

- Cálculo de la fracción evaporativa.
- Cálculo del flujo del calor del suelo.
- Cálculo del balance de radiación neta en superficie.

6.1.1. Cálculo de la fracción evaporativa

Desde la Ecuación 29 previa, la fracción evaporativa (EF) corresponde al término:

$$EF = \phi \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \quad (31)$$

donde:

- Φ es calculado a partir de la ecuación

$$\phi = \phi_{\max} \frac{LST_{\max} - LST}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (32)$$

siendo:

- $\phi_{\max} = 1.26$ correspondiente a suelo completamente cubierto, NDVI_{\max}
- LST_{\max} : temperatura máxima para un $\text{NDVI} \geq 0$.
- LST_{\min} : temperatura mínima para un $\text{NDVI} \geq 0$.

Para cada píxel se puede obtener los valores de las rectas de regresión que forman el triángulo (o trapecio) que comprenden la nube de puntos LST versus NDVI.

En este espacio, el borde izquierdo representa el suelo desnudo seco. Cuando aumenta la cantidad de vegetación verde, el valor de NDVI aumenta a lo largo del eje X y por lo tanto disminuye LST. La Figura 18 presenta el espacio LST-NDVI obtenido para la fecha de 28/06/2011.

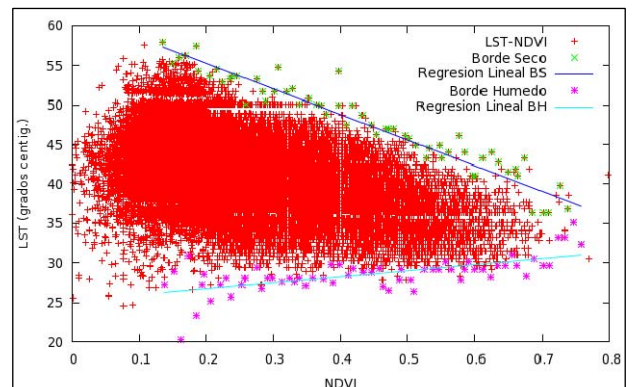


Figura 18: Espacio LST-NDVI (28/06/2011).

La pendiente de presión de vapor saturado (kPa °C⁻¹) a temperatura ambiente T_a (°C), definido por Murray (1967) es calculada como:

$$\Delta = \frac{4098 * 0.6108}{(T_a + 237.3)^2} \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (33)$$

La constante psicrométrica γ (kPa °C⁻¹) es función de la presión atmosférica mediante la fórmula:

$$\gamma = 0.665.10^{-3} P \quad (34)$$

Siendo P la presión en kPa que depende a su vez de la altura (en condiciones de climatología normales), como:

$$P = P_0 e^{\left(\frac{-z}{8000}\right)} \quad (35)$$

Siendo z, la altura en metros sobre el nivel del mar y P₀, la presión atmosférica en kPa a nivel del mar (101,3 kPa).

6.1.2. Estimación de la Radiación Neta

La evapotranspiración, depende en gran medida del balance de radiación neta que es necesario calcular. La radiación neta R_N (W m⁻² día⁻¹) se estima como el resultado del balance de radiación de onda corta y onda larga, como sigue:

$$R_N = R_s^\downarrow - R_s^\uparrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow = (1 - \alpha)R_s^\downarrow + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow \quad (36)$$

- **Balance de radiación de onda corta**

La radiación de neta onda corta es el resultado del balance de radiación entre la radiación solar incidente y la proporción de ésta que es reflejada por cualquier cuerpo:

$$R_s^\downarrow - R_s^\uparrow = R_s^\downarrow - \alpha R_s^\downarrow = (1 - \alpha)R_s^\downarrow \quad (37)$$

El relieve es el factor principal de la modificación de la distribución de la radiación. Variables como la altura, inclinación de la superficie (pendiente) y orientación (aspecto), así como sombras proyectadas por características del terreno, crean fuertes gradientes locales. Para el cálculo de la radiación incidente de onda corta se ha empleado un modelo de radiación solar denominado *r.sun* (Súri and Hofierka, 2002).

Este modelo, integrado como un comando bajo el GIS GRASS, tiene en cuenta la inclinación del terreno, aspecto y efectos de sombreado. Los parámetros de entrada de dicho modelo, son el mapa de elevaciones y sus mapas derivados de pendientes y orientaciones, la turbidez atmosférica, el albedo, el día del año, la declinación, y la hora paso del satélite. La radiación reflejada será calculada en función de la radiación incidente y la influencia del albedo. La figura 19 presenta un mapa de radiación solar de la cuenca para el mes de junio.

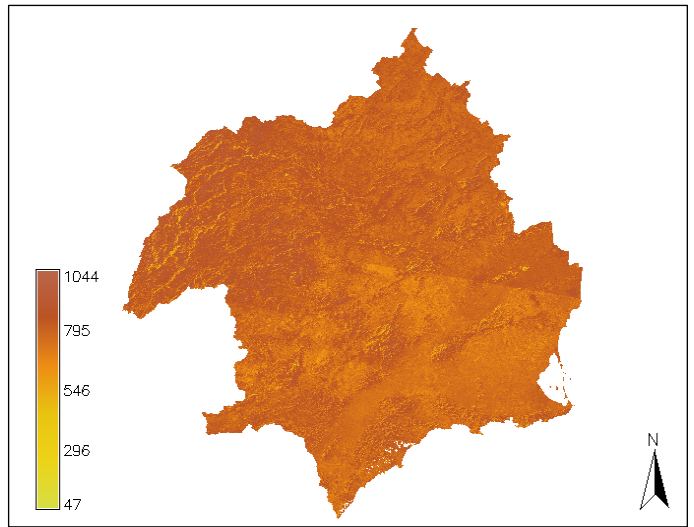


Figura 19: Cuenca del Río Segura: mapa de radiación de solar. Mosaico Landsat. (Junio 2011).

- **Balace de radiación de onda larga**

La radiación neta de onda larga es el resultado del balance de radiación emitida por la bóveda celeste y la que desprende la superficie terrestre que emite cualquier cuerpo a una temperatura dada:

$$R_L^\downarrow - R_L^\uparrow = \sigma \varepsilon_s \varepsilon_a T_a^4 - \sigma \varepsilon_s LST^4 \quad (38)$$

donde:

- σ : $5.67 \cdot 10^{-8}$ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)
- T_a : temperatura del aire (K).
- LST : temperatura de superficie (K).
- ε_s : emisividad del suelo.
- ε_a : emisividad de la atmósfera.

La emisividad de la atmósfera, se puede calcular a partir de medidas de la temperatura del aire de acuerdo a la fórmula de Swinbank (T_a en K):

$$\varepsilon_a = 9.2 \cdot 10^{-6} T_a^2 \quad (39)$$

6.1.3. Cálculo del flujo del calor del suelo.

La fracción evaporativa es empleada para calcular el flujo de calor del suelo (G) según Tanguy *et al.* (2012) mediante la relación empírica entre G y la R_N del tipo:

$$G = R_N \alpha \quad (40)$$

Donde α es obtenida como una función lineal de la EF, mediante la ecuación:

$$\alpha = a + b \cdot EF \quad (41)$$

siendo $a = -0.22$ y $b = 0.23$

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Metodología para la validación de resultados

Se ha realizado una malla de puntos regular (80 m.) de la parcela considerando la inclusión de las estaciones de medida (torres de medida de flujos). Se han considerado, por tanto dos ventanas de análisis:

- Ventana 1, representará la media de las celdas correspondientes a la ubicación de las torres de medida (VE086 y ME115) y de cuatro puntos vecinos. La Figura 20 ilustra los puntos considerados en el análisis para cada parcela.

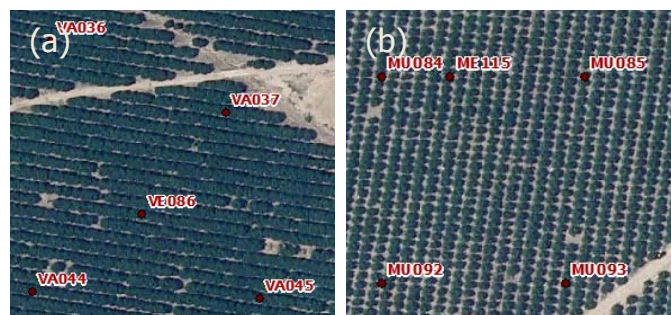


Figura 20: Ventana 1: (a) Parcela A y (b) Parcela B. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)

- Ventana 2, representará la media de las celdas correspondientes a la ubicación de las torres de medida (VE086 y ME115) y de dieciséis puntos vecinos. La Figura 21 presenta su ubicación para cada una de las parcelas.

El periodo de análisis corresponde a los años 2009-2011 y las fechas disponibles se presentan en la Tabla 3.



Figura 21: Ventana 2: (a) Parcela A y (b) Parcela B. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA)

Tabla 3: Fechas disponibles para la validación de datos

Información de satélite				Información de Parcela			Validación	
Fecha	Landsat Disponibles	Hora de paso	Nubes	Nubes En Parcela	Parcela A	Parcela B	Hora Medida	Análisis
14/02/2009	✓	10:29						✗
18/03/2009	✗							✗
06/06/2009	✓	10:32	✓					✗
22/06/2009	✗							✗
24/07/2009	✗							✗
09/08/2009	✓		✗					✗
10/09/2009	✓	10:33	✓		✓		10:30	✓
15/12/2009	✗				✓	✓	10:30	✗
06/04/2010	✓	10:33	✗		✓	✓	10:30	✗
08/05/2010	✓	10:34	✓		✓	✓	10:30	✓
24/05/2010	✓	10:34			✓	✓	10:30	✓
11/07/2010	✓	10:34	✓		✓	✓	10:30	✓
27/07/2010	✓	10:30	✓		✓	✓	10:30	✓
29/09/2010	✓	10:30			✓	✓	10:30	✓
15/10/2010	✓	10:30	✓	✗	✓	✓	10:30	✗
31/10/2010	✓	10:34	✓	✗	✓	✓	10:30	✗
16/11/2010	✓	10:33	✓		✓	✓	10:30	✓
02/12/2010	✓	10:33	✓		✓	✓	10:30	✓
04/02/2011	✓	10:33	✓		✓	✓	10:30	✓
20/02/2011	✗				✓	✓	10:30	✗
11/05/2011	✓	10:33	✓	✗	✓	✓	10:30	✗
28/06/2011	✓	10:33			✓	✓	10:30	✓

✗ Indica la no disponibilidad o presencia de nubes

La parcela B se trata de cultivos más jóvenes y menos desarrollados. Por esta razón, la influencia del suelo en los valores de reflectancia es importante. Este hecho, queda reflejado en los indicadores biofísicos medidos, presentan valores altos de

albedo, y bajos de fracción de cobertura vegetal. Sin embargo, la Parcela A presenta mayores valores de NDVI, y una fracción de cobertura vegetal mayor en contraste con la Parcela B. La Tabla 4 resume los valores biofísicos medidos.

Tabla 4: Parámetros biofísicos obtenidos en la Ventana 2.

FECHA	Albedo		NDVI				Fc	
	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B		
10/09/2009	0.14 (±0.01)	0.21 (±0.03)	0.51 (±0.05)	0.30 (±0.12)	0.91 (±0.18)	0.26 (±0.14)		
08/05/2010	0.17 (±0.01)	0.19 (±0.01)	0.54 (±0.05)	0.43 (±0.01)	0.96 (±0.11)	0.56 (±0.11)		
24/05/2010	0.20 (±0.02)	0.19 (±0.01)	0.53 (±0.06)	0.45 (±0.02)	0.60 (±0.46)	0.67 (±0.15)		
11/07/2010	0.18 (±0.01)	0.20 (±0.00)	0.51 (±0.06)	0.42 (±0.02)	0.89 (±0.21)	0.54 (±0.08)		
27/07/2010	0.19 (±0.02)	0.22 (±0.02)	0.59 (±0.07)	0.44 (±0.02)	0.88 (±0.31)	0.46 (±0.20)		
29/09/2010	0.19 (±0.01)	0.21 (±0.01)	0.54 (±0.06)	0.46 (±0.03)	0.83 (±0.30)	0.72 (±0.15)		
16/11/2010	0.23 (±0.01)	0.25 (±0.00)	0.51 (±0.04)	0.42 (±0.01)	0.93 (±0.15)	0.56 (±0.06)		
02/12/2010	0.19 (±0.00)	0.19 (±0.00)	0.57 (±0.04)	0.50 (±0.02)	0.99 (±0.04)	0.93 (±0.08)		
04/02/2011	0.25 (±0.01)	0.25 (±0.01)	0.48 (±0.04)	0.46 (±0.02)	0.85 (±0.20)	0.74 (±0.12)		
28/06/2011	0.17 (±0.02)	0.17 (±0.01)	0.56 (±0.07)	0.46 (±0.03)	0.76 (±0.38)	0.77 (±0.22)		

- **Análisis del ajuste**

Para la validación de las variables de flujo de energía se utiliza como referencia la Parcela A. La disposición de los cultivos simula una gran superficie vegetal, más apropiada para el modelo de evapotranspiración a contrastar.

Al comparar LST con la temperatura de la cubierta vegetal, se obtiene una correlación de 0.84 como se deduce desde la Figura 22, subestimando la temperatura de las torres de medidas de flujos en la mayoría de los casos.

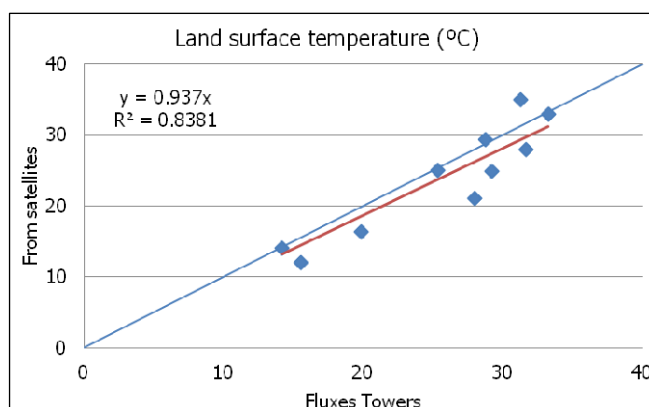


Figura 22: Gráfico de correlación para Parcela A: LST-Temperatura cubierta vegetal.

En los valores estimados para la radiación neta se obtiene un coeficiente de correlación similar, ya que se consigue un buen resultado de aplicar el modelo de radiación solar, Figura 23.

