Universidad
Politécnica
de Cartagena

Campus
de Excelencia
Internacional

EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DESDE SATÉLITE. APLICACIÓN A LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL SEGURA

*Tecnologías Avanzadas en Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario*

(Fotografía: "Signs of Spring". Auditoría: NASA Goddard GPM)

*Autor: José Ángel Martínez Pérez
Directores: Sandra García Galiano y Alain Baille*

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 (ref. EC-DG ENV. Grant nº 241559).
- “Uso sostenible del agua de riego en la Región Mediterránea”, SIRRIMED (ref. FP7-245159).
- “Accounting System for the SEgura river and Transfers” ASSET (ref. EC-DG ENV. Grant nº 07.0329)
- "Evaluación de Variabilidad Hidroclimática desde Combinaciones Multimodelo Climáticas Regionales", HYDROCLIM (ref. CGL2012-39895-C02-01).
- “Análisis de la potencialidad de la información satelital y otra fuentes automáticas para pronóstico, seguimiento y extensión de zonas inundables. Catedra Ayuntamiento de Cartagena -UPCT
- Al Plan Nacional de Teledetección (Instituto Geográfico Nacional) por la provisión de imágenes de satélite.
- A la Confederación Hidrográfica del Segura por la cesión de información, que ha permitido llevar a cabo este trabajo.

A mis directores, Dra. Sandra García Galiano y Dr. Alain Baille por haber depositado su confianza en mí y querer dirigir este trabajo.

A Patricia Olmos, por tantas vivencias, mejor compañera de viaje no he podido tener.

Y en especial a mi gran familia, que siendo pequeña los engrandece por todo lo que me dan, os quiero con locura.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	5
1.1. Motivación.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Estructura de la Tesis.....	7
2. ANTECEDENTES.....	9
2.1. Introducción.....	9
2.2. Métodos para la obtención de ET_{real} mediante satélite.....	9
2.2.1. ET_{real} obtenida como residuo del balance energía.....	9
2.2.2. ET_{real} obtenida mediante el método gráfico.....	9
2.2.3. ET_{real} obtenida a partir de condiciones referencia.....	12
2.3. El potencial ET_{real} en un sistema de contabilidad hídrica.....	13
3. ZONA DE ESTUDIO.....	17
3.1. La Cuenca del Río Segura.....	17
3.1.1. La zona regable de Campo Cartagena.....	21
4. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	23
4.1. Información requerida.....	23
4.1.1. Datos observados para la validación de resultados.....	23
4.1.2. Datos requeridos para la aplicación de algoritmos.....	24
4.1.3. Datos requeridos para el completado de balances hídricos.....	39
4.2. Software empleado.....	41
5. ESTIMACIÓN DE ET_{REAL} A ESCALA INSTANTANEA Y SU VALIDACIÓN.....	43
5.1. Introducción.....	43
5.2. Metodología.....	43
5.2.1. Algoritmo de estimación de ET_{real}	43
5.2.2. Determinación automática de los End-Members.....	46
5.2.3. Análisis del ajuste.....	46
5.3. Resultados.....	47
5.3.1. Valores estimados vs. verdad terreno.....	47
5.3.2. Sensibilidad de EF al valor de α	49
5.3.3. Sensibilidad de EF a la forma del espacio.....	52
5.3.4. Validación de resultados de ET_{real}	55
5.4. Discusión de los resultados.....	57
5.4.1. Diferencias inducidas a la forma del espacial.....	57
5.4.2. Incertidumbres debidas a R_n	58
5.4.3. Incertidumbres debidas al valor de α	59
5.4.4. Exactitud global.....	59
6. ESTIMACIÓN DE ET_{REAL} A ESCALA MENSUAL Y SU VALIDACIÓN.....	61
6.1. Introducción.....	61
6.2. Metodología.....	61
6.2.1. Sistema de Contabilidad Hídrico SEEA-Water.....	61
6.2.2. Barreras en la aplicación de SEEA-Water: la agregación espacial y temporal.....	64
6.2.3. Desarrollo de una Herramienta de Apoyo a la Toma de Decisión.....	64

6.2.4.	Algoritmo para la obtención de ET_{real}	65
6.2.5.	Modelo lógico de datos para las Tablas ASSET del sistema SEEA-WATER.....	66
6.3.	Resultados	68
6.3.1.	Modelización de la cuenca alta del río Segura.....	68
6.3.2.	Completado de las Tabla ASSET.....	71
6.4.	Discusión de resultados	79
7.	CONCLUSIONES	83
7.1.	Conclusiones	83
7.1.1.	Estimación de ET_{real} y su validación a escala temporal instantánea.....	83
7.1.2.	Estimación de ET_{real} y su validación a escala temporal mensual.....	84
7.2.	Líneas futuras de investigación	85
8.	BIBLIOGRAFÍA	87
9.	ANEJO I	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1. Parcelas experimentales: (a) Mapa ubicación de las parcelas y (b) imagen de torre de medidas de flujos. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.....	24
Figura 4.2. Distribuciones espaciales de temperaturas (Fecha: 28/06/2011): - modelo propuesto por Cristobal <i>et al.</i> (2008) (a) T_{max} y (c) T_{min} y modelo propuesto Hengl <i>et al.</i> (2012) (b) T_{max} y (d) T_{min}	32
Figura 4.3. Variogramas experimentales standards para T_{max} (a) y T_{min} (b) y semivariogramas ajustados de T_{max} (c) y T_{min} (d) para el Año 2010.....	33
Figura 4.4. Correlación entre temperatura del aire estimada y observada, validación de parcela....	34
Figura 4.5. Correlación entre temperatura del aire estimada y observada instantánea de composiciones de 8 días, validación a escala de cuenca para los años: (a) 2009, (b) 2010, (c) 2011.....	34
Figura 4.6. Distribuciones espaciales de temperatura del aire (a) modelo según Cristóbal <i>et al.</i> (2008 y (b) modelo propuesto Hengl <i>et al.</i> (2012) Fecha: 28/06/2011. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.....	35
Figura 4.7. Muestras del comportamiento de los residuos para diferentes fechas de acuerdo con el modelo propuesto.....	36
Figura 4.8. Correlación entre LST MODIS y temperatura observada instantánea 8 días: (a) 2009, (b) 2010, (c) 2011.....	37
Figura 4.9. Correlación entre LST MODIS corregido y temperatura observada instantánea 8 días: (a) 2009, (b) 2010, (c) 2011.....	37
Figura 4.10. Distribuciones espaciales de LST (Composición: 15/04/2010) (a) producto bruto, (b) producto corregido. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.	38
Figura 4.11. Imagen empleada para la definición de la zona permeable de la zona regable del Campo de Cartagena. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.....	38
Figura 5.1. Comparación entre variables estimadas vs verdad terreno: (a) LST ; and (b) R_n	49
Figura 5.2. Sensibilidad de EF a la variación de α en un rango [0.7, 1.3] con incremento de 0.1 para la forma trapezoidal (TR) y la forma rectangular (RC).....	50
Figura 5.3. Diagrama de cajas de EF considerando $\alpha = 1.3$ and $\alpha = 1$, para las fechas 11/07/2010, 29/09/2010, 16/11/2010 y 28/06/2011: (a,c,e,g) forma trapezoidal (TR); y (b,d,f,h) formar rectangular (RC).	51
Figura 5.4. Histogramas de frecuencia de ET_{real} para $\alpha = 1$ y las dos formas en las fechas 11/07/2010, 29/09/2010, 16/11/2010 and 28/06/2011: (a,c,e,g) forma trapezoidal (TR); y (b,d,f,h) forma rectangular (RC).	54
Figura 5.5. Distribuciones espaciales de diferencias relativas de EF para las formas trapezoidal y rectangular, para las fechas: (a) 11/07/2010; (b) 29/09/2010; (c) 16/11/2010; and (d) 28/06/2011. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N.	55
Figura 5.6. Relación entre valores observados y estimados de ET_{real} , para $\alpha = 1.3$ (formas: (a) trapezoidal y (b) rectangular); and para $\alpha = 1$ (formas: (c) trapezoidal y (d) rectangular).....	56
Figura 5.7. Contraste EF observada vs estimada para las dos parcelas	57
Figura 5.8. Relación entre valores observados y estimados de A para la forma trapezoidal.	58

Figura 6.1. Unidades de Gestión Elementales Representativas REWMUs.....	65
Figura 6.2. Box 8 del Technical Report -2015-090 (EU, 2015).....	73
Figura 6.3. Curva ajustada para la correlación ET_{real}/ET_o vs EVI	74
Figura 6.4. Relación entre valores observados y estimados de ET_{real} (a) Parcela A y (b) Parcela B...	74
Figura 6.5. ET_{real} estimada para cada REWMU.....	75
Figura 6.6. Análisis descriptivo de la serie temporal estimada de ET_{real} : (i) serie estimada (O), (ii) tendencia-ciclo (T), (iii) estacionalidad (E), (iv) componente irregular (I) de las zonas: cabecera (REWMU-I, a), Vega del Segura (IV, b), Mar Menor (VII, c) y sur de Almería y Murcia (VI, d).....	76
Figura 6.7. Comparativa Precipitaciones-evapotranspiración real.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen de datos climáticos requeridos por los distintos métodos FAO para el cálculo de ET_o	13
Tabla 4.1. Parámetros de calibración Landsat-5 TM (Chander <i>et al.</i> , 2009).....	26
Tabla 4.2. Rango de valores y factores de escala de productos MODIS	29
Tabla 4.3. Correlaciones y desviaciones de PCA respecto T_{max} y T_{min}	31
Tabla 4.4. MAE T_{max} y T_{min}	33
Tabla 4.5. Correlaciones PCA respecto LST	35
Tabla 4.6. MAE para la muestra aleatoria resultado del ajuste exponencial	36
Tabla 4.7. Parámetros del ajuste de los residuos LST mediante modelo de covarianzas sumétrico.....	36
Tabla 5.1. Detalles de las imágenes usadas y condiciones de riego.	48
Tabla 5.2. Valores de $NDVI$ and f_c evaluados desde las imágenes de satélite para el pixel de la torre de medida de flujo en las Parcelas A and B (F), respectivamente	48
Tabla 5.3. Borde seco y húmedo para formas trapezoidal (TR) y rectangular (RC), donde a y b son coeficientes de regresión del borde seco para LST y DT respectivamente, y a' es para LST y DT del borde húmedo.	52
Tabla 5.4. Influencia de T_{air} en el método del triángulo para $\alpha = 1.26$	52
Tabla 5.5. Errores en la evaluación de ET_{real} : error absolutos (AE), error porcentual absoluto (APE), MAE , $MAPE$ y $RMSE$. TR = forma trapezoidal, RC = forma rectangular.....	56
Tabla 5.6. Influencia de α en la selección de los valores de EF	57
Tabla 6.1. Parámetros estadísticos: MAE, MAPE y RMSE y R^2	75
Tabla 6.2. Tablas ASSET: (a) año 2000 y(b) año 2010.....	80

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 4.1. Esquema de tareas para la realización de mascara de nubes.....	28
Esquema 5.1. Esquema del proceso implementado.	44
Esquema 5.2. Representación conceptual de la relación <i>DT-NDVI</i> . Puntos representa el ara de cada forma: (Caso 1) pixeles grises área triangular; (Caso 2) pixeles grises y amarillos área trapezoidal; and (Caso 3) rojos y azules representan área rectangular.....	44
Esquema 5.3. Esquema del algoritmo de extracción de end-members.....	47
Esquema 6.1. Principales flujos dentro del sistema de aguas interiores y de la economía.....	43
Esquema 6.2. Modelo lógico para tablas ASSET.....	67
Esquema 6.3. Diagrama de flujo	69
Esquema 6.4. Esquema del cálculo de volúmenes sobre los activos geográficos mediante algebra de mapas.....	70
Esquema 6.5. Esquema topológico para REWMU I	70
Esquema 6.6. Grupos de filas de la tabla ASSET en función de la fuente de datos.	72
Esquema 6.7. Esquema del sistema hidrológico-hidráulico para cada REWMU. Casillas con (*) representan entradas debidas a transferencias de aguas, Postrasvase T-S. Solamente las áreas IV, VI y VII proporcionan salidas al mar.	79

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

<i>Acrónimo</i>	<i>Descripción</i>
<i>A</i>	Flujo de energía disponible
<i>AEMET</i>	Agencia estatal de Meteorología
<i>ASSET</i>	Accounting System for the SEgura river y Transfers o Tablas de activos hídricos
<i>CCAA</i>	Comunidades Autónomas
<i>CEDEX</i>	Centro de Estudios de Obras Públicas y Experimentación
<i>CHS</i>	Confederación Hidrográfica del Segura
<i>DEM</i>	Modelo Digital de Elevaciones
<i>DENU</i>	División de Estadística de las Naciones Unidas
<i>DMA</i>	Directiva Marco del Agua
<i>DSS</i>	Sistemas Soporte a la Decisión (Decision Support Systems)
<i>DT</i>	Diferencial de temperaturas ($LST - T_{air}$)
<i>EB</i>	Balance de energía
<i>EC</i>	Eddy-covariance
<i>ECRINS</i>	European Catchment and Rivers Network System
<i>EF</i>	Fracción evaporativa
<i>EP</i>	Evapotranspiración potencial (ET_{opt})
ET_o	Evapotranspiración de referencia (ET_{ref})
ET_{real}	Evapotranspiración real (ET_{act})
<i>EVI</i>	Enhanced Vegetation Index
<i>FAO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
f_c	Fracción de cobertura vegetal
$fPAR$	Fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (fraction of photosynthetically active radiation)
<i>G</i>	Flujo de calor del suelo
<i>GRASS</i>	Geographic Resources Analysis support System
<i>H</i>	Flujo de calor sensible
<i>HBV</i>	Modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalans-avdelnin
<i>HG</i>	Ecuación de Hargreaves
<i>HYBRID</i>	Tablas híbridas y económicas
<i>IGN</i>	Instituto Geográfico Nacional
<i>INSPIRE</i>	Infrastructure for Spatial Information in Europe
<i>IPCC</i>	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<i>IVI</i>	Instituto de Investigaciones Agrarias de la Generalitat Valenciana
<i>IWRM</i>	Integrated Water Resources Management (gestión integrada de los recursos hídricos)
<i>Kc</i>	Coeficiente de cultivo
<i>LAI</i>	Índice de área foliar (Leaf Area Index)
<i>LST</i>	Temperatura Superficial
<i>MAE</i>	Error Absoluto Medio (Mean Absolute Error)
<i>MAPE</i>	Error Porcentual Absoluto Medio (Mean Absolute Percent Error)
<i>MCT</i>	Mancomunidad de los Canales del Taibilla

<i>MMA</i>	Ministerio de Medio ambiente
<i>MRT</i>	Re-proyección MODIS Tool
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration de los Estados Unidos
<i>ND</i>	Niveles digitales
<i>PATRICAL</i>	Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad de aguas
<i>PCA</i>	Análisis de Componentes Principales (Principal Component Analysis)
<i>PHC</i>	Plan Hidrológico de Cuenca
<i>PM</i>	Ecuación de Penman-Monteith
<i>PNOT</i>	Plan Nacional de Observación del Territorio
<i>PNT</i>	Programa Nacional de Teledetección
<i>PSUTS</i>	Tablas de suministro físico y uso y cuentas de emisiones
<i>PT</i>	Ecuación de Priestley-Taylor
<i>REWMU</i>	Unidades de Gestión Elementales Representativas (Representative Elementary Watershed Management Units)
<i>RMSE</i>	Error Cuadrático Medio (Root Mean Square Error)
<i>R_n</i>	Radiación neta
<i>SAIH</i>	Sistema Automático de Información Hidrológica
<i>SCH</i>	Sistema de Contabilidad Hídrica
<i>SDS</i>	Conjunto de datos científicos (Scientific datasets)
<i>SEB</i>	Balance de energía superficial
<i>SEEA-W</i>	Sistema de Contabilidad Hídrica (System of Environmental-Economic Accounting for Water)
<i>SIAM</i>	Sistema de Información Agraria de Murcia
<i>SIAR</i>	Servicio Integral de Asesoramiento al Regante de Castilla la Mancha
<i>SIG</i>	Sistemas Información Geográfica
<i>SIMGES</i>	Modelo de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos
<i>SIMPA</i>	Modelo de Simulación Precipitación-Aportación
<i>SIOSE</i>	Sistema de Información de Ocupación Suelo de España
<i>SRB</i>	Cuenca del Río Segura (Segura River Basin)
<i>T_{air}</i>	Temperatura instantánea
<i>T_{max}</i>	Temperatura máxima
<i>T_{min}</i>	Temperatura mínima
<i>TWI</i>	Índice Topográfico de Humedad (Topographic Wetness Index)
<i>T-S</i>	Tajo Segura
<i>UAs</i>	Unidades Astronómicas
<i>UE</i>	Unión Europea
<i>UTC</i>	Coordinated Universal Time
<i>USDA</i>	Departamento de agricultura de EEUU (U.S. Department of Agriculture)
<i>VI</i>	Índice de vegetación
<i>VPD</i>	Déficit de Presión de Vapor
<i>α</i>	Coeficiente Priestley-Taylor ($=\phi_{max}$)
<i>λE</i>	Flujo de calor latente

RESUMEN

La Cuenca del Río Segura, localizada en el Sureste de España, es un área semiárida donde las necesidades hídricas del sector agrícola superan el 80 % del uso total del agua disponible. En esta cuenca considerada la “huerta de Europa”, las sequías son recurrentes por ello la gestión sostenible del uso del agua representa un reto a alcanzar. En este sentido, el aumento de fiabilidad en la estimación de la evapotranspiración real (ET_{real}) se vería traducido en un mayor conocimiento de la necesidad hídrica real del cultivo, y por consiguiente en un uso más racional del agua, siendo por tanto el principal objetivo de la presente Tesis.

La información necesaria para alcanzar este objetivo, ha sido obtenida en su mayor parte desde satélite; valiosa fuente de información que permite derivar componentes del balance hídrico. Desde observaciones multiescala se pueden identificar las zonas regadas con problemas de estrés hídrico, sus necesidades de riego, y realizar por tanto recomendaciones acertadas de volúmenes de riego. En la presente Tesis, se han propuesto y desarrollado metodologías en base a imágenes satélites que han sido validadas con datos al suelo desde torres de medida de flujo (mediante la técnica Eddy Covariance), permitiendo una estimación espacio-temporal de la ET_{real} a distintas escalas temporales y espaciales.

Primeramente se abordó un análisis a escala de parcela o distrito de riego, centrándose el área de estudio en el Campo de Cartagena. El método aplicado consistió en una aproximación gráfica basado en la ecuación de Priestley-Taylor (PT), donde condiciones no limitantes del agua y de suelo seco fueron definidas por la temperatura superficial (LST) y el índice de vegetación (VI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ambos obtenidos mediante teledetección. Utilizando mediciones de ET_{real} e imágenes Landsat 5-TM en un área regada, se realizó un análisis de sensibilidad de las distribuciones espaciales de ET_{real} para el período 2009-11 con respecto a: (i) la forma (trapezoidal o rectangular) del espacio LST versus VI; y (ii) el valor del coeficiente PT (α). Los resultados de la validación fueron satisfactorios. Ambas formas proporcionaron resultados similares en la estimación de ET_{real} , con un error cuadrático medio (RMSE) $\sim 30 \text{ W/m}^2$ y una diferencia relativa $\sim 10 \%$ con respecto a las observaciones basadas en las torres de medida. El mejor ajuste con datos medidos fue para α cercano a 1, un valor algo diferente del valor comúnmente utilizado de 1.27, lo que indica que podría producirse un error sustancial al usar este último valor.

En segundo lugar, se afronta un análisis a escala de cuenca hidrográfica más apropiado en estudios y modelos hidrológicos orientados a planificación de recursos hídricos, y usos agrícolas, pues éstos exigen el conocimiento de largas series temporales de ET_{real} empleando escenarios dinámicos relacionados con el uso del suelo o el cambio climático. Esta información a escala mensual y de cuenca hidrográfica permite la mejora de series temporales hidrológicas, uno de los objetivos buscados por la política del agua de la Unión Europea. En este sentido, a nivel europeo se pretende incentivar la contabilidad del agua a escala de cuenca, como herramienta para determinar ahorros potenciales de agua y homogeneizar resultados para ser comparados entre territorios y periodos.

Debido a ello, con el propósito de integrar ET_{real} en un sistema de contabilidad hídrica, se empleó un método basado en un ajuste de regresión no lineal, usando para ello el IV Enhanced Vegetation Index (EVI) provisto por el sensor MODIS a bordo de la plataforma TERRA, datos de temperatura del aire para la estimación de la ETo , y observaciones de ET_{real} , proporcionando estimaciones mensuales y a escala de cuenca. Los resultados fueron validados con datos al suelo desde torres de medida de flujos, mostrando un error inferior a un 15 % y un RMSE inferior a 0.5 mm/d (mensual). Con esta información, se completaron balances hídricos en el marco de la implantación del sistema SEEA-Water de Naciones Unidas para toda la Demarcación del Río Segura, diseñándose una herramienta que combina la información hidrometeorológica necesaria desde distintas fuentes. De este modo, constituye una metodología innovadora para la incorporación de datos hidrometeorológicos agregando diferentes redes de medición. A modo de aplicación, en esta Tesis se detallan únicamente los resultados referentes a en la cuenca alta del Río Segura, donde se localizan y generan las reservas más importantes de la cuenca.

Finalmente, se destaca que el obtener estimas confiables de ET_{real} desde satélite a escala mensual y de demarcación hidrográfica, es un objetivo difícil de alcanzar, dada la escasez de datos al suelo para su contraste,

y validación para diferentes condiciones de cobertura vegetal. Se destaca la dificultad en la aplicación de la metodología SEEA-Water de las cuentas del agua a escala de demarcación hidrográfica, dada la falta de datos y la integración de diferentes fuentes de información y escalas espacio-temporales de trabajo. Sin embargo, quedan por resolver incertidumbres relacionadas con otras variables así como la integración de diferentes fuentes de información y escalas espacio-temporales de trabajo. En este sentido se debe hacer un esfuerzo, que permita llegar a un equilibrio entre lo establecido en la Directiva Marco de Aguas y la disponibilidad real de la información requerida.

PALABRAS CLAVE: Cuenca del Río Segura; teledetección; coeficiente Priestley-Taylor; análisis de sensibilidad; evapotranspiración real; contabilidad del hídrica; balance hídrico.

ABSTRACT

The Segura River Basin, located in the Southeast of Spain, is a semi-arid area where water need of agricultural sector exceed 80 % of the total use of available water. In this basin, which is considered the "orchard of Europe", droughts are frequent, so the sustainable management of water use represents a challenge to be achieved. In this sense, the increase of reliability in the estimation of the actual evapotranspiration (ET_{act}), would be reflected in a better knowledge of the crop water requirements, and consequently in a more rational use of agricultural water resources, which is one of the main objectives of this Thesis.

The necessary information to achieve this objective have been obtained mostly from satellite, which is known to be a valuable source of information for retrieving the components of land energy and water balance. From multiscale observations, it can be identified irrigated areas with water stress problems, their irrigation needs, and therefore, it could provide accurate recommendations for irrigation scheduling. In this Thesis, methodologies have been proposed and developed based on satellite images, which have been validated from ground truth using flux towers and the Eddy-Covariance technique, allowing estimation of ET_{act} at different temporal and spatial scales.

Firstly, an analysis was carried out at the scale of the irrigation plot or district. The applied method consisted of a graphical approximation based on the Priestley-Taylor (PT) equation, where non-limiting conditions of water and dry soil were defined by the surface temperature (LST) and a vegetation index (VI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), both obtained by remote sensing. Using ET measurements from flux towers, and Landsat 5-TM images in a irrigated area, a sensitivity analysis of ET_{act} spatial distributions was performed for the period 2009-11 with respect to: (i) the form (trapezoidal or rectangular) of the LST-VI space; and (ii) the value of the PT coefficient (α). The results from ground truth validation were satisfactory, both shapes providing similar performances in estimating ET_{act} , with root mean square error (RMSE) $\sim 30 \text{ W/m}^2$ and relative difference $\sim 10 \%$ with respect to tower-based measurements. Importantly, the best fit with ground data was found for α close to 1, a somewhat different value from the commonly used value of 1.27, indicating that substantial error might arise when using the latter value.

Secondly, an analysis at the hydrographic basin scale is, more appropriate in hydrological and agricultural studies and models, but requires the knowledge of long time series of ET_{act} using dynamic scenarios related to land use or climate change. This information at a monthly scale and in a watershed allows for the improvement of hydrological time series, the purpose of the European Union's water policy. In this sense, at European level the water accounting is pretended to encourage, as a tool to determine potential water savings and homogenize results to be compared between territories and periods.

Therefore, with the purpose of integrating ET_{act} in a water accounting system, a method based on a non-linear regression adjustment was used, which uses the IV Enhanced Vegetation Index (EVI) provided by the MODIS sensor on board the platform TERRA, air temperature data for the estimation of ET_0 , and observations of ET_{act} , provided monthly and basin scale estimates. The results were validated with soil data from flow measurement towers, showing an error of less than 15 % and an RMSE of less than 0.5 mm/d (monthly). With this information, water balances were filled out within the framework of the implementation of the United Nations SEE-Water system, for the entire Segura River Demarcation, designing a tool that combines different hydrometeorological information necessary for the completion of water balances. In this way, it constitutes an innovative methodology for the incorporation of hydrometeorological data by the integration of different measurement networks. However, this thesis only details the results respect to the upper basin of the Segura River, where the most important stocks of the basin are located and generated.

Finally, it is emphasized that obtaining reliable estimates of ET_{act} for different vegetal coverage conditions by means of large-scale satellite data is a difficult objective to achieve given the multitude of variables involved in this process. To which must be added the scarcity of ground true data for its contrast under different environmental conditions. The difficulty in the implementation of SEEA-Water methodology of water accounting at basin scale, is justified by the unavailability of all data at the spatio-temporal scale

required. However although there are still unresolved uncertainties related to other variables and the integration of different sources of information and spatio-temporal scales of work. Therefore, an effort must be made in this sense, which allows achieving a balance between what is established in the Water Framework Directive and the actual availability of the required information.

KEYWORDS: Segura River Basin, remote sensing, Priestley-Taylor coefficient; sensitivity analysis; actual evapotranspiration; water accounting; water balance.

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Motivación

El impacto del cambio climático afecta cada vez más a los procesos del ciclo hidrológico (Giorgi y Lionello 2008). Distintos autores han utilizado Modelos Climáticos Regionales (RCMs) para acometer evaluaciones del impacto del cambio climático en procesos del ciclo hidrológico y eventos extremos en la España Peninsular. Por ejemplo Olmos Giménez (2015) y Olmos *et al.* (2016) predicen disminuciones para el período 2021-2050 respecto al período 1961-1990, en otoño y verano, con un leve incremento en invierno y primavera, en distintas partes de la España Peninsular. Mientras Giraldo Osorio y García Galiano (2012), trabajando con combinaciones de RCMs demuestran que se esperan aumentos significativos plausibles de las sequías más severas en distintas cuencas de la España Peninsular, destacándose la cuenca semiárida del Río Segura en su cabecera. Estos cambios en los regímenes de precipitación tendrán su mayor impacto en la huella del agua (Bocchiola *et al.*, 2013), pues a menor disponibilidad de este recurso natural; mayor competencia existirá entre los sectores económicos (Stefanova *et al.*, 2015).

Las presiones y los impactos del uso del agua se advierten más en zonas áridas, caracterizadas por la escasez hídrica, donde se concentra 1/3 de población mundial (UNEP, 2005). Wada and Bierkens, (2014) pronosticaron que se incrementará la demanda de agua, en particular en zonas de regadío, dado que ante el incremento de la población mundial sería necesario cubrir necesidades alimentarias. En concordancia con la opinión de Multsch *et al.* (2015), ante la tendencia de incremento de demanda hídrica debido al aumento de población, es necesario anticiparse y llevar a cabo adaptaciones locales para administrar prácticas y estrategias de mejora en los métodos de riego.

Entre las presiones que afectan al sureste español, cabe mencionar la mayor demanda urbana por intensificación del proceso urbanizador en zonas costeras, los altos requerimientos hídricos de la demanda agrícola - cerca del 85 % del total disponible en la cuenca del Segura - (Urrea Mallebrera *et al.*, 2010) y un mayor deterioro de la calidad del agua debido a la intervención humana (Olmos Giménez *et al.*, 2016).

En cuencas deficitarias como la Cuenca del Río Segura, es imprescindible el uso sostenible y racional del agua, especialmente en periodos de sequía. Durante las sequías las administraciones tienen que hacer un gran esfuerzo para garantizar la demanda urbana y cumplir requerimientos medioambientales (Pedro-Monzonís *et al.*, 2016a).

En la actualidad, la política del agua de la Unión Europea (UE) pretende mejorar la cantidad y calidad de los recursos hídricos. En este sentido se ha redactado el *Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources* (EC, 2012). Para ello ha sido necesario analizar los objetivos de la política del agua junto con el crecimiento económico de los distintos sectores económicos como agricultura, pesca, transporte, entre otros sin ser exhaustivos. También es necesario mejorar aspectos significativos de la Directiva Marco del Agua (DMA) en relación a la eficiencia del agua (Pedro-Monzonís *et al.* 2016a). Para la consecución de estas actuaciones, se cuenta con la "contabilidad del agua" a escala de cuenca hidrográfica como herramienta para evaluar los ahorros potenciales reales de agua. Esta contabilidad permitiría medir la contribución de cada usuario al valor económico global de los recursos hídricos. Coincidiendo con la opinión de distintos autores como Pedro-Monzonís *et al.* (2016b), herramientas metodológicas como la contabilización hídrica permitiría homogeneizar resultados para ser comparados entre los diferentes territorios y periodos.

Un aspecto importante a contabilizar a escala de cuenca hidrográfica, es la evapotranspiración real (ET_{real}). En síntesis, constituiría la cantidad de agua que realmente se evapora desde la superficie de tierra y que transpira desde la vegetación y las plantas existentes.

Esta pérdida de agua no se puede recuperar para su uso posterior, por lo que es importante considerarla al momento de planificar y gestionar los usos del agua, y en especial en zonas áridas o

semiáridas donde la deficiencia de agua se está convirtiendo en un obstáculo importante para el bienestar económico y el desarrollo sostenible (Eberbach y Pala, 2005; Falkenmark y Rockstrom, 2004; Tang *et al.*, 2010).

Así ocurre en la Cuenca del Río Segura, una región agrícola altamente productiva del sureste de España, con alta demanda de agua en la agricultura y el menor porcentaje de recursos hídricos renovables de todas las cuencas españolas (Urrea Mallebrera *et al.*, 2010). Las tierras cultivadas representan el 43 % de su superficie, con un tercio de la superficie bajo riego (más de 269.000 ha) y el agua proveniente de recursos no convencionales (por ej. transferencias de agua, desalación y reutilización) representa más del 65 % del total disponible (Urrea Mallebrera *et al.*, 2010), con los consiguientes elevados costos respecto a los recursos convencionales. En este contexto son cruciales las estimaciones exactas del consumo de agua de los cultivos (ET_{real}) para optimizar la asignación de agua, ahorrar agua y reducir costes.

