



Mejoras en el cálculo de los Modelos Digitales de Radiación Solar a partir del tratamiento del MDE y de la incorporación del patrón espaciotemporal de la profundidad óptica atmosférica: resultados preliminares para la Península Ibérica

C. Roca-Fernández¹, M. Ninyerola², X. Pons¹

¹ Grumets Research Group, Departament de Geografia, Edifici B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Catalonia, Spain

² Grumets Research Group, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Edifici C, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Catalonia, Spain

Catalina.Roca@uab.cat, Miquel.Ninyerola@uab.cat, Xavier.Pons@uab.cat

RESUMEN: En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el cálculo de un Modelo Digital de Radiación Solar (MDRS) de la Península Ibérica (PI) a 100 m de resolución espacial, el cual presenta dos novedades importantes respecto a trabajos previos: mayor precisión en la determinación de la geometría de iluminación, y aplicación de un modelo atmosférico no constante en el tiempo y el espacio, considerando los ángulos de incidencia del vector solar en cada instante a lo largo de los meses y años, las zonas con ocultamiento topográfico, las variaciones de la constante solar a lo largo del año debidas a la distancia Tierra-Sol, y el tipo de radiación solar. Para conseguir una mayor exactitud se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 100 m de resolución espacial desglosado en franjas latitudinales y teselas W-E, con tamaños y solapes calculados en sus 4 lados. Además, en el modelo actual se integra un modelo atmosférico basado en datos de profundidad óptica atmosférica debida a las nubes (COT, *Cloud Optical Thickness*) obtenida de teledetección satelitaria. Finalmente, para el ajuste y validación del nuevo MDRS se utilizarán como datos verdad-terreno los proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en sus estaciones meteorológicas.

Palabras-clave: modelo digital de radiación solar; geometría de iluminación; profundidad óptica atmosférica; modelo atmosférico.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este trabajo se presenta la metodología utilizada para el cálculo de un Modelo Digital de Radiación Solar (MDRS) de la Península Ibérica (PI) a 100 m de resolución espacial, el cual presenta dos novedades importantes respecto a trabajos previos: mayor precisión en la determinación de la geometría de iluminación, y la integración de observaciones de teledetección para la aplicación de un modelo atmosférico no constante en el tiempo y el espacio.

En efecto, en aproximaciones anteriores se consideraba una posición solar simplificada considerando un único punto central para toda la PI en el cálculo de la radiación solar, y una densidad óptica atmosférica constante a lo largo del día y del año y estándar para días claros (Pons, 1996; Pons y Ninyerola, 2008; Ruiz-Arias *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2015), mientras que, para un cálculo más preciso de la radiación solar que permita obtener resultados espacializados para toda la PI y a lo largo del tiempo mediante la integración de distintos modelos atmosféricos, la nueva propuesta se basa en los objetivos siguientes:

- *Mejorar la geometría de iluminación solar a partir de la teselación adecuada con su zona de influencia (buffer) calculada en sus 4 lados para considerar los obstáculos topográficos en la radiación solar.* El modelo actual considera los ángulos de incidencia del vector solar en cada instante a lo largo de los meses y años, las zonas con ocultamiento topográfico, las variaciones de la constante solar a lo largo del año debidas a la distancia Tierra-Sol, y el tipo de radiación solar (directa y/o difusa). Para una mayor exactitud se ha utilizado un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 100 m de resolución espacial desglosado en franjas latitudinales y teselas W-E, con tamaños y solapes calculados en sus 4 lados. Ello ha permitido asumir como negligibles ($\leq 1.00\%$) las diferencias en la posición solar entre teselas y, al mismo tiempo, asegurar que se consideran correctamente las sombras orográficas proyectadas sobre teselas vecinas en cada punto.

- *Calcular mejor la situación atmosférica a partir de datos de profundidad óptica atmosférica debida a las nubes (Cloud Optical Thickness, COT), reflejando más rigurosamente la variabilidad espaciotemporal de la PI.* El modelo atmosférico se basa en la integración de datos de COT obtenidos mediante teledetección satelitaria. La COT es la principal responsable de la extinción atmosférica de la radiación solar a través de su influencia sobre la transmitancia descendente (τ_1). Gracias a la teledetección (como por ejemplo los productos utilizados en este trabajo: CLAAS 2.1 derivados del sensor SEVIRI de los satélites MSG durante el período temporal diurno mensual horario 2004–2017) se obtienen valores de COT diferentes según las zonas de la PI en cada momento, lo cual revierte en un cálculo de un MDRS mucho más ajustado a la variabilidad espaciotemporal de la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra.

Finalmente, para el ajuste y validación del nuevo MDRS se utilizarán como datos verdad-terreno los proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en sus estaciones meteorológicas para el período temporal diario 1980–2020. Consideramos que este nuevo MDRS aportará una base de gran interés en estudios de modelización climática general, así como en aspectos particulares como el estudio de las sequías.

2. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y RESULTADOS PROVISIONALES

A partir de los objetivos anteriores, en este apartado se expone el estado actual de esta investigación, explicando y discutiendo los aspectos metodológicos que se han ido desarrollando.