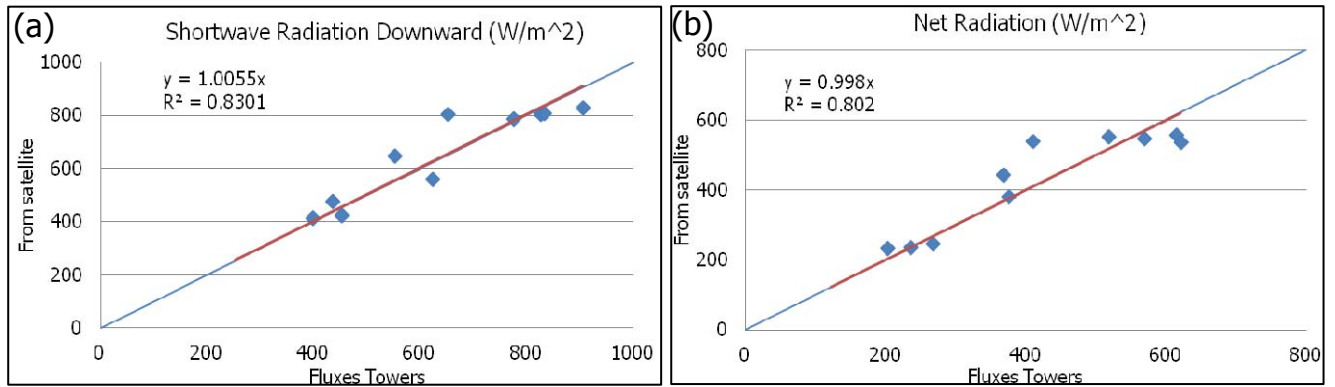


Figura 23: Gráfico de correlación para Parcela A: (a) radiación de onda corta incidente y (b) radiación neta.

En el cálculo de ET_{real} , el factor a controlar para una buena aproximación corresponde a la fracción evaporativa (EF), concretamente Φ . La determinación de LST_{min} dificultada por la presencia de nubes y cirros, influye de forma acusada.

La delimitación de los bordes secos y húmedos del espacio LST-NDVI, se han definido mediante ajuste por mínimos cuadrados, y la determinación de LST_{max} y LST_{min} con la temperatura máxima y mínima respectivamente del espacio.

Debido a la existencia de temperaturas bajas en capas altas de la atmósfera, quizás por la presencia de cirros no perceptibles visualmente motivo por el que no se les realizó mascara de nubes, se obtienen temperaturas mínimas inferiores a -10° en algunos casos. Debe destacarse, el caso de las imágenes con fecha 10/09/2009 y 04/02/2011, a las que se les ha asignado una temperatura mínima de una imagen próxima a la fecha correspondiente. La Tabla 5 presenta los LST_{max} y LST_{min} obtenidos para cada fecha.

Tabla 5: Temperaturas máximas y mínimas

Fechas	LST_{max} (C°)	LST_{min} (C°)
10/09/2009	47.41	3.11 (-80.73)
08/05/2010	50.65	-5.13
24/05/2010	54.22	11.23
11/07/2010	54.29	15.98
27/07/2010	47.88	9.93
29/09/2010	43.61	3.11
16/11/2010	39.59	-8.17
02/12/2010	25.52	-5.12
04/02/2011	31.12	-5.12 (-56.58)
28/06/2011	59.56	6.69

Para evaluar la bondad del ajuste en el cálculo de ET_{real} se ha estimado la Raíz del Error Medio cuadrático (RMSE), Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - M_i| \quad (42)$$

$$MAPE = \frac{100}{\langle M \rangle} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - M_i| \right) \quad (43)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2} \quad (44)$$

donde E representa valores estimados, M valores medidos, $\langle M \rangle$ media de los valores medidos.

La Tabla 6 presenta el error absoluto y el error porcentual absoluto estimados para cada fecha. Se obtiene valores de MAE 50.15, MAPE del 26.92%, y RMSE de 57.3.

Tabla 6: MAE, MAPE y RMSE para ET_{real}

Fecha	Medido (W/m ²)	Estimado (W/m ²)	Error absoluto	Error porcentual absoluto	Error cuadrático
10/09/2009	197.03	132.82	64,11	34,41	4110,18
08/05/2010	118.03	179.86	63,17	33,91	3990,93
24/05/2010	237.98	318.41	83,61	44,88	6990,00
11/07/2010	232.00	259.22	29,39	15,78	863,91
27/07/2010	222.02	229.78	8,49	4,56	72,08
29/09/2010	215.78	163.72	52,27	28,06	2732,45
16/11/2010	155.43	78.10	75,79	40,68	5743,93
02/12/2010	123.70	59.54	62,48	33,54	3903,83
04/02/2011	110.09	70.08	38,32	20,57	1468,62
28/06/2011	251.02	198.82	54,76	29,39	2998,35

- **Análisis de sensibilidad**

Para conseguir un mejor ajuste, y poder identificar los posibles cirros, se varía un umbral en la banda térmica para la detección de nubes propuesto por Chuvieco y Hantson (2010).

Aplicando este filtro a la temperatura de brillo, que oscila entre 290K (valor propuesto para verano) y 272K (valor propuesto para invierno), se consigue elevar la temperatura mínima en la mayoría de los casos. De esta manera, se consigue aproximar la estimación de ET_{real} a los valores medidos en las torres de medidas de flujos. La Tabla 7 presenta las temperaturas mínimas que han sido ajustadas y la Tabla 8 presenta el error absoluto (MAE) y el error porcentual absoluto (MAPE) estimados para dichas temperaturas. Se obtiene un valor medio de MAE igual a 19.25, MAPE del 10.33%, y un RMSE de 34.5

Tabla 7: Temperaturas máximas y mínimas ajustadas

Fechas	LST _{max} (Cº)	LST _{min} (Cº)
10/09/2009	47.41	16.37
08/05/2010	50.65	-5.13
24/05/2010	54.22	11.22
11/07/2010	54.29	15.98
27/07/2010	47.88	9.93
29/09/2010	43.61	11.86
16/11/2010	39.59	13.35
02/12/2010	25.52	9.54
04/02/2011	31.12	6.83
28/06/2011	59.56	16.84

Tabla 8: MAE, MAPE y RMSE ET_{real} ajustada

Fecha	Medido (W/m ²)	Estimado (W/m ²)	Error absoluto	Error porcentual absoluto	Error cuadrático
10/09/2009	197.03	197.14	0,10	0,05	0,01
08/05/2010	118.03	181.20	63,17	33,91	3990,93
24/05/2010	237.98	321.58	83,61	44,88	6990,00
11/07/2010	232.00	261.39	29,39	15,78	863,91
27/07/2010	222.02	230.51	8,49	4,56	72,08
29/09/2010	215.78	215.65	0,14	0,07	0,02
16/11/2010	155.43	157.02	1,59	0,85	2,53
02/12/2010	123.70	126.26	2,56	1,38	6,57
04/02/2011	110.09	111.75	1,66	0,89	2,76
28/06/2011	251.02	249.21	1,80	0,97	3,24

El Anexo VII contiene los triángulos obtenidos para las fechas consideradas y el Anexo VIII presenta el contraste de resultados medidos y estimados en parcela A.

Dos ejemplos de la distribución espacial de ET_{real} obtenida para la Cuenca del río Segura (escenas con fecha 10/09/2009 y 28/06/2011) se presentan en la Figura 24. Se puede apreciar la influencia la presencia de nubes y cirros en la Figura 24a, lo que no permite tener valores en la zona baja de la Cuenca del Segura. En contraste, el mapa

de la figura 24b corresponde a una imagen con cielo despejado donde prácticamente ET_{real} se ha determinada en toda la Cuenca. ET_{real} muestra una gran variabilidad a escala regional, entre 15 y 800 Wm^{-2} en septiembre 2009, y entre 25 y 400 $W m^{-2}$ en Junio 2011. El Anexo IX contiene las distribuciones espaciales de ET_{real} .

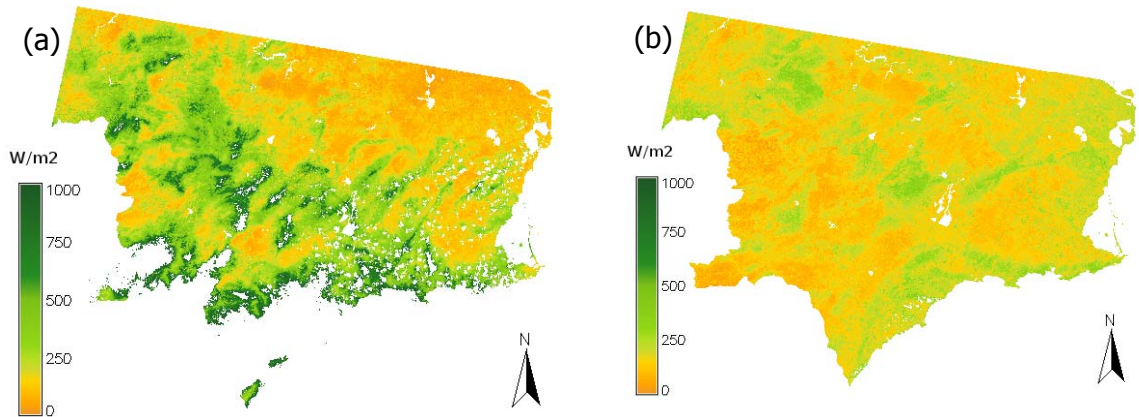
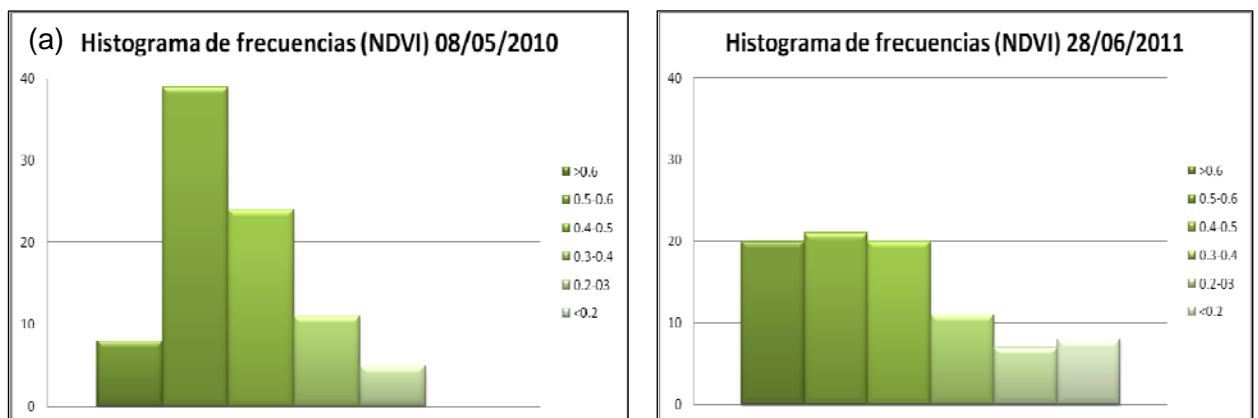


Figura 24: Cuenca del río Segura: Mapa de ET_{real} . (a) fecha 10/09/2009 y (b) fecha 28/06/2011.

- **Detección de valores atípicos**

El conocimiento de la variabilidad de variables biofísicas en una finca agrícola representa una información valiosa para la aplicación de técnicas de agricultura de precisión. La detección de valores atípicos se analiza mediante histogramas de frecuencias. En la Figura 25 se puede analizar la evolución del NDVI en diferentes fechas, así como la fracción de cobertura vegetal. El histograma de NDVI en dos fechas (Mayo 2010 y Junio 2011) en la Parcela A muestra una distribución bastante diferente de NDVI, indicando un desarrollo vegetativo más homogéneo en Mayo 2005 que en Junio 2011.



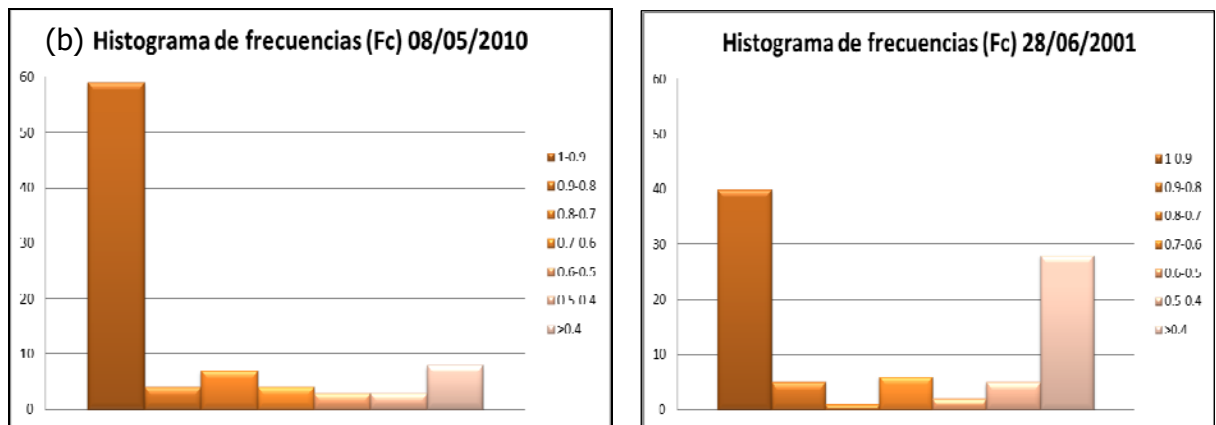


Figura 25: Histogramas de frecuencias para la Parcela A: (a) NDVI y (B) Fc para las fechas 08/05/2010 y 28/06/2011

- **Relaciones entre variables**

Desde la Figura 26 se observa que LST y NDVI se encuentran inversamente correlacionados. En este gráfico de dispersión, mediante la línea de tendencia se advierten que celdas se alejan de la línea de tendencia, como por ejemplo celdas con temperaturas elevadas para un determinado NDVI.

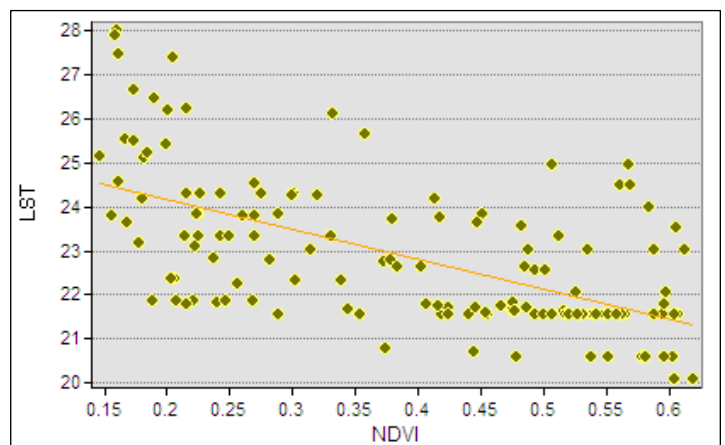


Figura 26: Gráfico de dispersión para la Parcela A: LST-NDVI. (29/09/2010).