Esta información es muy valiosa para la aplicación de prácticas de gestión del agua como el riego de precisión y la fertilización, porque optimizará los insumos, mejorará los rendimientos y promoverá prácticas agrícolas sostenibles (Hetzroni *et al.*, 2012). La práctica de una agricultura de precisión optimiza de manera sostenible la gestión de los campos agrícolas abordando la variabilidad espacial en plantas, suelo y medio ambiente. Pero para ello, es necesario el seguimiento de la vegetación y estado del agua en el suelo. Es necesario equipar a las parcelas agrícolas con sensores que permitan mediciones precisas de parámetros físicos (como por ejemplo torres de medida de flujos de energía), o con lisímetros para evaluar balance del agua del suelo. Estos métodos experimentales de campo, en general caros, exigen precisión en las mediciones, y pueden ser realizados apropiadamente sólo por personal de investigación suficientemente preparado. Así como se requerirían de muchos sensores para obtener una distribución espacio-temporal precisa para un amplio territorio. Ello no es factible en amplias extensiones, por lo que es importante el empleo que de otras técnicas que permitan una visión global. Una solución sería la observación a gran escala y periódica proporcionada por la teledetección, las tecnologías de la información y los métodos geoespaciales, que se utilizan para cuantificar dicha variabilidad en campos agrícolas (Corwin y Plant, 2005a).

1.2. Objetivos

El principal objetivo de la presente Tesis Doctoral es desarrollar una metodología operativa para la precisa estimación espacio-temporal de la ET_{real} aplicando técnicas basadas en teledetección. Para ello se trabaja a escala de parcela (o distrito de riego), donde se dispone de imágenes satelitales de alta resolución espacial como las Landsat 5-Thematic Mapper (TM). Así como medidas al suelo ("verdad terreno") de ET_{real} en dos parcelas experimentales, mediante torres de medida de flujos de energía para el período 2009-2011.

Como objetivos específicos se plantean:

- (i) Validar un método espacio temporal distribuido de estimación de evapotranspiración real instantánea de cultivos al momento del paso del satélite, considerando una cantidad mínima de datos auxiliares.

El método seleccionado corresponde a una aproximación gráfica (Jiang y Islam, 2001) basada en la ecuación de Priestley-Taylor (PT, Priestley y Taylor, 1972), donde el suelo seco y las condiciones no limitantes del agua se definen a partir del espacio formado por la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el índice de vegetación (VI) ambos obtenidos desde teledetección. Dicho espacio puede adoptar diferentes configuraciones del espacio, rectangular y trapezoidal.

- (ii) Evaluar la influencia de los bordes del espacio LST - VI – trapezoidal y triangular -, en la distribución espacial de ET_{real} .

En este enfoque gráfico se fija el coeficiente de Priestley-Taylor (α) al valor usual de 1,27. Este parámetro corresponde a condiciones bien regadas, si bien podría diferir entre los distintos tipos de cultivos/vegetación debido a una respuesta diferenciada al estrés climático.

- (iii) Evaluar la sensibilidad al coeficiente de Priestley-Taylor para obtener distribuciones espaciales precisas de ET_{real} desde teledetección, validando con las medidas al suelo.

Los cultivos de cítricos son bien conocidos por su fuerte cierre estomatal en respuesta al déficit de presión de vapor (VPD), disminuyendo sustancialmente el término advectivo de la ecuación de Penman-Monteith (PM , Allen *et al.*, 1998) que incluye la resistencia aerodinámica (r_a) y VPD , incluso cuando el cultivo está bien regado. Como la ecuación PT es una forma simplificada de la ecuación PM , se suele sugerir un valor de α inferior a 1,27 para cultivos como los cítricos, que ejercen un fuerte control estomático en la pérdida de agua.

Y finalmente,

- (iv) Evaluar la ET_{real} mensual a escala de cuenca hidrográfica y su potencial uso en el cierre de los balances hídricos, integrándola con el resto de información espacio-temporal en el marco de un sistema de contabilidad hídrica.

Debido a que el método propuesto en el objetivo (iii) posee un carácter predictivo instantáneo en el momento del paso del satélite, no es posible asumir el ratio de flujo de calor latente para la energía disponible observada constante a través de la hora del día. Por ello, para alcanzar el objetivo específico propuesto se opta por el empleo de un método basado en VI propuesto por Nagler *et al.* (2013). Se propone validar la metodología desarrollada con datos al suelo desde torres de medidas de flujo disponibles en el territorio.

A modo de aplicación de los resultados obtenidos, se propone evaluar la integración de ET_{real} mensual en un sistema de contabilización hídrica a escala de cuenca hidrográfica propuesto por Naciones Unidas. Para ello se considerarán los datos provistos por el Plan Hidrológico de Cuenca (PHC) de la Cuenca del Río Segura, y otras fuentes de información (incluyendo trasvases y recursos no convencionales). El uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) como marco de desarrollo facilitará la integración de información alfanumérica y espacial (vectorial y ráster), y el desarrollo de las herramientas para alcanzar este objetivo. Se utilizarán composiciones de imágenes provistas por el sensor MODIS para el periodo temporal 2009-2011, así como datos medidos de ET_{real} para la validación de los resultados.

1.3. Estructura de la Tesis

Este documento de Tesis (en adelante Tesis), está estructurado en siete capítulos, bibliografía y anejos.

El capítulo de antecedentes (Capítulo 2) introduce el tema objeto de estudio, presentando un estado del arte en la evaluación de la ET_{real} . Se justifica de este modo la idoneidad en la elección de las metodologías propuestas para alcanzar los objetivos planteados.

En el Capítulo 3 se presenta una breve descripción de la zona de estudio tanto a escala de distrito de riego, como a escala de cuenca hidrográfica.

El Capítulo 4 recoge las distintas metodologías de procesamiento de la información requerida para la aplicación de los algoritmos desarrollados. Entre ellas, las correcciones radiométricas y topográficas realizadas a las imágenes de satélite; el tratamiento realizado para la obtención de las distribuciones espaciales de temperatura del aire o la información complementaria empleada para la validación de resultados; así como para el completado de los balances hídricos a escala de cuenca hidrográfica.

El Capítulo 5 se centra en la validación del algoritmo de estimación de ET_{real} aplicando un método gráfico, a escala de distrito de riego, mediante imágenes de alta resolución espacial y baja

resolución temporal (sensor Landsat 5 TM), realizando un análisis de sensibilidad del parámetro de Priestley-Taylor.

Un estudio práctico del empleo de ET_{real} evaluada a escala mensual desde teledetección, como parte del balance hídrico mensual a escala de demarcación hidrográfica - aplicando una metodología de contabilización hídrica ampliamente aceptada -, se presenta en el Capítulo 6 para la Cuenca del Río Segura.

Finalmente, el Capítulo 7 recoge las conclusiones y recomendaciones más destacadas de la Tesis, dando lugar al planteamiento de interesantes líneas de investigación futuras.

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

El seguimiento de la evapotranspiración a partir de información satelital es una fuente de información muy valiosa, porque facilita el identificar zonas regadas con problemas de estrés hídrico, realizar recomendaciones de riego o derivar componentes del balance hídrico. El aumento de fiabilidad en su estimación se traduce en un mejor conocimiento de la necesidad hídrica real del cultivo y por lo tanto, en un uso más racional del agua.

En coincidencia con la opinión de distintos autores, la obtención de series temporales largas de ET_{real} es de gran interés para estudiar y modelar sistemas hidrológicos y agrícolas empleando escenarios dinámicos relacionados con el uso del suelo o el cambio climático (Maestre-Valero *et al.*, 2013), así como para la mejora de la modelización hidrológica (García Galiano *et al.*, 2015).

Desde la década de los '80, se advierte un esfuerzo por desarrollar y validar algoritmos de recuperación de ET_{real} a partir de datos de teledetección (ver Li *et al.*, 2009, para una revisión). Los métodos de estimación de ET_{real} basados en el empleo de la banda térmica se pueden clasificar en dos grupos principales: - los métodos "residuales", que determina el flujo de calor latente como el término residual del balance de energía superficial (SEB), y - los "métodos gráficos", basados en la interpretación del diagrama de dispersión de la temperatura de la superficie terrestre (LST) versus el índice de vegetación (VI). Finalmente, se destacan los métodos que emplean condiciones de referencia para reflejar la evapotranspiración real.

2.2. Métodos para la obtención de ET_{real} mediante satélite

2.2.1. ET_{real} obtenida como residuo del balance energía

La evapotranspiración requiere cantidades relativamente altas de energía, ya sea en la forma de calor sensible o de energía radiante. Por ello, el proceso de evapotranspiración es controlado por el intercambio de energía en la superficie de la vegetación y es limitado por la cantidad de energía disponible. Debido a esta limitación, es posible predecir la evapotranspiración aplicando el principio de conservación de energía (Allen *et al.*, 1998). La energía que llega a la superficie debe ser igual a la energía que sale de la superficie en el mismo periodo de tiempo. El Balance de Energía (en adelante EB) representa la forma en la cual se distribuye la radiación neta en un sistema formado por la vegetación, el suelo y la atmósfera que los rodea. El denominado "método residual", determina el flujo de calor latente como el término residual del balance de energía superficial (Surface Energy balance SEB, Choudhury *et al.*, 1994):

$$\lambda E = R_n - G - H \quad (2.1)$$

donde los diferentes flujos expresados en $W \cdot m^{-2}$, son la radiación neta (R_n), flujo de calor latente (λE , con λ = calor latente por evaporación en $J \cdot g^{-1}$ y E = evaporación en $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), flujo de calor sensible (H) y el flujo de calor del suelo (G). Distintas variantes del método residual son: (i) el método simplificado SM (Carlson *et al.*, 1995 a y b); (ii) el modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land, Bastiaanssen *et al.*, 1998 a y b); (iii) y el modelo TSEB (Two Source Energy Balance: Norman *et al.* 1995; Kustas *et al.*, 2003; Melesse *et al.*, 2005). Estos algoritmos se utilizan actualmente debido a su relativa simplicidad, pero requieren datos auxiliares de tierra como la temperatura del aire y la velocidad del viento. Además es necesaria su extrapolación de las estaciones meteorológicas a otras celdas o píxeles (Beven y Fisher, 1996). En regiones semiáridas, los altos valores del flujo de calor sensible (H) influyen los resultados siendo estos muy afectados por pequeños errores de H .

2.2.2. ET_{real} obtenida mediante el método gráfico

El segundo conjunto de métodos se denomina "métodos gráficos", basados en la interpretación del diagrama de dispersión de LST versus VI . Esta metodología fue sugerida por primera vez por Price (1990), y más tarde aplicada con éxito para la obtención de ET mediante teledetección (Jiang y Islam, 2001). El espacio $LST-VI$ suele presentar una forma geométrica (típicamente triangular, trapezoidal o rectangular), cuyos límites pueden interpretarse en términos de límites evaporativos (Sandholt *et al.*, 2002). El límite superior (borde "seco" o "cálido") corresponde a un valor de ET_{real} nulo, mientras que el límite inferior (borde "húmedo" o "frío") representa el valor máximo de ET_{real} en la región. Una suposición comúnmente utilizada es que los píxeles del borde "húmedo" del espacio $LST-VI$ correspondan a áreas con valores de ET_{real} iguales a la "evaporación de superficie húmeda" (E_w), definida como la evaporación de una superficie bien húmeda bajo condiciones de mínima advección (Priestley y Taylor, 1972), como sigue:

$$\lambda E_w = \alpha \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (2.2)$$

Donde Δ (Pa K⁻¹) es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en el T_{air} predominante, γ es la constante psicrométrica (Pa K⁻¹), y α es el coeficiente de Priestley-Taylor (PT, adimensional). La posición del pixel en el espacio $LST-VI$ con respecto al borde seco y húmedo permite la determinación de la fracción evaporativa (EF), definida como la relación del flujo de calor latente (λE) a la energía disponible (A) como sigue:

$$EF = \lambda E / A \quad (2.3)$$

Con $A = R_n - G$. La Ecuación (2.3) indica que, además de EF , la estimación de λE requiere la evaluación de otros dos flujos, R_n y G . Comparado con el método residual, el método gráfico presenta la importante ventaja de incluir la valiosa información contenida en el índice de vegetación, indicador de la cobertura vegetal y su estado de salud. En todo caso, se destaca que el uso de índices de vegetación se considera en la mayoría de los enfoques SEB previos.

Diferentes inconvenientes de los métodos gráficos fueron analizado por García *et al.* (2014) y Long y Singh (2013). Por lo tanto, varias deficiencias afectan a la exactitud y a la confiabilidad del método. Uno de ellos es la incertidumbre sobre el verdadero valor del coeficiente de Priestley-Taylor (α). Como se ha indicado previamente, un valor generalmente aceptado para α es 1.27 (Priestley y Taylor, 1972), aunque se reconoce que α depende de las características y la cobertura vegetal de la superficie. En particular, De Bruin (1983) advirtió que α podía variar de 0.9 a 1.5, dependiendo entre otros factores de la resistencia a la transferencia de vapor de agua de la superficie vegetal o resistencia superficial (r_s). Distintos autores asumieron en regiones semiáridas, valores de α substancialmente más altos que el valor estándar de 1.27. A modo de ejemplo, García *et al.* (2014) consideraron valores de α entre 1.6 y 1.8, en matorrales del sur de España debido a las condiciones locales de fuerte advección. No obstante, se puede afirmar que en general la mayoría de los autores consideraron en sus estudios α igual a 1.27; tanto en cuatro sitios de América del norte (Kim y Hogue, 2013), como en una zona semiárida del este de Asia (Tang *et al.*, 2010), o en países de África occidental (Tanguy *et al.*, 2012).

Pereira (2004) identificó como los principales factores relacionados con α , a el déficit de presión de vapor atmosférica, contenido de humedad del suelo, velocidad del viento, condición de estabilidad atmosférica y flujo turbulento de calor sensible. El valor α puede presentar variaciones sistemáticas con la hora del día y época del año (De Bruin, 1983; Eichinger *et al.*, 1996) y con el contenido de humedad del suelo (Davies y Allen, 1973; Komatsu, 2003).

Un segundo inconveniente es la incertidumbre inherente en la determinación de los bordes seco y húmedo, debida a la selección más o menos arbitraria de la forma geométrica y de los límites. Con el objetivo de reducir subjetividad y ambigüedad en la aplicación del método, Long y Singh (2013) analizaron el impacto de la selección de miembros finales (*ends members*) en el funcionamiento y mecanismo de propagación de error en la variabilidad espacial de flujos,

destacando la elección de la forma de conducir las distorsiones significativas en la distribución espacial de los flujos de superficie.

Pero para estudiar y modelizar sistemas hidrológicos y agrícolas es necesario el conocimiento de largas series temporales de evapotranspiración, como bien apuntan Maestre-Valero *et al.* (2013). Al utilizar modelos de flujos de calor latente en la estimación de balances hídricos, se debería cubrir una gran extensión espacial y presentar apropiada longitud temporal; ser tanto temporal como espacialmente dinámico a moderada o alta resolución y cerrar de forma precisa el balance de energía y masa (Van Niel *et al.*, 2011).

Considerando como objetivo la estimación de ET_{real} a escala de cuenca, puede suceder que el tamaño de la escena no permita incluir toda la extensión, siendo una posible solución recurrir al empleo de composiciones de imágenes para solventar el problema de nubes y por tanto en diferentes fechas. Con el empleo de composiciones se resuelve el problema de las nubes en esta superficie espectro temporal (Villa *et al.*, 2012), pero al tratarse de valores medios almacenados en cada pixel, se introducen distorsiones ya que no corresponde a todos los valores correspondientes al lapso de tiempo que comprende dicha composición. Además el mosaico de imágenes contiene artefactos y ruido, por lo que las composiciones están representadas como una mezcla de tres componentes: condiciones atmosféricas, función de “mosaicado” y una componente de ruido (Hengl *et al.*, 2012). Diversos autores han empleado composiciones de LST para la estimación de evapotranspiración a escala de cuenca hidrográfica (García *et al.*, 2014, Kim y Hogue, 2013). Sin embargo, no han llevado a cabo una corrección a las composiciones previa a la estimación de ET_{real} a escala de cuenca hidrográfica.

El carácter temporal de ET_{real} , considerando el método del triángulo (Jiang y Islam 2001), queda determinado principalmente por LST y por VI . Estos últimos tienen menor variabilidad temporal, pudiendo permanecer inalterados en el plazo de una semana (Nagler *et al.*, 2013). En el caso de LST , presenta una fuerte variabilidad espacial y temporal debido a la heterogeneidad meteorológica, usos del suelo, humedad del suelo, propiedades radiactivas de la superficie y topográficas (Patra *et al.*, 1995). En zonas montañosas LST es enmascarado por efectos de la topografía debido al efecto de la iluminación (radiación solar) y de la elevación (variación de temperatura del aire por altitud) (Malbêteau *et al.*, 2017). No obstante, asumiendo la corrección por temperatura del aire propuesta por Kalma *et al.* (2008), LST es reemplazado por $DT=LST-T_{air}$, donde T_{air} corresponde a temperaturas instantáneas del aire en el periodo considerado, añadiéndose una nueva incertidumbre: la predicción espacial de la temperatura del aire en localizaciones donde no existen estaciones de medida.

A través de la consulta bibliografía, se advierte que en muchas ocasiones se han usado predictores como la latitud, longitud, distancia al mar, altitud, la radiación solar o el índice topográfico de humedad (Topographic Wetness Index), disponibles para toda localización y poco ruido, para obtener la distribución espacial de las temperaturas. Incluso se han usado variables obtenidas de teledetección, con el fin de mejorar dichas distribuciones (McVicar *et al.*, 2002; Cristóbal *et al.*, 2008; Hengl *et al.*, 2012; Cherif *et al.*, 2015).

Hengl *et al.* (2012) propone emplear datos observados para calibrar variables obtenidas por teledetección a través de un modelo de interpolación espacio temporal que combina regresión múltiple y kriging. Este método permitiría corregir las composiciones de LST sobre grandes áreas, que respecto a otros métodos menos operativos necesitan mayor número de variables, como por ejemplo la humedad relativa y la velocidad del viento (Malbêteau *et al.*, 2017). Datos que no siempre están disponibles en estaciones meteorológicas ordinarias, que sólo proporcionan datos de temperatura y precipitación.

Aunque los métodos basados en el uso de la banda térmica presentan como desventaja la resolución temporal, su estimación instantánea en el momento de paso del satélite les hace ser idóneos para detectar cortos periodos de estrés o programación de riegos (Nagler *et al.*, 2013). Además permiten contabilizar el valor de G , variable difícil de estimar mediante teledetección, y

detectable como un incremento en la temperatura superficial. Sin embargo, según Tanguy *et al.* (2012) el valor de G es de gran importancia en ambientes semiáridos. Esta fuerte reducción de G y ET_{real} es debida a factores como la salinidad y profundidad del agua subterránea según Nagler *et al.* (2013).

Sin embargo para deducir ET_{real} a escala diaria, no es posible asumir EF constante a lo largo del día, puesto que no es representativa del ciclo diurno del flujo (Schüttemeyer *et al.*, 2007). Este hecho es reconocido como un potencial fuente de error siendo necesario realizar ciertas correcciones (Van Niel *et al.*, 2011). Por esta razón el cierre del balance de energía y masa es generalmente problemático, ya que requiere estimación de 24 h de flujo de calor latente (Kalma *et al.*, 2008).

2.2.3. ET_{real} a partir de condiciones de referencia

La evapotranspiración de referencia, simbolizada como $ET_{ref} = ET_o$, es según Hargreaves (1994) la evapotranspiración del cultivo de referencia o la evapotranspiración de la superficie de referencia. La superficie de referencia es un cultivo hipotético de hierba, con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de 70 s/m y un albedo de 0.23. Esta superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo.

Un método habitualmente usado es utilizar las condiciones de evapotranspiración referencia o potencial y multiplicarlas por unos coeficientes, que según el tipo de cultivo, sean capaces de reflejar las condiciones no estándar de la vegetación, el grado de estrés hídrico al que está sometida y las condiciones del suelo. El enfoque de Allen *et al.* (1998) considera el coeficiente de cultivo (K_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia estimada a partir de datos meteorológicos, en sus estimaciones, como sigue:

$$ET_{opt} = ET_{ref} \cdot K_c \quad (2.4)$$

Los datos del K_c varían con el crecimiento del cultivo y derivan de datos experimentales en lisímetros (Da Silva *et al.*, 2013).

El concepto de coeficiente ha sido empleado para determinar requerimientos de agua y el impacto del agua en la agricultura, como volumen de agua consumida por unidad de biomasa (Mulisch *et al.*, 2015). Sin embargo, estos métodos tienden a sobrestimar el uso consuntivo de los cultivos, porque se derivan de condiciones óptimas. Pero en condiciones reales, los cultivos están sujetos a diferentes condiciones de nutrientes y estrés hídrico (Nagler *et al.*, 2013). Además estos coeficientes de cultivo, en condiciones de vegetación natural, suelen ser una variable desconocida.

Otros métodos sustituyen K_c por un índice de vegetación (VI) (Glenn *et al.*, 2011), de forma que combinan estimaciones de densidad del verdor vegetal con datos meteorológicos por medio de ET_o , evaluando de este modo la ET_{real} :

$$ET_{real} = a \cdot ET_o \cdot VI^n \quad (2.5)$$

Donde a es un coeficiente determinado por regresión de ET_{real} versus VI , y n es un exponente relativo de ET_{real} a VI (Choudhury *et al.*, 1994).

Nagler *et al.* (2013) testó la fiabilidad de generalizar el algoritmo $VI-ET_o$ para ser empleado en zonas áridas con regadíos, incluyendo por tanto cultivos y vegetación riparia con la finalidad de caracterizar la eficiencia del uso del agua y las necesidades hídricas medioambientales y de cultivos en este tipo agricultura-biomasa.

La mayor parte de métodos de estimación de ET_o necesitan una gran cantidad de datos (véase Tabla 2.1), para reproducir mejor el fenómeno. Si se dispusiera de la completa gama de variables climáticas involucradas en el fenómeno en el punto de estimación, no se tendría más que aplicar el mejor método para dar la máxima fiabilidad en los resultados. Sin embargo, no suele ser posible ya que normalmente se cuenta con escasos datos climáticos.

La formulación de *PM* es el método de estimación de evapotranspiración de referencia recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO-56), después de contrastar sus resultados por todo el mundo con medidas desde lisímetros (*PM*, Allen *et al.*, 1998). La formulación conocida como *PM*, se diferencia de la formulación original de Penman en que incluye factores aerodinámicos para poder considerar la resistencia a los flujos de calor a través de los estomas de la planta y superficie evaporante en función del tipo de planta, de su estado y de la cobertura sobre el suelo. La normalización internacional de esta formulación ha promovido la implementación de redes agro-meteorológicas equipadas para su aplicación. Sin embargo, un gran inconveniente para determinar ET_o a partir de datos históricos es la falta de registros fiables durante largos periodos debido a los cambios progresivos en los dispositivos de medición y de estaciones meteorológicas (Maestre-Valero *et al.*, 2013). Por este motivo la ecuación de Hargreaves (*HG*) es un método alternativo cuando se dispone de datos meteorológicos ordinarios para largos periodos temporales con baja demanda de datos (Hargreaves y Samani, 1985).

Tabla 2.1. Resumen de datos climáticos requeridos por los distintos métodos FAO para el cálculo de ET_o (datos medidos ✓, datos estimados ○, datos no indispensables pero convenientes X).

	Temperatura del aire	Humedad Relativa	Viento	Insolación	Radiación	Evaporación	Condiciones Locales
Penman-Monteith (1192)	✓	✓	✓	✓	X		○
Evaporímetro clase A		○	○			✓	✓
Hargreaves (1998)	✓	○	○	○			○
Blaney-Criddle (1197)	✓	○	○	○			○

2.3. El potencial de ET_{real} en un sistema de contabilidad hídrica

La Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (EEDS, MAPAMA, 2007) acorde con su visión europea, Estrategia de Desarrollo Sostenible de la UE renovada por la Comisión Europea en 2006, pretende fomentar un enfoque integrador de la dimensión económica, social, ambiental y global de la sostenibilidad del desarrollo con los objetivos de: garantizar la prosperidad económica, asegurar la protección del medio ambiente, evitar la degradación del capital natural, fomentar una mayor cohesión social teniendo en cuenta las tendencias demográficas actuales y contribuir solidariamente al desarrollo de los países menos favorecidos en aras de la sostenibilidad global.

La EEDS establece entre sus objetivos en materia de sostenibilidad ambiental: el aumentar el ahorro y la eficiencia en el uso de los recursos en todos los sectores (producción y consumo sostenibles), y asegurar la sostenibilidad ambiental y la calidad del recurso hídrico, garantizando el abastecimiento a la población y el uso productivo y sostenible del mismo, en relación con la conservación y gestión de los recursos naturales.

En este sentido, la política actual del agua de la Unión Europea pretende mejorar la cantidad y calidad de los recursos hídricos. La iniciativa europea denominada *Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources* (EC, 2012), analizando los objetivos de política del agua con el crecimiento económico de distintos sectores económicos como la agricultura, la pesca, el transporte o la energía renovable; busca mejorar aspectos significativos de la Directiva Marco del Agua (DMA) en relación con la eficiencia del agua (Pedro-Monzonís *et al.*, 2016a).

Una herramienta para lograr este objetivo es la contabilidad del agua a escala de cuenca hidrográfica, con el fin de determinar los ahorros potenciales reales de agua (Tilmant *et al.*, 2015). Permite cuantificar la contribución de cada usuario del agua al valor económico global de los recursos hídricos, y homogeneizar los resultados para facilitar su comparación entre diferentes territorios y periodos (Pedro-Monzonís *et al.*, 2016b).

The System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA-Water, UN, 2012) es un instrumento empleado para estandarizar conceptos de contabilidad relacionados con el agua, pues proporciona un marco conceptual necesario para organizar la información económica e hidrológica. El proyecto de investigación denominado *Accounting System for the SEgura river y Transfers* (ASSET, Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD, Technical Report - 2015), financiado por la Comisión Europea bajo el lema detener la desertificación en Europa (*Halting Desertification in Europe*), permitió evaluar y estandarizar la información detallada sobre la cuenca del río Segura (SRB), incluyendo las transferencias externas de agua en la cuenca empleando el Sistema de Contabilidad Hídrica (SCH) SEEA-Water. La misión de este proyecto fue analizar y demostrar el potencial de la gestión de recursos, medidas económicas y tecnológicas para disminuir la escasez de agua de esta región propensa a la sequía. Para ello se validaron metodologías innovadoras que permitieron aumentar la precisión de las cuentas del agua y cierre de balance hídricos.

En los balances hídricos, los principales elementos que los componen corresponden a precipitación, escorrentía superficial y subterránea, infiltración, existencias, y se cierra el ciclo mediante la evapotranspiración/evaporación (ET y EV). Globalmente estos últimos términos mencionados del balance son importantes, pues representan 2/3 de la lluvia sobre el terreno (Mulsch *et al.*, 2015), mientras la evapotranspiración de cultivos por sí sola se acerca a un 8 % y es por tanto el término más importante del balance hídrico (Oki y Kanae, 2006). Numerosos trabajos de contabilidad del agua aplicados en cuencas de España (Guadalquivir, Guadiana y Júcar por ejemplo) emplearon modelos hidrológicos para completar los componentes de los balances hidrológicos (Borrego-Marín *et al.*, 2015; Montesinos *et al.*, 2017; Pedro-Monzonis *et al.*, 2016a).

Pedro-Monzonis *et al.* (2016 a y b) emplearon en la cuenca del río Vélez el módulo de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos (SIMGES, Andreu *et al.*, 1996) junto con el modelo HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalans-avdelning, Bergström y Forsman, 1973) y el modelo Precipitación Aportación en Tramos de Red Integrados con Calidad de aguas (PATRICAL, Pérez-Martín *et al.*, 2014) en la cuenca del Júcar. Sin embargo, es el modelo de Simulación Precipitación-Aportación (SIMPA, Estrela y Quintas, 1996; Ruiz, 1998; Álvarez *et al.*, 2005) el ampliamente utilizado en prácticamente todas las demarcaciones hidrológicas en procesos de planificación hídrica. Este modelo se ha desarrollado en el Centro de Estudios de Obras Públicas y Experimentación (CEDEX) durante la elaboración del Libro Blanco del Agua en España (Estrela *et al.*, 1996; MMA, 2000) y simula los procesos el ciclo hidrológico en régimen natural, con resolución temporal mensual. La precipitación se descompone en una parte que alimenta la zona no saturada, donde coexisten aire y agua (humedad del suelo) y se produce la evapotranspiración, mientras que el resto escurre superficialmente o bien recarga los acuíferos, los cuales drenan a la red superficial o al mar. Este modelo posee como variables de entrada las precipitaciones, evapotranspiración potencial (o en su caso temperaturas), características físicas de las cuencas como usos del suelo, pendiente, geología, entre otras; y como variables resultado destacan las aportaciones superficiales y subterráneas. En este caso, la evapotranspiración real es determinada como un término residual del balance del ciclo hidrológico.

No obstante, emplear modelos hidrológicos en regímenes hídricos tan alterados, hace que las salidas de dichos modelos presenten incertidumbres importantes, como el volumen de agua subterránea, la humedad del suelo y la evapotranspiración. Además en este ciclo ideal, hay que introducir ajustes debidos a actividades humanas como la extracción o retorno al medio ambiente (SEEA-Water 2013). En estas zonas, donde el riego se considera un gran consumidor de agua, es difícil cerrar el balance de agua, dado que las tomas para regadíos no corresponden exactamente con las demandas de agua de los cultivos y se genera incertidumbre sobre el uso consuntivo y la fuente de agua superficial o subterránea.

Esta complejidad es aún mayor en el caso de cuencas con transferencias de aguas internas o externas, donde el déficit hídrico, las demandas de agua a satisfacer, en definitiva el modelo hidráulico profundamente alterado implica su desnaturalización (Gil Olcina, 2000).

A través de estudios como el de Olmos Giménez (2015) para la cuenca alta del Río Segura, donde se contrastaron las escurrimientos observados y los simulados por el modelo Témez (Témez, 1977) para el periodo de calibración 2000-2005, se demostró que la variabilidad observada mensual era mayor que la simulada, poniendo de manifiesto las diferencias entre ambas variables, errores que se propagan al resto de variables resultado del modelo.

Por tanto, se justifica que las estimaciones de ET_{real} realizadas por modelos de balance como el modelo de Témez, no representen los valores reales de esta variable. Ocurre lo mismo con otras variables de salida de este tipo de modelos, como por ejemplo la humedad del suelo y la dinámica del flujo subterráneo. Esta última variable es una componente del ciclo hidrológico tan importante como desconocida en algunos casos, por tanto una fuente de elevadas incertidumbres.