Con la herramienta InsolDia, desarrollada en el entorno SIG MiraMon (MM) se ha hecho una primera aproximación al cálculo de la radiación solar ($10 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$) (Figura 2). Para ello se ha utilizado un MDE a 100 m de resolución espacial, obtenido a partir del MDE PNOA <[Plan Nacional de Ortofotografía Aérea \(ign.es\)](http://plan.nacionaldeortofotografia.aerea.ign.es)> para los territorios españoles, y del MDE de ASTER v. 3.0 <<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>> para los territorios portugueses. La zona pirenaica contiene los datos del MDE PNOA para el territorio francés donde existen, así como los datos del MDE de las colecciones preferidas de MM para el territorio andorrano. Las hojas del MDE PNOA se han mosaicado mediante cambio de lado de píxel de un ráster de 5 m a 50 m, utilizando como criterio de contracción la mediana, y finalmente se ha aplicado un remuestreo por interpolación bilineal de 50 m a 100 m. Para las hojas del MDE de ASTER, estas se han mosaicado mediante remuestreo por interpolación bilineal de 30 m a 100 m. Siguiendo los mismos criterios de mosaicado, se han utilizado las imágenes del MDE PNOA para las Islas Baleares y las imágenes del MDE de ASTER más allá de la frontera pirenaica catalana con Francia, haciendo converger todos los sistemas de referencia a UTM-30N-ETRS89. Se ha comprobado que en la frontera con Portugal la diferencia entre los valores de los MDE es suficientemente pequeña, obteniendo los siguientes valores: media = 0.01 m; desviación estándar = 6.31 m; mínimo = -59.39 m; máximo = 53.20 m; diferencias > +10 m = 4.60 %; diferencias < -10 m = 5.50 %. Se ha añadido una zona de influencia de costa de 2 km con valor 0 para evitar artefactos en los cálculos, por ejemplo, de radiación solar; todo lo que está más allá de esta zona de influencia se ha asignado como NoData. Finalmente, a través de la aplicación de *Google Maps* se han comprobado las zonas $\leq -30 \text{ m}$, observando que se tratan de zonas de extracción minera.

InsolDia es una herramienta que calcula la radiación solar global (directa y difusa, sin considerar la reflejada por su habitualmente discreta aportación) que llega a la superficie de la Tierra. También tiene en cuenta información sobre la estructura del relieve, ya que integra las pendientes, las orientaciones y las sombras proyectadas por el mismo. Dado que la variabilidad interanual de la irradiancia solar es muy baja, no se contemplan en este estudio los datos a lo largo de los años (sí las diferencias Tierra-Sol). En cambio, sí que se desea calcular la radiación solar individualizada para todos los meses del año ya que sí que es claramente diferente (cambios en la altura solar y la ya referida distancia Tierra-Sol). En cada mes se ha considerado suficiente realizar el cálculo a día 15, y en ese día integrar toda la radiación que llega desde el alba hasta el ocaso, ya que el día central del mes es suficientemente representativo del promedio diario mensual. Sin embargo, la situación atmosférica es cambiante a lo largo del día y de los meses del año, lo cual se introducirá como novedad en el modelo. Los parámetros adicionales a los ya expuestos son los siguientes:

- *Modelo Digital de Sombras:* Se calcula previamente para un rango de azimuts entre 30° y 330° (dada la latitud de la PI), con saltos de 5° en 5° , a partir del MDE. Se utiliza este rango para que el resultado sea simétrico y porque en algunas zonas de la PI puede ser que el Sol salga o se ponga más hacia el N de los $\pm 50^\circ$, sobre todo hacia el solsticio de verano. Los modelos de sombra resultantes contendrán los ángulos de elevación solar por debajo de los cuales se producen sombras en cada punto para todo el rango de los posibles ángulos azimutales que se darán durante el día escogido.

- *Irradiancia exoatmosférica:* Se utilizará la constante solar de 1366 W/m^2 (ISO 21348:2007) en el momento medio de las distancias astronómicas Tierra-Sol (1 unidad astronómica, AU). InsolDia considera los cambios de la constante solar en función del día del año a partir del cálculo astronómico de dichas distancias, de manera que la proporción con el valor medio (1 AU) resulta en un coeficiente que modula la constante solar entre $\pm 3.40 \%$. En el momento de la órbita (momento del año) en el que la Tierra esté a la distancia media del Sol, el coeficiente modulador será 1 y la constante solar de 1366 W/m^2 , mientras que en el perihelio el coeficiente será máximo y en el afelio mínimo.
- *Coeficiente de extinción atmosférica de la energía solar (τ_0):* Permite tener en cuenta tanto la dispersión como la absorción de la radiación. Anteriormente (Pons y Ninyerola, 2008) se había utilizado un valor promedio de 0.288 para un día claro en el conjunto del espectro solar (propuesto por Rothermel *et al.* (1986), para una atmósfera clara forestal media). En esta nueva primera aproximación de la radiación solar (Figura 2), este valor es, pues, constante. Una de las principales novedades en la aproximación en la que se integra este trabajo, consiste en considerar τ_0 diferentes según las zonas de la PI, necesitando para ello integrar imágenes de teledetección que proporcionen la COT (τ_0 relacionada con la nubosidad) en cada punto y momento. Es precisamente este cálculo de la COT, el segundo de los objetivos de esta contribución, necesario para poder aplicarla en una segunda aproximación de cálculo del MDRS.
- *Incremento horario:* Establecido en 0.5 h, se trata del incremento en unidades horarias que se aplica a cada posición solar desde la salida del Sol hasta la puesta.

En esta primera aproximación del nuevo MDRS (Figura 2) se ha puesto en práctica la metodología para mejorar la geometría de iluminación solar, tratándose del primer objetivo de esta contribución. Dicha mejora se basa en los siguientes criterios:

