

INTERCOMPARACIÓN DE LAS VERSIONES 5 Y 6 DEL PRODUCTO BRDF/ALBEDO DE MODIS

MARIA MIRA SARRIÓ, MARIO PADIAL IGLESIAS, XAVIER PONS

GRUMETS Research Group, Departamento de Geografía,
Universitat Autònoma de Barcelona. Edificio B, 08193 Bellaterra, Cataluña, España
maria.mira@uab.cat, mario.padial@uab.cat, xavier.pons@uab.cat

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar las principales diferencias entre las estimaciones de albedo proporcionadas por las versiones V005 y V006 del producto *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF)/albedo del *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a 1 km de resolución espacial. Las mayores diferencias de albedo se observan en la estimación de su componente difusa, o albedo *White-Sky*, que a su vez toma valores superiores a la componente directa, o albedo *Black-Sky*. Sin embargo, el albedo real o *Blue-Sky*, comparable con las medidas terreno, presenta unas diferencias entre versiones muy similares al albedo *Black-Sky* debido a la escasa presencia de aerosoles los días de estudio. Un análisis más detallado diferenciando usos del suelo permite apreciar la mayor capacidad de la V006 respecto la V005 para detectar rápidos cambios del albedo debidos a cambios fenológicos o eventos puntuales, como una precipitación.

Palabras clave: albedo, albedo Black-Sky, albedo White-Sky, MODIS, BRDF.

INTERCOMPARISON BETWEEN THE MODIS BRDF/ALBEDO PRODUCT VERSION 5 AND 6

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the main differences between the albedo estimates provided by versions V005 and V006 of the *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF)/albedo product from the *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) at 1 km spatial resolution. The largest albedo differences are observed in the estimation of its diffuse component, or albedo *White-Sky*, which in turn exceeds values from the direct component, or albedo *Black-Sky*. However, the actual albedo or albedo *Blue-Sky*, comparable to ground measurements, shows differences between versions very similar to those from the *Black-Sky* albedo

Recibido: 01/02/2017

Aceptada versión definitiva: 05/06/2018

Editor al cargo: Dr. Martin Garbulsky

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

© Los autores

www.geofocus.org

due to the limited presence of aerosols during the study days. A more detailed analysis by differentiating land uses, allows to appreciate the increased capacity of V006 respect V005 to detect rapid changes in albedo due to phenological changes or specific events, such as a rainfall.

Keywords: albedo, Black-Sky albedo, White-Sky albedo, MODIS, BRDF.

1. Introducción

El albedo es una de las variables críticas necesarias dentro del campo de la agricultura (por ejemplo en relación a los ritmos de irrigación, la evapotranspiración, etc.), la silvicultura, la gestión del suelo, o la climatología e hidrología (por ejemplo en los balances de energía, hidrológicos, etc.). El conocimiento de su exactitud es, en consecuencia, de suma importancia para la evaluación de los resultados. El albedo instantáneo es un parámetro físico adimensional que representa el cociente de la radiación reflejada por la superficie en todo el hemisferio respecto a la radiación que le llega en todas direcciones, integrada respecto a las longitudes de onda del espectro solar (Pinty y Verstraete, 1992).

La observación de la superficie de la Tierra a través de sensores remotos permite obtener estimaciones de múltiples variables de forma global. La generación de series de productos de teledetección, en continuo desarrollo y mejora, son claves para la comunidad científica a la hora de conocer los usos del suelo, efectuar el seguimiento de sus cambios y estimar los posibles impactos ambientales o climáticos. En este sentido, el programa *Earth Observing System* (EOS) de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) proporciona, entre otros, el producto de albedo calculado a partir de las reflectancias registradas por el *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) instalado en las plataformas *Terra* y *Aqua*. Para dar una mayor consistencia física y temporal a estos productos, es importante cuantificar la exactitud a ellos asociada y estimar las mejoras proporcionadas por las nuevas versiones de los mismos, informando así a los usuarios de las implicaciones del uso de cada versión. Recientemente, la NASA puso a libre disposición la nueva versión del albedo MODIS (colección V006), generando los productos correspondientes a las imágenes tomadas desde el año 2000 a través de *Terra* y *Aqua*. La principal diferencia con la versión anterior (V005) es su resolución temporal, es decir, la generación de estos productos pasa a ser de cada 8 días a 1 día. Sin embargo, y de acuerdo con la metodología seguida, aunque se trate de un producto diario, para la estimación del albedo se continúan considerando las adquisiciones tomadas en periodos de 16 días dando predilección al día considerado. En principio esto se traduce en una mayor capacidad de detección y seguimiento de cambios rápidos ocurridos en superficie (*i.e.*, incendios, fusión de nieve, cambios de uso del suelo, cambios en la fenología de cultivos, inundaciones y deslizamientos, ciclones, sequías) y, en consecuencia, en una mejora en la exactitud de sus estimaciones.

En esta línea, en este manuscrito se propone como principal objetivo analizar las posibles mejoras proporcionadas por el producto MOD43D de la V006 del albedo MODIS en comparación con el producto MOD43B de la V005, ambos con una resolución espacial nominal de 1 km en el nadir (4.816 km en los extremos laterales de la imagen, Pons y Arcalís (2012)). El presente trabajo se puede considerar como una continuación del estudio publicado por Mira *et al.* (2015). En dicho estudio se evalúa la V006 del albedo BRDF de MODIS en relación con las estimaciones de albedo

proporcionadas con mayor resolución espacial por el sensor Formosat-2, previamente validadas con medidas terreno por Bsaibes *et al.* (2009). Es por ello que en el presente trabajo se consideró la misma serie temporal de imágenes MODIS tomadas sobre la misma zona de estudio. Así mismo, se consideró el producto de albedo MODIS de banda ancha correspondiente a las longitudes de onda más corta (0.3 – 5.0 μm) por su equivalencia con las medidas tomadas por los piranómetros utilizados en la validación (Bsaibes *et al.*, 2009). Además, si bien existen productos de albedo MODIS con otra resolución espacial (*i.e.*, 500 m en el nadir o 0.05 grados, acordes con el *Climate Modeling Grid* o CMG), siguiendo la línea del trabajo anterior (Mira *et al.*, 2015), se decidió evaluar los productos con 30 segundos de arco de resolución espacial (*i.e.*, aproximadamente 1 km en latitud, y mejor en longitud cuanto más cerca de los polos) por el interés particular en utilizarlos dentro del marco de un proyecto cuyo objetivo es la monitorización de la evapotranspiración. Esto implica la necesidad de ser directamente compatibles con el producto MODIS de temperatura de superficie proporcionado a 1 km.

El presente documento se ha estructurado de la siguiente manera. En primer lugar, presentamos una revisión de los antecedentes teóricos y metodológicos (Sección 2). A continuación se dan los detalles sobre los datos utilizados y la metodología aplicada (Sección 3). Después, se presenta la descripción y el análisis de los resultados (Sección 4), y finalmente se exponen la discusión y las principales conclusiones obtenidas (Sección 5).

2. Estado de la cuestión

Existe un evidente problema de escala a la hora de validar los productos de satélite de moderada resolución espacial (*e.g.*, albedo MODIS a 1 km), el cual se hace más complejo cuando aumenta la heterogeneidad de la zona de estudio. Las medidas de campo son representativas de la zona que les rodea solamente en el caso de tratarse de zonas realmente homogéneas en usos del suelo, tipo de sustrato, etc. Dichas diferencias espaciales pueden llegar a presentar errores significativos del orden del 15 % entre las estimaciones de albedo MODIS y las medidas de campo (Jin *et al.*, 2003; Salomon *et al.*, 2006; Román *et al.*, 2010). Para afrontar dicho problema, estudios posteriores consideraron la posibilidad de realizar la validación en dos etapas: en primer lugar, utilizar las medidas de campo para la validación de estimaciones de satélite de mayor resolución espacial, minimizando así el problema de la heterogeneidad espacial de la zona de estudio; y en segundo lugar, evaluar dichas imágenes con las de resolución espacial moderada, objeto de nuestro estudio (Liang *et al.*, 2002; Susaki *et al.*, 2007; Mira *et al.*, 2015).