Por este motivo se considera que la introducción de técnicas basadas en teledetección, que permitan realizar estimaciones espacio-temporales precisas de la ET_{real} , constituyen un aporte significativo en este campo. Puesto que no sólo permitirían realizar de forma más cercana a la realidad el cierre de los balances en sistemas de contabilización hídrica, sino también facilitarían el calibrado espacial de modelos hidrológicos distribuidos de simulación continua con la consiguiente mejora en la estimación de las aportaciones simuladas; entre otras aplicaciones.

3. ZONA DE ESTUDIO

3.1. La Cuenca del Río Segura

La cuenca del río Segura (SRB) situada en el Sureste semiárido de la Península Ibérica, cubre el área de 19.025 km² y se extiende sobre cuatro unidades administrativas regionales: Región de Murcia, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana y Andalucía (véase Figura 3.1). El territorio presenta grandes contrastes climáticos, entre los que destacan frecuentes sequías, lluvias torrenciales, inundaciones recurrentes, altas temperaturas y fuertes heladas (Romero Díaz *et al.*, 1992).

Geológicamente la demarcación se encuentra casi en su totalidad dentro del dominio geológico de las Cordilleras Béticas. Se trata de un ámbito muy complejo en su estructura debido en su mayor parte por el choque de las placas africanas y el macizo central Ibérico, confiriéndole una topografía muy variada, distinguiendo zonas por encima de los 2.000 m. (véase Figura 3.1) en cabecera, y montañas y llanuras extensas en zonas cercanas a la costa. En términos generales, el 40 % se sitúa bajo los 500 m de altitud dando idea de la topografía suave que presenta, solamente se localizan pendientes acusadas en su bordes. Esta configuración orográfica, montañas y tierras altas a modo de arco, cierra la cuenca por el oeste e impide el paso de frentes húmedos procedente de este origen, efecto Foehn (Gallego Jimenez, 1997).

No tiene una red hidrográfica homogénea debido al régimen pluviométrico dispar, ya que al colector principal se suman cursos pluvionivales atenuados, pluviales mediterráneos y aportes esporádicos de ramblas propios de ambientes semiáridos (Gil Olcina, 2000). La red está compuesta por 1.553 kilómetros de corrientes permanentes e intermitentes. Los ríos Segura y Mundo contribuyen con las más altas descargas naturales (391 y 167 hm³/año, respectivamente) representando el 68 % del total de recursos disponibles. Aguas abajo de la confluencia Río Segura-Río Mundo, otros afluentes del lado derecho (Río Moratalla, Río Argos, Río Quípar, Río Mula and Río Guadalentín) proporcionan descargas al río Segura entre 10 y 40 hm³/año hasta un total de 105 hm³/año (13 % de los recursos de aguas superficiales). Los afluentes del margen izquierdo tienen un régimen intermitente y sólo después de los eventos de lluvia muy intensos proporcionan descargas. El denominador común es la sequía estival debido a la subsidencia subtropical. La Figura 3.1 presenta un mapa del relieve, la red hidrográfica principal y subcuencas.

Fruto de la complejidad geológica, le confiere a la zona, la existencia de un total de 63 masas de agua subterránea con un total de 236 acuíferos. Según los últimos estudios de caracterización disponibles, los recursos hídricos subterráneos disponibles se estiman en 540,7 hm³/año en valor medio interanual (CHS).

En lo referente a las temperaturas, son suaves durante los meses de invierno, y a partir de primavera, se elevan prolongándose durante otoño. Las máximas corresponden al mes de julio y agosto, aunque los máximos absolutos se alcanzan por la llegada de los vientos del noreste de África. El interior se caracteriza por temperaturas medias anuales de 10 a 12°C con altas fluctuaciones y en la costa se caracteriza por temperaturas medias anuales de alrededor de 17 a 18 °C.

La precipitación media oscila desde 1000 mm/año en cabecera y 300 mm/año en la zona más secas, con promedios de evapotranspiración potencial 1.400 mm/año. Existen frecuentes episodios de precipitaciones torrenciales producidos por las tormentas convectivas de corto tiempo y alta intensidad comúnmente conocidos como "gota fría" (Pedro-Monzonís *et al.*, 2016a). Estas lluvias torrenciales, y su consiguiente proceso de escorrentía directa, representan una parte importante de la precipitación total, por lo que la precipitación efectiva es relegada a una pequeña cantidad. Los problemas de escasez de agua y las sequías son persistentes en la cuenca.

Figura 3.1. Mapa de relieve, subcuencas y red hidrográfica principal. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

El clima predominante es el mediterráneo excepto la parte Sureste particularmente árida (Thornes y Rowntree, 2006). Por este motivo, esta región soporta muchas comunidades de plantas y especies con origen en el Norte de África, y es de todas las cuencas del SE de España la que muestra mayor diversidad de comunidades vegetales de ribera presenta, debido a una gran variación en el bioclima y rango altitudinal (Alcaraz *et al.*, 1997).

En general, los suelos tienen escasa consistencia, y la abierta vegetación que los cubre, facilita la formación de surcos de erosión y de redes de drenaje ramificadas. Además el déficit hídrico produce aumentos del nivel de sales en los horizontes altos. Esto implica que la roca madre sea la que más ha influido en las características actuales de los suelos. Por tanto, la humedad del suelo tiene escasa variación en toda la cuenca, presentándose dos regímenes diferentes, según la clasificación U.S. Department of Agriculture (USDA) de suelos (Soil Taxonomy): arídico y xérico, típico de climas áridos y del área mediterránea, respectivamente (CHS, 2005). Se tratan de suelos donde el régimen de humedad a lo largo del año está caracterizado por la abundancia de días secos sobre todo en los arídicos, y en menor cantidad los suelos xéricos.

La cuenca de estudio es una región agrícola altamente productiva, con la mayor demanda de agua para usos agrícolas y el menor porcentaje de recursos hídricos renovables de todas las cuencas españolas (Urrea Mallebrera, *et al.* 2010). Las tierras cultivadas representan el 43 % de su área, con un tercio de la superficie bajo riego (más de 269.000 ha). La Figura 3.2 corresponde a un mosaico de falso color de las imágenes Landsat 5-TM (Thematic Mapper) de la cuenca (color rojo para las superficies con vegetación y color rojo intenso para tierras de regadío), en blanco aparecen delimitadas las dos áreas de análisis el Noroeste de la Cuenca del Segura y el Campo de Cartagena. En el Campo de Cartagena, que se caracteriza más tarde, se ubican las torres de medida de flujo empleadas para la validación de resultados. Esto es resultado de la profunda transformación de los espacios rurales tanto en lo que se refiere a la práctica de las actividades agropecuarias como a su poblamiento. Se ha pasado de una urbanización rural tradicional orientada en gran medida hacia el autoconsumo, a otra situación donde predominan actividades especializadas que persiguen un incremento de la producción y sobre todo una orientación de mercado, tanto nacional como internacional. No obstante, predominan las pequeñas explotaciones y de formas irregulares. La

Figura 3.3 presenta un ejemplo de agricultura de mercado donde el producto que se planta Kohlrabi, es íntegramente destinado a la exportación (a Alemania y Austria).

Las tierras labradas se han incrementado en los últimos años. En lo que se refiere al secano, el aumento de superficie cultivada se ha hecho sobre todo gracias a un incremento apreciable de la mecanización. Y en cuanto al regadío además del aumento de superficie, que en el periodo 1987-2000 se estimó para la Región de Murcia en torno a 43.000 ha (MAM, 2006), deben añadirse otras modificaciones de gran envergadura. El primer ítem importante fue la construcción de embalses, y la extracción de aguas subterráneas en zonas donde no existían cursos de agua permanente. Hoy día la falta de agua es suplida mediante el uso de tanto recursos convencionales (superficial o subterránea), como no convencionales entre los que destacan el agua reutilizada, los pozos de emergencia y la desalinización (March *et al.*, 2014), y por ultimo las transferencias externas. El agua procedente de recursos no convencionales supone más del 65 % del total disponible (Urrea Mallebrera, *et al.*, 2010), con los consiguientes costes más elevados de recursos convencionales. En general, ello se traduce en grandes inversiones en infraestructuras, una alta regulación y el uso intensivo de los recursos no convencionales.

Una contextualización detallada de la zona alta del Río Segura se presenta en el Capítulo 6, mediante la modelización de los elementos geográficos más destacados. La cuenca recibe el agua de los dos acueductos entre cuencas: Tajo-Segura (desde 1975, véase Figura 3.4) y Guadalquivir-Negratín (desde Febrero 2004). El volumen de agua recibida en la cuenca por transferencia de agua se distribuye principalmente para el riego, consumo humano e industrias. También se abastece a otras cuencas vecinas como la del Río Júcar para el abastecimiento humano.

Figura 3.2. Mosaico en falso color de las imágenes Landsat 5-TM y áreas seleccionadas (límite en blanco) objeto del estudio detallado (Campo de Cartagena donde se ubican las torres de medida de flujo, y Noroste de la Cuenca). Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

Figura 3.3. Agricultura de mercado, Kohlrabi (Auditoría propia).

Se está realizando un gran esfuerzo a la hora de reducir los consumos de agua para riego, introduciendo modalidades de riego localizado, sobre todo en tierras de regadío, donde por medio de los sistemas de riego se intenta economizar al máximo los reducidos recursos. De este modo cambia el modelo de riego de la oferta de los cultivos a la demanda (Montaner Salas *et al.*, 2002) multiplicando el número de pequeños embalses y balsas para acumular agua, y ajustando el riego a las demandas hídricas para permitir mayores rendimientos (véase Figura 3.4). Con los recursos hídricos disponibles por habitante - solamente 442 m³/habitante/año -, la diferencia entre la oferta y demanda de agua es elevada (EEA, 2013).

Entre las consecuencias negativas se puede mencionar la sobreexplotación de acuíferos, dado que se han puesto en regadío nuevas tierras cuyas dotaciones de agua no están aseguradas en un futuro, ello ha generado un elevado déficit de agua que se quiere paliar e importantes necesidades hídricas a atender (Montaner Salas *et al.*, 2002), a la vez que se ha incrementado la salinización de los caudales extraídos y de los suelos (Esteve Selma *et al.*, 2003).

El agua en el SRB es gestionada por dos grandes instituciones públicas: la Mancomunidad de los Canales del Taibilla (MCT) y Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). La MCT distribuye y suministra el agua a la mayor parte de los municipios de la cuenca (véase Figura 3.4). La CHS es la autoridad de gestión del agua en la cuenca (gestión, política, control, etc.). La CHS es la responsable de la mayor parte de las grandes infraestructuras de agua (presas, canales, etc.) y gestiona la recepción y distribución de los flujos de agua recibida.

Figura 3.4. Mapa de infraestructuras y balsas. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

3.1.1. La zona regable del Campo de Cartagena

La región denominada Campo de Cartagena se trata de una zona casi llana con pendiente suave de alrededor del 1%. Está rodeada por pequeñas alineaciones montañosas, y por el Este se encuentra abierta al mar Mediterráneo a través de la laguna hipersalina costera denominada Mar Menor. Las principales características climáticas corresponden a una temperatura anual gradual de 18 °C, precipitación anual promedio de 300 mm (distribuida en una serie de eventos intensivo que tienen lugar principalmente en primavera y otoño), y evapotranspiración potencial promedio de 1.275 mm/año (Jiménez-Martínez *et al.*, 2016).

En este área no existen cursos de agua permanente, siendo una práctica habitual extraer agua de las capas más superficiales del subsuelo, siendo hoy día habitual ver antiguos molinos abandonados (véase Figura 3.5) empleados para dicha extracción, vestigios de tal explotación pero que han pasado a ser parte del paisaje (catalogados como bienes de interés regional).

El uso del suelo está dominado por la agricultura (véase la Figura 3.6). Los requerimientos de agua están satisfecho por el agua subterránea bombeada desde acuíferos, recursos de agua superficiales de la transferencia entre cuencas Tajo-Segura (proporciona más de un tercio de la demanda total de agua), con plantas desalinizadoras de agua marina y del agua subterránea salobre (Jiménez-Martínez *et al.*, 2016)

Figura 3.5. Antiguo molino (Fuente: Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España, base de datos de fotografías georreferenciadas, Instituto Geográfico Nacional).

Figura 3.6. Mapa de usos del suelo de la zona regable del Campo de Cartagena. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

4. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

4.1. Información requerida

La información requerida en esta Tesis puede agruparse en tres bloques principales: datos necesarios para la aplicación de los algoritmos desarrollados; aquellos requeridos para la validación de los mismos; y los utilizados en el completado del método de contabilización hídrica a escala de cuenca.

Como inputs de los algoritmos a aplicar, destacan tanto las propias imágenes de satélite como los datos necesarios para reflejar la variabilidad climática de la zona: la temperatura del aire y la radiación solar. Para estimar la distribución espacial de ambas variables es crucial el empleo de un Modelo Digital de Elevaciones (o DEM por sus siglas en inglés) y así reflejar las diferentes condiciones de iluminación debido a la topografía (variación en la radiación solar) y a la elevación (variación en la temperatura del aire).

Así mismo cabe mencionar otros datos auxiliares considerados, tales como el mapa de ocupación del suelo para delimitar las zonas susceptibles de producirse evapotranspiración, y otra información que será detallada seguidamente en cada uno de los ítems siguientes.

4.1.1. Datos observados para la validación de resultados

Como se ha comentado, se dispone de dos parcelas experimentales (véase mapa situación de la parcelas, Figura 4.1a) situadas en la comarca agraria del Campo de Cartagena: Villa Antonia (Parcela A o Farm A) y Casa Mulero (Parcela B o Farm B). Las peculiaridades que caracterizan estas parcelas son las siguientes:

- En la parcela A (37 ha) 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, índice de área foliar (Leaf Area Index, *LAI*) ≈ 3 .
- En la Parcela B (16 ha) 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, y *LAI* ≈ 5 . El valor mayor del *LAI* en la Parcela B, en comparación con la Parcela A, se justifica en el hecho de la mayor área de la copa de los árboles adultos en contraste con la copa mucho más pequeña de los árboles jóvenes. Por lo tanto, la fracción de cobertura es aproximadamente 0.70-0.75 en la Parcela B, frente a 0.35 – 0.45 en la Parcela A.

Los árboles son regados al 100 % de la evapotranspiración estándar del cultivo (ET_{opt}) a lo largo de todo el año. El valor de ET_{opt} fue calculado como el producto de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y el coeficiente de cultivo K_c para naranjos propuesto para el método Penman-Monteith por la FAO (Allen *et al.*, 1998).

Ambas parcelas están equipadas con torres de medida de flujos de energía (Figura 4.1b) que registran directamente y en continuo λE , H , R_n and G a escala temporal de 30 minutos, mediante la técnica de covarianza de remolinos (eddy-covariance, EC), además de otras variables como intercambio de CO_2 , y temperatura superficial de la vegetación y del suelo. En resumen, las variables registradas son las siguientes:

- A 1.5 m por encima de las copas de los árboles se registra la temperatura del aire (T_{air}), humedad relativa, radiación solar (RG, piranómetro CMP3 Kipp & Zonen, Delft, Holanda) y temperatura de la cubierta vegetal (T_c , termómetro infrarrojo (IRT) Apogee, Logan, Utah, EE.UU.).

- El flujo de calor del suelo se mide por medio de dos placas (REBS, model HFT-3.1, Seattle, WA, USA) enterradas a 5 mm por debajo de la superficie cerca de un gotero (bulbo húmedo) y en medio de la fila (suelo seco).
 - Los flujos H y λE son medidos a 1.5 m por encima de los árboles mediante el sistema eddy-covariance que comprende un anemómetro sónico CSAT-3 Campbell Scientific Inc. (Logan, UT, EE.UU.) de alta de alta frecuencia (10 Hz) de media de velocidad del viento 3D y un analizador de gases LICOR (Lincoln, NE, EE.UU.) LI-7500 por infrarrojos de camino abierto que registra la relaciones de mezcla de CO_2 y H_2O en modo absoluto a 10 Hz.
- Estas medidas se emplean para validar los resultados obtenidos desde las imágenes de satélite.

Figura 4.1. Parcelas experimentales: (a) Mapa ubicación de las parcelas, y (b) imagen de torre de medidas de flujos. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N

Procesado de datos para la validación

La falta de cierre en la ecuación del balance energético superficial se verificó comparando mediciones cada 30 min de la diferencia entre la energía disponible ($A = R_n - G$) y la suma de los flujos EC ($\lambda E + H$). A escala diaria, la suma fue menor en un 15 a 20 % que el término A , siendo la diferencia pequeña en la mañana (~5 a 10 % en el tiempo de paso superior) y algo mayor a media tarde (hasta 20-25 %). Para solventar la falta de cierre del balance, se aplicó la corrección propuesta por Twine *et al.* (2000), suponiendo que la relación de Bowen se mantuvo sin cambios.

Se utilizó un análisis *footprint* simplificado (Schuepp *et al.*, 1990, para estimar la contribución relativa de un área dado, dentro de las parcelas, al flujo total medido. El análisis indicó que más del 90 % de la λE medido proviene de una zona contra el viento de menos de 160 m de distancia de la torre de medición. Como el mínimo fetch fue cercano a 200 m (sector Sur), no se aplican correcciones de *footprint* acorde a la dirección del viento.

4.1.2. Datos requeridos para la aplicación de los algoritmos

Imágenes Landsat 5TM

Las imágenes Landsat 5-TM presentan la resolución espacial adecuada para abordar los problemas de gestión del agua a escala de parcela. Las imágenes fueron descargadas desde el servidor del Programa Nacional de Teledetección (PNT), coordinado por el Instituto Geográfico

Nacional (IGN), con remuestreo a 25 m por el método de convolución cúbica (o algoritmo del vecino más próximo en algunos casos), y corregidas geométricamente al sistema de referencia geodésico oficial ETRS-89 UTM Huso 30. Un total de 10 imágenes fueron consideradas en el período septiembre 2009 - junio 2011.

Las imágenes Landsat 5-TM presentan seis bandas multiespectrales con una resolución espacial de 30 m, con la excepción de la banda del infrarrojo térmico que presenta 120 m. Mientras la resolución temporal corresponde a 16 días. Las correcciones radiométricas, atmosféricas, topográficas, y de emisividad se llevaron a cabo siguiendo las especificaciones provistas por Chuvieco y Hantson (2010). También se aplicaron máscaras de nubes.

Procesado de imágenes Landsat 5 TM.

- 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.

Durante la calibración radiométrica, los valores de los píxeles (niveles digitales) son convertidos a unidades de radiancias espectrales absolutas (32-bit floating) Mediante la siguiente ecuación, los niveles digitales (ND) son transformados en radiancias (L_λ):

$$L_\lambda = G_{rescale} \times ND + B_{rescale} \quad (4.1)$$

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 4.1).

La reflectividad aparente es calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\rho_{\lambda TOA} = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cos \theta_s} \quad (4.2)$$

donde d : distancia Tierra-Sol en el momento de la toma de la imagen, expresado en unidades astronómicas (UAs); L_λ : radiancia espectral, calculada como en el punto anterior; $ESUN_\lambda$: irradiancia espectral exoatmosférica solar (en $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$); θ_s : ángulo cenital solar. El valor de $ESUN_\lambda$: está recogido en la Tabla 4.1, y los parámetros d y el ángulo cenital solar se definen en los metadatos de la propia imagen.

La temperatura de brillo (T_{sen}), se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$T_{sen} = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{sen}} + 1 \right)} \quad (4.3)$$

siendo: L_{sen} : radiancia obtenida en el sensor; y T_{sen} : temperatura de brillo (en K). Para Landsat 5-TM K_1 : 607.76 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) y K_2 : 1260.53 (en K).

Tabla 4.1 Parámetros de calibración Landsat-5 TM (Chander *et al.*, 2009).

Sensores L5 TM (LPGS) Q calmin =1 Q calmax=255							
Bandas	Rango Espectral	Longitud de onda central	LMIN λ	LMAX λ	Grescale	Brescale	ESUNA
Unidades	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	1.237	15.30	0.055376	1.18	N/A
7	2.097-2.349	2.222	-0.15	16.5	0.65551	-0.22	83.44

- Corrección atmosférica

Para las bandas ópticas, la reflectividad (ρ_λ) es calculada mediante la siguiente formulación:

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot [L_\lambda - L_a] \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cos \theta_s \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} \quad (4.4)$$

donde 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 UAs. 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). Para los valores de τ_2 se considera $\cos \theta_s$, siendo θ_s el ángulo cenital del sensor (1 para imágenes Landsat, ya que la observación es siempre vertical).

El algoritmo para el cálculo de la temperatura superficial (LST), para el infrarrojo térmico, se basa en la inversión de una ecuación de transferencia radiactiva (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2009). Por tanto, LST se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

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

$$\gamma = \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad \delta = T_{sen} - \frac{T_{sen}}{b_\gamma} \quad (4.5)$$

donde ε : emisividad del suelo; ψ_1, ψ_2, ψ_3 : funciones atmosféricas, γ y δ : parámetros para la estimación de LST , siendo b_γ : 1256 para Landsat 5-TM.

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), corresponden a:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 0.08735w^2 - 0.09553w + 1.10188 \\ \psi_2 &= -6.9188w^2 - 0.58185w - 0.29887 \\ \psi_3 &= -0.03724w^2 + 1.53065w - 0.45476 \end{aligned} \quad (4.6)$$

siendo w : contenido de vapor de agua en la atmósfera (gcm^{-2}).

- Corrección topográfica.

El método empírico estadístico que se ha aplicado en el caso de la corrección topográfica, está descrito por el siguiente algoritmo (Chuvieco y Hantson, 2010):

$$\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \cos \gamma_i m_{\lambda} - b_{\lambda} + \bar{\rho}_{\lambda,i} \quad (4.7)$$

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 $\rho_{\lambda,i}$.

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 el ángulo cenital y azimutal, utilizando los pixeles vecinos con la fórmula estándar (Colby, 1991):

$$\cos \gamma_i = \cos \theta_s \cos \eta_i + \sin \theta_s \sin \eta_i \cos(\varphi_a - \varphi_o) \quad (4.8)$$

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 ; y γ_i : ángulo de incidencia en un píxel.

- Corrección por 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 valor de NDVI, considerando las siguientes formulaciones propuestas por Sobrino *et al.* (2008):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0.979 - 0.035 \rho_{TM3} & NDVI < 0.2 \\ \varepsilon &= 0.0986 + 0.004 \cdot f_c & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ \varepsilon &= 0.99 & NDVI > 0.5 \end{aligned} \quad (4.9)$$

donde ρ_{TM3} es la la reflectancia de la banda 3; y f_c es la fracción vegetal que se estima como sigue (Sobrino *et al.*, 2004):

$$f_c = \begin{cases} \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 & si \quad NDVI < NDVI_s \Rightarrow f_c = 0 \\ & si \quad NDVI > NDVI_v \Rightarrow f_c = 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

$NDVI_s$ y $NDVI_v$ se refieren al NDVI del suelo y la vegetación, respectivamente, donde $NDVI_v = 0.5$ and $NDVI_s = 0.2$ fueron fijados de acuerdo a Carlson y Ripley (1997). 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 respecto a otra (Rouse *et al.*, 1974). NDVI se calcula mediante la fórmula:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \quad (4.11)$$

donde ρ_{NIR} : reflectancia en la banda 4 (Infrarrojo Cercano); y ρ_R : reflectancia en la banda 3 (Rojo). NDVI es un buen indicador fuertemente relacionado con la fracción de radiación activa fotosintética absorbida por la vegetación (*fraction of photosynthetically active radiation, fPAR*) y por tanto está estrechamente asociado con el verdor o actividad vegetal (Asrar *et al.*, 1984, Myneni *et al.*, 1995).

- Máscara de nubes

La metodología seguida para la elaboración de máscaras de nubes y nieve ha consistido en los siguientes pasos acorde a la metodología propuesta por Chuvieco 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 290 K (17 °C) en verano y en invierno inferior a 272-274 K (1 °C), se considera la existencia de una nube.

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), fijando un umbral de 0.4:

$$NDSI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} \quad (4.12)$$

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 (1200 m² en este caso) y polígonos que representen nubes falsas. El Esquema 4.1 ilustra esquemáticamente las tareas realizadas para la identificación de máscaras de nubes.

Esquema 4.1. Esquema de tareas para la realización de máscara de nubes.

Imágenes TERRA MODIS

El sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, o espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada) consta de 36 canales, 2 con resolución espacial 250 m, 5 con 500 m y el resto con 1 km. Los siete primeros canales que presentan la máxima resolución espacial del sensor, están orientados al estudio del suelo, los nueve siguientes al estudio del océano y el resto a estudios atmosféricos.

La infraestructura consiste en un sistema de captación de datos del sensor MODIS mediante imágenes a bordo de los satélites TERRA (en órbita desde 1999) y AQUA (desde 2002) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration de los Estados Unidos). Ambos satélites presentan una frecuencia de paso diario (diurno y nocturno), con una resolución espacial media (250-1000 m) y 36 bandas espectrales entre el rango visible y el IR térmico.

Los productos y justificación con los que se ha trabajado en esta Tesis, son los siguientes:

- **MOD05_L2.** 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). Se recurre a datos externos para la estimación del vapor de agua, en este caso se emplea el producto MOD05_L2. El modelo empleado para su estimación (*algorithm near-infrared*) ofrece datos de vapor de agua diarios (gr/cm²), con una resolución temporal de 1 km.

- **MOD09A1:** La reflectancia superficial (MOD 09) se calcula a partir de las bandas 1 a 7 con una resolución de 500 metros en 8 días. Este producto proporciona una estimación de la reflectancia espectral de la superficie. Contiene la mejor observación posible durante un periodo de 8 días, seleccionado sobre una base de cobertura de observación alta, ángulo de visión baja y con ausencia de nubes o sombras por nubes y carga de aerosoles (en ausencia de dispersión atmosférica o absorción).
- **MOD13Q1.** MOD13 incluye productos estándar de Índices de Vegetación (VI): el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) y el índice de vegetación mejorado (EVI). Estos IV caracterizan eficazmente los estados biofísicos y bioquímicos de las superficies con vegetación. MOD13Q1 presenta una resolución espacial de 250 m, y temporal de 16 días.
- **MOD11A2.** El producto MOD11 brinda estimaciones de LST y emisividad. Presenta una resolución espacial de 1 km, tanto a escala diaria como composiciones de 8 días (MOD11A1 y MOD11A2 respectivamente). *LST* es proporcionado en Kelvin, al contacto entre la cobertura y la atmósfera. La emisividad es un número adimensional igual al cociente entre la radiación emitida por un objeto y un cuerpo negro a la misma temperatura.

Procesado de imágenes MODIS.

Para la descarga de imágenes provistas por el sensor MODIS, se ha utilizado la plataforma Web Reverb (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>), creada por la NASA agencia gubernamental responsable de los programas espaciales.

Ofrece los archivos en formato HDF (Hierarchical Data Format) para almacenar y organizar grandes cantidades de datos numéricos. Dentro del archivo HDF se almacenan un conjunto de datos científicos (*scientific datasets*, SDS). Los valores almacenados en el SDS (aparte de las matrices de geolocalización) son valores con formato de entero corto con el fin de ahorrar espacio de almacenamiento. Para calcular el valor real de los datos, se necesita aplicar al valor almacenado un factor de escala (*scale_factor*) y un offset (*add_offset*). Por tanto, se utiliza la siguiente ecuación para obtener el valor real:

$$valor = scale_factor * (stored_value - add_offset) \quad (4.13)$$

Finalmente, se convierte al formato Geotiff, con el programa Modis Reprojection Tool (MRT), para que pueda ser procesada bajo el Sistema de Información Geográfica (SIG) GRASS (Geographic Resources Analysis support System). La Tabla 4.2 resume el rango de valores y factores de escala considerado en el procesado de las imágenes.

Tabla 4.2. Rango de valores y factores de escala de productos MODIS.

Indicador	BD	Unidades	Rango de valores	Factor de escala	Offset
Reflectancia superficial	MOD09A1	reflectancia	-100 -16000	0.0001	0
Índices de vegetación	MOD13Q1	(adimensional)	-2000-100000	0.0001	0
Temperatura superficial	MOD11A1	Kelvin	7500-65535	0.02	0
Vapor de agua	MOD05_L2	g/cm ²	0-20	Metadata	

Modelo Digital de Elevaciones (DEM).

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) con un tamaño de píxel de 20 m., remuestreado a un tamaño de 25 m., se han calculado los mapas de pendientes y orientaciones de pendientes (o mapa de aspecto). El empleo de los DEM para generar distintas variables permite modelizar las diferentes condiciones climáticas a lo largo de la zona de estudio, reflejando condiciones de iluminación variables debidas a la topografía (variación de la radiación solar) y la elevación (afectando la temperatura del aire).

Modelo de radiación solar

Para la estimación de la radiación de onda larga al momento del paso del satélite, se empleó el modelo de radiación solar propuesto por Muneer (1997) integrado en el GIS GRASS (Hofierka y Suri, 2002) que simula sus tres componentes: radiación directa, reflejada y difusa. Las entradas requeridas por el modelo son el albedo, día del año, declinación, tiempo de paso del satélite, DEM (con sus atributos derivados: mapas de aspecto y pendiente), y la distribución espacial de la media mensual del factor de turbidez de atmosférica Linke (Remund *et al.*, 2003) generado en el proyecto de proyecto SoDa (Integration and exploitation of networked Solar radiation databases for environment monitoring, Wald *et al.*, 2002). Mediante el empleo del DEM se tiene en cuenta la variación espacial de la radiación debida al terreno y los efectos del terreno-sombreado.

Será necesario incorporar el albedo en el modelo anteriormente mencionado, calculado mediante la formulación propuesta por Menenti (1984) y por Liang (2000) para Landsat 5-TM y MODIS respectivamente.

$$a = 0.2212 \cdot \rho_{TM1} + 0.2569 \cdot \rho_{TM2} + 0.1787 \cdot \rho_{TM3} + 0.2295 \cdot \rho_{TM4} + 0.0815 \cdot \rho_{TM5} + 0.0322 \cdot \rho_{TM7} \quad (4.14)$$

donde ρ_{TMi} ($i = 1$ a 7) son las reflectancias de las bandas 1 a la 7 de Landsat 5 TM.

$$\alpha = 0,160\rho_{M1} + 0,291\rho_{M2} + 0,243\rho_{M3} + 0,116\rho_{M4} + 0,112\rho_{M5} + 0,081\rho_{M7} - 0,0015 \quad (4.15)$$

donde ρ_{Mi} de 1 a 7, corresponde al valor de la reflectancia del producto MOD09A1.

Datos de temperatura del aire

Los datos de temperatura del aire del territorio correspondiente a la Cuenca del Río Segura han sido descargados de sistemas de información agrometeorológica disponibles en diferentes Web de las Comunidades Autónomas que abarca la demarcación hidrográfica:

- 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.

Esta información ha sido completada con datos meteorológicos de la Agencia de Estatal de Meteorología (red AEMET), así como con estaciones de medida propias del organismo de cuenca, como el Sistema Automático de Información Hidrológica (red SAIH).