- **Análisis de tendencias**

Mediante el gráfico 3D, Figura 27, se representan las localizaciones (x, y) de cada uno de los puntos sobre un plano y la altura z representa el valor de la variable, en este caso ET_{real} . Presenta dos líneas de tendencias sobre el eje x (de color verde) y sobre el eje y (de color azul).

Estas dos líneas de tendencia se han calculado a partir de una función de segundo orden. Para la fecha 29/09/2010 se aprecia de Este a Oeste un comportamiento similar, aunque la tendencia disminuye algo más en el extremo oeste. Sin embargo las diferencias son más notables Norte a Sur. En dirección sur la caída de la tendencia es bastante acentuada.

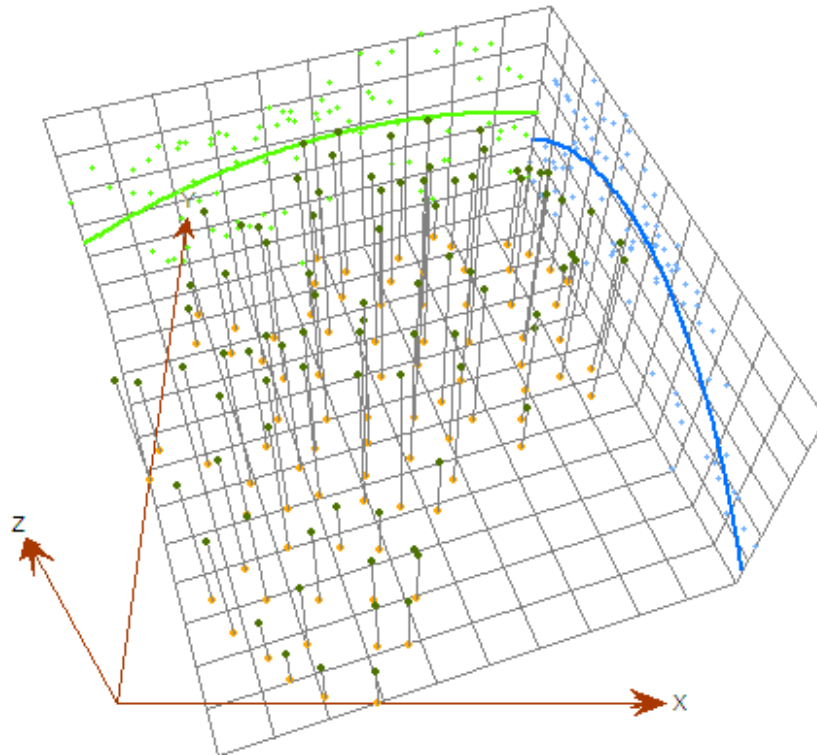


Figura 27: Gráfico de tendencias de ET_{real} para la Parcela A (29/09/2010).

- **Identificación de agrupaciones**

Para detectar relaciones entre puntos cercanos e identificar agrupaciones con valores significativamente altos o bajos, se realiza mediante el indicador Getis-Ord G_i^* (Ord and Getis, 1995). Su cálculo se realiza a partir de los datos de los puntos vecinos, de manera que si el valor del atributo de un punto es alto y los valores de sus vecinos también, es posible identificar en esa zona un *punto caliente (hot spot)*. A la vez, cuando el valor del punto es bajo y el de sus vecinos también, es posible identificarlo como un punto frío (*cold spot*). Para más información ver Anexo X.

La Figura 28 presenta un mapa de hot spots y cold spots correspondiente a la fecha 29/09/2010 para un nivel de confianza del 95% y una distancia fija o umbral de 100 m. Esta distancia es seleccionada cumpliéndose que todas las entidades tengan al menos un vecino y ninguna entidad tenga todas las demás entidades como un vecino.

Se observan celdas, en el norte y centro de la parcela entorno a las cuales aparecen concentraciones de valores elevados superiores a los esperados con una distribución aleatoria completa, con significación estadística encima de 1.96 (hot spots). Por el contrario, puntos fríos (cold spots) aparecen en el extremo sur de la parcela principalmente (celdas con significación estadística por debajo de -1.96).

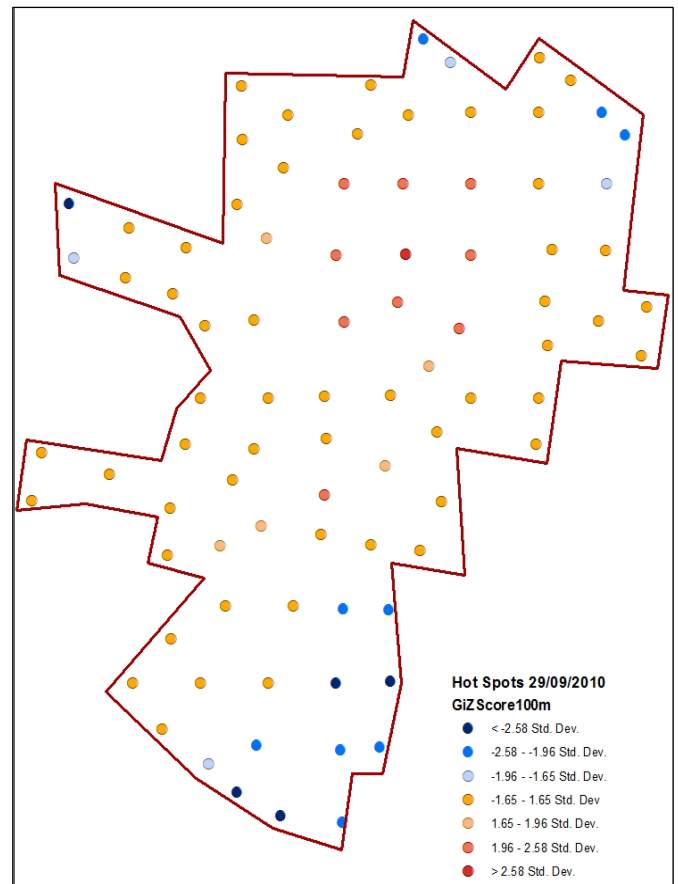


Figura 28: Mapa de hot spots y cold spots de ET_{real} para la Parcela A (29/09/2010).

- **Estadísticas de vecindad**

Se pueden visualizar datos y estadísticas de vecindad a partir del cálculo de mapas obtenidos con polígonos de Voronoi. Estos son indicadores de carácter espacial que se obtienen para cada unidad a partir de datos de sus unidades vecinas. A partir de medidas de tendencia central como la media, se aprecia donde se producen zonas con valores altos, o a partir de medidas de dispersión como la desviación estándar, se puede conocer donde se presentan grandes variaciones locales.

La Figura 29(a) ilustra mapas de polígonos de Voronoi de medias de ET_{real} para la fecha 29/09/2010. Se observan máximos en el centro y Norte de la parcela, predominando los mínimos en el sur de la misma. La Figura 29(b) representa desviaciones típicas de ET_{real} , donde se advierte al Este de la parcela mayores variaciones locales (zonas de mezcla).

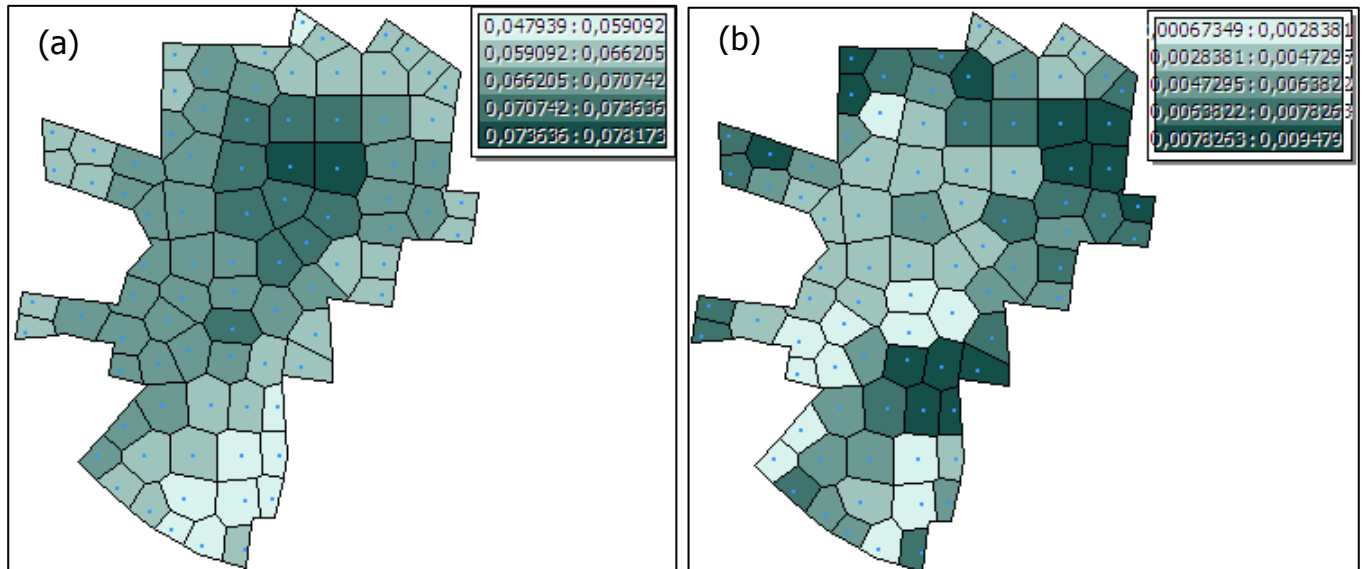


Figura 29: Mapas de polígonos Voronoi de ET_{real} de estadísticos para la Parcela A (a) media y (b) desviación típica. (29/09/2010)

8. CONCLUSIONES.

Los parámetros biofísicos obtenidos a partir de imágenes de satélite permiten dar seguimiento y vigilancia a la dinámica de la vegetación de manera eficiente y funcional.

Las relaciones entre índices de vegetación y parámetros biofísicos (por ej. fracción de cubierta vegetal) y otros parámetros obtenidos a partir de las reflectividades de la cubierta (por ej. albedo), hacen posible estimar ET_{real} de forma sencilla, en base a imágenes provenientes de un sensor que presenta banda térmica.

Sin embargo un inconveniente en el empleo de imágenes de satélite es la falta de disponibilidad debido a errores (principalmente de captura) o también debido a la cobertura nubosa que inutiliza muchas imágenes perdiendo continuidad y afectando a la periodicidad.

Por este motivo, la cobertura nubosa o la existencia de capas de aire con bajas temperaturas ($<-10^{\circ}$) por posibles cirros, dificulta la determinación de la temperaturas mínimas. Éste es el principal problema de aplicar el algoritmo planteado, debido a la complejidad de estimar las temperaturas mínimas en imágenes con atmosfera inestable, ya que condiciona la determinación de la fracción evaporativa, que presenta gran sensibilidad a ϕ .

Se ha conseguido una buena aproximación de ET_{real} a los valores obtenidos en las torres de medidas de flujos, aplicando un umbral para la detección de nubes a la temperatura de brillo. Este umbral varía a lo largo del año, adoptando un valor de 290K

(para verano) y 272K (para invierno). De esta manera se han modificado las temperaturas mínimas.

Otro inconveniente es que en zonas con vegetación dispersa, como es el caso de la Parcela B, el algoritmo no es tan preciso. Por lo que es conveniente aplicar un modelo de dos fuentes, donde los flujos de evaporación del suelo y transpiración del cultivo se consideran desacoplados.

Los resultados distribuidos espacialmente constituyen buenos indicadores del estado hídrico del cultivo a nivel de parcela. Desde los mismos, se pueden identificar patrones espaciales y sectores agrícolas con problemas de estrés hídrico (o enfermedades de cultivos), permitiendo realizar recomendaciones de riego.

9. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como línea futura de investigación se plantea la incorporación de un modelo de dos fuentes. Sin embargo la mayoría de modelos de dos fuentes, necesitan datos que la teledetección no puede proporcionar. Por ejemplo, la velocidad del viento. Estos algoritmos calculan determinados parámetros que también difieren en complejidad, tal es el caso de la resistencia aerodinámica.

Uno de los modelos a considerar es el denominado Modelo de 3T (Qiu *et al.* 1996). Se trata de un modelo de doble fuente con la ventaja de que se elimina resistencia aerodinámica por la introducción de sitios de referencia (suelo seco sin evaporación y dosel seco sin transpiración), como plantea Qiu *et al.*, 2006. Sin embargo un problema considerable para la aplicación del modelo 3T utilizando datos de teledetección, es la adquisición de las temperaturas de referencia para suelo seco (T_{cp}) y la cubierta seca (T_{sd}). El objetivo de esta línea de investigación, es proponer un algoritmo simple basado en teledetección para estimar la temperatura de referencia, no dependiente de la resistencia aerodinámica, y minimizar el empleo de datos auxiliares, resultando una implementación funcional sobre grandes áreas.

Otra línea de investigación que se plantea es llegar a una aproximación de datos medios diarios de ET_{real} a partir de las observaciones de campo considerando de las correcciones que proponen Van Niel *et al.* (2011)

10. BIBLIOGRAFÍA.

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Carlson, T.N., William, J.C. and Gillies, R.R., 1995. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, 54, 161-167.
- Cea, C., J. Cristóbal, Pons X., 2007. An improved methodology to map snow cover by means of landsat and MODIS imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE International. 2007. IGARSS 2007*
- Chavez, P.S., 1996. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chander, G., Markham, B. L., Barsi, J.A., 2007. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 4(3), 490-494.
- Chander, G., Markham, B., Helder, D., 2009. Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 1-24. On line. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20090027884_2009026987.pdf
- Choudhury B.J., Ahmed N.U., Idso S.B., Reginato R.J. and Daughtry C.S., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. In: *Remote Sensing of Environment*, 50, p. 1-17.
- Chuvieco, E., Hantson, S., 2010. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Version1. Plan Nacional de Teledetección. Instituto Geográfico Nacional. On line. http://www.ign.es/PNT/pdf/especificaciones-tecnicas-pnt-medar-landsat_v2-2010.pdf
- Colby, J. D., 1991. "Topographic Normalization in Rugged Terrain." *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(5), 531-537.
- García Galiano, S.G., Baille, A., González, M.M., Martínez, V., Urrea, M., Hernández, Z., Nortes, P., y Tanguy, M. Desarrollo y Aplicación de Indicadores de Alerta Temprana frente a Sequías a Escala Regional desde MODIS. XII Congreso de la Asociación

- Española de Teledetección. Teledetección. Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional, Ed. Martín. 223-229.
- Getis, A., Ord, J.K, 1992. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis* 24(3):189-206.
- Gilabert, M. A., Conese, C., Maselli,1994. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 15(10), 2065-2086.
- Gilabert, M. A., Gandia, S., y Melia, J. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, 55, 11-20.
- González-Dugo, M. P., Mateos, L., 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops, *Agricultural Water Management*, 95, 48-58.
- Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M., 1983. The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina Alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 77-83
- Huete, A. R. 1988. A soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing and Environment*, 32: 155-167.
- Huete, A .2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MOIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2), 195-213
- IFAPA: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de la Junta de Andalucía <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa>.
- IVIA: Instituto valenciano de Investigaciones Agrarias de la Generalitat Valenciana. <http://riegos.ivia.es/>
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663–666.
- Jiang, L., Islam, S., 2001. Estimation of surface evaporation map over southern GreatPlains using remote sensing data. *Water Resources Research*, 37(2), 329-340.
- Jiang L., Islam S., Carlson T.N., 2004. Uncertainties in latent heat flux measurements and estimation: implications for using a simplified approach with remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 30, 769-787.

- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J.A., 2003. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 108, 1.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Soria, G., Ninyerola, M., Pons, X., 2009. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* . 47, 339-349.
- Monteith J.L. 1965. Evaporation and the environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. XIXth Symposium. Soc. for xp. Biol., Swansea. Cambridge University Press. pp. 205-234.
- Monteith J.L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quarterly J.Royal Meteo. Soc.* 107:1-27.
- Muneer, T.,1990, Solar radiation model for Europe. *Building services engineering research and technology*, 11: 153-163.
- Ord, J.K., Getis. A. 1995. Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. *Geographical Analysis* 27(4):286-308
- Pinilla C., 1999. Interacciones de la radiación en teledetección. *Universidad de Jaén, Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico, nº 71*.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81–92.
- Qiu, G. Y., Shi, P. J. and Wang, L. M., 2006, Theoretical analysis of a soil evaporation transfer coefficient. *Remote sensing of environment*, 101: 390-398.
- Qiu, G. Y., Yano, T. and Momii, K., 1996, Estimation of plant transpiration by imitation leaf temperature. I. Theoretical consideration and field verification. *Transactions of the Japanese society of irrigation, Drainage and Reclamation Engineering* 64, 401-410
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Keer, Y. H., & Sorooshian, S., 1994. A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sensing of Environment.*, 48, 119–126.
- Remund J., Wald L., Lefevre M., Ranchin T., Page J., 2003. Worldwide Linke turbidity information. Proceedings of ISES Solar World Congress, 16-19. CD-ROM published by International Solar Energy Society. On line http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/57/91/PDF/ises2003_linke.pdf

- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C., 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation (p. 371). Greenbelt, MD: NASA/GSFC (Type III, Final Report).
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J., 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79 (2-3), 213-224.
- SIAM: Sistema de Información Agraria de Murcia. <http://siam.imida.es/>
- SIAR: Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla la Mancha. <http://crea.uclm.es/siar/>.
- Sobrino, J.A., Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2), 353-366.
- Sobrino, J.A., Jiménez Muñoz, Soria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P., 2008. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316-327.
- Súri M., Hofierka J., 2004. A new GIS-based solar radiation model and its application to photovoltaic assessments. *Transactions in GIS*, 8(2), 175-190.
- Tanguy M., Baille A., González-Real M., Lloyd C., Cappelaere B., Kergoat L., and Cohard J., 2012. A new parameterisation scheme of ground heat flux for land surface flux retrieval from MODIS products. *Journal of hydrology*. 454-455.
- Van Niel, T. G., McVicar, T. R, Roderick, M. L, van Dijk A.I.J.M., Renzullo, L. J., van Gorsel, E., 2011. Correcting for systematic error in satellite-derived latent heat flux due to assumptions in temporal scaling: Assessment from flux tower observations. *Journal of Hydrology*. 409, 140–148
- Wald, L., 2000. SODA: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases. European Geophysical Society Meeting, XXV General Assembly, Nice, France, 25-29, On line <http://www.soda-is.com/>.
- Wang, PX. Li, X., Gong, J., Song, C., 2001. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE International*, 1: 141-143.

Anexo I. Imágenes Landsat disponibles

El Anexo I presenta distintas tablas con información de las imágenes Landsat disponibles:

- Tabla I.1: Imágenes Landsat remuestreadas a vecino más próximo y a convolución cúbica.
- Tabla I.2: Imágenes disponibles para análisis con datos de campo.
- Tabla I.3: Imágenes Landsat no disponible por cobertura nubosa
- Tabla I.4: Imágenes Landsat libres de nubes.
- Tabla I.5: Imágenes Landsat con máscara de nubes.

Tabla I.1: Imágenes Landsat remuestreadas a vecino más próximo y a convolución cúbica

Vecino más próximo	Año					Total general	
		Escena	2008	2009	2010		2011
NN	199033		8	6	9	3	26
	199034		7	5	6	2	20
	199035		6	7	8	2	23
	200033		7	9	12	1	29
	200034		6	6	11	1	24
Total NN		34	33	46	9	122	
No disponible,	199033		1	7			8
	199034		1	4		1	6
	199035			1			1
	200033			3			3
	200034		2	7		1	10
Total No Disponible		4	22		2	28	
Total general		38	55	46	11	150	

Convolución Cúbica	Año							Total general	
		Escena	2004	2005	2008	2009	2010		2011
Bicubicas	199033		1	1	8	6	12	4	32
	199034		1	1	7	4	10	3	26
	199035			2	6	7	11	3	29
	200033			2	7	9	13	5	36
	200034			2	6	6	15	5	34
Total		2	8	34	32	61	20	157	
No disponible (*)	199033				1	7			8
	199034				1	5		1	7
	199035					1			1
	200033					3			3
	200034				2	7		1	10
Total				4	23		2	29	
Total general		2	8	38	55	61	22	186	

(*)Errores por desplazamiento

Tabla 1.2: Imágenes disponibles para análisis con datos de campo (Escena 199034).

Resumen			
	Fecha	Datos	199034*
2009	20090214	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20090606	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20090809	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20090910	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
Total BIC 2009			4
Total NN 2009			4
2010	20100508	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20100524	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20100711	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	
	20100727	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20100929	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20101015	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20101031	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20101116	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	
	20101202	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	
Total BIC 2010			10
Total NN 2010			6
2011	20110204	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	
	20110511	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
	20110628	Convolución cúbica	1
		Vecino más próximo	1
Total BIC 2011			3
Total NN 2011			2
Total BIC			17
Total NN			12

Tabla I.3: *Imágenes Landsat no disponibles por cobertura nubosa*

Escena	Imagen	Observaciones
199033	landsat5_nn_199033_20091028	No disponibles por $\geq 80\%$ cobertura nubosa en superficie de cuenca, neblina o nubes bajas, o no pertenece a la cuenca
	landsat5_nn_199033_20091113	
	landsat5_nn_199033_20101015	
	landsat5_nn_199033_20110511	
	landsat5_nn_199033_20090809	
199034	landsat5_nn_199034_20090809	
	landsat5_nn_199034_20101015	
199035	landsat5_nn_199035_20091028	
	landsat5_nn_199035_20100508	
	landsat5_nn_199035_20100524	
	landsat5_nn_199035_20090622	
	landsat5_nn_199035_20091028	
200033	landsat5_nn_200033_20100312	
	landsat5_nn_200033_20100123	
200034	landsat5_nn_200034_20090309	
	landsat5_nn_200034_20100312	

Tabla I.4: *Imágenes Landsat libres de nubes*

Escena	Libres de nubes
199033	landsat5_nn_199033_20100929
	landsat5_nn_199033_20100524
	landsat5_nn_199033_20100812
199034	landsat5_nn_199034_20090214
	landsat5_nn_199034_20110628
199035	landsat5_nn_199035_20090214
	landsat5_nn_199035_20091113
	landsat5_nn_199035_20100727
	landsat5_nn_199035_20100812
	landsat5_nn_199035_20100929
	landsat5_nn_199035_20101015
	landsat5_nn_199035_20101031
	landsat5_nn_199035_20101116
landsat5_nn_199035_20110511	
200033	landsat5_nn_200033_20090309
	landsat5_nn_200033_20091206
	landsat5_nn_200033_20101006
	landsat5_nn_200033_20090528
	landsat5_nn_200033_20090715

	landsat5_nn_200033_20090731
	landsat5_nn_200033_20100531
	landsat5_nn_200033_20100718
	landsat5_nn_200033_20110619
	landsat5_nn_200033_20090325
200034	landsat5_nn_200034_20101022
	landsat5_nn_200034_20100429
	landsat5_nn_200034_20091003
	landsat5_nn_200034_20101006
	landsat5_nn_200034_20110619
Total	26

Tabla I.5: Imágenes Landsat con máscara de nubes.

Escena	Imagen	Máscara
199033	landsat5_nn_199033_20090318	M_20090318_F
	landsat5_nn_199033_20090403	M_20090403_F
	landsat5_nn_199033_20100406	M_20100406_F
	landsat5_nn_199033_20101031	M_20101031_F
	landsat5_nn_199033_20110220	M_20110220_F
	landsat5_nn_199033_20090606	M_20090606_F
	landsat5_nn_199033_20090622	M_20090622_F
	landsat5_nn_199033_20090809	M_20090809_F
	landsat5_nn_199033_20100508	M_20100508_F
	landsat5_nn_199033_20100727	M_20100727_F
	landsat5_nn_199033_20100913	M_20100913_F
	landsat5_nn_199033_20110511	M_20110511_1
	landsat5_nn_199033_20110628	M_20110628_F
	199034	landsat5_nn_199034_20090606
landsat5_nn_199034_20090809		M_20090809_F
landsat5_nn_199034_20090910		M_20090910_F
landsat5_nn_199034_20100508		M_20100508_F
landsat5_nn_199034_20100524		M_20100524_F
landsat5_nn_199034_20100727		M_20100727_F
landsat5_nn_199034_20100929		M_20100929_F
landsat5_nn_199034_20110511		M_20110511_1
landsat5_nn_199034_20091113		M_20091113_F
landsat5_nn_199034_20101031		M_20101031_F
199035	landsat5_nn_199035_20090708	M_20090708_1
	landsat5_nn_199035_20110628	M_20110628_F
200033	landsat5_nn_200033_20100803	M_20100803_F
	landsat5_nn_200033_20100904	M_20100904_F
	landsat5_nn_200033_20100616	M_20100616_F

	landsat5_nn_200033_20100702	M_20100702_F
	landsat5_nn_200033_20090309	M_20090309_F
	landsat5_nn_200033_20100224	M_20100224_F
	landsat5_nn_200033_20101022	M_20101022_F
200034	landsat5_nn_200034_20100224	M_20100224_F
	landsat5_nn_200034_20090325	M_20090325_F
	landsat5_nn_200034_20090613	M_20090613_F
	landsat5_nn_200034_20090731	M_20090731_F
	landsat5_nn_200034_20090901	M_20090901_F
	landsat5_nn_200034_20100531	M_20100531_F
	landsat5_nn_200034_20100616	M_20100616_F
	landsat5_nn_200034_20100702	M_20100702_F
	landsat5_nn_200034_20100803	M_20100803_F
	landsat5_nn_200034_20100904	M_20100904_F

Anexo II. Distribución de puntos de medida en parcelas

El Anexo II presenta imágenes de la distribución de los puntos considerados en cada parcela de cultivo:

- Figura II.1: Imagen de la parcela Casa Mulero-Roca
- Figura II.2: Imagen de la parcela Villa Antonia

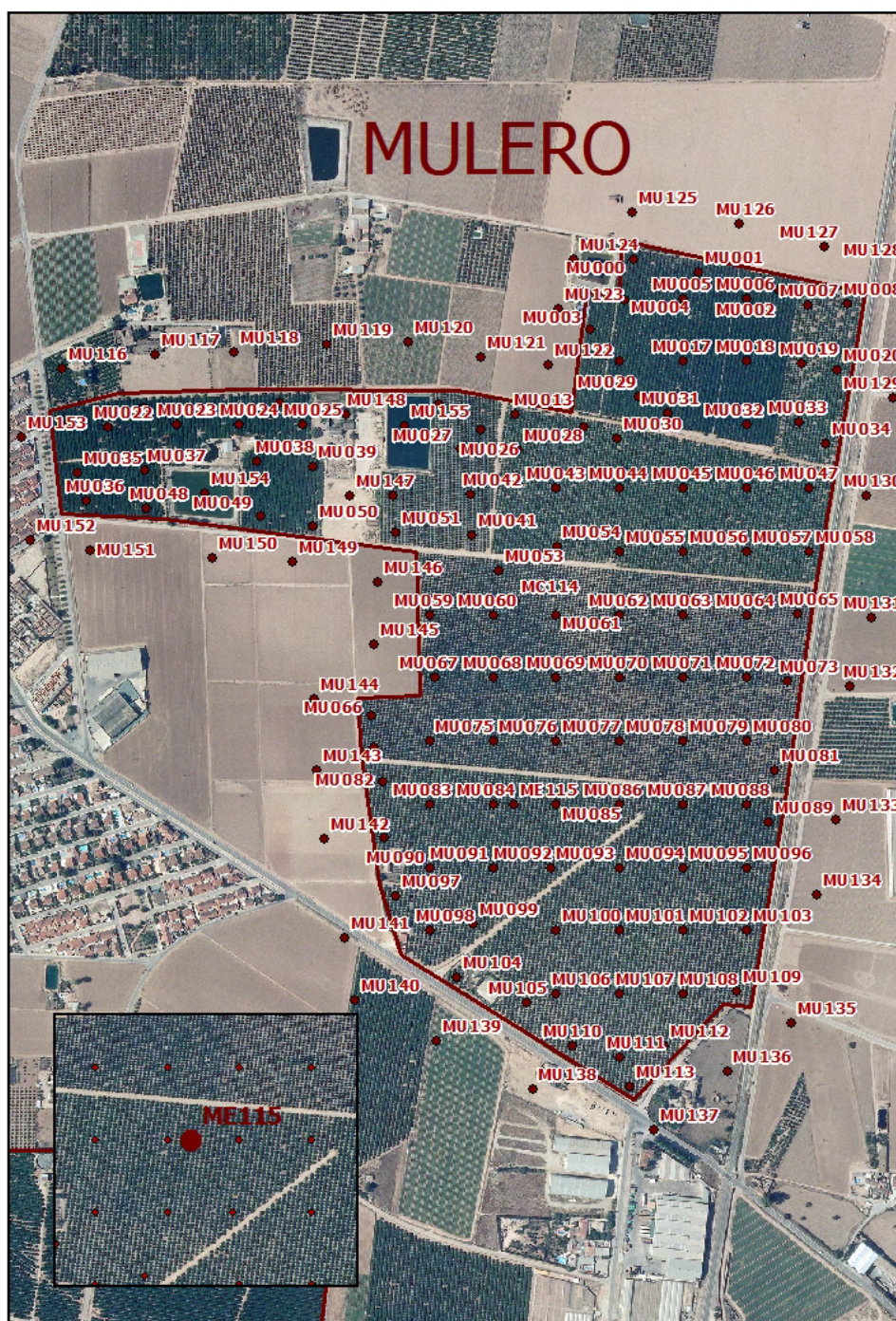


Figura II.1: Imagen de la distribución de puntos y detalle de la situación de la torre de medidas de flujo en la parcela Casa Mulero (ME115). Ortofotografía PNOA.

