



Editores:
Luis Ángel Ruiz
Javier Estornell
Manuel Erena

TELEDETECCIÓN

NUEVAS PLATAFORMAS Y SENSORES
APLICADOS A LA GESTIÓN DEL AGUA, LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE

ASOCIACIÓN
ESPAÑOLA
DE TELEDETECCIÓN



Instituto Murciano de Investigación
y Desarrollo Agrario y Alimentario

XVII CONGRESO DE LA ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE TELEDETECCIÓN

TELEDETECCIÓN

NUEVAS PLATAFORMAS Y SENSORES

APLICADOS A LA GESTIÓN DEL AGUA, LA AGRICULTURA Y EL MEDIO AMBIENTE

LIBRO DE ACTAS

Editores:
Luis Ángel Ruiz
Javier Estornell
Manuel Erena

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Nuevas plataformas y sensores de teledetección

Aplicados a la gestión del agua, la agricultura y el medio ambiente

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona

Editores científicos

Luis Ángel Ruiz
Javier Estornell
Manuel Erena

Editorial

2017 Editorial Universitat Politècnica de València
www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6418_01_01_01

Maquetación

Enrique Mateo, Triskelion diseño editorial

ISBN: 978-84-9048-650-4 (versión impresa)

Dépósito legal: V-2513-2017

Imagen de portada: Composición en color de las bandas 4, 3 y 2 (RGB) de una imagen del Mar Menor (Murcia) adquirida el 4 de agosto de 2017 por el satélite Sentinel 2A de la ESA.

Este congreso ha recibido ayuda de:

- Organización de congresos y reuniones científico-técnicas 2017 (Expediente 20124/OC/17) financiado por la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia con cargo al Programa Regional "Jiménez de la Espada" de Movilidad Investigadora, Cooperación e Internacionalización".
- La Universidad Politécnica de Cartagena.
- Proyecto 14-20-15 (Diseño y puesta en marcha de una infraestructura de datos espaciales sobre agricultura y agua en la Región de Murcia-IDEaRM), cofinanciado al 80% con fondos FEDER

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es.

Impreso en España

Prólogo

El XVII Congreso Nacional de Teledetección se celebra coincidiendo con la “**Semana Mundial del Espacio**” declarada por la ONU en 1999, ya que el **4 de Octubre** de 1957 se lanzó al espacio el primer satélite artificial de observación de la Tierra, el **Sputnik I**, lo que abrió el camino para la exploración del espacio hasta el **10 de Octubre** de 1967, fecha en la entró en vigor el Tratado sobre los principios que deben regir las actividades de los Estados en la exploración y utilización del espacio.

El 4 de Octubre de 2017, **60 años** después de este evento y hasta el día 6 Octubre, se celebra en Murcia el **XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET)**, bajo el lema “**Nuevas plataformas y sensores de teledetección**” aplicados a la gestión del Agua, la Agricultura y el Medio Ambiente.

Desde el lanzamiento por la **NASA** del primer satélite artificial para el estudio de los recursos naturales, el ERTS I, después denominado **Landsat I**, el **23 de Julio de 1972**, los sistemas de observación de la Tierra han venido demostrando su enorme potencial como fuentes de datos y como herramientas para el análisis, la investigación o la definición y control de políticas medio ambientales.

El 8 de Septiembre de 2017 se ha celebrado también el 50 aniversario del Centro Europeo de Operaciones Espaciales, los esfuerzos de la EU en la observación de la Tierra han crecido año tras año y se amplían a nuevas plataformas y satélites como el **SENTINEL 5** de la **ESA**, que será lanzado el próximo 13 de octubre de 2017, el satélite **PAZ** promocionado desde el **CDTI**, que tiene previsto su lanzamiento el último trimestre de 2017, las nuevas **plataformas Aéreas ICTS** del **INTA** que están en desarrollo y los **drones** dotados con cámaras multispectrales cada vez más potentes y económicos. Con

todo ello, es de esperar una gran variedad y progresión de nuevos productos y servicios operativos de la teledetección.

Tal y como proponen las iniciativas de **COPERNICUS**, es el momento de volcar los esfuerzos en el fortalecimiento de las sinergias entre la investigación, el desarrollo industrial y sobre todo los usuarios, para lograr una mejor implementación de servicios con un mayor reconocimiento de la sociedad.

Quiero agradecer a la **Junta Directiva de la AET** la confianza depositada en el **IMIDA** para hacer posible este evento, a los patrocinadores, los compañeros del grupo de Sistemas de Información geográfica y Teledetección, el Comité Científico, el de Organización y el de Honor por su apoyo a este evento.

Una mención especial por dedicación a José Antonio Sobrino, presidente de la **AET**, Luis Ángel Ruiz y Javier Estornell de la **Universitat Politècnica de València**, Sandra García de la **Universidad Politécnica de Cartagena**, Emilio Domenech y Guillermo Villa del **Instituto Geográfico Nacional**, José María Bernabé de la **Confederación Hidrográfica del Segura**, Rafael Melendreras y Ramón Pablo García de la **Universidad Católica de Murcia**, Tomás F. Sevilla de **Airbus Defence and Space**, Isabel Saura de **Gade Eventos** por su dedicación y a Luis Navarro, Gerente del **IMIDA**, por su apoyo en la organización de este evento.

Manuel Erena,
Presidente del comité organizador
Murcia, octubre de 2017

Introducción

En estas Actas se recogen las comunicaciones presentadas en el XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, celebrado en el Auditorio y Centro de Congresos Víctor Villegas de Murcia entre el 3 y el 7 de octubre de 2017 y organizado por el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA). Como cada dos años, este foro congrega a investigadores, empresas y gestores en el área y en él se presentan los últimos avances científicos y técnicos en el ámbito de la teledetección que tienen lugar en nuestro país. En esta ocasión, el lema del congreso, "Nuevas plataformas y sensores de teledetección", hace alusión a la irrupción durante los últimos años de los vehículos aéreos no tripulados y a las distintas misiones internacionales de observación de la Tierra, como es el caso de los nuevos satélites *Sentinel* del programa europeo *Copernicus*, con capacidad para albergar un amplio espectro de sensores y obtener datos a diferentes escalas de trabajo y permitiendo ampliar cada vez más el conjunto de aplicaciones de la teledetección.

En esta ocasión se han seleccionado 121 trabajos para su presentación, todos ellos evaluados por dos miembros del Comité Científico, formado por 49 especialistas en las distintas áreas temáticas del congreso. De ellos, 75 se presentan en forma de comunicación oral a lo largo de las 16 sesiones científicas programadas y 46 como comunicación en formato póster. Además, durante el congreso se han programado tres conferencias invitadas a cargo de expertos nacionales e internacionales, dos sesiones completas dedicadas al programa *Copernicus* en las que se tratan diferentes aspectos relacionados con el desarrollo y la transferencia de servicios en nuestro país y una sesión

con presentaciones técnicas de empresas. Las sesiones científicas se han dividido en las siguientes áreas temáticas:

- Meteorología y Cambio Climático (11)
- Agricultura y Recursos Hídricos (18)
- Bosques (6)
- Incendios Forestales (12)
- Medio Ambiente y Geología (16)
- Oceanografía, Limnología y Aguas continentales (8)
- Fotogrametría, Cartografía y SIG (15)
- Procesado y Análisis de Imágenes (21)
- Vehículos no tripulados – UAV (7)
- Divulgación y Formación (5)

Tras la celebración del congreso, algunas de las ponencias serán seleccionadas por el Consejo de Redacción para su ampliación y publicación en la **Revista de Teledetección** (<https://polipapers.upv.es/index.php/raet/>), con objeto de conferir una mayor difusión científica a los contenidos temáticos y avances presentados en el congreso.

Transmitimos nuestro agradecimiento a todos los autores que han presentado sus trabajos y compartido los resultados de su trabajo y esfuerzo, a los miembros del comité científico por la revisión de las comunicaciones con tan poco margen de tiempo y, como no, a los miembros del comité organizador por materializar este evento y ofrecernos su apoyo y entusiasmo.

Luis Ángel Ruiz
Javier Estornell
Manuel Erena
Editores

Comité de honor

Vázquez Rojas, Juan María.

*Secretario General de Ciencia e Innovación.
Ministerio de Economía, Industria y Competitividad.
Gobierno de España.*

Jódar Alonso, Francisco.

*Consejero de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca de la
Región de Murcia.*

Belda Esplugues, Fernando.

*Director, Observing and Information Systems Department,
WMO - World Meteorological Organization.*

Fernández Monistrol, José Antonio.

*Director Infraestructuras de Agencia Estatal de Meteorología-
AEMET- Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y
Medio Ambiente. MAPAMA.*

Pérez Hernández, Fulgencio.

*Director General de Innovación, Producciones y Mercados; y
del IMIDA. Consejería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca
de la Región de Murcia.*

Ródenas Cañada, Miguel Ángel.

*Presidente de la Confederación Hidrográfica del Segura-CHS.
Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio
Ambiente. MAPAMA. Gobierno de España.*

Arozarena Villar, Antonio.

*Vocal Asesor de Observación del Territorio-Instituto
Geográfico Nacional-IGN. Ministerio de Fomento.
Gobierno de España.*

Soroosh Sorooshian.

*Director, Center for Hydrometeorology and Remote Sensing-
CHRS, University of California. Irvine. USA.*

Sobrino Rodríguez, José Antonio.

*Director de la Unidad de Cambio Global.
Universitat de València.
Presidente de la Asociación Española de Teledetección-AET.*

Comité organizador local

Erena Arrabal, Manuel

Instituto Murciano de Investigación A.-IMIDA

García Galiano, Sandra

Universidad Politécnica de Cartagena-UPCT

Melendreras Ruiz, Rafael

Universidad Católica de San Antonio-UCAM

Pérez Cutillas, Pedro

Universidad de Murcia-UMU

Palenzuela Cruz, Juan Esteban

Delegado AEMET en Murcia. MAPAMA.

García Sánchez, Rafael M.

C. de Agua, Agricultura y M. Ambiente. CARM

Ballesta German, Ignacio

C. de Transparencia, Participación. CARM

Secretaría técnica y de Organización

Saura Martínez, Isabel

Gade Eventos

López Morales, Juan Antonio

IMIDA

Sánchez Fernández, Diana

IMIDA

Porrás Castillo, Ignacio

IMIDA

Fernández Fornos, Lara

SM Geodim

García García, Ramón Pablo

UCAM

Comité científico

Coordinador

Ruiz Fernández, Luis Ángel
Universitat Politècnica de València

Secretario:

Estornell Cremades, Javier
Universitat Politècnica de València

Miembros:

Aguado Suárez, Inmaculada,
Universidad de Alcalá de Henares

Alonso Sarría, Francisco
Universidad de Murcia

Arbelo Pérez, Manuel
Universidad de La Laguna

Cabello Piñar, Javier
Universidad de Almería

Calle Montes, Abel
Universidad de Valladolid

Cámara Artigas, Rafael
Universidad de Sevilla

Conesa Martínez, Agustín
Universidad Miguel Hernández

Camps Carmona, Adriano José
Universidad Politècnica de Catalunya

Calera Belmonte, Alfonso
Universidad de Castilla La Mancha

Caselles, Vicente
Universitat de València

Chuvieco Salinero, Emilio
Universidad de Alcalá de Henares

Cristóbal Rosselló, Jordi
University of Alaska Fairbanks

De la Riva, Juan
Universidad de Zaragoza

De Miguel Llanes, Eduardo
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Díaz-Delgado, Ricardo
Estación Biológica de Doñana, CSIC

García Alonso, Mariano
University of Leicester, Reino Unido

García-Pintado, Javier
University of Bremen -MARUM

García Rodríguez, Rafael
Universidad Politècnica de Madrid

Gilbert Navarro, María Amparo
Universitat de València

Gómez Miguel, Beatriz
Área de Innovación Tecnológica, Guardia Civil

Gómez Sánchez, José Antonio
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

González Alonso, Federico
I. N. I. A

González de Audicana Amenábar, María
Universidad Pública de Navarra

Gonzalo Martín, Consuelo
Universidad Politècnica de Madrid

Gutiérrez de la Cámara Ara, M^a Jesús
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Hernández Clemente, Rocío
Universidad de Swansea, Reino Unido

Jiménez Michavila, Marcos
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

Jiménez Muñoz, Juan Carlos
Universitat de València

Jiménez-Berni, José
CSIRO Plant Phenomics, Australia

Lobo Aleu, Agustín
ICTJA-CSIC

López Sánchez, Juan Manuel
Universidad de Alicante

Martín Isabel, María del Pilar
I. de Economía Geografía y Demografía, CSIC

Merino de Miguel, Silvia
Universidad Politécnica de Madrid

Montesinos Aranda, Salomón
SM Geodim

Moreira Madueño, José Manuel
C. de Medio A. y O. del T., Junta de Andalucía

Moreno Méndez, José
Universitat de València

Peces Morera, Juan José
Instituto Geográfico Nacional

Pérez Aragües, Fernando
Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña

Pons Fernández, Xavier
Universidad Autónoma de Barcelona, CREAM

Recondo González, Carmen
Universidad de Oviedo

Rodríguez Galiano, Víctor
Universidad de Sevilla

Ruiz Verdú, Antonio
Universitat de València

Sánchez Martín, Nilda
Universidad de Salamanca

Sánchez-Azofeifa, Arturo
Universidad de Alberta, Canadá

Sánchez Tomás, Juan Manuel
Universidad de Castilla La Mancha

Serra Ruiz, Pere
Universidad Autónoma de Barcelona, CREAM

Sobrino Rodríguez, José A.
Universitat de València

Villa Alcázar, Guillermo
Instituto Geográfico Nacional

Yebra, Marta
Australian National University



iii	Prólogo
v	Introducción
vii	Comité de honor
vii	Comité organizador local
vii	Secretaría técnica y de Organización
ix	Comité científico
1	SECCIÓN 01 Meteorología y cambio climático
3	Extracción de propiedades ópticas de nubes mediante imágenes DSCOVR-EPIC: modelo de transferencia radiativa y algoritmo de inversión <i>Molina, V., Doicu, A., Calle, A., Loyola, D.</i>
7	Integración de MODIS en el modelo de balance de energía STSEB para su aplicación operativa a escala regional <i>Sánchez, J. M., Galve, J. M., Bisquert, M., Valor, E., Caselles, V.</i>
11	Comparación entre las temperaturas de superficie obtenidas con MODIS y las temperaturas <i>in situ</i> medidas en la península Hurd, isla Livingston, Antártida: Primeros resultados <i>Recondo, C., Peón, J., Pendás, E., de Pablo, M. A., Calleja, J. F., Fernández, S.</i>
15	Validación de un producto de precipitación global cercano a tiempo real para el seguimiento de extremos meteorológicos <i>Cánovas-García, F., García-Galiano, S., Karbalaee, N.</i>
19	Evaluación de las estimas de precipitación desde satélite PERSIANN-CDR para la España Peninsular <i>García-Galiano, S., Giraldo-Osorio, J. D., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Erena, M.</i>
23	Incorporación de la temperatura de la superficie terrestre obtenida desde satélite para la mejora de modelos predictivos de temperatura del aire <i>Mira, M., Ninyerola, M., Batalla, M., Pesquer, L., Pons, X.</i>
27	ForestCO2: monitorización de sumideros de carbono en masas de <i>Pinus halepensis</i> en la Región de Murcia <i>Sanchez, T., Martín, S., Tomé, J. L., Navarro, J. A., Fernández-Landa, A.</i>

- 31 **Comparación de la medida de la temperatura de la superficie terrestre en campo mediante radiómetros y pirogeómetros. Implicaciones para el calibrado de sensores en vuelo**
Valor, E., Sánchez, J. M., Niclòs, R., Moya, R., Barberá, M. J., Caselles, V., Coll, C.
- 35 **Desarrollo de un nuevo producto de temperatura para la región del Amazonas**
Gomis-Cebolla, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Soria, G., Julien, Y., Skokovic, D.
- 39 **Imágenes Radar de alta resolución para la caracterización de la cobertura nival en la Isla Decepción (Antártida Marítima)**
Jiménez, J. J., Mora, C., Ramos, M., Vieira, G., Fernández, S., de Pablo, M. A., Recondo, C.
- 45 **Adquisición de datos verdad-terreno para evaluar la temperatura de la superficie terrestre obtenida desde satélite: el producto S-NPP VIIRS**
Niclòs, R., Pérez-Planells, L., Valiente, J. A., Coll, C., Barberá, M. J., Caselles, V.

49 SECCIÓN 02 Agricultura y recursos hídricos

- 51 **Evolución de la evapotranspiración y el estrés hídrico de la vegetación de dehesa en la Península Ibérica (2001-2015)**
González-Dugo, M. P., Chen, X., Andreu, A., Carpintero, E., Gómez-Giráldez, P., Su, Z.
- 55 **¿Es posible calibrar un modelo eco-hidrológico en una cuenca no aforada utilizando exclusivamente el NDVI de satélite?**
Francés, F., Ruiz-Pérez, G.
- 59 **Objetivos y primeros resultados del proyecto SENSAGRI (Sentinels Synergy for Agriculture)**
Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Verrelst, J., Tenjo, C., Pasqualotto, N., Moreno, J.
- 63 **Estimación del contenido en agua de la cubierta vegetal de diversos cultivos mediante dos nuevos índices hiperespectrales: *Water Absorption Area Index* y *Depth Water Index***
Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, S., Verrelst, J., Moreno, J.
- 67 **Influencia del equilibrio en el tamaño de muestra de entrenamiento en la clasificación de cultivos obtenida mediante Random Forests**
Arantzazu, A., Álvarez-Mozos, J.
- 71 **Cuantificación del estrés hídrico de una parcela de melocotonero mediante la integración de CWSI con el modelo de balance de energía METRIC a partir de imágenes térmicas e hiperespectrales de alta resolución espacial**
Ramírez-Cuesta, J. M., Zarco-Tejada, P. J., Testi, L., Lorite, I., Rubio-Asensio, J. S., Intrigliolo, D. S., González-Dugo, V.
- 77 **Estimación de la altura de arrozales mediante interferometría polarimétrica SAR en banda X**
López-Sánchez, J. M., Vicente-Guijalba, F., Romero-Puig, N.
- 81 **Comparación y ajuste en zonas agrícolas de índices de vegetación derivados de Landsat-8 y Sentinel-2**
Tello, J., Gómez-Báguena, R., Casterad, M. A.
- 85 **Evaluación de imágenes multitemporales WorldView 2-3 para la clasificación de castaños en Tenerife**
Marchetti, F., Arbelo, A., Alonso-Benito, A., Arbelo, M., Hernández-Leal, P. A., Moreno, J. A.
- 89 **Comparación de dos modelos físicos de balance de energía para la estimación de la evapotranspiración en zonas agrícolas**
Gomis-Cebolla, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Soria, G., Julien, Y., Skokovic, D.
- 93 **Desarrollo de metodologías para la caracterización y evaluación de daños por sequía en cereales y almendro**
Montesinos, S., Erena, M., Fernández, L., López, J. A.
- 97 **Estimación de la superficie de los cultivos y la evapotranspiración de los regadíos de la Cuenca del Guadalquivir por Teledetección**
Sánchez, B., González-Dugo, M. P., Mateos, L., Cifuentes, V. J., Escudero, R.
- 101 **Variación espacio-temporal de la fenología del arroz en Aragón a partir de información multispectral satelital**
Guillén, M., Moreno-García, B., Quílez, D., Casterad, M. A.
- 105 **Análisis multitemporal de la pérdida de la capacidad hídrica a causa de los cambios generados en los suelos usando imágenes Landsat: Estudio de caso Córdoba-Colombia entre los años 1985 y 2016**
Martín-Vega, D., Pulido, J., Upegui, E. S.

- 109 **Mejora en la calibración de un modelo hidrológico distribuido en base a teledetección**
Olmos, P., García-Galiano, S., Martínez-Pérez, J. A.
- 113 **Explorando nuevas posibilidades en la estimación de la temperatura de superficie (LST) en zonas agrícolas. Análisis multiescala**
Sánchez, J. M., González, J., Galve, J. M., Hernández, D., Bisquert, M., Nicolòs, R.
- 117 **Comportamiento de las escalas temporales “número de días”, “grados-día” y “evapotranspiración de referencia” en la monitorización de la fenología del trigo y su relación con la evolución temporal del NDVI en Albacete**
González, L., Campos, I., Calera, A.
- 121 **Estimación de la producción y el rendimiento de la cosecha de trigo en Andalucía mediante modelos basados en series temporales de imágenes de satélite**
Egea-Cobrero, V., Rodríguez-Galiano, V., Sánchez-Rodríguez, E.

125 **SECCIÓN 03 Bosques**

- 127 **Aplicaciones de LiDAR para inventario forestal exhaustivo y cartografía de la estructura 3D en una dehesa mediterránea**
Martínez-Prentice, R., Vicente, C., Ortega, S., Burgos, T., Montalvo, J.
- 131 **Análisis comparativo del potencial del ALS y TLS en la caracterización estructural de la masa forestal basado en voxelización**
Crespo-Peremarch, P., Ruiz, L. A.
- 137 **Evolución espacio-temporal del NDVI en relación a la meteorología: aplicación a las dehesas españolas**
Cifuentes, A., Cicuéndez, V., Recuero, L., Palacios, A., López-Leiva, C., Merino, S.
- 143 **Dinámica forestal de *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en el bosque de Hoyocasero (Ávila) mediante serie temporal Landsat (1984-2016) y métodos geoestadísticos**
Aulló-Maestro, I., Gómez, C., Cuevas, R., Rubio, A., Montes, F.
- 147 **Forestmap, inventario forestal online a partir de datos LiDAR en la Región de Murcia**
Tomé, J. L., Esteban, J., Martín-Alcón, S., Escamochero, I., Fernández-Landa, A.
- 151 **Análisis de la estructura de la vegetación del poljé de la Nava de los Pinsapos mediante tecnología LiDAR**
Cortés, A., Melero, I. J., Fernández-Luque, I., Flores-Moya, A., Salvo, A. E.

155 **SECCIÓN 04 Incendios forestales**

- 157 **Random Forest para la clasificación global de áreas quemadas**
Ramo, R., Chuvieco, E.
- 161 **Generación de un algoritmo global de área quemada a partir de imágenes MODIS MOD09GQ para el proyecto Fire_cci**
Lizundia, J., Otón, G., Ramo, R., Garcia, D., Chuvieco, E.
- 165 **Evolución espacio-temporal de la estructura del paisaje de áreas incendiadas mediante teledetección: efecto de las repoblaciones forestales**
Ariza, A., Merino, S., Salas, J.
- 169 **Cartografía anual de incendios forestales (1985-2015) en el Noroeste de España a partir de serie temporal de datos Landsat y algoritmo Composite2Change**
Gómez, C., Hermosilla, T., Martínez-Fernández, J., Montes, F., Aulló-Maestro, I., White, J. C., Wulder, M. A., Coops, N. C., Vázquez, A.
- 173 **Potencialidad de índices de severidad de incendios utilizando Sentinel2 y su análisis comparativo con Landsat8 en el Sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina) en 2017**
Delegido, J., Pezzola, A., Casella, A., Winschel, C., Urrego, E. P., Jiménez, J. C., Soria, G., Sobrino, J. A., Moreno, J.
- 177 **PREFER, “Información remota como soporte a las fases de prevención y restauración de emergencias por incendios forestales en el área Mediterránea”. Ámbito piloto Andalucía**
Valés, J. J., Barrio, M., Suárez, J., Sebastián, A., Pérez, P., Pino, I., Granado, L., Montoya, G., Carpintero, I., Méndez, E., Prieto, R., Giménez de Azcárate, F., Cáceres, F., Moreira, J. M.

- 181 **Cartografía de la afección del incendio en Huesa, Quesada y Cabra de Santo Cristo (Jaén) con imágenes satelitales**
Carpintero, I., Montoya, G., Granado, L., Méndez, E., Pino, I., Prieto, R., Valés, J. J., Salas, F. J., Venegas, J., Cáceres, F., Moreira, J. M., Giménez de Azcárate, F.
- 185 **Utilización de las imágenes Sentinel-2 para cartografía de área quemada**
Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., Quintano, C., Marcos, E., Calvo, L.
- 189 **Cartografía de área quemada en la región de Siberia nororiental utilizando datos LTDR entre 1982 y 2015**
García Lázaro, J. R., Moreno Ruiz, J. A., Barón Martínez, J., Riaño, D., Arbelo Pérez, M.
- 193 **Análisis de procesos de regeneración en grandes incendios forestales a partir de series temporales de Landsat: caso de estudio en Uncastillo (Zaragoza)**
Martínez, S., Chuvieco, E., Aguado, I., Salas, J.
- 197 **Detección de áreas quemadas con series temporales de imágenes Sentinel-1**
Belenguer-Plomer, M. A., Tanase, M. A., Chuvieco, E.
- 201 **Detección global de áreas quemadas a partir de imágenes AVHRR-LTDR mediante algoritmos RandomForest**
Otón, G., Lizundia, J., Ramo, R., Chuvieco, E.

205 **SECCIÓN 05 Medio ambiente y geología**

- 207 **Caracterización de la fenología de los macrófitos en la marisma de Doñana y su relación con la precipitación**
Fernández-Carrillo, A., Rodríguez-Galiano, V., Sánchez-Rodríguez, E.
- 211 **Discriminación espectral de macrófitos acuáticos característicos de la marisma de Doñana bajo diferentes condiciones mediante técnicas de *machine learning***
Martínez-Almarza, M., Aragonés, D., Afán, I., Bustamante, J., Díaz-Delgado, R.
- 215 **Resultados preliminares sobre el decaimiento de las masas forestales del Maresme usando imágenes Sentinel-2A**
Tardà, A., Pineda, L., Palà, V., Riera, R., Corbera, J., Pérez, F.
- 219 **El uso de la fenología de la superficie terrestre para discriminar entre especies de pinos Mediterráneos**
Aragonés, D., Rodríguez-Galiano, V., Caparros-Santiago, J. A., Navarro-Cerrillo, R. M.
- 223 **Modelización de factores de reflectividad en un ecosistema de dehesa a partir de un modelo de transferencia radiativa 3D**
Melendo-Vega, J. R., Martín, M. P., Pacheco-Labrador, J., Riaño, D., González-Cascón, R., Verrelst, J., Moreno, G., Vilar, L., Pérez-Cabello, F., Montorio, R., García-Martín, A.
- 227 **Análisis y modelización de la deformación del Alto Guadalentín mediante datos de interferometría radar**
Ezquerro, P., Béjar-Pizarro, M., Herrera, G., Fernández Merodo, J. A., Tomás, R., Guardiola-Albert, C., Boni, R., Staller, A.
- 231 **Análisis de subsidencia en el Delta del Ebro mediante el uso de imágenes SENTINEL-1A/B: Resultados preliminares y lecciones aprendidas**
Mora, O., Pérez Aragüés, F., Pipia, L., Marchán, J. F., Marturià, J., Corbera, J., Tardà, A.
- 235 **Cartografía de calizas con datos hiperespectrales AISA Eagle II en una zona montañosa con vegetación: una corrección atmosférica geológicamente orientada**
Buzzi, J., Costa, E., Riaza, A., Fernandez, O., Garcia-Sellés, D., Corbera, J.
- 239 **Selección de bandas espectrales por Análisis de Componentes Principales (ACP) y elaboración de ratios para la localización de emisiones de CO₂.**
Rincones, M., Gutiérrez del Olmo, J., Iglesias, L., De La Vega, R., García R.
- 243 **Metodología para la detección de cambios de uso del suelo orientada a la verificación de proveedores de biocombustibles y bioproductos**
Viñuales, M., Álvarez-Mozos, J., Barberena, G., Campo-Bescós, M. A.
- 247 **Contribución de la interferometría SAR diferencial (InSAR) al estudio de la subsidencia del terreno de la Vega Media del Segura (Murcia): experiencias y tendencias futuras**
Tomás, R., Herrera, G., López-Sánchez, J. M., Mulas, J., Fernández-Merodo, J. A., Mallorquí, J. J., Aragón, R., Sanabria, M., Tessoro, S., Vicente-Guijalba, F., Guardiola-Albert, C., Cano, M., Béjar-Pizarro, M., Hornero, J. E., Ezquerro, P.
- 251 **Evolución espacio-temporal del nivel piezométrico del acuífero de Madrid a partir de datos de interferometría radar**
Béjar-Pizarro, M., Ezquerro, P., Herrera, G., Tomás, R., Guardiola-Albert, C., Ruiz Hernández, J. M., Fernández Merodo, J. A., Marchamalo, M., Martínez, R.

- 255 **Aplicación de las nubes de puntos LiDAR en la evaluación del impacto sobre la vegetación causado por las infraestructuras de transporte**
Martín Forero, L.
- 259 **Sentinel 2A en el seguimiento del jacinto de agua en la cuenca media del río Guadiana**
Montesinos, S., Fernández, L., De Veer, D., Cifuentes, N.
- 263 **Evolución de la cobertura vegetal del Parque Nacional del Teide mediante el procesado de datos de teledetección multiplataforma**
Marcello, J., Padrón, Y., Martín-Esquivel, J. L., Rodríguez, D., Eugenio-González, F.
- 267 **Teledetección y geomática aplicada al monitoreo de los recursos forestales nativos en el ámbito de la defensa**
Cuello, A. R., Antes, M. E., Ortone Lois, A. S.

271 **SECCIÓN 06 Oceanografía, limnología y aguas continentales**

- 273 **Monitorización de la Batimetría y Habitats Bentónicos en Ecosistemas Litorales mediante Sistemas Espaciales de Alta Resolución: Evaluación de Técnicas de Corrección Atmosféricas**
Eugenio-González, F., Marcello, J., Marqués, F.
- 277 **Variabilidad espacio-temporal de grupos funcionales de fitoplancton en el Mediterráneo mediante sensores remotos**
Navarro, G., Almaraz, P., Caballero, I., Vázquez, A., Huertas, I. E.
- 281 **Objetivos y primeros resultados del proyecto ESAQS (*Ecological Status of Aquatic Systems with Sentinel Satellites*)**
Pereira-Sandoval, M., Soria, X., Urrego, E. P., Vicente, E., Ruiz-Verdú, A., Soria, J., Peña, R., Delegido, J., Tenjo, C., Moreno, J.
- 285 **Modelo de Mezcla Lineal aplicado al mapeo de la temperatura superficial a nivel de subpíxeles**
Giraldo-Osorio, J. D., Eslava-Rodríguez, A. G.
- 289 **Validación de algoritmos para la estimación de la Clorofila-a con Sentinel-2 en la Albufera de Valencia**
Soria, X., Delegido, J., Urrego, E. P., Pereira-Sandoval, M., Vicente, E., Ruiz-Verdú, A., Soria, J., Peña, R., Tenjo, C., Moreno, J.
- 293 **Uso de imágenes Landsat-8 para la estimación de la profundidad del disco de Secchi en aguas continentales**
Soria, X., Vicente, E., Durán, C., Soria, J. M., Peña, R.
- 297 **Seguimiento de la Calidad del Agua del embalse de Picadas mediante imágenes Landsat 8 (Septiembre 2015-Diciembre 2016)**
Domínguez, J. A., Vargas, J., Navarro, E., Martín, A.
- 301 **Cartografiado de un ecosistema costero vulnerable mediante clasificación basada en objetos en imágenes de muy alta resolución**
Ibarrola-Ulzurrun, E., Marcello, J., Gonzalo-Martín, C.