Procesado de datos de temperatura del aire

A partir de los datos de temperatura del aire de las estaciones meteorológicas, se emplearon dos modelos de regresión multi-variable para predecir datos de temperatura máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) donde no existía su medida, aplicando la siguiente metodología:

- inicialmente se empleó la metodología propuesta por Cristobal *et al.* (2008), a partir de un modelo de regresión espacial entre datos observados y predictores (McVicar y Jupp, 2002) que considera: elevación, latitud, longitud, distancia al mar e insolación.

$$\begin{aligned} T_{max} &= b_0 + b_1(ALTITUD) + b_2(DISTANCIA) + b_3(LATITUD) + b_4(LONGITUD) + b_5(INSOLACION) \\ T_{min} &= b_0 + b_1(ALTITUD) + b_2(DISTANCIA) + b_3(LATITUD) + b_4(LONGITUD) + b_5(INSOLACION) \end{aligned} \quad (4.16)$$

donde b_n ($n = 1$ a 5) son los coeficientes de regresión múltiple.

- posteriormente se mejoró su estimación mediante un modelo de regresión espacio-temporal siguiendo la metodología propuesta Hengl *et al.* (2012), usando los predictores: elevación, latitud, longitud, distancia al mar, insolación e índice topográfico de humedad, TWI

(Topografic Wetness Index, usado para describir la acumulación potencial de aire frio) y para mejorar la predicción de la distribución de las temperaturas emplearon LST

$$\begin{aligned} T_{max} &= b_0 + b_1(ALTITUD) + b_2(DISTANCIA) + b_3(LATITUD) + b_4(LONGITUD) + b_5(INSOLACION) + b_6(TWI) + b_7(LST) \\ T_{min} &= b_0 + b_1(ALTITUD) + b_2(DISTANCIA) + b_3(LATITUD) + b_4(LONGITUD) + b_5(INSOLACION) + b_6(TWI) + b_7(LST) \end{aligned} \quad (4.17)$$

donde b_n ($n = 1$ a 7) son los coeficientes de regresión múltiple.

El primer método de interpolación espacial de datos de temperatura del aire fue empleado para el cumplimiento del primer objetivo de esta Tesis, que consiste en validar un método espacio temporal distribuido de estimación ET_{real} instantánea de cultivos al momento del paso del satélite. La metodología propuesta es desarrollada en Capítulo 5, usando el sensor Landsat 5-TM.

Como soporte a los resultados obtenidos en dicho Capítulo 5, se realizó un *upscaling*, considerando un mayor tamaño de celda y mejor resolución temporal usando un sensor diferente. Se emplea el sensor MODIS, y se estima ET_{real} pero a escala de cuenca hidrográfica, aumentado el área de análisis y utilizando la segunda metodología para la predicción de temperatura del aire. Este análisis espacio-temporal permite su vez corregir las composiciones de LST (ruido, mosaicado y efectos de la topografía) así como solventar la presencia de nubes.

La diferencia principal de ambas metodologías es la consideración de una dimensión más; el tiempo (4D). Cristobal *et al.* (2008) construyen un modelo de regresión espacial donde los residuos son interpolados al resto de ubicaciones mediante la técnica de inversa de la distancia al cuadrado (véase Figura 4.2 para $T_{max}(a)$ y $T_{min}(c)$). Sin embargo, Hengl *et al.* (2012) emplean un modelo más complejo de regresión espacio-temporal estimando la parte determinística de la variación, analizando los residuos resultantes de la correlación espacio-temporal, para finalmente crear mapas mediante regresión-kriging (véase Figura 4.2 para $T_{max}(b)$ y $T_{min}(d)$, respectivamente).

El modelo propuesto por Hengl *et al.* (2012) elimina outliers y datos no correlacionados mediante un procedimiento estadístico que utiliza la transformación ortogonal. La transformación ortogonal permite convertir el conjunto de observaciones de las variables posiblemente correlacionadas, en un conjunto de variables linealmente correlacionadas llamadas componentes principales, PCA (Principal component analysis). Este procedimiento es mejorado combinándolo con regresión escalonada (*step-wise*), donde los datos no correlacionados son desplazados hacia el más alto orden de componentes, eliminándose la componente del análisis de regresión. La Tabla 4.3 presenta los coeficientes de correlación y desviaciones de PCA con respecto T_{max} y T_{min} .

Tabla 4.3. Correlaciones y desviaciones de PCA respecto T_{max} y T_{min} .

Año	T_{max}		T_{min}	
	R^2	σ	R^2	σ
2009	0.78	3.6	0.72	3.4
2010	0.79	3.6	0.7	3.7
2011	0.71	4.1	0.72	3.2

La componente del error consiste en tres componentes estacionarias e independientes (Heuvelink y Griffith, 2010): una puramente espacial, una temporal, y otra espacio-temporal donde la distancia en el tiempo es comparable con la distancia en el espacio introduciendo un porcentaje de anisotropía espacio-temporal (α). Esto consiste en la parametrización la suma de funciones de semivarianza: una componente espacial, otra temporal y otra espacio-temporal. La representación de semivariancas versus distancia, produce una nube de puntos, que para ser fácilmente visualizables son mediados para una distancia estándar (lag), obteniendo un variograma experimental estandar. En la Figura 4.3 se presentan los variogramas experimentales estandares para los valores de $T_{max}(a)$ y $T_{min}(b)$ del año 2010.

Figura 4.2. Distribuciones espaciales de temperaturas (Fecha: 28/06/2011): - modelo propuesto por Cristobal *et al.* (2008) (a) T_{max} y (c) T_{min} ; y - modelo propuesto por Hengl *et al.* (2012) (b) T_{max} y (d) T_{min} . Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

Se espera que las semivarianzas sean más pequeñas a distancias cortas y que se estabilice en alguna distancia, es decir efecto de auto-correlación espacial. Estos variogramas son fijados a partir de un modelo de variograma por mínimos cuadrados, donde los pesos son determinados en base a un número de pares de puntos y distancias más cortas. Esos pesos serán empleados para interpolar mediante kriging. La Figura 4.3 presenta los semivariogramas ajustados para las T_{max} (c) y T_{min} (d) del año 2010.

En este trabajo, el modelo de ajuste empleado es una combinación de modelos espacial, temporal y métrico que incluye un parámetro de anisotropía k (Snepvanger *et al.*, 2003), denominado modelo sum-métrico de covarianzas.

$$C_{sm}(h, u) = C_s(h) + C_t(u) + C_{st}(\sqrt{h^2 + (ku)^2}) \quad (4.18)$$

donde $C_s(h)$ es componente espacial, $C_t(u)$ es componente temporal y (C_{st}) es componente espacio temporal. La Tabla 4.4 muestra el Error Absoluto Medio (Mean Absolut Error, MAE) resultado del ajuste para las T_{max} y T_{min} de los años 2009, 2010, 2011

Figura 4.3. Variogramas experimentales estándares para: (a) T_{max} ; y (b) T_{min} ; y semivariogramas ajustados de T_{max} (c) y T_{min} (d) para el año 2010.

Tabla 4.4 MAE T_{max} y T_{min}

Año	MAE T_{max}	MAE T_{min}
2009	2.58	2.4
2010	6.5	2.7
2011	1.13	0.65

Finalmente, la temperatura instantánea (T_{air}) se obtuvo mediante el modelo propuesto por Parton y Logan (1981) a partir de T_{max} y T_{min} . Este modelo simula el ritmo diurno de las temperaturas, considerando la progresión sinusoidal durante el día:

$$T_{air} = (T_{max} - T_{min}) \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{Y + 2a}\right) + T_{min} \quad (4.19)$$

y una caída curva exponencial durante la noche

$$T_{air} = (T_{sunset} - T_{min}) \cdot \exp\left(-\frac{bn}{Z}\right) \quad (4.20)$$

donde T_{sunset} : es la temperatura al amanecer; Y : es la duración del día en horas; m : es el número de horas después de que ocurriera la mínima temperatura; n : es el número de horas después amanece

hasta la hora de la mínima temperatura; Z : es la duración de la noche; a : es el coeficiente lag para la máxima temperatura, y b : es el coeficiente de temperatura durante la noche. Estos valores son tabulados en función de la altura de la temperatura de aire, correspondiendo a una altura de 150 cm los valores a : 1.86 h y b : 2.2 h.

Para ello es necesario conocer variables relacionadas con la duración del día para una determinada fecha y localización (latitud φ , longitud λ). Los cálculos de la posición Solar, puesta y salida del Sol y duración del día, reflejados en Anexo I, están basados en los algoritmos astronómicos de Meeus (1999).

La Figura 4.4 presenta la correlación obtenida para las fechas empleadas en la validación a escala de parcela de la estimación de temperatura del aire instantánea (10:30 h). Mientras la Figura 4.5 presenta las correlaciones y errores de las composiciones de 8 días de temperatura del aire, para la validación a escala de cuenca. Finalmente, la Figura 4.6 muestra las distribuciones espaciales de temperatura del aire instantánea obtenidas aplicando ambas metodologías.

Figura 4.4. Correlación entre temperatura del aire estimada y observada instantánea, validación de parcela.

Figura 4.5. Correlación entre temperatura del aire estimada y observada instantánea desde composiciones de 8 días, validación a escala de cuenca para los años: (a) 2009, (b) 2010, y (c) 2011.

Figura 4.6. Distribuciones espaciales de temperatura del aire: (a) modelo según Cristóbal *et al.* (2008) y (b) modelo propuesto por Hengl *et al.* (2012) Fecha: 28/06/2011. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

A partir de las temperaturas instantáneas, se propone realizar una corrección a las composiciones de LST basándose en el modelo espacio temporal propuesto por Hengl *et al.* (2012), puesto que los resultados son más realistas. Previamente fue necesario el completado de valores nulos mediante interpolado temporal empleando *splines*. El modelo sigue la siguiente ecuación:

$$LST_c = b_0 + b_1(ALTITUD) + b_2(DISTANCIA) + b_3(LATITUD) + b_4(LONGITUD) + b_5(TWI) + b_6(\overline{INSOLACION}) + b_7(\overline{T_{ins}}) \quad (4.21)$$

Donde $\overline{INSOLACION}$ y $\overline{T_{ins}}$ corresponden a los valores medios de 8 días que comprende la composición de MODIS, y LST_c : LST corregido.

De acuerdo con este modelo la Tabla 4.5 recoge los valores de los coeficientes de correlación de PCA respecto a LST, mientras la Figura 4.7 presenta muestras del comportamiento de los residuos en diferentes puntos y fechas respecto al valor esperado por el modelo. Un inconveniente de su aplicación es el elevado requerimiento de memoria computacional (memoria RAM) para poder trabajar con toda la imagen, por esta razón se opera con una muestra aleatoria de píxeles espacial y temporalmente. Así, la Tabla 4.6 muestra el MAE con respecto al ajuste exponencial de los variogramas espacio-temporales del modelo sum-métrico de covarianzas (Ecuación 4.18), de forma similar al empleado para la estimación de temperaturas máximas y mínimas para una muestra aleatoria de 800 puntos y la Tabla 4.7 los parámetros empleados para el ajuste.

Tabla 4.5 Correlaciones PCA respecto *LST*

Año	<i>LST</i>	
	R^2	σ
2009	0.93	2.7
2010	0.97	2.1
2011	0.94	2.6

Figura 4.7. Muestras del comportamiento de los residuos para diferentes fechas de acuerdo con el modelo sum-métrico.

Tabla 4.6. MAE para la muestra aleatoria resultado del ajuste exponencial.

Año	MAE
2009	4.3
2010	1.6
2011	6.7

Tabla 4.7. Parámetros del ajuste de los residuos LST mediante modelo de covarianzas sum-métrico.

Año	Variogramas	Modelo	Sill	Rango	Nugget	Anisotropia
2009	Espacio	Exponencial	6.5	17 Km.	0	1 Km/d
	Tiempo		0	171 días	0	
	Union		0	0	0	
2010	Espacio	Exponencial	3.7	10 Km.	1	1 Km/d
	Tiempo		0.1	170 días	0.01	
	Union		0	0	0	
2011	Espacio	Exponencial	7.7	17 Km.	0	1 Km/d
	Tiempo		0	172 días	0.01	
	Union		0	0	0	

Como puede apreciarse, el comportamiento de los errores en las dos parcelas de validación posee similar comportamiento para *LST* sin corregir (Figura 4.8), y *LST* corregido (Figura 4.9). Las diferencias son apreciables espacialmente como demuestra la Figura 4.10 donde se presenta una imagen bruta sin información y otra imagen interpolada proporcionando información del resto de la cuenca.

Figura 4.8. Correlación entre *LST* MODIS y temperatura observada instantánea 8 días: (a) 2009, (b) 2010, y (c) 2011.

Figura 4.9. Correlación entre *LST* MODIS corregido y temperatura observada instantánea 8 días: (a) 2009, (b) 2010, y (c) 2011.

Figura 4.10. Distribuciones espaciales de LST (Composición: 15/04/2010): (a) producto bruto, y (b) producto corregido. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

Mapa de usos del suelo

El mapa de usos del suelo para la zona de estudio, se basó en el Sistema de Información de Ocupación Suelo de España (SIOSE), integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT). Su objetivo es generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España a escala de referencia 1:25.000, integrando la información disponible de las comunidades autónomas y de la Administración General del Estado. Este mapa se produce de manera descentralizada y coordinada entre las distintas Administraciones, siguiendo los principios de la Directiva Europea INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe, Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y el Consejo del 14 de marzo del 2007), actualizándose periódicamente.

Esta cartografía sirvió para la definición de un área definida como zona permeable - eliminando roquedos, superficies artificiales y agua -, con el fin de poder calcular los volúmenes de agua evaporada o precipitada. En la Figura 4.11 se presenta el ejemplo de la máscara empleada para la definición la zona permeable en el área regable del Campo de Cartagena.

Figura 4.11. Imagen empleada para la definición de la zona permeable de la zona regable del Campo de Cartagena. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

Datos de ET_0

Un método para la obtención de ET_0 es mediante la ecuación de Penman-Monteith (PM, Allen *et al.*, 1998), que incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones uniformes de vegetación (radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento):

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (4.22)$$

donde R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); G es el flujo del calor en el suelo ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor (VPD) (kPa); ρ_a es la densidad media del aire a presión constante (kg m^{-3}); c_p es el calor específico del aire ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ es la constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); y r_a y r_s son las resistencias aerodinámica y superficial respectivamente (s/m).

La resistencia aerodinámica (r_a), es la resistencia de transferencia de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta, definida por la fórmula:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{z_m - d}{z_{om}}\right] + \ln\left[\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right]}{k^2 u_z} \quad (4.23)$$

donde z_m altura de medición del viento (m); z_h altura de medición de humedad (m); d plano de altura de desplazamiento cero (m); z_{om} longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momentum (m); z_{oh} longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua (m); k constante de Von Karman, 0.41 [-]; y u_z velocidad del viento a la altura z (m/s).

Por otro lado, la resistencia superficial (r_s) representa el flujo de vapor a través del cultivo transpirante y de la superficie evaporante de suelo (s/m), definida por la fórmula:

$$r_s = \frac{r_l}{IAF_{activo}} \quad (4.24)$$

donde r_l resistencia estomática total de una hoja bien iluminada (s/ m); IAF_{activo} índice activo de área foliar [m^2 (área de la hoja)/ m^2 (superficie del suelo)].

La versión FAO 56 del método PM fue establecida como estándar para calcular ET_o desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s/m y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. El método reduce las imprecisiones del método de Penman propuesto por la FAO, y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos.

Considerando la ecuación original de PM (Ecuación 4.22) y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica (Ecuación 4.23) y superficial (Ecuación 4.24), ET_o ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) es calculada del siguiente modo:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 3.4U_2)} \quad (4.25)$$

donde R_n radiación neta en la superficie del cultivo; G flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); T_m temperatura media del aire a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$); U_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m/s); e_s presión de vapor de saturación (kPa); e_a presión de vapor del aire (kPa); $(e_s - e_a)$ déficit de presión de vapor (kPa); Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), y γ constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Como se ha comentado, parte de estos datos han sido descargados de los sistemas de información agrometeorológica disponibles en diferentes web de las Comunidades Autónomas que abarca la Cuenca.

4.1.3. Datos requeridos para el completado de balances hídricos

En el marco de la aplicación del sistema de contabilización hídrica a escala de cuenca, se requiere el diseño y completado de los balances hídricos. Tres bases de datos, de acuerdo a su origen y funcionalidad fueron empleados para ello:

- Datos facilitados por el organismo de cuenca sobre redes de medidas hidrológicas e hidrometeorológicas: la Red Oficial de Estaciones de Aforo (ROEA) y la red SAIH (estaciones en cauces, canales de distribución de riego y en embalses), así como la red de estaciones evaporimétricas en embalses. Además, una geodatabase con mapas vectoriales permitieron identificar elementos del sistema de explotación (ríos, embalses, acuíferos, cuerpos de agua, y canales).
- Conjunto de datos meteorológicos observados denominado Spain 02 (Herrera *et al.*, 2010) para el período de tiempo 2000-2007 con resolución espacial de 20 km. La disponibilidad de estos datos abarca el periodo 1950-2008, siendo necesario el uso de otras fuentes de información en períodos más recientes.
- Datos meteorológicos de temperatura y precipitación procedentes de diferente origen: centros agro-meteorológicos de distintas Comunidades Autónomas (CCAA); el SAIH y AEMET.

Variables requeridas en el Sistema de contabilidad económico-ambiental del agua.

El Sistema de Contabilidad Económico y Ambiental del agua (*System of Environmental-Economic Accounting for Water*) denominado SEEA-Water (2013), es una metodología estándar propuesta por la División de Estadística de las Naciones Unidas (DENU) en colaboración con el *Group on Environmental Accounting*. Proporciona una guía para la integración armonizada de información hidrológica y económica en apoyo a la gestión integrada de los recursos hídricos (UN, 2012).

Para comprender qué requerimientos de información demanda la implementación de SEEA-Water a escala de cuenca, se presenta un breve resumen de su estructura, y principales variables a considerar. SEEA-Water cubre cinco categorías de cuentas:

1. suministro físico y uso y cuentas de emisiones (que representa la cantidad de agua utilizada y retornadas al medio ambiente y la cantidad de contaminantes añadidos al agua, PSUTS),
2. cuentas híbridas y económicas (ligadas a los aspectos económicos del agua con el suministro físico y datos de uso, HYBRID),
3. cuentas de activos (que representan el balance de agua y la medición de existencias o stocks y sus cambios debidos a causas naturales y actividades humanas, ASSET),
4. cuentas de calidad (indican el stock de agua en términos de su calidad) y
5. valoración de los recursos hídricos. Esta Tesis se centra en las cuentas de activos, en lo sucesivo tablas ASSET.

Las tablas ASSET son las relacionadas con los balances de recursos hídricos y describen las existencias y sus cambios durante un período contable (mes, año, etc.). Se organizan en cuentas de flujos, según representen flujos de agua entre elementos del medio ambiente, o entre el medio ambiente y la economía, y las cuentas de activos, que miden las existencias al principio y final del período contable.

Los volúmenes de los activos geográficos a contabilizar son superficies de agua (EA.131, como las reservas artificiales, lagos, ríos, y nieve-hielo o glaciares), aguas subterráneas (EA.132) y humedad del suelo (EA.133). Estos volúmenes son resumidos en las existencias a la apertura y cierre del periodo contable (escala anual, mensual o período representativo como por ej. un año medio). A su vez, son resultado de considerar los siguientes niveles de información: incrementos, disminuciones y otros cambios en las existencias (o volúmenes). Luego, los incrementos son analizados desde las siguientes variables: retornos, precipitación, flujos de entrada (siendo este resultado de agregar los flujos procedentes de aguas arriba del territorio y los flujos procedentes de otros recursos del territorio). Las disminuciones en stocks, su volumen es detallado mediante: detracciones, evaporación o evapotranspiración y flujos de salida (considerando otro nivel de

desagregación se considerarían flujos aguas abajo del territorio, flujos hacia el mar y flujos a otros recursos del territorio).

Por lo tanto, para cada activo geográfico son analizados diez volúmenes: - cuatro de entrada en el sistema hídrico (retornos, precipitación, flujos procedentes de aguas arriba de territorio, flujos procedentes de otros recursos del territorio), - cinco de salida (detracciones, evaporación /Evapotranspiración, flujos aguas abajo del territorio, flujos hacia el mar, flujos a otros recursos del territorio), y finalmente - cambios en los volúmenes debidos a otras causas. Sin embargo cabe mencionar excepciones, que por definición no computan:

- la precipitación y la evapotranspiración en relación con el volumen de aguas subterráneas; y
- algunos flujos de salida (aguas abajo del territorio y hacia el mar) en el volumen de reservas artificiales y lagos.

También ciertos flujos serán nulos (0) en función de si se trata de un área correspondiente a cabecera o desembocadura. Ejemplos de ello, son los flujos de salida hacia el mar para el caso de una zona de cabecera; ó los flujos aguas abajo del territorio si se trata de una zona de desembocadura.

De esta forma se tiene una primera aproximación al volumen de datos y la complejidad en la generación de los mismos de forma consistente, para la correcta implementación de las tablas ASSET. Entre estas series temporales a considerar destaca la evapotranspiración real, que podría ser el resultado de un modelo hidrológico de simulación continua a escala de cuenca, ó como en esta Tesis, resultado de la aplicación de técnicas de teledetección.

4.2 Software empleado

Toda la información requerida para el desarrollo de la Tesis, ha sido integrada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) denominado GRASS. Se ha hecho uso de la versión GRASS 7.0.1, bajo licencia GPL (software libre).

Los algoritmos fueron programados usando código R, que se trata de un lenguaje de programación enfocado al análisis estadístico y muy empleado en investigación. R proporciona diferentes librerías para la interoperabilidad de fuentes de datos y software. Entre las librerías empleadas en esta Tesis destacan las siguientes:

- “rgrass7”: interface entre GRASS 7 y R. El paquete proporciona todos los comandos de GRASS para ser usados desde línea de comandos R.
- “rgdal”: proporciona acceso a las operaciones de transformación y proyección de la biblioteca PROJ.4. GDAL y proj.4 que son bibliotecas externas al paquete. Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) es una biblioteca traductor para los datos raster y vectoriales geoespaciales. PROJ 4 es una biblioteca para realizar conversiones entre las proyecciones cartográficas.
- “RODBC”: implementa los comandos para el acceso ODBC, funciones SQL; lectura, copia y manipulación de datos entre datos R (data frame) y tablas y conexiones DSN/host.
- “sqldf”: para operar datos R mediante consultas SQL.
- “gstat”: proporciona una amplia gama modelado geoestadístico univariable y multivariable, funciones de predicción y simulación (interpolación)

La herramienta Sorpresa Toolbox (García *et al.*, 2007), desarrollada en Tcl-tk bajo Linux fue empleada para el seguimiento y alerta temprana de sequías desde teledetección y-usada en esta Tesis para automatizar procesos y algoritmos relacionados con imágenes de satélite. En ella se utilizó la cadena de procesado y corrección de imágenes Landsat 5-TM, así como la carga de imágenes MODIS. Se trabajó de forma complementaria con la herramienta de re-proyección MODIS Tool (MRT, 2017), software diseñado para reproyectar imágenes MODIS. El software guarda los datos de MODIS en formatos compatibles con los paquetes de software existentes (binario y GeoTIFF).

5. ESTIMACIÓN DE ET_{real} A ESCALA INSTANTÁNEA Y SU VALIDACIÓN

5.1. Introducción

Este capítulo discute un método operativo para la estimación de evapotranspiración real (ET_{real}) desde teledetección, considerando una cantidad mínima de datos auxiliares. El método consiste una aproximación gráfica basada en la ecuación de Priestley-Taylor (PT), donde condiciones no limitantes del agua y de suelo seco son definidas por la temperatura superficial (LST) y un índice de vegetación (VI), ambos obtenidos mediante teledetección.

Utilizando mediciones de ET desde torres de flujo e imágenes Landsat 5-TM en un área regada del SE español, se realizó un análisis de sensibilidad de las distribuciones espaciales de ET_{real} para el período 2009-11 con respecto: (i) la forma (trapezoidal o rectangular) del espacio; y (ii) el valor del coeficiente PT, α .

El área de estudio corresponde al Campo de Cartagena bajo regadío. Aunque a todos los efectos se considera la totalidad de la escena Landsat 5-TM (199-34), en realidad la misma cubre aproximadamente la mitad de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

El presente capítulo presenta la metodología desarrollada y los principales resultados obtenidos, así como su discusión

5.2. Metodología

5.2.1. Algoritmo de estimación de ET_{real}

La metodología desarrollada, resumidamente, consiste en derivar desde teledetección (en este caso imágenes Landsat 5-TM), variables biofísicas para calcular flujos de energía como la radiación neta (R_n), el flujo de calor del suelo (G) y finalmente obtener ET_{real} . El Esquema 5.1 presenta un diagrama simplificado de la metodología implementada considerando imágenes Landsat 5-TM. Un total de 10 imágenes se han procesado para el período septiembre 2009-junio 2011, para el que se cuenta con información al suelo (verdad terreno o *ground truth*).

Variables Biofísicas

Las variables biofísicas empleadas en el algoritmo son obtenidas de las diferentes correcciones realizadas a las imágenes Landsat 5-TM, explicadas en detalle previamente, siguiendo las especificaciones de Chuvieco y Hantson (2010). Específicamente, las variables empleadas serán principalmente: albedo (α), emisividad (ϵ_s), LST y NDVI.

Interpretación del espacio LST versus NDVI

Como sugiere Kalma *et al.* (2008), se emplea la diferencia $DT = LST - T_{air}$ en lugar del valor absoluto de LST. La envolvente geométrica de los píxeles en el espacio DT -NDVI generalmente se considera que se ajusta a alguno de los siguientes tres casos (Esquema 5.2):

- Caso 1: forma triangular, como sugieren Jiang y Islam (2001) y Sandholt *et al.* (2002);
- Caso 2: forma trapezoidal (ej. García *et al.*, 2014; Long y Singh, 2012); y
- Caso 3: forma Rectangular (ej. Batra *et al.*, 2006).

Esquema 5.1 Esquema del proceso implementado.

Esquema 5.2. Representación conceptual de la relación DT - $NDVI$: (Caso 1) píxeles grises área triangular; (Caso 2) píxeles grises y amarillos área trapezoidal; y (Caso 3) rojos y azules representan área rectangular.

Desde el análisis de todas las imágenes procesadas, se concluye que el espacio DT - $NDVI$ estaba lejos de asemejarse a la forma triangular. Por lo tanto, la detección automática de los bordes secos y húmedos del espacio (o *end-members*) se realizó considerando sólo las formas trapezoidal y rectangular.

Estimación de ET_{real}

El método gráfico basado en la interpolación de la fórmula de Priestley-Taylor (Ecuación 2.2), fue empleado para evaluar la distribución espacio-temporal de ET_{real} . Se asumió que los píxeles del espacio DT - $NDVI$ presentan ET_{real} igual a:

$$\lambda ET = \varphi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G) \quad (5.1)$$

con φ dada por la ecuación:

$$\varphi = \varphi_{max} \frac{DT_{max} - DT_{obs}}{DT_{max} - DT_{min}} \quad (5.2)$$

donde $\varphi_{max} = \alpha$ (superficie completamente húmeda). De acuerdo con Jiang y Islam (2001) los valores máximos y mínimos de DT (DT_{max} y DT_{min}) correspondieron a $\varphi=0$ and $\varphi = \varphi_{max}$, respectivamente; y los valores de DT fueron asumidos ser linealmente proporcionales a la fracción evaporativa, EF . Desde el Esquema 2 para un píxel " i " con un DT_{obs} (observado), φ fue obtenida por la relación entre " l " ($DT_{max} - DT_{obs}$) y " n " ($DT_{max} - DT_{min}$). La Ecuación 5.2 implica que EF se iguala a:

$$EF = \varphi \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (5.3)$$

El siguiente paso fue la estimación de la energía disponible $A = R_n - G$, en el momento de paso del satélite. La radiación neta (R_n) en la superficie se deriva de la siguiente ecuación (Bisht *et al.*, 2005)

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot S + L_d - L_{up} \quad (5.4)$$

donde S es la radiación de onda corta incidente, y α el albedo de la superficie, mientras L_d y L_{up} son la radiación de onda corta incidente y emitida, respectivamente.

La radiación de onda corta $L_n = L_d - L_{up}$ fue calculada de acuerdo a los autores Xiong y Qiu (2014):

$$L_n = L_d - L_{up} = \sigma \varepsilon_s \varepsilon_a T_{air}^4 - \sigma \varepsilon_s LST \quad (5.5)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), T_{air} (Kelvin) es la temperatura del aire instantánea a la hora de paso del satélite, ε_s es la emisividad del suelo, y ε_a es la emisividad del aire, calculada a partir de la ecuación empírica propuesta por Swinbank (1963):

$$\varepsilon_a = 9.2 \cdot 10^{-6} T_{air}^2 \quad (5.6)$$

Flujo de Calor del Suelo

Un método habitual para estimar G como una fracción constante de la R_n ($\beta = G/R_n$) fue propuesto por Brutsaert (1998). En la presente Tesis, el valor de G es obtenido mediante el enfoque propuesto por Tanguy *et al.* (2012) considerando G proporcional a R_n ; $G = \beta R_n$, y siendo β una función lineal de EF , como sigue:

$$\beta = a + b \cdot EF \quad (5.7)$$

con $a = 0.23$ y $b = -0.22$.

5.2.2. Determinación Automática de los End-Members

Se llevó a cabo un filtrado previo de las imágenes, en base a un mapa usos de suelo se identificaron y filtraron áreas sin vegetación, coberturas artificiales y superficies de agua. Se coincide por tanto con la opinión de Timmermans *et al.* (2007) que indican que la inclusión del conocimiento de los usos del suelo podría minimizar el error entre valores observados y estimados.

En la presente Tesis se aplicó un método modificado del originalmente propuesto por Tang *et al.* (2010), para la identificación automática de los bordes húmedos y secos del espacio (o end-members). Los bordes fueron identificados mediante el filtrado de píxeles espurios, aplicando un método iterativo que minimiza el error cuadrático medio (Root Mean Square Error, $RMSE$). El algoritmo automático, sintetizado en el Esquema 5.3., extrae subconjuntos de píxeles máximos y mínimos para identificar los end-members.

En resumen, el algoritmo presenta los siguientes pasos: (i) El rango de NDVI se divide en M intervalos (siendo $M \leq 20$) y cada intervalo en N subintervalos (con $N \geq 5$); (ii) DT promedio (DT_{aver}) y desviación estándar (σ) de cada subintervalo son calculados como estado inicial. Entonces, se identifica el valor DT máximo y mínimo de cada subintervalo; (iii) El subintervalo es omitido si es menor que $DT_{aver} - \sigma$, recalculando el valor medio y σ ; (iv) DT_{aver} se define como el máximo o el mínimo DT para un intervalo dado; (v) Se calcula una regresión lineal entre de los valores DT y $NDVI$, evaluándose el $RMSE$. El intervalo se omitirá si DT es menor que DT_c (calculado con coeficientes $a'+b'$ obtenidos a partir de la regresión lineal) menos 2 veces $RMSE$; y (vi) Se obtiene un subconjunto de DT promedios (end-members máximos o mínimos) para cada intervalo.