- *Tamaño de tesela negligible en cuanto a posición solar en cualquiera de sus puntos.* InsolDia debe poder calcular la radiación solar a partir del punto central de cada tesela con la confianza que ésta es suficientemente pequeña (aunque no tendría sentido hacer el cálculo a 100 m para un ámbito tan grande como la PI), para que las diferencias de posición solar en el punto central de la misma y cualquier punto de la tesela sean mínimas. Ello se ha calculado mediante los procedimientos astronómicos pertinentes que han llevado a desglosar el MDE en franjas latitudinales y teselas W-E, con los tamaños que se indicarán.
- *Solape suficiente entre teselas para asegurar una correcta consideración del ocultamiento topográfico.* Como es sabido, la radiación solar cambia a lo largo del año también por la altura solar. En efecto, en la PI es máxima en junio y mínima en diciembre y a la vez también aumenta conforme nos desplazamos desde el N hacia el S, produciéndose menos zonas con ocultamiento topográfico. Para tener correctamente en cuenta este efecto, debe disponerse de una zona de influencia suficiente en cada zona, pero no excesiva para no ralentizar innecesariamente el cálculo. Para ello el teselado del MDE deducido de las necesidades del punto anterior, debe ampliarse con solapes calculados en sus 4 lados para tener en cuenta el ocultamiento topográfico que se pueda crear como consecuencia de las sombras orográficas generadas sobre aquella tesela. Dicho de otra manera, cada tesela dispone de una zona de influencia suficiente para asegurar que cualquier obstáculo topográfico a la radiación será tenido en cuenta y en esos puntos el programa aplicará exclusivamente un modelo de radiación difusa. Posteriormente MM realizará el mosaico de todas las teselas excluyendo las zonas de influencia que ya no son necesarias (y conllevarían problemas si se incluyeran en el mosaico).

La conjunción de ambos criterios ha llevado, pues, a la determinación del tamaño de las teselas y sus zonas de solape en las que se ha dividido la PI. Fruto de los cálculos realizados se prevén errores sistemáticos mínimos debidos a la posición solar entre teselas y al ocultamiento topográfico de teselas vecinas. En efecto, se ha ajustado el método definiendo estos errores en diferencias relativas de radiación solar en la precisión del cálculo que, en cualquier caso, son menores o iguales a 1.00 %. Se han realizado comprobaciones adicionales para asegurar dicha precisión:

- Las franjas latitudinales se comprobaron a partir de las diferencias de radiación solar en zonas de mar entre franjas vecinas (N-S) a 2 km de la costa porque en estas localizaciones la radiación solar es constante, ya que el mar es una superficie uniforme, sin obstáculos topográficos y sin sombras. También se hicieron comprobaciones entre 2 puntos cercanos sobre el territorio, repitiendo el proceso en 2 puntos especialmente distintos: 2 puntos en Galicia, y 2 puntos en Cádiz. Para ello se definió un ámbito libre de obstáculos topográficos de 3×3 celdas de 100 m de lado para el cálculo de las sombras que se utilizarán en la radiación solar. Además, se trabajó en este caso en incrementos de posición en azimut de 1° para aumentar la precisión del cálculo. De esta forma, y sin considerar posibles zonas de solape se garantiza que la similitud de radiación solar será por debajo del límite preestablecido. Los resultados obtenidos para las franjas

latitudinales de 10 km (Figura 1) han sido los siguientes:

- Diferencias de radiación solar en 2 puntos de Galicia (coordenada Y de los puntos, en UTM-30N-ETRS89: 4861150 y 4851150): 1.00 % entre los 2 puntos.
- Diferencias de radiación solar en 2 puntos de Cádiz (coordenada Y de los puntos, en UTM-30N-ETRS89: 3979750 y 3989750): 0.60 % entre los 2 puntos.
- Las teselas W-E se comprobaron a partir de las diferencias de radiación solar entre 3 puntos concretos sobre el territorio (Finisterre – Meridiano Central de la PI – Cap de Creus), definiendo un ámbito libre de obstáculos topográficos como en el caso anterior. Los resultados obtenidos para las teselas W-E de 250 km (Figura 1) han sido los siguientes:
 - Diferencias de radiación solar inferiores al 1.00 % entre todos los 2 puntos.
- Para determinar la consideración del ocultamiento topográfico se generaron perfiles de radiación solar de forma horizontal en los solapes de la zona N, medial y S, y perfiles de forma vertical en la zona W, medial y E. En este caso sí que se trazaron sobre el MDE y, por tanto, se consideraron las sombras topográficas calculadas cada 5° para el rango azimutal 30° a 330° (en este caso no se consideraron las zonas de mar situadas en los solapes). Los resultados obtenidos han sido los siguientes para solapes de 5 km en los 4 lados de la tesela en franjas latitudinales de 10 km y longitudinales de 250 km (Figura 1):
 - En el solape latitudinal la diferencia media fue de 0.29 % en zonas menos abruptas y de -0.15 % en zonas más abruptas, y en el solape longitudinal la diferencia media fue de 0.16 % en zonas menos abruptas y de -0.98 % en zonas más abruptas.
 - Teniendo en cuenta la estacionalidad de los datos de radiación solar (enero, abril, junio y octubre), se detectaron, como era de esperar, más diferencias de radiación solar durante el invierno porque el Sol está más bajo y las sombras topográficas proyectadas generadas por la orografía de una tesela a la tesela vecina son más grandes. En ningún caso, sin embargo, estas diferencias fueron superiores al 1.00 %.



Figura 1. Ejemplo de teselas: 10 km latitudinales x 250 km longitudinales + 5 km de solape en las cuatro direcciones. Modelización de la radiación solar a 15 de junio de 1985.