En relación con la metodología aplicada para la estimación del albedo MODIS, detallamos a continuación una breve referencia a la naturaleza anisótropa de la reflectancia de una superficie. Ésta viene determinada por la función de distribución de la reflectancia bidireccional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, BRDF), la función encargada de caracterizar la reflectancia de una superficie en una dirección determinada respecto a la irradiancia espectral incidente (R). La BRDF depende de la longitud de onda (λ) y está determinada por una serie de propiedades ópticas y estructurales complejas siguiendo la expresión introducida por Nicodemus *et al.* (1977):

$$R(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v; \lambda) = dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v; \lambda) / dE_i(\theta_i, \varphi_i; \lambda) \quad (1)$$

donde $dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v)$ es la radiancia reflejada por la superficie en un diferencial de ángulo sólido en la dirección de observación definida por los ángulos cenital y acimutal (θ_v y φ_v , respectivamente), $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ es la irradiancia incidente a la superficie desde la dirección de iluminación definida por los ángulos cenital y acimutal (θ_i y φ_i , respectivamente), mientras que los subíndices i, v hacen referencia a ángulos de iluminación y observación, respectivamente. Existen diferentes campos en la teledetección que explotan el dominio de la información direccional (Asner *et al.*, 1998), como son los estudios de clasificación (Bicheron *et al.*, 1997), la estimación de parámetros biofísicos de la cubierta vegetal (Bicheron y Leroy, 1999; Knyazikhin *et al.*, 1998), la mejora de la corrección atmosférica (Vermote *et al.*, 1997), o la mejora en la estimación del albedo (Lucht, 1998). La BRDF se puede determinar a partir de diversos modelos (*i.e.*, empíricos, semiempíricos, físicos, simulados por ordenador o mezcla espectral) que reproducen la arquitectura de la cubierta, sus propiedades ópticas e iluminación solar. Entre ellos, los modelos semiempíricos son los más empleados y se basan en el supuesto de que a resoluciones espaciales moderadas (de centenares de m a km), la radiación dispersada por las superficies heterogéneas pueden descomponerse en componentes o *kernels* (Wanner *et al.*, 1995). Cada '*kernel*' representa una componente particular del comportamiento dispersivo de la cubierta y contribuye a la forma de la reflectividad total. Además, los modelos lineales o *kernel-driven* asumen que la reflectividad presenta componentes separables no correlacionadas.

En relación al albedo, es importante comentar que el flujo radiante descendente puede ser definido como la suma de dos componentes: una componente directa y una difusa. La reflectancia direccional hemisférica o albedo *Black-sky* (BS) se define como el albedo en ausencia de componente difusa y es dependiente del ángulo cenital solar. La reflectancia bihemisférica o albedo *White-Sky* (WS) se define como el albedo en ausencia de componente directa, considerando isotropa la componente difusa. Así, de la integración de la BRDF a través del albedo *Black-sky*, el albedo *White-sky*, y la fracción de luz difusa del cielo, se obtiene el albedo de una superficie o albedo *Blue-sky* (Schaaf *et al.*, 2002).

3. Materiales, datos y métodos

3.1. El caso de estudio

Mediante la intercomparación píxel a píxel, se pretende evaluar cuantitativamente los cambios producidos entre las estimaciones de albedo de la V005 y V006 del producto BRDF/albedo de MODIS. No solo se analizan las estimaciones de albedo *Blue-sky*, comparables con las medidas terreno, sino también los productos de albedo *Black-sky* y *White-sky*. Para ello, se definieron como métricas de evaluación: la media de las desviaciones o *Bias*; el error cuadrático medio absoluto o *Absolute Root Mean Square Error*, $RMSE_A$; y el error cuadrático medio relativo o *Relative Root Mean Square Error*, $RMSE_R$. También se realizó un análisis temporal de la dinámica del albedo sobre los principales usos del suelo presentes en la zona de estudio.

3.1.1. Delimitación espacial

La región de estudio se ubica al sudeste de Francia en la región de la Crau-Camargue (43.55° N, 4.80° E). Se trata de una región con poca pendiente próxima a la desembocadura del río Ródano caracterizada por una gran heterogeneidad en su paisaje. De un lado, en la región de la Crau, situada al este del río, dominan paisajes de estepa a lo largo de una extensa meseta que cubre 11500 ha. En esta zona, cultivos de secano y cultivos intensivos de frutales aprovechan los recursos hídricos subterráneos existentes. Hacia los límites de esta extensa estepa se desarrollan distintos tipos de cultivos agrícolas irrigados (*e.g.*, maíz, huertas, trigo, pastizales) favorecidos por la presencia de agua disponible. Por otro lado, las ramificaciones del río Ródano en su aproximación a la desembocadura generan las zonas pantanosas de la Camargue. Se trata de un área dominada por un mosaico de marismas, lagos, salinas y humedales con una rica avifauna asociada. En ella predominan principalmente los cultivos de arroz, pastizales de regadío y, en menor medida, trigo y viñedos. Debido al equilibrio existente entre los humedales y los sistemas acuíferos que los sustentan, las variaciones en los niveles piezométricos provocan cambios en el estado de inundación de estos ecosistemas, lo que se traduce en una dinámica húmedo-seco que tendrá respuesta en la reflectividad de las cubiertas. El clima de la zona es Mediterráneo, con una precipitación media de 550 mm anuales y presencia de fuertes vientos dominantes a lo largo del año. En el periodo estudiado (año 2006), la precipitación acumulada fue de 456 mm, con eventos de lluvia dispersos y de una intensidad inferior a los 30 mm diarios.

3.1.2. Delimitación temporal

El periodo temporal y los días concretos analizados en este estudio vienen determinados por las fechas de adquisición de las imágenes Formosat-2 disponibles, utilizadas en el trabajo previo (Mira *et al.*, 2015) para la evaluación del albedo MODIS. Concretamente, se trata de un conjunto de 31 imágenes tomadas el año 2006 los días siguientes: 12 de marzo; 2, 11 y 14 de abril; 14, 16, 24, 27 y 30 de mayo; 2, 5, 8, 11, 14, 23, 26 y 29 de junio; 2, 8, 11, 17, 23, 26, y 29 de julio; 1, 7, 10, y 22 de agosto; 3 y 27 de septiembre; y 6 de octubre.

3.2. Set de datos

Se consideraron datos pluviométricos diarios tomados en la zona de estudio, un conjunto de imágenes Formosat-2 para la estimación del mapa de usos del suelo, y diversos productos del sensor MODIS para el cálculo de los albedos.

3.2.1 Imágenes Formosat-2

Formosat-2 es un satélite del *National Space Program Office* de Taiwan, lanzado el 20 de mayo de 2004 con una órbita heliosíncrona a 888 km de altura media. Esto le permite prácticamente visitar con una frecuencia próxima a la diaria los mismos puntos en su zona de cobertura, bajo las mismas condiciones de iluminación, naturalmente con la dinámica intraanual correspondiente. Su

capacidad de apuntamiento lateral es de $\pm 45^\circ$. Las imágenes captadas a partir de su sensor RSI, presentan una franja (*swath*) de 24 km de anchura que permite obtener una resolución pancromática de 2 m y de 8 m en las bandas multiespectrales centradas en 488, 555, 650 y 830 nm.

Las imágenes fueron corregidas geométricamente según el método de Baillarin *et al.* (2004), obteniéndose una precisión en la localización (RMS) mejor que 0.4 píxeles, y radiométricamente siguiendo el método de Hagolle *et al.* (2015). También se disponía de las máscaras de nubes y sombras de las mismas correspondientes a cada adquisición, obtenidas según la metodología descrita por Hagolle *et al.* (2008).

Concretamente, en la zona de la Crau-Camargue las imágenes fueron tomadas con un ángulo cenital de observación en torno a 41° y acimutal de 239° , con una periodicidad variable entre 3 y 6 días. Del conjunto de 31 escenas consideradas para las imágenes MODIS, preestablecidas por el estudio previo (Mira *et al.*, 2015), se seleccionaron solamente 7 para la obtención de la cartografía de usos y cubiertas del suelo. Concretamente, se consideraron las imágenes tomadas los días: 14 de abril; 16 de mayo; 23 de junio; 11 de julio; 7 de agosto; 27 de septiembre; y 6 de octubre de 2006.

3.2.2 Datos MODIS y datos auxiliares utilizados para estimar el albedo

Como introducimos en el apartado 2, la reflectancia de una superficie captada remotamente está condicionada por la geometría de iluminación y observación. Esta dependencia viene descrita por la función BRDF. El producto BRDF/albedo de MODIS se genera con una resolución de 500 m a partir de las observaciones multiangulares, libres de nubes y corregidas atmosféricamente, captadas por el instrumento MODIS a lo largo de un periodo de 16 días. Los datos se ponderan en función de su calidad y la cobertura de la observación. Además, cuando los productos son generados diariamente, como el MOD43D, también son ponderados en función de la distancia al día de interés. Para generar el producto se emplea el modelo semiempírico *kernel-driven* que emplea las funciones *RossThick-LiSparse-reciprocal* que caracterizan las componentes dispersivas isométrica, volumétrica y geométrica de una superficie (Wanner *et al.*, 1995; Lucht y Roujean, 2000; Schaaf *et al.*, 2002). Si el número de observaciones disponibles es suficiente para determinar la geometría de iluminación y observación, se genera la inversión completa del modelo, obteniendo así la máxima calidad del producto. Los parámetros que se obtienen de la inversión del modelo se emplean para calcular la reflectancia direccional hemisférica (o albedo *Black-Sky*) y la reflectancia bihemisférica (o albedo *White-Sky*) de la superficie.

En la transición de la V005 a la V006 del producto de BRDF/albedo de MODIS con 1 km de resolución espacial (MCD43) se introdujeron una serie de mejoras, resumidas en la [tabla 1](#). Éstas están asociadas principalmente al origen de los datos que emplea cada versión para su estimación, a la periodicidad con la que se genera, y a la fecha de asignación asociada al producto. Cada producto MODIS viene acompañado de su banda de calidad (QA), la cual permite valorar la bondad en la estimación de los parámetros de inversión del modelo para cada una de las bandas, así como la presencia de nieve.