305 **SECCIÓN 07 Fotogrametría, cartografía y SIG**

- 307 **Sistema de información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE) de Alta Resolución, metodología de integración automática**
Delgado Hernández, J., Valcárcel Sanz, N., Arozarena Villar, A., Caballero García, E., Porcuna Fernández-Monasterio, A., López Rodríguez, E.,
- 311 **Modelos de simulación de expansión urbana a partir de imágenes de satélite: Adecuación al análisis temporal de la fragmentación de los usos del suelo**
Sapena, M., Ruiz, L. A., Joó, K.
- 315 **Innovación en la producción de cartografía temática de amplias y variadas superficies. Ecuador un caso de éxito**
Leránoz Goñi, A., Zalba Almándo, M., Del Barrio Arellano, F.
- 321 **Análisis multisensor de la variabilidad espacio temporal de diversos parámetros biofísicos en el Mar Menor**
Erena, M., Domínguez, J. A., Soria, J., Aguado-Giménez, F., García-Pintado, J., Melendreras, R., Atenza, J. F., López, J. A.
- 325 **Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales**
Donezar Hoyos, U., Larrañaga Urien, A., Tamés Noriega, A., Sánchez Gil, C., Albizua Huarte, L., Ciriza Labiano, R., del Barrio Arellano, F.

- 329 **Procesado y distribución de nubes de puntos en el proyecto PNOA-LiDAR**
Lorite Martínez, S., Ojeda Manrique, J. C., Rodríguez-Cuenca, B., González Cristóbal, E., Muñoz, P.
- 333 **Sistemas LIDAR embarcados en Drones - TerraSystem LidarPod**
Cruz Josa, D., Sacristán, M. A., Mier Gutiérrez, S.
- 337 **Extracción automática de líneas eléctricas a partir de LIDAR aéreo**
Rodríguez-Cuenca, B., Ojeda Manrique, J. C., Lorite Martínez, S.
- 341 **Comparación de parámetros dendrométricos en almendros utilizando láser escáner terrestre (TLS) y fotogrametría digital automatizada (SfM)**
Fernández-Sarría, A., Estornell, J., López-Cortés, I., Velázquez-Martí, B., Salazar, D.
- 345 **Estimación de variables de inventario forestal a través de modelos 3D obtenidos mediante fotogrametría terrestre**
de Eugenio García, A., Fernández-Landa, A., Merino de Miguel, S.
- 349 **Desarrollo de un geoportal para el inventario y la evaluación de daños por heladas en los cítricos de la Región de Murcia**
Erena, M., Brotons, J. M., Conesa, A., Manera, F. J., Castañer, R., García, P., Sánchez, D., Porras, I.
- 353 **Estimación de masas forestales afectadas por el incendio de Huesa, Quesada y Cabra de Sto. Cristo (Jaén) en 2015 a partir de PNOA LiDAR y PLEIADES**
Méndez, E., Prieto, R., Valés, J. J., Granado, L., Pino, I., Montoya, G., Carpintero, I., Giménez de Azcárate, F., Cáceres, F., Moreira, J. M., Salas, F. J.
- 357 **Mejora del Modelo Digital del Terreno de un embalse mediante una serie histórica de imágenes Landsat**
García Díaz, D., Aragónés, D., Rodríguez, A., Bustamante, J.
- 361 **Modelización dunar mediante técnicas GPS de alta precisión (Gandia – Oliva)**
Alborch, V., Santillana, D., Estornell, J., Martí, J.
- 365 **Análisis geomorfológico en la cuenca inferior del río Luna (España)**
Martínez-Cantó, R., Cadenas Sánchez, M. J., Hidalgo, A.

369 **SECCIÓN 08 Procesado y análisis de imágenes**

- 371 **Influencia de la resolución del MDE en la calidad de la corrección topográfica de imágenes de satélite**
Sola, I., Álvarez-Mozos, J., González-Audicana, M.
- 375 **Esquema de teselado GoogleMapsCompatible TileMatrixSet: un estándar “de facto” para la interoperabilidad y el procesado multirresolución de datos de teledetección**
Villa, G., Fernández, X., Hernández, D., Tejero, J. A., Villena, A.
- 379 **Una plataforma web interactiva para la anotación de imágenes de satélite mediante un enfoque basado en aprendizaje activo**
García-Pedrero, A., Gonzalo-Martín, C., Lillo-Saavedra, M., Rodríguez-Esparragón, D., Pulido, L., Ortiz, C., Rodríguez González, A.
- 383 **Análisis comparativo del producto Sentinel L-2A y valores de reflectividad extraídos mediante espectro-radiometría de campo**
Sandonís Pozo, L., García-Martín, A., Pérez-Cabello, F., Montorio Llovería, R.
- 387 **Clasificación automática de series multitemporales de imágenes de satélite usando intercalibración con píxeles pseudoinvariantes y fechas sintéticas**
Ortega, D., Domenech, E., Peces, J. J., Pérez, B., Porcuna, A., Tejero, J. A., Villa, G.
- 391 **Una respuesta operativa a los requisitos EMSA para la detección de embarcaciones sobre imágenes SAR y correlación con datos AIS**
de la Mata Moya, D. A., Jarabo Amores, M. P., Benito Ortiz, M. C., Gallego Reina, G., Moreno Burgos, V., Cerezo, F., Cicuéndez Perez, J. I.
- 395 **Evaluación de técnicas de reducción de la dimensionalidad en imágenes hiperespectrales y su aplicación para la clasificación de ecosistemas terrestres**
Ibarrola-Ulzurrun, E., Gonzalo-Martín, C., Marcello, J.
- 399 **Aplicativo de escritorio para la determinación de Sólidos Suspendidos Totales usando imágenes satelitales MODIS MYD09 y MOD09.**
Carrillo, I. y Medina, J.

- 403 **Cartografía de especies vegetales mediante la aplicación de técnicas de desmezclado y clasificación en imágenes de alta resolución**
Marcello, J., Medina, A., Hernández-Cordero, A., Eugenio-González, F.
- 407 **Clasificación de cubiertas terrestres a partir de la fusión de datos multi-sensor en ecosistemas mixtos**
Rodríguez-Esparragón, D., Marcello, J., Moreno-Gázquez, D., Eugenio-González, F., Guida, R.
- 411 **Caracterización de la fenología del abedul común en Europa a partir de series temporales (1999-2016) VEGETATION y PROBA-V**
Bórnez, K., Verger, A., Filella, I., Peñuelas, J.
- 415 **Entorno cloud de análisis de imágenes multitemporales para el Plan Nacional de Teledetección**
Villena, A., Domenech, E., Plaza, N., Villa, G.
- 419 **Uso de áreas pseudoinvariantes (PIA) para la corrección radiométrica, automática y coherente, de captaciones simultáneas Landsat-8 y Sentinel-2A**
Padró, J. C., Pons, X., Aragonés, D., Díaz-Delgado, R., García Díaz, D., Bustamante, J., Pesquer, L., Domingo, C., González-Guerrero, O.
- 423 **Comparación de métodos para la reconstrucción de series temporales de NDVI**
Julien, Y., Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Skokovic, D., Gomis, J.
- 427 **Mejora de la resolución espacial de la Temperatura de la Superficie Terrestre mediante el método de re-escalado *Nearest Neighbour Temperature Sharpening***
Skoković, D., Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Julien, Y., Gomis-Cebolla, J.
- 431 **Sistemas multiplataforma de observación de la Tierra para la monitorización y conservación sostenible de recursos marinos en ecosistemas naturales vulnerables**
Eugenio-González, F., Marcello, J., Marqués, F.
- 435 **Generación de escenas de reflectancia a partir de imágenes hiperespectrales y firmas espectrales de campo**
de Miguel, E., González-Lagos, M., Jiménez, M., Martín, A. I.
- 439 **Optimización polarimétrica de interferogramas diferenciales aislados correspondientes a eventos geológicos**
Mestre Quereda, A., López Sánchez, J. M., Ballester Berman, J. D., Selva, J., González, P. J., Hooper, A., Wright, T. J.
- 443 **El aporte de las imágenes adquiridas mediante vehículos aéreos no tripulados en la fusión de imágenes para la detección de cambios en análisis multitemporales usando la transformada de Wavelet**
Medina Daza, R. J., Upegui, E.
- 447 **Implementación en R de técnicas de fusión de imágenes**
Pesántez Cobos, P., Cánovas-García, F., Alonso-Sarría, F.
- 451 **Clasificación de imágenes hiperespectrales mediante un índice de aproximación basado en supervoxels**
Ortiz Toro, C. A., García Pedrero, A., Gonzalo Martín, C., Rodríguez-Esparragón, D., Menasalvas Ruiz, E.

455 **SECCIÓN 09 Vehículos no tripulados**

- 457 **Primeras experiencias en el uso de drones para aplicaciones de teledetección en el Grupo Tragsa: lecciones aprendidas**
Checa Alonso, M. J., Miquelsanz Muñoz, P., Rejas Ayuga, J., Escudero Barbero, R., Molina Blázquez, S., Roldán Zamarrón, A.
- 461 **Experiencias en la adquisición de imágenes para agricultura a empresas de drones españolas**
Portero, C., Salas, P., Mercadal, M., Casterad, M. A.
- 465 **Espacialización del estrés biótico en los frailejones del Parque Natural Nacional Chingaza (Colombia) utilizando imágenes capturadas con un vehículo aéreo no tripulado**
Sastoque, L., Gutiérrez, E., Upegui, E.
- 469 **Evaluación de modelos de elevación derivados de fotogrametría por aeronaves remotamente pilotadas para el cálculo de áreas de inundación en zonas urbanas: el caso de estudio de la ciudad costera de Riohacha (Caribe colombiano)**
Escobar Villanueva, J. R., Iglesias Martínez, L., Perez Montiel, H. I.
- 473 **Análisis de precisión de Modelos Digitales de Elevaciones y Orto-fotografía derivados de fotogrametría desde vehículos aéreos no tripulados (UAV)**
García Hernández, J., Merino de Miguel, S.

477 **Utilización de Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) en el estudio de los niveles de severidad por chancro del castaño en el noroeste de España**
Cifuentes, J. M., Fernández-Manso, A., Sanz-Ablanedo, E.

481 **Calibración Radiométrica de Cámaras Compactas mediante Espectro Radiómetro de Campo**
García-Fernández, M., Sanz-Ablanedo, E., Rodríguez-Pérez, J. R.

485 SECCIÓN 10 Divulgación y formación

487 **La Observación del Territorio en el IGN dentro del Programa COPERNICUS y UNGGIM (Naciones Unidas)**
Arozarena Villar, A., Valcárcel Sanz, N., Villa Alcázar, G., Domenech Tofiño, E.

491 **Plataformas Aéreas de Investigación: ICTS-PAI**
Gómez-Sánchez, J.A., Corrales Sierra, A., Ortiz Serrano, J., Seoane Vieira, N., Vega López, G., Calvo Moral, B., Marqués Balaguer, B.

495 **Futura aEronave de iNvestigación Y eXperimentación: FENYX**
Corrales Sierra, A., Gómez-Sánchez, J.A., Ortiz Serrano, J., Seoane Vieira, N., Calvo Moral, B., Marqués Balaguer, B.

499 **Dimensiones éticas de la Observación de la Tierra: ¿Qué sabemos sobre nuestro Planeta y qué hacemos al respecto?**
Chuvioco, E.

503 **Aplicaciones de la plataforma de aprendizaje de teledetección RS-EducA en el análisis y evaluación de los incendios forestales**
Fernández-Manso, A., Quintano, C., Fernández-Manso, O.

507 **Investigar aprendiendo: Calidad de Agua mediante Teledetección**
Domínguez, J. A., Morán, J. T., Baena, R., Soria, X., Soria, J., Caselles, V.

511 **Uso de datos hiperespectrales para el análisis de SEN2COR**
de Miguel, E., Salido-Monzú, E., Jiménez, M., Martín, A. I., Carpintero, E., González-Dugo, M. P.



SECCIÓN 01

Meteorología y cambio climático

Extracción de propiedades ópticas de nubes mediante imágenes DSCOVER-EPIC: modelo de transferencia radiativa y algoritmo de inversión

Molina García, V. ⁽¹⁾, Doicu, A. ⁽¹⁾, Calle Montes, A. ⁽²⁾, Loyola, D. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Tecnológico de Teledetección, Agencia Aeroespacial Alemana (DLR), Münchner Str. 20, Edificio 133/03, 82234 Oberpfaffenhofen, Alemania. victor.molinagarcia@dlr.de, adrian.doicu@dlr.de, diego.loyola@dlr.de

⁽²⁾ Grupo de Óptica Atmosférica (GOA), Universidad de Valladolid (UVa), Paseo de Belén 7, 47011 Valladolid, España. abel@goa.uva.es

Resumen: En el presente trabajo se estudian los requerimientos del modelo de transferencia radiativa y del algoritmo de inversión para la extracción de propiedades ópticas de nubes mediante imágenes de *Earth Polychromatic Imaging Camera* (EPIC) a bordo de *Deep Space Climate Observatory* (DSCOVER). Debido a la localización de DSCOVER en el punto de Lagrange L_1 , el efecto gloria juega un papel importante en el modelo de dispersión radiativa y ello incrementa los tiempos de computación, puesto que se necesita describir las funciones de fase de manera muy precisa en la región de *back-scattering*. Partiendo del modelo de transferencia radiativa DOME (*Discrete Ordinate Method with Matrix Exponential*), se analiza la repercusión de modelos aproximados (teoría asintótica, modelo de nube lambertiana equivalente) y de técnicas de aceleración en la exactitud de las radiancias del modelo *forward*. Se estudia, asimismo, la linearización del modelo *forward* usando la ecuación adjunta de transferencia radiativa. Finalmente, se muestran ejemplos de su uso aplicados a medidas sintéticas de EPIC.

Palabras clave: EPIC, DSCOVER, efecto gloria, nubes, transferencia radiativa, técnicas de aceleración computacional.

Retrieval of cloud optical properties from DSCOVER-EPIC imagery: radiative transfer model and inversion algorithm

Abstract: In this work, we show the requirements for the radiative transfer model and the inversion algorithm in order to retrieve cloud optical properties from DSCOVER-EPIC imagery. As DSCOVER is located in the Lagrangian point L_1 , the glory effect plays an important role in the radiative transfer model and it increases the computation time, because the scattering phase function must be described precisely in the back-scattering region. Based on the radiative transfer model DOME, the use of approximate models (e.g. asymptotic theory, Lambertian cloud) and acceleration techniques in the forward model is shown from the point of view of accuracy. Also, the linearisation of the forward model by means of the adjoint theory is studied. Finally, retrieval test examples with synthetic measurements of EPIC are analysed.

Keywords: EPIC, DSCOVER, glory effect, clouds, radiative transfer, computational acceleration techniques.

1. INTRODUCCIÓN

El satélite DSCOVER (*Deep Space Climate Observatory*) fue lanzado el 11 de febrero de 2015 con destino final al punto de Lagrange L_1 , a 1,5 millones de kilómetros en la línea que une la Tierra y el Sol. A bordo de DSCOVER se encuentra el instrumento EPIC (*Earth Polychromatic Imaging Camera*), una cámara con 10 canales repartidos en el ultravioleta, el visible y el infrarrojo próximo, que observa la fracción de Tierra iluminada por el Sol.

La localización de DSCOVER en el punto de Lagrange L_1 presenta una serie de ventajas e inconvenientes para EPIC. Así, esta cámara presenta una buena resolución temporal (captura una imagen de la mitad de la Tierra al menos cada 2 horas), y la resolución espacial (8×8 km² en el punto sub-satélite) es aceptable para el estudio de la atmósfera teniendo en cuenta su distancia a la Tierra. Empero, la configuración geométrica Tierra-DSCOVER-Sol es tal que la radiación recibida por EPIC proviene de la dirección de *back-scattering*. Este hecho implica complicaciones al resolver la ecuación de transferencia radiativa (RTE), dado que la complejidad de la RTE depende de la descripción de la función de fase usada para caracterizar la dispersión de la radiación por las

partículas atmosféricas (aerosoles, nubes). Esta función de fase tiene una estructura muy asimétrica para ángulos de dispersión pequeños y en las regiones de arcoíris y de gloria. Esta última región afecta a EPIC. En la RTE, la función de fase se escribe como una serie truncada de Legendre, pero su asimetría hace necesarios muchos términos del desarrollo para una descripción exacta, y ello se traduce en mayor tiempo de computación.

Asimismo, EPIC es un instrumento interesante para el estudio de las propiedades ópticas de nubes, pues cuenta con canales de referencia y absorción en las bandas de oxígeno O_2 -A y O_2 -B (Tabla 1), de las que la primera ha sido usada con anterioridad para obtener propiedades ópticas de nubes tales como la fracción de cubierta de nube (*cloud fraction*, CF), su altura en la cima (*cloud-top height*, CTH, h_c), su espesor óptico (*cloud optical thickness*, COT, τ_c) o su espesor geométrico (*cloud geometrical thickness*, CGT), aunque solamente dos de forma simultánea (Schuessler *et al.*, 2014). Además, la combinación de ambas bandas O_2 -A y O_2 -B también ha sido analizada para obtener información independiente de CF, CTH y COT (Kuze y Chance 1994).

Tabla 1. Canales de referencia y absorción en las bandas de oxígeno O_2 -A y O_2 -B disponibles en EPIC.

Canal	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Tipo
7	680,0 ± 0,2	3,0 ± 0,6	Referencia
8	687,75 ± 0,20	0,80 ± 0,20	Absorción
9	764,0 ± 0,2	1,0 ± 0,2	Absorción
10	779,5 ± 0,3	2,0 ± 0,4	Referencia

Con estas consideraciones, se plantea analizar cuál es el modelo de transferencia radiativa óptimo para obtener propiedades ópticas de nubes a partir de las medidas de radiancia de EPIC, así como el empleo de técnicas de aceleración que disminuyan el tiempo de computación. Para el algoritmo de inversión, se estudia el impacto de emplear la teoría adjunta de transferencia radiativa para hallar las jacobianas del problema, y la efectividad de la regularización de Tikhonov para extraer las propiedades ópticas de nubes provenientes de radiancias sintéticas obtenidas usando el modelo de transferencia radiativa *forward* a partir de propiedades conocidas.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La extracción de propiedades ópticas de nubes exige un modelo de transferencia radiativa que tenga en cuenta la dispersión y absorción por las gotas de agua, además de la absorción por gases y dispersión Rayleigh. Como los canales de los instrumentos no son monocromáticos, la transferencia radiativa debe estudiarse para un conjunto significativo de longitudes de onda, línea a línea (LBL) dentro del canal, y después convolucionar el resultado con la función respuesta del sensor para dichos canales. La complejidad de estos problemas provoca que el tiempo de computación para su resolución sea elevado. Por lo tanto, dos puntos son remarcables:

- La dificultad del problema monocromático, que es la del modelo de transferencia radiativa.
- La dificultad del problema policromático, que es la de tener que usar el modelo monocromático para canales con un cierto ancho de banda.

El problema monocromático se intenta simplificar con modelos de transferencia radiativa aproximados, y el problema policromático se intenta solucionar con las técnicas de aceleración computacional.

2.1. Modelos aproximados

Partiendo de la ecuación de transferencia radiativa (RTE) de la radiancia difusa L en el punto genérico r y en la dirección $\Omega = (\mu, \varphi)$:

$$\mu (\partial L / \partial r)(r, \Omega) = -\sigma_{\text{ext}}(r) L(r, \Omega) + J(r, \Omega),$$

donde σ_{ext} es el coeficiente de extinción y J denota las contribuciones de dispersión simple y múltiple, esta no se puede resolver de manera analítica. DOME, variante de DISORT junto con el método de matriz exponencial, resuelve la RTE de forma exacta para un número finito de Ω (ordenadas discretas o *streams*), pero el tiempo de computación es alto (Efremenko et al., 2017).

El fundamento de la teoría asintótica parte de la premisa de que el espesor óptico es muy grande, y con ella la RTE

se puede resolver de forma analítica; si el espesor óptico es pequeño, esta teoría no es válida. El modelo de nube lambertiana equivalente simplifica la atmósfera de modo que la nube es sustituida por una superficie lambertiana con un albedo efectivo que tiene en cuenta los efectos de la nube y de la atmósfera bajo ella.

2.2. Técnicas de aceleración computacional

Técnicas de aceleración comunes son el método de la distribución-k y el análisis de componentes principales (PCA), la primera para agrupar intervalos espectrales en función de la distribución del coeficiente de absorción, la segunda como técnica de reducción dimensional de las propiedades ópticas. Ambas se pueden, no obstante, emplear conjuntamente (Molina García et al., 2017)

2.3. Modelo de transferencia radiativa linealizado

El cálculo de la jacobiana de la radiancia se abordó mediante la propia linealización de DOME (LDOME), pero también con la teoría adjunta o *forward-adjoint* (FADOME), pues es muy eficiente desde el punto de vista computacional. Se recomienda (Marchuk 1995).

2.4. Algoritmo de inversión

El algoritmo de inversión es un proceso de optimización en que se usa la regularización de Tikhonov (Neubauer 1989) con parámetro de regularización a priori, y en el que las variables a extraer son el COT y el CTH.

3. SIMULACIONES

3.1. Modelos aproximados

Para decidir la conveniencia de los diferentes modelos aproximados en vez del uso del modelo DOME exacto, se realizaron primero simulaciones de referencia de las radiancias para el canal 9 de EPIC con los siguientes parámetros de entrada (Figura 1):

- Computación DOME con LBL y 128 *streams*.
- Albedo de superficie: 0,06.
- Radio efectivo de las partículas: 8 μm .
- Ángulo zenital solar y satelital: de 5 a 60°.
- Altura de nube en la cima: 4 km.
- Espesor óptico de nubes: de 2 y 50.

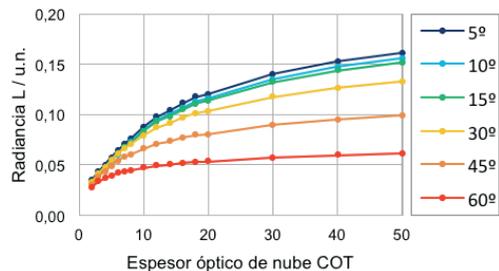


Figura 1. Radiancias en unidades normalizadas (u.n.) para el caso de referencia, que emplea DOME con LBL y 128 ordenadas discretas, en función del COT (eje x) y del ángulo zenital solar (leyenda).

Se repitieron las simulaciones con dicha configuración, pero con 32 ordenadas discretas y variando el modelo:

- DOME con LBL.
- Teoría asintótica de orden 4 con LBL.
- Nube lambertiana equivalente con LBL.

Los errores relativos en las radiancias comparados con las simulaciones de referencia se indican en la Figura 2.

3.2. Técnicas de aceleración computacional

Después del análisis de los modelos de transferencia radiativa aproximados, se realizaron simulaciones con la configuración general indicada en la sección 3.1, pero en esta ocasión con 32 ordenadas discretas en vez de 128, y usando el modelo exacto DOME pero esta vez sustituyendo las computaciones LBL con la técnica de aceleración computacional basada en la combinación de distribución-k más PCA.

Los errores relativos en las radiancias se muestran en la Figura 3, y en la sección 4 se comentan junto a la Figura 2 superior, dada su relevancia.

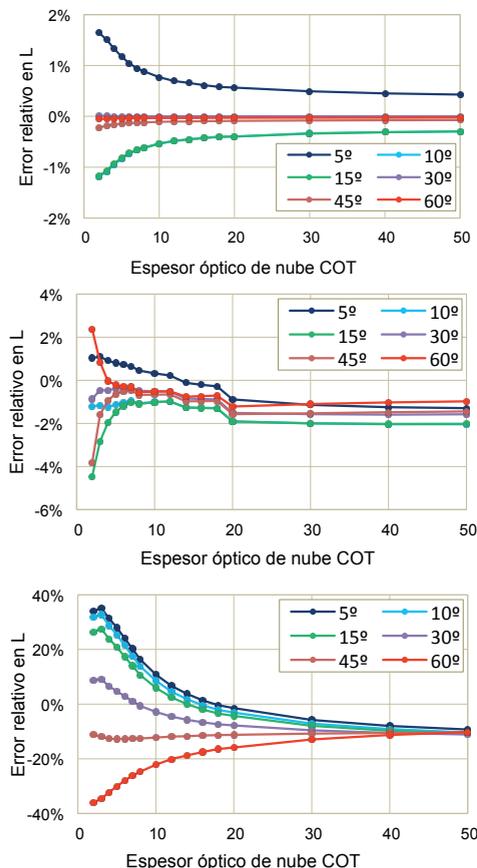


Figura 2. Errores relativos respecto a las radiancias de referencia al usar DOME exacto LBL con 32 streams (arriba), teoría asintótica de orden 4 (medio) y nube lambertiana equivalente (abajo) en función del COT (eje x) y del ángulo zenital solar (leyenda).

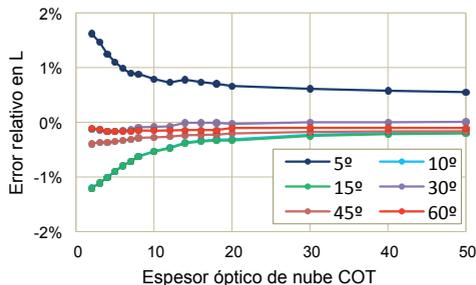


Figura 3. Errores relativos respecto a las radiancias de referencia al usar DOME con distribución-k más PCA en función del COT (eje x) y del ángulo zenital solar (leyenda).

Se realizaron primero simulaciones de referencia de las derivadas de la radiancia con respecto al COT y al CTH para el canal 9 de EPIC con parámetros de entrada:

- Computación LDOME y FADOME con LBL y 32 streams.
- Albedo de superficie: 0,06.
- Radio efectivo de las partículas: 8 μm .
- Ángulo zenital solar y satelital: 30°.
- Altura de nube en la cima: de 2 a 16 km (4 km cuando se elige constante).
- Espesor óptico de nubes: de 2 a 50 (5 cuando se elige constante).

Las discrepancias obtenidas entre LDOME y FADOME para $(\partial L/\partial \tau_c)$ y $(\partial L/\partial h_c)$ son inferiores a 0,01% y a 0,1% respectivamente. No se incluyen estas gráficas porque la diferencia no es distinguible.

Las siguientes simulaciones del modelo de transferencia radiativa linealizado usan la configuración de referencia de FADOME, pero sustituyendo de nuevo los cálculos LBL con la técnica de aceleración computacional que combina distribución-k más PCA.

Los errores relativos en el cálculo de las derivadas parciales $(\partial L/\partial \tau_c)$ y $(\partial L/\partial h_c)$ usando FADOME más las técnicas de aceleración con respecto a las derivadas de referencia se muestran en la Figura 4.

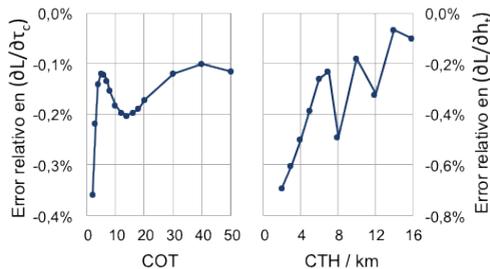


Figura 4. Errores relativos en las derivadas parciales de la radiancia comparadas con la referencia al usar FADOME con distribución-k más PCA en función del COT o CTH (eje x) para ángulo zenital solar de 30°.

3.3. Algoritmo de inversión con medidas sintéticas

Se crearon medidas sintéticas de nubes de fase líquida con todas las combinaciones posibles de los siguientes parámetros de entrada:

- Radio efectivo: 6, 8, 10, 12, 14 y 16 μm .
- COT: 4, 5, 6, 8, 10, 16, 20 y 30.
- CTH: 2, 4, 6 y 8 km.

Algunas combinaciones se eliminaron al corresponder con situaciones físicas no plausibles. En la Figura 5 se muestra el histograma de errores relativos al recuperar propiedades ópticas de nubes, partiendo de una solución semilla razonable y una razón señal-ruido SNR = 100.

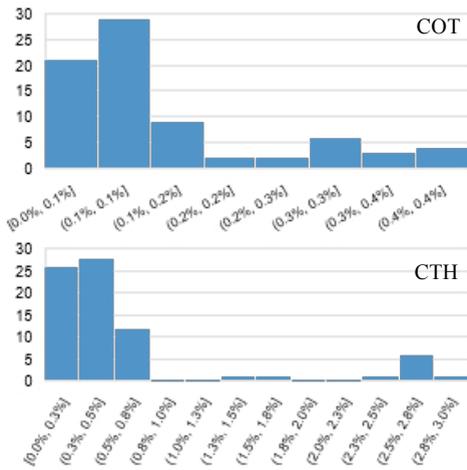


Figura 5. Histograma de errores relativos entre los valores obtenidos de COT (arriba) y CTH (abajo) y los valores usados para generar las medidas sintéticas.

4. DISCUSIÓN

Las simulaciones de la sección anterior arrojan varias conclusiones del modelo de transferencia radiativa y del algoritmo de inversión necesarias para la cámara EPIC al extraer propiedades ópticas de nubes:

- Los modelos de transferencia radiativa aproximados tienen errores mayores que la aplicación exacta del modelo DOME con LBL. Para la teoría asintótica de orden 4 el error relativo máximo en las radiancias es del 4%; para el modelo de nube lambertiana equivalente este error asciende hasta el 40%. El uso exacto de DOME con LBL acota estos errores a menos del 2%. Por lo tanto, es preferible no usar los modelos aproximados y usar en su lugar DOME exacto.
- Cuando el cálculo LBL en DOME es sustituido por la combinación de distribución-k con PCA, se observa que la estructura de los errores relativos para las radiancias no cambia significativamente. Esto es relevante porque el tiempo de computación de los dos casos es significativamente distinto. El cálculo LBL para todos los puntos de la Figura 2 superior

(6 ángulos de observación, 16 valores de COT) duró 28,5 horas (*user time*), y el cálculo con distribución-k más PCA solamente 5 minutos.

- Es indiferente usar LDOME o FADOME para hallar las derivadas parciales de las radiancias con respecto a las propiedades ópticas de nubes, ya que sus resultados se pueden considerar equivalentes, pero de nuevo el tiempo de computación es crucial. En general, FADOME es un 50% más rápido que LDOME. La combinación de FADOME con las técnicas de aceleración anteriores da un tiempo de computación de 3,5 minutos para el cálculo de las derivadas parciales de la Figura 4 izquierda (con 1 ángulo de observación, 16 valores de COT y un valor de CTH) y 2,5 minutos para las derivadas parciales de la Figura 4 derecha (con 1 ángulo de observación, 1 valor de COT y 11 valores de CTH).
- Un algoritmo de inversión basado en regularización de Tikhonov para problemas mal definidos permite recuperar propiedades ópticas de nubes partiendo de las radiancias observadas por el sensor para tales circunstancias. Estas propiedades ópticas de nubes son halladas para SNR 100 con una incertidumbre inferior al 3% para la altura de la nube en la cima y al 0,5% para el espesor óptico de nubes en el conjunto de medidas sintéticas analizadas.