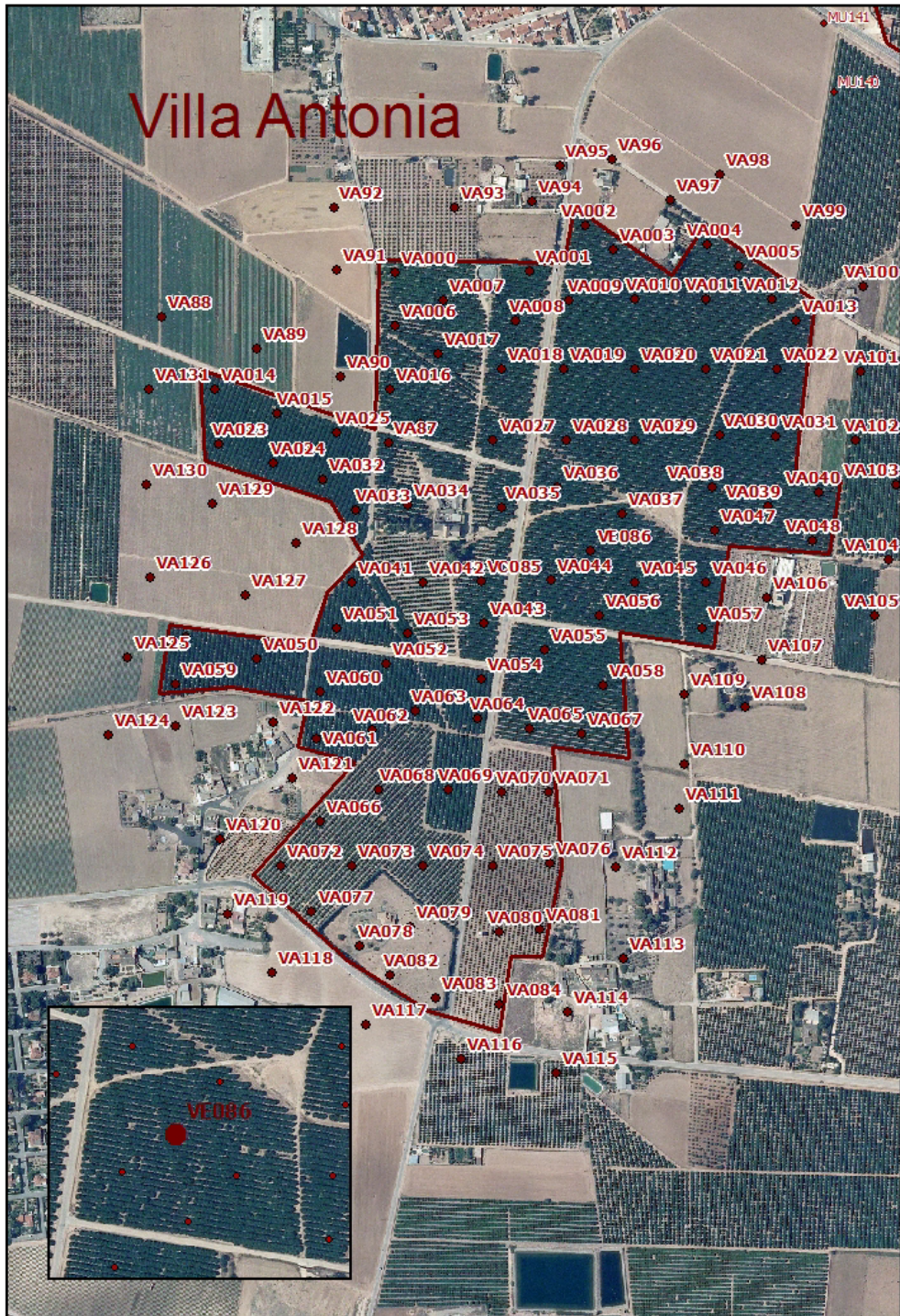
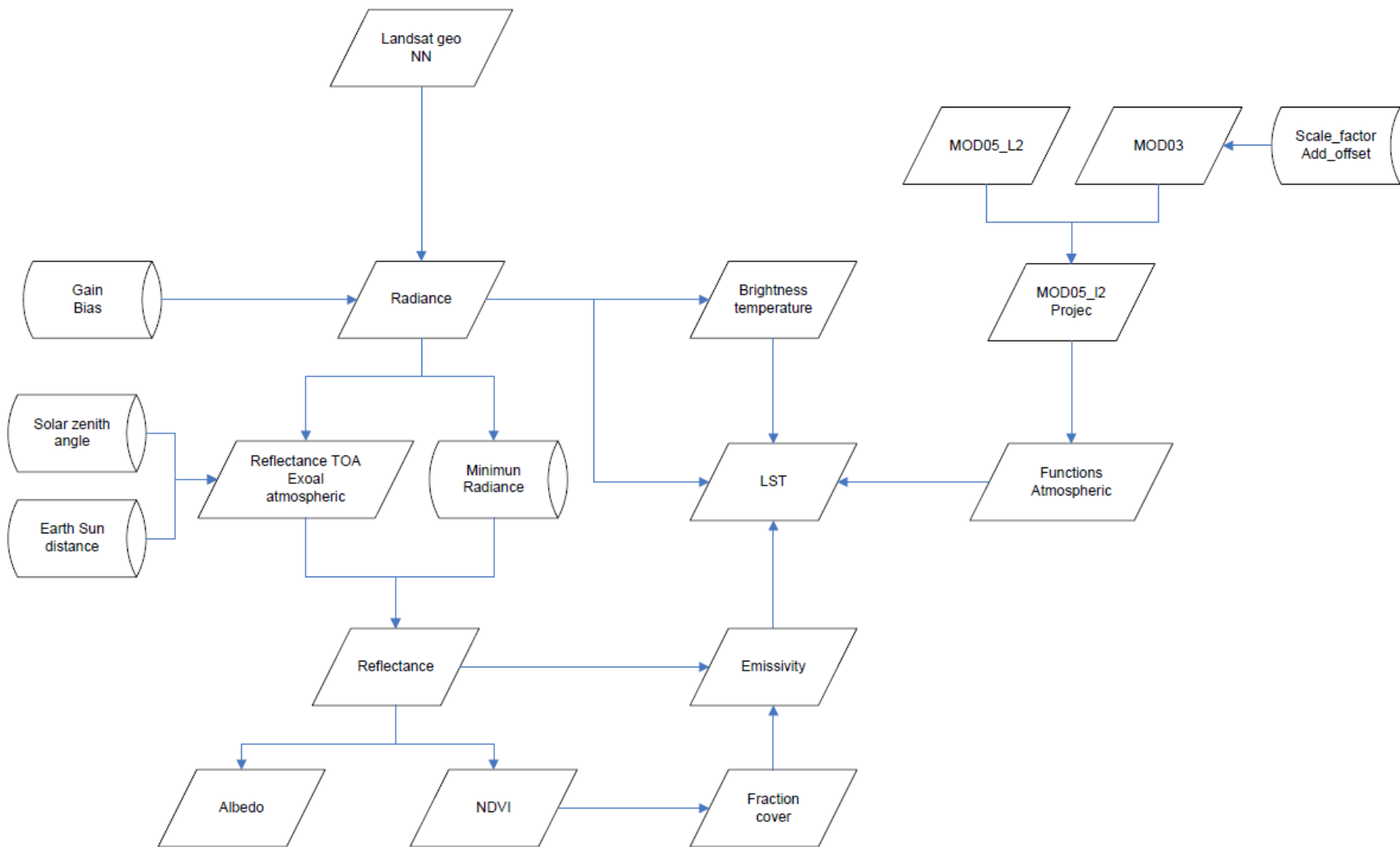


Figura II.2: Imagen de la distribución de puntos y detalle de la situación de la torre de medidas de flujos en la parcela Villa Antonia (VA086). Ortofotografía PNOA.

Anexo III. Flujo de trabajo del tratamiento de imágenes Landsat



Anexo IV. Ángulos cenitales, acimutales y distancias solares de imágenes Landsat procesadas

Imagen	Nº día	Dist Tierra-Sol	Declinación solar	Altura solar	Angulo cenital solar	Angulo acimutal solar	Hora
landsat5_nn_199034_20090214	45	0.988	-13.620	33.3422	56.6578	147.2534	10:29:52
landsat5_nn_199035_20090214	45	0.988	-13.620	34.0412	55.9588	146.6839	10:30:07
landsat5_nn_200034_20090309	68	0.993	-5.200	41.4137	48.5863	143.4994	10:36:35
landsat5_nn_200033_20090309	68	0.993	-5.200	40.4109	49.5891	144.6204	10:36:11
landsat5_nn_199033_20090318	77	0.995	-1.610	43.8647	46.1353	143.2186	10:30:13
landsat5_nn_200033_20090325	84	0.997	1.210	46.5647	43.4353	142.0649	10:36:33
landsat5_nn_200034_20090325	84	0.997	1.210	47.5170	42.4830	140.6765	10:36:57
landsat5_nn_200033_20090512	132	1.010	18.040	61.6205	28.3795	130.4175	10:37:30
landsat5_nn_200033_20090528	148	1.013	21.440	64.0159	25.9841	125.4571	10:37:47
landsat5_nn_199034_20090606	157	1.015	22.650	65.1808	24.8192	119.9935	10:32:09
landsat5_nn_199035_20090606	157	1.015	22.650	65.4881	24.5119	123.1007	10:31:45
landsat5_nn_199033_20090606	157	1.015	22.650	64.6574	25.3426	123.1007	10:31:45
landsat5_nn_199035_20090622	173	1.016	23.450	65.4055	24.5945	115.4235	10:32:43
landsat5_nn_199033_20090622	173	1.016	23.450	64.6717	25.3283	120.7067	10:32:03
landsat5_nn_200033_20090629	180	1.017	23.240	64.2847	25.7153	120.5400	10:38:22
landsat5_nn_199035_20090708	189	1.017	22.480	64.2768	25.7232	116.3325	10:33:00
landsat5_nn_200033_20090715	196	1.016	21.520	60.8096	29.1904	130.5895	10:37:27
landsat5_nn_199035_20090724	205	1.016	19.820	62.3467	27.6533	120.4031	10:33:15
landsat5_nn_200033_20090731	212	1.015	18.170	60.2624	29.7376	127.2175	10:38:52
landsat5_nn_200034_20090731	212	1.015	18.170	60.8883	29.1117	124.6825	10:39:16
landsat5_nn_199034_20090809	221	1.014	15.670	59.2447	30.7553	128.4326	10:35:59
landsat5_nn_199033_20090809	221	1.014	15.670	58.5397	31.4603	130.6098	10:32:49
landsat5_nn_200033_20090816	228	1.013	13.450	57.0265	32.9735	133.4807	10:39:07
landsat5_nn_200034_20090901	244	1.009	7.720	53.9363	36.0637	138.5488	10:39:45
landsat5_nn_199034_20090910	253	1.007	4.220	51.4490	38.5510	142.4612	10:33:28
landsat5_nn_200034_20091003	276	1.006	-5.010	44.3197	45.6803	151.0071	10:40:10
landsat5_nn_199035_20091028	301	0.994	-14.110	37.0412	52.9588	156.3587	10:34:29
landsat5_nn_199033_20091028	301	0.994	-14.110	35.0243	54.9757	157.6616	10:33:35
landsat5_nn_199035_20091113	317	0.990	-18.670	32.4514	57.5486	158.1489	10:34:36
landsat5_nn_199033_20091113	317	0.990	-18.670	30.3961	59.6039	159.2603	10:34:42
landsat5_nn_200033_20091206	340	0.985	-22.700	25.6616	64.3384	159.0817	10:40:05
landsat5_nn_200033_20100123	23	0.984	-19.710	26.9799	63.0201	152.8650	10:40:37
landsat5_nn_200034_20100123	23	0.984	-19.710	28.1187	61.8813	152.1991	10:41:01
landsat5_nn_200033_20100224	55	0.990	-10.150	36.0272	53.9728	147.8546	10:40:43
landsat5_nn_200034_20100224	55	0.990	-10.150	37.0820	52.9180	146.9219	10:41:07
landsat5_nn_200033_20100312	71	0.994	-4.020	41.9361	48.0639	145.4480	10:40:44
landsat5_nn_200034_20100312	71	0.994	-4.020	42.9463	47.0537	144.3048	10:41:08
landsat5_nn_199033_20100406	96	1.001	5.990	51.4355	38.5645	141.1573	10:34:32
landsat5_nn_200033_20100429	119	1.007	14.270	58.8970	31.1030	135.6090	10:40:37
landsat5_nn_200034_20100429	119	1.007	14.270	59.7043	30.2957	133.3893	10:41:00
landsat5_nn_199034_20100508	128	1.009	16.970	61.8955	28.1045	130.4350	10:34:49
landsat5_nn_199035_20100508	128	1.009	16.970	62.6019	27.3981	127.8129	10:35:13