Tabla 1. Principales características de las versiones V005 y V006 del producto BRDF/albedo de MODIS con 1 km de resolución espacial nominal (MCD43).

Producto (versión)	MCD43B (V005)	MCD43D (V006)
Periodo de síntesis	16 días	16 días
Periodicidad	8 días	1 día
Origen de los datos	Agregado de la versión con 500 m	Todas las observaciones disponibles con 500 m
Fecha atribuida	Primer día del periodo de 16 días	Día central del periodo de 16 días

Los datos de partida fueron descargados directamente desde el portal web del *United States Geological Survey* (USGS) (WWW1), disponiendo de cada uno de los productos detallados en la [tabla 2](#). Los datos obtenidos fueron filtrados considerando solamente los de mayor calidad (*i.e.*, reflectancias creadas con el 75 % o más, de los datos con la mejor calidad).

Tabla 2. Productos de la V005 y V006 correspondientes a los factores de inversión del modelo BRDF y las bandas de calidad, para la banda de onda corta (0.3 – 5.0 μm). f_k : parámetros de ponderación asociados con el modelo de BRDF *RossThick-LiSparse-Reciprocal*.

	V005		V006
MCD43B1	<i>f</i> isométrico	MCD43D28	<i>f</i> isométrico
	<i>f</i> volumétrico	MCD43D29	<i>f</i> volumétrico
	<i>f</i> geométrico	MCD43D30	<i>f</i> geométrico
MCD43B2	Bandas de calidad	MCD43D31-41	Bandas de calidad

3.3. Metodología

3.3.1 Obtención de la cartografía de usos y cubiertas del suelo

Con el objetivo de determinar los principales usos del suelo, así como para identificar píxeles de $1 \times 1 \text{ km}^2$ caracterizados por una cubierta mayoritaria, se generó una clasificación de usos del suelo de la zona de estudio a una resolución de 8 m utilizando imágenes Formosat-2. Sobre éstos, se analizó la dinámica temporal del albedo con el fin de identificar posibles relaciones entre el tipo de cubierta y su respuesta de albedo. Se consideraron 7 escenas Formosat-2 atendiendo a criterios que permitieron disminuir varianzas excesivas sobre las categorías de partida (*i.e.*, humedales, arroz), una menor presencia de nubes, y una distribución temporal óptima que maximizase el contraste fenológico de los cultivos presentes.

Se consideró una metodología de clasificación híbrida que permite beneficiarse de la objetividad estadística que la clasificación no supervisada aporta, y de las categorías temáticas con sentido para el usuario generadas a través de una clasificación supervisada. La primera se obtuvo mediante el módulo *IsoMM* del software MiraMon (Pons, 2004) basado en el método de Duda y Hart (1973). Éste maximiza la distancia entre clases y permite obtener un elevado número de clases informacionales estadísticamente independientes. Por otro lado, las áreas de entrenamiento definidas por el usuario son entendidas como objetos reclasificadores que no participan en la fase no

supervisada. En este segundo paso se empleó el módulo de clasificación mixta, *ClsMix* de MiraMon. Dentro del proceso de clasificación se tuvieron en cuenta aspectos clave como:

- La optimización de variables mediante su normalización y análisis de componentes principales.
- La generación de variables adicionales que mejoren el contraste entre categorías en función de las bandas espectrales disponibles: el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), el Índice de Brillo (IB), y dos nuevos índices resultado del análisis de distancia normalizada realizado sobre las categorías que relacionan la banda azul con la del infrarrojo cercano o el rojo.
- El análisis de Divergencia Transformada de Jeffries-Matusita y Distancia Normalizada con la que determinar la separabilidad estadística en las categorías designadas, y la generación de los dos índices adicionales.

3.3.2 Estimación del albedo a partir de imágenes MODIS

Siguiendo la línea del trabajo previo (Mira *et al.*, 2015), las características de las imágenes MODIS fueron adaptadas a las captadas mediante el sensor de Formosat-2. Concretamente se realizó un cambio de proyección y resolución espacial desde la proyección sinusoidal del producto MODIS, a una proyección cónica conforme de Lambert para la zona II extendida para toda Francia, con un tamaño de píxel ajustado a exactamente 1000 m. El criterio adoptado para el cambio de resolución espacial fue la aproximación bilineal para los datos de albedo, mientras que se utilizó el vecino más próximo para las bandas de calidad. Para ello, se empleó la aplicación *MODIS Reprojection Tool* disponible en el portal web de la *Land Processes Distributed Active Archive Center* del USGS (WWW2). Además, se calcularon los albedos considerando la geometría de iluminación solar correspondiente a la hora de adquisición de las imágenes Formosat-2 (10:30 UTC).

A partir de las expresiones polinómicas definidas en las ecuaciones (2) y (3) (Ross, 1981; Li y Strahler, 1992; Schaaf *et al.*, 2011) se calculó el valor del albedo *Black-sky* (α_{BS}) y *White-sky* (α_{WS}), respectivamente, utilizando los coeficientes g_{ij} de la [tabla 3](#) (Strahler *et al.*, 1999) y los parámetros $f_k(\lambda)$ que ponderan las componentes dispersivas (*kernels*) isométricas, volumétricas y geométricas del modelo de la BRDF, proporcionadas en el producto BRDF/albedo de MODIS (ver [tabla 2](#)):

$$\begin{aligned}\alpha_{BS}(\theta, \lambda) = & f_{iso}(\lambda) * (g_{0iso} + g_{1iso}\theta^2 + g_{2iso}\theta^3) \\ & + f_{vol}(\lambda) * (g_{0vol} + g_{1vol}\theta^2 + g_{2vol}\theta^3) \\ & + f_{geo}(\lambda) * (g_{0geo} + g_{1geo}\theta^2 + g_{2geo}\theta^3)\end{aligned}\quad (2)$$

$$\alpha_{WS}(\theta, \lambda) = f_{iso}(\lambda) * (g_{0iso}) + f_{vol}(\lambda) * (g_{0vol}) + f_{geo}(\lambda) * (g_{0geo}) \quad (3)$$

donde θ hace referencia al ángulo cenital solar y λ a la longitud de onda.

Tabla 3. Coeficientes empleados en componentes dispersivas de la BRDF.

Término	Isótropo (iso)	RossThick (vol)	LiSparseR (geo)
$g0$ (término 1)	1.0	-0.007574	-1.284909
$g1$ (término θ^2)	0.0	-0.070987	-0.166314
$g2$ (término θ^3)	0.0	0.307588	0.041840
<i>White-Sky</i> : g	1.0	0.189184	-1.377622

Finalmente, el albedo *Blue-Sky* para la banda de longitud de onda más corta (0.3 – 5.0 μm) se obtuvo realizando una suma aritmética entre el albedo *Black-Sky* y el albedo *White-Sky*, ponderados por la fracción de luz difusa del cielo (S) de acuerdo con Schaaf *et al.* (2002), siguiendo la expresión:

$$\alpha(\theta, \lambda) = \{1 - S(\theta, \tau(\lambda))\} \alpha_{BS}(\theta, \lambda) + S(\theta, \tau(\lambda)) \alpha_{WS}(\theta, \lambda) \quad (4)$$

donde τ representa el espesor óptico de los aerosoles.

La fracción de luz difusa del cielo (S) se calculó a partir de las medidas del espesor óptico de aerosoles a 550 nm (τ) y del ángulo cenital solar (θ) calculado para cada píxel de la escena. Para ello, se consideró una *look-up table* desarrollada por la comunidad de usuarios de MODIS basada en el código 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) de transferencia radiativa (Vermote *et al.*, 1997), obtenido como mejora de la versión previa 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*), por el *Laboratoire d'Optique Atmosphérique* (Tanré *et al.*, 1990). Como estimación del espesor óptico de aerosoles se consideraron los valores determinados y considerados por Hagolle *et al.* (2015) en la corrección radiométrica de las imágenes Formosat-2 (ver figura 2 de Mira *et al.*, 2015). Concretamente, en nuestro estudio, el rango de valores de espesor óptico τ_{550nm} varía entre 0.013 y 0.323, y la fracción de luz difusa del cielo correspondiente toma valores entre 0.08 y 0.24 (ver figura 2 de Mira *et al.*, 2015).

3.3.3 Evaluación del producto de albedo MODIS

En concordancia con el trabajo previo (Mira *et al.*, 2015), los píxeles MODIS con más del 50 % del área clasificada como agua, zonas urbanas, nubes o sombras de las nubes fueron descartados. Esto es así ya que el albedo Formosat-2, utilizado para la evaluación del albedo MODIS, no fue calibrado ni evaluado sobre cubiertas de agua y zonas urbanas (Bsaiibes *et al.*, 2009). Además, se descartaron los valores atípicos o *outliers* (definidos como los píxeles que quedan por debajo del percentil 0.5 % y por encima el percentil 99.5 %).

Los estadísticos considerados para la evaluación de las diferencias de albedo entre versiones fueron la media de las desviaciones (*Bias*), el error cuadrático medio absoluto ($RMSE_A$) y relativo ($RMSE_R$):

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i) \quad (5)$$

$$RMSE_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2} \quad (6)$$

$$RMSE_R = \frac{RMSE_A}{\bar{X}_i} \quad (7)$$

donde X_i representa la V005, Y_i la V006, y el subíndice i indica cada píxel de los N de la imagen.