5. BIBLIOGRAFÍA

Efremenko, D.S., Molina García, V., Doicu, A., Gimeno García, S., Doicu, A. 2017. A review of the matrix-exponential formalism in radiative transfer, *Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer*, 196, 17-45. doi: 10.1016/j.jqsrt.2017.02.015

Kuze, A., Chance, K.V. 1994. Analysis of cloud top height and cloud coverage from satellites using the O₂ A and B bands, *Journal of geophysical research*, 99(D7), 14481-14491. doi: 10.1029/94jd01152

Marchuk, G.I. 1995. *Adjoint equations and analysis of complex systems*, Springer Nature, Netherlands. doi: 10.1007/978-94-017-0621-6.

Molina García, V., Sasi, S., Efremenko, D.S., Doicu, A., Loyola, D. 2017. An offline processor for retrieval of cloud parameters from EPIC measurements. *Radiative transfer models*, In preparation.

Neubauer, A. 1989. Tikhonov regularisation for non-linear ill-posed problems: optimal convergence rates and finite-dimensional approximation, *Inverse Problems* 5(4), 541-557.

Schuessler, O., Loyola Rodriguez, D.G., Doicu, A., Spurr, R. 2014. Information content in the oxygen A-band for the retrieval of macrophysical cloud parameters, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 52(6), 3246-3255. doi: 10.1109/tgrs.2013.2271986

Integración de MODIS en el modelo de balance de energía STSEB para su aplicación operativa a escala regional

Sánchez, J. M. ⁽¹⁾, Galve, J. M. ⁽¹⁾, Bisquert, M. ⁽¹⁾, Valor, E. ⁽²⁾, Caselles, V. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dpto. Física Aplicada e Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha, 02071 Albacete.
juanmanuel.sanchez@uclm.es, joanmiquel.galve@uclm.es

⁽²⁾ Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia.
enric.valor@uv.es, vicente.caselles@uv.es

Resumen: En este trabajo se extiende la aplicación del modelo de balance de energía STSEB a imágenes Terra/MODIS. Se presenta una metodología para la estimación operativa de mapas diarios de radiación neta, flujo de calor en el suelo, y flujos de calor sensible y latente. Para ello se emplean como *inputs* productos MODIS disponibles de temperatura de superficie y emisividad (MOD11_L2), albedo (MCD43B3), reflectividades en superficie (MOD09GA), y usos de suelo (MCD12Q1) con resoluciones espaciales entre 500 m y 1 km. Para las variables meteorológicas se recurre a los productos disponibles del *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) con una resolución espacial de 0,25° cada 3 horas. La cadena de procesado incluye un redimensionado de todos los *inputs* a una rejilla común de 1 km, y una interpolación temporal para ajustar los datos meteorológicos a la hora de paso del satélite por cada zona. A modo de ejemplo se han elaborado mapas de los diferentes términos del balance de energía en superficie sobre la Península Ibérica para una fecha concreta, con una resolución de 1 km. Los resultados se han comparado con el producto operativo proporcionado por el propio GLDAS a una resolución menor. Este trabajo muestra la viabilidad de extender la aplicación del modelo STSEB también a escala regional-global.

Palabras clave: Balance de energía, flujos energéticos, STSEB, MODIS, evapotranspiración.

Integration of MODIS data in the STSEB energy balance model for its operational application at a regional scale

Abstract: In this work, the STSEB model is adapted to be applied to Terra/MODIS imagery. We introduce an operational methodology to obtain daily maps of net radiation, soil heat flux, and sensible and latent heat fluxes. Available MODIS products of land surface temperature and emissivity (MOD11_L2), albedo (MCD43B3), surface reflectivity (MOD09GA) and land classification (MCD12Q1) are used, with spatial resolution ranging between 500 m and 1 km. The meteorological variables were extracted from the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) with a spatial resolution of 0.25 ° every 3 hours. All inputs were rescaled to a common grid of 1 km. A temporal interpolation was conducted to adjust the meteorological data to the satellite overpass time. As an example, maps of the different terms of the surface energy balance equation in the Iberian Peninsula were obtained for a specific date with 1-km resolution. Results were compared to the operational product provided by GLDAS at a coarser resolution. This work shows the feasibility to apply the STSEB model at regional-global scale too.

Keywords: Energy balance, energy fluxes, STSEB, MODIS, evapotranspiration

1. INTRODUCCIÓN

El balance de energía en superficie resulta fundamental en estudios climáticos, meteorológicos o hidrológicos, entre otros. Las medidas a nivel de suelo de los flujos de balance de energía tienen la limitación de tratarse de mediciones puntuales con la consecuente dificultad de capturar la variabilidad espacial de la superficie.

Gracias a la Teledetección es posible proporcionar medidas frecuentes y espacialmente continuas de las variables biofísicas necesarias para la estimación y seguimiento de los flujos energéticos a diferentes escalas.

El modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes (STSEB) permite la estimación de flujos energéticos en superficie combinando información de parámetros biofísicos y variables meteorológicas. Este modelo se ha aplicado en la última década con resultados satis-

factorios a escala local en una gran variedad de superficies y condiciones ambientales (Sánchez *et al.* 2008a,b) tanto en cultivos como en vegetación natural, empleando medidas radiométricas locales en superficie o estimadas mediante sensores espaciales de media resolución principalmente de la serie Landsat (Sánchez *et al.* 2008b). Sin embargo, la aplicación operativa del modelo a mayor escala, con fines meteorológicos o climáticos, requiere de imágenes de satélite que suministren una cobertura espacial más amplia y con frecuencia diaria, como por ejemplo el sensor MODIS.

El único producto operativo que existe actualmente con MODIS es el MOD16 (<http://ntsug.umd.edu/project/mod16>), que contiene información de la evapotranspiración diaria a escala de 1 km, en acumulados de 8 días.

En este trabajo hemos abordado el desafío de extender

la aplicación del modelo STSEB a escala MODIS para obtener imágenes de flujos energéticos de forma diaria. Para ello se ha trabajado con variables biofísicas obtenidas directamente con MODIS, y con información meteorológica distribuida proporcionada por el sistema global de asimilación de datos terrestres GLDAS.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Este trabajo se centra en la aplicación del modelo STSEB a imágenes MODIS/Terra de la Península Ibérica. A modo de ejemplo, se presenta la aplicación detallada de la metodología a la fecha concreta del 26 de Julio de 2010, por tratarse de un día con una cobertura nubosa muy baja para toda la Península.

2.1. Imágenes MODIS

La temperatura de la superficie (LST) es uno de los parámetros clave en los modelos de balance de energía en general, y en el STSEB en particular. El producto MOD11_L2 proporciona datos diarios de LST, además de emisividad, con una resolución espacial de 1 km, a una hora de paso, en nuestro caso, entorno a las 11:00 UTC (Figura 1). Para la georreferenciación de estas variables también se necesita del producto MOD03 que contiene información de latitudes y longitudes.

Otra de las variables clave para el balance de radiación neta es el albedo de la superficie. En este caso se recurrió al producto MCD43B3 de 8 días, también a 1 km de resolución (Figura 1). Para estimar la proporción de vegetación en cada píxel se utilizó información diaria de las reflectividades en las bandas del rojo (R) e infrarrojo (IR) contenida en el producto MOD09GA, en este caso a resolución de 0,5 km (Figura 1).

El modelo STSEB requiere también de una estimación de la altura de la cubierta vegetal (h) en cada píxel. Para ello se asignaron valores nominales a partir de la clasificación de usos de suelo del IGBP contenida en el producto MCD12Q1 (también a 0,5 km).

En el caso de los productos de albedo, reflectividades en superficie y clasificación de usos de suelo se hizo necesaria una reproyección de sinusoidal a UTM, WGS 84.

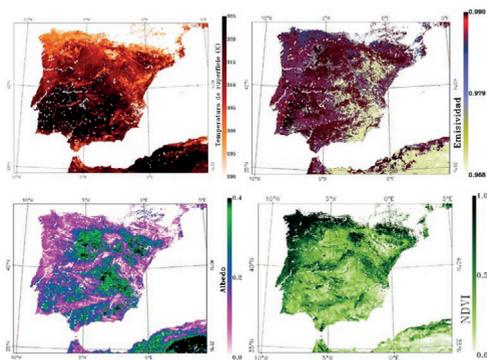


Figura 1. Imágenes de productos MODIS de la Península Ibérica: temperatura de superficie (LST), emisividad (ϵ), albedo (α) y NDVI.

2.2. Imágenes GLDAS

Una parte esencial en los modelos de balance de energía es la información de entrada necesaria correspondiente a variables meteorológicas. En concreto, el modelo STSEB precisa de datos de temperatura del aire (T_a), velocidad de viento (u), humedad relativa del aire (H_R), radiación solar incidente (R_s) y radiación de onda larga incidente (R_l). En trabajos anteriores a escala Landsat se recurrió a técnicas geoestadísticas para la interpolación de datos de estaciones agrometeorológicas distribuidas por la zona (Sánchez et al. 2008b). Sin embargo, a escalas mayores la distribución espacial de las variables meteorológicas de forma precisa supone un desafío, principalmente a la hora de automatizar los procesos. En este trabajo se utilizaron los productos suministrados por el sistema global de asimilación de datos terrestres, GLDAS (<http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/>). Estos productos contienen información de las distintas variables meteorológicas a intervalos de 3 horas, con cobertura global y resolución de $0,25^\circ$ (aproximadamente 25 km para nuestra latitud). Se realizó una interpolación tanto espacial como temporal para obtener estos productos a la hora de paso de MODIS, y al tamaño de píxel de 1 km (ver Figura 2).

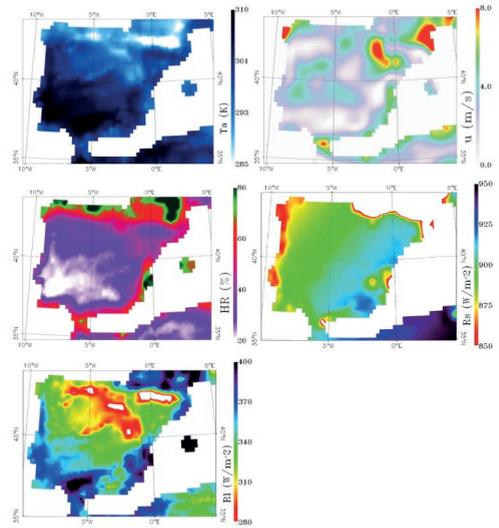


Figura 2. Mapas de productos GLDAS para la Península Ibérica: temperatura del aire (T_a), velocidad del viento (u), humedad relativa del aire (H_R), radiación solar incidente (R_s) y radiación de onda larga incidente (R_l).

2.3. Estimación de flujos energéticos instantáneos y ET diaria

El diagrama de flujo de la Figura 3 muestra, a modo de esquema, los diferentes pasos a seguir en el proceso de producción de mapas de flujos energéticos en superficie. Una vez listos y corregistrados todos los datos de variables biofísicas y parámetros meteorológicos necesarios, se ejecuta el código preparado en IDL del modelo

STSEB. Todos los detalles referentes a las distintas ecuaciones y las bases de este modelo simplificado de balance de energía pueden consultarse en Sánchez *et al.* (2008a,b). Las salidas del modelo son mapas a 1 km de los diferentes términos de la ecuación de balance de energía: radiación neta (R_n), flujo de calor en el suelo (G), y flujos turbulentos de calor sensible (H) y calor latente (LE). Éstos son flujos instantáneos a la hora de paso del sensor MODIS, en este caso. El modelo STSEB también incorpora una técnica para la estimación de los valores diarios de evapotranspiración real de la superficie (ET_d), a partir de los valores instantáneos de los flujos energéticos.

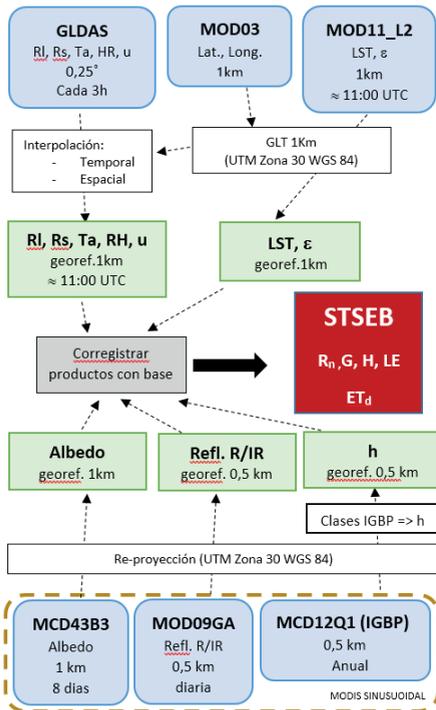


Figura 3. Diagrama de flujo de las diferentes etapas y procesos dentro de la metodología descrita.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 recoge los resultados de los mapas de R_n , G , H y LE para la fecha de estudio, mientras que el mapa de ET_d se muestra en la Figura 5. Con el fin de establecer una comparación con los productos de flujos GLDAS, también se han procesado las imágenes originales, siguiendo el procedimiento de interpolación espacial y temporal descrito en la sección 2.2, para obtener estos productos a la hora de paso de MODIS, y al tamaño de píxel de 1 km.

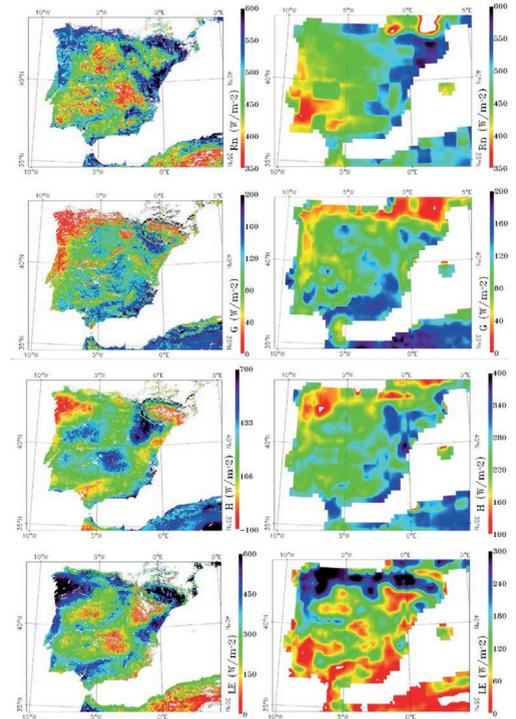


Figura 4. Mapas de flujos energéticos instantáneos para la Península Ibérica estimados mediante STSEB (columna izquierda) comparados con los productos GLDAS (columna derecha).

En primer lugar, es evidente el mayor nivel de detalle que se observa en los resultados STSEB. La resolución espacial de 1 km en los mapas de ET_d sigue siendo demasiado pobre para estudios agronómicos, sobre todo en zonas heterogéneas con parcelas de cultivo de pequeña-mediana extensión. Sin embargo, con esta resolución espacial ya sería posible poder hacer seguimiento, en términos medios, del balance de energía a escala de cuenca hidrográfica, o de zonas de especial protección ambiental. Desde luego, la metodología presentada en este trabajo tendrá su principal aplicación en estudios climáticos a nivel regional.

En la Figura 5 se aprecia como STSEB reproduce patrones similares a GLDAS, obteniéndose los valores más altos de ET en zonas del interior de Galicia, Cantábrico y Pirineos, y detectándose claramente las zonas más áridas de ambas Castillas, Aragón y zonas del sureste peninsular. Las diferencias que se aprecian en términos absolutos pueden deberse precisamente a los efectos del mayor nivel de resolución conseguido, ya que al empeorar la resolución espacial siempre se tienden a suavizar los valores pico.

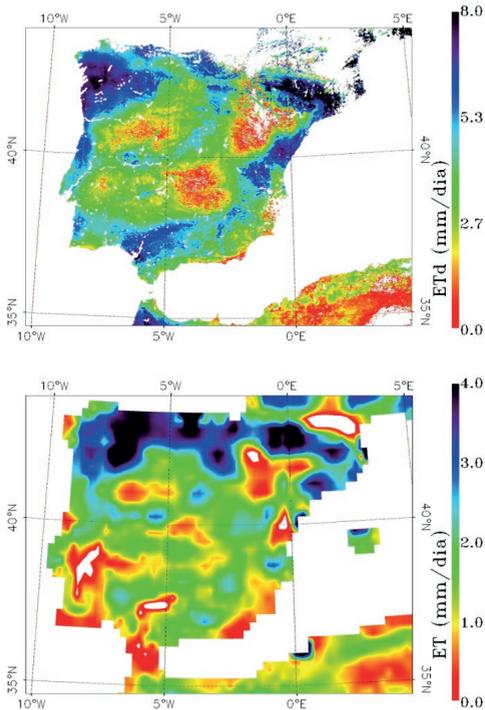


Figura 5. Mapas de evapotranspiración real diaria (ET) para la Península Ibérica estimados mediante STSEB (superior) comparado con el producto GLDAS (inferior).

En la gráfica de la Figura 6 se muestra la comparación de los resultados promedio de los distintos flujos energéticos instantáneos para la Península Ibérica obtenidos mediante STSEB y GLDAS. Las barras de error representan la desviación estándar de los promedios de toda la imagen, siendo mayores en el caso de STSEB, consecuencia de la mayor resolución espacial, y por tanto mayor variabilidad, de los mapas generados. En próximos trabajos habrá que analizar qué ocurre al aplicar la metodología a series temporales más largas, involucrando variedad de condiciones ambientales y estacionales, y estableceremos una comparación con otros productos ya de forma más robusta.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo debe entenderse como un primer paso en el intento de extender la aplicación del modelo de balance de energía STSEB más allá de las imágenes Landsat, con el objeto de tratar de automatizar la metodología y obtener productos diarios de flujos energéticos en superficie, y evapotranspiración, a escala regional a resolución espacial de 1 km.

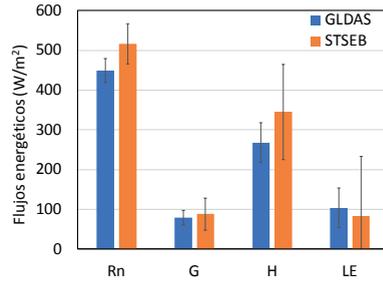


Figura 6. Comparación de los promedios de los flujos energéticos instantáneos para la Península Ibérica estimados mediante STSEB y GLDAS.

Teniendo en cuenta el desafío que supone la integración de datos biofísicos y meteorológicos de distintas fuentes, y lo complejo de ciertos procesos de reproyección, interpolación y rescalado de imágenes, consideramos que los resultados obtenidos son buenos y esperanzadores. En próximos trabajos mostraremos la aplicación ya operativa y automatizada de la metodología a series largas de imágenes MODIS.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea H2020 a través del proyecto FATIMA (Ref. 633945) y por el Ministerio de Economía y Competitividad, junto con el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través de los proyectos CGL2013-46862-C02-1/2-P y AGL2015-68700-R.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Sánchez, J.M. *et al.* 2008a. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1130-1143.
- Sánchez, J.M. *et al.* 2008b. Monitoring daily evapotranspiration at a regional scale from Landsat-TM and ETM+ data: Application to the Basilicata region. *Journal of Hydrology*, 351, 58-70.

Comparación entre las temperaturas de superficie obtenidas con MODIS y las temperaturas *in situ* medidas en la península Hurd, isla Livingston, Antártida: Primeros resultados

Recondo, C. ⁽¹⁾, Peón, J. ⁽¹⁾, Pendás, E. ^(1,2), de Pablo, M. A. ⁽³⁾, Calleja, J. F. ⁽⁴⁾, Fernández, S. ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Grupo *Remote Sensing Applications* (RSApps). Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C/ Gonzalo Gutiérrez Quirós, s/n, 33600 Mieres, Asturias, España. mdrecondo@uniovi.es, juanjopeon@gmail.com

⁽²⁾ AEMET-Galicia. C/ Canceliña 8, 15011 A Coruña, Galicia, España. enrique@pendas.es

⁽³⁾ Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. Campus Científico-Tecnológico. Ctra. A-II Km 33.6, 28871 Alcalá de Henares, Madrid, España. miguelangel.depablo@uah.es

⁽⁴⁾ Grupo *Remote Sensing Applications* (RSApps). Departamento de Física. Universidad de Oviedo. Campus de Oviedo (Llamaquique). C/ Calvo Sotelo s/n, 33007 Oviedo, Asturias, España. jfcalleja@uniovi.es

⁽⁵⁾ Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. Campus de Oviedo (Llamaquique). C/ Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, Asturias, España. fernandezmsusana@uniovi.es

Resumen: En el marco del proyecto PERMASNOW estamos comparando los datos térmicos MODIS (*LST*, 1-km) con los obtenidos *in situ* (T_a y T_s) en las estaciones meteorológicas de la AEMET y las propias del proyecto en la península Hurd, isla Livingston (Antártida). Este trabajo muestra los primeros resultados obtenidos para las estaciones de la AEMET: Juan Carlos I (JCI), Glaciar Johnson (GJ) y Glaciar Hurd (GH) en el periodo marzo-2000/julio-2002 y febrero-2016. Se comparan los datos diarios *LST* con los valores medios diarios de T_a y T_s . Se observa una alta correlación lineal entre T_a y T_s , restringiéndose entonces la comparación a T_a . Se confirma también la tendencia lineal ligeramente decreciente de T_a en el periodo estudiado. Aunque la nubosidad limita la disponibilidad de datos *LST*, sin embargo, el mayor problema proviene de la calidad de los datos *LST*, observando que los que no son de “good quality” generalmente subestiman mucho *LST* y no son fiables. El producto MODIS-albedo diario (500-m) nos ayuda a mejorar el filtrado de datos de “other quality” y “cloud”, además de clasificar la cubierta en tierra (con/sin nieve) o agua (nieve/hielo fundido). El filtrado reduce a un 3-8% los días con datos disponibles en JCI y GJ y elimina todos en GH. Un ajuste lineal simple no explica bien la relación *LST* (tierra/agua)- T_a ($R^2=0,1-0,4$), recurriendo a regresiones lineales múltiples para tener en cuenta las variaciones anuales/estacionales en esta relación. Así R^2 sube a 0,3-0,6, siendo mejor en JCI ($R^2=0,6$ y $RSE\sim 2^\circ C$). Se concluye que los datos *LST*-MODIS sirven para estimar tendencias a largo plazo en T_a a nivel global en la isla Livingston. Mejorar la calidad de los datos *LST* en este tipo de ambientes fríos es esencial.

Palabras clave: Temperatura de la superficie terrestre (*LST*), MODIS, temperatura del aire (T_a) temperatura superficial del suelo (T_s), permafrost, Antártida.

Comparison of MODIS-derived land surface temperatures with in situ temperatures measured in the Hurd Peninsula, Livingston Island, Antarctica: First results

Abstract: In the framework of the PERMASNOW project, we are comparing the MODIS thermal data (*LST*, 1-km) with those obtained *in situ* (T_a and T_s) at the AEMET meteorological stations and the project's stations in the Hurd Peninsula, Livingston Island (Antarctica). This article shows the first results obtained at the AEMET stations: Juan Carlos I (JCI), Glacier Johnson (GJ) and Glacier Hurd (GH) in the period of March-2000/July-2002 and February-2016. The daily *LST* data are compared with the daily mean values of T_a and T_s . A high linear correlation between T_a and T_s is observed, and thus, the comparison being restricted to T_a . The slightly decreasing linear trend of T_a in the studied period is also confirmed. Although the cloudiness limits the availability of *LST* data, however, the main problem proceeds from the quality of the *LST* data, observing that those with no “good quality” usually underestimate *LST* and are not reliable. The daily MODIS albedo product (500-m) helps us to improve the filtering of data with “other quality” and “cloud”, besides of classifying the cover in land (with/without snow) or water (melting snow/ice). The filtering reduces to 3-8% the days with available data at JCI and GJ, and eliminates all of them in GH. A simple linear fit does not explain well the relationship *LST* (land/water)- T_a ($R^2=0.1-0.4$), appealing to multiple linear regressions to take into account the annual/seasonal variations in this relationship. So, R^2 goes up to 0.3-0.6, being better at JCI ($R^2=0.6$ and $RSE\sim 2^\circ C$). It is concluded that the MODIS-*LST* data are useful for estimating long-term trends in T_a at a global level in the Livingston Island. Improving the quality of the *LST* data in this type of cold environments is essential.

Keywords: Land surface temperature (*LST*), MODIS, air temperature (T_a) soil surface temperature (T_s), permafrost, Antarctica.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático que sufre la Antártida es extremadamente complejo tanto a escala espacial como temporal. Medidas de la temperatura del aire (T_a) en 19 estaciones con largos periodos de registro de datos bajo el proyecto READER (*Reference Antarctic Data for Environmental Research*), mostraron que la Península Antártica (PA) se había calentado entre 1950-2000 a un ritmo de hasta 0,56 °C/década (estación Faraday/Vernadsky), mientras que el interior continental se había enfriado ligeramente y las estaciones costeras, unas se habían calentado y otras enfriado (Turner et al., 2005). Steig et al. (2009) ampliaron el estudio a 107 estaciones con datos de T_a y usaron también datos térmicos (*Land Surface Temperature*, LST) NOAA-AVHRR para concluir que ambos tipos de datos mostraban resultados similares y un significativo calentamiento de la Antártida Oeste, que excedió los 0,1°C/década entre 1957-2006. Estudios recientes, sin embargo, muestran que la mayoría de las estaciones en la PA están enfriándose desde 1998/1999 (Oliva et al., 2017). El seguimiento del comportamiento térmico (y del *permafrost* o suelo congelado, cobertura nival, etc.) es esencial para entender y prever los cambios en la Antártida. Y para ello se debe actuar tanto tomando datos de campo o *in situ* como datos desde satélites, ya que ambos tienen limitaciones (datos locales en el primer caso y falta de datos por nubosidad en el segundo) y ventajas (registros continuos de datos en el primer caso y amplia cobertura espacial en el segundo). Bajo esta perspectiva trabajamos en el proyecto PERMASNOW (de Pablo et al., 2016) en las islas Livingston (penínsulas Byers y Hurd) y Decepción (Antártida). En estas islas (pertenecientes a las islas Shetland del Sur, situadas a unos 120 km de las costas de la PA y en su lado Oeste), se encuentran las bases antárticas españolas (BAE) Juan Carlos I (en la península Hurd de la isla Livingston) y Gabriel de Castilla (isla Decepción), y en el entorno de ambas el equipo de la Universidad de Alcalá trabaja desde 1991, y especialmente desde 2006, con la instalación de estaciones de monitorización incluidas en las redes de la Asociación Internacional del Permafrost. Además del trabajo de campo, en este nuevo proyecto (entre 2015-2019) se analizarán imágenes ópticas, radar (Jiménez et al., 2017), y térmicas, siendo éstas últimas, en concreto los datos térmicos del sensor MODIS, con una serie ya larga de datos, los usadas en este trabajo.

No existen muchos trabajos de comparación entre los datos MODIS-LST y los de T_a y/o temperatura del suelo (T_s) en las zonas polares, especialmente en la Antártida. Wan (2014) incluyó la T_s del Polo Sur sólo en la evaluación de la versión 6 (V6) del producto MODIS-LST, obteniendo un error de -0,5°C. Fréville et al. (2014) evaluaron la V5 (sólo con datos “good quality”) en la meseta antártica y su costa NE, obteniendo $R^2=0,69-0,97$ y $RMSE=2,2-7,5^\circ\text{C}$, con los mejores resultados en la meseta, siendo, en general, $LST < T_s$ hasta en -3°C . La mayoría de los trabajos de comparación entre MODIS-LST y T_a en zonas polares encuentran correlación entre ambas temperaturas, aunque ésta es variable dependiendo

de las estaciones. En la Antártida Este, Wang et al. (2013) encontraron mayor correlación en las estaciones del lado este ($R^2=0,83-0,98$) que en las del oeste ($R^2=0,41-0,83$), usando Terra diurnas y nocturnas, indicando que los valores de R^2 eran similares para ambas. Obtuvieron errores entre $SD=1,3-8,5^\circ\text{C}$, siendo $LST < T_a$.

En lo que conocemos, trabajos similares con MODIS no se han realizado en las islas Shetland del Sur. Por ello abordamos este trabajo. El objetivo es comparar los datos MODIS-LST con los de T *in situ* (T_a y T_s) tanto de las estaciones propias del grupo como de las estaciones de la AEMET. La instrumentación del grupo se detalla en de Pablo et al. (2016) y la de la AEMET en Bañón y Vasallo (2015), aunque en ambos casos son estaciones automáticas de T , que se mantienen y cuyos datos se recogen en el verano antártico, cuando están activas las BAE. El error en T es 0,2°C en ambos casos, mientras que para T_s es 0,2°C en las de la AEMET y 0,5°C en las del grupo. Como no existen datos MODIS-LST en la isla Decepción ni en la península Byers de la isla Livingston (los píxeles son enmascarados como agua), nos ceñiremos a la península Hurd de la isla Livingston. El objetivo final pretendido es encontrar algoritmos de estimación de la T_a (o T_s) a partir de los datos LST en estos ambientes polares, como ha sido posible en otras zonas más cálidas, por ejemplo, en España (Recondo et al., 2013; Peón et al., 2014), para extrapolar los resultados espacialmente a toda la isla Livingston o incluso a otras islas y poder realizar mapas temporales de temperatura. Otro objetivo es aprender lo que aportan los datos LST de los sensores actuales, como MODIS, así como sus limitaciones en estos ambientes fríos, para ver cómo se pueden mejorar los sensores futuros. Como primeros resultados mostramos aquí las comparaciones con los datos de la AEMET (T_a).

2. ÁREA DE ESTUDIO

Nuestro estudio se centra en la península Hurd de la isla Livingston, una de las áreas donde trabaja el equipo del proyecto PERMASNOW (Figura 1).

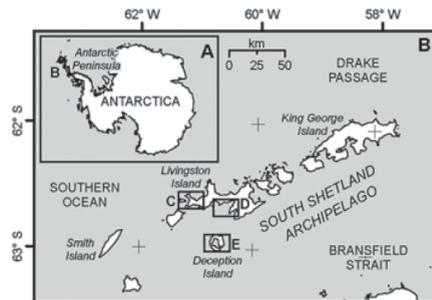


Figura 1. Área de estudio del proyecto PERMASNOW: penínsulas Byers (Área C) y Hurd (D) de la isla Livingston y la isla Decepción (E). Imagen de de Pablo et al. (2016)

3. DATOS

Los datos de T_a y T_s son los obtenidos en las estaciones de la AEMET: Juan Carlos I (JCI), Glaciar Johnson (GJ) y Glaciar Hurd (GH) (Tabla 1). En realidad, la estación GJ estuvo operativa hasta el 24/01/2015, que fue trasladada al lóbulo Hurd y llamamos desde entonces GH. En JCI se obtienen datos cada 10 minutos (10^m) a lo largo de todo el año, mientras en GJ y GH son cada 10^m en el verano antártico (entre diciembre y febrero) y cada media hora ($0,5^h$) el resto del año.

Tabla 1. Localización, altitud y fechas de operatividad de las estaciones antárticas de la AEMET usadas.

Estación	Latitud	Longitud	h (m)	Fechas
JCI	62°39'47"S	60°23'16"W	12	16/02/1988 Actualidad
GJ	62°40'16"S	60°21'51"W	178	01/12/2006 24/01/2015
GH	62°41'48"S	60°24'44"W	93	25/01/2015 Actualidad

Los productos MODIS-LST son los diarios de 1 km de resolución espacial, tanto de Terra (desde el 05/03/2000) como de Aqua (desde el 08/07/2002) y tanto diurnos como nocturnos (MOD11/MYD11, V5). Además, se usaron los productos MODIS-albedo diarios de 500 m (MOD10/MYD10), con su clasificación de la cubierta de cada píxel en nieve, tierra (no nieve), agua y nube, para mejorar la discriminación de las nubes y comprobar si la cubierta influye en los resultados. Ambos productos tienen datos de calidad (QC o QA).