landsat5_nn_199033_20100508	128	1.009	16.970	61.1498	28.8502	132.8942	10:34:25
landsat5_nn_199034_20100524	128	1.009	20.730	64.5793	25.4207	124.8542	10:34:45
landsat5_nn_199035_20100524	128	1.009	20.730	65.1534	24.8466	121.7988	10:35:09
landsat5_nn_199033_20100524	128	1.009	20.730	63.9507	26.0493	127.7554	10:34:22
landsat5_nn_200033_20100531	151	1.014	21.900	64.6641	25.3359	125.6429	10:40:30
landsat5_nn_200034_20100531	151	1.014	21.900	65.2460	24.7540	122.6145	10:40:54
landsat5_nn_200033_20100616	157	1.015	23.350	65.1805	24.8195	122.1034	10:40:26
landsat5_nn_200034_20100616	157	1.015	23.350	65.6749	24.3251	118.9335	10:40:49
landsat5_nn_200033_20100702	183	1.017	23.050	64.3945	25.6055	121.4005	10:40:20
landsat5_nn_200034_20100702	183	1.017	23.050	64.8787	25.1213	118.3017	10:40:29
landsat5_nn_200033_20100718	199	1.016	21.010	62.5880	27.4120	123.7280	10:40:17
landsat5_nn_199034_20100727	208	1.016	19.150	61.8024	28.1976	123.6794	10:34:41
landsat5_nn_199035_20100727	208	1.016	19.150	62.1701	27.8299	121.8306	10:34:50
landsat5_nn_199033_20100727	208	1.016	19.150	61.1983	28.8017	126.2704	10:34:17
landsat5_nn_200033_20100803	215	1.015	17.380	59.9342	30.0658	128.6086	10:41:11
landsat5_nn_200034_20100803	215	1.015	17.380	60.6006	29.3994	126.1686	10:40:20
landsat5_nn_199035_20100812	224	1.013	14.740	59.3078	30.6922	128.3040	10:34:28
landsat5_nn_199033_20100812	224	1.013	14.740	58.1050	31.8950	132.0851	10:33:42
landsat5_nn_200033_20100904	247	1.009	6.570	52.3191	37.6809	141.6157	10:40:17
landsat5_nn_200034_20100904	247	1.009	6.570	53.2612	36.7388	139.9509	10:40:39
landsat5_nn_199033_20100913	256	1.006	3.020	49.6723	40.3277	145.1814	10:33:35
landsat5_nn_199034_20100929	272	1.002	-3.420	45.6913	44.3087	149.6234	10:34:19
landsat5_nn_199035_20100929	272	1.002	-3.420	46.4165	43.5835	148.8410	10:34:14
landsat5_nn_199033_20100929	272	1.002	-3.420	44.5808	45.4192	150.7723	10:33:28
landsat5_nn_200033_20101006	279	1.000	-6.180	42.2598	47.7402	152.8278	10:40:04
landsat5_nn_200034_20101006	279	1.000	-6.180	43.4041	46.5959	151.7902	10:40:28
landsat5_nn_199034_20101015	288	0.997	-9.600	40.4433	49.5567	154.1446	10:33:43
landsat5_nn_199035_20101015	288	0.997	-9.600	41.2167	48.7833	153.5236	10:34:20
landsat5_nn_199033_20101015	288	0.997	-9.600	39.2640	50.7360	155.0604	10:48:00
landsat5_nn_200033_20101022	295	0.995	-12.100	36.9656	53.0344	156.4720	10:39:53
landsat5_nn_200034_20101022	295	0.995	-12.100	38.1660	51.8340	155.6351	10:39:50
landsat5_nn_199034_20101031	304	0.993	-15.060	35.3517	54.6483	157.1277	10:34:04
landsat5_nn_199035_20101031	304	0.993	-15.060	36.1540	53.8460	156.6183	10:34:12
landsat5_nn_199033_20101031	304	0.993	-15.060	34.1311	55.8689	157.8824	10:33:40
landsat5_nn_199035_20101116	320	0.989	-19.380	31.7028	58.2972	158.1373	10:33:55
landsat5_nn_199033_20110220	51	0.989	-11.580	34.4693	55.5307	148.2672	10:33:20
landsat5_nn_199033_20110511	131	1.010	17.780	61.5777	28.4223	131.5869	10:32:57
landsat5_nn_199033_20110628	179	1.017	23.290	64.4899	25.5101	120.7896	10:32:37
landsat5_nn_199034_20110511	131	1.010	17.780	62.3028	27.6972	129.0158	10:33:21
landsat5_nn_199034_20110628	179	1.017	23.290	64.9594	25.0406	117.6686	10:33:00
landsat5_nn_199035_20110511	131	1.010	17.780	62.7525	27.2475	127.2540	10:33:43
landsat5_nn_199035_20110628	179	1.017	23.290	65.2304	24.7696	115.5544	10:33:23
landsat5_nn_200033_20110619	170	1.016	23.430	63.0790	26.9210	130.1253	10:37:39
landsat5_nn_200034_20110619	170	1.016	23.430	65.3972	24.6028	118.1213	10:39:15

Anexo V. Mínimas radiancias correspondientes a las imágenes Landsat procesadas

Radiancias	Valor Min B1	Valor Min B2	Valor Min B3	Valor Min B4	Valor Min B5	Valor Min B7
landsat5_nn_199034_20090214	13.6786	16.6739	5.8926	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20090214	14.4124	20.9063	6.4462	1.6471	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20090309	19.1126	39.3420	12.4257	7.1648	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20090309	16.3314	30.7946	9.4708	1.4706	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20090318	17.0430	28.1903	8.3558	1.0795	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20090325	17.8292	32.7269	10.4696	2.0474	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20090325	17.8514	33.5134	11.9248	4.4543	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20090512	22.0833	46.7532	15.1341	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20090528	20.5266	42.3222	12.8222	3.1947	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20090606	23.5484	46.4582	15.3117	5.9741	0.0002	0.0000
landsat5_nn_199035_20090606	24.6567	49.4131	17.0965	9.2411	0.0191	0.0010
landsat5_nn_199033_20090606	23.6471	46.5227	15.5151	0.0000	0.0033	0.0000
landsat5_nn_199035_20090622	47.9504	31.5308	24.0919	19.5565	1.5305	0.2700
landsat5_nn_199033_20090622	38.2109	0.0000	13.9648	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20090629	37.9252	22.3960	13.4815	5.6756	0.1660	0.0000
landsat5_nn_199035_20090708	41.2696	25.9309	16.4865	8.9624	0.7901	0.0973
landsat5_nn_200033_20090715	34.3316	19.2525	9.2913	1.9235	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20090724	46.5089	36.1010	24.7840	23.1412	3.5899	0.8222
landsat5_nn_200033_20090731	34.0718	19.3847	9.8069	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20090731	33.0620	16.5555	9.2661	1.9344	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20090809	40.3980	22.3256	13.4180	0.0000	0.3712	0.0000
landsat5_nn_199033_20090809	34.8818	18.9007	11.8942	0.0000	0.1238	0.0000
landsat5_nn_200033_20090816	32.0080	16.4486	9.4154	0.0000	0.0955	0.0000
landsat5_nn_200034_20090901	33.0164	19.9742	11.5697	5.5574	0.2403	0.0000
landsat5_nn_199034_20090910	36.7865	21.1044	12.4709	5.8690	0.4682	0.0000
landsat5_nn_200034_20091003	25.5934	12.0834	5.6965	2.1120	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20091028	26.2099	11.7193	5.8871	3.0153	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20091028	25.4603	11.9300	5.7125	2.1231	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20091113	25.2684	11.3590	5.8552	3.4514	0.0994	0.0000
landsat5_nn_199033_20091113	39.7622	28.6821	20.4055	15.6018	1.9231	0.5244
landsat5_nn_200033_20091206	17.6851	6.3518	1.6493	0.5948	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100123	0.0000	10.7706	5.2904	2.3945	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100123	20.7727	10.2554	5.1199	2.2765	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100224	24.6258	13.2725	5.2847	3.7941	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100224	24.6678	13.2851	7.1878	3.7629	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100312	45.2480	20.7308	11.1862	6.5769	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100312	0.0000	17.7104	9.5192	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20100406	41.3363	28.8754	18.7059	10.8129	1.0913	0.2109
landsat5_nn_200033_20100429	48.3270	37.6624	26.4921	21.4111	0.0000	0.7083
landsat5_nn_200034_20100429	46.2529	36.5896	26.1850	19.2462	0.0000	0.4538
landsat5_nn_199034_20100508	44.0825	28.2498	17.4851	11.7034	0.0000	0.0803
landsat5_nn_199035_20100508	51.5298	35.9278	25.9740	20.5640	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20100508	39.5672	23.7104	13.4350	0.0000	0.0000	0.0426
landsat5_nn_199034_20100524	42.3952	28.7264	16.8714	8.2555	0.0000	0.0000

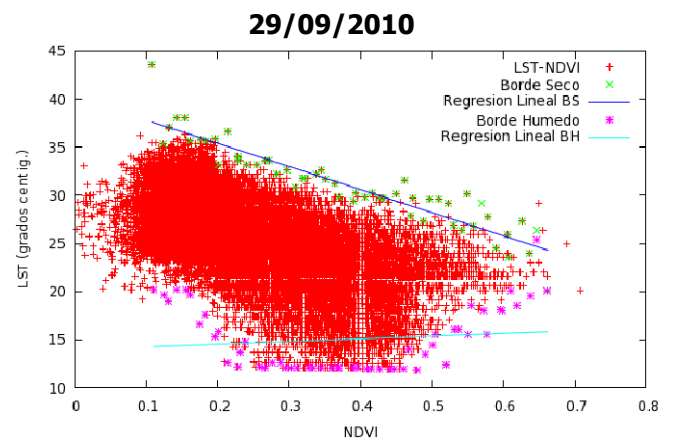
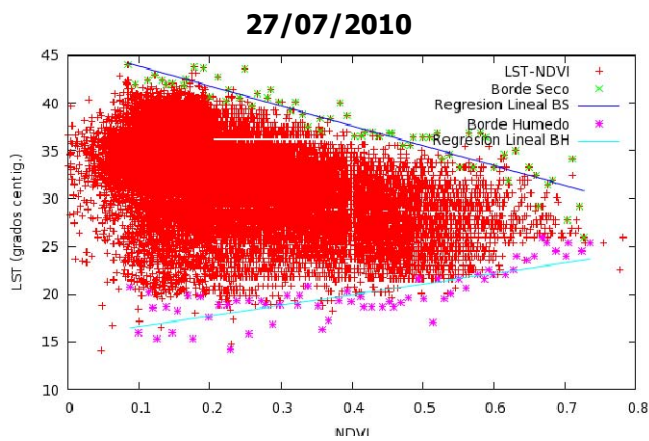
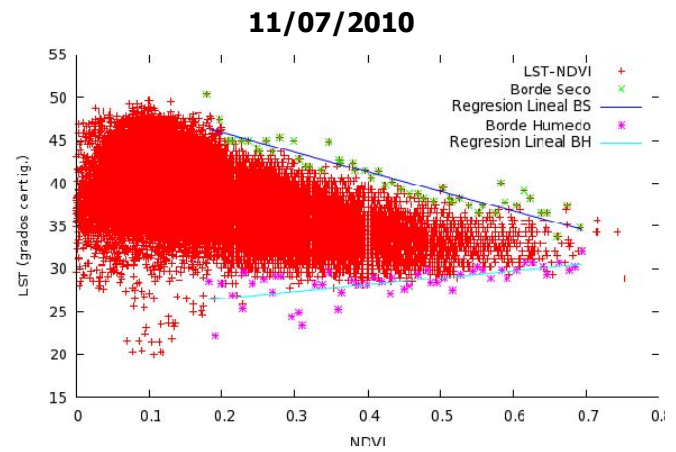
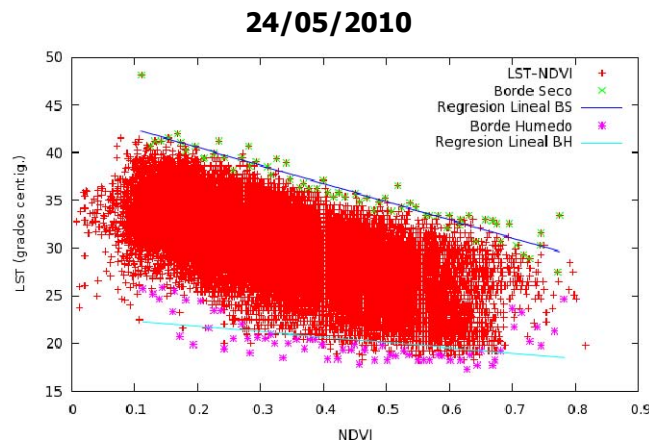
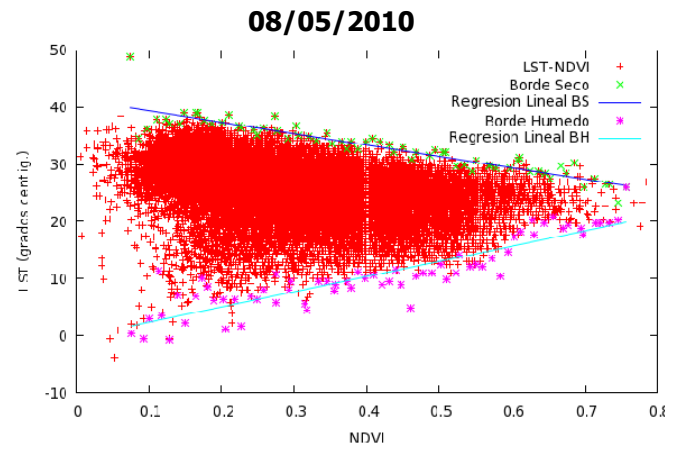
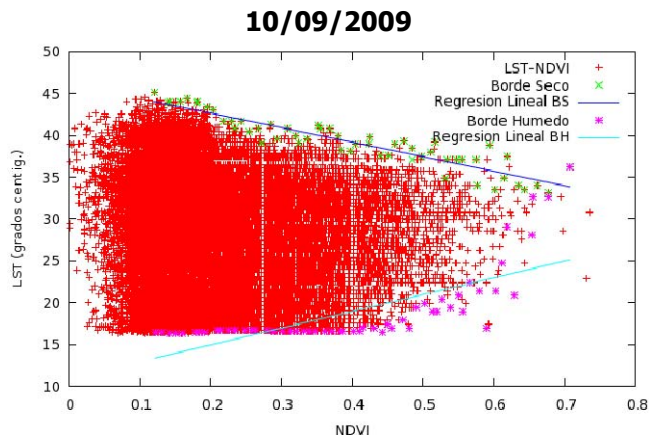
landsat5_nn_199035_20100524	47.5349	38.4605	24.6249	13.9530	0.0000	0.4192
landsat5_nn_199033_20100524	41.3337	28.8754	18.7056	10.8129	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100531	35.6875	20.4856	10.3973	4.0516	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100531	0.0000	0.0000	11.1386	4.0697	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100616	32.7306	17.5150	9.6871	4.0491	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100616	33.1327	17.7540	10.3252	0.0000	0.0146	0.0000
landsat5_nn_200033_20100702	33.0225	14.9734	8.8874	0.0000	0.6378	0.0000
landsat5_nn_200034_20100702	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100718	36.6783	21.4340	11.5257	4.5988	0.2306	0.0000
landsat5_nn_199034_20100727	37.5894	20.9003	11.8909	3.7688	0.1285	0.0000
landsat5_nn_199035_20100727	39.7218	23.3219	14.5937	8.2719	1.4552	0.1262
landsat5_nn_199033_20100727	32.8837	15.9912	8.3868	1.5648	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20100803	33.0486	17.9534	9.4396	3.7385	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100803	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20100812	38.7000	22.7560	14.7792	13.1082	1.6868	0.2366
landsat5_nn_199033_20100812	39.9274	25.0499	13.5562	5.1670	0.1384	0.0000
landsat5_nn_200033_20100904	26.0669	13.2483	7.2790	2.5964	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20100904	0.0000	0.0000	7.2140	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20100913	31.9442	16.0906	8.2211	2.0530	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20100929	28.2555	12.1766	6.1562	1.1422	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20100929	30.2148	15.9800	9.0957	4.7707	0.1995	0.0000
landsat5_nn_199033_20100929	27.0009	13.0308	5.3025	0.9425	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20101006	25.7318	13.0194	6.1444	2.0935	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20101006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20101015	27.6445	11.7821	5.5958	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20101015	29.0688	13.0469	6.3529	2.9114	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20101015	26.7570	11.8825	5.6816	0.6415	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20101022	22.9166	9.5297	4.0321	1.3041	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20101022	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20101031	25.4126	11.6594	5.2209	1.3833	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20101031	25.9412	11.8219	6.2483	3.2288	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20101031	26.7410	11.8689	5.6762	0.6415	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199035_20101116	22.1874	10.0450	4.2992	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199033_20110220	0.0000	10.2577	4.8661	0.3270	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20110511	38.8202	23.9184	14.7817	5.4006	0.3333	0.0000
landsat5_nn_199035_20110511	41.3235	27.7350	18.5003	20.3462	2.6304	0.4899
landsat5_nn_199033_20110511	37.1507	21.0313	9.8259	2.8784	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200033_20110619	35.1885	19.2841	8.4071	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_200034_20110619	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
landsat5_nn_199034_20110628	40.6951	25.0702	15.6968	8.7228	1.0828	0.1297
landsat5_nn_199035_20110628	40.3655	24.6039	15.3760	12.8245	1.6928	0.2837
landsat5_nn_199033_20110628	41.1928	129.6000	15.6005	6.3655	0.4842	0.0000