4. Descripción y análisis de resultados

4.1 Cartografía de usos y cubiertas del suelo

Una vez realizada la generalización de la clasificación, la calidad temática contrastada con áreas de test independientes a través de la matriz de confusión proporcionó un acierto global del 90 %. La clasificación obtenida aportó 10 clases temáticas, definidas y espacializadas en la [figura 1](#).

En la [tabla 4](#) se muestra la composición de cada uno de los píxeles seleccionados caracterizados por un tipo mayoritario de cubierta. Excepcionalmente, la categoría *Trigo*, al ser minoritaria y estar compuesta por diversas tipologías de cubierta en un porcentaje elevado, no se tuvo en cuenta para realizar el análisis de los albedos. Así mismo, la categoría *Agrícola sin cultivar* representa zonas no cultivadas localizadas tanto en zonas de secano como en zonas de humedales, con respuestas espectrales no equiparables, motivo por el cual también se descartó para el análisis de los albedos.

4.2 Intercomparación entre la V005 y la V006 del albedo MODIS

4.2.1 Análisis independientemente del uso del suelo

Como se observa en la [figura 2](#), cuando se comparan todas las fechas conjuntamente y se consideran todos los píxeles de la imagen sin diferenciar entre usos del suelo, las diferencias de albedo entre versiones no son significativas (*i.e.*, $Bias < 0.0005$ y $RMSE_A < 2.6$). No obstante, como indican los estadísticos y la mayor dispersión de puntos observada en la [figura 2c](#), las diferencias son un poco mayores en el caso del albedo *White-Sky*. Además, como era de esperar, los valores de albedo *White-Sky* son mayores a los de *Black-Sky*, ya que corresponden a los valores estimados para las 10:30 UTC (11:30 o 12:30 hora local solar). En esta franja horaria, en las horas centrales del día, la componente difusa del flujo radiante descendente es mayor que la componente directa. Contrariamente, durante las horas de la mañana y la tarde, la componente directa es mucho mayor que la componente difusa (ver figura 1 de Román *et al.*, 2010). Teniendo en cuenta los valores obtenidos para la fracción de luz difusa del cielo (*i.e.*, $S < 0.24$) y la ecuación (4), no es de extrañar

que la dispersión de puntos correspondiente al albedo *Blue-Sky*, sus estadísticos y el rango de valores ([figura 2a](#)), sean prácticamente iguales a los del albedo *Black-Sky* ([figura 2b](#)).

Por otro lado, si analizamos la evolución temporal de los estadísticos ([figura 3](#)), observamos que varían en función del día considerado. Por simplicidad, no se representa el $RMSE_R$ porque sigue prácticamente la misma tendencia que el $RMSE_A$. Excepcionalmente, el $RMSE_R$ sufre un crecimiento un poco mayor que el $RMSE_A$ en el caso del albedo *White-Sky* en los dos últimos días (*i.e.*, días julianos 270 y 279). Esto es debido a que el valor medio del albedo *White-Sky* es ligeramente más pequeño (en 0.0002 unidades). En la [figura 3](#) vemos que el patrón de evolución de los estadísticos es reproducido de manera similar por el albedo *Black-Sky* y *White-Sky*. Además, como era de esperar, el albedo *Blue-Sky* presenta unos valores muy similares a los del *Black-Sky*, pero un poco mayores debido a la influencia de la mayor incertidumbre del albedo *White-Sky*.

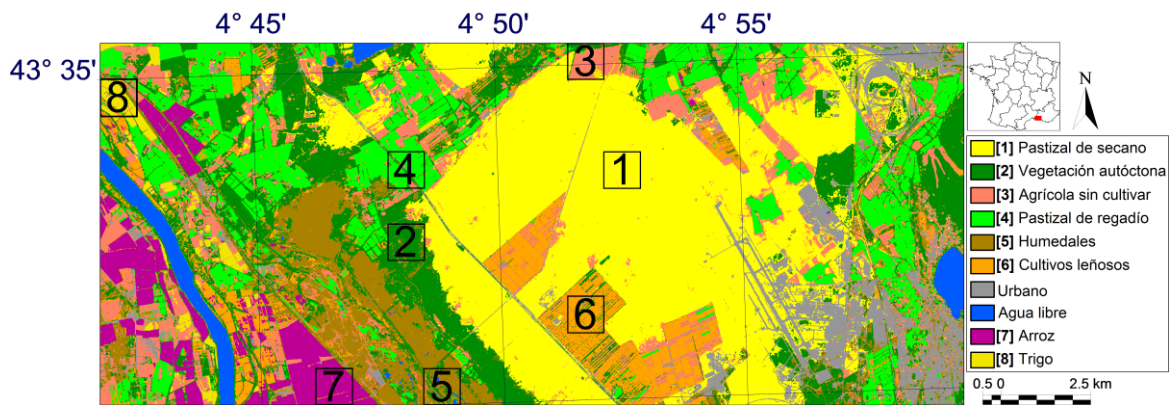


Figura 1. Mapa de usos y cubiertas del suelo de la zona Crau-Camargue (sudeste de Francia), elaborado siguiendo una metodología de clasificación híbrida. Localización de píxeles de $1 \times 1 \text{ km}^2$ caracterizados por un uso del suelo mayoritario.

Tabla 4. Identificación y composición de las categorías que definen los píxeles caracterizados por un uso del suelo mayoritario, cuya localización se observa en la figura 1, ordenados en función del área ocupada en la zona de estudio.

Píxel homogéneo	%	Composición del píxel	Píxel homogéneo	%	Composición del píxel
[1] Pastizal de secano	100 %	Pastizal de secano	[5] Humedales	95 %	Humedales
				3 %	Vegetación autóctona
				2 %	Cultivos leñosos
[2] Vegetación autóctona	86 %	Vegetación autóctona	[6] Cultivos leñosos	94 %	Cultivos leñosos
	9 %	Pastizal de secano		6 %	Pastizal de secano
	5 %	Agrícola sin cultivar			
[3] Agrícola sin cultivar	83 %	Agrícola sin cultivar	[7] Arroz	94 %	Arroz
	9 %	Vegetación autóctona		6 %	Humedales
	8 %	Pastizal de secano	[8] Trigo	60%	Trigo
[4] Pastizal de regadío	85 %	Pastizal de regadío		23%	Agrícola sin cultivar
	11 %	Agrícola sin cultivar		6%	Cultivos leñosos
	4%	Urbano		5 %	Vegetación autóctona
				3 %	Arroz
				3 %	Otros

Cuantitativamente, el *Bias* oscila entre -0.002 y 0.004 (0.007 para el albedo *White-Sky*), con un promedio prácticamente nulo (*i.e.*, <0.0005); el $RMSE_A$ varía entre 0.001 y 0.008 (0.014 para el albedo *White-Sky*), con un promedio de 0.003 (0.004 para el albedo *White-Sky*); y el $RMSE_R$ varía entre 0.7 % y 5 % (7 % para el albedo *White-Sky*), con un promedio de 1.7 % (2 % para el albedo *White-Sky*). En conclusión, a excepción de uno de los días (*i.e.*, día juliano 246), el *Bias* no supera los 0.005, el $RMSE_A$ es inferior a 0.008, y el $RMSE_R$ a 4.4 %.

Mira Sarrió, M., Padial Iglesias, M., Pons Fernández, X. (2018): "Intercomparación de las versiones 5 y 6 del producto BRDF/albedo de MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 57-78. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.494>