La comparación con los datos de la AEMET se hizo hasta el 21/02/2016, cuando terminó la campaña antártica 2015/2016, es decir, se han comparado 16/14 años de datos conjuntos MODIS-AEMET.

4. METODOLOGÍA

Se obtuvieron las T_a y T_s medias diarias para cada estación siempre que el registro de datos diarios estuviese completo ($n=144$ datos para los datos de 10^m y $n=48$ para los de $0,5^h$). Los datos MODIS usados fueron extraídos en la localización de cada estación a través de *Google Earth Engine* (<http://earthengine.google.org>) con su *Application Programming Interface* (API) (<https://code.earthengine.google.com/>). El análisis estadístico y los gráficos se realizaron con el software libre R (<http://www.r-project.org/>). La mayoría de las comparaciones T -LST están basadas en regresiones lineales simples o múltiples, en todos los casos usando regresiones robustas con la librería MASS en R. Se usan los parámetros estadísticos típicos de R^2 y RSE (*residual standard error*) para cuantificar la bondad del ajuste del modelo. En este artículo sólo se presentan los modelos obtenidos, que no se han validado todavía.

5. RESULTADOS

5.1. Comparación entre T_a y T_s

Aunque T_s y LST son medidas distintas que T_a , si existe una fuerte correlación entre T_s y T_a , significa que

también la habrá entre T_a y LST, y que podría estimarse T_a (medida más usual en las estaciones) a partir de LST. Para demostrar esto, hemos estudiado la correlación entre las T_a y T_s medias diarias de las estaciones (desde el 2000). La comparación muestra que ambas tienen un comportamiento similar de tipo sinusoidal, variando en fase y con similar amplitud. Se observa también en ambas una tendencia lineal ligeramente decreciente con el tiempo en la mayoría de las estaciones desde el año 2000 (p. ej., para T_a entre $-0,08t$ y $-1,1t$), confirmando lo observado ya por el equipo en proyectos anteriores. T_a y T_s están fuertemente correlacionadas ($R^2=0,80$ en JC y GH, y $R^2=0,66$ en GJ, con pendiente lineal, $a \sim 1$ y $RSE \sim 1^\circ C$ en todas ellas (Figura 2). En general $T_a < T_s$, aunque la diferencia entre ambas ($< 1^\circ C$) está dentro del error del ajuste (RSE). En GJ, el ajuste es mejor con sólo los datos de 10^m del verano antártico ($R^2=0,78$).

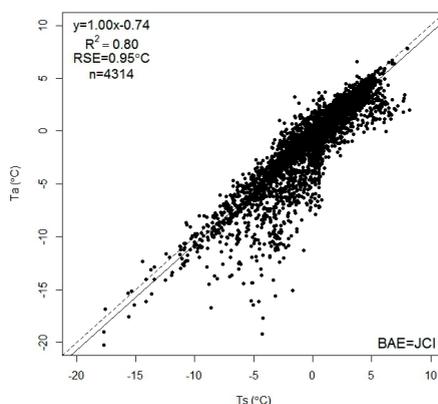


Figura 2. Ejemplo de ajuste lineal entre las T_a y T_s medias diarias: en JCI entre 01/01/2000 y 21/02/2016.

Dado este resultado, nos ceñiremos de momento a T_a para su comparación con la LST de MODIS.

5.2. Comparación entre T_a y LST

La disponibilidad de datos MODIS-LST en el área de estudio es limitada, debido a la frecuente cobertura nubosa. Así, sólo hay datos en un 24-35%, 18-28% y 3-13% de los días estudiados en JCI, GJ y GH, respectivamente (correspondiendo los menores valores a los datos nocturnos), frente a un 82-87%, 98% y 100% para T_a , respectivamente. Sin embargo, el mayor problema proviene de la calidad (QC) de los datos LST disponibles, ya que aquellos de peor calidad de acuerdo con Wan (2006) muestran que $LST \ll T_a$, de forma que sólo los datos de "good quality" son fiables y son los seleccionados (Figura 3). Además, la calidad (QA) y la clasificación del producto MODIS-albedo nos ayuda a filtrar los datos de "other quality" and "cloud", mientras que los datos de "snow-covered land", "snow-free land" and "open-water" (en nuestro caso nieve fundida) se han mantenido juntos en el análisis porque su relación T_a -LST es similar. Los filtros aplicados (especialmente el de la calidad de los

datos LST) reduce significativamente el número de datos considerados como “good”, en términos de porcentajes de días con datos, al 3-8%, 4% y 0% en JCI, GJ y GH, respectivamente. En GH se eliminan todos los datos.

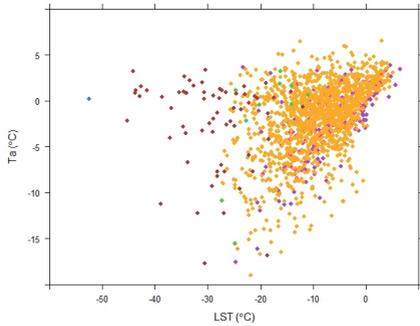


Figura 3. Ejemplo de relación T_a -LST para los datos Terra diurnos en JCI mostrando los distintos códigos de calidad (QC) en colores (color rosa: “good quality”)

Un ajuste lineal simple con los datos “good” no explica bien la relación T_a -LST ($R^2=0,1-0,4$) (Figura 4).

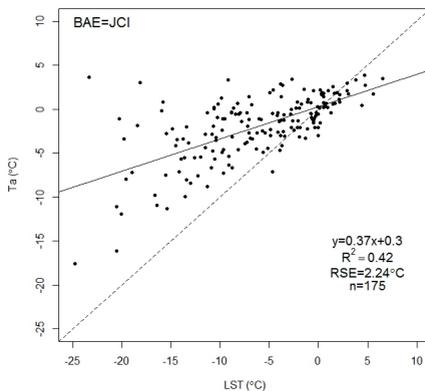


Figura 4. Ejemplo de ajuste lineal T_a -LST para los datos Terra diurnos “good” en JCI

Recurrimos entonces a regresiones lineales múltiples para tener en cuenta las variaciones anuales/estacionales en la relación T_a -LST. Así, para estimar T_a incluimos, además de LST, el tiempo (t) en forma lineal y con dos armónicos, en los primeros modelos probados. Con ellos R^2 sube a 0,3-0,6, con RSE entre 2-3 °C, siendo mejor los ajustes para JCI ($R^2=0,5-0,6$, $RSE=2,1-2,3^\circ\text{C}$, $n=125-355$) que para GJ ($R^2=0,3-0,5$, $RSE=1,7-2,7^\circ\text{C}$, $n=53-55$). Sobre todo para JCI no se observa gran diferencia en términos de R^2 y RSE entre los datos de Terra y de Aqua, ni entre los diurnos y los nocturnos.

6. CONCLUSIONES

En la zona y el periodo de estudio se observa una correlación moderada entre la T_a media diaria de las estaciones y la LST de MODIS. La falta de datos LST debido a la nubosidad es una limitación importante, pero

más aún el que la mayoría de los datos disponibles no sean de buena calidad, lo que debería mejorar en los sensores futuros. Aun así, los datos LST adecuados pueden servir para estimar tendencias a largo plazo y hacer mapas a escala global de la isla Livingston.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), a través del proyecto PERMASNOW (CTM2014-52021-R).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Bañón, M., Vasallo, F. 2015. *AEMET en la Antártida: Climatología y meteorología sinóptica en las estaciones meteorológicas españolas en la Antártida*. AEMET, 150 p. ISBN: 978-84-7837-093-1
- de Pablo, M.A., et al. 2016. Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: Instrumentation, effects on ground thermal behaviour and future research. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(2), 475-495.
- Fréville, H., et al. 2014. Using MODIS land surface temperatures and the Crocus snow model to understand the warm bias of ERA-Interim reanalyses at the surface in Antarctica. *The Cryosphere*, 8, 1361-1373.
- Jiménez, J., et al. 2017. Imágenes Radar de alta resolución para la caracterización de la cobertura nival en la Isla Decepción (Antártida Marítima). *Nuevas plataformas y sensores de teledetección. Actas del XVI congreso científico de la AET*.
- Oliva, M., et al. 2017. Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Sci Total Environ*, 580, 210-223.
- Peón, J., et al. 2014. Improvements in the estimation of daily minimum air temperature in peninsular Spain using MODIS land surface temperature”. *Int J Remote Sensing*, 35(13), 5148-5166.
- Recondo, C. et al. 2013. Empirical models for estimating daily surface water vapour pressure, air temperature, and humidity using MODIS and spatiotemporal variables. Applications to peninsular Spain”. *Int. J. Remote Sensing*, 34(22), 8051-8080.
- Steig, E.J. et al. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457, 459-463.
- Turner, J. et al. 2005. Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25, 279-294.
- Wan, Z. 2006. *Collection-5. MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide, Sep 2006*. http://www.icess.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_C5.pdf
- Wan, Z. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product Remote Sens. *Environ.*, 140, 36-45
- Wang, Y. et al. 2013. A comparison of MODIS LST retrievals with in situ observations from AWS over the Lambert Glacier Basin, East Antarctica, *Int. J. Geosci.*, 4, 611-617.

Validación de un producto de precipitación global cercano a tiempo real para el seguimiento de extremos meteorológicos

Cánovas-García, F. ⁽¹⁾, García Galiano, S. ⁽¹⁾, Karbalaee, N. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Unidad Predepartamental de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, Cartagena 30203 (España). fulgencio.canovas@upct.es, sandra.garcia@upct.es

⁽²⁾ Civil and Environmental Engineering Department, Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS), University of California Irvine (EE.UU.). nkarbala@uci.edu

Resumen: El seguimiento en tiempo real de una tormenta es relevante en la gestión y prevención de los riesgos frente a avenidas. Sin embargo, es posible que la densidad de las redes de pluviómetros automáticos presentes en un territorio no sea suficiente para caracterizar adecuadamente la distribución espacial ni las altas intensidades de precipitación alcanzadas durante determinadas tormentas. Los productos de precipitación estimada desde satélite tales como PERSIANN-CCS (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Cloud Classification System*) podrían complementar las redes pluviométricas y solventar este problema. En este trabajo se presenta una metodología de validación horaria del producto PERSIANN-CCS empleando 45 estaciones pluviométricas automáticas de la red SIAM (Sistema de Información Agraria de Murcia, IMIDA), para un episodio tormentoso de elevado periodo de retorno. Se han llevado a cabo contrastes entre los hietogramas obtenidos desde teledetección y los correspondientes a los registrados por los pluviómetros, evaluando estadísticos como el sesgo, la diferencia media cuadrática y el coeficiente de correlación de Pearson. Si bien en algunos casos la distribución temporal de la precipitación es capturada satisfactoriamente por PERSIANN-CCS, en varios pluviómetros las altas intensidades han sido subestimadas. La tormenta ha sido correctamente identificada por las imágenes de precipitación satelital, siendo la estimación cuantitativa de la precipitación la que presenta subestimaciones en varios casos. Como principal conclusión, se destaca la necesidad de una calibración local específica para el área de estudio en el caso de que se pretenda utilizar PERSIANN-CCS como una herramienta operativa para el seguimiento en tiempo cercano al real de fenómenos meteorológicos extremos.

Palabras clave: PERSIANN-CCS, precipitación satelital, episodios extremos, Sureste Español.

Validation of global satellite rainfall product for real time monitoring of meteorological extremes

Abstract: *The real time monitoring of storms is relevant in the management and prevention of flood risks. However, due to high spatio-temporal variability of typical storms of Southeast of Spain, the density of the rain gauge network could be not enough to represent the spatial distribution and high intensities of rainfall during the storms. The satellite rainfall estimates (SREs) such as PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Cloud Classification System), could complement the rain gauges networks and solve this issue. Nevertheless, this product is recently released, and there are not enough works to validate its potential as an operational real time rainfall product, for regions such as the Southeast of Spain. In this work, a methodology is proposed for hourly validation close to real time of the PERSIANN-CCS product, using 45 automatic rain gauges provided by SIAM network (System of Agricultural Information of Murcia, IMIDA) for the storm of 17th-19th Dec 2016 registered in the East and South East of Iberian Peninsula. Several contrasts were made between the hyetographs registered by the automatic rain gauges and PERSIANN-CCS, analyzing statistics such as bias, root mean square difference and Pearson's correlation coefficient. In some cases the temporal distribution of rainfall is well captured by the SRE product, however in general the quantitative estimation of the total rainfall of episode is underestimated. As main conclusion, it is remarkable the need of specific calibration for the study area in the case of operational use close to real time of PERSIANN-CCS product to monitor meteorological extremes.*

Keywords: *PERSIANN-CCS, satellite rainfall, meteorological extremes, South East of Spain.*

1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento en tiempo real de una tormenta es relevante en la gestión y prevención de los riesgos frente a avenidas. De forma más general la cuestión sobre la exactitud de las estimaciones cuantitativas de precipitación (QPE) es un tema de cierta relevancia en Ciencias de la Tierra.

La mayor parte de las áreas del mundo poseen una red de observatorios meteorológicos insuficiente para obtener información adecuada para la gestión de recursos y el manejo de catástrofes. Este hecho es quizás más relevante en zonas áridas y semiáridas, con tormentas de tipo convectivo.

Sin embargo, en el ámbito espacial de esta investigación aun siendo un territorio densamente ocupado, la

existencia de una red de estaciones meteorológicas puede no ser suficiente para caracterizar adecuadamente la distribución espacial del fenómeno estudiado. Especialmente cuando se trata de eventos tormentosos con intensidades extremadamente altas en un corto periodo de tiempo y muy localizadas.

Las estimaciones cuantitativas de precipitación procedentes de imágenes de satélite (SRE) pueden ser una alternativa a las medidas puntuales y discretas de la red de pluviómetros. Estos productos de precipitación obtenidos desde satélites se han convertido en una valiosa herramienta para obtener estimaciones de precipitación de carácter continuo en distintas escalas temporales (Ballari et al., 2016) y espaciales. Es de destacar que las SRE en la actualidad presentan las siguientes características que las hacen potencialmente muy atractivas para distintas aplicaciones medioambientales: (i) cobertura cercana a global (normalmente abarcan todas las longitudes planetarias y unas latitudes comprendidas entre los 60°N y 60°S); (ii) longitud de registros, en algunos casos se comienza a disponer de series temporales suficientemente largas para estudios climáticos (al menos 30 años); (iii) carácter continuo de la estimación de la precipitación; y por último (iv) su disponibilidad es independiente de las condiciones ambientales del área de estudio, algo de crucial importancia cuando las SRE se obtienen en tiempo real durante episodios de fenómenos meteorológicos extremos.

Hay varios tipos de SRE, sin ánimo de ser exhaustivos se pueden citar PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Data Record*), PERSIANN-CCS (*Cloud Classification System*), CMORPH (*Climate Prediction Center morphing method*), TRMM *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA) 3B42RT y 3B42V6, entre otros (Chen et al., 2013). Entre las más recientes: *Convective Rainfall Rate* del NWC SAF (*Nowcasting and Very Short Range Forecasting*) o la amplia variedad de productos del *Precipitation Measurement Missions*.

Sin embargo, las SRE deberían ser validadas con medidas al suelo, como aquellas obtenidas por pluviómetros. Este es el objetivo de esta investigación, la comparación de la SRE como PERSIANN-CCS con las medidas proporcionadas por la red de pluviómetros SIAM (Sistema de Información Agraria de Murcia) en la Región de Murcia para el episodio de fuertes precipitaciones ocurrido a mediados de diciembre de 2016.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. El episodio de diciembre de 2016

Entre los días 15 al 19 de diciembre se registró el episodio de precipitación más importante del año 2016. La precipitación total del episodio fue de 320 mm en Sierra Espuña; y en 24 horas, se registraron hasta 166 mm en Torre Pacheco (AEMET, 2017). Se vieron particularmente afectados los territorios que drenan al

Mar Menor de Murcia, y muy especialmente el núcleo urbano de Los Alcázares.

2.2. PERSIANN-CCS y SIAM

En la actualidad PERSIANN-CCS provee estimaciones cuantitativas de precipitación con una resolución temporal de una hora y espacial de 0,04°, entre los 60°N y los 60°S en tiempo real y cadencia de una hora. Estas características son suficientes para aplicaciones hidrológicas a escala local (Yang et al., 2016).

Los datos PERSIANN-CCS se pueden descargar de forma libre del *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* (CHRS) de la Universidad de California-Irvine (EE.UU.).

La red SIAM es el conjunto de estaciones agrometeorológicas de la Región de Murcia, instaladas en zonas regables, cuyo objetivo es estimar la evapotranspiración de referencia y las necesidades de riego de los cultivos (IMIDA, s/f).

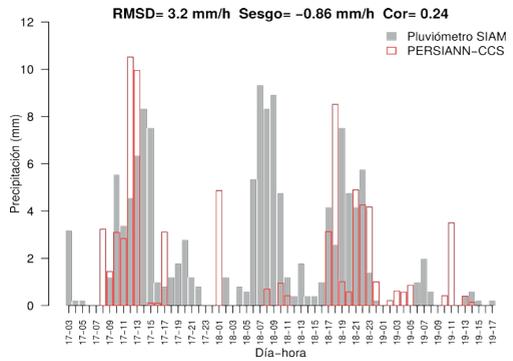


Figura 1. Hietogramas de los valores de PERSIANN-CCS y del pluviómetro en la estación AL31 de Totana.

2.3. Estadísticos para la comparación

Se han utilizado varios estadísticos para comparar los valores obtenidos con PERSIANN-CCS en la localización de cada pluviómetro de la red SIAM. Estos son la diferencia media cuadrática (RMSD), el sesgo y el coeficiente de correlación de Pearson. Además de manera gráfica se han analizado las diferencias obtenidas por medio de la comparación de los hietogramas PERSIANN-CCS y SIAM en dos estaciones pluviométricas.

La primera de ellas, la TP42, está localizada en el paraje Torre Blanca del término municipal de Torre Pacheco y es la estación de la red que más precipitación acumulada registró en el evento estudiado (285,3 mm).

La segunda, la AL31, se localiza en el paraje Lebor en el término municipal de Totana y es la estación cuya precipitación acumulada (129.7 mm) está más cerca al valor medio de precipitación acumulada calculada desde todas las estaciones de la red SIAM. También se han generado gráficos de dispersión precipitación SIAM y SRE por un lado, y de precipitación SIAM y diferencia de precipitación por otro. Por motivos de claridad en la

visualización, solo se han representado parejas de datos en los que al menos uno de los valores de precipitación sea mayor que 0.

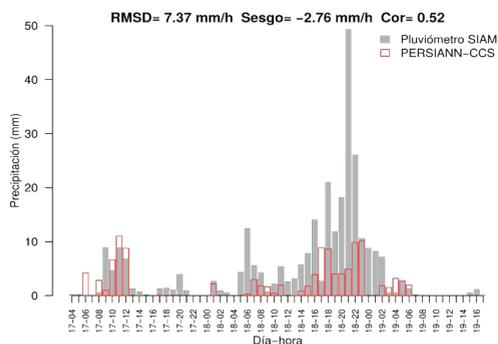


Figura 2. Hietogramas de los valores de PERSIANN-CCS y del pluviómetro en la estación TP42 de Torre Pacheco.

3. RESULTADOS

Desde el análisis de los hietogramas de las dos estaciones seleccionadas, se identifican diferencias notables entre los registros. En el caso de la estación AL31 (Figura 1) entre las 9 y las 15 horas del día 17 se producen fuertes precipitaciones que son representadas relativamente bien por PERSIANN-CCS, aunque con dos horas de adelanto. Sin embargo, las fuertes intensidades alcanzadas entre las 6 y las 10 horas del día 18 no han sido captadas por PERSIANN-CCS. La RMSD horaria es bastante alta (3,2 mm) y el sesgo indica que PERSIANN-CCS presenta subestimaciones, que como media alcanza 0,86 mm por hora.

En el caso de la estación TP42 (Figura 2) las diferencias entre PERSIANN-CCS y el registro pluviométrico, son aún mayores. Téngase en cuenta que las intensidades que se alcanzaron en este pluviómetro fueron extraordinariamente altas: entre las 21:00 y las 22:00 horas del día 18 se registraron 49,3 mm. Como en el caso anterior las elevadas intensidades alcanzadas en varios intervalos de tiempo no han sido captadas adecuadamente por PERSIANN-CCS. Tan solo en las primeras horas de la tormenta, entre las 8 y las 12 del día 17 son representadas de forma aceptable. La RMSD es muy alta (7,37 mm/h) y el sesgo indica que PERSIANN-CCS claramente subestima los valores de precipitación registrados por el pluviómetro SIAM.

En los hietogramas se puede apreciar que la subestimación no se produce a partir de la superación de cierto umbral de precipitación, ya que se aprecian varios intervalos de tiempo en que SIAM indica valores de intensidad por debajo de 5 mm/h y PERSIANN-CCS no provee valores de precipitación o bien ofrece valores de intensidad muy bajos.

Los gráficos de dispersión (Figura 3) representan en el eje de ordenadas la precipitación PERSIANN-CCS y

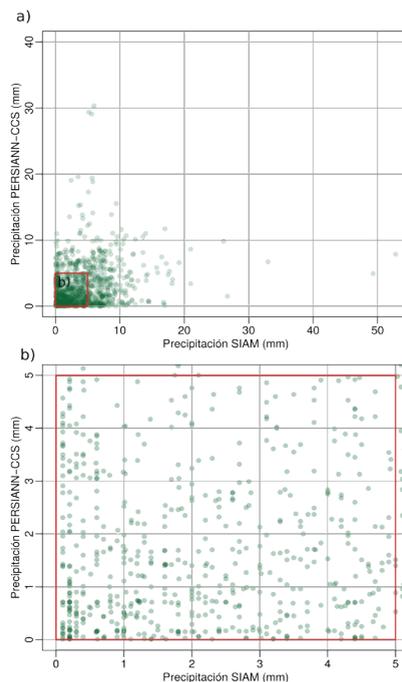


Figura 3. Gráficos de dispersión de precipitación SIAM vs. precipitación PERSIANN-CCS. a) Todos los casos en los que la precipitación de alguna fuente es mayor que 0. b) Detalle de a).

en el eje de abscisas la precipitación SIAM. Desde la Figura 3 a y b se identifica que el grado de ajuste lineal entre estas dos variables es bajo. Se aprecia como las máximas intensidades captadas por los pluviómetros SIAM (dos valores muy elevados en torno a 50 mm) son subestimados por PERSIANN-CCS con valores inferiores a 10 mm. Luego, la correlación entre estas dos variables para valores inferiores a 5 mm es nula (Figura 3b). Con respecto al total precipitado, la estación AL31 recibió un aporte de 129,7 mm, siendo la estimación de 75,7 mm, lo que supone un 41,7% de subestimación. Con respecto a la estación TP42 el volumen precipitado fue de 285,3 mm, llegando la subestimación al 60%.

En la Tabla 1 se presentan estadísticos (sesgo, RSMD y R) que evalúan el acuerdo y el ajuste lineal existente. Los mismos se han estimado para todas las observaciones, comarcas agrarias del Ministerio de Agricultura (Fernández González, 2013), y las estaciones ubicadas en la comarca del Campo de Cartagena, ya que fue esta la que más perjudicada se vio por las escorrentías superficiales provocadas por la tormenta. La RMSD presenta un valor global de 3,37 mm/h, siendo la comarca del Campo de Cartagena la que supera ampliamente este valor.

Tabla 1. Estadísticos extraídos de la comparación de PERSIANN-CCS y los observatorios de la red SIAM.

Ámbito	Observaciones	RSMD (mm/h)	Sesgo (mm/h)	R
Nordeste	469	2,30	-0,47	0,31
Noroeste	335	2,82	-1,11	0,36
Centro	134	2,88	-1,45	0,50
Río Segura	938	3,20	-0,78	0,37
SO y V. del Guadalentín	737	3,34	-0,64	0,28
Campo de Cartagena	670	4,52	-1,18	0,43

Estación*	Observaciones	RSMD (mm/h)	Sesgo (mm/h)	R
CA42	67	3,73	-0,72	0,42
CA52	67	3,59	-0,24	0,17
CA73	67	3,37	-0,92	0,33
CA91	67	3,67	-0,98	0,19
TP22	67	6,71	-2,65	0,64
TP42	67	7,09	-2,56	0,53
TP52	67	3,26	-0,98	0,64
TP73	67	2,37	-0,33	0,74
TP91	67	4,69	-1,37	0,46
Total	3283	3,37	-0,84	0,37

*La localización de las estaciones se puede consultar en: <http://siam.imida.es/apex/tp=101:41:432032925834500>.

Desde Tabla 1, el valor del sesgo indica que para todas las comarcas los datos PERSIANN-CCS en media, son inferiores a los correspondientes SIAM. Por su parte, los coeficientes de correlación R están por debajo de 0,5 en cinco de las seis comarcas. Con respecto a este estadístico es conveniente aclarar que en su cálculo se han incluido las parejas de datos en las que ambas precipitaciones son cero y es fácil entender que para el caso que nos ocupa (lluvias intensas) estas parejas de ceros son irrelevantes.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación sugiere que el producto SRE PERSIANN-CCS, en su versión actual, presenta poca capacidad para describir con exactitud fuertes eventos de precipitación.

El hecho de que exista una clara subestimación por parte de PERSIANN-CCS hace pensar que pueda ser viable su calibración a escala local considerando pluviómetros locales. La ventajosa cadencia temporal de PERSIANN-CCS y de los pluviómetros SIAM (alrededor de una hora) y el tiempo de procesamiento del producto SRE hacen pensar que de identificarse una buena corrección, el nuevo producto calibrado podría ser considerado como una herramienta operativa para el seguimiento de fenómenos meteorológicos extremos en tiempo cercano al real.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es resultado de un contrato posdoctoral con cargo al Programa Saavedra Fajardo (20023/

SF/16) financiado por la Consejería de Educación y Universidades de la CARM, a través de la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia. Queremos agradecer al *Center for Hydrometeorology and Remote Sensing* de la Universidad de California, Irvine y al Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia la posibilidad de acceder a la información empleada en esta investigación de forma libre y autónoma.

6. BIBLIOGRAFÍA

AEMET. Avance climatológico mensual. Diciembre 2016 en la Región de Murcia.

Ballari, D., Castro, E., Campozano, L. 2016. Validation of satellite precipitation (TRMM 3B43) in ecuadorian coastal plains, andean highlands and amazonian rainforest. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, The International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8*, 305-311.

Chen, S., Hong, Y., Cao *et al.* 2013. Performance evaluation of radar and satellite rainfalls for Typhoon Morakot over Taiwan: Are remote-sensing products ready for gauge denial scenario of extreme events? *Journal of Hydrology*, 506, 4-13.

Erena, M., López, J., García, P. *et al.* 2012. Estimación de precipitación combinada radar-pluviómetros y publicación mediante servicios OGC. *XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Tecnologías de Información Geográfica en el contexto de Cambio Global*.

Fernández González, J. (Dir.). 2013. *Caracterización de las comarcas agrarias de España. Tomo 34*. Región de Murcia. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España.

IMIDA. s/f. Sistema de Información Agrario de Murcia.

Yang, Z., Hsu, K., Sorooshian, S., Xu, X., Braithwaite, D., Verbist, K.M.J. 2016. Bias adjustment of satellite-based precipitation estimation using gauge observations: A case study in Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 3790-3806.

Evaluación de las estimas de precipitación desde satélite PERSIANN-CDR para la España Peninsular

García Galiano, S. ⁽¹⁾, Giraldo-Osorio, J. D. ⁽²⁾, Hsu, K. L. ⁽³⁾, Sorooshian, S. ⁽³⁾, Erena Arrabal, M. ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Unidad Predepartamental de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, Cartagena 30203, España. sandra.garcia@upct.es

⁽²⁾ Departamento de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No. 40 - 62, Bogotá, Colombia j.giraldo@javeriana.edu.co

⁽³⁾ Civil and Environmental Engineering Department, Center for Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS), University of California Irvine, EE.UU. soroosh@uci.edu

⁽⁴⁾ Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, IMIDA, Murcia, España. manuel.arena@carm.es

Resumen: Estudiar la variabilidad a largo plazo y las tendencias cambiantes de la precipitación en España, debido a su gradiente latitudinal de precipitación y su compleja orografía, pueden proveer de información relevante sobre cómo la hidroclimatología de la zona ha cambiado. La disponibilidad de un reciente producto de precipitación global de alta resolución estimado desde satélite denominado PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network – Climate Data Record*), provee la oportunidad de llevar a cabo ese estudio. En áreas que no presenten una densa red de pluviómetros, el producto PERSIANN-CDR cobra especial relevancia para identificar la confiabilidad de modelos climáticos regionales (RCMs) en orden a reducir incertidumbres; como entrada a modelos hidrológicos; o incluso para estudios de climatología regional. Sin embargo, una evaluación de la confiabilidad de PERSIANN-CDR considerando la información provista por pluviómetros, aún no ha sido acometida para España. En el presente trabajo, como información pluviométrica observada se ha utilizado la base de datos en malla de alta resolución a escala diaria denominada Spain02. La variable longitudes de rachas secas de precipitación (o DSL en inglés), considerando umbrales de 1 mm y 10 mm de precipitación diaria, ha sido considerada para la validación. El estudio de las DSL es un modo de analizar el riesgo de sequías. El período temporal seleccionado corresponde a 1988-2007, con resolución espacial 0,25°. La evaluación se ha basado en el análisis de la similaridad distribucional entre los datos pluviométricos observados y las estimas satelitales. Los resultados demuestran la robustez de la base de datos PERSIANN-CDR sobre la España peninsular para representar las rachas secas más críticas (las DSLs más largas). Si bien para el umbral 1 mm, las DSLs más cortas fueron sobreestimadas por PERSIANN-CDR, en general PERSIANN-CDR se demostró como un producto robusto tanto para abordar estudios de detección del cambio climático, como para seguimiento de extremos meteorológicos como sequías.

Palabras clave: PERSIANN-CDR, rachas secas de precipitación, precipitación satelital, riesgo de sequía, España.