Una vez identificados los subconjuntos de end-members, los bordes húmedos y secos de las formas trapezoidales y rectangulares fueron definidos mediante la siguiente metodología:

- Píxeles con una fracción de suelo dominante, $NDVI < 0.3$ fueron omitidos para definir el borde seco. En el caso de borde húmedo, solamente los píxeles con cobertura de vegetación completa ($NDVI > 0.5$) fueron considerados (García *et al.*, 2014), como se presenta en el Esquema 5.2.
- En el caso de formas trapezoidales, el borde seco es definido por ajuste lineal de los end-members máximos, el borde húmedo es considerado un valor constante igual a la media de end-members mínimos (borde húmedo y el borde seco 2 en el Esquema 5.2).
- Para las formas rectangulares, el borde seco es estimado como una constante igual al valor máximo del subconjunto máximo, con $NDVI > 0.3$. El borde seco es igualmente considerado como una constante igual al valor mínimo del subconjunto de end-members mínimos con $NDVI > 0.5$ (borde húmedo y seco 3 en el Esquema 5.2).

5.2.3. Análisis del ajuste

De acuerdo con las recomendaciones de diversos autores (Willmott, 1982; Anderson *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2005; Timmermans *et al.*, 2007), el error cuadrático medio ($RMSE$) (Ecuación 5.8), el error absoluto medio (Mean Absolute Error, MAE) (Ecuación 5.9) y el error porcentual absoluto medio (Mean Absolute Percent Error, $MAPE$) (Ecuación 5.10), se utilizaron para evaluar el ajuste del algoritmo durante su evaluación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \quad (5.8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - M_i| \quad (5.9)$$

$$MAPE = \frac{100}{\langle M \rangle} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - M_i| \right) \quad (5.10)$$

donde E_i y M_i son pares de estimaciones/predicciones del modelo y variables medidas/observadas respectivamente, mientras que n es el número de datos, y M es el valor medio de la variable observada.

Esquema 5.3 Esquema del algoritmo de extracción de end-members.

5.3. Resultados

5.3.1. Valores estimados vs. Verdad terreno

La Tabla 5.1 recoge el listado de las imágenes empleadas (10), estación y condiciones de riego para esas fechas. Mientras en la Tabla 5.2 se presentan los valores de $NDVI$ y fc evaluados a partir de las imágenes de satélite para las diez fechas seleccionadas, en los píxeles de las torres de medida de flujo de las Parcelas A (*Farm A*) y B (*Farm B*), respectivamente. Valores más altos de $NDVI$ se

observaron en la Parcela B en comparación con la A, un resultado lógico teniendo en cuenta que el LAI de la Parcela B ($LAI \approx 5$) es mayor al correspondiente a la Parcela A ($LAI \approx 3$). Si se considera el valor medio para toda la superficie de la parcela, el rango de variación de $NDVI$ oscila desde 0.48 a 0.57 en la Parcela B, y de 0.30 a 0.50 en la Parcela A (Tabla 5.2).

Tabla 5.1. Detalles de las imágenes usadas y condiciones de riego.

Fecha	Estación	Condiciones de Riego	
		Farm A	Farm B
		wfv ($m^3 \cdot m^{-3}$)	wfv ($m^3 \cdot m^{-3}$)
		Mean $\pm$ Std	Mean $\pm$ Std
10/09/2009	Verano	0.361 ± 0.013	0.453 ± 0.002
08/05/2010	Primavera	0.440 ± 0.036	0.385 ± 0.002
24/05/2010	Primavera	0.432 ± 0.037	0.390 ± 0.003
11/07/2010	Verano	0.400 ± 0.021	0.425 ± 0.002
27/07/2010	Verano	0.427 ± 0.023	0.465 ± 0.002
29/09/2010	Otoño	0.450 ± 0.036	0.477 ± 0.001
16/11/2010	Otoño	0.474 ± 0.013	0.454 ± 0.001
02/12/2010	Otoño	0.447 ± 0.037	0.471 ± 0.002
04/02/2011	Invierno	0.436 ± 0.054	0.463 ± 0.002
28/06/2011	Verano	0.321 ± 0.022	0.307 ± 0.019

wfv: water fraction by volume ($m^3 \cdot m^{-3}$).

Tabla 5.2. Valores de $NDVI$ and fc evaluados desde las imágenes de satélite para el pixel de la torre de medida de flujo en las Parcelas A and B (F), respectivamente.

FECHA	F	$NDVI$	fc
10/09/2009	A	0.34	0.24
	B	0.54	1.00
08/05/2010	A	0.44	0.64
	B	0.60	1.00
24/05/2010	A	0.46	0.74
	B	0.54	1.00
11/07/2010	A	0.41	0.48
	B	0.56	1.00
27/07/2010	A	0.43	0.53
	B	0.63	1.00
29/09/2010	A	0.48	0.74
	B	0.59	1.00
16/11/2010	A	0.42	0.55
	B	0.55	1.00
02/12/2010	A	0.54	1.00
	B	0.61	1.00
04/02/2011	A	0.47	0.82
	B	0.52	1.00
28/06/2011	A	0.48	0.89
	B	0.62	1.00

La comparación entre los valores estimados y observados de LST y R_n (o *verdad terreno*), al momento de paso del satélite, indicó que el método de estimación proporcionó resultados precisos (Figura 5.1 a y b). De acuerdo con Malbêteau *et al.* (2017), la ligera subestimación de los valores de LST podría justificarse por el procedimiento aplicado para la estimación de la emisividad a partir de $NDVI$ (Figura 5.1a). El valor de R_n que es la variable básica necesaria para la cuantificación de ET_{real} (Ecuación 5.1), se estimó con valor $MAPE$ de 15 % (Figura 5.1b), resultado considerado bastante satisfactorio.

Figura 5.1. Comparación entre variables estimadas vs verdad terreno: (a) LST ; y (b) R_n .

5.3.2. Sensibilidad de EF al valor de α

Con el fin de identificar el valor α (o coeficiente PT) más adecuado para el área de estudio, se buscó el valor de α que minimizara el RMSE entre los valores observados y estimados de EF. Ello fue realizado teniendo en consideración la sensibilidad a DT_{min} y DT_{max} .

Los bordes fueron identificados variando α en el rango [0.7, 1.3], con un incremento 0.1 para ambas formas trapezoidal (TR) y rectangular (RC). Los resultados del análisis se presentan en la Figura 5.2. Los resultados fueron similares para ambas parcelas, indicando que el RMSE se redujo al mínimo para α cercano a 1.1 en el caso de la forma de TR, y a 1.0 para la forma RC.

En la Figura 5.2a, los bordes húmedo y seco se estiman para todo el rango de NDVI (todos los valores DT_{min} y DT_{max}). En la Figura 5.2b, se consideran los valores de DT_{min} para $NDVI > 0.5$ (en el Esquema 5.2 corresponde al borde húmedo 2 de la forma TR o borde húmedo 3 de la forma RC), y todo el rango de NDVI para la definición del borde seco (se consideran todos los valores DT_{max}). En la Figura 5.2c, se omiten los valores DT_{max} con fracción dominante de suelo, $NDVI < 0.3$ (en el Esquema 5.2, corresponde al borde seco 2 de la forma TR y al borde seco 3 de la forma RC), y el borde húmedo a través de todo el rango de NDVI (se consideran todos los valores de DT_{min}). Finalmente, la Figura 5.2d representa la situación cuando son consideradas todas las restricciones definidas en el Esquema 5.2.

Teniendo en cuenta todos los valores del NDVI, los errores más pequeños se corresponden a valores de α cercanos a 1.1-1.2. La Figura 5.2c muestra una pequeña disminución en comparación con la Figura 5.2a, con errores más pequeños con valores de α próximos a 1-1.1. Sin embargo, la más relevante restricción está relacionada con el borde húmedo (Figura 5.2b), mostrando los mínimos errores con valores de α cercanos a 1. Resumidamente, se concluye que los mejores resultados (mínimos RMSE) se obtuvieron para α próximo a 1.1 en el caso de la forma TR, y para $\alpha = 1.0$ para la forma RC (Figura 5.2d). Por tanto, se ha considerado este último enfoque sobre el resto porque se obtiene el mínimo error. Además, factores tales como la resolución espacial y el pequeño tamaño de las parcelas induce a buscar mayor fiabilidad en los resultados omitiendo píxeles contaminados por otros usos del suelo.

Figura 5.2. Sensibilidad de EF a la variación de α en un rango [0.7, 1.3] con incremento de 0.1 para la forma trapezoidal (TR) y la forma rectangular (RC). Los puntos y triángulos negros representan MAPE y RMSE, respectivamente, en los siguientes casos: (a) a través de todo el rango de valores de NDVI; (b) considerando píxeles con $NDVI > 0.5$ para el borde húmedo (borde húmedo 2 o 3 en Esquema 5.2) y toda la variación de NDVI para el borde seco; (c) el rango completo de NDVI para borde húmedo y se omiten los píxeles con fracción dominante de suelo ($NDVI < 0.3$) para el borde seco (borde seco 2 o 3 en Esquema 5.2); y (d) bordes húmedos and bordes secos (2 o 3 in Esquema 5.2) de acuerdo con el forma estudiada.

Los diagramas de caja (o boxplots) de EF estimada con $\alpha = 1$ y $\alpha = 1.3$ indican en el caso de formas trapezoidal y rectangular que el valor medio de EF para ambas formas fue bastante próximo (Figura 5.3). La razón de la presencia de valores atípicos, aun habiendo filtrado nubes y cirrus, puede ser debida a la presencia de sombras que podrían producir valores anómalos de reflectancias. Al comparar los diagramas de caja para ambas formas del espacio, se puede observar el menor número de valores atípicos para la forma rectangular (Figura 5.3 b, d, f, y h) en comparación con la trapezoidal (Figura 5.3 a, c, e, y g)

Figura 5.3. Diagramas de cajas de EF considerando $\alpha = 1.3$ and $\alpha = 1$, para las fechas 11/07/2010, 29/09/2010, 16/11/2010 y 28/06/2011: (a, c, e, g) forma trapezoidal (TR); y (b, d, f, h) forma rectangular (RC).

5.3.3. Sensibilidad de EF a la forma del espacio

Interesa evaluar la sensibilidad de la distribución espacial de EF a la forma seleccionada del espacio LST-IV. La Tabla 5.3 presenta de forma comparativa los bordes identificados por el algoritmo desarrollado para las formas trapezoidal y rectangular, considerando DT y LST para la definición de los bordes. Se identifica una disminución en la forma de aproximadamente 20 °C (entre LST y DT), especialmente en los meses de verano, debido al efecto de la temperatura máxima en estos meses. Sin embargo, para los meses de invierno la disminución es menos relevante.

Tabla 5.3. Borde seco y húmedo para formas trapezoidal (TR) y rectangular (RC), donde a y b son coeficientes de regresión del borde seco para LST y DT respectivamente, y a' es el coeficiente de regresión para LST y DT del borde húmedo.

FECHA	Forma	Borde Seco (Dry Edge)				Borde Húmedo (Wet Edge)	
		a LST	b LST	a DT	b DT	a' LST	a' DT
10/09/2009	TR	47.7	-11.2	23.46	-15.9	15.24	-14.6
	RC	44.45		18.6		15.24	-14.6
08/05/2010	TR	42.6	-16.0	23.3	-11.9	10.4	-15.1
	RC	38.2		20.7		10.4	-15.1
24/05/2010	TR	48.2	-20.5	28.5	-22.9	18	-5.9
	RC	45.7		23.9		18	-5.9
11/07/2010	TR	51.3	-17.5	24.2	-17.9	27.3	-5.3
	RC	47		19.8		27.3	-5.3
27/07/2010	TR	51.3	-17.5	21	-17.5	15.8	-12.6
	RC	44.4		16.9		15.8	-12.6
29/09/2010	TR	38.1	-11.2	23.3	-22.7	11.5	-9.7
	RC	35.2		17.6		11.5	-9.7
16/11/2010	TR	40.3	-29.0	29.3	-33.2	9.7	-6.0
	RC	23.8		21.6		9.7	-6.0
02/12/2010	TR	41.6	-38.6	25.8	-34.1	4.1	-8.6
	RC	24.6		16.5		4.1	-8.6
04/02/2011	TR	41.5	-38.6	36.4	-47.7	7.8	-6.6
	RC	30.8		22.2		7.8	-6.6
28/06/2011	TR	60.1	-17.2	35.0	-22.3	29.3	-7.5
	RC	54.94		28.12		29.3	-7.5

Resulta de interés conocer la influencia de T_{air} en los resultados, para ello los errores se cuantificaron para cada método (Tabla 5.4) teniendo en cuenta LST y DT , respectivamente. Tomando como referencia $\alpha = 1.27$, se identifica una reducción de aproximadamente 20 % en el valor de los errores al incluir T_{air} en los cálculos (al considerar DT en lugar de LST). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Kalma *et al.* (2008) en sus investigaciones.

Tabla 5.4. Influencia de T_{air} en el método del triángulo para $\alpha = 1.27$.

LST						DT			
	F	R ²	RMSE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MAPE %	R ²	RMSE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	MAPE %
TR	A	0.81	84.87	70.18	44.27	0.80	45.26	36.65	19.82
	B	0.91	91.49	83.05	51.27	0.85	58.98	53.37	29.90
RC	A	0.82	86.99	77.15	46.47	0.80	54.19	44.18	22.98
	B	0.91	103.13	94.00	54.18	0.85	78.52	66.45	33.79

Analizando los bordes definidos mediante DT , sólo una imagen tiene forma similar para ambas configuraciones, pues la forma trapezoidal posee una pendiente del 10 % asemejándose a una forma rectangular. Las otras imágenes presentan pendientes cercanas al 15-35 %, con formas próximas a un trapecio (triángulo degenerado). Finalmente, sólo una imagen puede ser considerada como la forma más triangular con una pendiente de aproximadamente 50 %. No obstante, en la mayoría de los casos se observan degenerados triángulos, tal como fue definido por Long y Singh (2013).

Como se ha señalado anteriormente, el considerar un valor de α cercano 1 arrojó mejores resultados. Partiendo de ese valor, se analizaron los histogramas de EF representados en la Figura 5.4 para las fechas 11/07/2010, 29/09/2010, 16/11/2010 y 28/06/2011. Se observa que las frecuencias relativas se presentan más agrupadas (más concentradas) para la forma trapezoidal en comparación con la forma rectangular. Por lo tanto, se aprecia que la forma rectangular (Figura 5.4 b, d, f, y h) presenta un coeficiente de variación (CV) mayor en comparación con la trapezoidal (Figura 5.4 a, c, e, y g).

Luego, si se consideran las distribuciones espaciales de EF , estimadas desde ambas formas del espacio (TR y RC), se pueden identificar las diferencias para el área de estudio que corresponde al área regada del Campo de Cartagena. Las diferencias relativas entre las distribuciones espaciales de EF estimado para la forma trapezoidal y rectangular fueron calculadas como: $(EF_{TR}-EF_{RC})/EF_{TR}$, y se representan en la Figura 5.5. Las diferencias relativas no fueron mayores de un 20 % (Figura 5.5).

Estas diferencias pueden corresponder a un área o tener un carácter más puntual, y se pueden justificar en los siguientes hechos:

- Las diferencias puntuales en el espacio se localizan en los extremos de las parcelas, lugares donde bien el filtrado por usos del suelo o errores en la corrección geométrica de la imagen repercute en que se introduzcan valores de reflectancias contaminados por otros usos del suelo diferente a vegetación; y
- Las diferencias areales, dado que el patrón no se repite en las cuatro imágenes sino que presenta un carácter eventual, puede deberse a parcelas de cultivo no desarrollado, con influencia marcada de reflectancias del suelo, o diferente a regadío.

Figura 5.4. Histogramas de frecuencia de EF para $\alpha = 1$ y las dos formas, en las fechas 11/07/2010, 29/09/2010, 16/11/2010 y 28/06/2011: (a, c, e, g) forma trapezoidal (TR); y (b, d, f, h) forma rectangular (RC).

Figura 5.5. Distribuciones espaciales de diferencias relativas de EF para las formas trapezoidal y rectangular, para las fechas: (a) 11/07/2010; (b) 29/09/2010; (c) 16/11/2010; and (d) 28/06/2011. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Zona 30N.

5.3.4. Validación de Resultados de ET_{real}

Por último, se compararon los valores de ET_{real} estimados para $\alpha = 1.0$ y $\alpha = 1.3$, con los valores de ET_{real} observados desde torres de medidas de flujos (Tabla 5.5). Considerando el valor de $\alpha = 1.3$ se observa cierta sobreestimación sistemática de ET_{real} (Figura 5.6 a y b). Mientras $\alpha = 1$ proporciona un mejor ajuste de ET_{real} (Figura 5.6 c y d). Evaluando los resultados de Tabla 5.5., se destaca que la forma trapezoidal proporciona errores más pequeños (MAE , $MAPE$ y $RMSE$) en comparación con la forma rectangular, así como que ET_{real} estimada asumiendo la forma trapezoidal fue menos sensible a la selección de los bordes del espacio (end-members).

Figura 5.6. Relación entre valores observados y estimados de ET_{real} , para $\alpha = 1.3$ (formas: (a) trapezoidal y (b) rectangular); and para $\alpha = 1$ (formas: (c) trapezoidal y (d) rectangular).

Tabla 5.5. Errores en la evaluación de ET_{real} desde imágenes satélite: error absoluto (AE), error porcentual absoluto (APE), MAE, MAPE y RMSE. TR = forma trapezoidal, RC = forma rectangular.

FECHA	$\alpha = 1.3$								$\alpha = 1$					
	ET_{real} W/m ²		ET_{real} W/m ²		AE W/m ²		APE %		ET_{real} W/m ²		AE W/m ²		APE %	
	F	Tower	TR	RC	TR	RC	TR	RC	TR	RC	TR	RC	TR	RC
10/09/09	A	175.7	171.2	164.2	4.5	11.6	2.6	6.6	127.8	122.6	48	53.1	27.3	30.2
	B	197.0	224.8	243.1	27.7	46.1	14.1	23.4	167.8	141.2	29.3	30	14.9	17.5
08/05/10	A	171.2	173	188.2	1.9	17	1.1	9.9	130	236.6	41.1	12.2	24	5.4
	B	118.0	171.8	202.5	53.8	84.4	45.6	71.5	129.2	238.4	11.2	27.8	9.5	10.4
24/05/10	A	224.4	281.7	318.8	57.3	94.5	25.5	42.1	209.7	214.2	14.7	3.7	6.6	1.8
	B	238.0	290.9	358.1	53	120.1	22.3	50.5	216.6	199	21.4	28.6	9	16.8
11/07/10	A	266.2	305.1	321.6	38.9	55.4	14.6	20.8	226.5	103.2	39.7	54.4	14.9	34.5
	B	232.0	322	354.2	90	122.2	38.8	52.7	238.9	87.6	6.9	28.6	3	24.6
27/07/10	A	210.4	282.9	288.3	72.5	77.9	34.4	37	210.2	94.2	0.2	12.4	0.1	11.6
	B	222.0	284	321	62	98.9	27.9	44.6	211	217.9	11	2.3	5	1.1
29/09/10	A	170.4	256.6	269.8	86.2	99.4	50.6	58.4	189.5	181.1	19.2	15.9	11.2	8.1
	B	215.8	276.2	306	60.4	90.2	28	41.8	203.9	151.8	11.8	33.8	5.5	28.6
16/11/10	A	157.6	130.5	139.3	27.1	18.2	17.2	11.6	96.8	265.1	60.8	27.1	38.6	11.4
	B	155.4	120	135.1	35.4	20.3	22.8	13.1	89.2	262.1	66.2	30.1	42.6	13
02/12/10	A	116.2	99.1	117.5	17	1.4	14.7	1.2	74.1	237.8	42	15.8	36.2	7.1
	B	123.7	81	107.3	42.7	16.4	34.5	13.3	60.8	225.2	62.9	9.4	50.8	4.4
04/02/11	A	106.7	115.7	126.6	9	20	8.5	18.7	86.3	100.1	20.4	55.3	19.1	35.6
	B	110.1	102.9	118.1	7.2	8	6.5	7.3	77	80	33.1	43.7	30.1	35.3

28/06/11	A	220.3	279.1	293.3	58.8	73.1	26.7	33.2	207.6	88	12.6	22.1	5.7	20.1			
	B	251.0	324.4	362.2	73.3	111.2	29.2	44.3	240.7	268	10.3	17	4.1	6.8			
MAE	A					37.3	46.8	19.6	24					29.8	25.3	18.3	15.4
MAPE	B					50.6	71.8	27	36.2					26.4	27	17.4	17
RMSE	A	47		58.7					34.9	30.7							
(W/m²)	B	55.3		83.4					33.6	30.2							

 Tabla 5.6. Influencia de α en la selección de los valores de EF

		$\alpha = 1.3$				$\alpha = 1$			
	F	μ	σ	Max.	Min.	μ	σ	Max.	Min.
TR	A	0.57	0.10	0.73	0.39	0.44	0.07	0.56	0.30
	B	0.55	0.11	0.74	0.37	0.43	0.08	0.57	0.29
RC	A	0.60	0.10	0.76	0.42	0.46	0.07	0.59	0.32
	B	0.62	0.11	0.80	0.43	0.48	0.08	0.62	0.33

Si se considera la eliminación de dos días de invierno con valores de EF observada (EF_{obs}) demasiado altos con respecto a los valores restantes - debido a errores experimentales cuando la evaporación y la energía disponible fueron bajos -, los valores estimados de EF (EF_{est}) demuestran un buen ajuste con respecto los observados (Figura 5.7). Considerando $\alpha = 1$, para la Parcela A los valores medios para EF_{est} y EF_{obs} fueron 0.46 y 0.45, respectivamente; mientras que para la Parcela B, fueron 0.49 y 0.44, respectivamente, con un RMSE de un 15 % en ambos casos.

 Figura 5.7. Contraste EF observada vs estimada para las dos parcelas.

5.4. Discusión de los resultados

5.4.1. Diferencias inducidas por la forma del espacio

En los métodos basados en el análisis del espacio $LST-VI$, la selección de la forma juega un papel crítico en la definición de la posición de los end-members, y por lo tanto define el valor resultante de φ y, en consecuencia de EF y ET_{real} (Long y Singh, 2013). Por esta razón, el algoritmo desarrollado en la presente Tesis utiliza un método estadístico basado en un proceso iterativo para evitar una interpretación errónea de los valores máximos y mínimos del espacio (eliminando subjetividades). Además, trata de corregir la sobreestimación de DT_{min} o DT_{max} considerando los valores medios en cada uno de los intervalos de $NDVI$, tal y como fue explicado en Esquema 5.3 previo. Sin embargo, es necesario tener en cuenta las incertidumbres asociadas a DT debidas a diferentes fuentes de error, entre ellas: (i) sesgo en LST (Wang *et al.*, 2007), debido a la falta de corrección por la elevación (Malbêteau *et al.*, 2017), o por una componente de ruido (Hengl *et al.*, 2012); (ii) errores en la interpolación de datos de temperatura (McVicar *et al.*, 2002; Cristóbal *et al.*, 2008; Cherif *et al.*, 2015) y

la distribución de sus residuos (Hengl *et al.*, 2012); (iii) debido al método de evaluación de la temperatura instantánea; y (iv) sesgo en DT por causa de la extensión inapropiada de la imagen y su resolución espacial (Long y Singh, 2013; García *et al.*, 2014).

Sin embargo, como se ha demostrado previamente (apartado 5.2.3), las diferencias obtenidas en el caso de estudio son inducidas principalmente a la selección del borde seco (borde seco 2 o 3 en el Esquema 5.2), que se considera paralelo al eje NDVI en el caso de la forma rectangular, y decrece con el valor de NDVI en el caso de la forma trapezoidal. Si bien todos los patrones espaciales son triángulos degenerados, como indican Long y Singh (2013), se identifican las siguientes diferencias:

- menor número de valores atípicos con la forma rectangular, ya que esta forma permite incluir dentro de sus límites un mayor número de píxeles "válidos" que la forma trapezoidal; y
- por la misma razón, el coeficiente de variación - considerando sólo los píxeles válidos -, fue superior en el caso de la forma rectangular.

Tales diferencias debidas a la forma, no parecen afectar en gran medida a los valores resultantes de EF y ET_{real} . Los valores obtenidos de $RMSE$ y MAE fueron similares para ambas formas, aunque se aprecia que la forma trapezoidal se adapta mejor en el caso de la Parcela A (Tabla 5.5), y por lo tanto podría ser preferible. Los autores Long y Singh (2013) también encontraron que las dos formas proporcionaban similar precisión, aconsejando la forma rectangular cuando no hubiera claros indicios de que el espacio presentara una tendencia trapezoidal. Otros autores como Jiang *et al.* (2009) sugieren que la forma rectangular podría ser más apropiada para grandes áreas y resoluciones espaciales gruesas.

5.4.2. Incertidumbres debidas a R_n

Acorde a Nemani *et al.* (2003) la temperatura y la influencia de la radiación son más importantes que la escasez hídrica, siendo en realidad la energía disponible la que controla la evaporación superficial (Malbêteau *et al.*, 2017). En el balance de R_n , tres variables tienen importante influencia: el albedo, emisividad, y LST . Por esta razón, es importante destacar que el sesgo en la estimación de R_n puede ser debido a: (i) LST , y por lo tanto a la emisividad (Bisht *et al.*, 2005; Malbêteau *et al.*, 2017); y (ii) el uso de reflectancia superficial en lugar de calcular el albedo de conforme a Mattar *et al.* (2014). En todo caso, la resolución espacial de LST (120 m) controla la exactitud de este método y, por tanto, los errores son balanceados, obteniéndose una buena correlación entre datos observados y estimados de R_n , y en consecuencia de la energía disponible A (Figura 5.8).

Figura 5.8. Relación entre valores observados y estimados del término A (energía disponible) para la forma trapezoidal.

5.4.3. Incertidumbres debidas al valor de α

El valor elegido para el parámetro α (o coeficiente PT) presenta una importante influencia en el valor de EF , y por lo tanto en el valor de ET_{real} . De acuerdo con los resultados obtenidos en esta Tesis, el valor de $\alpha = 1$ arrojó los errores más bajos en la estimación EF al contrastarse con datos observados, y por lo tanto proporcionó las mejores estimaciones de la distribución espacial de ET_{real} . Ello puede explicarse en el hecho de que la mayor parte del borde húmedo del espacio $LST-NDVI$ corresponde a cultivos de regadío, que en la zona de estudio (Campo de Cartagena) corresponde a cítricos y cultivos hortícolas con una resistencia a la transferencia de vapor de agua (r_s) bastante alta. Otros autores como De Bruin (1983), demostraron claramente que el control de la evaporación en superficies con vegetación depende fuertemente de las características fisiológicas de la vegetación, en particular del valor de la resistencia superficial, r_s . Este autor demostró que el valor de α en el momento del paso del satélite (10:00-11:00 am) está cercano a 1 cuando r_s corresponde al rango de 150 a 250 s/m, siendo estos valores del orden de magnitud de r_s para cítricos - similar a los cultivos que crecen en el área de estudio - (Villalobos *et al.*, 2009).

Obviamente, una diferencia de aproximadamente el 25 % en el valor de α resulta en un error de magnitud similar en la estimación cuantitativa de la EF y ET_{real} (Figura 5.6 a-d). Tal error podría poner en duda la solidez global del método, a menos que una estimación razonable de α pueda ser llevada a cabo para el área en estudio. Una solución podría ser recopilar información, por ejemplo del tipo de vegetación o cultivos que más abunda en el área de estudio (a partir de mapas de uso del suelo), y de su resistencia superficial media. A partir del conocimiento de los r_s promedios, un valor medio de α podría estimado como propone De Bruin (1983), y utilizado como un valor más realista del coeficiente PT para la estimación de ET_{real} .

5.4.4. Exactitud global del método

Los resultados de la validación fueron satisfactorios, con un valor medio $RMSE \sim 30 \text{ W/m}^2$ para las dos formas seleccionadas del espacio $LST-NDVI$. La precisión global del método desarrollado en la presente Tesis es comparable a la obtenida en otros estudios recientes, como los de García *et al.* (2014) o Long y Singh (2012 y 2013). En particular, los últimos autores destacaron que el error cometido en la selección de los end-members podría ser alta debido a los outliers (altos valores atípicos). En el método desarrollado en la Tesis, se ha tratado de minimizar el número de valores atípicos (outliers) a través de diferentes pretratamientos:

- En el primer paso, filtrando los tipos de uso del suelo, eliminando de esta manera posibles conflictos entre usos del suelo y valores de EF como comenta Timmermans *et al.* (2007), y el posicionamiento erróneo de los bordes húmedo y seco.
- En un segundo paso, teniendo en cuenta que el borde seco se determinó considerando todos los píxeles con $NDVI > 0.3$, y el borde húmedo mediante los píxeles con $NDVI > 0.5$, considerando las recomendaciones de García *et al.* (2014).

Además, otros dos elementos podrían haber influido positivamente en la precisión global del método:

- La determinación de G , por medio de una formulación sólida en función de EF , que incluye implícitamente el efecto de la humedad del suelo y propiedades de suelo sobre el flujo de calor del suelo, considerando la formulación planteada por Tanguy *et al.* (2012).
- La consideración de la variación de la temperatura del aire al momento del paso del satélite considerando temperatura instantánea (Gillies y Carlson, 1995; Moran *et al.*, 1994), y la corrección de la temperatura del aire mediante el empleo de DT (Kalma *et al.*, 2008), reduciendo los errores in 15–30 % como se demuestra en la Tabla 5.4. previa.

6. ESTIMACIÓN DE ET_{REAL} A ESCALA MENSUAL Y SU VALIDACIÓN

6.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla una metodología para la estimación de evapotranspiración real (ET_{real}) a escala mensual a partir de teledetección. El método empleado, idóneo para aproximaciones globales a escala de cuenca y de gran aplicación para el cálculo de series históricas, se empleó un método basado en un ajuste de regresión no lineal, el cual emplea el IV Enhanced Vegetation Index (EVI) provisto por el sensor MODIS a bordo de la plataforma TERRA, datos de temperatura del aire para la estimación de la ET_o , y observaciones de ET_{real} , proporcionando estimaciones mensuales y a escala de cuenca. Los resultados fueron validados con datos al suelo desde torres de medida de flujos, mostrando un error inferior a un 15 % y un RMSE inferior a 0.5 mm/d (mensual).

Como una de las aplicaciones de las series temporales de ET_{real} mensual estimadas, se presenta una herramienta que combina información hidrológica y meteorológica necesaria para la implementación de los balances hídricos considerados en el marco del Sistema de Contabilidad Hídrica (System of Environmental - Economic Accounting for Water SEEA-Water, 2013) a escala de cuenca, propuesto por Naciones Unidas. Como cuenca de estudio se considera la Cuenca del Río Segura (SRB).