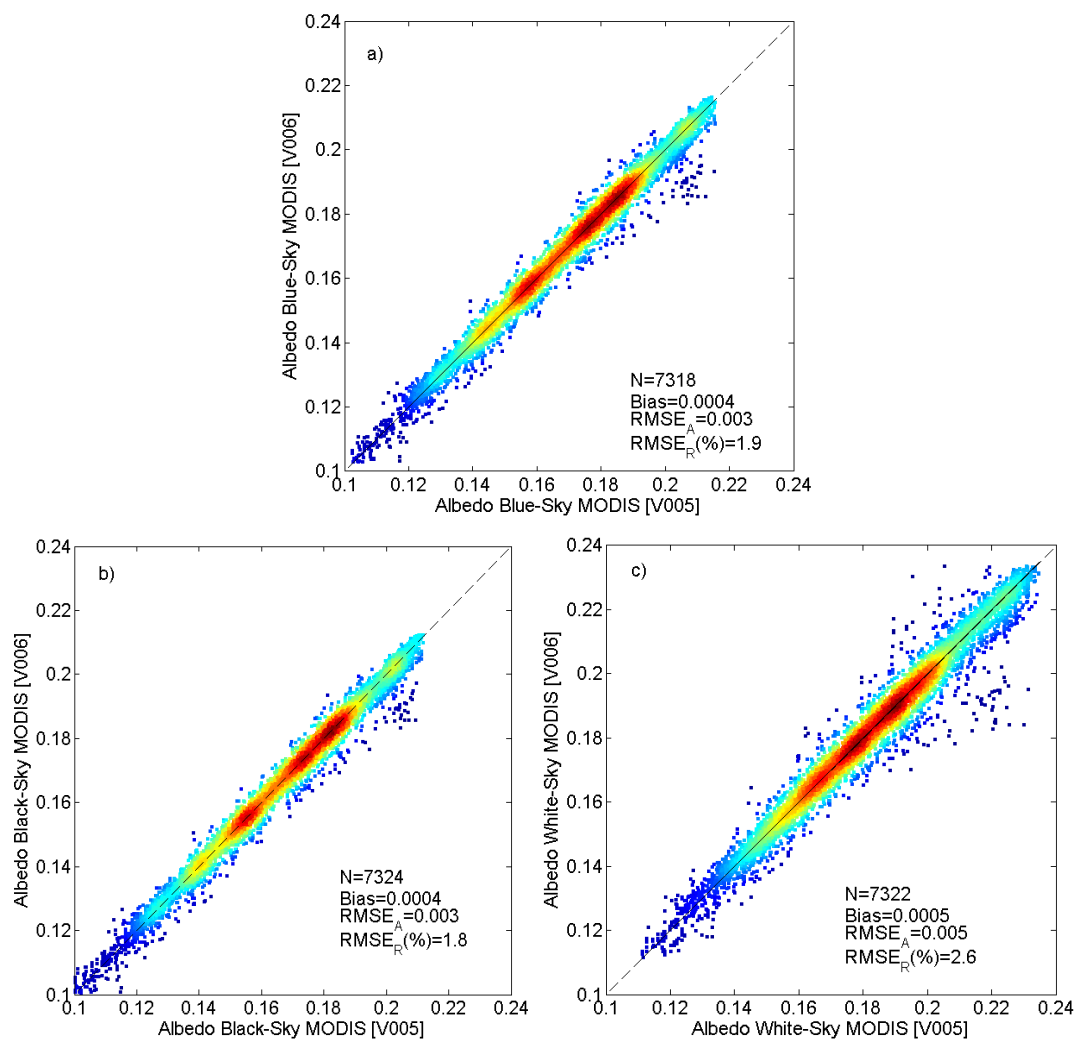


Figura 2. Diagrama de densidad de dispersión entre las estimaciones de la V005 y la V006 de MODIS del albedo (a) *Blue-Sky*, (b) *Black-Sky*, y (c) *White-Sky*. Se considera el ámbito geográfico definido en la [figura 1](#) y las adquisiciones correspondientes a los días indicados en la sección #3.1.2. Los colores rojizos indican una mayor densidad. Se excluyeron píxeles enmascarados por la máscara de calidad de MODIS, píxeles con más del 50 % clasificados como suelo urbano, agua, nubes o sombras de nubes, y los *outliers*. N: número de píxeles; $RMSE_A$ y $RMSE_R$: error cuadrático medio absoluto y relativo, respectivamente.

Mira Sarrió, M., Padial Iglesias, M., Pons Fernández, X. (2018): "Intercomparación de las versiones 5 y 6 del producto BRDF/albedo de MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 57-78. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.494>

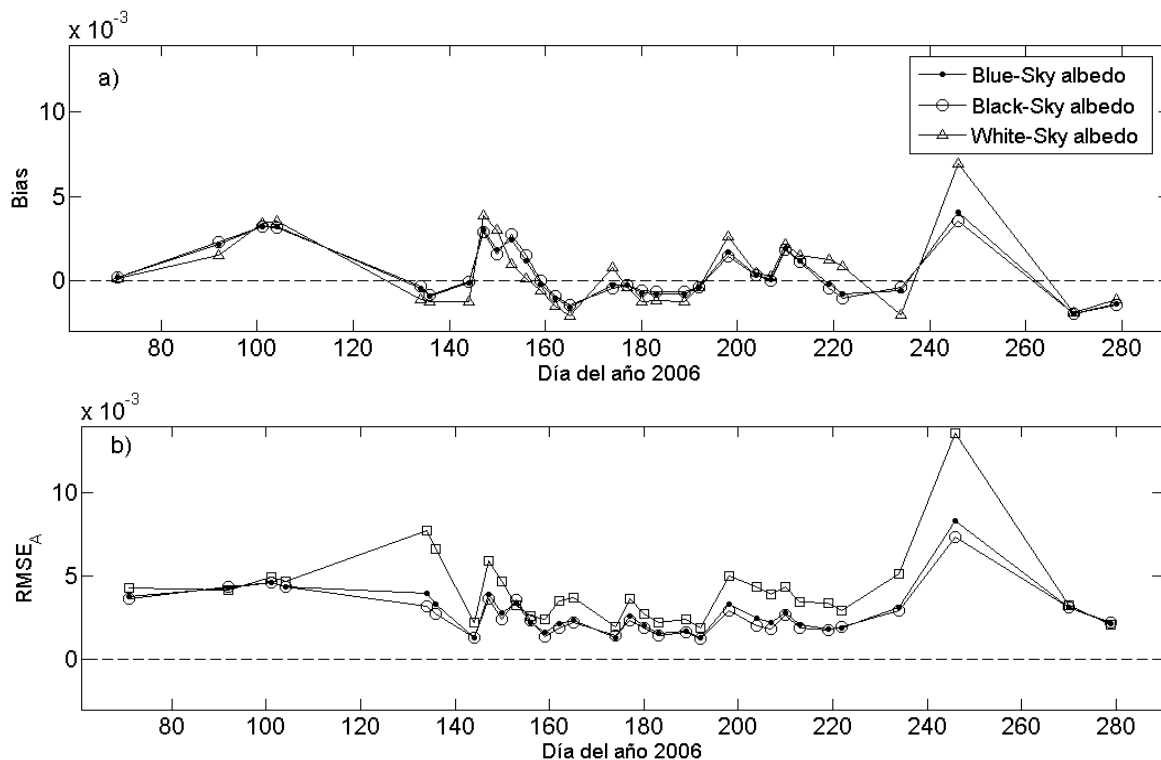


Figura 3. Evolución temporal de (a) la desviación (*Bias*) y (b) el error cuadrático medio absoluto (*RMSE_A*), entre las estimaciones de la V005 y V006 de MODIS de albedo *Blue-Sky*, *Black-Sky* y *White-Sky* para el ámbito geográfico definido en la [figura 1](#).

4.2.2 Análisis a nivel de usos del suelo

Del análisis estadístico de los valores de albedo estimado según ambas versiones (ver [figura 4](#)), observamos de nuevo que los errores varían según el tipo de albedo, independientemente de los usos del suelo. En correlación con los resultados de la [figura 2](#), las diferencias de albedo entre versiones son siempre mayores en el caso del albedo *White-Sky*, menores para el *Black-Sky*, e intermedias para el *Blue-Sky* (que toma valores ligeramente superiores al *Black-Sky*). Concretamente, las categorías que presentan los errores más elevados (*i.e.*, $Bias \geq 0.001$; $RMSE_A \geq 0.004$; $RMSE_R \geq 2\%$) fueron el *Pastizal de secano*, los *Cultivos leñosos* y el *Arroz*. Además, vemos que los valores de $RMSE_R$ para el *Arroz* son los más grandes, mientras que su $RMSE_A$ no lo es, debido al pequeño valor medio de albedo de este uso del suelo (*i.e.*, 0.0013, 0.0012 y 0.0014 para el albedo *Blue-Sky*, *Black-Sky* y *White-Sky*, respectivamente). Los albedos de los otros usos del suelo (*i.e.*, *Vegetación autóctona*, *Pastizal de regadío*, y *Humedales*) son estimados por ambas versiones con diferencias poco significativas ($Bias \leq 0.0006$; $RMSE_A \leq 0.0036$; $RMSE_R \leq 1.9\%$).

Mira Sarrió, M., Padial Iglesias, M., Pons Fernández, X. (2018): "Intercomparación de las versiones 5 y 6 del producto BRDF/albedo de MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 57-78. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.494>