Assessment of satellite rainfall estimations PERSIANN-CDR over continental Spain

Abstract: *The study of long term variability and trends of rainfall over Spain, due to its latitudinal gradient of rainfall and complex orography, can provide relevant information about how the hydroclimatology of the area has changed. The availability of recent global precipitation product of high resolution estimated from satellite named PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Network – Climate Data Record), provides the opportunity to perform this study. In areas without a dense network of raingauges, the PERSIANN-CDR product presents high relevance to identify the reliability of Regional Climate Models (RCMs) in order to reduce the uncertainties; as input to hydrological models; or for regional climatology studies. However, an assessment of PERSIANN-CDR robustness considering the information provided by raingauges, was not yet performed over Spain. In the present work, the high resolution grid of observed rainfall at daily scale (named Spain02) was considered. The dry spell length variables (or DSL in English), considering thresholds of 1 and 10 mm of daily rainfall, were considered for the validation. The analysis of DSLs is a way to assess the drought risk. The selected time period corresponds to 1988-2007, with spatial resolution of 0.25°. The assessment was based in the analysis of distributional similarity between the observed raingauges and rainfall satellite estimates. The results demonstrate the robustness of PERSIANN-CDR dataset over continental Spain to represent the more severe dry spell lengths (the longest DSLs). However, for 1 mm threshold the shorter DSLs were underestimated for PERSIANN-CDR; the rainfall satellite estimates demonstrated its reliability. In conclusion, PERSIANN-CDR was a robust product for both climate change studies and monitoring of meteorological extremes as droughts.*

Keywords: *PERSIANN-CDR, dry spell lengths, satellite rainfall estimates, drought risk, Spain.*

1. INTRODUCCIÓN

Mejorar el conocimiento de la distribución espacial y temporal de las sequías, es importante para el proceso de toma de decisión en riego y planificación hidrológica a escala de cuenca. Sin embargo, la duración de las sequías y su intensidad son directamente proporcionales al número de días sin precipitación (Dracup *et al.*, 1980), o rachas secas de precipitación. España se encuentra periódicamente afectada por sequías, mientras que el Sur y Sureste Español son zonas afectadas por estrés hídrico. La escasez hídrica es una consecuencia de la falta de balance entre la disponibilidad de los recursos hídricos renovables y el consumo, que emerge de la sobreexplotación de recursos hídricos (Van Loon y Van Lanen, 2013).

Una forma de abordar el estudio de las sequías y su incidencia en un territorio, es mediante un análisis probabilístico de las rachas secas de precipitación (o DSL por su acrónimo en inglés). El análisis de las DSL usualmente se basa en registros pluviométricos. Entre los estudios llevados a cabo en España en la temática, destacan los de Martín Vide y Gomez (1999) trabajando con cadenas de Markov con umbrales de precipitación de 0,1, 1 y 10 mm/día; y los trabajos de Vicente Serrano y Beguería (2003) considerando umbrales diarios de precipitación 0,1 y 5 mm y funciones de distribución teóricas.

Aunque las estimaciones de precipitación desde satélite (SREs) están llegando a ser cada vez más robustas, existen aún pocos trabajos que demuestran la robustez de las SREs teniendo en consideración el resultado de su contraste a redes pluviométricas de alta densidad especial, tanto para aplicaciones climáticas como hidrológicas.

En la actualidad existen distintos productos SREs, entre ellos los registros de larga longitud del producto PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*, Ashouri *et al.*, 2015). PERSIANN-CDR provee de series temporales de 30 años de datos de precipitación diaria a escala global.

Distintos autores han evaluado PERSIANN en diferentes zonas del globo terrestre, pero usualmente trabajando en períodos temporales inferiores a 30 años. Entre ellos destacar el trabajo de Sorooshian *et al.* (2000) que abordaron la evaluación de la precipitación tropical mediante el sistema PERSIANN (concretamente el producto PERSIANN-GT), con resultados satisfactorios. Luego, Katirae *et al.* (2013) focalizó sus esfuerzos en evaluar en el semiárido Irán, cuatro diferentes productos SREs, entre ellos los productos PERSIANN y adj-PERSIANN, pero en base a un red de pluviómetros muy dispersa (baja densidad pluviométrica).

En el presente trabajo, la validación se ha orientado a evaluar la robustez de PERSIANN-CDR en la representación de las longitudes de rachas secas en España continental, considerando una base de datos de precipitación observada de alta resolución.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El producto PERSIANN-CDR (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks*) para la estimación de precipitación, utilizaba originalmente imágenes infrarrojas del satélite GOES (GOES-IR, Hsu, *et al.*, 1997). Las series largas de PERSIANN-CDR (PERSIANN- *Climate Data Record*) corresponden a datos diarios globales de precipitación, que cubre el área entre latitud 60°S y 60°N y longitud 0° y 360°, para el período temporal 1983-presente (Ashouri *et al.*, 2014). Para el presente trabajo, se trabajó con productos de precipitación acumulada en períodos temporales de 3-horas para el período temporal 1988-2007, que fueron convertidos a precipitación diaria 0600UTC a 0600UTC para ajustarlos a la hora local, y fueron asimismo remuestreados a tamaño de celda 0,20° para España continental.

Luego, se ha trabajado con la base de datos observacional de alta resolución denominada Spain02. La misma se extiende para la España peninsular y las Islas Baleares, con una resolución de malla regular de 0,2° (Herrera *et al.*, 2010).

La Figura 1 (a) representa la zona de estudio que corresponde a la España continental. Mientras la Figura 1 (b) identifica los sitios de análisis, sobre un Modelo de Elevación Digital (MED) de la zona, considerando la malla provista por la base de datos Spain02. A modo de ejemplo se presentan los resultados obtenidos en tres sitios de análisis en el Sureste semiárido español, si bien se ha trabajado a escala de España continental.

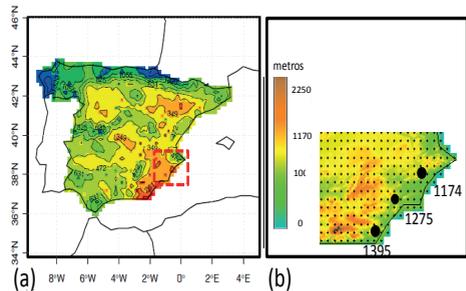


Figura 1. Zona de estudio y sitios seleccionados para el análisis: (a) distribución espacial de la precipitación media anual (mm) para el periodo 1961-90 desde la base de datos Spain02; y (b) MED (m) con ubicación de los sitios seleccionados de análisis.

La variable longitud de rachas secas (o DSL por su acrónimo en inglés) se define como el número de días consecutivos sin precipitación o con precipitación por debajo de un umbral. Se han considerado dos umbrales de trabajo (1 mm/día y 10 mm/día) para definir las DSLs desde ambas base de datos (Spain02 y PERSIANN-CDR), y para cada sitio definido desde la malla de Spain02. El período de trabajo ha correspondido a 1988-2007. Por cuestiones de homogeneidad y consistencia, cuando la base de datos PERSIANN-CDR ha presentado valores

nulos, se ha considerado también nulo el correspondiente valor de la base de datos Spain02. Se han identificado las funciones de densidad de probabilidad (o PDFs por su acrónimo en inglés) de las DSLs desde cada base de datos, a escala de sitio para España continental. Se ha trabajado por tanto con 1445 sitios. Se trabajó con distintas longitudes de DSLs (mayores a 1 día y a 10 días). Mientras se evaluó la bondad del ajuste entre las funciones de distribuciones de ambas base de datos, aplicando el test de dos muestras de Smirnov-Kolmogoroff test (SKTEST).

3. RESULTADOS

La Figura 2 representa las PDFs de todas las DSLs obtenidas desde ambas bases de datos, y los correspondientes histogramas de frecuencia (en rojo PERSIANN-CDR, mientras que en negro Spain02), para umbrales 1 mm/día y 10 mm/día. Desde la Figura 2 (a) para umbral 1 mm/día, se observa en general una sobreestimación de las DSLs más cortas, mientras una leve subestimación de las DSLs más largas. Los resultados mejoran al considerar umbral 10 mm/día (Figura 2 (b)), con elevados valores del valor p del test de Smirnov-Kolmogorov (SKTEST) en algunos casos. Desde el análisis de la distribución espacial de la media de las DSLs (no mostrado) para tanto la base de datos Spain02 como PERSIANN-CDR, considerando umbrales de 1 mm y 10 mm/día, y su diferencia en %

(PERSIANN-CDR-Spain02/Spain02). Por un lado, para umbral 1 mm/día se ha identificado una clara sobreestimación de PERSIANN-CDR en la parte Norte de España en la costa Cantábrica. Mientras en los sistemas montañosos (montañas cantábricas, Pirineos, Sistema Ibérico, y Sistema de Andalucía), y Sureste semiárido, los valores son subestimados. Mientras que para el caso de umbral de 10 mm se observa alta coherencia espacial (sin sobreestimación). En general las más importantes subestimaciones se identifican en los principales sistemas montañosos.

4. CONCLUSIONES

El trabajo presenta los resultados de la evaluación de la robustez del producto PERSIANN-CDR en la réplica de las DSLs en España continental, considerando como contraste los resultados obtenidos desde una base de datos observados de precipitación diaria de alta resolución espacial. Se ha trabajado con dos umbrales de precipitación diaria (1 y 10 mm/día) para identificar los DSLs en cada sitio de análisis.

Como conclusión general de los análisis llevados a cabo, la representación de las funciones de densidad de probabilidad de DSLs usando la base de datos PERSIANN-CDR, demuestra mejor comportamiento al considerar umbrales que permiten identificar las sequías más severas. La distribución espacial de los resultados demuestra que PERSIANN-CDR replica mejor las DSLs mayores a 10 días para umbral de 1 mm/día, y la representación de todas las DSLs para el caso de umbral 10 mm/día.

Finalmente, se destaca que PERSIANN-CDR se demostró como un producto robusto tanto para abordar estudios de detección del cambio climático, como para seguimiento de extremos meteorológicos como sequías a escala global. Se debe destacar que se trata de un registro climático de 30 años de longitud a escala diaria. Por tanto no debe confundirse con otros productos como PERSIANN-CCS que se genera en tiempo cercano al real y mayor resolución espacial.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación recibida del proyecto de I+D Ref. 19527/PI/14 Fundación SENECA: “Evaluación y propuestas para mejorar la prevención, protección y preparación frente a avenidas en el Alto Guadalentín y tributarios: Implicaciones en diseño de infraestructuras hidráulicas”; y del Proyecto de I+D Ref. CGL2012-39895-C02-01 financiado por la Secretaría Nacional de Investigación del Ministerio de Ciencia e Innovación y fondos FEDER. Se agradece la beca otorgada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deportes para movilidad de profesores seniors e investigadores (Ref. PRX14/00748). Finalmente, se agradece especialmente al grupo de investigación del Center of Hydrometeorology and Remote Sensing (CHRS) de la University of California-Irvine (UCI) por proveer la base de datos PERSIANN-CDR.

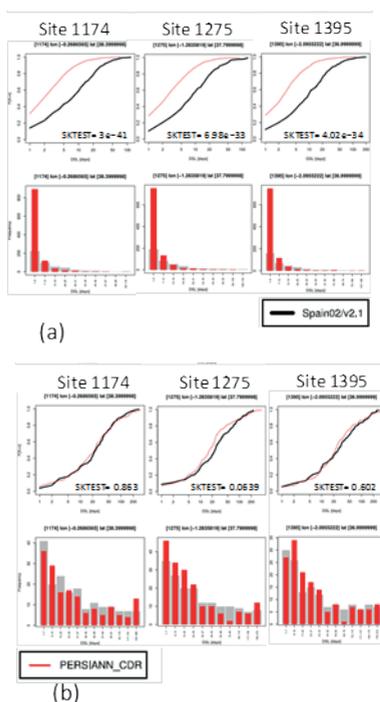


Figura 2. Histogramas y PDFs de todas las DSLs en sitios seleccionados del Sureste de España, para: (a) umbral de 1mm/día; y (b) umbral de 10 mm/día.

6. REFERENCIAS

- Ashouri, H., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Braithwaite, D., Knapp, K., Cecil L.D., Nelson B.R., Prat, O.P. 2015. PERSIANN-CDR Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69-83.
- Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G. 1980. On the definition of droughts, *Water Resour. Res.* 16, 297-302.
- Herrera, S., Gutiérrez, J.M., Ancell, R., Pons, M.R., Frias, M.D., Fernández, J. 2010. Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02), *Int J Climatol.*, 32, 74-85.
- Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., Gupta, H.V. 1997. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks, *J. Appl. Meteor.*, 36, 1176-1190.
- Katirae Boroujerdy, P.S., Nasrollahi, N., Hsu, K.L., Sorooshian, S. 2013. Evaluation of satellite-based precipitation estimation over Iran, *Journal of Arid Environments*, 97, 205-219.
- Martin Vide, J., Gomez, L. 2013. Regionalization of peninsular Spain based on the length of dry spells, *Int. J. Climatol.*, 19, 537-555.
- Sorooshian, S., Hsu, K.L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B., Braithwaite, D. 2000. Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2035-2046.
- Van Loon, A.F., Van Lanen, H.A.J. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework, *Water Resour. Res.*, 49, 1483-1502.
- Vicente Serrano, S.M., Beguería Portugues, S. 2003. Estimating extreme dry-spell risk in the Middle Ebro Valley (Northeastern Spain): a comparative analysis of partial duration series with a General Pareto Distribution and annual maxima series with a Gumbel Distribution, *Int. J. Climatol.* 23, 1103-1118.

Incorporación de la temperatura de la superficie terrestre obtenida desde satélite para la mejora de modelos predictivos de temperatura del aire

Mira, M. ⁽¹⁾, Ninyerola, M. ⁽²⁾, Batalla, M. ⁽²⁾, Pesquer, L. ⁽³⁾, Pons, X. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ GRUMETS research group. Departamento de Geografía, Edificio B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Bellaterra, Cataluña, España. maria.mira@uab.cat, xavier.pons@uab.cat

⁽²⁾ Departamento de Biología Animal, de Biología Vegetal y de Ecología, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Bellaterra, Cataluña, España. miquel.ninyerola@uab.cat, meritxell.batalla@uab.cat

⁽³⁾ GRUMETS research group. CREA, Edificio C, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Bellaterra, Cataluña, España. l.pesquer@creaf.uab.cat

Resumen: En este estudio se propone una metodología empírica para la creación de mapas mensuales de temperatura del aire (T_{aire}) mínimas y máximas a partir de datos del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) y la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). El objetivo principal es analizar las mejoras observadas en la estimación espacial de la T_{aire} cuando incorporamos información satelital de temperatura de la superficie terrestre (TST) en el modelo, además de la información geográfica. El área de estudio es Cataluña, al noreste de la Península Ibérica, y el periodo de estudio comprende los meses de junio y diciembre desde 2003 a 2011. Los mejores modelos de T_{aire} se obtuvieron cuando la regresión incluyó la TST satelital y las variables geográficas. En general, la mejora fue mayor (en términos de reducción de la incertidumbre) para la estimación de la T_{aire} mínima de invierno (con una diferencia máxima de 0,4 K en el RMSE). Por otra parte, no hubo diferencias significativas ($>0,1$ K) en la estimación de la T_{aire} máxima considerando la TST diurna o nocturna. Sin embargo, en el caso de la T_{aire} mínima, ésta fue claramente mejor estimada con la TST nocturna (diferencias en el RMS de hasta 0,3 K).

Palabras clave: temperatura del aire, temperatura de la superficie terrestre, interpolación espacial, modelado climatológico, SIG, teledetección.

Incorporation of satellite land surface temperature for the improvement of predictive air temperature models

Abstract: This study proposes an empirical methodology for the creation of monthly minimum and maximum air temperature (T_{air}) maps based on data from the Meteorological Service of Catalonia (MSC) and the State Meteorological Agency (AEMET). The main objective is to analyze the observed improvements in the spatial estimation of T_{air} when incorporating land surface temperature (LST) satellite information into the model, besides of geographic information. The study area is Catalonia, at the northeast of the Iberian Peninsula, and the study period includes months of June and December from 2003 to 2011. The best T_{air} models were obtained when regression accounted for remote sensing LST and geographical variables. In general, the improvement was greater (in terms of reduction of uncertainty) for the estimation of the minimum T_{air} during wintertime (with a maximum difference of 0.4 K in the RMSE). On the other hand, there were no significant differences (>0.1 K) in the maximum T_{air} estimate considering daytime or nighttime LST data. However, in the case of the minimum T_{air} , it was clearly better estimated with nighttime LST (RMS differences up to 0.3 K).

Keywords: air surface temperature, land surface temperature, spatial interpolation, climatological modeling, GIS, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

La monitorización y definición del clima y la meteorología de una región geográfica específica son esenciales para el conocimiento de los patrones espaciales y temporales de la temperatura superficial del aire (T_{aire}), definida como la temperatura medida por un termómetro expuesto al aire en un lugar protegido de la radiación solar directa (WMO, 1992), típicamente situado a unos 1,5 m sobre el suelo. La T_{aire} es una variable climática y meteorológica clave que permite cuantificar procesos a nivel superficial. En efecto, está implicada en muchos procesos ambientales tales como los flujos energéticos, la evapotranspiración real y potencial, el estrés hídrico, o la distribución de especies (Prihodko y Goward, 1997). Por tanto, puede

utilizarse, por ejemplo, como parámetro de entrada en los modelos climáticos y meteorológicos.

La T_{aire} suele medirse en estaciones meteorológicas, que proporcionan datos puntuales, espacialmente caracterizados por la densidad y distribución de la red de estaciones disponibles. Sin embargo, en muchos casos (especialmente en áreas extensas y heterogéneas) es necesario disponer de una superficie continua, o cuasi-continua, de dicha variable.

La observación de la Tierra desde el espacio utilizando la información obtenida mediante sensores aeroportados o a bordo de satélites artificiales (teledetección) es la única metodología que permite evaluar de manera efectiva la distribución espacial de las variables de la superficie

terrestre a escala regional y global de manera periódica. Gracias al desarrollo tecnológico de la última generación de sensores con bandas espectrales en la región del infrarrojo térmico (8-14 μm) (e.g., Sentinel-3, Landsat, MODIS, ASTER, AATSR, AVHRR) se ha mejorado la capacidad de los programas actuales de observación de la Tierra. Estos sensores incorporan nuevos canales espectrales de medida y aportan una resolución espacial y espectral mucho mejor que hace sólo unas décadas. Así mismo, las largas series históricas de datos de satélite existentes hoy en día (Landsat, más de 40 años; NOAA-AVHRR, más de 30 años; MODIS, 16 años) ofrecen la posibilidad de integrar la cartografía climática basada en los datos de las estaciones meteorológicas con la información satelital (Vicente-Serrano et al., 2004; Sun et al., 2005; Cristóbal et al., 2008; Hengl et al., 2012). En este sentido, existen en la bibliografía variedad de estudios que introducen la temperatura de la superficie terrestre (TST) estimada con datos de teledetección (Cristóbal et al., 2008; Hengl et al., 2012). Sin embargo, no es habitual encontrar trabajos que usen series temporales extensas.

El presente trabajo tiene como finalidad general avanzar en la comprensión y predicción de futuros cambios ambientales. El principal objetivo es mejorar las estimaciones espaciales de T_{aire} mensuales (mínimas y máximas) proporcionadas actualmente por modelos estadísticos que combinan aproximaciones estadísticas (regresión) y espaciales (interpolación) a partir de datos meteorológicos, incorporando la TST procedente de datos de satélite como predictor. En este estudio se considera una larga serie temporal completa y robusta (años 2003 a 2011), tanto de datos procedentes de observaciones meteorológicas convencionales, como de datos de teledetección, integrando también factores geográficos como la altitud, la continentalidad, etc. y se tienen en cuenta imágenes de diferentes satélites. Como objetivo secundario, se evalúan los cambios en las estimaciones de la T_{aire} a nivel espacial y temporal, considerando el análisis de datos correspondientes a las distintas épocas del año analizadas, así como la diferenciación entre cubiertas del suelo y niveles de complejidad orográfica del territorio, basados en la desviación estándar de la altitud en un radio de 10 km (tierras llanas, desviación <150 m; tierras medias, entre 150 y 250 m; tierras abruptas, >250 m). El ámbito de estudio es Cataluña, al noreste de la Península Ibérica.

2. MATERIAL

La base de datos incluye medidas concurrentes procedentes de datos de satélite (TST diurnas y nocturnas), medidas de campo de estaciones meteorológicas (T_{aire}) y datos geográficos, para los meses de verano (junio) e invierno (diciembre) de los años 2003 a 2011.

2.1. Datos de satélite

Como datos mensuales de TST diurna y nocturna se consideraron 1) los productos MOD11B3 y MYD11B3 del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

(MODIS) de la NASA y 2) el producto que llamaremos "ATCDR" correspondiente a datos del *Along Track Scanning Radiometer-2* (ATSR-2) o del *Advanced Along Track Scanning Radiometer* (AATSR) de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Las estaciones incluidas en el modelo fueron ponderadas, en la calibración, en base a la información de las bandas de calidad de la TST, según los criterios establecidos en la Tabla 1 y Tabla 2. La hora de adquisición de las imágenes sobre el área de estudio se detalla en la Tabla 3. La resolución espacial nominal de ambos productos es de aproximadamente 6 km (5568 km para MODIS y 0,05 grados para ATSR-2 y AATSR). No obstante, las imágenes fueron adaptadas a 90 m de resolución espacial mediante interpolación bilineal (o el vecino más próximo, en el caso de las máscaras de calidad de los productos MODIS) para su inclusión en los modelos de regresión.

Tabla 1. Ponderación de las estimaciones TST proporcionadas por el producto ATCDR en función de su banda de calidad, correspondiente a la incertidumbre (δ) de la TST.

ATCDR	
δ TST (K)	Ponderación (%)
≤ 1	100
>1 y $\leq 1,2$	90
$>1,2$ y $\leq 1,4$	80
$>1,4$ y $\leq 1,6$	70
$>1,6$ y $\leq 1,8$	60
$>1,8$ y $\leq 2,0$	50
$>2,0$ y $\leq 2,3$	40
$>2,3$ y $\leq 2,6$	30
$>2,6$ y $\leq 3,0$	20
$>3,0$	10

Tabla 2. Ponderación de las estimaciones TST proporcionadas por los productos MOD11B3 y MYD11B3 en función de las máscaras de calidad.
 QC-TST: "QC_Mandatory_QA_flag";
 QC-Emis: "QC_Emis_error_flag".

QC-TST	QC-Emis	Ponderación (%)
1	1,2,3,4	100
3	1	70
3	2	50
3	3	30
3	4	10

Tabla 3. Intervalo de hora local de adquisición de las imágenes de satélite, tras considerar todas las imágenes y píxeles del ámbito de estudio.

Producto	Diurna	Nocturna
ATCDR	10:02 – 10:47	21:04 – 21:45
MOD11B3	10:24 – 12:00	21:12 – 22:48
MYD11B3	12:24 – 13:48	1:24 – 3:00

2.2. Datos meteorológicos de campo

Los datos meteorológicos fueron cedidos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Servicio

Meteorológico de Cataluña (SMC). Dichos datos fueron sometidos previamente a un riguroso control de calidad, realizando una selección en función de varios criterios objetivos (estabilidad de las series temporales, test de validación cruzada, etc.), conjuntamente con el conocimiento del experto (calidad de las series de las estaciones, ubicación adecuada, etc.).

Las T_{aire} han sido observadas alrededor de las 5 h - 6 h (mínimas) y las 15 h - 16 h (máximas), aunque existe una cierta variabilidad en función de la localización y el momento del año. Se considera un promedio de 195 estaciones en cada imagen, variando entre un mínimo de 180 y un máximo de 212 en función de la época del año. La precisión de las estimaciones es 0,1 K.

2.3. Datos geográficos

El modelo considera además información geográfica derivada de un modelo digital de elevaciones y otras variables geográficas, como son la altitud, la latitud, la continentalidad (distancia euclidiana y distancia de coste al mar), la radiación solar potencial y un índice topográfico de humedad (Boehner *et al.*, 2002).

3. METODOLOGÍA

Si bien existen diferentes técnicas de interpolación espacial, se optó por aplicar una metodología basada en el análisis de regresión múltiple combinada con la interpolación espacial de los residuos mediante el inverso de la distancia ponderada (Ninyerola *et al.*, 2000, 2005; Sun *et al.*, 2005). La regresión múltiple proporciona un modelo predictivo de la variable climática (T_{aire}) a partir de las variables que influyen sobre el clima de la zona (las variables geográficas y la TST). El resultado es un mapa potencial obtenido a partir de la ecuación de ajuste de la regresión que recoge el comportamiento general del clima. Una vez se dispone de esta cartografía potencial se está en disposición de interpolar los residuos de la propia regresión para acercar ostensiblemente la superficie potencial a los datos observados y, por tanto, en general para todo el territorio cartografiado. En otras palabras, la utilización de la varianza no explicada por el modelo de regresión permite, una vez combinada con el mapa potencial, obtener mapas lo más realistas posibles. Los residuos (diferencia entre el valor predicho por el modelo de regresión y el valor observado en las estaciones meteorológicas) muestran los aspectos locales del clima ya que cuantifican cómo de particular es aquella climatología respecto del modelo general.

Se utilizaron varios índices de fiabilidad que describen cuál es la calidad temática de cada mapa. Para el cálculo

de estos índices es indispensable reservar un conjunto de estaciones (conjunto de validación o test) que permita compararlos con los valores estimados a partir del conjunto de estaciones de ajuste. En el presente estudio se aplicó la validación cruzada uno a uno (*cross-validation leave-one-out*). Este proceso permite conservar al máximo la capacidad predictiva de los modelos y obtener un índice de fiabilidad promediado.

Las variables estadísticas analizadas en este estudio son la raíz del promedio del cuadrado de los errores (RMSE o *Root Mean Square Error*) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), que nos permitirá comparar los valores de las regresiones independientemente del número de variables dependientes del modelo.

4. RESULTADOS

Para la estimación de la T_{aire} mínima no se consideró la radiación solar como variable dependiente, dado que en la mayoría de los casos su inclusión no presentaba significación en los coeficientes de regresión, siendo éstos incluso negativos, invirtiendo la relación natural de la T_{aire} con la radiación solar (ya que a mayor radiación se espera mayor T_{aire}). Las regresiones obtenidas para la estimación de la T_{aire} máxima de invierno presentan una tendencia general a no incluir el índice topográfico al considerar la TST, ni la fricción al Mediterráneo al considerar la TST nocturna. Sin embargo, para la estimación de la T_{aire} mínima tal exclusión sólo ocurre ocasionalmente. Cuando la TST implica una mejora en la estimación de la T_{aire} , se obtiene un coeficiente mayor para dicha variable. En cambio, su valor disminuye (o es prácticamente cero), cuando la mejora es menor o inexistente.

El R^2_{aj} presenta un valor máximo de 0,95 y medio de 0,90 y 0,83 para las T_{aire} máximas y mínimas, respectivamente. No se observan grandes diferencias en el R^2_{aj} (< 0,02) en los modelos que no incluyen la TST ni entre los modelos obtenidos para verano o invierno.

Para la comparación del RMSE entre modelos, se consideraron 80 estaciones comunes a todos los años (Tabla 4). La consideración de la ponderación de las estaciones según la banda de calidad de la TST implica en general variaciones en el RMSE de $\pm 0,03$ K, si bien en algunos casos con datos MODIS implica un aumento del RMSE de hasta 0,07 K, o 0,04 K en las T_{aire} máximas y mínimas, respectivamente.

La variación del RMSE al introducir la TST en los modelos obtenida al diferenciar entre cubiertas de suelo y niveles de complejidad orográfica del territorio se resume en la Tabla 5.

Tabla 4. Diferencia máxima (media) en el RMSE de las T_{aire} obtenidas tras considerar 80 estaciones comunes a todos los años según diferentes modelos: a) con o sin TST; b) con la TST diurna (d) o nocturna (n); c) máxima diferencia entre modelos con la TST diurna o nocturna de los diferentes productos.

Mes	a) RMSEsinTST - RMSEconTST (K)		b) RMSETSTd - RMSETSTn (K)		c) Δ RMSETST (K)	
	Máximas	Mínimas	Máximas	Mínimas	Máximas	Mínimas
Junio	0,16 (0,10)	0,15 (0,10)	-0,15 (-0,06)	0,15 (0,10)	0,17 (0,11)	0,21 (0,12)
Diciembre	0,05 (0,02)	0,35 (0,22)	0,06 (0,01)	0,29 (0,17)	0,15 (0,06)	0,39 (0,25)

Tabla 5. Diferencia máxima (media) en el RMSE de las T_{aire} obtenidas tras diferenciar entre tipos de cubierta y complejidades del terreno según modelo con o sin TST.

Tipo de cubierta	Mes	RMSE _{sinTST} - RMSE _{conTST} (K)	
		Máximas	Mínimas
Forestal	Junio	0,22 (0,12)	0,30 (0,12)
	Diciembre	0,06 (0,04)	0,32 (0,31)
Agrícola y ganadero	Junio	0,02 (0,03)	0,06 (0,06)
	Diciembre	-0,01 (0,00)	0,11 (0,06)
Urbano	Junio	0,03 (0,02)	0,01 (0,05)
	Diciembre	0,06 (0,02)	0,28 (0,17)
Tipo de complejidad del terreno			
Tierras llanas	Junio	0,06 (0,03)	0,10 (0,10)
	Diciembre	-0,03 (0,00)	0,18 (0,14)
Tierras medias	Junio	0,15 (0,08)	0,02 (0,04)
	Diciembre	0,05 (0,02)	0,20 (0,13)
Tierras abruptas	Junio	0,09 (0,09)	0,08 (0,00)
	Diciembre	0,27 (0,13)	0,27 (0,24)

5. DISCUSIÓN

La baja significación del coeficiente de radiación solar en los modelos la atribuimos a la disposición de las estaciones meteorológicas en el espacio geográfico, la mayoría de ellas situadas en zonas llanas. Eso provoca que exista poca variabilidad y no se capture bien la relación en los modelos.

A diferencia de lo esperado, la ponderación de las estaciones en función de la banda de calidad de la TST no mejora las estimaciones de T_{aire} . Esto puede ser debido a una pérdida de información de estaciones relevantes, así como también a la posible pobre calidad de las máscaras MODIS.

Las T_{aire} mínimas y las T_{aire} máximas de invierno son mejor estimadas con la consideración de la TST nocturna, mientras que las T_{aire} máximas de verano son mejor estimadas con la TST diurna. Como ya mostró Zeng et al. (2015) para la estimación de la T_{aire} diaria, se demuestra la habilidad de la TST nocturna para estimar la T_{aire} mensual máxima, mientras que la mayoría de los estudios no exploran tal posibilidad (Vancutsem et al., 2010).

A excepción de las máximas de invierno y considerando la precisión de las medidas terreno (0,1 K), la consideración de la TST en los modelos mejora significativamente la estimación de la T_{aire} , especialmente para las mínimas de invierno (mejora del RMSE de hasta 0,35 K). Al diferenciar entre cubiertas y complejidades del terreno, dicha mejora es significativa para las mínimas de invierno, así como también para las mínimas y máximas de verano de cubiertas agrícolas y ganaderas, y las máximas de verano de tierras abruptas.

6. CONCLUSIONES

La incorporación de las estimaciones de satélite de la TST en los modelos predictivos de T_{aire} mensual implica una mejora significativa, especialmente para las mínimas y las máximas de invierno. En conclusión, la TST aporta una información adicional en relación al fenómeno de inversión térmica, no reflejada hasta el momento por las variables geográficas ni las medidas terreno, debido

probablemente a las escasas estaciones meteorológicas situadas en tierras abruptas.

Como valor añadido del presente trabajo destaca que implicará la actualización y mejora del “Atlas Climático Digital de Cataluña” desarrollado por la Universitat Autònoma de Barcelona y disponible online (http://www.creaf.uab.cat/miramon/Index_es.htm).

7. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación (proyecto CGL2015-69888-P MINECO/FEDER y contrato de investigación “Juan de la Cierva” de la Dra. Mira), la Generalitat de Catalunya (GRUMETS- grupo de investigación consolidado SGR 2014 núm. 1491) y la “Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats” (Xavier Pons es beneficiario de un ICREA Academia Excellence in Research grant, 2016-2020).

8. BIBLIOGRAFÍA

Boehner, J. et al. 2002. Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation. In: Micheli, E., Nachtergaele, F., Montanarella, L. [Ed.]: *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg. 213-222.