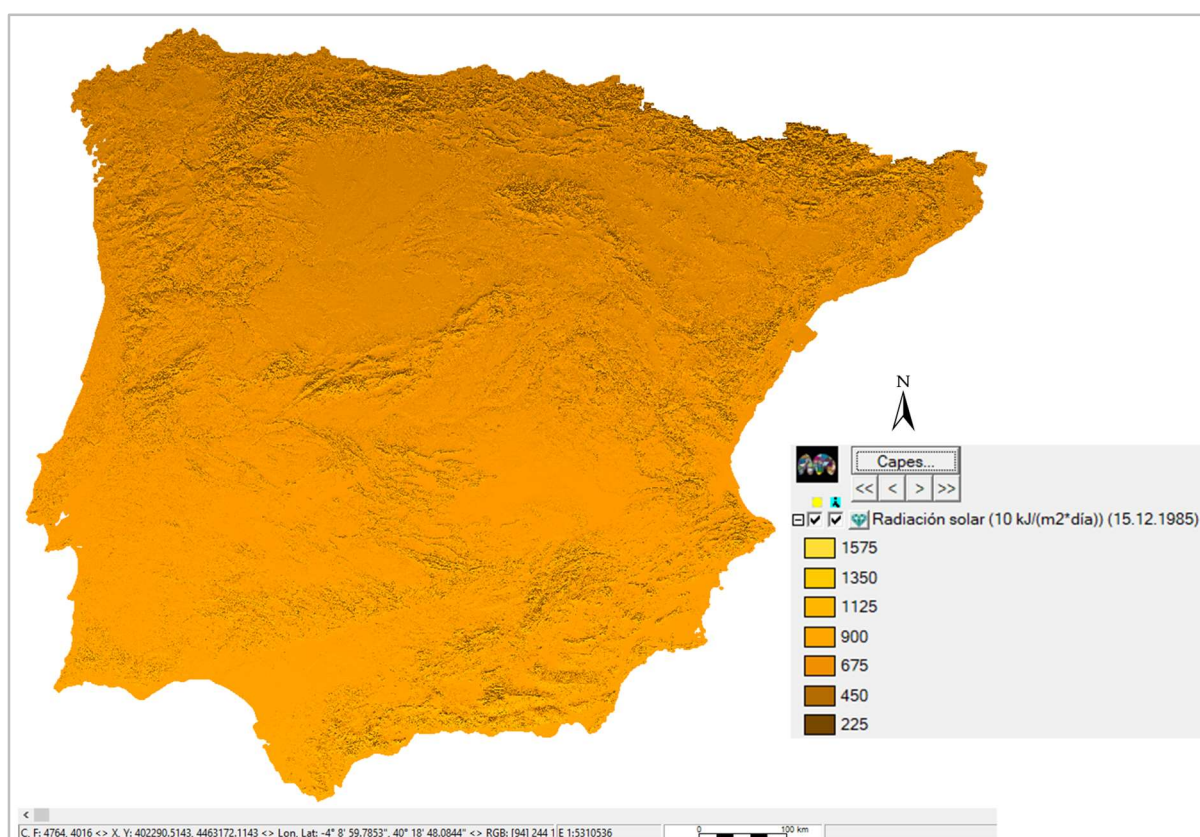


Figura 2. Primera aproximación del nuevo MDRS de la PI a 100 m. UTM-30N-ETRS89. Modelización de la radiación solar a 15 de diciembre de 1985, basada en la teselación.

Actualmente, a partir de la introducción de datos de COT mediante imágenes de teledetección satelitaria se está desarrollando una segunda aproximación mejorada del MDRS. Se han hecho diversas pruebas, utilizando datos de COT que ofrecen los diferentes sensores:

- **MODIS (a bordo de los satélites Terra y Aqua):** Los productos que se han utilizado son MOD06_L2 (Terra) y MYD06_L2 (Aqua), disponibles en su web <[MODIS Web \(nasa.gov\)](http://MODIS Web (nasa.gov))>. El producto MOD06_L2 ofrece datos de COT diarios para el período temporal 2000–2021, con una resolución temporal entre las 10 h y las 12 h, y una resolución espacial de 1 km. El producto MYD06_L2 ofrece datos de COT diarios para el período temporal 2002–2021, con una resolución temporal entre las 13 h y las 15 h, y una resolución espacial de 1 km.
- **AVHRR Pathfinder PATMOS-x (a bordo de los satélites NOAA):** Este producto, disponible en la web de GEWEX Cloud Assessment Database <[GEWEX Cloud Assessment \(polytechnique.fr\)](http://GEWEX Cloud Assessment (polytechnique.fr))>, ofrece datos de COT medios mensuales para el período 1982–2009, con una resolución temporal que es la media mensual a las 13:30 h, y una resolución espacial de 1°.
- **SEVIRI (a bordo de los satélites MSG):** Se ha utilizado la familia de productos CLAAS 2.1, disponibles en la web de la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) <EUMETSAT - Product Navigator - CLAAS-2.1: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI - Edition 2.1>. Se ofrece un subproducto de COT instantáneo a partir del producto CPP (*Cloud Physical Properties*), a una resolución temporal de 15 minutos, y a 0.05° de resolución espacial. Para obtener la COT con otra resolución temporal (diaria, mensual o diurna mensual horaria a lo largo de todo el día, siendo estos datos la media calculada a partir de los instantáneos cada 15 minutos (Benas *et al.*, 2017)), ofrecen una serie de productos y de subproductos a diferentes escalas de resolución espacial (0.05° para los productos diario y mensual, y 0.25° para el producto diurno mensual horario) para que, al aplicar la Ecuación (1) pueda obtenerse la COT y derivar el modelo atmosférico necesario. Nótese que se deberá aplicar el factor de escala a cada subproducto por separado antes de aplicar la Ecuación (1).

$$COT = cot_{liq} * cph + cot_{ice} * (1 - cph) \quad (1)$$

Donde:

cot_{liq} es un subproducto del producto LWP (*Liquid Water Path*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la COT de agua líquida contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cot_{liq} están escalados entre 0 y 100.

cph es un subproducto del producto CPH (*Cloud Phase*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la fracción de agua líquida contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cph están escalados entre 0 y 1. Esta variable, al indicar la fracción de nubes de agua, multiplica la componente de cot_{ice} por el complementario a 1 de la misma variable.

cot_{ice} es un subproducto del producto IWP (*Ice Water Path*) que consiste en la media instantánea cada 15 minutos de la COT de agua sólida (hielo) contenida en la nube. Deberá multiplicarse el valor de cada píxel por el factor 0.01, ya que los valores de cot_{ice} están escalados entre 0 y 100.

El período temporal de los productos que ofrece SEVIRI es 2004–2017, y los aspectos técnicos más relevantes son los siguientes (EUMETSAT Data Services, 2022b):

- El principio central del método para recuperar las propiedades físicas de las nubes es que la reflectividad de las mismas a una longitud de onda de no-absorción (0.6 o 0.8 μm) está fuertemente relacionada con la densidad óptica y tiene poca dependencia con el radio efectivo de las partículas, mientras que la reflectividad de las nubes a una longitud de onda de absorción (1.6 o 3.7 μm) depende en gran medida del radio efectivo de las partículas (Nakajima y King, 1992, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b).
- Se utiliza el algoritmo CPP v. 3.90 (Roebeling *et al.*, 2006, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b) y el modelo de transferencia radiativa Doubling-Adding KNMI (DAK) (De Haan *et al.*, 1987, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b; Stammes, 2001, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b). Se simulan reflectividades de longitudes de onda de 0.6 y 1.6 μm en la *Top of Atmosphere* (TOA) en función de la geometría de visualización, la densidad óptica de la nube, el radio efectivo de las partículas y la fase de la nube. Estas reflectividades simuladas se almacenan en una tabla *Look Up Table* (LUT). Se comparan simultáneamente las reflectividades observadas por el satélite con la LUT de reflectividades simuladas. Se realiza un proceso iterativo que finaliza cuando la densidad óptica de la nube recuperada converge a un valor estable.
- Sobre superficies muy brillantes, especialmente en hielo y nieve, la recuperación de las propiedades de las nubes es muy problemática, porque las reflectividades en los canales del visible son muy similares entre estas superficies. Además, la recuperación de las nubes “rotas” se ve afectada por la contribución de la reflectividad de la superficie, lo que, en general, da lugar a una subestimación de la COT en los píxeles parcialmente nublados.
- Para los píxeles NoData, los productos IWP y LWP únicamente están disponibles para las horas diurnas, ya que es necesaria la radiación solar para que el sensor pueda registrar datos de reflectividad y obtener la cot_{ice} y la cot_{liq} , respectivamente. Por tanto, según la latitud y longitud, en las horas límite del ciclo diurno siempre se encontrarán píxeles NoData en las esquinas de las imágenes de la COT obtenidas (Figura 3). Además, existen otros tipos de píxeles NoData, los debidos a píxeles corrompidos o sin nube, aunque el número de franjas horarias con este tipo de NoData es pequeño.
- Se utilizó SEVIRI-MSG1 para el período enero 2004 – abril 2007, SEVIRI-MSG2 para el período abril 2007 – enero 2013, y SEVIRI-MSG3 para el período enero 2013 – diciembre 2017. En este contexto, se produjeron lagunas significativas sin datos durante el servicio operacional de Meteosat-8 en agosto del 2005 y enero del 2006, en ambos meses inferiores a 2 días, y entre septiembre – octubre del año 2006, para el que existe un vacío de 2 semanas (Stengel *et al.*, 2014). Se rellenaron los *gaps* de las series temporales utilizando datos de *backup* del satélite, en caso de que estuviesen disponibles.
- Se procesaron secuencialmente todos los intervalos de tiempo de un mismo día. El procesado empezaba a medianoche. Esto permitió la detección de nubes temporales para todos los intervalos de tiempo, excepto a las 00:00 h (Derrien y LeGleau, 2010, dentro de EUMETSAT Data Services, 2022b). Se procesaron hasta 90 días en paralelo aislados entre sí para generar el registro de los datos.
- Las series temporales de las reflectividades de SEVIRI se calibraron a partir de las de MODIS ya que MODIS ha demostrado ser un producto estable a lo largo del tiempo y ha estado en órbita durante el período de tiempo completo del MSG.

- En el caso de los productos con resolución temporal diurna mensual horaria a lo largo del día, éstos se prepararon a una resolución espacial menos detallada (0.25°) en relación con los productos instantáneos, diarios y mensuales (0.05°) con la finalidad de conservar un número suficiente de observaciones en cada píxel (Benas *et al.*, 2017).

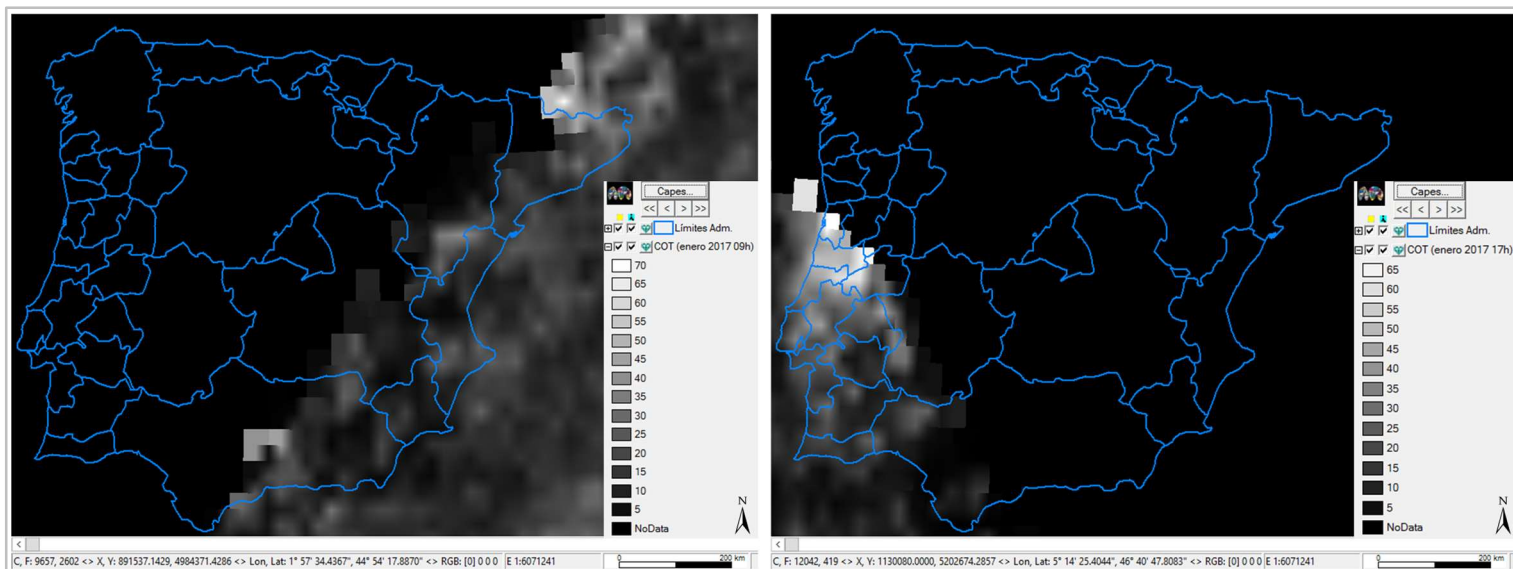


Figura 3. COT diurno mensual horario de la PI obtenido a partir de la Ecuación (1), remuestreado a 100 m. UTM-30N-ETRS89 (a la izquierda COT a enero 2017 a las 09 h, y a la derecha COT a enero 2017 a las 17 h). Se aprecia tanto la falta de datos en las horas límite de esta fecha solsticial, así como la presencia de artefactos (que serán tratados debidamente) entre la presencia y la ausencia de datos.

En base al análisis visual, al cálculo de las diferencias entre los datos y a algunas comparaciones con imágenes Landsat descargadas del SatCat <[SatCat: Servidor d'imatges de satèl·lit de Catalunya \(gru-mets.cat\)](http://SatCat: Servidor d'imatges de satèl·lit de Catalunya (gru-mets.cat))>, además de la información buscada, se determina utilizar los productos derivados de SEVIRI para obtener la COT y generar el modelo atmosférico de la PI, ya que SEVIRI ofrece una τ_0 más representativa que los otros sensores debido a que proporciona una radiografía temporal (a lo largo del día) más densa de los datos, mientras que MODIS proporciona una COT un poco más elevada a lo largo de todos los años de la serie ajustada, y SEVIRI detecta, en general, nubes más finas que MODIS para todo el mes (EUMETSAT Data Services, 2022b).

Para decidir la representatividad temporal a utilizar se han contrastado todas las resoluciones temporales posibles que ofrece SEVIRI (instantánea, diaria, mensual y diurna mensual horaria), determinando que:

- Como nuestro interés es calcular la radiación solar mensual anual horaria (media en una cierta hora, calculada a partir de todos los datos de aquel mes y año), o bien mensual climática horaria (media en una cierta hora y mes, calculada a partir de todos los datos de todos los años), se han descartado los productos instantáneos y diarios de SEVIRI. De todos modos, éstos se han comparado entre ellos y con los productos mensuales, además de con imágenes Landsat descargadas del SatCat (para las horas equivalentes), obteniendo diferencias significativas en el patrón geográfico y en las magnitudes de la COT del producto instantáneo que no comprendemos, más aún cuando los otros 3 productos son claramente coherentes (Figura 4).
- La elección entre los productos mensual (0.05°) y diurno mensual horario (0.25°) conlleva que con el segundo se pierde resolución espacial, pero se gana en resolución temporal ya que se puede obtener la COT con la Ecuación (1) de cada hora a lo largo del día. Esto permite integrar, para el mismo período temporal de la COT (2004–2017), el modelo atmosférico al cálculo de la radiación solar de la PI en horas concretas, y obtener el MDRS con carácter mensual anual horario, además del MDRS con carácter mensual climático horario. Asimismo, se ha realizado una comparación entre los modelos de diferente resolución con la herramienta AdapRas de MM, que permite adaptar un ráster según el patrón geométrico de un segundo ráster, comprobando que entre ambos productos existen buenas similitudes geográficas y de magnitudes de la COT. En efecto, las diferencias entre las medias son muy próximas a 0, a la vez que las magnitudes

del coeficiente de correlación r de Pearson son de 0.95 para todo el modelo peninsular y de 0.79 cuando tomamos perfiles concretos de la COT a lo largo de zonas en las direcciones N, S, W y E de la PI, y en 2 diagonales (NE-SW y NW-SE).

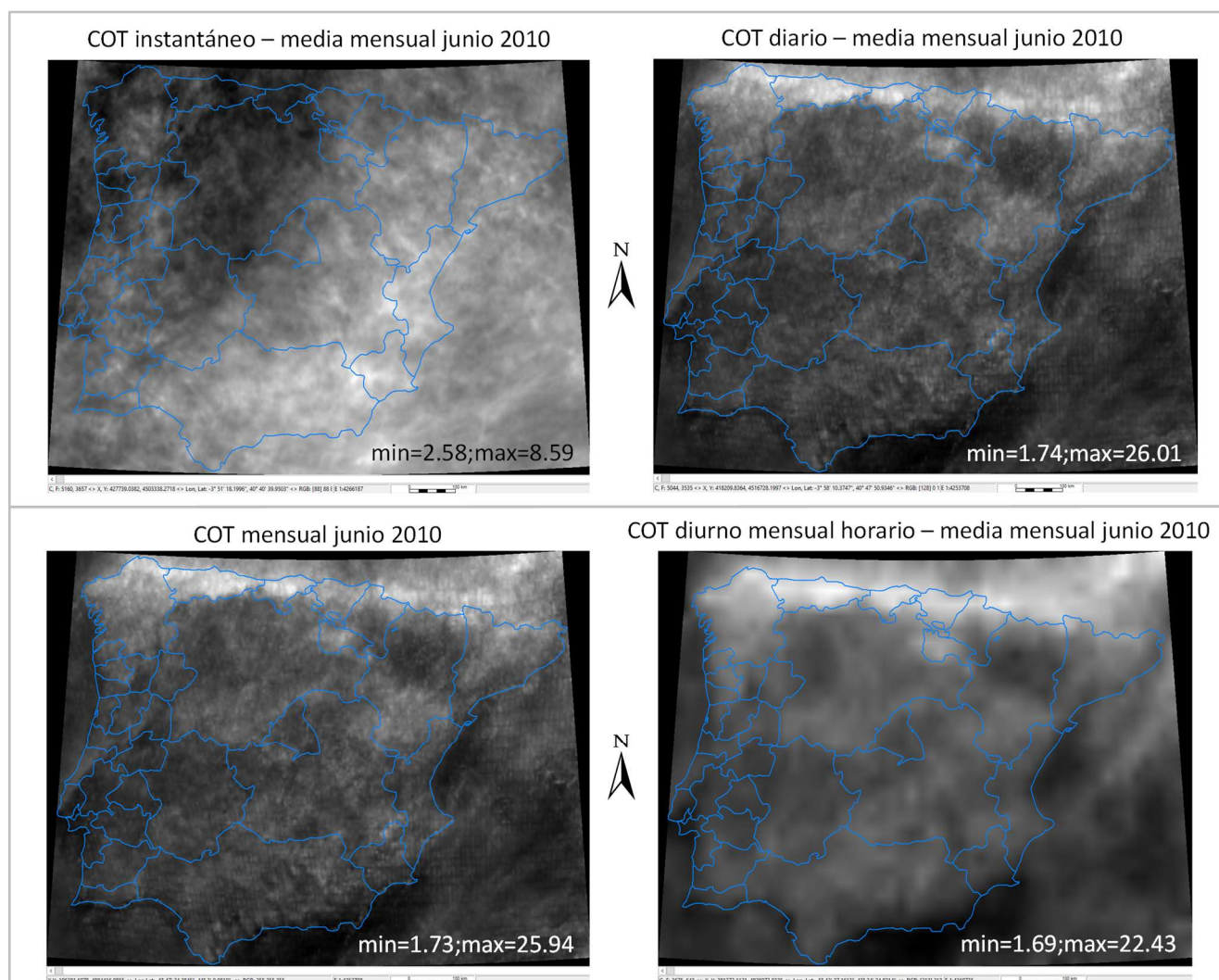


Figura 4. COT a las diferentes resoluciones temporales de la PI obtenidas a partir de la Ecuación (1), excepto el producto instantáneo (calculado en origen), remuestradas a 100 m. UTM-30N-ETRS89. COT a junio 2010.

Es necesario tener en cuenta que la COT no considera los aerosoles, y que la profundidad óptica atmosférica puede ser debida a las nubes (COT) o a los aerosoles, en cuyo caso viene determinada por el parámetro *Aerosol Optical Thickness* (AOT). La profundidad óptica atmosférica da cuenta de la extinción de la radiación solar producida por procesos de absorción y/o dispersión atmosférica. Dichos procesos afectan a la transmitancia de manera diferente en función de la longitud de onda, siendo τ_1 la transmitancia descendente y τ_2 la transmitancia ascendente (necesaria en correcciones radiométricas de instrumentos de teledetección que miden radiación reflejada).

Se ha hecho una pequeña investigación sobre si fuese conveniente combinar datos de COT y de AOT para estimar mejor la radiación solar, y se concluye lo siguiente (Yolanda Sola y Jeroni Lorente de Física de la Atmósfera del Departamento de Física Aplicada de la UB, comunicación personal, 25 de marzo del 2021):

- Para análisis de la atmósfera, como por ejemplo estudios sobre la calidad del aire, mejor utilizar la AOT como la extinción de la radiación solar integrada en la columna atmosférica. Pero para estimar con más precisión la radiación solar, mejor utilizar datos de COT como la extinción de la radiación solar integrada en la columna atmosférica.

- Las nubes tienen más peso en la radiación solar que llega a la superficie que no los aerosoles. Además, los aerosoles no se detectan bien cuando hay nubes densas, y si no se complementa con algún perfilador (lidar) no se puede afinar bien para separar los dos componentes.
- Los datos de COT y de AOT pueden corresponder a momentos diferentes del día. Por tanto, los datos son difícilmente combinables.
- Cuando son coincidentes en el tiempo tampoco serían combinables ni comparables, porque las magnitudes son tan diferentes que deberían ser por ejemplo tormentas de arena en AOT para ser comparables con datos de COT.
- Normalmente los aerosoles residen por debajo o dentro de la nube, y su densidad óptica es pequeña en comparación con la de la nube. Pero si los aerosoles residen por encima de la nube y si absorben suficiente energía, pueden reducir significativamente la reflectividad en el visible y entonces se estaría subestimando la COT (EUMETSAT Data Services, 2022a, 2022b).
- Son datos que provienen de componentes atmosféricos diferentes y se miden en longitudes de onda diferentes (COT entre 0.6 – 3.7 μm , principalmente sobre la columna de la nube, y AOT en 0.55 μm sobre toda la columna atmosférica).

3. CONCLUSIONES Y CONTINUIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

Los avances realizados permiten disponer de un modelo de teselación que reduce a menos de un 1.00 % los problemas que pudieran derivarse de la distinta posición solar en cada punto de la PI, sin incurrir en errores por no consideración del ocultamiento topográfico en cada punto. Por otra parte, los avances también han logrado definir un modelo atmosférico de la COT para la PI que permitirá ir más allá de las aproximaciones previas del MDRS (Pons y Ninyerola, 2008), que consideraban una atmósfera clara y constante a lo largo del día y del año, y representar mejor la variabilidad espaciotemporal de la radiación solar en este territorio (a partir de los modelos atmosféricos mensuales horarios (anual y climático) en cada punto). Para ello se han utilizado productos CLAAS 2.1 del sensor SEVIRI de los satélites MSG durante el período temporal 2004–2017.

Esta metodología permitirá generar diferentes MDRS a partir de la integración de distintos modelos atmosféricos de la COT, ajustados a la variabilidad espaciotemporal de la PI, calibrados y validados con los datos verdad-terreno para el período temporal diario 1980–2020 de las estaciones meteorológicas de la AEMET. Los resultados se espera que sean de gran interés en estudios de distribución de la vegetación y en modelización climática general, y en particular para el estudio de las sequías, mejorando el cálculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), variable incluida en el índice de sequía climática SPEI (*Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se está llevando a cabo en el marco de la contratación de personal investigador predoctoral en formación FI-DGR (2020FI-B00669), cofinanciada por la Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación (AGAUR) de la Generalitat de Catalunya y por la Unión Europea (UE), a través del Fondo Social Europeo (FSE). Forma parte del proyecto de investigación I+D+i NEWFORLAND (RTI2018-099397-B-C21), desarrollado por el grupo de investigación GRUMETS.

Se agradece al Sr. Martin Stengel de EUMETSAT la facilitación de los detalles específicos de los productos de EUMETSAT, además de indicarnos que únicamente hiciésemos uso de la familia de productos CLAAS 2.1 y la Ecuación (1) para el cálculo de la COT. También se agradece a la Dra. Yolanda Sola y al Dr. Jeroni Lorente de Física de la Atmósfera del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Barcelona (UB), la reunión concertada para solventar las dudas que teníamos sobre si incluir los aerosoles o no en el modelo atmosférico para el cálculo definitivo de la radiación solar. Finalmente, agradecemos a nuestro colega Mario Padial su ayuda en la elaboración de los *scripts* más sofisticados.

4. BIBLIOGRAFÍA

- Benas, N.; Finkensieper, S.; Stengel, M.; Van Zadelhoff, G.J.; Hanschmann, T.; Hollmann, R.; Meirink, J.F. (2017). "The MSG-SEVIRI based cloud property data record CLAAS-2". *Earth Syst. Sci. Data*, 9(2), pp. 415-434. Doi: 10.5194/essd-9-415-2017
- EUMETSAT Data Services. (2022a). *CLAAS: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI – Edition 1 – Hourly / Daily Means, Pentad Means, Monthly Means / Monthly Mean Diurnal Cycle / Monthly Histograms*. https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:CM:MSG:CLAAS_V001?query=&filter=satellite_MSG&filter=instrument_SEVIRI&filter=themes_Cloud&results=51&s=extended
- EUMETSAT Data Services. (2022b). *CLAAS-2.1: CM SAF Cloud Property Dataset using SEVIRI – Edition 2.1*. https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:DAT:0279?query=&filter=satellite_MSG&filter=instrument_SEVIRI&filter=themes_Cloud&results=40&s=extended
- EUMETSAT Data Services. (2020). *CM SAF Aerosol Optical Depth (AOD) Data Record – Edition 1*. https://navigator.eumetsat.int/product/EO:EUM:CM:MSG:AOD_SEVIRI_V001?query=&filter=satellite_MSG&filter=instrument_SEVIRI&filter=themes_Aerosol&results=11&s=extended
- GEWEX Cloud Assessment. (2022). *Assessment of global cloud datasets from satellites*. <https://climserv.ipsl.polytechnique.fr/gewexca/>
- GRUMETS. (2022). *SatCat: Servidor d'imatges de Satèl·lit de Catalunya*. <https://www.opengis.grumets.cat/wms/satcat/>
- Meirink, J.F.; Roebeling, R.A.; Stammes, P. (2013). "Inter-calibration of polar imager solar channels using SEVIRI". *Atmos. Meas. Tech.*, 6(9), pp. 2495-2508. Doi: 10.5194/amt-6-2495-2013
- MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (2022a). *MODIS Aerosol Product*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod04.php>
- MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. (2022b). *MODIS Cloud Product*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod06.php>
- Pons, X. (1996). "Estimación de la Radiación Solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica". *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Juaristi, J. i Moro, I. (eds.) Vitoria-Gasteiz. https://ddd.uab.cat/pub/poncom/1996/200247/Pons_1996_Estimacion_de_la_radiacion_solar_a_partir_de_modelos_digitales_de_elevaciones_Propuesta_metodologica_OCR.pdf
- Pons, X.; Ninyerola, M. (2008). "Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data". *Int. Journ. Climato.*, 28, pp. 1821-1834. Doi: 10.1002/joc.1676
- Ruiz-Arias, J.A.; Pozo-Vázquez, D.; Santos-Alamillos, F.J.; Lara-Fanego, V.; Tovar-Pescador, J. (2011). "A topographic geostatistical approach for mapping monthly mean values of daily global solar radiation: A case study in southern Spain". *Agr. For. Met., Elsev.*, 151(2011), pp. 1812-1822. Doi: 10.1016/j.agrformet.2011.07.021
- Stengel, M.; Kniffka, A.; Meirink, J.F.; Lockhoff, M.; Tan, J.; Hollmann, R. (2014). "CLAAS: the CM SAF cloud property data set using SEVIRI". *Atmos. Chem. Phys.*, 14(8), pp. 4297-4311. Doi: 10.5194/acp-14-4297-2014
- Zhang, Y.; Li, X.; Bai, Y. (2015). "An integrated approach to estimate shortwave solar radiation on clear-sky days in rugged terrain using MODIS atmospheric products". *Sol. Energ., Elsev.*, 113(2015), pp. 347-357. Doi: 10.1016/j.solener.2014.12.028