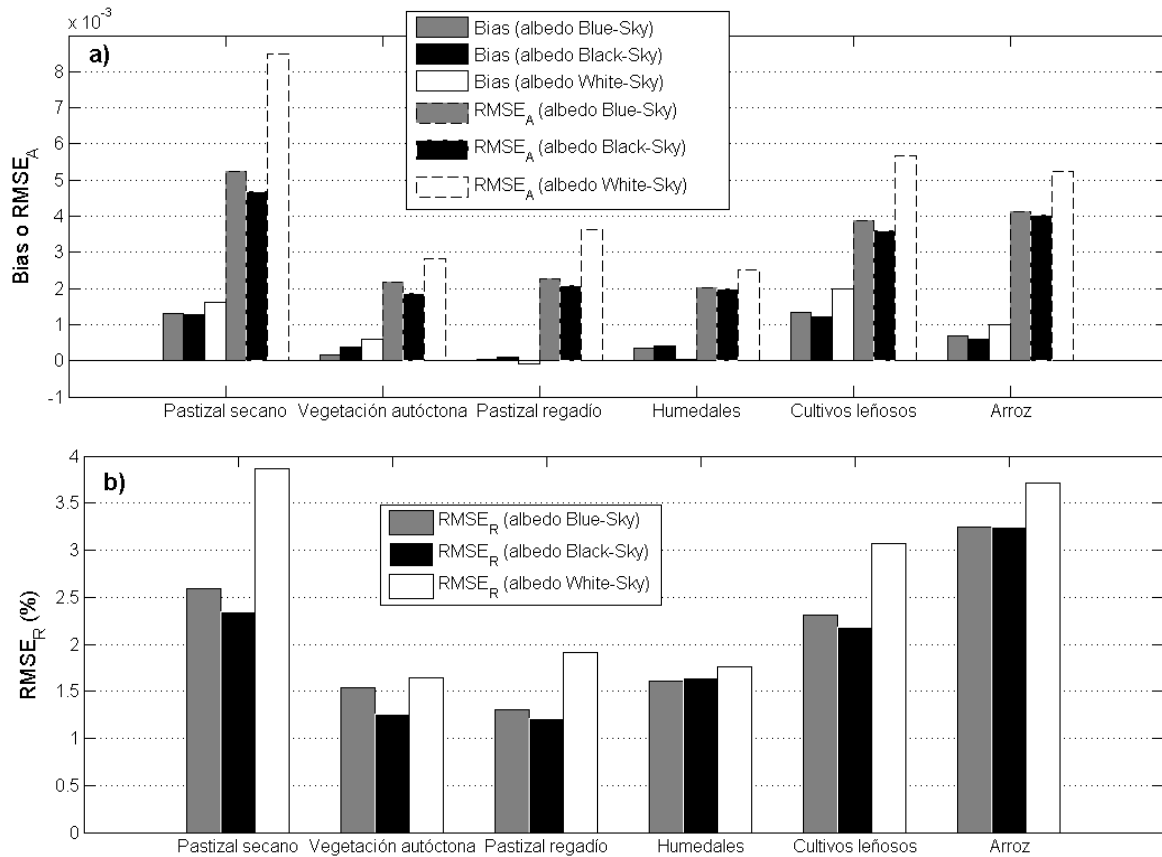


Figura 4. Estadísticos correspondientes a los píxeles de 1×1 km² caracterizados por un uso del suelo mayoritario (localizados en la figura 1) relativos a la comparación entre las estimaciones de la V005 y V006 de MODIS de albedo *Blue-Sky*, *Black-Sky* y *White-Sky*. Se han considerado los datos de los 31 días indicados en la sección #3.1.2. $RMSE_A$: error cuadrático medio absoluto; $RMSE_R$: error cuadrático medio relativo.

Con el análisis de la evolución temporal del albedo para cada uso del suelo y versión del producto (figura 5), y teniendo en cuenta la evolución de los cultivos y los eventos de lluvia acaecidos ese año (figura 6), es posible detectar pequeñas mejoras en la estimación del albedo con la nueva versión V006. Por simplicidad, en la figura 5 no se han representado los valores del albedo *Blue-Sky*, si bien su evolución es prácticamente igual a la del albedo *Black-Sky* con valores ligeramente superiores, debido a los pequeños valores de fracción de luz difusa del cielo y su derivación según la ecuación (4).

Como se observa en la figura 5, de nuevo los valores de albedo *White-Sky* son siempre mayores a los del albedo *Black-Sky*, por las razones mencionadas en la sección anterior. Se observa un aumento general de los valores de albedo en el período de verano (i.e., días julianos 174 a 246), cuando los cultivos están en producción, y una disminución al empezar el otoño (i.e., día juliano 265), por los cambios fenológicos de los cultivos y el aumento de las precipitaciones. La categoría con mayores valores de albedo (i.e., >0.18) corresponde al *Pastizal de seco*. Los *Humedales*, por

Mira Sarrió, M., Padial Iglesias, M., Pons Fernández, X. (2018): "Intercomparación de las versiones 5 y 6 del producto BRDF/albedo de MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 57-78. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.494>

el contrario, presentan los valores más bajos (*i.e.*, <0.16), situándose el resto de categorías entre valores intermedios. La categoría *Arroz* es la que presenta una mayor variabilidad a lo largo del año (*i.e.*, ~ 0.08), relacionada con los cambios que experimentan los arrozales con su acondicionamiento, inundación y plantación, crecimiento de la planta y recolección final. Presenta valores mínimos (*i.e.*, <0.1) cuando los campos se encuentran inundados en el mes de abril, y valores progresivamente crecientes en la etapa de desarrollo de la planta, entre los meses de mayo y septiembre, alcanzando valores alrededor de 0.18. Por otro lado, excepcionalmente, el día juliano 246 (3 de septiembre de 2006), el *Pastizal de secano* y el *Pastizal de regadío* presentan valores de albedo V005 significativamente superiores (*i.e.*, 0.01 o 0.02) a los de la V006, que toman unos valores más razonables siguiendo la tendencia de los días colindantes. En este caso consideramos que los valores de la V006 son los más fiables.