Cristóbal, J. et al. 2008. Modeling air temperature through a combination of remote sensing and GIS data. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 113, D13106.

Hengl, T. et al. 2012. Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1), 265-277.

Ninyerola, M. et al. 2000. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques. *International Journal of Climatology*, 20, 1823-1841.

Ninyerola, M., et al. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. *Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. 44 pp. Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra. <http://opengis.uab.es/wms/iberia/pdf/acdpi.pdf>

Prihodko, L., Goward, S.N. 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 60, 335-346.

Sun, Y.J. et al. 2005. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology*, 80, 37-48.

Vancutsem, C. et al. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114, 449-465.

Vicente-Serrano, S.M. et al. 2004. NAO influence on NDVI trends in the Iberian Peninsula (1982–2000). *International J. Remote Sensing*, 25, 2871-2891.

World Meteorological Organization, 1992. Measurement of temperature and humidity (R.G. Wylie and T. Lalas). Technical Note No. 194, WMO-No. 759, Geneva.

Zeng, L. et al. 2015. Estimation of daily air temperature based on MODIS land surface temperature products over the corn belt in the US. *Remote Sensing*, 7, 951-970.

ForestCO2: monitorización de sumideros de carbono en masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia

Sanchez Pellicer, T., Martín Alcón, S., Tomé Morán, J. L., Navarro, J. A., Fernández-Landa, A.
Departamento de Evaluación de los Recursos Forestales, Agresta Sociedad Cooperativa, C/ Duque de Fernán
Núñez, 2, 1º, 28012, Madrid, Agresta Sociedad Cooperativa.
{tsanchez, smalcon, jltome, janavarro, afernandez}@agresta.org

Resumen: La gestión forestal es una de las actividades de compensación de emisiones contempladas en el protocolo de Kioto, pero aún no está aplicándose en España por falta de metodologías y experiencias. El proyecto LIFE ForestCO2 pretende dar un importante impulso a los sumideros de carbono generados a través de actuaciones de Gestión Forestal Sostenible como clave en la lucha contra el cambio climático y, simultáneamente, como almacenes de carbono donde organizaciones y empresas de los sectores difusos puedan invertir de forma voluntaria para compensar sus emisiones a través de la figura del crédito de CO₂. La línea principal de trabajo del proyecto es la modelización del secuestro de carbono como consecuencia de actuaciones de gestión forestal en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Ait. en sus diversos depósitos: biomasa (aérea y subterránea), materia orgánica del suelo y materia orgánica muerta, mediante metodologías reconocidas por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), calibradas y precisadas a escala local. La combinación de fuentes de datos públicos, como son los datos LiDAR del PNOA y las bases de datos del cuarto Inventario Forestal Nacional, permite trabajar en grandes superficies a bajo coste, y con información de alta calidad. En este proyecto se han seleccionado estas fuentes de datos para desarrollar metodologías específicas de generación de cartografía de calidad de estación y carbono secuestrado en masas de las especies objetivo. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la modelización de la calidad de estación y la monitorización de existencias de carbono para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia. Se espera que esta metodología contribuya a que la compensación de emisiones a través de la gestión forestal pueda convertirse en una fuente de financiación para la silvicultura de estas masas forestales.

Palabras clave: LiDAR, calidad de estación forestal, Kioto, cambio climático, gestión forestal.

ForestCO2: monitoring of carbon sinks in Pinus halepensis stands in the Region of Murcia

Abstract: Forest management is one of Kyoto's offsetting mechanisms, but it is not yet being applied in Spain due to lack of methodologies and experiences. The LIFE ForestCO2 project aims to give a major impetus to the carbon sinks generated through actions of Sustainable Forest Management as a key in the fight against climate change and, simultaneously, as carbon stores where organizations and companies from the diffuse sectors can invest, on a voluntary basis, to offset their emissions through the figure of the CO₂ credit. The aim of the project is the modeling of carbon sequestration as a consequence of forest management activities in *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinaster* Ait stands in its different deposits: biomass (aerial and underground), soil organic matter and dead organic matter, through methodologies recognized by the panel of experts on climate change (IPCC), calibrated and improved the accuracy at the local level. The combination of public data sources, such as LiDAR data from PNOA, and databases of the fourth National Forest Inventory, allows to work in large areas at low cost, and with high quality information. In this project, these data sources have been selected to develop specific methodologies for generation of site quality and carbon sequestration cartography in the forest area occupied by the target species. This article presents the results obtained in the modeling of site index and the monitoring of carbon stocks for *Pinus halepensis* stands in the Region of Murcia. This methodology could contribute to the compensation of emissions' goal through forest management, becoming a source of funding for the silviculture of these forest stands.

Keywords: LiDAR, forest site quality, Kioto, climate change, forest management.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las acciones de compensación de emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en el protocolo de Kioto como en los acuerdos de Marrakech, la gestión forestal se planteó como una posibilidad a desarrollar. Sin embargo, mientras que otras opciones de compensación han sido ampliamente desarrolladas como la forestación/

reforestación o los cambios de uso de suelo, la gestión forestal quedó relegada a un segundo plano.

El proyecto LIFE FOREST CO2 "Cuantificación de sumideros de carbono forestal y fomento de los sistemas de compensación como herramientas de mitigación del cambio climático" trabaja en este sentido, tratando de desarrollar metodologías válidas para compensar emisiones mediante la gestión forestal. Una de las líneas

de trabajo del proyecto es la modelización del secuestro de carbono como consecuencia de actuaciones de Gestión Forestal Sostenible (podas, claras, clareos, etc.) en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Ait. españolas y francesas en sus diversos depósitos: biomasa (aérea y subterránea), materia orgánica del suelo y materia orgánica muerta, mediante cálculos reconocidos a nivel internacional (IPCC), pero precisados a escala local. Para ello, se ha apostado por la utilización de datos públicos como el LiDAR del PNOA y las parcelas del IFN4, lo que permite trabajar en grandes superficies a bajo coste, y con información de alta calidad

En este artículo se presentan los resultados sobre modelización de la biomasa y calidad de estación en el caso de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La cartografía de biomasa y de calidad de estación se desarrolló a partir de datos LiDAR complementados con otro tipo de datos relacionados con el índice de sitio como las variables topográficas, de suelo y climáticas. Los datos de LiDAR del PNOA corresponden al vuelo del 2009 con una resolución de 0,5 pulsos/m². Para la estimación de las variables topográficas en el área de estudio, se utilizó un modelo digital del terreno (MDT) con paso de malla de 25 m (CNIG). A partir del MDT de 25 metros de resolución se generó la cartografía de otras variables topográficas derivadas del MDT también necesarias para construir los modelos como son la pendiente, la insolación y el índice de posición topográfica. La insolación se generó utilizando la herramienta Hillshade disponible en la librería GDAL (QGIS). Para ello, se usó un azimut de 180° (mediodía solar) y un ángulo vertical o altitud correspondiente a la capital de provincia más cercana. Se usaron dos valores de altitud correspondientes a la posición del sol en verano y en invierno, obteniendo de esta forma dos ráster de insolaciones.

El índice de posición topográfica (TPI) compara la elevación de cada celda del MDT con la elevación media de una zona especificada alrededor de la celda. Los valores positivos del TPI representan puntos de mayor cota que la media de sus vecinos (crestas). Los valores negativos representan puntos de menor cota que los de su alrededor (valles) y los valores próximos a cero son o áreas planas o áreas de pendiente constante en las que la pendiente del punto es significativamente mayor que cero. La importancia del TPI se halla en que la cota de un punto no define la topografía sino la relación de esta cota con las próximas (Conejo Muñoz *et al.*, 1992).

Las variables de suelo se obtuvieron de la base de datos geográfica de suelos de Eurasia a escala 1:1.000.000 (SGDBE). Se hizo una reclasificación de las unidades de cartografía del terreno (SMU) en un código numérico dentro de la superficie de estudio, de forma que éstas puedan ser tratadas como una variable paramétrica a la hora de generar los modelos de calidad de estación. En este caso se utiliza la clasificación de suelos FAO-90 para distinguir los tipos de suelos presentes en el

área de trabajo: Petric Calcisol, Haplic Calcisol, Eutric Cambisol, Calcaric Fluvisol, Haplic Gypsisol, Mollic Leptosol, Lithic Leptosol, Water body.

Las variables de clima (temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación) se obtuvieron para tres bases de datos de clima principales para la Península Ibérica: Worldclim, con una resolución de 1 km, Atlas Climático de la España Peninsular (Gonzalo, 2010) con una resolución de 1 km y el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola, 2005) con una resolución de 200 m. A partir de esas variables se generaron 19 variables bioclimáticas a través del paquete “dismo” de R (Hijmans *et al.*, 2015)

2.1. Procesado LiDAR de toda la superficie de trabajo

La información LiDAR fue procesada con el programa FUSION (McGaughey y Carson, 2003). Para toda la superficie de estudio se generó un modelo digital de elevaciones (MDT) de 2 metros de resolución a partir de los puntos clasificados como suelo. El MDT fue posteriormente utilizado para asignar alturas sobre el suelo a todos los retornos clasificados como vegetación (normalización de la nube de puntos). A partir de la nube de puntos normalizada se calculó una batería de 70 estadísticos de estructura de masa arbolada por encima de 2 metros en celdas de 25 m de lado, seleccionado finalmente 13 variables LiDAR: Media, Desviación estándar, Varianza, Coeficiente de variación, Rango intercuartílico, Kurtosis, Percentil del 1%, Percentil del 5%, Percentil del 25%, Percentil del 50%, Percentil del 75%, Percentil del 95%, Percentil del 99%, Fracción Cubida Cubierta y *Canopy releaf ratio*. En total se obtuvieron 41 variables predictoras para el cálculo de modelos de predicción de la biomasa y la calidad de estación de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

2.2. Parcelas IFN4 y campo

Para el ajuste del modelo se han utilizado parcelas del IFN4 localizadas en masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia.

Las parcelas del IFN se localizan en campo mediante modelos de navegador GPS básico que presentan unos errores de medición medios superiores a los 5 metros. Para la modelización de la biomasa a partir de LiDAR es conveniente utilizar precisiones submétricas de localización del centro de la parcela, de modo que fue necesario realizar un trabajo previo de recolocación de las parcelas para alcanzar esa precisión necesaria. Tras esta tarea, se hizo una selección de las parcelas que alcanzaron dicha precisión submétrica que dio como resultado una base de datos de 243 parcelas que fueron las que finalmente se utilizaron en todos los trabajos de modelización (Figura 1).

La calidad de estación de cada parcela se calculó a partir de los modelos para *Pinus halepensis* (Montero *et al.*, 2006). La biomasa se calculó como el volumen con corteza del IFN4.

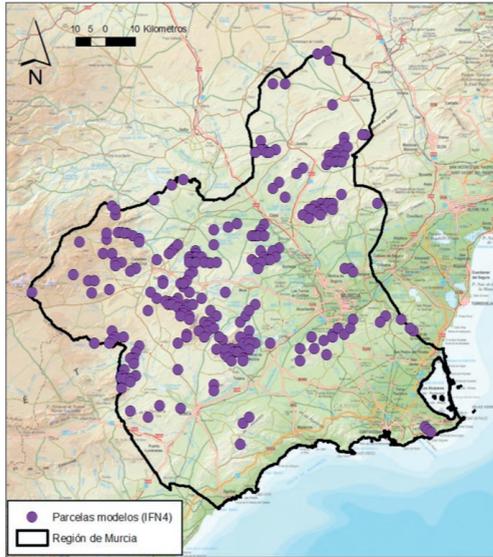


Figura 1. Localización de las parcelas del IFN4 de *Pinus halepensis* en Murcia.

2.3. Modelización estadística

El ajuste de modelos y la generación de cartografía se realizaron con el paquete estadístico R. Se ajustaron modelos paramétricos (regresión lineal) y no paramétricos (*Random Forest*).

Para el ajuste de modelos se utilizaron los siguientes paquetes de R: Rcmdr, stats, car, graphics, lmtest, MASS, lme4, randomForest, rfUtilities, caret, ggpubr, maptools, hydroGOF. La selección de variables para optimizar la capacidad predictiva de los modelos de *Random Forest* se realizó con el paquete VSURF de R (Genuer *et al.*, 2010).

3. RESULTADOS

3.1. Calidad de estación

Se construyeron distintos modelos de calidad de estación de diferentes tipos, paramétricos y no paramétricos, y se seleccionó el que mejor ajuste tuvo. Este modelo se corresponde con un modelo no paramétrico generado con *Random Forest* (Breiman, 2001.) con una selección de variables realizada mediante el paquete VSURF de R. Dicho modelo está integrado por 12 variables: 7 variables de worldclim, 2 variables climáticas de Gonzalo, 2 variables topográficas y una de insolación. En la Tabla 1 se presentan los valores de ajuste del modelo.

Tabla1. Valores de ajuste del modelo RF de calidad de estación.

RMSE	R squared	Cohen f2	Accuracy	Overfitting ratio
3,006	0,214	0,272	0,850	12,000

El modelo seleccionado se aplicó al *stack* de raster y se generó un mapa de calidades de estación para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia con una resolución de 25 metros (Figura 2).

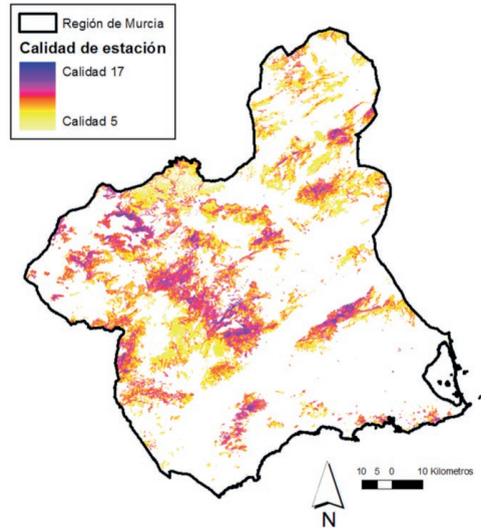


Figura 2. Cartografía de Calidad de estación en las masas de *P. halepensis* en la Región de Murcia.

3.2. Biomasa

Para la biomasa también se probaron modelos de diferentes tipos y se seleccionó un modelo no paramétrico generado con *Random Forest* con una selección de variables realizada mediante el paquete VSURF de R. Dicho modelo contiene 2 variables LiDAR: un percentil bajo de alturas y un estadístico de fracción de cubierta cubierta.

En la Tabla 2 se presentan los valores de ajuste del modelo.

Tabla2. Valores de ajuste del modelo RF de biomasa.

RMSE	R squared	Cohen f2	Accuracy	Overfitting ratio
17,495	0,670	2,028	0,767	70,000

El modelo seleccionado se aplicó a su vez al *stack* de raster y se generó un mapa de biomasa (m^3/ha) para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia con una resolución de 25 metros (Figura 3). A su vez, se calcularon las existencias totales de biomasa a partir del raster generado con el modelo de LiDAR para el estrato de *Pinus halepensis* (257.216,08 ha) y se compararon con las existencias calculadas con todas las parcelas del IFN4 incluidas dentro de los límites de dicho estrato como otra manera adicional de validar las predicciones de LiDAR (Tabla 3).

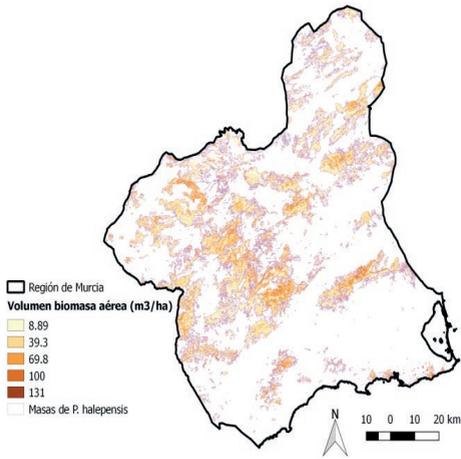


Tabla3. Existencias de biomasa aérea de *P. halepensis*.

	Nº Inventario parcelas	Biomasa (m³/ha)	Biomasa Total (m³)	Error de muestreo (m²)
LIDAR	243	30,04	7.727.199,67	-
IFN4	1.508	31,34	8.110.581,84	520.564,51

4. DISCUSIÓN

En las diferentes pruebas realizadas se observó que las variables LiDAR, descriptoras de la estructura forestal, “engañan” al modelo de calidad de estación, ganando peso en los modelos e incluso llegando a desplazar al resto de variables. Sin embargo, al analizar el resultado de dichos modelos, se observa que en ellos la estructura llega a enmascarar a la propia calidad de estación, de manera que predicen todas las masas de menor altura dominante como de calidades bajas, no siendo capaces de discriminar aquellos enclaves con masas jóvenes y buenas calidades de estación.

Por este motivo, los modelos de calidad de estación con más sentido biológico son los que prescindan de las variables LiDAR e incorporen solamente variables ambientales (climáticas, topográficas y de insolación). No obstante, los modelos seleccionados de calidad de estación funcionan muy bien.

Respecto a los modelos de biomasa, la situación es distinta. En las diferentes pruebas realizadas se comprobó que las variables LiDAR son más que suficientes para conseguir buenos modelos predictivos, no siendo necesarias en este caso las variables ambientales. Esto se explicaría por la relación directa entre la cantidad de biomasa existente y las características estructurales del rodal, algo que no sucede con la calidad de estación, variable en la que intervienen otros factores (e.g. la edad de la masa).

Se puede concluir que es posible obtener cartografía continua de alta resolución de biomasa y calidad de estación a partir de datos de fácil acceso. Esta cartografía supone una oportunidad para mejorar la gestión forestal y el diseño de intervenciones selvícolas a escala rodal

ya que permite conocer la calidad de estación y las existencias de biomasa en rodales de pequeña superficie, allí donde la precisión de otras fuentes de datos como el IFN4 no llega (por ausencia de parcelas). En este sentido, esta cartografía generada es totalmente válida para los fines del proyecto LIFE ForestCO2.

Por otro lado, en la tabla 3 se puede comprobar que el valor de las existencias totales calculadas para todo el estrato de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia a partir de los modelos de LiDAR está dentro del intervalo de confianza del valor calculado con todas las parcelas del IFN4 correspondientes a dicho estrato. La conclusión más importante es que se pueden conseguir resultados similares con un esfuerzo de muestreo mucho menor (243 parcelas frente a 1.508) lo que supone un importante ahorro económico. Esta cartografía de alta resolución obtenida con bajo coste puede ser fundamental en la rentabilidad de los proyectos de carbono de gestión forestal, más aún si cabe en masas de especies poco productivas sobre suelos pobres, con una lenta respuesta a los tratamientos selvícolas como es el caso del *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

5. BIBLIOGRAFÍA

Breiman, L. 2001. Random forests. *Mach. learn.*, 5-32.

Conejo Muñoz, R., Morales Bueno, R., Pérez de la Cruz, J.L., Urbano Montero, J.A. 1992. Conjuntos difusos y reconocimiento de rasgos del terreno. *II Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, Madrid.

Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern. Recognition Letters*, 31(14), 2225-2236

Gonzalo, J. 2010. *Diagnosis Fitoclimática de la España Peninsular. Hacia un modelo de clasificación funcional de la vegetación y de los ecosistemas peninsulares españoles*. Serie técnica Naturaleza y Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España.

Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J. 2015. Dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978.

Mcgaughey, R. J., Carson, W.W. 2003. Fusing LIDAR data, photographs, and other data using 2D and 3D visualization techniques. In: *Proceedings of Terrain Data: Applications and Visualization—Making the Connection*, October 28–30, 2003. pp. 16–24.

Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M. 2005. *Atlas Climático Digital de la Península ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. Univ. Autónoma de Barcelona. Bellaterra, 44 pp.

Worldclim URL: <http://www.worldclim.org/>

Comparación de la medida de la temperatura de la superficie terrestre en campo mediante radiómetros y pirgeómetros. Implicaciones para el calibrado de sensores en vuelo

Valor, E. ⁽¹⁾, Sánchez, J. M. ⁽²⁾, Nicolòs, R. ⁽¹⁾, Moya, R. ^(1,3), Barberá, M. J. ⁽¹⁾, Caselles, V. ⁽¹⁾, Coll, C. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr Moliner 50, 46100 Burjassot. España.
{enric.valo, raquel.niclos, ruben.moya, M.Jesus.Barbera, vicente.caselle, cesar.coll}@uv.es

⁽²⁾ Depto. Física Aplicada e Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha, 02071 Albacete. España.
juanmanuel.sanchez@uclm.es

⁽³⁾ Department of Electronic Warfare, Cranfield University. Shrivenham Swindon, SN6 8LA, United Kingdom.

Resumen: La temperatura de la superficie terrestre es una magnitud fundamental en muchos procesos de intercambio entre la superficie y la atmósfera. Su medida desde satélites artificiales provee un modo eficiente de obtener su variación en regiones amplias de la Tierra, siendo un aspecto esencial su validación usando medidas *in situ* para establecer su exactitud y precisión. En la actualidad se están usando fundamentalmente dos metodologías para ese fin: medidas realizadas con radiómetros de banda ancha que observan la superficie bajo un ángulo cenital definido y con un campo de visión limitado, y medidas efectuadas con pirgeómetros de radiación total que poseen un campo de visión prácticamente hemisférico. Aunque ambas medidas deben estar correlacionadas, no es evidente su equivalencia, y establecer sus diferencias es relevante cuando se trata de usarlas como referencia a los sensores térmicos aeroportados. Por ello, se ha comparado las medidas realizadas por ambos métodos en dos tipos de superficies distintas, una hierba homogénea y un viñedo, bajo condiciones atmosféricas diversas. Los resultados muestran una buena correspondencia en el primer caso, con diferencias de $+0,3 \pm 1,0$ K, mientras que en el segundo las discrepancias pueden ser significativas ($-1,7 \pm 1,1$ K) con lo que ello implica en la fiabilidad de los resultados de validación de sensores aeroportados.

Palabras clave: temperatura de la superficie terrestre, radiómetro, pirgeómetro, infrarrojo térmico.

Comparison of the land surface temperature measurement in the field through radiometers and pyrgeometers. Implications for the calibration of sensors in flight

Abstract: Land surface temperature (LST) is a key magnitude in many exchange processes between the surface and the atmosphere. LST measurement from satellites provides an efficient way to monitor its change across wide areas on Earth, an essential issue being LST validation using *in situ* measurements to assess its accuracy and precision. There are two main methodologies being used presently to this end: temperature measurements made by wide-band radiometers observing the land surface with a particular viewing angle and a limited field of view, and measurements provided by total radiation pyrgeometers with a nearly hemispheric field of view. Although both measurements must be correlated, it is not evident their equivalence; thus, it may be relevant to establish their differences when they are used as ground reference for the thermal infrared sensors. For this reason, both methodologies have been compared over two different surfaces (a homogeneous grass and a vineyard) under different atmospheric conditions. The results show good correspondence in the first case, with differences $+0.3 \pm 1.0$ K, while in the second one the discrepancies can be significant (-1.7 ± 1.1 K) affecting the reliability on the results of the validation of airborne sensors.

Keywords: land surface temperature, radiometer, pyrgeometer, thermal infrared.

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura de la superficie terrestre es una magnitud clave para la comprensión de diversos fenómenos que tienen lugar en la biosfera, en particular los flujos de calor latente y sensible a nivel de superficie, y está íntimamente relacionada con las Variables Climáticas Esenciales (ECV) definidas por el Sistema Global de Observación del Clima (GCOS). Por ese motivo, un aspecto esencial de la medida de la temperatura desde satélites artificiales consiste en su validación mediante medidas realizadas en el campo que sean referencia, con el fin de establecer su fiabilidad y definir su margen de incertidumbre (Li *et al.*, 2013).

Un modo de llevar a cabo este proceso consiste en desplegar en un área térmicamente homogénea de dimensiones adecuadas a la resolución espacial del sensor en estudio un conjunto de radiómetros que realicen medidas de temperatura con las que obtener una media espacial y temporal comparable a la medida satelital. Estos radiómetros suelen trabajar en banda ancha (8-14 μm) y miden de forma direccional de modo semejante a como lo hacen los sensores aeroportados. Sin embargo, desde hace un tiempo diferentes equipos están usando pirgeómetros como alternativa a los radiómetros para este fin, los cuales miden en la mayor parte del espectro terrestre (3-100 μm) y de forma

hemisférica, por lo que no es evidente la equivalencia entre ambos tipos de medida. El ejemplo más extendido es el uso de la red *SURFace RADiation budget observing network* (SURFRAD) para validaciones (Augustine et al., 2000).

En el presente trabajo hemos comparado las medidas obtenidas simultáneamente por ambos sistemas en diferentes condiciones atmosféricas en dos tipos de superficie bien distintas: una superficie de hierba homogénea, y un viñedo durante las diferentes fases fenológicas del cultivo.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el estudio planteado se ha utilizado medidas realizadas mediante radiómetros térmicos de banda ancha Apogee SI-121 y radiómetros netos Kipp&Zonen CNR4. Ambos instrumentos han medido simultáneamente de manera continua sobre dos tipos de superficie distintas, que se presentan a continuación.

2.1. Instrumentación

La comparación se ha realizado usando dos tipos de instrumentos bien diferentes. Uno de ellos es un radiómetro de banda ancha Apogee SI-121 (www.apogeeinstruments.co.uk/) que opera en el intervalo 8-14 μm y que presenta un campo de visión (FOV) de 36°, por tanto realiza medidas de radiancia (basadas en la ley de Planck) de tipo direccional y en una zona espectral relativamente reducida. Este radiómetro presenta una precisión de $\pm 0,2^\circ\text{C}$ en la medida de temperatura (Nicolòs et al., 2015, Theocharous et al., 2010).

El otro sensor es el pirgeómetro integrado en el radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 (<http://www.kippzonen.com>), el cual observa la superficie con un campo de visión prácticamente hemisférico (150°) y en un intervalo espectral mucho más amplio (4,5-42 μm). Por lo cual mide la irradiancia emitida por la superficie en consonancia con la ley de Stefan-Boltzmann. Su precisión es del orden del 10% de la irradiancia medida.

2.2. Tipos de superficie

Con el fin de comparar los resultados de ambos tipos de medidas y ver las posibles discrepancias, se han usado dos tipos de superficie netamente diferentes. Por un lado se realizaron medidas sobre un área cubierta homogéneamente por hierba (*Festuca arundinacea* Schreb., cv. "Asterix") bien irrigada situada en la finca experimental de Las Tiesas, Albacete, perteneciente al Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP-FUNDESCAM). Las medidas se realizaron cada 15 minutos de manera continua entre el 30 de noviembre de 2015 y el 27 de octubre de 2016, cubriendo de ese modo condiciones ambientales muy diversas. El radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 se situó en un mástil a una altura de 1 m sobre la superficie, mientras que el radiómetro Apogee SI-121 la observaba desde 1,5 m con un ángulo cenital de 45° (ver Figura 1).

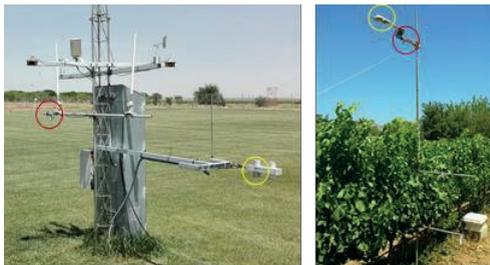


Figura 1. Montaje experimental de los radiómetros netos Kipp&Zonen CNR4 (marcados en amarillo) y Apogee SI-121 (marcados en rojo), sobre la festuca (izquierda) y la viña (derecha).

Por otra parte, se efectuaron medidas sobre un viñedo situado en el campus de la Universitat de les Illes Balears (UIB, Mallorca) cada 15 minutos entre el 21 de junio y el 17 de octubre de 2012, cubriendo de ese modo la evolución fenológica de este cultivo. En este caso, tanto el radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 como el Apogee SI-121 se situaron sobre un mástil a 4,5 m de la superficie, observando este último la superficie con una inclinación de 45° respecto a la vertical, con el fin de observar una composición del conjunto (suelo + vegetación) de forma comparable al pirgeómetro.

2.3. Medidas con Apogee SI-121

El radiómetro Apogee mide la radiancia emitida por la superficie observada en el intervalo 8-14 μm y bajo un ángulo cenital de observación θ , $L(T, \theta)$, que viene determinada por la siguiente ecuación:

$$L(T, \theta) = \varepsilon(\theta)L^\circ(T) + (1 - \varepsilon(\theta))L_{\text{atm}}^\downarrow \quad (1)$$

donde Tr es la lectura de temperatura proporcionada por el radiómetro, $L^\circ(T)$ es la radiancia emitida por un cuerpo negro a la temperatura de la superficie T definida por la ley de Planck, $L_{\text{atm}}^\downarrow$ es la radiancia atmosférica descendente, y $\varepsilon(\theta)$ es la emisividad de la superficie. Esta última se ha estimado mediante un modelo geométrico sencillo dado por:

$$\varepsilon(\theta) = \varepsilon_v P_v(\theta) + \varepsilon_s (1 - P_v(\theta)) \quad (2)$$

donde ε_v es la emisividad de la vegetación (0,985), ε_s es la emisividad del suelo (0,960) y $P_v(\theta)$ es la fracción de cobertura vegetal. En el caso de la hierba se tomó $P_v=1$, y en el caso del viñedo se midió su evolución a lo largo del tiempo entre $P_v=0,2$ y $P_v=0,4$. Por otro lado, la radiancia atmosférica descendente se midió con un segundo radiómetro Apogee dirigido hacia el cielo con un ángulo cenital de 53°, utilizando la aproximación difusiva válida bajo condiciones de cielo homogéneo (totalmente descubierto o completamente nublado) (Rubio et al., 1997).

Con estas medidas, la inversión de la ecuación (1) permite obtener la radiancia de cuerpo negro de la superficie de la cual puede obtenerse fácilmente su temperatura corregida del efecto de la emisividad.

2.4. Medidas con Kipp&Zonen CNR4

El radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 consta de dos piranómetros y dos pirgeómetros que miden la irradiancia hemisférica solar y terrestre, respectivamente, ascendentes y descendentes. En este trabajo se han usado las medidas de los dos pirgeómetros. El situado en observación de la superficie mide la irradiancia ($M(T_s)$) emitida con un FOV de 150° dada por:

$$M(T_s) = \epsilon M^{\circ}(T) + (1 - \epsilon) M_{\text{atm}} \quad (3)$$

donde $M^{\circ}(T)$ es la irradiancia hemisférica total emitida por un cuerpo negro a la temperatura T dada por la ley de Stefan-Boltzmann, M_{atm} es la irradiancia hemisférica descendente (medida por el pirgeómetro que observa el cielo, en este caso con un FOV de 180°), y ϵ es la emisividad hemisférica (que puede obtenerse a partir de la proporción de vegetación con una relación similar a la Ecuación (2)).

La inversión de la ecuación (3) a partir de las medidas de los dos pirgeómetros permite obtener la temperatura de la superficie.

3. RESULTADOS

Las series de medidas realizadas fueron depuradas previamente eliminando los casos en que hubiese nubosidad. Para ello se analizó las medidas realizadas por los piranómetros por el día y se eliminaron aquellos días en los que la curva de irradiancia se separara del comportamiento previsto para un día claro sin nubes. En el caso de los datos nocturnos, se eliminaron aquellos casos en los que la temperatura medida en el caso de la radiancia descendente superase un cierto umbral. Con las series resultantes se realizó una comparación de las medidas de temperatura obtenidas con ambos métodos.

3.1. Comparación sobre hierba

La Figura 2 muestra la comparación de las medidas realizadas con ambas metodologías para el caso de la zona de hierba homogénea bien irrigada, separando las medidas de día y noche. Se observa una correspondencia razonablemente buena en ambos casos (con coeficientes de determinación de 0,988), siendo sensiblemente mejor en los datos nocturnos a causa de una mayor homogeneidad térmica de la superficie. En concreto,

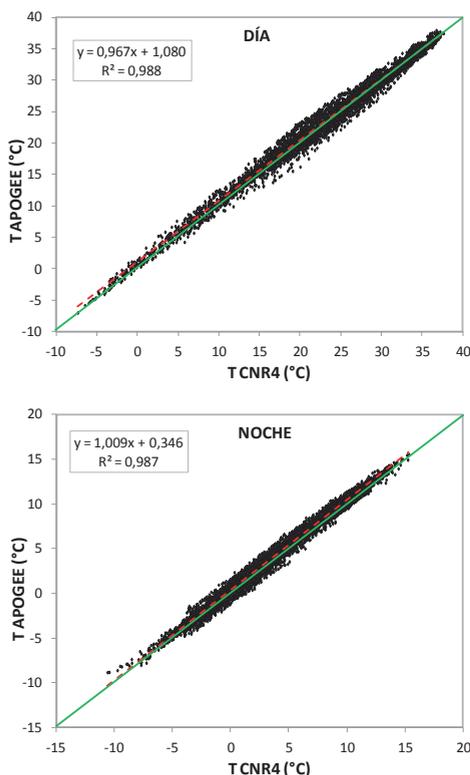


Figura 2. Comparación de las medidas realizadas con un radiómetro Apogee SI-121 y un radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 sobre una superficie homogénea de hierba bien irrigada, diferenciando entre día y noche.

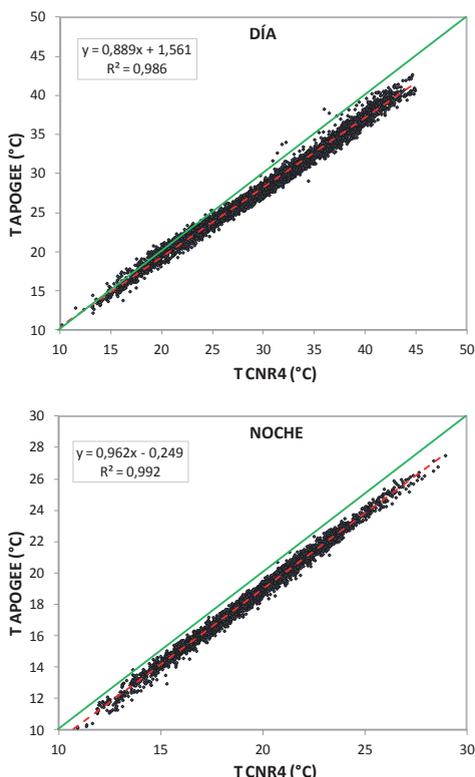


Figura 3. Comparación de las medidas realizadas con un radiómetro Apogee SI-121 y un radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 sobre una superficie heterogénea de viñedo, diferenciando entre día y noche.

la pendiente es muy cercana a la unidad en los datos nocturnos (1,009 frente a 0,967 en los diurnos).

Tabla 1. Estadísticos básicos de la comparación entre las temperaturas medidas con un radiómetro Apogee SI-121 y un radiómetro neto Kipp&Zonen CNR4 sobre un viñedo ($T_{APOGEE}-T_{CNR4}$).

	Bias (°C)	MAE (°C)	Desviación estándar (°C)	Coefficiente determinación
Hierba				
DÍA	0,3	0,8	1,0	0,988
NOCHE	0,4	0,5	0,6	0,987
Viñedo				
DÍA	-1,7	1,8	1,1	0,978
NOCHE	-1,0	0,3	1,0	0,992

La tabla 1 muestra los estadísticos básicos de las diferencias de temperatura observadas entre ambos métodos ($T_{APOGEE}-T_{CNR4}$). El *bias* es muy similar en ambos casos (+0,4°C), siendo el error absoluto medio (MAE) sensiblemente mayor en los datos diurnos (0,8°C frente a 0,5°C), al igual que las desviaciones estándar obtenidas (±1°C frente a ±0,6°C).

3.2. Comparación en viñedo

La Figura 3 muestra la comparación de las medidas realizadas para el caso de la zona de viñedo durante su evolución fenológica. En este caso se pueden observar mayores discrepancias entre ambos sistemas de medida, incluso para las medidas nocturnas donde la homogeneidad térmica es mayor. Si bien los coeficientes de determinación son buenos (0,978 para el día y 0,992 para la noche), las diferencias son mayores que en la comparación sobre hierba. Ahora la pendiente de las rectas de regresión se aleja de la unidad (0,884 y 0,962 para día y noche, respectivamente), con valores de *bias* mucho más elevados, del orden de +1°C para la noche y de +2°C para el día, con desviaciones estándar alrededor de ±1°C en ambos casos.

4. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha realizado una primera comparación de dos métodos de medida de la temperatura efectiva de la superficie en campo ampliamente usados en las experiencias de calibración de sensores térmicos en vuelo. Para ello se han seguido dos estrategias de medida: el uso de un radiómetro de banda ancha observando la superficie bajo un determinado ángulo de observación (medidas direccionales basadas en la ley de Planck), y la utilización de un radiómetro neto de 4 componentes que porta dos pirgeómetros de radiación térmica cuasi total que miden hemisféricamente (medidas en todo el espacio y todo el espectro térmico basadas en la ley de Stefan-Boltzmann). Ambos sistemas se han dispuesto simultáneamente sobre dos superficies bien distintas: una hierba homogénea y un viñedo.

Los resultados muestran que hay una gran correlación entre ambos tipos de medida, pero con discrepancias

que pueden llegar a ser significativas. Únicamente las medidas nocturnas en el caso de la superficie homogénea tienen un *bias* y desviación estándar pequeños, del orden de 0,5°C, similar al error mínimo de medida alcanzable. Sin embargo, en las medidas diurnas, especialmente en el caso de una superficie heterogénea, las diferencias pueden llegar a ser de entre -1 y -2°C, por encima de los errores de medida en campo y del orden de los errores que suelen observarse en el calibrado de sensores en vuelo, lo que puede afectar sensiblemente a los resultados en tales experiencias en función del tipo de metodología que se esté usando para obtener las medidas de referencia *in situ*. De entrada, desde un punto de vista físico las medidas realizadas con radiómetros son más comparables a las efectuadas desde plataformas aeroportadas, que las realizadas por los pirgeómetros. En el futuro cotejaremos ambos tipos de medidas con diferentes instrumentos en vuelo con el fin de establecer su comparabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, así como el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través de los proyectos CGL2015-64268-R (MINECO / FEDER, UE) y CGL2013-46862-C02-1/2-P. Los autores desean expresar su agradecimiento al ITAP-FUNDESCAM y al Dpto. de Física de la UIB, por el mantenimiento y recogida de datos de los sensores instalados en la festuca y la viña, respectivamente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Augustine, J.A., DeLuisi, J.J., Long, C.N. 2000. SURFRAD— A national surface radiation budget network for atmospheric research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 81, 2341–2357.
- Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F., Sobrino, J.A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14-37.
- Niclòs, R., Valiente, J.A., Barberà, M.J., Coll, C. 2015. An autonomous system to take angular thermal-infrared measurements for validating satellite products. *Remote Sensing*, 7(11), 15269-15294.
- Rubio, E., Caselles, V., Badenas, C. 1997. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14 μm wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 490-521.
- Theocharous, E., Usadi, E., Fox, N.P. 2010. *CEOS Comparison of IR Brightness Temperature Measurements in Support of Satellite Validation. Part I: Laboratory and Ocean Surface Temperature Comparison of Radiation Thermometers*. National Physical Laboratory. Teddington, UK.

Desarrollo de un nuevo producto de temperatura para la región del Amazonas

Gomis-Cebolla, J., Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Soria, G., Julien, Y., Skokovic, D.
Unidad de Cambio Global, Laboratorio Procesado Imágenes, Catedrático Agustín Escardino, nº 9,
46980-Paterna, España. jose.gomis@es

Resumen: Los bosques tropicales de la región del Amazonas incluyen aproximadamente el 50% de los bosques tropicales mundiales y albergan aproximadamente el 25% de la biodiversidad terrestre mundial. Además, juegan un papel crucial en el ciclo del agua y carbono a nivel global. Considerando la relevancia de este bioma y teniendo en cuenta la situación de calentamiento global, el seguimiento de cambios en estos bosques resulta de vital importancia. En este contexto, el uso de imágenes de satélite se presenta como la única alternativa viable para un seguimiento preciso a nivel temporal y espacial de esta región. En particular, recientes estudios han resaltado el papel que pueden jugar el seguimiento de las anomalías de temperatura haciendo uso de datos MODIS en la comprensión de estos cambios. En este trabajo, se propone un nuevo producto de temperatura especialmente diseñado para esta región derivado a partir de datos MODIS. Este ha sido validado utilizando medidas *in-situ* y comparado con los productos de temperatura MODIS actuales. Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de este nuevo producto en la monitorización de los bosques tropicales.

Palabras clave: AMAZONIA, MODIS, LST.

Development of a new temperature product for the Amazonian region

Abstract: Amazonian tropical forests include approximately 50% of the total amount of tropical forests in the world and account for approximately 25% of the global terrestrial biodiversity. Moreover, they play a crucial role in the global water and carbon cycle. Taking into account the importance of this biome and the current global warming scenario the monitoring of the changes in these forests becomes of special importance. In this context, the use of satellite imagery is presented as the only viable means to observe the Amazon in a spatially comprehensive and temporally frequent fashion. Particularly, recent studies have highlighted the role that could play the monitoring of thermal anomalies making use of MODIS data in the comprehension of these changes. In this study, a new LST product especially designed for this region is presented. This has been validated using *in-situ* data and has been compared against the current MODIS LST products. Results obtained prove the utility of this new product in the monitoring of the Amazonian tropical forests.

Keywords: AMAZONIA, MODIS, LST.

1. INTRODUCCIÓN

En una situación de calentamiento global y origen antropogénico cobra importancia el seguimiento del comportamiento de los diferentes biomas. En particular, los bosques tropicales del Amazonas, destacan por su importancia a nivel biológico (Malhi, 2008) y el papel que juegan en el ciclo global de carbono (Malhi, 2008). Debido a la extensión de estos bosques, mediciones puntuales de parámetros meteorológicos/ambientales fallan en representar la variabilidad espacial de los diferentes procesos que ocurren. El uso de imágenes de satélite por tanto se presenta como una herramienta capaz de proporcionar información sobre la región de forma exhaustiva tanto a nivel espacial como temporal. En particular, productos derivados a partir del sensor MODIS que proporciona imágenes diarias con una resolución de 1km, se encuentran entre las herramientas más utilizadas para el seguimiento climático de estos bosques (Hilker *et al.*, 2015).

En este contexto, siendo la temperatura una variable clave en el funcionamiento fisiológico de las plantas, el análisis de anomalías térmicas derivadas a partir de series temporales de imágenes térmicas del satélite MODIS se presenta como una herramienta útil en la monitorización

de los cambios producidos en estos bosques (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2013, Jiménez-Muñoz *et al.*, 2015). Adicionalmente, la relación entre la temperatura de la vegetación y otras variables tales como la productividad y pérdida de biomasa ha sido destacada por algunos estudios (Doughty y Goulden, 2008, Galbraith *et al.*, 2010).

En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un algoritmo de temperatura de la superficie terrestre (LST) split-sindow adaptado para los bosques tropicales de la región del Amazonas haciendo uso de datos MODIS. Este ha sido validado haciendo uso de datos de temperatura *in-situ*. Adicionalmente, ha sido comparado con los resultados de los productos de temperatura MODIS actuales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Región de estudio

La región de los bosques tropicales ha sido delimitada a partir de la intersección de los píxeles clasificados como “Evergreen Broadleaf Forest-EBF” en el producto MCD12Q1 (Strahler *et al.*, 1999) y un vector geográfico que delimita las regiones políticas del Amazonas

(Figura 1). Adicionalmente, se muestra también la ubicación del sitio experimental que proporciona las medidas de temperatura *in-situ*. Esta está localizada en la región de Tambopata, Amazonas peruano (12,818 S, 69,281 W). Se encuentra situada en una zona relativamente homogénea de denso bosque tropical. Dos sensores térmicos T_SI111 e IR_120 proporcionan medidas radiométricas de temperatura cada cinco minutos.

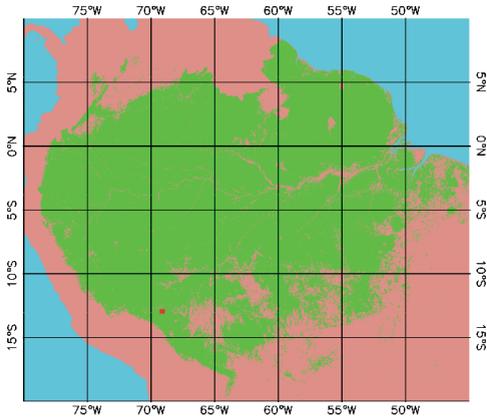


Figura 1. Delimitación de los bosques tropicales utilizado en el presente trabajo. En rojo, se ha indicado la ubicación del sitio experimental (12,818 S, 69,281 W).

2.2. Datos de satélite

En la Tabla 1 se muestran los productos MODIS utilizados para el desarrollo del producto de temperatura presentado y los productos de temperatura MODIS utilizados para su posterior comparación. Los diferentes productos presentes en la Tabla 1, fueron descargados de ladsweb.nascom.nasa.gov.

Tabla 1. Productos MODIS utilizados en el desarrollo del producto de temperatura. Adicionalmente, se recoge los productos MODIS de temperatura utilizados en la comparación posterior.

Producto MODIS	Layers	Versión	Finalidad
MODTBGA	Band 31, Band 32	6	Generación producto LST
MCD12Q1	Land Cover Type 1	5,1	Generación producto LST
MOD07_L2	Temperature_Profile Moisture_Profile Height_Profile	6	Generación producto LST
MOD11A1	LST_Day_1km QC_Day Day_view_time	6	Comparación producto

2.3. Algoritmo MODIS Split Window

El producto de temperatura MOD11A1 es obtenido mediante el algoritmo generalizado Split-Window (Wan y Dozier, 1996):

$$T_s = C + \left(A_1 + A_2 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} + A_3 \frac{\epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_{31} + T_{32}}{2} + \left(B_1 + B_2 + B_3 \frac{\epsilon}{\epsilon^2} \right) \frac{T_{31} - T_{32}}{2} \tag{1}$$

en donde T_s es la temperatura de la superficie, T_{31} y T_{32} son las temperaturas de brillo de las bandas 31 y 32, ϵ_{31} y ϵ_{32} son las emisividades de la superficie de las bandas 31 y 32, ϵ y $\Delta\epsilon$ es la emisividad media y diferencia de emisividades de estas dos bandas. Y finalmente, C , A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 y B_3 son coeficientes derivados a partir de regresiones estadísticas.

2.4. Algoritmo SW

Para el presente trabajo se sugiere el siguiente algoritmo:

$$T_s = T_{31} + C_0 + (T_{31} - T_{32}) + c_2(T_{31} - T_{32})^2 \tag{2}$$

en donde T_{31} y T_{32} se tratan de las temperaturas de brillo de las bandas 31 y 32. El algoritmo propuesto deriva una simplificación de la estructura matemática de Sobrino *et al.*, 1996. Los coeficientes del algoritmo fueron derivados mediante la regresión estadística de una base de datos formada por temperaturas de brillo (T_{31} y T_{32}) simuladas sobre diferentes superficies y condiciones atmosféricas. Esta base de datos fue generada mediante el código de transferencia radiativa MODTRAN (Berk *et al.*, 1990). Las diferentes condiciones de la superficie fueron simuladas considerando tres espectros de vegetación diferentes (grass, coniferous and deciduous) de la librería espectral ASTER (Baldrige *et al.*, 2009). Respecto de las diferentes condiciones atmosféricas éstas fueron simuladas mediante el uso del producto de perfiles atmosférico MOD07 (Tabla 1). Las simulaciones en el MODTRAN fueron realizadas considerando el ángulo de visión del sensor y asumiendo como temperatura de la superficie la temperatura de la primera capa del perfil. Con el fin de representar adecuadamente las diferentes condiciones atmosféricas se seleccionaron los perfiles atmosféricos libres de nubes durante el periodo 2014-2016 de 1118 puntos espaciales de referencia dentro de la delimitación de los bosques tropicales previamente descrita. Teniendo en cuenta tanto los perfiles atmosféricos como los diferentes espectros de vegetación considerados la base de datos de temperatura simuladas consta de un total de 542000 puntos.

2.5. Validación de resultados y comparación de productos

Los valores radiométricos de temperatura han sido convertidos a LST mediante la corrección por emisividad e irradiancia atmosférica descendiente. El período temporal de datos considerado es diciembre 2014 – octubre 2016. Los valores de LST *in situ* han sido comparados con los valores de LST proporcionados por el algoritmo SW y el producto MOD11A1V6. Esta

comparación ha sido realizada considerando dos casos respectivamente: i) filtrando los valores marcados como nubes en la *quality layer* del producto y ii) realizando un filtro adicional indicado también en la *quality layer*. En particular se filtraron los pixels identificados como LST *not produced due to clouds* + LST *produced unreliable quality* (QC=0).

3. RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra T_s (temperatura de la superficie) frente a T_{alg} (temperatura derivada por los algoritmos considerados) para el caso de filtrado de las nubes según la *quality layer*. Y en la Figura 3 considerando el filtro adicional (QC = 0).

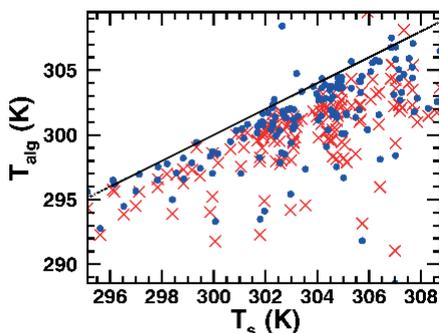


Figura 2. Valores de T_s (temperatura de la superficie) frente a T derivado a partir del algoritmo SW (puntos azules) y valores MOD11A1V6 (puntos rojos) filtrando las nubes según la QA layer. La línea 1:1 está también representada.

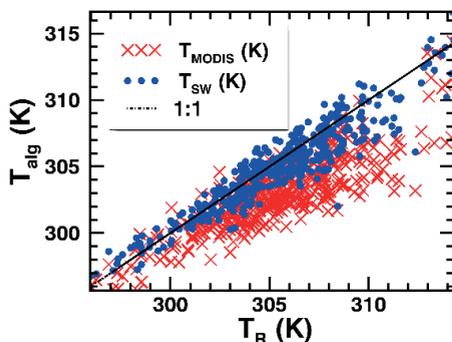


Figura 3. Valores de T_s (temperatura de la superficie) frente a T derivado a partir del algoritmo SW (puntos azules) y valores MOD11A1V6 (puntos rojos) realizando un filtrado adicional (QC = 0). La línea 1:1 está también representada.

En la Tabla 2 se recogen los estadísticos resultantes de la comparación $T_s - T_{alg}$ para los dos casos de estudio considerados.

Tabla 2. Estadísticos derivados de la comparación $T_s - T_{alg}$, *bias*, *desviación estándar*, *RMSE*, *coeficiente de determinación (R^2)* y *número de puntos (N)*.

Método	bias	stdev	rmse	R	N
MOD35_SW	2,35	2,76	3,63	0,42	142
MOD35_MOD	3,46	2,49	4,26	0,45	142
QC_SW	1,56	1,51	2,18	0,76	107
QC_MOD	2,85	1,58	3,26	0,72	107

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Se comprueba cómo el algoritmo propuesto en el presente trabajo es capaz de mejorar los resultados proporcionados por el producto MOD11A1V6. Respecto del caso i) el MOD35_SW proporciona un RMSE 0,6 menor que el MOD35_MOD. Éste resulta principalmente de una reducción de 1,1 K en el *bias*. Respecto del caso ii) el QC_SW proporciona un RMSE con un valor de aproximadamente 1,1 K menor que el QC_MOD. En este caso, también resulta principalmente de una reducción en el *bias*, con un valor de 1,3 K. Respecto de las Figuras 2 y 3 se observa cómo en el segundo caso los valores se distribuyen más cercanos a la línea 1:1. Adicionalmente, se observa cómo el valor del coeficiente de determinación ha aumentado con respecto al MOD35. También se obtiene un valor de desviación estándar menor. Esto es debido a una reducción en la posible contaminación por nubes en los valores de temperatura debido al filtrado adicional. En conclusión, la validación con datos *in-situ* ha demostrado que el algoritmo SW presentado proporciona valores de RMSE menores, 0,6 K y 1,1 K para los dos casos considerados, que el producto MOD11A1 versión 6. Esto demuestra la utilidad del algoritmo propuesto para la monitorización térmica de los bosques tropicales.

5. AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido financiado por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (FPU14/06502) y el Ministerio de Ciencia e Innovación (CEOS-Spain2, ESP2014-52955-R).

6. BIBLIOGRAFÍA

Baldrige, A.M *et al.* 2009. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113, 711–715.

Berk, A., *et al.* 1999. *MODTRAN4 User's Manual*. Hanscom, AFB, MA: Air

Doughty, C., *et al.* 2008. Are tropical forests near a high temperature threshold?. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113.

Galbraith, D., *et al.* 2010. Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. *New Phytologist*, 187, 647-665.

Hilker, T., *et al.* 2015. On the measurability of change in Amazon vegetation from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 166, 233-242.

- Jiménez-Muñoz, J., et al. 2013. Spatial and temporal patterns of the recent warming of the Amazon forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5204-5215.
- Jiménez-Muñoz, J. et al. 2015. A database for the monitoring of thermal anomalies over the Amazon forest and adjacent intertropical oceans. *Scientific Data*, 2, 150024.
- Malhi, Y. et al. 2008. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. *Science*, 319, 169-172.
- Strahler, A. et al., MODIS Land Cover Product, Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0. (Boston University, 1999).

Imágenes Radar de alta resolución para la caracterización de la cobertura nival en la Isla Decepción (Antártida Marítima)

Jiménez, J. J. ^(1,2), Mora, C. ⁽²⁾, Ramos, M. ^(1,2), Vieira, G. ⁽²⁾, Fernández, S. ⁽³⁾, de Pablo, M. A. ⁽⁴⁾, Recondo, C. ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Departamento de Física y Matemáticas. Universidad de Alcalá, Madrid. Campus Científico-Tecnológico.

Ctra. A-II Km 33.6, 28871 Alcalá de Henares, Madrid, España. jjavierjimenez2@gmail.com

⁽²⁾ CEG/IGOT-Universidad de Lisboa, Rua Branca Edmée Marques, Cidade Universitária, 1600-276 Lisboa, Portugal.
carlamora@campus.ul.pt, vieira@campus.ul.pt

⁽³⁾ Departamento de Geología. Universidad de Oviedo. Campus de Oviedo (Llamaquique). C\ Jesús Arias de Velasco
s/n, 33005 Oviedo, Asturias, España. fernandezmsusana@uniovi.es

⁽⁴⁾ Departamento de Geología, Geografía y Medio Ambiente. Universidad de Alcalá. Campus Científico-Tecnológico.
Ctra. A-II Km 33.6, 28871 Alcalá de Henares, Madrid, España. miguelangel.depablo@uah.es

⁽⁵⁾ Grupo Remote Sensing Applications (RSApps). Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría.

Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Campus de Mieres. C\ Gonzalo
Gutiérrez Quirós, s/n, 33600 Mieres, Asturias, España. mdrecondo@uniovi.es

Resumen: Los estudios de caracterización de la cobertura nival con sensores activos de microondas en banda C en ambientes de alta nubosidad, como es el caso de las islas Shetland del Sur (Antártida Marítima), muestran una capacidad de detección ajustada a escala regional (Mora *et al.*, 2013) y también limitaciones para la detección de nieve seca y para su aplicación a escala local. La banda X, como es el caso del sensor TerraSAR X (modo *Spotlight*) ofrece mejor resolución espacial para detectar la cobertura de nieve estacional, pero se precisan medidas de verdad-terreno (espesor de nieve, densidad, tamaño del grano de nieve y SWE, además de temperatura del aire y del suelo) en las mismas fechas que las adquisiciones de sensores remotos (Mora *et al.*, 2017), siendo de gran ayuda para la clasificación de las superficies innivadas disponer de registros fotográficos diarios de la evolución del manto nival. El modo *Staring Spotlight* permite disponer de imágenes de aún mayor resolución espacial (0,671 m azimut × 0,455 m range), que analizadas en estudios multitemporales, en el marco del Proyecto *PermaSnow* (de Pablo *et al.*, 2016), esperamos nos permitan identificar superficies con nieve húmeda, nieve seca (con posibles limitaciones) y suelo desnudo. Durante las Campañas Antárticas 2016-2019, además de la instalación de nuevos elementos de medida de la capa nival en el sitio de pruebas CALM “Crater Lake”, se ha comenzado a realizar nuevas medidas de verdad-terreno mediante catas en la nieve, para cruzar esta información con la medida del *backscattering* superficial en la zona. El objetivo es disponer de nuevas fuentes de datos que permitan realizar mapas de innivación a nivel regional e incluso a escala local. En este trabajo se muestran los resultados preliminares obtenidos y el estado de evolución de los estudios en marcha.

Palabras clave: *Backscattering*, nieve, Antártida, imágenes radar.

High resolution Radar imaging for snow cover characterization in Deception Island (Maritime Antarctica)

Abstract: *Studies on the characterization of snow cover with active C-band microwave sensors in high cloud environments, such as the South Shetland Islands (Antarctica Maritime), show a regional-adjusted detection capacity (Mora et al., 2013) and also limitations for the detection of dry snow and for its application to local scale. The X-band, such as the TerraSAR X sensor (Spotlight mode), offers better spatial resolution to detect seasonal snow cover, but true terrain measurements are required (snow thickness, density, snow grain size and SWE, in addition to air and soil temperature) on the same dates as the acquisition of remote sensors (Mora et al., 2017), and there is a great deal for the classification stage to have daily photographic records of the evolution of the snow mantle. The Staring Spotlight mode allows images with even higher spatial resolution (0.671 m azimuth × 0.455 m range), which analyzed in multitemporal studies, within the framework of the PermaSnow Project (de Pablo et al., 2016), expecting to allow us to identify surfaces with wet snow, dry snow (with foreseeable limitations) and bare ground. During Antarctic Campaigns 2016-2019, in addition to the installation of new elements of measurement of the snow cover at the CALM “Crater Lake” test site, we are collecting new measures of ground-truthing by snow-pits, to cross-correlate this information with the measurement of the superficial backscattering in the zone. The objective is to have new sources of data that facilitate us to map innivation at the regional level and even at the local level. This work shows the preliminary results obtained and the evolution status of the ongoing studies.*

Keywords: *Backscattering, snow, Antarctica, radar imagery.*

1. INTRODUCCIÓN

La detección remota de la cobertura nival ha sido abordada en numerosos estudios desde hace ya más de dos décadas. Las limitaciones que presenta el dominio óptico en zonas de elevada nubosidad y largos periodos de ausencia de radiación solar, como es el caso de la Antártida, se soslayan cuando se trabaja con sensores activos de microondas (Rees and Steel, 2001; Magagi y Bernier, 2003; Falk et al., 2016), que son capaces de penetrar la capa nubosa y pueden actuar en ciclo diurno o nocturno, dado que solo dependen de la energía que ellos mismos emiten y reciben.

Los primeros desarrollos en banda L y banda C (Mora et al., 2013), que mostraron resultados prometedores en la detección de superficies innivadas a nivel regional, están dando paso a los análisis de alta resolución espacial que permiten algunos sensores en banda X, como es el caso de las plataformas TerraSAR X y TanDEM X del consorcio formado por DLR (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt*) y Airbus, que en su modo de explotación *Staring SpotLight* permiten obtener resoluciones cercanas a 1 m de tamaño de pixel, lo que facilita en gran medida la comparación de los resultados del *backscattering* superficial con los datos de verdad-terreno que se obtienen localmente, tanto en las Campañas Antárticas que anualmente se desarrollan en el verano austral, como con los datos observacionales que aportan los sensores allí implantados que recogen información durante todo el año.

Las ubicaciones experimentales que albergan estos equipos funcionan bajo el protocolo internacional CALM (*Circumpolar Active Layer Monitoring*), lo que permite establecer patrones comparativos a la hora de valorar los resultados obtenidos.

El estudio que se presenta se está realizando en el sitio experimental CALM “Crater Lake”, ubicado en la Isla Decepción (Figuras 1 y 2), perteneciente al archipiélago de las Islas Shetland del Sur (Antártida).

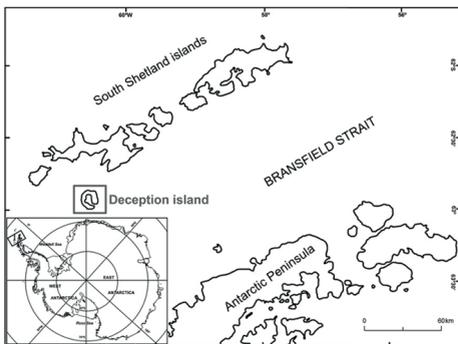


Figura 1. Ubicación de la Isla Decepción, Antártida Marítima.

La nieve desempeña un papel importante en el control del régimen térmico del suelo, influyendo de esta forma en la capa activa del permafrost subyacente, cuya distribución

es un indicador recogido en el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

La cobertura nival con su efecto de aislamiento térmico determina en gran medida la capacidad termodinámica del suelo en pérdida de energía durante el invierno austral o de aislamiento al flujo térmico durante el verano, lo que puede implicar a término agradación del permafrost o en caso contrario, su degradación y la liberación asociada de gases de efecto invernadero, con la bien conocida problemática que ello implica.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La parcela CALM está constituida por un recinto cuadrado de 100 m de lado que está subdividido en cuadrículas de 10×10 m, con sensores de temperatura ubicados a nivel superficial y a diferentes profundidades en sondeos realizados al efecto, sensores de medida de la temperatura del aire y termónivómetros para la medida del espesor nival. Las medidas se realizan cada 4 horas y se almacenan localmente.

Adicionalmente existen cámaras fotográficas que realizan 3 tomas en las horas centrales del día para poder valorar el estado de la cobertura nival en la parcela (Figura 2).

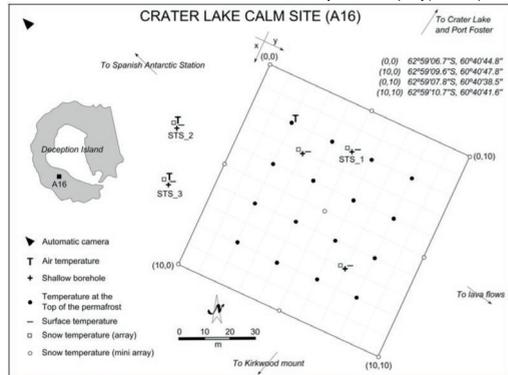


Figura 2. Ubicación y dotación de instrumental en la parcela CALM “Crater Lake” de la Isla Decepción.