Se desarrolla una metodología innovadora para la incorporación de datos hidrológicos agregados desde diferentes redes de medida, e información meteorológica como precipitación y ET_{real} estimada desde teledetección. Si bien la aplicación del sistema SEEA-Water se llevó a cabo en toda la Cuenca del Río Segura (SRB), como ejemplo de aplicación se presenta la cuenca cabecera del Río Segura, donde se localizan y generan las reservas más importantes de la SRB.

6.2. Metodología

6.2.1. Sistema de Contabilidad Hídrico SEEA-Water

La gestión integrada de los recursos hídricos (IWRM) se basa en el concepto del agua como parte integrante del ecosistema, como recurso natural y como activo social y económico, cuya cantidad y calidad determinan la naturaleza de su utilización (SEEA-Water, 2013). De conformidad con ello, se necesita una gestión sostenible de los recursos hídricos para asegurar que las futuras generaciones tengan agua suficiente y que el agua satisfaga los altos requerimientos de calidad.

El Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el agua (SEEA-Water) es un útil instrumento que apoya la gestión integrada de los recursos hídricos (IWRM por sus siglas en inglés) al proporcionar el sistema de información necesario para aportar conocimientos a los procesos de toma de decisiones.

El marco del SEEA-Water es resultado de una ampliación del Manual de contabilidad nacional: ambiental y económica integrada (SCAE-2003, Naciones Unidas, 2003), en donde se describe la interacción entre la economía y el medio ambiente y se consideran los recursos naturales y el medio ambiente en su conjunto. Ambos, SCAE-2003 y SEEA-Water, utilizan como marco de referencia básico el Sistema de Cuentas Nacionales 2008 (SCN 2008, Naciones Unidas, 2008) que es el sistema estándar para la compilación de estadísticas económicas y la derivación de indicadores económicos, como es el producto interno bruto (PIB).

SEEA-Water tiene como objetivo estandarizar conceptos y métodos de la contabilidad del agua y proporcionar un marco conceptual para organizar la información sobre cuestiones económicas e hidrológicas y posibilita un análisis sistemático de la contribución del agua a la economía y de los efectos de la economía sobre los recursos hídricos (SEEA-Water, 2013), por tanto informa sobre:

- a) Stocks y flujos de recursos hídricos en el medio ambiente;

- b) Presiones impuestas al medio ambiente por la economía en lo concerniente a la extracción del agua y a las emisiones agregadas a las aguas residuales y evacuadas hacia el medio ambiente, o eliminadas de las aguas residuales;
- c) Suministro de agua y su utilización como insumo en los procesos de producción y por los hogares;
- d) Reutilización del agua en la economía;
- e) Costos de captación, depuración, distribución y tratamiento del agua, así como los cargos al usuario por los servicios;
- f) Financiación de esos costos, es decir, determinación de quien sufraga los servicios de suministro de agua y saneamiento;
- g) Pago por permisos de acceso para extraer agua o para utilizarla como sumidero en la descarga de aguas residuales;
- h) Stocks de recursos hídricos disponibles, e inversiones en infraestructuras hidráulicas efectuadas durante el periodo contable.

El marco del SEEA-Water se presenta sintéticamente en el Esquema 6.1, el cual incluye la economía, el sistema de recursos hídricos y las interacciones entre ambas esferas. La economía y el sistema de aguas interiores de un territorio, se representan en el grafico como dos recuadros separados. El sistema de aguas interiores de un territorio se compone de todos los recursos hídricos de ese territorio (aguas superficiales, aguas subterráneas y agua del suelo), y los flujos naturales entre ellos. La economía de un territorio abarca los usuarios que extraen agua con fines de producción y consumo e instalan infraestructuras para almacenamiento, distribución, tratamiento y descarga de agua. Se incluyen los principales agentes económicos relacionados con el agua. En particular, figuran los siguientes:

- a) La industria involucrada principalmente en la captación, el tratamiento y la distribución de agua a hogares e industrias y al resto del mundo;
- b) La industria relacionada con la captación, el tratamiento y la descarga de aguas de desecho (evacuación de aguas residuales);
- c) Otras industrias, que utilizan agua como insumo en sus procesos de producción; y
- d) Los hogares, donde se usa agua para satisfacer necesidades.

El sistema SEEA-Water se divide en:

- Cuentas de suministro y uso físico, y cuentas de emisiones: congregan en un marco común datos hidrológicos sobre el volumen de agua utilizada y devuelta al medio ambiente por la economía y sobre la cantidad de contaminantes agregados al agua.
- Cuentas híbridas y económicas: armonizan la información sobre hechos físicos registrados en los cuadros de suministro y usos físicos, con los cuadros de datos monetarios del SCN 2008.
- Cuentas de calidad: caracterizan los stocks de agua en lo concerniente a sus aspectos cualitativos
- Valoración de los recursos hídricos. abarca la valoración del agua y los recursos hídricos
- Cuentas de activos: comprenden cuentas de stocks de recursos hídricos medidos mayormente en términos físicos.

El proyecto europeo denominado *Accounting System for the SEgura river and Transfers* (ASSET, 2015) ha presentado como parte de sus objetivos la evaluación y estandarización de información hidrometeorológica de la Cuenca del Río Segura (SRB), incluyendo las transferencias externas de agua aplicando sistema SEEA-Water descrito previamente. Este instrumento se ha empleado para estandarizar conceptos de contabilidad relacionados con el agua, proporcionando un marco conceptual necesario para organizar la información económica e hidrológica. Resultados del

proyecto ASSET han sido incluidos en la Guía nro. 34 de la Unión Europea (EU, 2015) para la aplicación de los balances hídricos, para soportar la implementación de la Directiva Marco de Aguas.

Esquema 6.1. Principales flujos dentro del sistema de aguas interiores y de la economía.

El objetivo último del proyecto ASSET fue analizar y demostrar el potencial de la gestión de los recursos hídricos, medidas económicas y tecnológicas para disminuir la escasez de agua de esta área propensa a la sequía. Para ello se testearon metodologías innovadoras que permitieran aumentar la precisión de las cuentas del agua y cierre de balance hídricos. Esta Tesis se centrará en los balances de los recursos hídricos que componen el sistema, los activos de aguas superficiales y subterráneas. Los principales insumos naturales de agua para esos recursos son los provenientes de la precipitación y otros flujos de entrada (afluentes) desde otros territorios y desde otros sistemas recursos hídricos dentro del mismo territorio. Los principales flujos naturales que reducen los activos de agua son la evapotranspiración y los flujos de salida (efluentes) hacia otros sistemas

recursos hídricos dentro del mismo territorio y hacia sistemas de recursos hídricos fuera del territorio. Las actividades humanas influyen en los activos de agua debido a la extracción y a los retornos de agua.

6.2.2. Barreras en la aplicación de SEEA-Water: la agregación espacial y temporal

La evaluación de los recursos hídricos aplicando la metodología SEEA-Water suele ser compleja, debido fundamentalmente a que los datos a menudo no están disponibles o es demasiado costosa su recopilación (Pedro-Monzónis *et al.*, 2016a). Considerando a la cuenca y a sus sistemas de explotación como escala espacial de análisis, no toda la información requerida se encuentra disponible. Por ejemplo la información económica suele presentarse a escala administrativa o regional. Luego, la desagregación temporal de la información económica tampoco suele ser la deseada. La escala temporal de trabajo para el caso de los balances hídricos suele ser mensual y anual.

Por esta razón en el proyecto ASSET, la aplicación de SEEA-Water en la Cuenca del Río Segura se desarrolló con distintos niveles de agregación espacial y temporal según el objetivo a alcanzar:

- (i) las tablas suministro físico y uso y cuentas de emisiones (PSUTs) se desarrollaron a escala anual para cada unidad de gestión;
- (ii) las tablas híbridas se presentaron a escala anual para la cuenca entera (HYBRID); y
- (iii) las cuentas de activos (ASSET) a escala mensual y para cada unidad de gestión.

Espacialmente se realizó una regionalización funcional a escala de subcuenca, teniendo en cuenta el mayor grado de agregación de datos presentado por el sistema de clasificación ECRINS (*European Catchment and Rivers Network System*, EEA, 2012). Para la regionalización se ha considerado un análisis multicriterio basado en la fisiografía, gestión funcional y conocimiento experto, para así tratar de capturar las fuertes heterogeneidades socioeconómicas y biofísicas típicamente observadas en ambientes mediterráneos. De esta manera, se dividió la cuenca en siete sistemas que se denominaron Unidades de Gestión Elemental Representativa (Representative Elementary Watershed Management Units, REWMU), que fueron: - Cabecera, - Ramblas del Noroeste, - Mundo-Mula, - Guadalentín, - Segura, - Mar Menor, y - Sur de Murcia y Almería, cuya extensión y localización se representa en la Figura 6.1. siguiente.

6.2.3. Desarrollo de una Herramienta de Apoyo a la Toma de Decisión: tablas ASSET

El propio sistema de contabilización hídrica puede ayudar a los responsables políticos a adoptar decisiones fundamentadas con respecto a:

- a) Asignar eficientemente los recursos hídricos;
- b) Acrecentar la eficiencia de los recursos hídricos;
- c) Comprender los efectos de la ordenación de los recursos hídricos sobre todos los usuarios;
- d) Obtener el mayor rendimiento posible de las inversiones en infraestructura;
- e) Vincular la disponibilidad de agua con su uso;
- f) Ofrecer un sistema de información estandarizado capaz de armonizar datos;
- g) procedentes de diferentes fuentes, aceptado por los interesados directos y utilizado;
- h) para elaborar indicadores sobre la base de dicha información; y
- i) Involucrar a los interesados directos en la adopción de decisiones.

Por tanto en este sentido puede considerarse como un Sistema Soporte a la Decisión (Decision Support Systems, DSS) pues sirve de herramienta indispensable para ayudar a los tomadores de decisión, con el propósito proveer la integración de alternativas, obteniendo guías de operación e implementando un análisis de sensibilidad y evaluación del riesgo (Andreu *et al.*, 1996).

Figura 6.1. Unidades de Gestión Elemental Representativas REWMUs. Sistema de Coordenadas: ETRS89 UTM Huso 30N.

Aunque en esta Tesis, el objetivo no ha sido tan ambicioso, se desarrolló una herramienta computacional que permite el procesamiento de los datos requeridos, bajo un entorno libre acceso (*open source*), los clasifica y ordena de acuerdo al sistema SEEA-Water de manera que puedan ser modificados ante diferentes alternativas y se generen de una forma operacional las tablas ASSET a escala mensual para cada REWMU. Siendo por tanto una herramienta que en cierta medida, actúa como apoyo a la toma de decisión, sin llegar a constituir un DSS.

Como punto de partida en la aplicación de la metodología fue necesario modelizar la cuenca para integrar y cuantificar los volúmenes agregando datos desde diferentes fuentes y formatos. Para facilitar estas tareas se diseñaron los esquemas topológicos de cada unidad elemental representativa REWMU, identificando estaciones de medida en cauces, canales y embalses y otros elementos que pudieran servir para definir el resto de datos de entrada (inputs) a las tablas.

6.2.4. Algoritmo para la obtención de ET_{real}

Estimación de EVI

El índice EVI (Enhanced Vegetation Index) minimiza variaciones de fondo del dosel de la vegetación, y mantiene la sensibilidad sobre condiciones de vegetación densa. Este índice que utiliza la banda azul y coeficientes para la corrección atmosférica y el efecto de suelo desnudo, se estima como:

$$EVI = \frac{G \cdot (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(\rho_{NIR} + C1 \cdot \rho_{RED} - C2 \cdot \rho_{BLUE} + L)} \quad (6.1)$$

donde ρ_{NIR} es la reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; ρ_{RED} reflectividad en la banda del rojo; ρ_{BLUE} reflectividad en la banda del azul; los coeficientes adoptados en el algoritmo son: $L=1$, $C1=6$, y $C2=7.5$.

Estimación de ET_o .

Para la estimación de ET_o se puede recurrir a una amplia gama de métodos que varían en función de la exigencia de datos. El método FAO-56 Penman-Monteith (PM) fue establecido como estándar para el cálculo de ET_o (Allen *et al.*, 1998), debido a su relativa exactitud y coherencia tanto en climas áridos y como en climas húmedos. No obstante, es un método que requiere de un gran número de variables meteorológicas que no siempre están disponibles. Además, para su determinación a partir de datos históricos se presentan como inconvenientes la falta de registros fiables debido a los cambios en los dispositivos de medición y localizaciones de estaciones (Maestre-Valero *et al.*, 2013).

La ecuación de Hargreaves (HG, Hargreaves y Samani, 1985) requiere sólo la temperatura máxima y mínima del aire, así como la radiación extraterrestre. El promedio mensual (mm/día) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ET_o = C \cdot R_a (T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17.8) \quad (6.2)$$

donde C se refiere al coeficiente HG; R_a promedio de radiación extraterrestre diaria-mensual (mm/día), calculado de acuerdo a Allen *et al.* (1998); T_{max} y T_{min} son los valores mensuales promedio máximo y mínimo de la temperatura del aire diaria ($^{\circ}C$); y T es la temperatura diaria promedio mensual, calculada como la media de T_{max} y T_{min} .

Estimación de ET_{real}

La estimación de ET_{real} se ha llevado a cabo según el algoritmo propuesto por Nagler *et al.* (2005) y Guerschman *et al.* (2009), donde el promedio mensual (mm/día) se puede formular como,

$$ET_{real} = ET_o \left[a \cdot (1 - e^{(-b \cdot EVI)}) - c \right] \quad (6.3)$$

donde a , b y c son coeficientes de ajuste y $(1 - e^{(-b \cdot EVI)})$ se deriva de la Ley de Beer-Lambert modificada para predecir la reflexión de la luz por una cubierta vegetal según Nagler *et al.* (2004). El EVI reemplaza al LAI como una estimación de la densidad de la luz de las partículas absorbentes asumiendo una relación lineal entre el EVI y el LAI .

6.2.5 Modelo lógico de datos para las Tablas ASSET del sistema SEEA-WATER

Para establecer interconexiones entre las entidades (información geográfica y alfanumérica) y las salidas (outputs) de los activos de aguas, se ha generado un modelo lógico de datos en base a los esquemas topológicos diseñados (ej. Esquema 6.5). Este modelo tiene como objetivo definir entidades y relaciones virtuales entre tablas de manera que, conservando la misma estructura de las entidades originales, permita retroalimentar el sistema con otros años *a posteriori*. En el Esquema 6.2 se presenta el modelo lógico de datos para las tablas ASSET, donde se definen el tipo de relaciones definidas (de equidad, uno a cero o uno, uno a uno-más, uno a cero-muchos) y los tipos de tablas.

- SIGMestaciones contiene todas las estaciones de medida de la cuenca con sus distintivos tales como el nombre el código y la red a la que pertenecen (en el Esquema 6.2 son representadas de color azul).
- Tablas de series: son tablas que contienen datos seriados según fecha. EMBALSES_D_HIDROLOG contiene series de mediciones en las estaciones situadas en embalses con variables tales como la aportación, el volumen o el desagüe. En el Esquema 6.2 son representadas en color naranja.
- Tablas de categoría: son las tablas simples que contienen la descripción de códigos correspondientes a categorías definidas. CODE_REWMU es la tabla que define la pertenencia de una entidad a cada REWMU. En el Esquema 7.1 son representadas de color rosa.

- En el caso de los ríos, mediante la red vectorial proporcionada por Confederación Hidrográfica del Segura (CHS), se clasificaron los cauces según el orden de Horton-Strahler, y se definen y confieren a esos cauces una anchura representativa mediante un *buffer*. Por último, se convierte el mapa a formato ráster.
- Empleando un mapa de usos del suelo del Sistema de Información de Ocupación de Suelo de España (SIOSE) y mediante sus categorías definidas, se definió una zona permeable, donde se omitieron las zonas artificiales, roquedos, etc. El mapa resultante se convirtió a formato ráster con un tamaño de celda de 10 m.

A partir de estas superficies y para cada una de las máscaras de las áreas representativas, mediante álgebra de mapas se ha calculado el valor medio de la precipitación (mm/mes) y evapotranspiración (mm/d) sobre cada objeto donde interese determinar los volúmenes. En el Esquema 6.4 se representa el procedimiento aplicado para calcular el volumen: a partir de la distribución espacial de la variable mensual objeto de cálculo (ej. precipitación o evapotranspiración). Se aplica una primera máscara obteniendo el mapa de precipitación del área de interés (REWMU), y sobre esta última área se le aplica una segunda máscara obteniendo el mapa de precipitación sobre activo (ej. río o zona permeable). Finalmente, se convierte a volumen multiplicando por la superficie de la REWMU de análisis.

6.3. Resultados

En esta Tesis se presentan a modo de ejemplo los resultados aplicados a la REWMU I, correspondiente a la zona de nacimiento de los principales cursos fluviales de la cuenca alta del Río Segura.

6.3.1 Modelización de la cuenca alta del Río Segura

El Esquema 6.5 siguiente presenta el esquema topológico realizado para el REWMU I donde:

- Los cuadrados con nomenclatura “sufijo EB” (ej. EB-001) simbolizan los embalses donde se encuentran disponibles datos de aportaciones, desembalses, y evaporación.
- Los elementos lineales simbolizan cauces, donde en color azul se representan los ríos, en rojo los canales artificiales destinados a riego o abastecimiento, y en negro los canales artificiales para el trasvase de agua.
- Sobre ellos, se ubican puntos negros que representan estaciones de medición, cuya nomenclatura “sufijo EA” (ej. EA-024) son los pertenecientes a la ROEA (Red Oficial de Estaciones de Aforo), que a su vez pueden pertenecer a la red SAIH, y por tanto poseen doble nomenclatura que corresponde a siete dígitos, que son identificados si están en embalse (p.e. 03E03B01), cauce natural (ej. 03R02Q02), o canal de riego (ej. 04A02Q04).

Una descripción detallada de los elementos a tener en cuenta en el modelo topológico para REWMU I es la siguiente:

Embalses

En los embalses se encuentra la mayor parte del volumen de agua embalsado en la cuenca. Existen dos embalses de pequeño tamaño de uso hidroeléctrico y de titularidad privada. La Presa de la Novia (en el río Zumeta de 1 hm³, de uso hidroeléctrico) y la presa de Anchuricas (en el río Segura con una capacidad de 6 hm³). Le siguen en tamaño la presa del Taibilla con una capacidad de 9.5 hm³, para abastecimiento humano, cuyo titular es el Estado. Además del anterior, con un uso de abastecimiento y de riego se encuentra sobre el río Mundo, el Embalse de Camarillas (38.6 hm³) y el Embalse del Talave, para defensa, generación de energía hidroeléctrica y abastecimiento (39.1 hm³). Por último, los dos mayores embalses en capacidad de uso riego y defensa contra avenidas

(titularidad del Estado) son la presa de la Fuensanta (224.7 hm³) y el Embalse del Cenajo (654.5 hm³), ambos localizados en el Río Segura (CHS, 2005).

Esquema 6.3. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

Esquema 6.4. Esquema del cálculo de volúmenes sobre los activos geográficos mediante álgebra de mapas.

Esquema 6.5. Esquema topológico para REWMU I.

Lagos

No existen lagos naturales en la cuenca en toda la SRB, exceptuando el Mar Menor siendo este de agua salina, el resto de humedales son de escasa extensión como para ser considerados en la contabilización.

Ríos

El río Segura nace a 1412 m de altitud en la Sierra de Segura. Sus aguas son represadas por el embalse de Anchuricas. Hacia el noreste, es acrecentado su caudal por los ríos Madera y Zumeta. Las aguas del río Zumeta son embalsadas por la presa de La Novia, también conocida como La Vieja. Su elevada potencia neta, fruto del pronunciado declive y caudal reforzado por el río Tus le ha permitido escavar una potente garganta donde se levanta la presa de la Fuensanta (Gil Olcina, 2000). Pasado este pantano le llega por su derecha el río Taibilla (Sierra de la Sagra, 1600 m), siendo el segundo de sus tributarios ($2.36 \text{ m}^3/\text{s}$). Ambos cursos llegan al embalse del Cenajo, mientras que aguas abajo del pantano confluye con el río Mundo (aprox. $5.23 \text{ m}^3/\text{s}$) y con origen en la resurgencia los Chorros del Calar del Río Mundo. El Río Mundo es regulado por los embalses del Talave y Camarillas, destacándose que el Embalse del Talave recibe las aguas del acueducto Tajo-Segura. Luego el río Mundo recibe por su flanco izquierdo las pequeñas aportaciones de la rambla Minateda, cuyas aguas son laminadas por los embalses de defensa Charcos y Bayco.

Acuíferos

La complejidad geológica de la zona hace que algunas unidades hidrogeológicas sean compartidas con Demarcaciones colindantes y no se encuentran por tanto en su totalidad dentro de los límites de la demarcación. Dicha complejidad es aún más destacada, con la existencia de acuíferos superpuestos.

Humedad del suelo

Aunque esta zona (REWMU I) presenta la mayor pluviometría de la cuenca, el gran número de percolaciones y surgencias de la zona, demuestran que se trata de una zona kárstica, corroborando la gran tasa de infiltración hacia capas subterráneas, por lo que gran parte del volumen precipitado no queda retenido como humedad del suelo. No obstante, predominan los suelos xéricos propios de ambientes mediterráneos frente a los áridos.

Transferencias

Las aguas procedentes del Acueducto Tajo-Segura vierten en el embalse del Talave, situado en el río Mundo. El 85 % del volumen trasvasado se utiliza en abastecimientos y riegos. El Embalse del Talave, permite pequeñas regulaciones de los envíos procedentes del Tajo, realizando los desagües según las demandas. Aguas abajo de este embalse, las aguas discurren por el río Mundo, hasta encontrar el Embalse de Camarillas, que aunque de poca capacidad permite junto con el Talave la regulación en cabeza de las aguas trasvasadas. Aguas abajo de Camarillas, el río Mundo se encuentra con el río Segura, continuando por este hasta el conocido Azud de Ojós, donde se realiza la derivación de aguas trasvasadas para el resto de la cuenca.

Del embalse del Taibilla surge una red primaria de abastecimiento de agua potable (captación, potabilización o desalinización, conducción y almacenamiento en depósitos de reserva), gestionada por la Mancomunidad de los Canales del Taibilla (MCT) para abastecer a un gran número de municipios de la cuenca. Las aportaciones totales anuales del río Taibilla son variables, con un mínimo histórico de 37 hm^3 en el año hidrológico 2007/2008 y un máximo de 71 hm^3 durante los últimos 25 años.

6.3.2. Completado de las Tablas ASSET.

El Esquema 6.6 presenta una agrupación de las filas de las tablas ASSET en función del origen (fuente) de datos.

Los datos meteorológicos de las Tablas ASSET corresponden a precipitaciones y evaporaciones/evapotranspiraciones reales (filas 3 y 6 respectivamente, de Esquema 6.6.). Su determinación será comentada en primer lugar.

REWMU I Month=2 Year=2000						
	ER.1311 Artificial Reservoir	EA.1312 Lakes	EA.1313 River	EA.132 Ground- Water	EA.133 Soil water	Total
1. Opening stocks	109.41					
Increases in stocks:	124.33	0	187.03	24.27	15.64	351.27
2. Returns	0	0	108.16	0	3.14	111.3
3. Precipitation	0	0	0	0.2	0.2	0.2
4. Inflows	124.32	0	78.87	24.27	12.3	239.77
4.a. From upstream territories	1.71					
4.b. From other resources in the territory	122.61	0	78.87	24.27	12.3	238.05
Decreases in stocks:	106.2	0	220.3	36.1	22.56	385.16
5. Abstraction	0.01	0	127.83	7.9	10.93	146.67
6. Evaporation/actual evapotranspiration	1.06	0	0.5	9.07	10.62	10.62
7. Outflows	105.14	0	91.98	28.2	2.56	227.87
7.a. To downstream territories			0.02	0	0.02	0.02
7.b. To the sea						
7.c. To other resources in the territory	105.14	0				
8. Other changes in volume	1.71	0				
9. Closing stocks	125.82					

- Legend -

- Returns (2) and Abstraction(5): PSTUs
- Precipitation(3) and ET(6): raster maps
- Inflows (4.a)/Outflows(7.a/7.b): according to REWMU
- Inflows (4.b)/Outflows(7.c)
- Changes Volume(8)
- Sum
- Zero entries by definition

Esquema 6.6. Grupos de filas de la tabla ASSET en función de la fuente de datos.

Grupo de Datos Meteorológicos: precipitaciones y evaporación/evapotranspiración real

Precipitación (fila 3, Esquema 6.6)

Los datos de precipitación (y evapotranspiración real) sobre cada activo fueron evaluados usando consultas espaciales según se comentó previamente, previo tratamiento espacial de cada uno de los activos confiriéndoles una superficie representativa para poder calcular el volumen correspondiente

Como se ha comentado en líneas anteriores, para el completado de los outputs relativos a la precipitación se empleó la base de datos Spain02 (Herrera *et al.*, 2010), completándose dicha serie con datos de precipitación interpolados mediante Krigging desde tres fuentes de información: red AEMET, red SAIH y red de estaciones agrometeorológicas.

Evapotranspiración real (fila 6, Esquema 6.6) y evaporación

En relación a la evaporación desde ríos y embalses se deben considerar dos excepciones:

- La evaluación de la evaporación en embalses es obtenida mediante la evaporación estimada en tanques evaporímetros ubicados en inmediaciones de los embalses.
- La estimación de la evaporación en ríos no se lleva a cabo, ya que se considera un activo dinámico (en movimiento), y su influencia en el balance es pequeña. En todo caso, por este concepto se incluyó en el balance una pequeña proporción del volumen evaporado en los embalses.

A través de estudios como el de Olmos Giménez (2015) para la cuenca alta del Río Segura, donde se contrastó para el periodo de calibración 2000-2005 las aportaciones observadas frente a las simuladas aplicando el modelo Témez (Témez, 1977), se demostró que la variabilidad observada mensual de los caudales era mayor que la simulada. Luego, también se puso de manifiesto los

errores en la estimación de otras variables de salida del modelo como por ejemplo la ET_{real} . Presentando esta variable un patrón temporal más cercano a la precipitación mensual, que a la ET_{real} estimada desde satélite. Se debe resaltar que el objetivo primordial del modelo Témez no es obtener estimas precisas de ET_{real} , sino de aportaciones. Luego la calibración de los parámetros del modelo se suele basar en evaluar la forma del hidrograma simulado frente al observado en un punto de la cuenca donde se cuenta con estación de aforos. No se suelen llevar a cabo calibraciones espaciales de parámetros. Por tanto, se justifica que las estimaciones de ET_{real} realizadas por modelos de simulación como el modelo de Témez, no representen los valores reales de esta variable, siendo más precisa su estimación empleando otras metodologías, como la descrita en apartados previos de este capítulo. Se destaca que la metodología desarrollada en esta Tesis fue considerada idónea para su inclusión en la Guía 34 de la Comisión Europea denominada *Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD* (Box 8, Technical Report - 2015 -090, EU, 2015), véase Figura 6.2.

Figura 6.2. Box 8 del Technical Report - 2015 -090 (EU, 2015).

La metodología planteada, incluida en la Guía nro 34 de la Unión Europea, fue mejorada posteriormente en el desarrollo de esta Tesis. Por ejemplo, se consideraron las distribuciones espaciales de temperatura del aire obtenidas por medio del método propuesto por Cristobal *et al.*, 2008, en lugar de utilizar el método de inverso de la distancia como método de interpolación.

En definitiva, a partir de la correlación ET_{real}/ET_0 vs EVI , se ha ajustado la curva como se presenta en la Figura 6.3, aplicando un método de regresión no lineal (Nonlinear Regression) propuesta por Fox y Weisberg (2010).

Figura 6.3. Curva ajustada para la correlación ET_{real}/ET_0 vs EVI ($ET_{real}=ET_a$)

Por lo tanto resulta la siguiente ecuación, obteniéndose los parámetros ajustados $a=0.98$, $b=2.24$, y $c=0.97$:

$$ET_{real} = ET_0 \left[0.98 \cdot (1 - e^{(-2.24 \cdot EVI)}) - 0.197 \right] \quad (6.5)$$

Resultados de la correlación valores estimados- medidos de ET_{real}

La Figura 6.4 presenta los resultados de la correlación entre los valores observados en las torres de medidas de flujos y los valores estimados de ET_{real} , reflejando un resultado satisfactorio. Para la Parcela B, existe una alta correlación ($R^2=0.82$) y un MAPE del 13.3 %. Sin embargo para la Parcela A, la correlación es menor ($R^2=0.65$), con cierta sobreestimación con respecto los valores medidos y con un MAPE de 18 %. Esto podría deberse a que se tratan de árboles más jóvenes y más espaciados, por lo que la influencia del suelo introduce distorsiones en la observación.

Figura 6.4. Relación entre valores observados y estimados de ET_{real} (ET_a): (a) Parcela A, y (b) Parcela B.

La Tabla 6.1 presenta los parámetros estadísticos que caracterizan la precisión con la que se ha estimado el valor de ET_{real} : MAE (mm/d), MAPE (%) y RMSE (mm/d). Más de 30 publicaciones

(Kalma *et al.*, 2008), demuestran que errores como los obtenidos en la presente Tesis (del orden del 15-30 %) son similares a los arrojados por otros métodos de estimación de evapotranspiración validados con datos al suelo. Por tanto, los resultados obtenidos con la metodología aplicada en la presente Tesis, se consideran satisfactorios.

Tabla 6.1. Parámetros estadísticos: MAE, MAPE, RMSE, y R^2 .

Error	Parcela A	Parcela B
MAE (mm/d)	0.30	0.23
MAPE (%)	18	13.3
RMSE (mm/d)	0.48	0.33
R^2	0.65	0.82

Resultados de ET_{real} media areal para cada REWMU

En la Figura 6.5 se puede observar el comportamiento presentado por la serie temporal media areal estimada de ET_{real} para cada REWMU: la zona de cabecera con los valores más altos (REWMU I), las zonas de costa con los valores mínimos (Sur de Murcia y Almería y Mar Menor correspondientes a REWMUs VI y VII respectivamente), y valores intermedios en el resto de zonas (Mundo-Mula, Guadalentín, Segura y Ramblas del Noroeste correspondientes a REWMUs II, III, IV y V, respectivamente). Este patrón podría ser debido a la presencia predominante de vegetación natural boscosa en la zona de cabecera, y de forma contraria, en zonas costeras por la ausencia de este tipo de vegetación junto con el efecto de la cercanía del mar, moderando las temperaturas y proporcionando humedad, más el efecto amortiguador del regadío en los cultivos. En el resto de áreas se presenta un valor intermedio de ET_{real} posiblemente debido al efecto combinado de la presencia de vegetación natural boscosa, vegetación en secano y vegetación en regadío.

Figura 6.5. ET_{real} estimada para cada REWMU

Desde la Figura 6.5 anterior, se identifican cuatro zonas representativas (o volúmenes), que serán analizadas con más detalle, que corresponden a las REWMUs: I (alcanza un volumen máximo superior a 200 hm^3), IV (un volumen máximo superior o igual 100 hm^3), VII (un volumen máximo de 50 hm^3) y VI (un volumen máximo de 20 hm^3). El resto de zonas (II, III, y V) poseen un comportamiento similar a la zona IV, seleccionada por su importancia socioeconómica al aglutinar la Vega del Segura. La Figura 6.6 presenta un análisis descriptivo de la serie temporal de ET_{real}

(2000-2013), mediante el análisis de las componentes de la serie estimada que corresponden a: - serie estimada (O), - tendencia-ciclo (T), - estacionalidad (E), y - componente irregular de cuatro zonas representativas (I) consideradas como cabecera (I, Fig. 6.6 a), Vega del Segura (IV, Fig 6.6 b), Mar Menor (VII, Fig. 6.6 c) y sur de Almería y Murcia (VI, Fig. 6.6 d).

Figura 6.6. Análisis descriptivo de la serie temporal estimada de ET_{real} : (i) serie estimada (O), (ii) tendencia-ciclo (T), (iii) estacionalidad (E), (iv) componente irregular (I) de las zonas: cabecera (REWMU-I, **a**), Vega del Segura (IV, **b**), Mar Menor (VII, **c**) y sur de Almería y Murcia (VI, **d**).

Analizando la Figura 6.6 previa, todos los datos estimados (O) no presentan una amplificación de las fluctuaciones en torno a la media conforme avanza el periodo observado, por lo que se trata de un modelo aditivo. Sin embargo, referente a la tendencia (T) se dan diferencias significativas. Por un lado las Figuras 6.6 a y b presentan dos ciclos diferenciados, una tendencia al aumento de ET_{real} hasta el año 2005-2006 con una caída brusca y posterior tendencia creciente pero con menor crecimiento respecto al ciclo anterior, teniendo de forma comparativa una menor fluctuación la Vega del Segura que la zona de cabecera de la cuenca. No obstante, esta tendencia contrasta con las zonas de costa, donde se aprecia una ligera disminución en el periodo final de análisis, aunque las fluctuaciones parecen repetirse en el tiempo. Respecto a la estacionalidad (E), el comportamiento de

la serie se reproduce cada año, sin embargo en Figuras 6.6 c y d, se aprecia un segundo pico al final de cada año.

Atendiendo al comportamiento anual de dicha variable, realizando una comparativa de los valores medios areales con respecto a las precipitaciones (Figura 6.7), solamente la zona de cabecera (I) presenta precipitaciones mayores a los valores de evapotranspiración real (línea azules). La Vega del Segura (IV) demuestra déficit al registrar un volumen precipitado inferior al evapotranspirado (líneas naranjas). Sin embargo en las otras dos zonas de costa (VI y VII), el comportamiento de ambas variables se encuentra en el mismo orden de magnitud (líneas verdes y negras). El comportamiento de la evapotranspiración presenta una tendencia menos fluctuante con respecto a la precipitación.

Figura 6.7. Comparativa Precipitaciones - Evapotranspiración real.

Estimación de existencias (filas 1 y 9, Esquema 6.6).

Las existencias en embalses representan la información más precisa de todos los stocks de recursos para la SRB, ya que la cuenca se encuentra altamente regulada, y dispone de distintas redes de medida (red SAIH, red oficial). Luego se puede considerar sin mayor margen de error que sólo los ríos de cabecera, en pequeños tramos desde su nacimiento, se encuentran en régimen natural. Por tanto, con este dato se llevan a cabo las estimaciones de demandas hídricas de la cuenca.

Para el completado de las tablas ASSET se consideraron los datos proporcionados por las redes de embalses evaluando el almacenamiento el último día del mes. Por ejemplo, para REWMU I se consideraron las siguientes estaciones en embalses según el esquema topológico diseñado: EA-004, EB-006, EB-007, EB-008, EB-009, EB-010, EB-013, EB-027, EB-028, y EB-029.

Se destaca que existe un alto nivel de incertidumbre en algunos almacenamientos, como los subterráneos por ejemplo. Luego, si bien se tiene conocimiento del elevado número de depósitos

artificiales para riego, los mismos no han sido considerados en la contabilización puesto que no se disponía de registros fiables y su estimación por métodos indirectos podía introducir elevados niveles de error. En el caso de las aguas subterráneas y el almacenamiento de humedad del suelo se hacen los siguientes comentarios:

- Para una correcta evaluación de las aguas subterráneas se requieren mejoras en las redes hidrométricas de aforos en fuentes y manantiales, de vigilancia y la realización de estudios específicos. Aunque existe una importante red de piezómetros en la cuenca, que realiza la verificación de la profundidad del agua en algunos de los sondeos existentes, no se dispone de información relevante de los acuíferos (tamaño, volumen almacenado, parámetros etc.)
- Referente al contenido de humedad del suelo y su variación, no se dispone de una red de medición. En distintas fases del trabajo, se evaluó la posibilidad de incluir productos basados en teledetección (radar, satélite, etc.), pero la resolución espacial (tres celdas para toda la cuenca), así como las unidades de los productos evaluados y su conversión a volumen podrían introducir elevadas incertidumbres. Sin embargo, estudios recientes a partir de teledetección han demostrado que a escalas espaciales más gruesas se puede llegar a proporcionar información relativamente fiable (si bien se debería validar esta información).

A diferencia de los dos activos arriba señalados, en los ríos sí se lleva a cabo una medición continuada de nivel y mediante la curva de gasto correspondiente se obtiene el caudal, pero debido a que son tratados como un activo dinámico, no se pueden evaluar sus existencias, ya que todo el volumen considerado al principio del periodo es inexistente al final, dadas las particularidades de la cuenca: ríos poco caudalosos sometidos a un fuerte estiaje estival y fuertemente regulados por embalses; así como existencia de ramblas. No obstante, la estimación de sus existencias se consideran de forma indirecta en las correspondientes a embalses.

Detracciones y Retornos (filas 2 y 5, Esquema 6.6).

Las detracciones y retornos reflejan los flujos del medio ambiente a la economía (detracciones), así como los flujos de la economía al medio ambiente (retornos). Para no crear pérdida de datos entre las tablas PSUTS y ASSET, estos outputs fueron evaluados a partir de las tablas PSUTs a los activos ríos, aguas subterráneas y humedad del suelo, con excepción de los embalses, los cuales son identificados mediante estaciones de aforo. En el caso de REWMU I se considera detracción a la suma de las estaciones EA-003 y EA-447, aunque a su vez el volumen de EA-447 es retornado al sistema.

Las detracciones a los ríos son evaluadas a partir de los valores de detracciones suministradas por la MCT y recursos propios de la cuenca. Los retornos son los correspondientes a los vertidos de aguas residuales, tratadas en estaciones depuradoras industriales -EDARs, calculados ambos en las tablas PSUTS.

Salidas y entradas al sistema (filas 4 y 7, Esquema 6.6)

Los flujos entre territorios y el mar fueron definidos a partir del esquema del sistema hidrológico-hidráulico identificado para cada REWMU (Esquema 6.7), como sigue:

- I recibe la entrada del trasvase Tajo-Segura, y presenta salida aguas abajo hacia IV;
- II, III y V no reciben ninguna entrada al ser área de cabecera, y tienen salida hacia IV, con la particularidad de que III aporta volumen a VI debido al trasvase Tajo-Segura (T-S);
- IV, siendo el área de desembocadura, recibe la entrada de I, II, III y V, y proporciona salidas a VII y al mar.
- VI y VII son áreas costeras y no conectan hidrológicamente con las anteriores, pero reciben las aportaciones del trasvase por las zonas III y IV respectivamente.

Atendiendo a REWMU I, en el caso de embalses, se consideraron los siguientes flujos:

- Aún siendo zona de cabecera, posee la particularidad de presentar entradas procedentes de aguas arriba del territorio con la aportación del trasvase T-S (estación EA-400);
- La estimación del volumen de entrada desde otros recursos del territorio es evaluado como término residual de la Ecuación 6.1; y
- Las salidas hacia otros recursos del territorio son estimados a partir del volumen desaguado. Sin embargo, este dato no asume el volumen de agua intercambiado con activos como aguas subterráneas o la humedad del suelo.

Esquema 6.7. Esquema del sistema hidrológico-hidráulico para cada REWMU. Casillas con (*) representan entradas debidas a transferencias de aguas, Postrasvase T-S. Solamente las áreas IV, VI y VII proporcionan salidas al mar.

Para el caso de los ríos, el cálculo del volumen de salida hacia otros territorios se realiza identificando las estaciones de aforo aguas abajo en la red de drenaje. A modo de ejemplo, en el caso de REWMU I las últimas estaciones de aforo aguas abajo siguiendo la red de drenaje, previas al área IV, son EA-013 y EA-124, considerando también las detracciones: EA-124B, y EA-013C. Por tanto, el volumen sería resultado de la ecuación siguiente:

$$\text{Flujo de salida hacia otros territorios} = \text{suma de caudales de las estaciones de aforo EA-013 y EA-124,} \\ \text{menos la suma de los caudales de la estaciones de aforo EA-124B, EA-013C} \quad (6.6)$$

Subrayar que los flujos entre recursos del territorio quedan sujetos a grandes incertidumbres ya que no se dispone de una medida de estos flujos y los modelos introducen inexactitudes, más aún cuando se mezclan valores medidos y simulados.

Cambios en el volumen y otros insumos (fila 8, Esquema 6.5).

Los cambios en los volúmenes se completan con volúmenes que son transferidos a otras cuencas. La siguiente Tabla 6.2. presenta las tablas ASSET para los años 2000 (Tabla 6.2a) y 2010 (Tabla 6.2b). Como puede verse, las existencias del año 2010 aumentan con respecto al año 2000, en parte debido al aumento de las precipitaciones, registrándose el doble con respecto al año 2000. Centrando la atención en la totalidad de las cuentas, el año 2000 presenta déficit en las cuentas hídricas frente al año 2010. No obstante, dado que existe cierta incertidumbre en el resto de activos (aguas subterráneas, humedad del suelo), a falta de una metodología completamente fiable para su estimación dichos datos totales deben ser considerados sólo como orientativos.

6.4. Discusión de resultados

Aunque el balance hídrico engloba cinco activos (ríos, embalses, aguas subterráneas y humedad del suelo), en la cuenca de estudio (SRB) el cierre es realizado considerando fundamentalmente el volumen de agua embalsada puesto que constituye el dato de mayor fiabilidad y, a partir del cual, se estiman las demandas hídricas. Es por esta razón que las existencias en los ríos, al tratarse de un elemento altamente dinámico, no se considera su cómputo como una unidad del almacenamiento propiamente dicha sino de forma indirecta.

Tabla 6.2. Tablas ASSET: (a) año 2000; y (b) año 2010.

	ER.1311 Artificial Reservoir	EA.1312 Lakes	EA.1313 River	EA.132 Ground- Water	EA.133 Soil water	Total
1. Opening stocks	105.96					
Increases in stocks:	2778.16		291.31	991.05	1402.89	5463.41
2. Returns	1297.88		0		47.89	1345.77
3. Precipitation	9.09		5.22		1303.08	1317.39
4. Inflows	1471.19		286.08	991.05	51.93	2800.24
4.a. From upstream territories	539.8					
4.b. From other resources in the territory	931.39		286.08	991.05	51.93	2260.44
Decreases in stocks:	2771.78		293.07	71.5	2520.73	5657.09
5. Abstraction	1297.88		151.78	71.5	131.14	1652.29
6. Evaporation/actual evapotranspiration	20		9.46		1268.24	1297.7
7. Outflows	1453.9		131.83	0	1121.35	2707.09
7.a. To downstream territories			131.83			131.83
7.b. To the sea						
7.c. To other resources in the territory	1453.9		0	0	1121.35	2575.26
8. Other changes in volume	0		0.05			0.05
9. Closing stocks	112.56					

(a)

	ER.1311 Artificial Reservoir	EA.1312 Lakes	EA.1313 River	EA.132 Ground- Water	EA.133 Soil water	Total
1. Opening stocks	236.41					
Increases in stocks:	3262.49		529.54	2380.42	3306.23	9478.67
2. Returns	1086.86		0		50.37	1137.23
3. Precipitation	18.11		12.34		3186.03	3216.48
4. Inflows	2157.52		517.19	2380.42	69.83	5124.95
4.a. From upstream territories	0					
4.b. From other resources in the territory	2157.52		517.19	2380.42	69.83	5124.95
Decreases in stocks:	2977.68		821.2	68.57	4184.46	8051.91
5. Abstraction	1086.86		95.24	68.57	115.55	1366.22
6. Evaporation/actual evapotranspiration	37.32		17.65		1369.89	1424.86
7. Outflows	1853.5		708.31	0	2699.02	5260.83
7.a. To downstream territories			704.68			704.68
7.b. To the sea						
7.c. To other resources in the territory	1853.5		3.63	0	2699.02	4556.15
8. Other changes in volume	0		0.01			0.01
9. Closing stocks	521.56					

(b)

La principal fuente de incertidumbre es la falta de información fiable de las existencias de agua en la zona no saturada y saturada (humedad del suelo y acuíferos, respectivamente). La hipótesis de que los recursos subterráneos no están bien evaluados y contabilizados, constituye ya una certeza apoyada en distintos trabajos publicados.

Variabes como las recargas a los acuíferos son claves para determinar si el recurso subterráneo es renovable, o no. La zona de estudio reviste una gran complejidad geológica, confiriéndole una interconexión entre masas de agua, zonas kársticas en cabecera, además de la existencia de masas de agua compartidas por diferentes demarcaciones, factores que agravan la complejidad de su estudio y evaluación.

Aunque los recursos hídricos subterráneos disponibles para toda la cuenca se estiman en 540.7 hm³/año (CHS, 2005), este dato es un valor medio considerando como recursos disponibles: el

sumatorio de la infiltración media de lluvia, los retornos de riego y las entradas/salidas laterales procedentes de otras cuencas menos las reservas medioambientales. Este valor no permite hacer una presunción de las existencias por zonas y a escala temporal, y así adecuarlo a un balance hídrico mensual. No menos importante es el gran número de acuíferos sobreexplotados debidos a las detracciones.

Otra fuente de incertidumbre es la humedad del suelo. Aunque hoy en día se puede determinar este tipo de existencias mediante nuevos productos de satélite, aún siguen existiendo elevadas incertidumbres en su estimación para resoluciones espaciales moderadas.

No obstante, no se debe menospreciar el importante papel de la humedad del suelo en la infiltración y percolación. Sin embargo, atendiendo a la zona analizada (cabecera), y dada la elevada escorrentía superficial en la zona, las recargas de humedad de suelo y del acuífero se supondrían satisfechas, sin olvidar de que se trata de una zona kárstica.

A escala temporal mensual la totalidad del agua recogida desde la precipitación en humedad del suelo, se deduce agotada a favor de otros recursos del territorio, razón por lo que podría ser considerada, al igual que en el caso de ríos, más que un activo de almacenamiento, un activo de tránsito, hacia aguas subterráneas mediante percolación, o a la atmósfera mediante evapotranspiración.

Por esta razón, queda justificada la importancia de evaluar la evapotranspiración en ambientes áridos. Como puede apreciarse, el volumen de agua evapotranspirada es superior (o en el mismo orden de magnitud) que el agua precipitada para los REWMUs IV, VI, y VII, exceptuando la zona de cabecera. La zona de cabecera destaca del resto de la cuenca con volúmenes (precipitación y evapotranspiración) superiores al doble de lo registrado en las zonas intermedias entre cabecera y la costa (REWMUs II, III, IV). Aunque es necesario considerar ciertas limitaciones del método propuesto, como verificar su idoneidad en zonas con vegetación natural dispersa propia de ambientes semiáridos; ó zonas con bosques. Ya que el método sólo fue contrastado con vegetación riparia (hábitats vegetales y comunidades a lo largo de las márgenes y orillas del río), por tanto se ha verificado en zonas con vegetación en regadío, así como también vegetación en secano. Se destaca que aunque el contraste con datos observados se realiza sólo en dos parcelas de cultivos bien regadas, los resultados permiten considerar adecuado el método en cuanto al objetivo que se persigue, puesto que se acerca más a la realidad ("verdad terreno") que los resultados simulados por modelos hidrológicos de simulación continua de pocos parámetros como el comentado.

Otros outputs a mejorar en el cálculo, son las interacciones entre economía y medio ambiente. En el desarrollo del proyecto ASSET, parte de la presente Tesis, se trabajó con distintas escalas temporales para las tablas ASSET (mensual) y PSUTs (anual), este desfase temporal impidió el contraste de los valores de posibles pérdidas de agua. Si bien se podría considerar una agregación anual de las tablas ASSET mensuales, se destaca que los datos económicos fueron referidos a una escala regional más que a escala de sub-cuenca.

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. Conclusiones

El objetivo principal de la Tesis ha sido estimar ET_{real} mediante teledetección aplicando algoritmos con mínimos requerimientos de datos auxiliares, y que permitan el cambio de escala (upscaling) empleando diferentes escalas espaciales y temporales. La validación con datos al suelo (medidas desde torres de flujos), ha presentado resultados satisfactorios. A modo de resumen, se remarcan los principales resultados y conclusiones considerando los objetivos planteados en la presente Tesis.

7.1.1. Estimación de ET_{real} y su validación a escala temporal instantánea

El empleo de imágenes Landsat 5-TM permitió la estimación de ET_{real} al momento del paso del satélite (estimación instantánea). Como producto del contraste de los resultados con datos medidos desde torres de flujo (Eddy Covariance), se subraya la importancia de un conocimiento más preciso del valor del coeficiente de Priestley Taylor (PT o α) al utilizar métodos de estimación de ET basados en el espacio temperatura superficial versus índice de vegetación ($LST-VI$).

Desde los resultados del análisis de sensibilidad de ET_{real} - estimada desde teledetección - con respecto a la forma del espacio $LST-VI$ (rectangular RC ó trapezoidal TR), no parece que resulte decisiva esta selección. Los resultados no se ven afectados sustancialmente, en cuanto a la precisión global del método, por la selección de la forma del espacio. Sin embargo, el importante papel de la variación de $NDVI$ indicó la prevalencia de la forma TR, que presenta una menor variabilidad, y por lo tanto una mayor confiabilidad que la forma RC.

Más crítica resultó ser la selección del valor del coeficiente PT (o α), con una amplia gama de variación en torno al valor estándar de 1.27. El valor α presenta una importante influencia sobre el valor de la fracción evaporativa (EF), y por tanto sobre el valor de ET_{real} . De acuerdo con los resultados obtenidos el valor de $\alpha = 1$ evidenció los menores errores para EF, y por lo tanto la mejor estimación de ET_{real} . Ello puede explicarse por el hecho de que la mayor parte del borde húmedo del espacio $LST-VI$ corresponde a cultivos de regadío, que en la zona de estudio (Campo de Cartagena) corresponde a cítricos y cultivos hortícolas con resistencia de la superficie a la transferencia de vapor de agua (r_s) bastante alta. El valor de α seleccionado ha sido el mismo para las dos parcelas, y para el resto de cítricos y cultivos hortícolas con un valor de r_s bastante alta a la hora de paso del satélite (10:00-11:00 horas). Se debe recordar que se trata de una zona regada en una región semiárida, como es el Campo de Cartagena con una precipitación de 250 a 300 mm/año, donde se presentan las máximas tasas de evaporación y por tanto las más bajas temperaturas superficiales.

Los buenos resultados en la estimación de ET_{real} a partir de teledetección, se justifican principalmente en la elevada correlación entre datos observados y estimados de Rn , y por lo tanto, de la energía disponible (A). Sin embargo, se demostró con evidencias que el método no es lo suficientemente preciso para discriminar pequeñas variaciones en el valor de EF.

En conclusión, la metodología propuesta en la presente Tesis utilizando la ecuación PT y un mejor conocimiento de r_s , presenta varias ventajas en comparación con la aplicación de la ecuación de Penman-Monteith (PM):

- dos parámetros deben ser fijados en el método PM (r_s y resistencia aerodinámica, r_a);
- el orden de magnitud de α ($= \phi_{max}$) es más o menos conocida e identificada, siendo mucho más incierto para los valores correspondientes de r_s y r_a de la ecuación PM; y
- el valor de VPD del aire debe ser conocido para calcular ET_{real} con la ecuación PM, lo que complica el proceso de estimación ya que es muy difícil obtener estimaciones correctas de humedad del aire de la superficie terrestre a partir de datos de satélite.

7.1.2 Estimación de ET_{real} y su validación a escala temporal mensual

El método considerado para la estimación de ET_{real} a escala mensual permitió conseguir satisfactoriamente el objetivo perseguido: obtener volúmenes representativos de ET_{real} mensual a escala de cuenca (o demarcación hidrográfica) para ser empleados en el completado de balances hídricos en el marco de un sistema de contabilización del agua, integrándolos con el resto de información hidrometeorológica necesaria.

Desde el análisis de la serie temporal de ET_{real} se pudieron identificar ciertas tendencias del volumen de agua evapotranspirada, si bien con cierta cautela puesto que la serie temporal no es muy extensa, diferenciando zonas de costa donde se aprecia una disminución con respecto al resto de zonas de la cuenca con tendencias crecientes.

Luego, comparando la serie temporal de ET_{real} frente a otras variables del ciclo hidrológico como la precipitación, quedó de manifiesto cómo en zonas deficitarias de la cuenca el volumen de agua evapotranspirada es superior (o en el mismo orden de magnitud) que el volumen de agua precipitada.

De este modo, se pueden identificar fortalezas y debilidades al aplicar la metodología desarrollada para la estimación de ET_{real} mensual a escala de cuenca (o amplios territorios). Entre los factores positivos se pueden señalar los siguientes:

- (i) Se eliminan subjetividades
- (ii) Su aplicación no está limitada por la presencia de nubes, permitiendo aumentar la resolución temporal de estimación de ET_{real} y así poder analizar posibles tendencias.
- (iii) Su escala espacial permite realizar estimaciones a escala de cuenca hidrográfica sin necesidad de emplear composiciones de imágenes.
- (iv) Se destaca que aunque el contraste con datos observados se realiza sólo en dos parcelas de cultivos bien regadas, mostrando un error en torno a un 15 %, los resultados permiten considerar adecuado el método en cuanto al objetivo que se persigue.

Sin embargo, ciertas limitaciones han sido identificadas:

- (i) Incertidumbres relacionadas con la predicción de la variación espacial de la temperatura del aire
- (ii) Falta de validación en el caso de vegetación natural dispersa ó boscosa, por lo que no puede llegar a concluirse su idoneidad para estos casos.
- (iii) Requiere de datos observados para la estimación de los coeficientes de regresión.
- (iv) La resolución espacial de las imágenes consideradas (moderada resolución) le convierte en un método inapropiado para un análisis más detallado a escala de parcela. Si bien este hecho podría subsanarse considerando imágenes de mayor resolución espacial.

Luego se han obtenido otras conclusiones referentes al completado de las tablas ASSET del sistema SEEA-Water. Ha quedado demostrado que en cuencas semiáridas como la Cuenca del Río Segura (SRB), resulta imprescindible la evaluación principalmente de dos activos, definidos como activos de almacenamiento propiamente dichos: las reservas artificiales y las aguas subterráneas.

La elevada regulación de la cuenca SRB, mediante gran número de embalses, condiciona los volúmenes de agua transportados por sus ríos, estableciendo sus caudales en gran medida por el agua desaguada. Luego, la evaluación de las demandas (flujos medioambiente-economía) se intentan satisfacer en función de las estimaciones existentes en estas reservas.

Por otro lado, respecto al almacenamiento en la zona saturada y manantiales, no se puede obviar la necesidad de su mejor conocimiento; analizando cuáles son renovables, y evaluando las conexiones de estas masas con el resto de recursos.

Sin embargo, activos como los ríos presentan escaso valor como almacenamiento. El conocimiento de la dinámica del almacenamiento de humedad del suelo para amplias zonas podría ser mejor evaluado si se consideran los últimos avances en teledetección satelital (ej. misión SMOS). Por esta razón, en ambientes semiáridos es crucial la escala temporal así como espacial para este tipo de activos. Sin embargo, sus interconexiones con el medio ambiente resultan decisivas para el cierre del balance hídrico como se ha demostrado con el balance entre precipitación y evapotranspiración.

Finalmente, se destaca que el obtener estimas confiables de ET_{real} a escala mensual y de demarcación hidrográfica es un objetivo difícil de alcanzar dada la escasez de datos al suelo para su contraste, y validación. No obstante, considerando el objetivo perseguido en esta Tesis, se estima que se ha cumplido con el cometido, destacándose la dificultad en la aplicación de la metodología SEEA-Water de las cuentas del agua a escala de demarcación hidrográfica, dada la falta de datos y la integración de diferentes fuentes de información y escalas espacio-temporales de trabajo. Se debe hacer un esfuerzo en este sentido, que permita llegar a un equilibrio entre lo establecido en la DMA y la disponibilidad real de la información requerida.

7.2. Líneas futuras de investigación

Como se ha enfatizado, queda de manifiesto que no existe un método de estimación de ET_{real} que obtenga los mejores resultados para todo tipo de cobertura vegetal, siendo por tanto un campo donde investigar el desarrollo de algoritmos que sean idóneos para vegetación natural. Si bien, se destaca que rara vez se dispone de datos de estaciones de medida para validar las estimaciones desde satélite.

Por otro lado, se ha de destacar que en la precisión alcanzada con los algoritmos empleados en la presente Tesis es crucial el papel que desempeña una correcta estimación de la variación espacial de la temperatura del aire. Aunque su evaluación por medio de satélites aún admite mejoras, mediante el empleo de métodos geoestadísticos y el uso de otras variables obtenidas mediante teledetección, como es LST, se puede deducir de forma satisfactoria su variabilidad, en particular en zonas montañosas o regiones naturales, donde igualmente rara vez se dispone de estos datos.

Como continuidad a la línea de investigación desarrollada en esta Tesis sobre estimación de ET_{real} instantánea, una línea muy interesante de investigación es el análisis espacio temporal del parámetro PT. Pero en este caso, basándose en medidas de ET_o repartidas por toda la cuenca, y variando el coeficiente de cultivo (K_c), se podría llevar a cabo un análisis de sensibilidad tanto espacial como temporal. Para ello podría hacerse uso de composiciones de imágenes MODIS para al menos 3 años de datos.

Los objetivos serían dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Se confirma que en zonas áridas y semiáridas el coeficiente de PT es del orden de 1?
- ¿La variación de la escala espacial requeriría considerar a toda la cuenca para la determinación de los end-members? ó ¿sería más apropiado la adopción de una región determinada que determine las condiciones ambientales o condiciones reales del cultivo?
- Para obtener estimas más confiables de ET_{real} para un territorio, ¿sería preciso definir valores de α a partir de K_c que puedan ser aplicados en función de la época del año siguiendo el ciclo anual del cultivo?

No obstante, se advierte que para dar respuesta a estas cuestiones se requeriría de una red de medida de torres de flujo, representativas del K_c considerado en el estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcaraz F., Ríos S., Inocencio C., Robledo, A. Variation in the riparian landscape of the Segura River Basin, SE Spain. *Journal of Vegetation Science*, 1997, 8, 597–600. doi: 10.2307/3237212
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements; FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56; FAO: Rome, Italy, 1998.
- Álvarez, J.; Sánchez, A.; Quintas, I. SIMPA, a GRASS Based Tool for Hydrological Studies. *International Journal of Geoinformatics*, 2005. pp. 13-20. 1, No. 1, March
- Anderson, M.C.; Norman, J.M.; Mechikalski, J.R.; Torn, R.D.; Kustas, W.P.; Basara, J.B. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *J. Hydrometeorol.* 2004, 5, 343–363, doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0343:AMRSMF>2.0.CO;2.
- Andreu, J., Capilla, J., Sanchís, E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *J. Hydrol.* 1996, 177, 269–291. doi: 10.1016/0022-1694(95)02963-X.
- Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating of absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* 1984, 76, 300–306, doi:10.2134/agronj1984.00021962007600020029x.
- ASSET. Final Technical Report: ASSET Accounting System for the SEgura river and Transfers, 2015. http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/SUMMARY_ASSET_Final%20Technical%20Report.pdf
- Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land. Part I: Formulation. *J. Hydrol.* 1998a, 212–213, 198–212, doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- Bastiaanssen, W.G.M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma Y.; Moreno J.F.; Roerink, G.J. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) Part 2: Validation. *J. Hydrol.* 1998b, 212–213, 213–229, doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- Batra, N.; Islam, S.; Venturini, V.; Bisht, G.; Jiang, L. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sens. Environ.* 2006, 103, 1–15, doi:10.1016/j.rse.2006.02.019.
- Bergström, S., Forsman, A. Development of a conceptual deterministic rainfall–runoff model. *Nord. Hydrol.* 1973, 4, 3.
- Beven, K.J.; Fisher, J. Remote sensing and scaling in hydrology. In *Scaling up in Hydrology Using Remote Sensing*; Stewart, J.B., Engman, E.T., Feddes, R.A., Kerr, Y., Eds.; Wiley: Chichester, UK, 1996; pp. 1–18. ISBN-13: 978-0471968290
- Bisht, G.; Venturini, V.; Islam, S.; Jiang, L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sens. Environ.* 2005, 97, 52–67, doi:10.1016/j.rse.2005.03.014
- Bocchiola, D.; Nana, E.; Soncini, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy, *Agr. Water Manage.* 2013, 116, 50–61, doi: 10.1016/j.agwat.2012.10.009
- Borrego-Marín, M. M.; Perales, J. M.; Posadillo, A.; Gutiérrez-Martín, C.; Berbel J. Analysis of Guadalquivir droughts 2004–2012 based on SEEA-W tables. Andreu, Joaquín, *et al.* (ed.). *Drought: Research and Science-Policy Interfacing*. CRC Press, 2015. doi: 10.1201/b18077-14
- Brutsaert, W. Evaporation into the Atmosphere. In *An Introduction to Environmental Biophysics*, 2nd ed.; Campbell, G.S., Norman, J.M., Eds.; Springer-Verlag New York, NY, USA, 1998; p.164. doi: 10.1007/978-1-4612-1626-1
- Carlson, T.N.; Capehart, W.J.; Gillies, R.R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration. *Remote Sens. Environ.* 1995a, 54, 161–167, doi: 10.1016/0034-4257(95)00139-R.

- Carlson, T.N.; Gillies, R.R.; Schmugge, T.J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content. *Agric. For. Meteorol.* 1995b, 77, 191–205, doi: 10.1016/0168-1923(95)02261-U.
- Carlson, T.N.; Ripley, D.A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 1997, 62, 241–252, doi: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1.10.1016/S0034-4257(97)00104-1
- Cea, C.; Cristóbal J.; Pons X. An improved methodology to map snow cover by means of Landsat and MODIS imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE International.* 2007. IGARSS 2007 doi: 10.1109/IGARSS.2007.4423781
- Chavez, P.S. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1996. 1025-1036.
- Chander, G.; Markham, B.L.; Barsi, J.A. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 4(3), 2007, 490-494. doi: 10.1109/LGRS.2007.898285
- Cherif, I.; Alexandridis, T.K.; Jauch, E.; Chambel-Leitao, P.; Almeida, C. Improving remotely sensed actual evapotranspiration estimation with raster meteorological data. *Int. J. Remote Sens.* 2015, 36, 4606–4620, doi: 10.1080/01431161.2015.1084439.
- Choudhury, B.J.; Ahmed, N.U.; Idso, S.B.; Reginato, R.J.; Daughtry, C.S. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sens. Environ.* 1994, 50, 1–17, doi: 10.1016/0034-4257(94)90090-6.
- CHS (Confederación Hidrográfica del Segura), 2005. Informe para la Comisión Europea sobre el artículo 5 de la Directiva Marco del Agua. <https://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/dma/implementacion/informearticulos567/>, (accessed on 15 08 2017).
- Chuvieco, E.; Hantson, S. Plan Nacional de Teledetección. Procesamiento estándar de imágenes Landsat. Documento técnico de algoritmos a aplicar. Publisher: Instituto Geográfico Nacional, Madrid, Spain, 2010. Available online: http://pnt.ign.es/PNTtheme/resources/pdf/especificaciones-tecnicas-pnt-mediad-landsat_v2-2010.pdf (accessed on 23 12 2016).
- Colby, J. D. Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991,57(5), 531-537.
- Corwin, D.L.; Plant, R.E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2005, 46, 1–10, doi:10.1016/j.compag.2004.10.004.
- Cristóbal, J.; Ninyerola, M.; Pons, X. Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, 2156–2202, doi: 10.1029/2007JD009318.
- Da Silva, V. de P.; da Silva, B. B.; Albuquerque, W. G.; Borges, C. J.; de Sousa, I. F.; Neto, J. D. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil, *Agr. Water Manage.* 2013, 128, 102–109. doi: 10.1016/j.agwat.2013.06.007
- Davies, J.A.; Allen, C.D. Equilibrium, potential and actual evaporation from cropped surface in southern Ontario. *J. Appl. Meteorol.* 1973, 12, 649–657, doi: 10.1175/1520-0450(1973)012<0649:EPAAEF>2.0.CO;2.
- De Bruin, H. A Model for the Priestley-Taylor Parameter α . *J. Clim. Appl. Meteorol.* 1983,22, 572–578, doi: 10.1175/1520-0450(1983)022<0572:AMFTPT>2.0.CO;2.
- EC (European Commission), 2012. *A Blueprint to Safeguard Europe's Water Resources*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission (COM).
- Eberbach, P.; Pala, M. Crop row spacing and its influence on the partitioning of evapotranspiration by winter-grown wheat in Northern Syria. *Plant Soil.* 2005, 268, 195–268, doi: 10.1007/s11104-004-0271-y.

- EEA, 2012. EEA Catchments and Rivers Network System- ECRINS v1.1: Rationales, building and improving for widening uses to water accounts and WISE applications. <https://www.eea.europa.eu/publications/eea-catchments-and-rivers-network> (accessed on 15 08 2017).
- EEA, 2013. Results and lessons from implementing the Water Assets Accounts in the EEA area. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-assets-accounts-report/download> (accessed on 15 08 2017).
- Eichinger, W.E.; Parlange, M.B.; Stricker, H. On the concept of equilibrium evaporation and the value of the Priestley Taylor coefficient. *Water Resour. Res.* 1996, 32, 161–164, doi: 10.1029/95WR02920.
- Esteve Selma M. A., Lloréns Pascual del Riquelme M., Martínez Gallur C. Los recursos naturales de la Región de Murcia: un análisis interdisciplinar. Editum. 443, 2003. ISBN: 978-8483713686
- Estrela, T.; Cabezas, F.; Estrada, F. La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del Agua*, 1996, 2, 125-138.
- Estrela, T.; Quintas, L. El sistema integrado de modelización precipitación -aportación SIMPA. *Revista de Ingeniería Civil*, 1996, 104, 43-52.
- European Union. Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD, Technical Report, 2015-090. pp. 129. doi: 10.2779/352735 <https://circabc.europa.eu/sd/a/820ec306-62a7-475c-8a98-699e70734223/Guidance%20No%2034%20-%20Water%20Balances%20Guidance%20%28final%20version%29.pdf>
- Falkenmark, M.; Rockstrom, J. Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology; Earthscan Press: London, U.K., 2004; p. 272.
- Fox J., Weisberg, S. An R Companion to Applied Regression, Second Edition. 2011
- Gallego Jimenez, F. Situaciones de flujo mediterráneo y precipitaciones asociadas. Aplicación a la predicción cuantitativa en la Cuenca del Segura. Editorial: Editum. Universidad de Murcia. 1997. ISBN: 84-7684-782-3
- García Galiano, S.G.; Baille, A.; González, M.M.; Martínez, V.; Urrea, M.; Hernández, Z.; Nortes, P.; Tanguy, M.. Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS. Teledetección, Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional. 2007, Ed. Martin, 223-229.
- García, M.; Fernández, N.; Villagarcía, F.; Domingo, F.; Puigdefábregas, J.; Sandholt, I. Accuracy of the Temperature–Vegetation Dryness Index using MODIS under water-limited vs. energy-limited evapotranspiration conditions. *Remote Sens. Environ.* 2014, 149, 100–117, doi: 10.1016/j.rse.2014.04.002.
- García Galiano, S. G.; Olmos Giménez, P.; Martínez Pérez, J.A.; Diego Giraldo Osorio, J. Improving evaluation of climate change impacts on the water cycle by remote sensing ET-retrieval, *Proc. IAHS*, 2015, 368, 239-244, doi: 10.5194/piahs-368-239-2015.
- Giraldo Osorio, J.D.; García Galiano, S.G., 2012. Assessing uncertainties in the building of ensemble RCMs over Spain based on dry spell lengths probability density functions. *Clim Dyn* doi: 10.1007/s00382-012-1381-5
- Gil Olcina, A. 2000. Acondicionamiento hidráulico y desnaturalización del río Segura Núm. 51 doi: 10.17811/er.0.2000.45-59
- Gilabert, M. A.; Conese, C.; Maselli, F.. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 1994,15(10), 2065-2086. doi 10.1080/01431169408954228
- Gillies, R.R.; Carlson, T.N. Thermal remote sensing of surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models. *J. Appl. Meteorol.* 1995, 34, 745–756, doi: 10.1175/1520-0450(1995)034<0745:TRSOS>2.0.CO;2.
- Giorgi, F.; Lionello, P. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global Planet. Change*, 2008, 63, 90–104. doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.

- Glenn, E.P.; Neale, C.M.U.; Hunsaker, D.J.; Nagler, P.L. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* 2011, 25, 4050–4062.
- Guerschman, J.P.; Van Kijk, I.J.M.; Mattersdorf, G.; Beringer, J.; Hutley, L.B.; Leuning, R.; Pipunic, R.C.; Sherman, B.S.. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux observations and catchment water balance observations across Australia. *J. Hydrol.*, 2009, 369, 107–119.
- EU, Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD. Technical Report - 2015 -090 <https://circabc.europa.eu/sd/a/820ec306-62a7-475c-8a98-699e70734223/Guidance%20No%2034%20-%20Water%20Balances%20Guidance%20%28final%20version%29.pdf> (accessed on 25/10/2017)
- Hargreaves G.H.; Samani, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1985, 1(2), 96-99.
- Hargreaves, G.H. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain Eng.* 1994, 120(6), 1132-1139.
- Hengl, T.; Heuvelink, G.B.; Tadić, M.P.; Pebesma, E.J. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images. *Theor. Appl. Climatol.* 2012, 107, 265–277, doi: 10.1002/2013JD020803.
- Heuvelink, G.B.M.; Griffith, D.A.. Space-time geostatistics for geography: a case study of radiation monitoring across parts of Germany. *Geogr Anal*, 2010, 42, 161–179, doi: 10.1111/j.1538-4632.2010.00788.x
- Herrera, S., Gutierrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frias, M.D., Fernandez, J. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *Int. J. Climatol.* 2010, doi: 10.1002/joc.2256.
- Hetzroni, A.; Peters, A.; Ben-Gal, A. Towards precision management of orchards: Using automated monitoring to build a GIS-based spatial decision support system, In Automation Technology for Off-Road Equipment 2012: Proceedings of the 2012 CIGR-AGENG 2012 - International Conference, Rovira-Mas, F. ,Ed.; Valencia, Spain, 2012; pp. 73–78.
- Hofierka, J.; Suri, M. The solar radiation model for Open source GIS: Implementation and applications. In Proceedings of the Open Source GIS - GRASS Users Conference 2002, Trento, Italy, 11–13 September 2002.
- Jiang, L.; Islam, S. Estimation of surface evaporation map over Southern Great Plains using remote sensing data. *Water Resour. Res.* 2001, 37, 329–340, doi: 10.1029/2000WR900255.
- Jiang, L.; Islam, S.; Guo, W.; Jutla, A.S.; Senarath, S.U.S.; Ramsay B.H.; Eltahir, E.A.B. A satellite-based Daily Actual Evapotranspiration estimation algorithm over South Florida. *Global Planet. Change* 2009, 67, 62–77, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.12.008.
- Jiménez-Martínez, J.; García-Aróstegui, J.L.; Hunink, J.E.; Contreras, S.; Baudron, P.; Candela, L. The role of groundwater in highly human-modified hydrosystems: A review of impacts and mitigation options in the Campo de Cartagena-Mar Menor coastal plain (SE Spain). *Environ. Rev.* 2016, 24, 377–392, doi: 10.1139/er-2015-0089.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Cristóbal, J.; Soria, G.; Ninyerola, M.; Pons, X. Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote* 2009, 47, 339–349, doi: 10.1109/TGRS.2008.2007125.
- Kalma, J.D.; McVicar, T.R.; McCabe, M.F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys.* 2008, 29, 421–469, doi: 10.1007/s10712-008-9037-z.
- Kim, J.; Hogue, T.S. Evaluation of a MODIS-Based Potential Evapotranspiration Product at the Point Scale. *J. Hydrometeor.*, 9, 444–460, 2008, doi: 10.1175/2007JHM902.1
- Kim, J.; Hogue, T.S. Evaluation of a MODIS triangle—Based evapotranspiration algorithm for semi-arid regions. *J. Appl. Remote Sens.* 2013, 7, 073493, doi: 10.1117/1.JRS.7.073493.

- Komatsu, T.S. Toward a robust phenomenological expression of evaporation efficiency for unsaturated soil surface. *J. Appl. Meteorol.* 2003, 42, 1330–1334, doi: 10.1175/1520-0450(2003)042<1330:TARPEO>2.0.CO;2.
- Kustas, W.P.; Norman, J.; Anderson, M.C.; French, A. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index–radiometric temperature relationship. *Remote Sens. Environ.* 2003, 85, 429–440, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00036-1.
- Liang, S.. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. *Remote Sens. Environ.*, 2000, 76, 213–238. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00205-4
- Li, F.; Kustas, W.P.; Prueger, J.H.; Neale, C.M.U.; Jackson, J.J. Utility of remote sensing-based two-source energy balance model under low - and high - vegetation cover conditions. *J. Hydrometeorol.* 2005, 6, 878–891, doi: 10.1175/JHM464.1.
- Li, Z.L.; Tang, R.; Wan, Z.; Bi, Y.; Zhou, C.; Tang, B.; Yan, G.; Zhang, X.. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 2009, 9(5), 3801–3853, doi:10.3390/s90503801
- Long, D.; Singh, V.P. A modified surface energy balance algorithm for land (M-SEBAL) based on a trapezoidal framework. *Water Resour. Res.* 2012, 48, W02528, doi: 10.1029/2011WR010607.
- Long, D.; Singh, V.P. Assessing the impact of end-member selection on the accuracy of satellite-based spatial variability models for actual evapotranspiration estimation, *Water Resour. Res.*, 2013, 49, 2601–2618, doi:10.1002/wrcr.2020.
- Maestre-Valero, J.F., Martínez Alvarez, V., González Real, M.M., 2013. Regionalization of the Hargreaves coefficient to estimate long-term reference evapotranspiration series in SE Spain. *Spanish Journal of Agriculture Research* 11(4):1137–1152.
- Malbêteau, Y.; Merlin, O.; Gascoin, S.; Gastellu, J.P.; Mattar, C.; Olivera-Guerra, L.; Khabba, S.; Jarlan, L. Normalizing land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas: A case study using ASTER data over a steep-sided valley in Morocco. *Remote Sens. Environ.* 2017, 189, 25–39, doi: 10.1016/j.rse.2016.11.010
- March, H.; Sauri, D.; Rico-Amoros, A.M. The end of scarcity? Water desalination as the new cornucopia for Mediterranean Spain. *J. Hydrol.* 2014, 519, 2642–2651. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.023.
- Mattar, C.; Franch, B.; Sobrino, J.A.; Corbari, C.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Olivera-Guerra, L.; Skokovic, D.; Soria, G.; Oltra-Carri, R.; Julien, Y.; et al. Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. *Remote Sens. Environ.* 2014, 147, 32–42, doi:10.1016/j.rse.2014.02.011.
- McVicar, T.R.; Jupp, D.L.B. Using covariates to spatially interpolate moisture availability in the Murray -Darling Basin: A novel use of remote sensed data. *Remote Sens. Environ.* 2002, 79, 199–212, doi: 10.1016/S0034-4257(01)00273-5.
- Meeus J. Astronomical Algorithms Willmann-Bell, Inc.; 2nd edition; 1999. ISBN: 0-943396-61-1
- Melesse, A.; Nangia, V. Spatially distributed surface energy flux estimation using remotely-sensed data from agricultural fields. *Hydrol. Process*, 2005, 19, 2653–2670, doi:10.1002/hyp.5779.
- Menenti, M. Physical Aspects and Determination of Evaporation in Deserts Applying Remote Sensing Techniques; Institute for Land and Water Management Research (IWC): Wageningen, Holanda, 1984; p. 202, doi: 0.1080/01431168608954682.
- MMA (Ministerio de Medio Ambiente), 2000. White Paper on Water in Spain, Madrid. https://www.chsegura.es/chs_en/planificacionydma/libroblancodelagua/ (accessed on 15 08 2017).
- MMA. Cambios de ocupación del suelo en España. Observatorio de la Sostenibilidad en España. Fundación Biodiversidad y Fundación Universidad de Alcalá. Madrid. , 2006, 485 p. <http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0637086.PDF>(accessed on 15 08 2017).
- MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente), 2007. Estrategia Española de Desarrollo Sostenible (<http://www.mapama.gob.es/es/ministerio/planes->

- [estrategias/estrategia-espanola-desarrollo-sostenible/EEDSnov07_editdic_tcm7-14887.pdf](#) (accessed on 15 08 2017).
- Montaner Salas, M. E.; Carlos, M.; Tudela, M. L. Murcia, una región al borde del Mediterráneo Editum. 126 2002, ISBN 9788483713334.
- Montesinos, S.; Fernández, L.; Holguín, A.; Erena M.; López J. A.; Arce M. Sistema de cuentas ambientales y económicas del agua, GuaSEEAW. (http://www.geodim.es/pdf/2013_rrhh_guaseeaw_cib.pdf accessed on 05/06/2017)
- Moran, M.S.; Clarke, T.R.; Inoue, Y; Vidal, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and espectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 1994, 49, 246–263, doi: 10.1016/0034-4257(94)90020-5.
- MRT User's Manual. Land Processes DAAC USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/mrt41_usermanual_032811.pdf (accessed on 05/06/2017)
- Multsch, S.; Exbrayat, J.-F.; Kirby, M.; Viney, N. R.; Frede, H.-G.; Breuer, L. Reduction of predictive uncertainty in estimating irrigation water requirement through multi-model ensembles and ensemble averaging, *Geosci. Model Dev.*, 2015, 8, 1233-1244, doi: 10.5194/gmd-8-1233-2015.
- Muneer, T. Solar Radiation and Daylight Models for Energy Efficient Design of Buildings; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 1997; p.392, ISBN: 9780750659741.
- Myneni, R.B.; Hall, F.G.; Sellers, P.J.; Marshak, A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 1995, 33, 481–486. doi: 10.1109/36.377948
- Naciones Unidas, Banco Mundial, Comisión de la Union Europea, Fondo Monetario Internacional y Organizacion de Cooperacion y Desarrollo Economicos, Sistema de Cuentas Nacionales, 2008 (publicacion de las Naciones Unidas, No. de venta: S.08.XVII.94)
- Naciones Unidas, Manual de contabilidad nacional: contabilidad ambiental y económica integrada: Manual de operaciones, Serie F, 2003, No. 78, Rev.1
- Nagler, P.; Glenn, E.; Thompson, T.; Huete, A. Leaf area index and Normalized Difference Vegetation Index as predictors of canopy characteristics and light interception by riparian species on the Lower Colorado River. *Agric. For. Meteorol.* 2004,116, 103–112.
- Nagler, P.; Scott, R.; Westenburg, C.; Cleverly, J.; Glenn, E.; Huete, A. Evapotranspiration on western US rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sens. Environ.* 2005, 97, 337–351, doi: 10.1016/j.rse.2005.05.011.
- Nagler, P.L.; Glenn, E.; Nguyen, U.; Scott, R.; Doody, T. Estimating Riparian and Agricultural Actual Evapotranspiration by Reference Evapotranspiration and MODIS Enhanced Vegetation Index. *Remote Sensing*. 2013, 2072-4292. doi: 10.3390/rs50083849
- Nemani, R.R.; Keeling, C.D.; Hashimoto, H.; Jolly, W.M.; Piper, S.C.; Tucker, R.B.; Myneni, R.B.; Running, S.W. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* 2003, 300, 1560–1563, doi: 10.1126/science.1082750.
- Norman, J.M.; Kustas, W.P.; Humes, K.S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. *Agric. For. Meteorol.* 1995, 77, 263–293, doi: 10.1016/0168-1923(95)02265-Y.
- Oki, T.; Kanae, S. Global hydrological cycles and world water resources, *Science*, 2006,313, 1068–1072, doi: 10.1126/science.1128845.
- Olmos Giménez, P.; García Galiano, S.G; Giraldo Osorio, J.D. Identifying a robust method to build RCMs ensemble as climate forcing for hydrological impact models. *Atmospheric Research* 2016, 174-175, 31-40, doi: 10.1016/j.atmosres.2016.01.012.
- Olmos Gimenez, P. Evaluation of hydroclimatic variability from regional climate models at basin scale. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politecnica de Cartagena 2015

- Prata, A.J.; Caselles, V.; Coll, C.; Sobrino, J.A., Ottle, C. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote Sens. Rev.* 1995, 12(3–4), 175–224. doi: 10.1080/02757259509532285
- Parton, W.J.; Logan, J.A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Agric. Meteorol.* 1981, 23, 205–216, doi: 10.1016/0002-1571(81)90105-9.
- Pedro-Monzonís, M.; Jiménez-Fernández, J.; Solera, A.; Jiménez-Gavilán, P. The use of AQUATOOL DSS applied to the System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEAW) *J. Hydrol.* 2016a, 533, 1–14, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.11.034
- Pedro-Monzonís, M.; Solera, A.; Ferrer, J.; Andreu, J.; Estrela, T. Water accounting in stressed river basins based on water resources management models. *Sci. Total Environ.* 2016b, 565, 181–190 doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.161
- Pereira, A.R. The Priestley-Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration. *Agric. For. Meteorol.* 2004, 125, 305–313, doi: 10.1016/j.agrformet.2004.04.002.
- Pérez-Martín, M.A.; Estrela, T.; Andreu, J.; Ferrer, J.; Modeling water resources and river-aquifer interaction in the Júcar River basin. Spain. *Water Resour. Manag.* 2014, 28, 4337–4358. doi: 10.1007/s11269-014-0755-3.
- Price, J.C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 1990, 28, 940–948, doi:10.1109/36.58983.
- Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 1972, 100, 81–92, doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.
- Remund, J.; Wald, L.; Lefèvre, M.; Ranchin, T.; Page, J. Worldwide Linke turbidity information. In Proceedings of ISES Solar World Congress, 16–19 June 2003; International Solar Energy Society: Goteborg, Sweden., 2003. Available online: http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/57/91/PDF/ises2003_linke.pdf (accessed on 23 December 2016)
- Romero Diaz, M.A.; Lopez Bermudez, F.; Cabezas, F. Erosion and fluvial sedimentation in the River Segura basin (Spain). *Catena*, 1992, 19, 379–392, doi: 10.1016/0341-8162(92)90010-9.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; Harlan, J.C. Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation; NASA/GSFC: Greenbelt, MD, USA, 1974. Available online: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19730017588.pdf> (accessed on 20 February 2017).
- Ruiz, J.M., 1998. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual-distribuido de simulación continua integrado con un sistema de información geográfica. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València.
- Sandholt, I.; Rasmussen, K.; Andersen, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.* 2002, 79, 213–224, doi: 10.1016/s0034-4257(01)00274-7.
- Schuepp, P.H.; Leclerc, M.Y.; MacPherson, J.I.; Desjardins, R.L. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Bound. Layer Meteorol.* 1990, 50, 355–373, doi: 10.1007/BF00120530.
- Schüttemeyer, D.; Schillings, Ch.; Moene, A.F.; De Bruin, H.A.R. Satellite-Based Actual Evapotranspiration over Drying Semiarid Terrain in West Africa 2007. doi:10.1175/JAM2444.1
- SEEA-Water, 2013. System of Environmental-Economic Accounting for Water. Available online: <http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/seeaw/> (accessed on: 06/06/2017).
- Snepvangers, J.J.J.C.; Heuvelink, G.B.M.; Huisman, J.A.. Soil water content interpolation using spatio-temporal kriging with external drift. *Geoderma* (2003), 112 (3–4), 253–271, doi: 10.1016/S0016-7061(02)00310-5
- Sobrino, J.A.; Jimenez-Muñoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.* 2004, 90, 434–440, doi: 10.1016/j.rse.2004.02.003.

- Sobrino, J.A.; Jiménez Muñoz, J.C.; Soria, G.; Romaguera, M.; Guanter, L.; Moreno, J.; Plaza, A.; Martínez, P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Trans. Geosci. Remote*, 2008, 46, 316–327, doi: 10.1109/TGRS.2007.904834.
- Stefanova, A.; Hesse, C.; Krysanova, V. Combined impacts of medium term socio-economic changes and Climate Change on water resources in a managed Mediterranean catchment. *Water*, 2015, 7: 1538–1567. doi: 10.3390/w7041538.
- Swinbank, W. Long-wave radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 1963, 89, 339–348, doi: 10.1002/qj.49708938105
- Tang, R.; Li, Z.L.; Tang, B. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sens. Environ.* 2010, 114, 540–551, doi: 10.1016/j.rse.2009.10.012.
- Tanguy, M.; Baille, A.; González-Real, M.; Lloyd, C.; Cappelaere, B.; Kergoat, L.; Cohard, J. A new parameterisation scheme of ground heat flux for land surface flux retrieval from MODIS products. *J. Hydrol.* 2012, 454–455, 113–122, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.06.002.
- Témez, J. R. 1977 Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39 pp.
- Thornes, J. B.; Rowntree, K. M. Integrated catchment management in semiarid environments in the context of the European Water Framework Directive. *Land Degradation Development*, 2006, 17, 355–364. doi: 10.1002/ldr.742
- Tilmant, A.; Marques, G.; Mohamed, Y. A dynamic water accounting framework based on marginal resource opportunity cost. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2015, 19, 1457–1467. doi: 10.5194/hessd-11-11735-2014.
- Timmermans, W.J.; Kustas, W.P.; Anderson, M.C.; French, A.N. An intercomparison of the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and the Two-Source Energy Balance (TSEB) modeling schemes. *Remote Sens. Environ.* 2007, 108, 369–384, doi:10.1016/j.rse.2006.11.028.
- Twine, T.E.; Kustas, W.P.; Norman, J.M.; Cook, D.R.; Houser, P.R.; Meyers, T.P.; Prueger, J.H.; Starks, P.J.; Wesely, M.L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* 2000, 103, 279–300, doi: 10.1016/S0168-1923(00)00123-4.
- UNEP. The Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends, Vol. 1. IslandPress, Washington, DC, USA. 2005, 948 pp.
- Urrea Mallebrera, M.; Mérida Abril, A.; García Galiano, S.G. Segura River Basin: Spanish Pilot River Basin Regarding Water Scarcity and Droughts. In *Agricultural Drought Indices*; Sivakumar, M.V.K., Motha, R.P., Wilhite, D.A., Wood, D.A., Eds.; World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland, 2010; pp. 2–12.
- Van Niel, T.G.; McVicar, T.R.; Roderick, M.L.; van Dijk, A.I.J.M.; Renzullo, L. J.; Gosselink, E. Correcting for systematic error in satellite-derived latent heat flux due to assumptions in temporal scaling: Assessment from flux tower observations. *Journal of Hydrology*. 2011, 409, 140–1480. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.011
- Villa, G.; Moreno, J.; Calera, A.; Amorós-López, J.; Camps-Valls, G.; Domenech, E.; Garrido, J.; González-Matesanz, J.; Gómez-Chova, L.; Martínez, J.Á.; Molina, S.; Peces, J.J.; Plaza, N.; Porcuna, A.; Tejero, J.A.; Valcárcel, N. STRS (Spectro-Temporal Reflectance Surface): a new conceptual Framework for the integration of remote sensing data from multiple different sensors. *Remote Sens. Environ.* 2012 doi: 10.1080/01431161.2012.716910
- Villalobos, F.J.; Testi, L.; Moreno-Perez, M.F. Evaporation and canopy conductance of citrus orchards. *Agric. Water Manag.* 2009, 96, 565–573, doi:10.1016/j.agwat.2008.09.016.
- Wada, Y.; Bierkens, M. F. P. Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections, *Environ. Res. Lett.*, 2014, 9, 104003, doi:10.1088/1748-9326/9/10/104003.
- Wald, L.; Albuissou, M.; Best, C.; Delamare, C.; Dumortier, D.; Kift, R.; Ratto, C.; Reise, C.; Kunz, S.; Pade, J. SoDa: A project for the integration and exploitation of networked solar radiation

- databases. In *Environmental Communication in the Information Society*; Pillmann, W., Tochtermann, K., Eds.; International Society for Environmental Protection: Vienna, Austria, 2002; pp. 713–720.
- Wang, K.; Wang, P.; Li, Z.; Cribb, M.; Sparrow, M. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *J. Geophys. Res.* 2007, 112, D15107, doi: 10.1029/2006JD008351
- Willmott, C.J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Am. Meteorol. Soc.* 1982, 63, 1309–1313, doi:10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2.
- Xiong, Y.J.; Qiu, G.Y. Simplifying the revised three-temperature model for remotely estimating regional evapotranspiration and its application to a semi-arid steppe. *Int. J. Remote Sens.* 2014, 35, 2003–2027, doi:10.1080/01431161.2014.885149.

ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DEL DÍA

Las variables a determinar para una fecha y localización determinada (latitud φ , longitud λ) (Meeus, 1999) son:

- Número de centuria juliana (JCN), (Siendo JDN el número de día Juliano)

$$JCN = (JDN - 2451545) / 36525, \quad (A.1)$$

- Longitud media geométrica del sol (Geometric Mean Longitude of Sun, $GMLS$) en grados

$$GMLS = (280.46646 + JCN * (36000.76983 + JCN * 0.0003032)) \quad (A.2)$$

- Anomalía media geométrica del sol (Geometric Mean Anomaly of Sun, $GMAS$) en grados

$$GMAS = 357.52911 + JCN * (35999.05029 - 0.0001537 * JCN) \quad (A.3)$$

- Excentricidad de la órbita de la Tierra (Eccentricity of Earth Orbit, EEO)

$$EEO = 0.016708634 - JCN * (0.000042037 + 0.0000001267 * JCN) \quad (A.4)$$

- Ecuación del centro del Sol (Sun Equation of Center, SEC)

$$SEC = \sin(GMAS) * (1.914602 - JCN * (0.004817 + 0.000014 * JCN)) + \sin(2 * GMAS) * (0.019993 - 0.000101 * JCN) + \sin(3 * GMAS) * 0.000289 \quad (A.5)$$

- Longitud del Sol verdadera (Sun True Longitude, STL) en grados:

$$STL = GMLS + SEC \quad (A.6)$$

- Anomalía del Sol verdadera (Sun True Anomaly, STA) en grados:

$$STA = GMAS + SEC \quad (A.7)$$

- Vector del Sol Radiante (Sun Radian Vector, SRV) (en unidades UAs)

$$SRV = (1.000001018 * (1 - EEO * EEO)) / (1 + EEO * \cos(STA)) \quad (A.8)$$

- Longitud del Sol aparente (Sun App Long, SAL) en grados:

$$SAL = STL - 0.00569 - 0.00478 * \sin((125.04 - 1934.136 * JCN)) \quad (A.9)$$

- Eclíptica media oblicua (Mean Oblique Ecliptic, MOE) en grados:

$$MOE = 23 + (26 + ((21.448 - JCN * (46.815 + JCN * (0.00059 - JCN * 0.001813)))) / 60) / 60 \quad (A.10)$$

- Corrección oblicua (Oblique correction, OC)

$$OC = MOE + 0.00256 * \cos((125.04 - 1934.136 * JCN)) \quad (A.11)$$

- Ascensión recta del Sol (Sun Right Ascension, SRA) en grados:

$$SRA = \text{atan2}(\cos(OC) * \sin(SAL), \cos(SAL)) \quad (A.12)$$

- Declinación del sol (Sun Declin, $SUND$) en grados:

$$SUND = \text{asin}((\sin(OC)) * \sin(SAL)) \quad (A.13)$$

- Var y (VY)

$$VY = \tan((OC/2)) * \tan((OC/2)) \quad (A.14)$$

- Ecuación del tiempo (Equation of Time, ET) en minutos:

$$ET = 4 * (VY * \sin(2 * GMLS) - 2 * EEO * \sin(GMAS) + 4 * EEO * VY * \sin(GMAS) * \cos(2 * GMLS) - 0.5 * VY^2 * \sin(4 * GMLS) - 1.25 * EEO^2 * \sin(2 * GMAS)) \quad (A.15)$$

- Ángulo de la hora de salida del Sol (Hour Angle Sunrise, HA) en grados:

$$HA = (\arccos(\cos(90.833) / (\cos(\varphi) * \cos(SUND))) - \tan(\varphi) * \tan(SUND))) \quad (A.16)$$

- Mediodía solar (Solar moon, SN) en minutos(tiempo solar verdadero,LST)

$$SN = (720 - 4 * \lambda - ET + zone * 60) / 1440 \quad (A.17)$$

- Hora del amanecer (Sunrise Time, SUNRISE) en minutos (LST)

$$SUNRISE = SN - HA * 4 / 1440 \quad (A.18)$$

- Hora del anoecer (Sunset Time, SUNSET) en minutos(LST)

$$SUNSET = SN + HA * 4 / 1440 \quad (A.19)$$

- Duración de las horas de Sol (Sunlight Duration, D) en minutos

$$D = 8 * HA \quad (A.20)$$