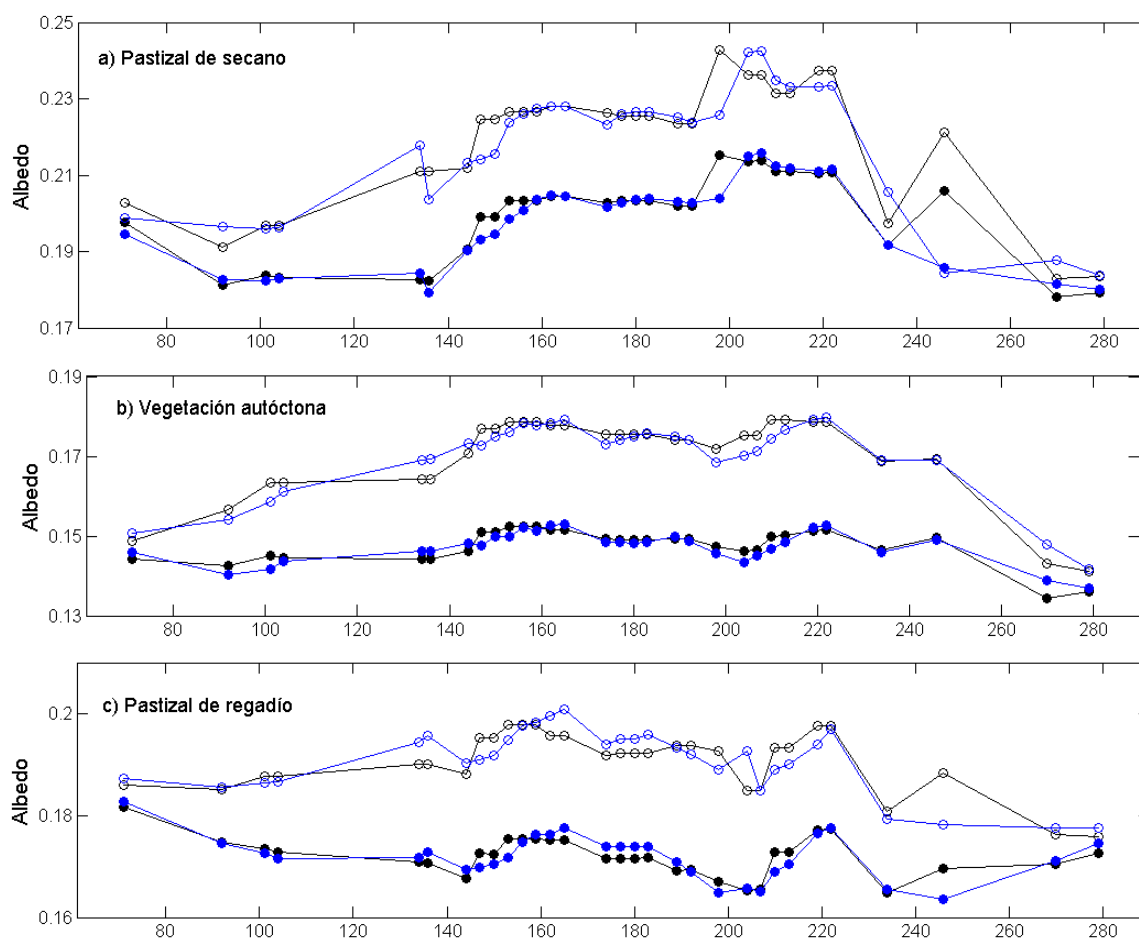


Figura 5

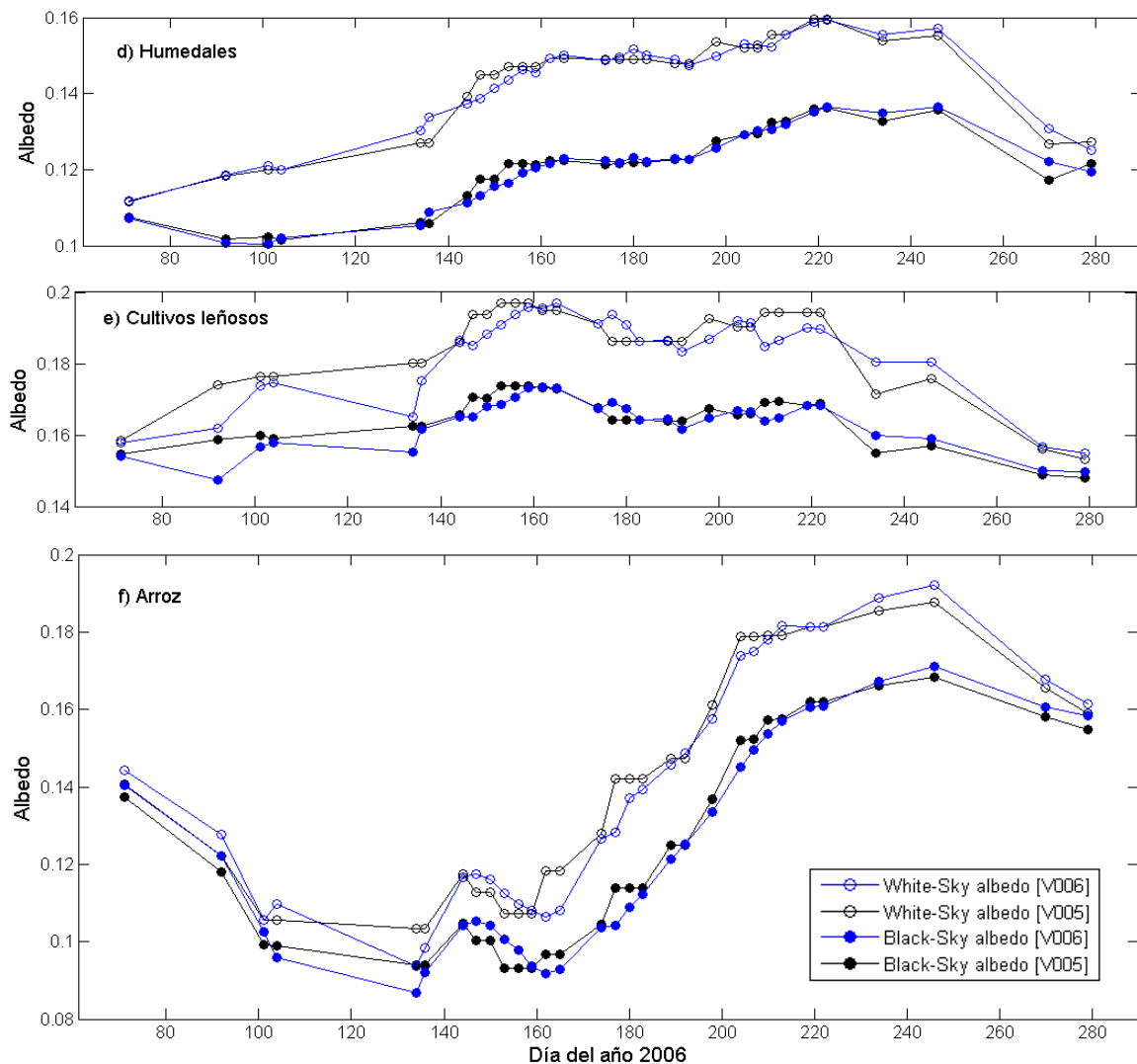


Figura 5. Dinámica temporal del albedo *Black-Sky* y *White-Sky* de la V005 y V006 sobre determinados usos del suelo (descritos en la [tabla 4](#) y localizados en la [figura 1](#)).

Un claro ejemplo de las mejoras que aporta la V006 respecto a la V005 lo observamos en los periodos en los que se tienen más imágenes consecutivas (*i.e.*, 8 adquisiciones entre los días 144 a 165; 4 adquisiciones entre los días 174 y 183). Generalmente, los valores de la V006 presentan una variación gradual en relación con los de la V005, que suelen mantener un valor prácticamente invariable. Las diferencias más significativas se observan en el *Pastizal de seco*, los *Cultivos leñosos* y el *Arroz*. Esto es debido al propio algoritmo de las versiones ya que aunque en ambos casos se consideran las adquisiciones de 16 días para poder calcular la BRDF, los productos de la V006 son producidos diariamente dando predilección a los valores observados ese día, mientras que los de la V005 se producen cada 8 días (y por lo tanto se considera el mismo producto para los 8 días consecutivos).

Esta característica permite visualizar en la V006 posibles cambios puntuales de respuesta en el albedo a escala diaria, ya sea a nivel de cambios fenológicos de la superficie o a rápidos cambios de la superficie (*i.e.*, precipitaciones, riegos, incendios, arado). Concretamente, existen diversos episodios de lluvia (ver [figura 6](#)) próximos a las fechas analizadas que podrían haber afectado a los valores de albedo de los cultivos. A destacar las lluvias acaecidas en los meses de verano, cuando generan un mayor contraste en la reflectividad de las cubiertas. En dicho caso, se espera una disminución de los valores de albedo, ya que la presencia de agua implica una disminución de la radiación reflejada por la superficie y, por lo tanto, una mayor absorción de energía por la superficie. Estas diferencias pueden verse magnificadas por la V005 sin necesidad (ya que considera por igual los valores de 16 días consecutivos), y por lo tanto la V006 reproduciría un albedo más ajustado a la realidad del día (ya que da predilección a los valores del día de interés).

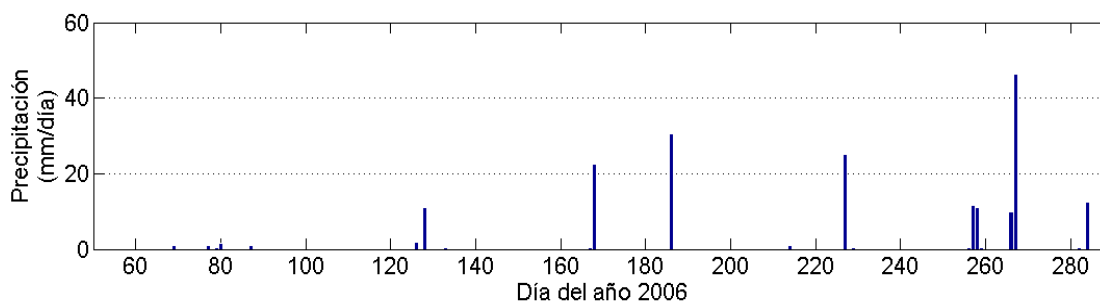


Figura 6. Datos de precipitación diaria en la zona de la Crau-Camargue, al sureste de Francia.

5. Discusión y conclusiones

El albedo es un parámetro de importancia crucial como variable de entrada en diversos modelos (*i.e.*, balance de energía, climáticos, hidrológicos, etc.). Su determinación es posible mediante técnicas de teledetección. Su estimación cuanto más precisa y exacta, y el conocimiento de su incertidumbre es por lo tanto clave en la aplicación de los modelos. El principal objetivo de este estudio es analizar y cuantificar las mejoras proporcionadas por la nueva versión (*i.e.*, V006) del producto BRDF/albedo de MODIS a 1 km de resolución espacial (*i.e.*, MOD43D) respecto a la versión previa (*i.e.*, V005) del producto (*i.e.*, MOD43B). Para ello se realizó una intercomparación entre las estimaciones de albedo de onda corta de ambas versiones, tanto a nivel global como analizando su evolución temporal y las diferencias a nivel de usos del suelo. Se analizaron tanto las componentes directa (*i.e.*, albedo *Black-Sky*) y difusa (*i.e.*, albedo *White-Sky*) del albedo, como el albedo real (*i.e.*, albedo *Blue-Sky*) resultante tras considerar las condiciones atmosféricas del día considerado, caracterizadas por la fracción de luz difusa del cielo.

Las mayores diferencias de albedo observadas entre versiones se obtienen para la componente difusa del albedo, o albedo *White-Sky*. Suponemos que esto es gracias a la mejora en la resolución temporal de la V006, ya que al producir los datos de manera diaria se da predilección a las características ambientales del día considerado. Además, como se trata de albedos calculados para las horas centrales del día, el albedo *White-Sky* toma valores superiores al albedo *Black-Sky*, de manera que las variaciones absolutas son mayores. No obstante, debido a las buenas condiciones

ambientales de los días considerados, reflejadas por la prácticamente ausencia de nubes en las imágenes y por los pequeños valores de la fracción de luz difusa del cielo (*i.e.*, $S < 0.24$), dichas diferencias son minimizadas en el cálculo del albedo *Blue-Sky*.

El análisis de la variación temporal de los estadísticos resultantes de la comparación de ambas versiones no presenta un patrón concreto con tendencias destacables. Sin embargo, ambas componentes del albedo siguen la misma tendencia. Esto es así independientemente de si se diferencian o no los usos del suelo. Es destacable que el *Bias* es generalmente < 0.004 , el $RMSE_A$ varía alrededor de los 0.004, y el $RMSE_R$ del 2.3 %. Si consideramos que con la V006 se mejoran las estimaciones de albedo, dichas diferencias, aunque sean pequeñas, implican una mejora significativa. Para tener una idea más clara de cuál sería el error de estimación del albedo de la V005, hay que considerar los estadísticos obtenidos en la validación de la V006 con imágenes de mayor resolución espacial, previamente validadas con medidas terreno (ver figura 9 de Mira *et al.*, 2015). Concretamente, se obtuvieron *Bias* de -0.005 a 0.011, $RMSE_A$ de 0.004 a 0.013, y $RMSE_R$ de 2 % a 7 % (Mira *et al.*, 2015), valores aceptables teniendo en cuenta el requerimiento del 5% de error establecido por el *Global Climate Observing System* (GCOS, 2006). Considerados estos valores, las diferencias de albedo observadas entre versiones idealmente implicarían un aumento del error para las estimaciones de la V005.