Con los recursos proporcionados por el Proyecto PermaSnow, se han adquirido 26 imágenes TerraSAR X (20 en polarización HH y 6 en polarización VV), desde el día 6/11/2016 al día 30/03/2017, con una periodicidad media de 11 días, en dos órbitas diferentes:

- órbita 13, ángulo de incidencia: 37,6°, sentido ascendente.
- órbita 19, ángulo de incidencia: 21,4°, sentido descendente.

Adicionalmente, en fechas coincidentes con la adquisición de imágenes se realizaron 6 snow-pits en las cercanías del sitio CALM “Crater Lake”, para caracterizar los parámetros físicos de la nieve siguiendo un perfil altitudinal progresivo.

Para el procesado de las imágenes TerraSAR X se ha utilizado la herramienta ESA-SNAP, siguiéndose el flujo de tratamiento reflejado en la figura 3. En la fase de corrección geométrica de las imágenes se ha empleado

un DEM de 10 m, para las extracciones de *backscattering* zonales, y de 1 m obtenido con medidas DGPS para la aplicación en detalle sobre la cuadrícula CALM. Con el fin de conseguir una mejor aproximación textural en una fase posterior se utilizará un DEM centimétrico obtenido mediante vuelos con un UAV durante la última Campaña Antártica 2016/2017.

El filtro de *speckle* aplicado es Lee con ventana 9×9 y la corrección geométrica se realiza con remuestreo de imagen mediante interpolación bicúbica, lo que genera una imagen con un tamaño de pixel de 0,75 m en *ground range*: (0,67 m *azimuth*×0,75 m *range*).

El estudio, en esta fase, se ha realizado con imágenes en polarización HH, si bien se extenderá también a polarización VV y a diferentes ángulos de incidencia para caracterizar la respuesta electromagnética de la nieve bajo esos parámetros.

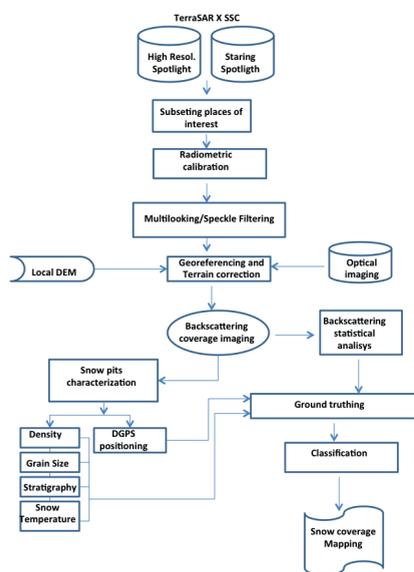


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de imágenes TerraSAR X.

3. RESULTADOS

3.1. Backscattering superficial

Se ha realizado la extracción de la respuesta de *backscattering* superficial (dB) en la zona de estudio: inmediaciones de la Base Española Antártica Gabriel de Castilla sobre un área aproximada de 15 km², con especial foco en la parcela CALM “Crater Lake”.

La respuesta electromagnética de las superficies cubiertas está fuertemente condicionada por la topografía, las texturas superficiales del terreno y en el caso del manto nival por el grado de humedad de la nieve y las características físicas de la misma (tamaño de grano, densidad, presencia de hielo intersticial y cohesión, entre

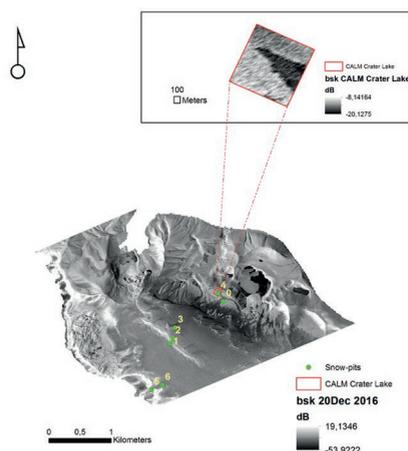
otros), modulando la respuesta de *backscattering* que se obtiene.

Las fechas de adquisición, coincidiendo con la Campaña anual Antártica, han sido escogidas para la valoración del proceso de fusión nival que se produce durante el verano antártico, lo que determina la desaparición completa del manto durante semanas y la exposición del suelo a la radiación solar directa, produciéndose un efecto inducido sobre el intercambio termodinámico entre suelo y aire (Ramos y Vieira, 2009) que afecta a la capa activa del permafrost.

La detección de la nieve por el sensor de microondas se produce por el diferencial en la constante dieléctrica, más elevada para la nieve húmeda que para el terreno circundante (Figura 4), lo que se traduce en una disminución sensible de la señal de retrodispersión.

Para cualificar el *backscattering* superficial en función de la tipología nival existente se realizaron 6 catas (*snow-pits*) el 20/12/2016 en la zona de estudio, siguiendo un gradiente altitudinal.

Está pendiente la introducción de estos resultados en un modelo de respuesta geofísica (GMF) para correlacionar el estado textural de la nieve con la respuesta electromagnética obtenida.



Backscattering superficial (dB) 20 Diciembre 2016

Figura 4. Extracción del *backscattering* superficial en el área de estudio y ubicación de los *snow-pits* realizados el 20/12/2016, polarización HH, ángulo de incidencia 37,6°, órbita ascendente, 23:33 UTC.

3.2. Delimitación de la cobertura nival

El día 31 de Diciembre de 2016, coincidiendo con la adquisición de la imagen TerraSAR X órbita 13, ascendente, con ángulo de incidencia 37,6°, se realizó un levantamiento de la cobertura nival en la zona de estudio (Figura 5), recogiendo la extensión de nieve con espesor superior a 2 cm.

El registro de temperatura obtenido por los sensores superficiales de la parcela CALM en la zona innivada muestra la estabilización térmica que se produce y permite confirmar que en la misma se mantiene dentro de un margen compatible con la presencia de nieve (Figura 6).

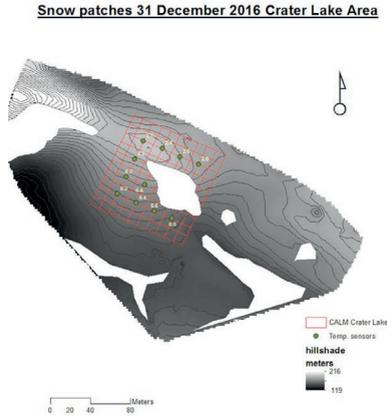


Figura 5. Mapa de cobertura nival del 31 de Diciembre de 2016 mediante datos observacionales, incluyendo ubicación de los sensores de temperatura superficial de la parcela CALM.

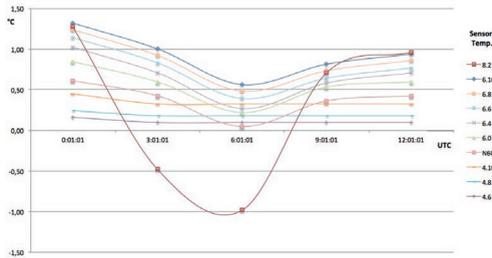


Figura 6. Datos de temperatura del día 31 Diciembre de 2016 en los sensores de temperatura superficial (2 cm) de la parcela CALM cubiertos por la capa nival (sensor 8.2 tomado como control).

El mapa de cobertura nival y el *backscattering* superficial detectado por el sensor se incluye en la figura 7. Se observa que espesores de nieve inferiores a 9 cm de nieve húmeda (como corresponde a la fecha de toma de datos en campo) no son detectables por el sensor TerraSAR X, quedando el margen de detección de nieve en fase de fusión en el rango de -21 a -13 dB. Están en fase de análisis los resultados de la evolución del *backscattering* superficial y de las coberturas correspondientes en el periodo de Noviembre de 2016 a Marzo de 2017 (en la Figura 8 se incluye una muestra de los mismos), conociéndose por estudios anteriores (Mora et al., 2017) que los registros del *backscattering* superficial del suelo desnudo y de la nieve seca muestran una zona de solapamiento con los de la nieve húmeda,

lo que determina la necesidad de utilizar software con orientación a objetos para delimitar las diferentes texturas presentes y poder obtener así mapas de cobertura fiables.

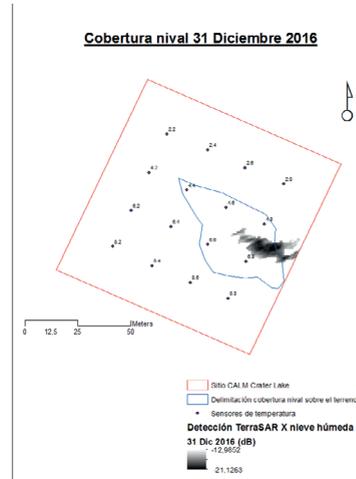


Figura 7. Mapa de cobertura nival y *backscattering* asociado del 31 Diciembre de 2016 mediante teledetección por microondas banda X, polarización HH, ángulo de incidencia 37,6°, órbita ascendente, 23:33 UTC.

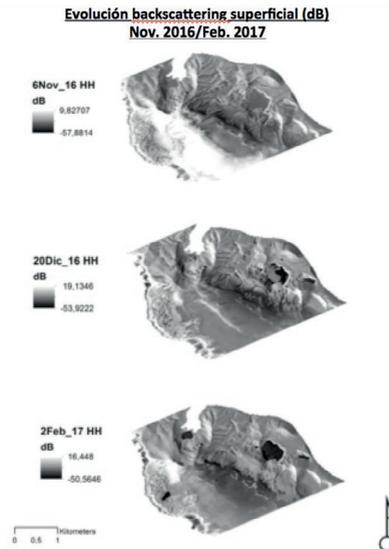


Figura 8. Muestra de la evolución del *backscattering* superficial del 6 de Noviembre de 2016 al 2 de Febrero de 2017, polarización HH, ángulo de incidencia 37,6°, órbita ascendente, en el área de estudio de la Isla Decepción.

4. DISCUSIÓN

La detección de la cobertura nival mediante imágenes Radar en banda X se realiza de forma precisa cuando

la nieve se encuentra en estado de fusión (densidades superiores a 550 kg/m³) y su espesor efectivo es superior a 10 cm.

Cuando la nieve es seca o su densidad es inferior a 450 kg/m³ se puede producir un solapamiento del *backscattering* superficial con el que corresponde a superficies sin nieve pero con características texturales particularmente similares (grado de humedad, tamaño de los clastos, orientación topográfica, entre otros); para paliar este efecto, a nivel regional, cuando se dispone de imágenes del dominio óptico para contrastar la extensión ocupada por el manto nival se puede generar una validación cruzada del registro de *backscattering* (dB) correspondiente a la nieve en sus diferentes estados metamórficos con la presencia de la misma en las imágenes ópticas, vía análisis visual, si bien la presencia casi continua de nubosidad en estas zonas geográficas y los periodos de muy baja irradiación solar dificultan en gran medida esta posibilidad. Esta fase del Proyecto *PermaSnow* aún no ha sido abordada.

En estudios a nivel local, la utilización de sensores de microondas en banda X, que poseen una baja capacidad de penetración en la capa nival, permite la delimitación de espesores nivales que no sean someros o de corta permanencia en el suelo (en una región donde es muy frecuente este tipo de precipitación), de forma que se puede registrar la “firma” de *backscattering* en dichas superficies y aplicarla a la clasificación de superficies innivadas, para ello y coincidiendo con la recopilación de datos observacionales durante las Campañas Antárticas anuales, se delimitan zonas de control que se toman como referencias de verdad-terreno. En la fase de estudio en la que nos encontramos se ha podido avanzar en la caracterización de la presencia nival y su extensión, sobre todo en la fase de fusión, dada la diferencial respuesta de *backscattering* que se genera, sin embargo se precisa una caracterización textural con software de análisis orientado a objetos para obtener clasificaciones robustas. Con ese mismo objetivo estamos evaluando el análisis de coherencia de la señal Radar en distintos momentos temporales y con diferentes polarizaciones de la señal emitida y recibida, así como composiciones multi-temporales para detectar transiciones en el metamorfismo de la nieve.

5. CONCLUSIONES

La detección de la cobertura nival mediante técnicas de microondas activas puede ofrecer información relevante sobre su extensión y sus características físicas, sobre todo cuando la nieve contiene un elevado grado de humedad y los espesores son significativos. Los resultados obtenidos así lo indican, pero han de considerarse claramente preliminares, dado que nos encontramos en una fase muy temprana de desarrollo del Proyecto *PermaSnow*, una vez finalizada la Campaña Antártica 2016/2017 (Noviembre 2016/Marzo 2017), y los datos están en fase de integración.

Este trabajo está siendo apoyado por fondos del Proyecto CTM2014-52021-R del Ministerio de

Economía del Gobierno de España en un acuerdo entre la Universidad de Alcalá, el Instituto Español de Geología y Minería y el Comité Polar Español: Proyecto *PermaSnow*, y del Proyecto PERMANTAR-3 (PTDC / AAG- GLO / 3908/2012) de la Fundación para la Ciencia y la Tecnología (FCT) de Portugal y el Programa Polar Portugués PROPOLAR, así como por el acuerdo de colaboración con la Institución DLR que ha proporcionado las imágenes del sensor TerraSAR X.

6. BIBLIOGRAFÍA

- De Pablo, M.A., Ramos, M., Molina, A., Vieira, G., Hidalgo M.A., Prieto, M., Jiménez, J.J., Fernández, S., Recondo, C., Calleja J.F., Peón J.J. and Mora, C. 2016. Frozen ground and snow cover monitoring in the South Shetland Islands, Antarctica: instrumentation, effects on ground thermal behaviour and future research. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 42 (2), 2016, p. 475-495. doi: 10.18172/cig.2917.
- Falk, U., Gieseke, H., Kotzur, F., and Braun, M. 2016. Monitoring snow and ice surfaces on King George Island, Antarctic Peninsula, with high-resolution TerraSAR-X time series. *Antarctic Science*, 28, 2, 135-149, doi: 10.1017/S0954102015000577, 2016.
- Magagi, R., Bernier, M, 2003. Optimal conditions for wet snow detection using RADARSAT SAR data. *Remote Sensing of Environment* 84, 221-233, 2003..
- Mora, C., Viera G. and Ramos, M. (2013). Evaluation of Envisat ASAR IMP imagery for snow mapping at varying spatial resolution (Deception Island, South Shetlands-Antarctica). *Antarctic Glacial and Periglacial Processes*, Mike Hambrey (ed). The Geological Society Publications, London. doi:10.1144/SP381.19.
- Mora, C., Jiménez, J.J., Pina, P., Catalao, J., Vieira, G. 2017. Evaluation of single-band snow-patch mapping using high-resolution microwave remote sensing: an application in the maritime Antarctic. *The Cryosphere*, 11, 139-155, 2017. www.the-cryosphere.net/11/139/2017/ doi:10.5194/tc-11-139-2017.
- Ramos, M., Vieira G. 2009. Evaluation of the ground surface enthalpy balance from bedrock temperatures (Livingston Island, Maritime Antarctic). *The Cryosphere*, 3, 133-145, 2009. www.the-cryosphere.net/3/133/2009/ doi:10.5194/tc-3-133-2009.
- Rees, W. S., Steel, M. 2001. Radar backscatter coefficients and snow detectability for upland terrain in Scotland. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 15, 3015-3026, 2001.

Adquisición de datos verdad-terreno para evaluar la temperatura de la superficie terrestre obtenida desde satélite: el producto S-NPP VIIRS

Niclòs, R. ⁽¹⁾, Pérez-Planells, L. ⁽¹⁾, Valiente, J. A. ⁽²⁾, Coll, C. ⁽¹⁾, Barberá, M. J. ⁽¹⁾, Caselles, V. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Universitat de València, Dr Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia, España. {raquel.niclos, lluis.perez, cesar.coll, m.jesus.barbera, vicente.caselles}@uv.es

⁽²⁾ Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo – CEAM-UMH, Charles Darwin 14, 46980 Paterna, Valencia, España. josean@ceam.es

Resumen: Este trabajo presenta una validación del producto de temperatura de la superficie terrestre (LST) proporcionado por el *Suomi National Polar-Orbiting Partnership (S-NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)*, tomando como referencia datos de campo adquiridos en una zona de arrozales. Los datos LST verdad-terreno se midieron principalmente con un sistema de medida autónomo dispuesto en una estación permanente situada en una zona de arrozales plana y homogénea de ~100 km² cercana a la ciudad de Valencia. La zona experimental cuenta con tres tipos de coberturas estacionales diferentes, que además son espacialmente homogéneas, lo que hace que la zona experimental resulte interesante. Además, el sistema gira automáticamente escaneando los hemisferios terrestre y celeste mediante pasos angulares, obteniendo temperaturas terrestres y celestes con un solo radiómetro térmico. Los datos adquiridos se procesaron para obtener la LST y se compararon con las LSTs proporcionadas con el producto S-NPP VIIRS. Este producto se genera mediante un algoritmo split-window a partir de las temperaturas de brillo en los canales centrados en 10,8 μm y 12,0 μm. Los coeficientes del algoritmo son diferentes para día y noche, y se obtuvieron para 17 coberturas IGBP diferentes. Los resultados de esta validación muestran que las LSTs de VIIRS disponen de una incertidumbre cercana a la esperada (1,5 K) en dicha zona, pero se obtienen diferentes desviaciones sistemáticas para día y noche, así como para las diferentes superficies estudiadas. El sistema autónomo y angular utilizado proporciona datos de referencia continuos que permitirán extender la validación de productos LST de satélite con el tiempo.

Palabras clave: temperatura de la superficie terrestre, datos verdad-terreno, VIIRS, validación.

Taking ground-truth data to assess the accuracy of satellite land surface temperature retrieval: the S-NPP VIIRS product

Abstract: *This contribution shows validation results of the land surface temperature (LST) product obtained from the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (S-NPP) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) data when using ground measurements acquired over a rice paddy as reference data. Ground-truth LST data were registered mainly by an autonomous system deployed on a permanent station at a ~100 km² flat and homogeneous area of rice crop fields near the Valencia city. The rice site has three seasonal land covers with time (bare soils, full vegetation cover and water), and spatially homogeneous, which makes it interesting since different surfaces can be studied by the system with time. The system can rotate automatically to scan land and sky hemispheres at angular steps to attain land and sky temperatures by means of a single thermal-infrared radiometer. The measured TIR data were processed to obtain ground-truth LST and compared with the operational LST product of the S-NPP VIIRS. This product is generated using a split-window algorithm, which uses brightness temperatures measured in channels centred on 10.8 μm and 12.0 μm, respectively. The algorithm coefficients are different for daytime and nighttime overpasses, and were derived 17 different IGBP surface types. The validation results showed that the VIIRS LST data work with uncertainty close to the expected (1.5 K) at the rice paddy site, but different systematic uncertainties were obtained for daytime and nighttime overpasses and for the different land covers studied with time. The proposed autonomous and angular system provides continuous reference data to extend the validation of satellite LST products with time.*

Keywords: *land surface temperature, ground-truth data, VIIRS, validation.*

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de productos de temperatura de la superficie terrestre (LST) obtenidos a partir de imágenes de satélite habitualmente se lleva a cabo mediante campañas específicas en las que se adquieren datos verdad-terreno a lo largo de transectos en zonas homogéneas y extensas. Sin embargo, en los últimos años nos hemos propuesto combinar estas campañas con el registro continuado de datos mediante un sistema pensado para

estaciones permanentes instaladas en campo. Además, la adquisición de datos LST es esencial para entender las interacciones superficie-atmósfera y en una amplia gama de aplicaciones en el área medioambiental como: la estimación de flujos energéticos, la evaporación en suelos y la evapotranspiración de la vegetación, la productividad de los cultivos y la estimación de necesidades de irrigación, la predicción de riesgo de incendios forestales y su detección y seguimiento, y la mejora en la predicción

de eventos meteorológicos extremos mediante su uso como dato de entrada en modelos meteorológicos.

Así, en este trabajo presentamos datos adquiridos por un sistema que hemos desarrollado para la medida automática de radiancias en el infrarrojo térmico (TIR). Este realiza barridos angulares (cenitales y acimutales) tanto en el hemisferio terrestre como celeste con un único radiómetro. Este sistema autónomo y angular ha sido desarrollado para su instalación en estaciones meteorológicas comunes con el fin de obtener datos continuos de LST y mejorar el conocimiento de la anisotropía angular de las propiedades emisivas superficiales.

En este trabajo utilizamos los datos adquiridos de esta forma como referencia en la evaluación del producto LST ofrecido por el sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo del *Suomi National Polar-Orbiting Partnership* (S-NPP), considerado sucesor del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo de EOS Terra y EOS Aqua.

2. EL PRODUCTO LST DEL S-NPP VIIRS

El producto VIIRS *Environmental Data Record* (EDR) LST se genera utilizando un algoritmo de tipo *split-window* (Ecuación 1), que combina las temperaturas de brillo en las bandas espectrales M15 y M16, centradas en 10,76 μm y 12,01 μm , respectivamente.

$$LST = a_0 + a_1 T_{15} + a_2 (T_{15} - T_{16}) + a_3 (\sec\theta_v - 1) + a_4 (T_{15} - T_{16})^2 \quad (1)$$

Los coeficientes de la Ecuación 1 (a_j , para $j=0-4$) son diferentes para las pasadas diurnas y nocturnas y según el tipo de superficie asignado para cada pixel, de forma que toman valores diferentes para 17 tipos de superficies basados en la clasificación *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) (VIIRS LST ATBD 2013; Guillevic et al., 2014). Estos coeficientes se obtienen mediante simulaciones con el modelo de transferencia radiativa MODTRAN y condiciones, tanto atmosféricas como superficiales, globalmente representativas. Los parámetros atmosféricos se derivaron a partir de datos del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y los valores de emisividad para cada tipo de superficie se obtuvieron a partir de la base de datos MOSART (VIIRS LST ATBD, 2013).

Los productos VIIRS LST se obtuvieron del *NASA Land Product Evaluation and Analysis Tool Element* (LPEATE), donde se proporcionan secciones de las imágenes VIIRS contenidas en el *NOAA Comprehensive Large Array-data Stewardship System* (CLASS).

3. ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

Los datos de referencia fueron adquiridos por un sistema diseñado para realizar barridos angulares con un único radiómetro TIR (Niclòs et al., 2015), evitando el uso de radiómetros dispuestos bajo ángulos de observación fijos, como es el caso de otras estaciones de medida a nivel internacional. Así, realiza barridos angulares completos en ambos hemisferios utilizando ángulos cenitales y

acimutales predefinidos. El radiómetro utilizado en el sistema autónomo es el modelo SI-121 (8-14 μm) de Apogee Instruments (www.apogeeinstruments.com), elegido, no solo por su bajo peso (190 g) y tamaño, sino también por su buena relación calidad-precio, probada en calibraciones frente a cuerpos negros de referencia. La precisión del SI-121 en términos de temperatura radiométrica ha sido evaluada frente a dos cuerpos de referencia: a) un cuerpo negro Landcal P80P con temperaturas de 278 K a 303 K, y b) un cuerpo negro *National Institute of Standards and Technology* (NIST), entre 283 K y 303 K, durante una campaña organizada por el comité internacional *Committee on Earth Observation Satellites* (CEOS). Con ello, se obtuvieron precisiones de $\pm 0,2$ K para el SI-121 entre 278 K y 303 K con (a), y todavía mejores entre 293-303 K con (b) (Theocharous et al., 2010, Niclòs et al., 2011).

El sistema se instaló en una parcela experimental emplazada en una zona extensa y homogénea dedicada al cultivo del arroz y cercana a la ciudad de Valencia (39,274°N, -0,317°E en WGS-84; 2,5 m sobre el nivel del mar; con extensión de ~ 100 km²; Figura 1). Cuenta con cobertura vegetal completa de julio a septiembre. Se inunda completamente de diciembre a enero y también en junio, y la cobertura terrestre cambia desde suelo desnudo húmedo a seco desde febrero a mayo. Con ello, con este cultivo estacional contamos con 3 coberturas terrestres diferentes con el paso del tiempo en un mismo emplazamiento, que además son térmicamente homogéneas.

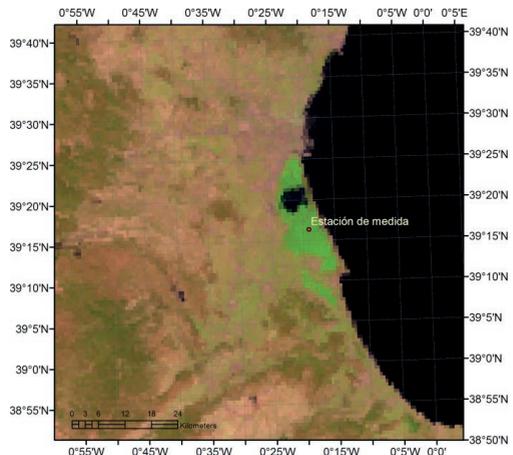


Figura 1. Emplazamiento de la estación de medida sobre una composición color RGB de datos de reflectividad VIIRS SDR (R-G-B M10-M7-M5) del 27 de julio de 2015.

A partir de las medidas radiométricas del sistema se obtiene la LST siguiendo la siguiente metodología. La radiancia TIR medida por la banda i de un radiómetro observando la superficie, cerca de ella, en una dirección determinada viene dada por:

$$L_i(\theta, \phi) = \varepsilon_i(\theta, \phi) B_i(LST) + (1 - \varepsilon_i(\theta, \phi)) L_{i, atm, hem}^{\downarrow} \quad (2)$$

donde $B_i(LST)$ es la función de Planck efectiva para la banda i a una temperatura LST ; $\varepsilon_i(\theta, \phi)$ es la emisividad direccional de la superficie; y $L_i^{down, hem}$ es la radiancia descendente hemisférica (irradiancia descendente dividida por π), obtenida mediante integración de la radiancia medida bajo diferentes direcciones en el hemisferio celeste. Estos datos además se utilizaron para el filtrado de datos afectados por nubes en la base de datos utilizada para la validación del producto VIIRS LST.

4. RESULTADOS

En este trabajo mostramos los primeros resultados de validación del algoritmo LST operativo de VIIRS cuando se utilizan datos VIIRS obtenidos a través de la herramienta LPEATE bajo ángulos de observación cenitales iguales o inferiores a 40° , y las tablas de coeficientes mostradas en Guillevic *et al.* (2014). La validación se realizó comparando los resultados VIIRS LST frente a los datos verdad-terreno obtenidos con el sistema en el emplazamiento indicado desde finales de 2014 a finales de 2015. Si analizamos estadísticamente las diferencias obtenidas entre las LST de VIIRS y los datos *in situ* (ver en Tabla 1), observamos una diferencia sistemática (mediana) de +1,1 K y una desviación estándar robusta ($RSD = 1,4826 - \text{mediana} \cdot (|dif_i - \text{mediana}(dif_i)|)$), donde dif_i representa cada una de las diferencias entre las LST de VIIRS y los datos *in situ* de 1,0 K, con una suma cuadrática de ambos valores (R-RMSD) de 1,5 K para las pasadas de VIIRS diurnas. En el caso de las pasadas nocturnas, la mediana es despreciable y la RSD toma un valor 1,2 K, obteniendo una R-RMSD de 1,2 K, cuando analizamos los resultados de los tres tipos de coberturas en el área experimental en conjunto.

Tabla 1. Estadísticas de las diferencias entre la LST de VIIRS y los datos verdad-terreno, diferenciando pasadas diurnas (D) y nocturnas (N).

		Mediana (K)	RSD (K)	R-RMSD (K)	N
Todas las coberturas	D	1,1	1,0	1,5	67
	N	0,0	1,2	1,2	60
Inundado (agua)	D	1,0	0,9	1,3	21
	N	-0,2	1,1	1,1	22
Cobertura Vegetal completa	D	1,2	0,6	1,3	23
	N	0,6	0,6	0,8	19
Suelo	D	1,6	1,1	2,0	23
	N	-0,3	1,4	1,5	19

En la Tabla 1 también mostramos los resultados de forma independiente para los tres tipos de coberturas estacionales existentes en el área experimental: suelo inundado (agua), cobertura vegetal completa, y suelo sin vegetación. Las diferencias sistemáticas presentan variaciones en función del tipo de cobertura y también difieren entre las pasadas de VIIRS diurnas y nocturnas.

Los tipos de coberturas IGBP asignados por el producto VIIRS para la zona experimental son principalmente las clases 12 (*cropland*) y 14 (*cropland/natural vegetation*), independientemente del estado fenológico del cultivo, es decir, de los cambios de cobertura superficial que se dan en la zona experimental a lo largo del año. Sin embargo el impacto de la asignación de coeficientes del algoritmo *split-window* en función del tipo de cobertura no parece ser importante a la vista de los resultados mostrados en la Tabla 1.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de esta primera validación muestran exactitudes para el algoritmo operacional LST de VIIRS dentro de los requisitos establecidos como mínimos por el Joint Polar Satellite System (JPSS), definidos con un error sistemático entre satélite y datos verdad terreno de $\pm 1,4$ K y una desviación estándar de las diferencias de 2,5 K. El JPSS también estableció unos requisitos en cuanto a exactitud como objetivo a alcanzar: error sistemático de $\pm 0,8$ K y desviación estándar de 1,5 K (Justice *et al.*, 2013; JPSS Program, 2014). Los resultados demuestran que las LST de VIIRS alcanzan exactitudes en nuestra zona experimental que no se encuentran lejos de dicho objetivo, principalmente en las pasadas nocturnas.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, así como el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto CGL2015-64268-R (MINECO / FEDER, UE) y del contrato de investigación del programa nacional Ramón y Cajal de la Dra. Raquel Niclòs (RYC-2010-06213).

7. BIBLIOGRAFÍA

- Guillevic, P.C., Biard, C.J., Hulley, G.C., Privette, J.L., Hook, S.J., Olioso, A., Göttsche, F.M., Radocinski, R., Román, M.O., Yu, Y., Csiszar, I. 2014. Validation of land surface temperature products derived from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) using ground-based and heritage satellite measurements. *Remote Sensing of Environment*, 154, 19-37.
- Joint Polar Satellite System (JPSS) Program. 2014. Level 1 Requirements, SUPPLEMENT – Final. Version 2.10. http://www.jpss.noaa.gov/assets/pdfs/technical_documents/level_1_requirements_supplement.pdf
- Justice, C. O., Román, M.O., Csiszar, I., Vermote, E. F., Wolfe, R., Hook, S. J. *et al.* 2013. Land and cryosphere products from Suomi NPP VIIRS: Overview and status. *Journal of Geophysical Research, [Atmospheres]*, 118, 9753-9765.
- Niclòs, R., Galve, J.M., Valiente, J.A., Estrela, M.J. Coll, C. 2011. Accuracy assessment of land surface temperature retrievals from MSG2-SEVIRI data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2126-2140.

- Nicolòs, R., Valiente, J.A., Barberà, M.J., Coll, C. 2015. An Autonomous System to Take Angular Thermal-Infrared Measurements for Validating Satellite Products. *Remote Sensing*, 7, 15269-15294. <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/11/15269>.
- Theocharous, E., Usadi, E., Fox, N. P. 2010. *CEOS comparison of IR brightness temperature measurements in support of satellite validation. Part I: Laboratory and ocean surface temperature comparison of radiation thermometers*. NPL REPORT OP3, National Physical Laboratory, Teddington, UK.
- VIIRS LST ATBD. 2013. *Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Land Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-022_JPSS_ATBD_VIIRS-LST_A.pdf.



SECCIÓN **02**

Agricultura y recursos hídricos

Para seguir leyendo haga click aquí