Anexo VI. Estaciones agrometeorológicas consideradas

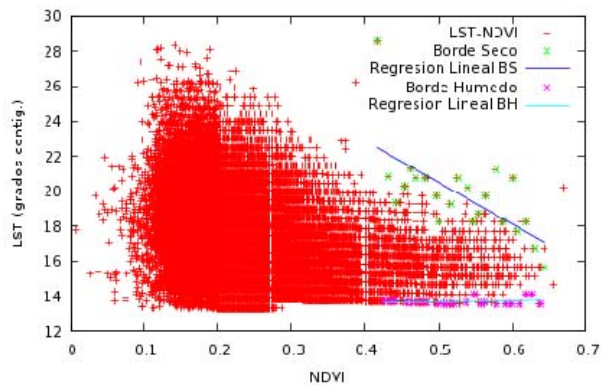
ESTACIONES			
COD	ESTACIÓN	XUTM	YUTM
AB01	TARAZONA	593280	4345926
AB02	JUANACO	529692	4346583
AB03	ALMANSA	664184	4307954
AB04	HELLÍN	612300	4260690
AB05	ALBACETE	595314	4311962
AB06	ONTUR	630940	4276220
AB07	POZOCAÑADA	608291	4295449
AB08	LA GINETA	585335	4328526
AB09	MOTILLEJA	606389	4336016
AB10	CAUDETE	675774	4289496
AL06	VIRGEN DE FÁTIMA-CUEVAS DE ALMANZORA	608951	4138960
AL07	HUÉRCAL-OVERA	598844	4141406
AL08	CUEVAS DE ALMANZORA	606478	4124237
AL31	TOTANA	631023	4177172
AL41	ALHAMA	639400	4183940
AL51	LIBRILLA	646098	4195952
AL62	MAZARRÓN	641224	4158438
CA12	CARTAGENA	680675	4173267
CA21	MURCIA	665209	4188766
CA42	FUENTE ALAMO	664813	4179533
CA52	CARTAGENA	670129	4171693
CA72	LA UNIÓN	683620	4166587
CA91	FUENTE ALAMO	655332	4173881
CI22	BLANCA	647926	4233286
CI32	ULEA	652564	4228485
CI42	CIEZA	631283	4239079
CI52	CALASPARRA	614203	4234746
CR12	CARAVACA	589496	4211178
CR32	CEHEGIN	615466	4218939
CR42	MORATALLA	603922	4228300
CR52	CEHEGIN	606972	4218110
CR61	MORATALLA	579202	4218933
GR01	BAZA	520628	4157712
GR02	PUEBLA DE DON FADRIQUE	554482	4192456
GR05	IZNALLOZ	451312	4141428
JA01	HUESA	494672	4177995
JA02	POZO ALCÓN	506267	4169627
JA11	CHICLANA DE SEGURA	504003	4239630
JA14	SANTO TOMÉ	492827	4209275
JA16	MARMOLEJO	396245	4211908
JU12	JUMILLA	637690	4250801
JU42	YECLA	657843	4280492
JU52	YECLA	664448	4269943
ju71	JUMILLA (LAS ENCEBRAS)	653629	4250841
JU81	JUMILLA	646483	4242623
LO11	LORCA	620981	4162511
LO21	LORCA	615444	4151563
LO31	AGUILAS	624577	4142248
LO41	LORCA	604000	4190456
LO51	AGUILAS	621649	4149877

LO61	PUERTO LUMBRERAS	612515	4161142
ML12	MULA	637771	4214288
ML21	MULA	634545	4211477
MO12	TORRES DE COTILLAS	649024	4207948
MO22	MOLINA SEGURA	655954	4221455
MO31	MOLINA SEGURA	655031	4215095
MO41	ABANILLA	670483	4226398
MO51	FORTUNA	661841	4225294
MO61	OJOS	646209	4221140
MU21	BENIEL	675540	4211532
MU31	MURCIA	652257	4195930
mu52	MURCIA (CABEZO PLATA)	677062	4205239
MU62	MURCIA (LA ALBERCA	663907	4200807
TP22	SAN JAVIER (SANTIAGO DE LA RIBERA)	691976	4184939
TP42	TORRE PACHECO	685074	4182798
TP52	SAN JAVIER (EL MIRADOR	685074	4182798
TP73	TORRE PACHECO (LOS INFIERNOS	682041	4188284
TP91	TORRE PACHECO (LOS INFIERNOS	677368	4179725
VA01	AGOST	705164	4255200
VA02	ALMORADÍ	695317	4211642
VA03	ALTEA	754321	4276842
VA04	CALLOSA D'EN SARRIÀ	751970	4281914
VA05	CALLOSA D'EN SARRIÀ (MALLA)	751970	4281914
VA06	CAMP DE MIRRA	693722	4283544
VA07	CASTALLA	702610	4275463
VA08	CATRAL	692274	4225086
VA09	CREVILLENTE	694012	4234860
VA10	DÉNIA GATA	246618	4297815
VA11	ELX EEA	701609	4235864
VA12	MONFORTE DEL CID	698210	4252499
VA13	ONDARA	240108	4300895
VA14	ORIHUELA LA MURADA	679120	4227949
VA15	PÍLAR DE LA HORADADA	692405	4193488
VA16	PINOSO	669278	4255019
VA17	PLANES	729979	4296196
VA18	VILA JOIOSA	739182	4267965
VA19	VILLENA	685024	4274032

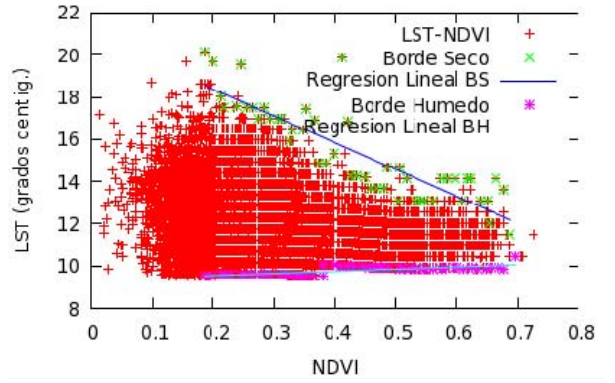
Anexo VII. Espacios LST-NDVI



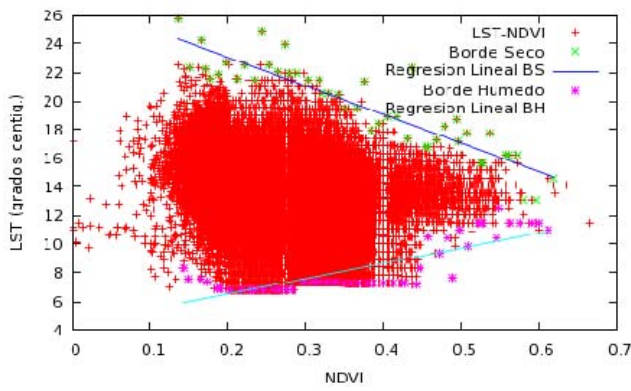
16/11/2010



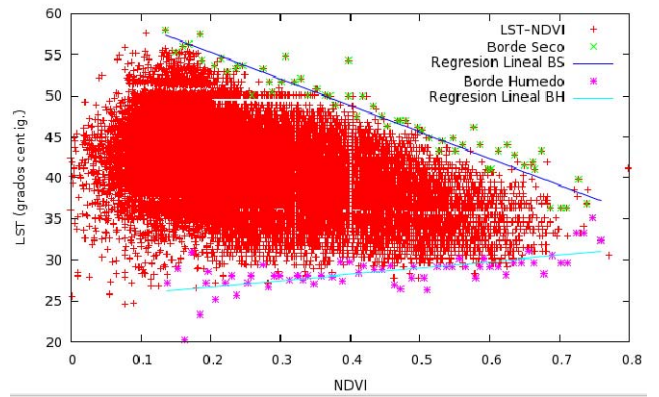
02/12/2010



04/02/2011



28/06/2011



Anexo VIII. Contraste de resultados medidos y estimados en parcela

Tabla VIII.1: Variables medidas en torres de medidas de flujo

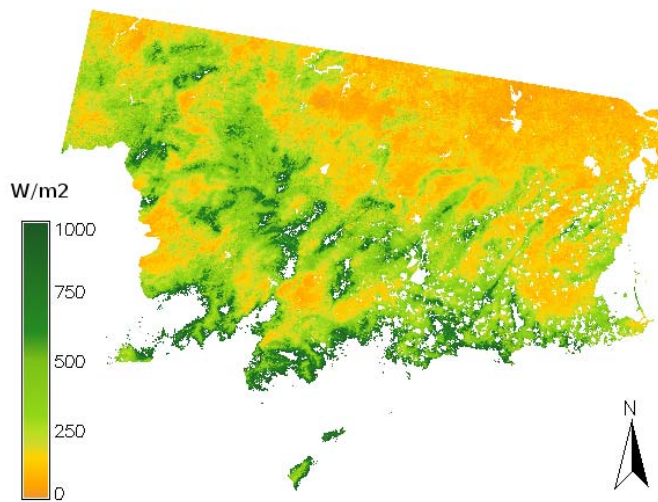
FECHA	T_a ($^{\circ}C$)	R_s^{\downarrow} (W/m^2)	R_s^{\uparrow} (W/m^2)	R_L^{\downarrow} (W/m^2)	R_L^{\uparrow} (W/m^2)	T_{can} ($^{\circ}C$)	G (W/m^2)	R_N (W/m^2)	λET (W/m^2)
10/09/2009	26,78	552,38	110,48	403,23	477,02	28,77	1,11	368,11	197,03
08/05/2010	21,62	652,09	130,42	341,26	452,60	25,35	26,54	410,33	118,03
24/05/2010	23,99	905,01	181,00	362,18	470,52	29,19	20,48	615,67	237,98
11/07/2010	29,25	826,39	165,28	398,47	489,65	33,26	20,39	569,93	232,00
27/07/2010	28,42	775,01	155,00	391,94	493,30	31,66	3,26	518,65	222,02
29/09/2010	24,92	623,41	143,38	361,96	465,84	27,97	16,95	376,15	215,78
16/11/2010	17,33	453,15	90,63	291,92	418,64	19,85	-1,95	235,80	155,43
02/12/2010	12,86	399,01	91,77	287,22	391,01	15,52	-4,34	203,45	123,70
04/02/2011	14,36	436,51	72,05	296,95	393,85	14,19	8,14	267,57	110,09
28/06/2011	28,30	833,44	124,22	402,46	490,35	31,31	0,00	621,33	251,02

Tabla VIII.2: Variables estimadas desde imágenes Landsat a partir de las medias de las distribuciones espaciales

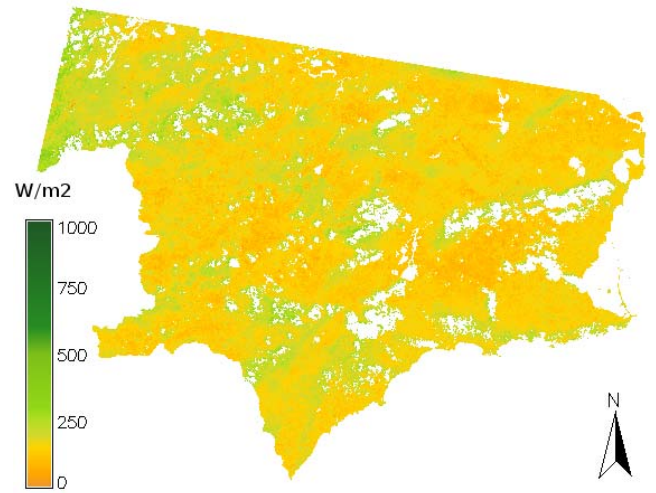
FECHA	T_a ($^{\circ}C$)	R_s^{\downarrow} (W/m^2)	R_s^{\uparrow} (W/m^2)	R_L^{\downarrow} (W/m^2)	R_L^{\uparrow} (W/m^2)	LST ($^{\circ}C$)	G (W/m^2)	R_N (W/m^2)	λET (W/m^2)
10/09/2009	24,08	648,50	86,84	355,98	476,00	30,33	52,37	441,64	197,14
08/05/2010	18,56	804,70	140,49	318,19	441,87	24,72	77,76	540,53	181,20
24/05/2010	21,46	824,56	144,79	337,69	441,19	24,60	55,25	576,27	317,66
11/07/2010	27,06	803,83	142,38	377,90	491,55	32,79	61,25	547,80	261,39
27/07/2010	26,33	787,26	148,39	372,32	465,17	28,61	67,71	546,02	230,51
29/09/2010	22,64	563,25	108,41	345,53	422,58	21,48	34,66	377,80	215,65
16/11/2010	16,44	423,63	98,41	304,52	393,98	16,31	16,99	235,75	157,02
02/12/2010	10,93	412,02	79,96	271,43	371,35	12,04	22,62	232,14	126,26
04/02/2011	11,22	474,79	118,37	272,96	380,99	13,91	29,26	248,40	111,75
28/06/2011	26,07	808,38	138,28	370,29	509,92	35,64	60,18	530,47	249,21

Anexo IX. Distribuciones espaciales de ET_{real}

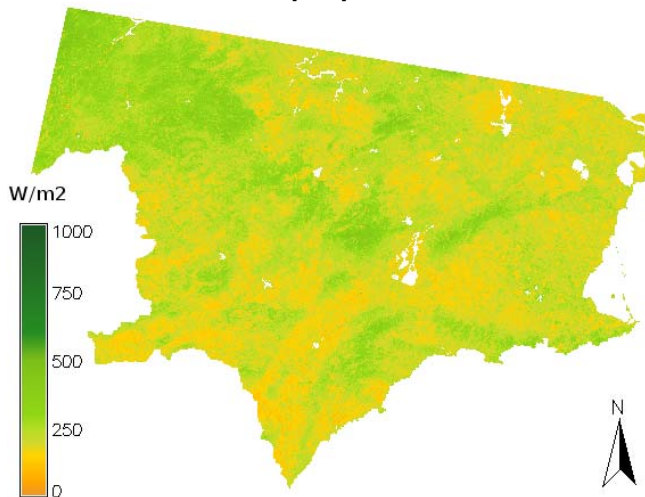
10/09/2009



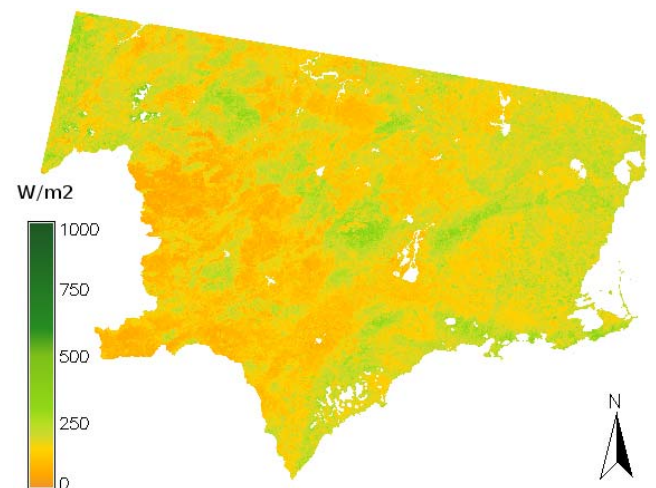
08/05/2010



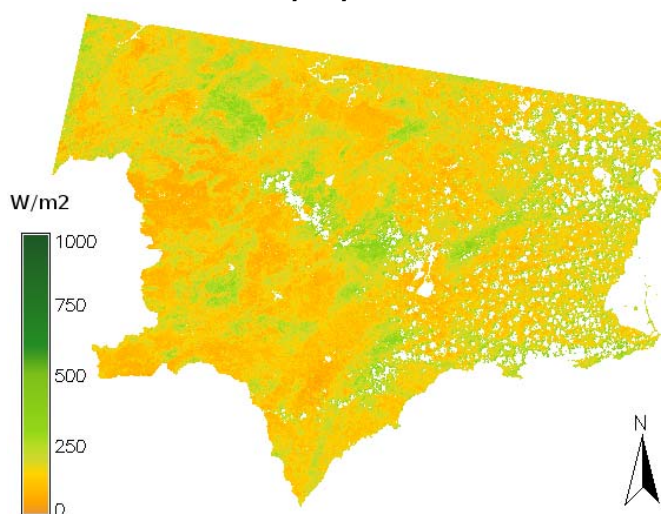
24/05/2010



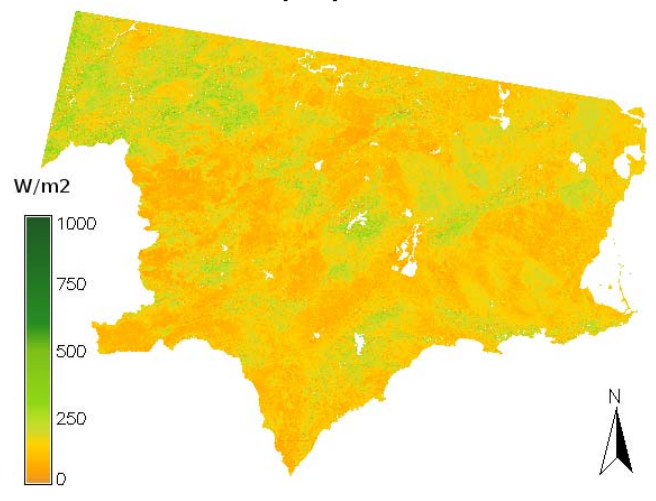
11/07/2010



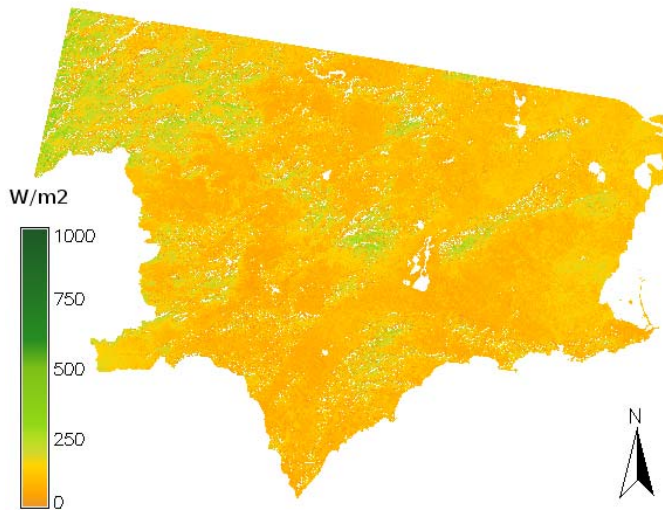
27/07/2010



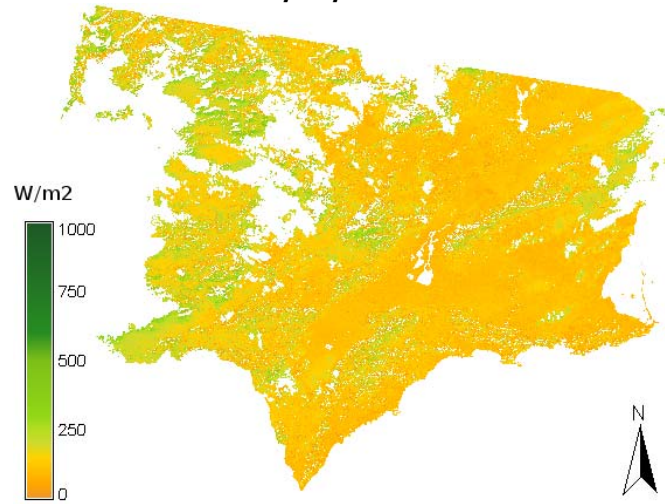
29/09/2010



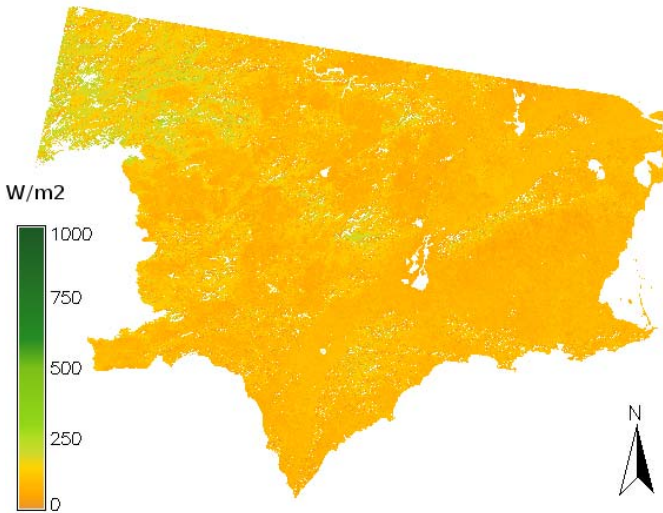
16/11/2010



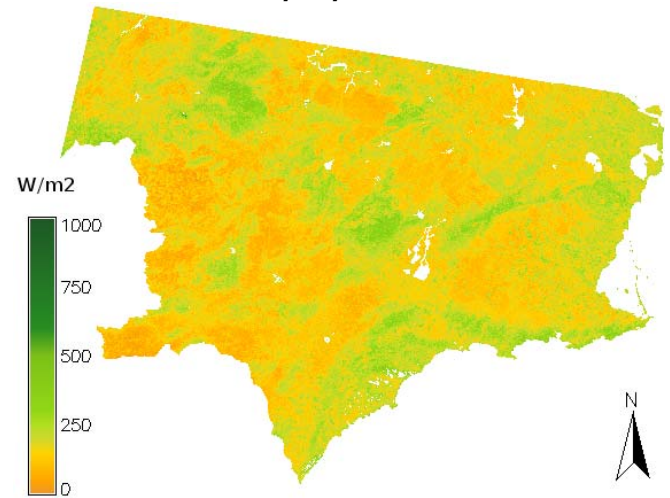
02/12/2010



04/02/2011



28/06/2011



Anexo X. Análisis de clúster

La mayoría de las pruebas estadísticas comienzan al identificar una hipótesis nula. La hipótesis nula para las herramientas de análisis de patrones es la aleatoriedad espacial completa, indicaría un patrón aleatorio, o de lo contrario una dispersión estadísticamente significativa.

Las desviaciones estándar (z) y los valores de probabilidad (p) devueltos por los estadísticos de análisis de clúster dicen si se puede rechazar la hipótesis nula o no.

En el análisis de clúster, existe la probabilidad de que el patrón espacial observado se haya creado mediante algún proceso aleatorio. Cuando el valor p es muy pequeño, significa que es muy poco probable (pequeña probabilidad) que el patrón espacial observado sea el resultado de procesos aleatorios, por lo tanto puede rechazar la hipótesis nula.

Tanto los valores de z como los valores p se asocian con la distribución normal estándar como se muestra a en la Figura X.1.

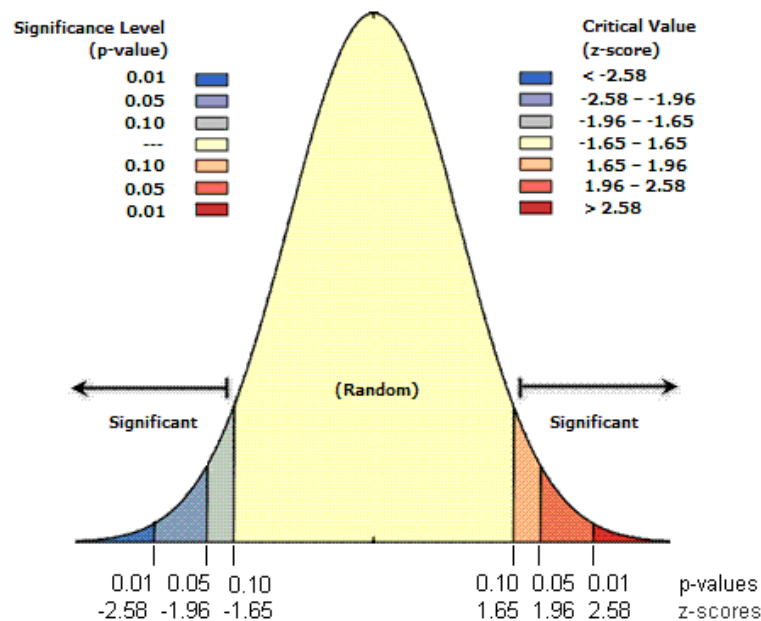


Figura X.1: valores z y p que se asocian con la distribución normal

z muy altas o muy bajas (negativas), asociadas con valores p muy pequeños, se encuentran en las colas de la distribución normal. Cuando el análisis de clúster produce valores p pequeños y z muy alta o muy baja, indica que es poco probable que el patrón espacial observado refleje el patrón aleatorio teórico representado por su hipótesis nula.

Para rechazar la hipótesis nula, se formula una opinión subjetiva con respecto al grado de riesgo que desea aceptar por estar equivocado (por rechazar falsamente la hipótesis nula). Por lo tanto se selecciona un nivel de confianza. En la tabla X.1 se muestran las desviaciones típicas y las probabilidades críticas para distintos niveles de confianza.

Tabla X.1: desviaciones típicas y las probabilidades críticas para distintos niveles de confianza.

Desviaciones estándar	Probabilidad	Nivel de confianza
< -1,65 o > +1,65	< 0.10	90%
< -1,96 o > +1,96	< 0.05	95%
< -2,58 o > +2,58	< 0.01	99%

Si consideramos un nivel de confianza del 95 %, se trata de desviaciones estándar de -1,96 y +1,96. La probabilidad asociada con un nivel de confianza del 95 por ciento es 0,05. Si su desviación está entre -1,96 y +1,96, su probabilidad será mayor que 0,05, y no puede rechazar la hipótesis nula; el patrón exhibido probablemente podría ser el resultado de procesos espaciales aleatorios. Si la desviación estándar cae fuera de ese rango (por ejemplo, desviaciones estándar de -2,5 ó +5,4), probablemente sea muy poco común que el patrón espacial observado sea el resultado de la opción aleatoria, y el valor p será pequeño para reflejar esto. En este caso, es posible rechazar la hipótesis nula y seguir averiguando qué puede estar causando la estructura espacial estadísticamente significativa en los datos.

Los valores en el medio de la distribución normal (puntuaciones z como 0,19 ó 1,2, por ejemplo) representan el resultado esperado. Sin embargo, cuando el valor absoluto de la puntuación z es grande y las probabilidades son pequeñas (en las colas de la distribución normal), se detecta algo poco común y por lo general muy interesante. Un punto caliente estadísticamente significativo o un punto frío estadísticamente significativo.

Con el estadístico G_i^* de Getis-Ord, las probabilidades (p) y las desviaciones estándar (z) resultantes indican dónde se agrupan espacialmente las entidades con valores altos o bajos, buscando en cada entidad, dentro del contexto de entidades vecinas. Una entidad con un valor alto es interesante, pero es posible que no sea un punto caliente estadísticamente significativo. Para ser un punto caliente

estadísticamente significativo, una entidad debe tener un valor alto y también estar rodeada por otras entidades con valores altos. La suma local para una entidad y sus vecinos se compara proporcionalmente con la suma de todas las entidades; cuando la suma local es muy diferente de la esperada, y esa diferencia es demasiado grande como para ser el resultado de una opción aleatoria, se obtiene como consecuencia una desviación estándar estadísticamente significativa.

La estadística G_i^* devuelta para cada entidad es una desviación estándar (z). El valor z representa la significación estadística de agrupación para una distancia especificada. Para los valores z positivas que son estadísticamente significativas, mientras más grande es el valor de z, más intenso es el clustering de valores altos (punto caliente). Para las puntuaciones z negativas que son estadísticamente significativas, mientras más pequeña es la puntuación z, más intenso es el clustering de valores bajos (punto frío). Para el cálculo del indicador G_i^* se obtiene la suma del atributo en el punto y sus vecinos y se compara proporcionalmente con la suma del atributo en todos los puntos y se compara esta proporción con la esperada para una distribución aleatoria. Su formulación es la siguiente:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (X.1)$$

Donde, S es la desviación estándar de los valores en cada uno de los puntos o eventos, x los valores en cada punto, \bar{X} es la media, es igual a 1 si el punto j está dentro de una distancia previamente definida al punto i. El valor resultante es testado respecto al valor para una distribución normal.