Las categorías que presentan las mayores diferencias de albedo entre versiones son aquellas que presentan una mayor variación temporal del albedo debido a cambios en la fenología de los cultivos y a los efectos de posibles cambios rápidos de la superficie (*i.e.*, precipitaciones, riegos, incendios, arado). El caso más evidente se observó con el píxel caracterizado como *Arroz*, seguido del *Pastizal de secano* y los *Cultivos leñosos*. Las diferencias se ponen también en evidencia con el análisis de las estimaciones de días consecutivos o muy seguidos, observándose cómo la V006 proporciona una variación gradual del albedo, siendo prácticamente invariable en la V005. Observamos también cómo un evento de lluvia ocurrido cercano a la fecha de interés modifica seguramente sin necesidad las estimaciones de albedo de la V005, mientras que en la V006 se pondera su importancia en función de la proximidad del evento al día de interés.

Para un análisis más completo y exhaustivo, este trabajo se podría mejorar con la consideración de una larga serie temporal de los productos de albedo MODIS de ambas versiones, y con el análisis de productos de mayor resolución espacial (*i.e.*, MOD43A).

Agradecimientos

Las imágenes Formosat-2 empleadas en este estudio son © de NSPO (2006), distribuidas por SPOT Image; todos los derechos reservados. Este estudio fue financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación (contrato de investigación "Juan de la Cierva" de la Dra. Mira), la Generalitat de Catalunya (GRUMETS SGR2014-1491 y SGR2009-1511) y la "Institutió Catalana de Recerca i Estudis Avançats" ("ICREA Academia Excellence in Research" del Dr. Pons). Asimismo, la investigación se enmarca en los proyectos ACAP (CGL2015-69888-P, MINECO/FEDER) y Ecopotential (EC H2020 641762-2).

Referencias bibliográficas

- Asner, G. P., Braswell, B. H., Schimel, D. S., Wessman, C. A. (1998): "Ecological Research Needs from Multiangle", *Remote Sensing of Environment*, 63, pp. 155–165.
- Baillarin, S., Glyzes, J. P., Latry, C., Bouillon, A., Breton, E., Cunin, L., Vesco, C., Delvit, J.M. (2004): "Validation of an automatic image orthorectification processing". *IGARSS's Proceedings*, 2, pp. 1398–1401.
- Bicheron, P., Leroy, M., Hautecoeur, O., Bréon, F. (1997): "Enhanced discrimination of boreal forest covers with directional reflectances from the airborne polarization and directionality of earth reflectances (POLDER) instrument". *Journal of Geophysical Research*, 102, 24, pp. 29517–29528.
- Bicheron, P., Leroy, M. (1999): "A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model". *Remote Sensing of Environment*, 67, pp. 251–266.
- Bsaibes, A., Courault, D., Baret, F., Weis, M., Olioso, A., Jacob, F., Hagolle, O., Marloie, O., Bertrand, N., Desfond, V., Kzemipour, F. (2009): "Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring". *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 716–729.
- Duda, R.D., Hart, P.E. (1973): *Pattern classification and scene analysis*. New York. John Wiley & sons.
- GCOS (2006). *Systematic observation requirements for satellite-based products for climate*. Global Climate Observing System (GCOS)-107, WMO/TD No. 1338. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D., Dedieu, G. (2008): "A multi-temporal method for cloud detection, applied to Formosat-2, VENμS, LandSat and Sentinel-2 images". *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 1747–1755.
- Hagolle, O., Huc, M., Villa, D., Dedieu, G., A. (2015): "Multi-Temporal and Multi-Spectral Method to Estimate Aerosol Optical Thickness over Land, for the Atmospheric Correction of Formosat-2, LandSat, VENμS and Sentinel-2 Images". *Remote Sensing*, 7, pp. 2668–269.
- Jin, Y.F., Schaaf, C.B., Woodcock, C.E., Gao, F., Li, X.W., Strahler, A.H., Lucht, W., Liang, S.L. (2003): "Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 2. Validation". *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 108, D5, pp. 2156–2202.
- Knyazikhin, Y., Martonchik, J. V., Myneni, R. B., Diner, D. J., Running, S. W. (1998): "Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data". *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103, 24, pp. 32257–32275.
- Kondratyev, K. Y. (1969): *Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press.
- Li, X.W., Strahler, A.H. (1992): "Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, pp. 276–292.
- Liang, S., Fang, H., Chen, M., Shuey, C.J., Walthall, C., Daughtry, C., Morissette, J., Schaaf, C.B., Strahler, A. (2002): "Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: Methods and preliminary results". *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 149–162.

- Lucht, W. (1998): "Expected retrieval accuracies of bidirectional reflectance and albedo from EOS-MODIS and MISR angular sampling". *Journal of Geophysical Research*, 103, pp. 8763–8778.
- Lucht, W., Roujean, J. L. (2000): "Considerations in the parametric modeling of BRDF and albedo from multi-angular satellite sensor observations". *Remote Sensing Reviews*, 18, pp. 343–379.
- Mira, M., Weis, M., Baret, F., Caurault, D., Hagolle, O., Gallego-Elvira, B., Oliso, A. (2015): "The MODIS (collection V006) BRDF/Albedo product MCD43D: temporal course evaluated over agricultural landscape". *Remote Sensing of Environment*, 170, pp. 216-228.
- Nicodemus, F. E., Richmond, J.C., Hsia, J.J. (1977): *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington, DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce.
- Pinty, B., Verstraete, M.M. (1992): "On the design and validation of Surface bidirectional reflectance and albedo models". *Remote Sensing of Environment*, 41, pp. 155-167.
- Pons, X. (2004): "MiraMon. Sistema d'Informació Geogràfica i *software* de Teledetecció " Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, CREAF. Bellaterra. ISBN: 84-931323-4-9 http://www.creaf.uab.cat/mirammon/index_usa.htm
- Pons, X., Arcalís, A. (2012): "Diccionari terminològic de teledetecció". Barcelona. Institut Cartogràfic de Catalunya y Enciclopèdia Catalana. 597 pp.
- Román, M.O., Schaaf, C.B., Lewis, P., Gao, F., Anderson, G.P., Privette, J.L., Strahler, A.H., Woodcock, C.E., Barnsley, M. (2010): "Assessing the coupling between surface albedo derived from MODIS and the fraction of diffuse skylight over spatially-characterized landscapes". *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 738–760.
- Ross, J. (1981): *The radiation regime and architecture of plant stands*. The Hague, Netherlands: Junk Publishers.
- Salomon, J.G., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Feng, G., Yufang, J. (2006): "Validation of the MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals using combined observations from the aqua and terra platforms". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 44, pp. 1555–1565.
- Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X. W., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.P., Lewis, P., Barnsley, M., Hobson, P., Disney, M., Roberts, R., Dunderdale, M., Doll, C., d'Entremont, R.P., Hu, B., Liang, S., Privette, J.L., Roy, D. (2002): "First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS". *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 35–148.
- Schaaf, C.B., Wang, Z., Strahler, A.H. (2011): "Commentary on Wang and Zender - MODIS snow albedo bias at high solar zenith angles relative to theory and to in situ observations in Greenland". *Remote Sensing of Environment*, 115, pp. 1296–1300.
- Strahler, A.H., Lucht, W., Schaaf, C.B., Gao, F., Li, X., Muller, J.P., Lewis, P., Barnsley, M.J. (1999): MODIS BRDF/Albedo Product: Algorithm Theoretical Basis Document Version 5.0. MODIS Product ID: MOD43
- Susaki, J., Yasuoka, Y., Kajiwar, K., Honda, Y., Hara, K. (2007): "Validation of MODIS albedo products of paddy fields in Japan". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, pp. 206–217.

Mira Sarrió, M., Padial Iglesias, M., Pons Fernández, X. (2018): "Intercomparación de las versiones 5 y 6 del producto BRDF/albedo de MODIS", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 57-78. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.494>

Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.J., Perbos, J., Deschamps, P.Y. (1990): "Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum. The 5S code". *International Journal of Remote Sensing*, 11, 4, pp. 659–668.

Vermote, E. F., Saleous, N. Z. E., Justice, C. O., Kaufman, Y. J., Privette, J., Remer, L., Roger, J. C., Tanré, D. (1997): "Atmospheric correction of visible to middle infrared EOS-MODIS data over land surface, background, operational algorithm and validation". *Journal of Geophysical Research*, 102, 14, pp. 17131–17141.

Wanner, W., Li, X., Strahler, A. H. (1995): "On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance". *Journal of Geophysical Research*, 100, 10, pp. 21077–21089.

WWW1: Web de descarga de los productos MODIS de la USGS. <http://glovis.usgs.gov/>

WWW2: Web de descarga de la aplicación *MODIS Reprojection Tool*. https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool