

**Adaptación de la silvicultura de *Eucalyptus* sp.
en el norte y el suroeste españoles:
Estimación de parámetros relativos a la irradiación solar**

**Adaptation of the silviculture of *Eucalyptus* sp.
in the north and southwest of Spain:
Estimation of parameters related to solar irradiation**

Corral-Pazos-de-Provens, E.²; Álvarez-González, J.G.³; Basurco, F.¹;
Canuto Amaral, G.¹; Diéguez-Aranda, U.³; Pérez-Cruzado, C.³;
Rapp-Arrarás, Í.²; Rodríguez-Soalleiro, R.⁴; Ruíz-Fernández, F.¹;
Vallejo-Orti, M.⁵; Domingo-Santos, J.M.^{2*}

¹ Ence, Energía y Celulosa S.A.

² Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva.

³ Departamento de Enxeñería y Ciencias Agrarias

⁴ Departamento de Producción Vexetal

⁵ Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones

* Autor de correspondencia: juan.domingo@uhu.es

Resumen

Se analiza la repercusión del cambio climático en el desarrollo de las masas de eucaliptos de interés comercial para adaptar su silvicultura a los cambios que se van produciendo.

Los modelos empíricos de crecimiento y producción, basados habitualmente en curvas de calidad de estación, pierden fiabilidad por la evolución fuera de la normalidad de los parámetros ambientales. Por ello acudimos a modelos fisiológicos o modelos híbridos, adaptables a los cambios. Estos modelos estiman las variaciones productivas y se espera que proporcionen pautas de silvicultura adaptada a la evolución climática de cada sitio, en cuanto a especies escogidas, espaciamiento, turno o fertilización.

Para la parametrización de los modelos se obtienen las variables ambientales y dasométricas de las zonas actuales de plantaciones de especies de *Eucalyptus*. Una variable relevante en los modelos es la irradiación solar, la energía que llega al arbolado, que depende de las condiciones atmosféricas, de la pendiente y orientación del terreno, y de la sombra recibida del relieve circundante. La irradiación es evaluable con herramientas de sistemas de información geográfica sobre un modelo digital del terreno si se conoce la irradiación global horizontal, la transmisividad atmosférica y la proporción (ratio) entre la radiación difusa y la radiación global. Se presenta una metodología para la obtención de estos tres parámetros, utilizando la información del Photovoltaic Geographical Information System y se pone de manifiesto la importancia de su cálculo preciso, observando la sensibilidad del modelo 3PG-Forest Growth Model a las posibles variaciones en la irradiación.

Palabras claves: 3PG, *Eucalyptus globulus*, modelos híbridos, transmisividad, PV-GIS.

Abstract

Our aim is to analyze the impact of climate change on the development of eucalyptus plantations of commercial interest, to adapt their silviculture to the changes that are taking place.

Empirical models of growth and production, usually based on site quality curves, lose reliability due to the non-normal evolution of environmental parameters, which is why we turn to physiological models or hybrid models, adaptable to changes. These models estimate the productive variations of eucalyptus trees and they are also expected to provide silviculture patterns adapted to the climatic evolution of each site, in terms of species chosen, spacing, rotation or fertilization.

For the parameterization of the models we obtain the environmental and forest-based variables of the current plantation areas of *Eucalyptus* species. A relevant variable in the models is solar irradiation, the energy that reaches the trees, which depends on the atmospheric conditions, the slope and aspect of the terrain, and the shadow received from nearby reliefs. Irradiation can be evaluated with GIS tools on a digital terrain model if the horizontal global irradiation, atmospheric transmissivity and the ratio between diffuse irradiation and global irradiation are known. A methodology for obtaining these three parameters is presented, using information from the Photovoltaic Geographical Information System and the interest of precise calculation is stated, observing the sensitivity of the 3PG-Forest Growth model to possible variations in irradiation.

Keywords: 3PG, *Eucalyptus globulus*, hybrid models, transmissivity, PV-GIS.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La producción de madera de eucalipto en la Península Ibérica presenta cifras importantes dentro del sector forestal. Con 525 000 hectáreas en el norte, en las regiones de Galicia, Asturias y Cantabria (MAGRAMA, 2013, 2012; MMAMMR, 2011), y 178 000 hectáreas en el sur, Huelva principalmente (Venegas Troncoso *et al.*, 2018), se obtiene una producción bruta de 7,6 millones de metros cúbicos de madera en rollo (MITECO, 2021), con fijación anual de 8,4 Mt de CO₂, en la biomasa de los eucaliptales (Montero *et al.*, 2005). *Eucalyptus globulus* está extensamente representado en el norte y suroeste, *E. camaldulensis* en el sur y *E. nitens* se ha convertido en otra especie importante en el norte en las últimas décadas. Estas especies presentan diversas amplitudes ecológicas frente a parámetros como sequía, temperaturas o suelos; su desarrollo también se ve condicionado por el conjunto de variables ecológicas, de forma que una evolución desfavorable de estos parámetros debida al cambio global afectará a las producciones de estas plantaciones en un nivel de importancia que es preciso cuantificar.

Las especies de eucaliptos de importancia comercial presentan, en general, una gran resistencia y adaptabilidad (Booth, 2013). *E. globulus* está presente en Europa sobre zonas cuya temperatura media anual se encuentre entre 11.8 y 18.3°C, con precipitaciones anuales entre 400 y más de 1500 mm, y temperaturas del mes más frío entre 5 y 12.2°C (Cerasoli *et al.*, 2016). De los extremos relativos indicados, los que corresponden a las precipitaciones mínimas y a las temperaturas mínimas sí tienen un carácter indicativo del rango ecológico de la especie; no ocurre así para los rangos máximos, dado que, en las ubicaciones evaluadas en Europa, no se dan condiciones del binomio temperatura-precipitación por encima de los rangos superiores indicados (*Figura 1*). En cuanto a la radiación, el límite inferior sí resulta limitante, mientras que el superior tampoco presenta valores más altos en Europa que permitan identificar limitación.

En Portugal, Alegría *et al.* (2020) definen los rangos de estación para *E. globulus* en:

1. Oscilación térmica anual (media de las máximas de agosto menos la media de las mínimas de enero) menor de 26°C.
2. Temperatura media de las mínimas de enero superior a 2°C.
3. Temperatura media de las máximas de agosto inferior a 31°C.
4. Precipitación superior a 600 mm.
5. Altitud inferior a 500 m.

Los mismos autores establecen que las variables más influyentes en la produc-

tividad de la especie son: la variabilidad estacional de la temperatura, la temperatura máxima del mes más cálido, la temperatura media del cuatrimestre más seco y la temperatura media del cuatrimestre más cálido.

En Australia se definieron como parámetros de rango estacional para *E. globulus* una temperatura mínima del mes más frío entre -2.1 y 8.4°C , y un índice de humedad ambiental (MI), tomado del conjunto de variables bioclimáticas (Hutchinson *et al.*, 2009; Kriticos *et al.*, 2012; Xu and Hutchinson, 2011), tal que $\text{MI} = \text{ETR}/\text{ETP}$, que toma valores entre 0.56 y 1.00 (Booth, 2016), siendo ETR la evapotranspiración real y ETP la evapotranspiración potencial. También para Australia, Cao *et al.* (2022) establecieron como variables de mayor peso en la definición del nicho introducido (no natural) de *E. globulus* la temperatura media de las máximas del mes más cálido (rango mayoritario de 17 a 36°C), la temperatura media del cuatrimestre más cálido, la precipitación del mes más lluvioso (rango mayoritario de 40 a 350 mm) y la precipitación del cuatrimestre más lluvioso. Estos autores resaltan también la gran plasticidad de la especie cuando es introducida artificialmente, pues se adapta a un rango ecológico que, sólo en Australia, es 7 veces más extenso que las zonas de ocurrencia natural.

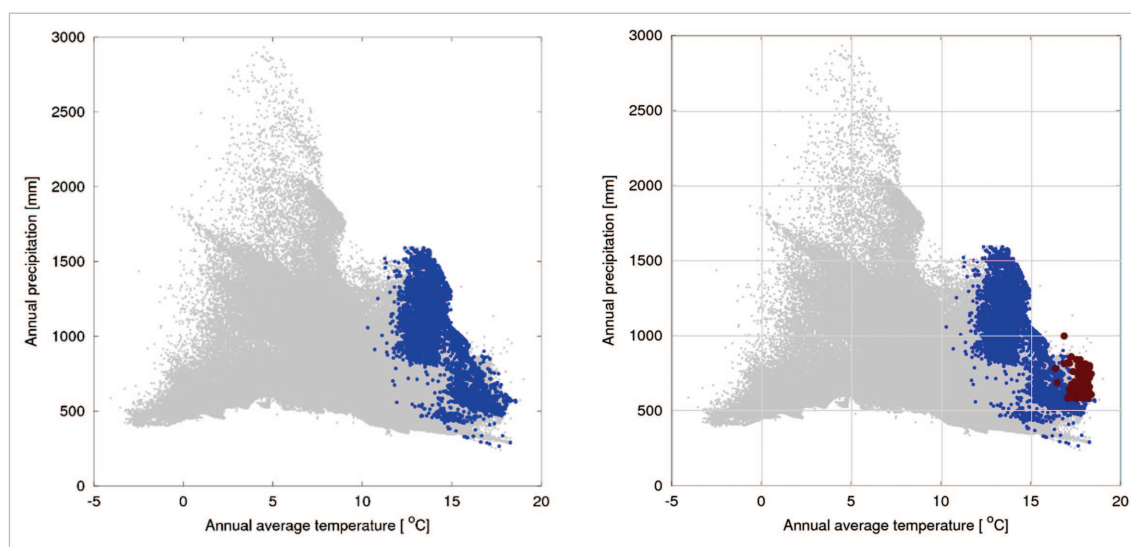


Figura 1. Izqda.: Rango ecológico de temperatura media anual y precipitación acumulada anual media para *Eucalyptus globulus* (puntos azules) en Europa (tomado de Cerasoli *et al.*, 2016). Dcha.: Sobre la misma figura anterior, localización de las parcelas de *E. globulus* del presente trabajo, fuera del rango termopluviométrico que establecieron los autores citados.

Los límites ecológicos de la especie en relación a los rangos térmicos y termopluviométricos no tienen una definición clara, especialmente en relación a las temperaturas máximas pues, como puede verse en la *Figura 1*, el aumento de las temperaturas lleva a la especie hacia estaciones forestales no registradas en Europa hasta el momento actual.

En consecuencia, resulta interesante plantearse el uso de modelos fisiológicos que puedan generar información aproximada a la realidad futura de estos nuevos es-

cenarios forestales. A escala global el modelo planteado por Landsberg and Waring (1997), desarrollado específicamente para *E. globulus* por Sands and Landsberg (2002), denominado 3PG-Forest Growth Model (3PG), es la aproximación de libre acceso más exitosa para la estimación de la producción de biomasa total y sus distintas fracciones (hojas-ramillos, ramas-tronco y raíces) a nivel rodal.

El modelo 3PG parte de las entradas básicas de cualquier sistema productivo, esto es, la energía, la materia, las condiciones ambientales compatibles y la capacidad biológica o tecnológica para desarrollar la producción de una manera eficiente que permita competir y defenderse de las agresiones externas, bióticas o abióticas.

En la *Figura 2* se muestra una simplificación del modelo 3PG, que establece el punto de partida en el suministro energético, en forma de radiación solar de eficacia fotosintética (PAR). La planta, mediante su sistema foliar, debe ser capaz de interceptar esta radiación y transformarla en materia. Sobre el proceso de transformación influyen las condiciones del entorno, la humedad, la temperatura y la disponibilidad de nutrientes, así como el estado de vigor de la planta, la presencia de patógenos y los eventos extremos (heladas, vientos, fuegos, etc.). Todos estos elementos entran en el modelo para proporcionar un resultado de productividad primaria neta en las tres fracciones de biomasa del árbol, la parte leñosa aérea, el sistema foliar (hojas y ramillos) y las raíces.

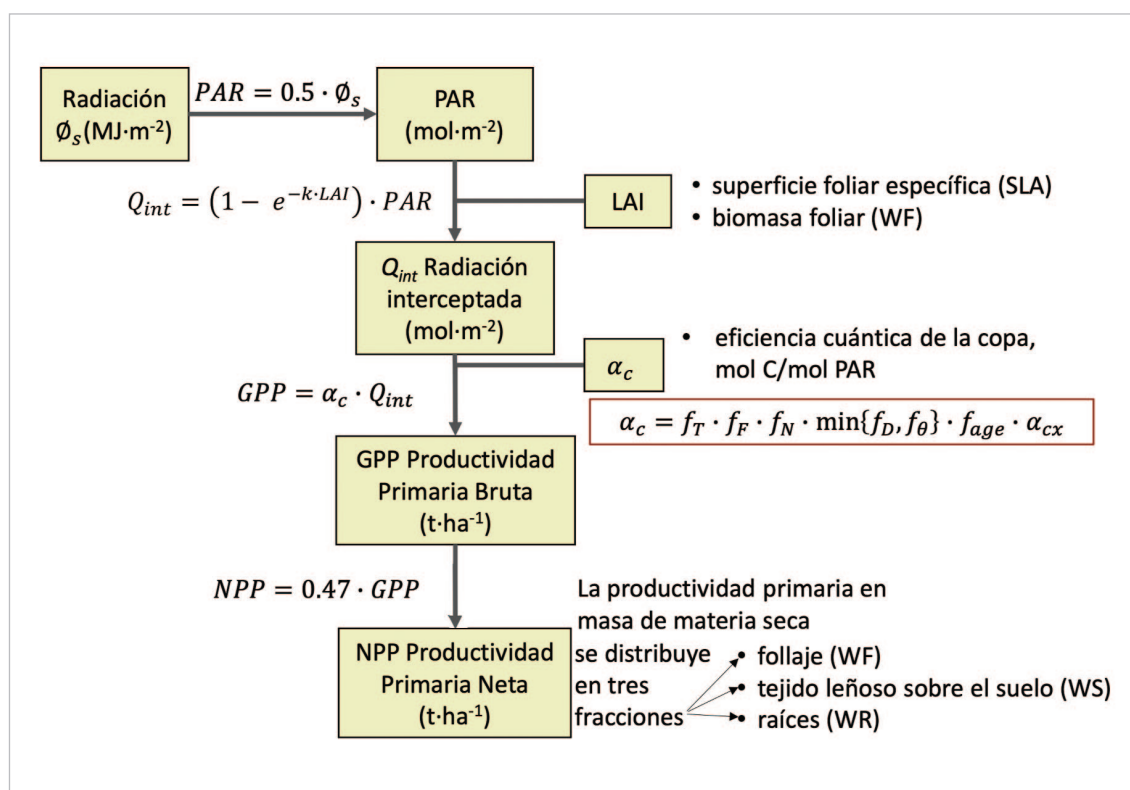


Figura 2. Esquema del proceso de obtención de la productividad de una masa forestal mediante el modelo fisiológico 3PG. PAR, radiación fotosintéticamente activa; f_T : factor de temperatura; f_F : factor días de helada; f_N : fertilidad; f_D : déficit de presión de vapor; f_θ : humedad del suelo; f_{age} : edad.

La evaluación de la irradiación solar es, por lo tanto, una primera condición necesaria para la puesta en marcha del modelo. Si bien se puede intuir que, en general, en la zona sur este factor no va a resultar limitante, en el norte sí es más escasa. En consecuencia, se considera de gran importancia el diseño de una metodología que dé una buena aproximación de la irradiación solar que llega al suelo en función de las condiciones atmosféricas, de la latitud y la altitud, de la orientación y la pendiente, y del sombreado del relieve.

1.2. Objetivo

El objetivo de esta comunicación es realizar una estimación lo más precisa posible de la irradiación solar y una primera evaluación de su incidencia sobre el desarrollo de las plantaciones de eucaliptos.

Este objetivo se enmarca en un proyecto de estudio de la repercusión del cambio climático en el desarrollo o, incluso, la compatibilidad con la presencia de las masas de eucaliptos de interés comercial, de cara a la adopción de prácticas y estrategias silvícolas adaptadas al nuevo paradigma climático que se proyecta. La herramienta de análisis y predicción de estos cambios será la generación de modelos de producción forestal.

2. Metodología

2.1. Planteamiento general

Para la generación de nuevos modelos de producción forestal, o para el calibrado de modelos existentes, se han recogidos datos climáticos, edafológicos, fisiográficos y dasométricos en una red de parcelas distribuidas en las zonas objetivo, que se sitúan en el suroeste, provincia de Huelva principalmente. Las parcelas deben corresponderse con parcelas de inventarios forestales que puedan proporcionar datos dasométricos históricos de buena calidad de dos o más inventarios, a ser posible.

Para la obtención de datos climáticos se recurre a la información disponible en alta resolución en cuadrículas de 1 km de lado o inferiores (Fick and Hijmans, 2017; Karger *et al.*, 2017), así como a información autogenerada o adquirida a partir de los datos de estaciones meteorológicas. Las mismas fuentes de información servirán para la obtención de datos futuros mediante los principales modelos de cambio climático proyectados según los distintos escenarios. Todos los datos obtenidos se gestionan con una base de datos georreferenciada desde donde se obtendrán las tablas de datos para la calibración del modelo fisiológico 3PG.

Los datos disponibles de irradiación solar no pueden ser usados directamente, dada la variación de este parámetro en función del relieve. Se explica a continuación el procedimiento de transformación para trabajar con una irradiación solar más cercana a la realidad.

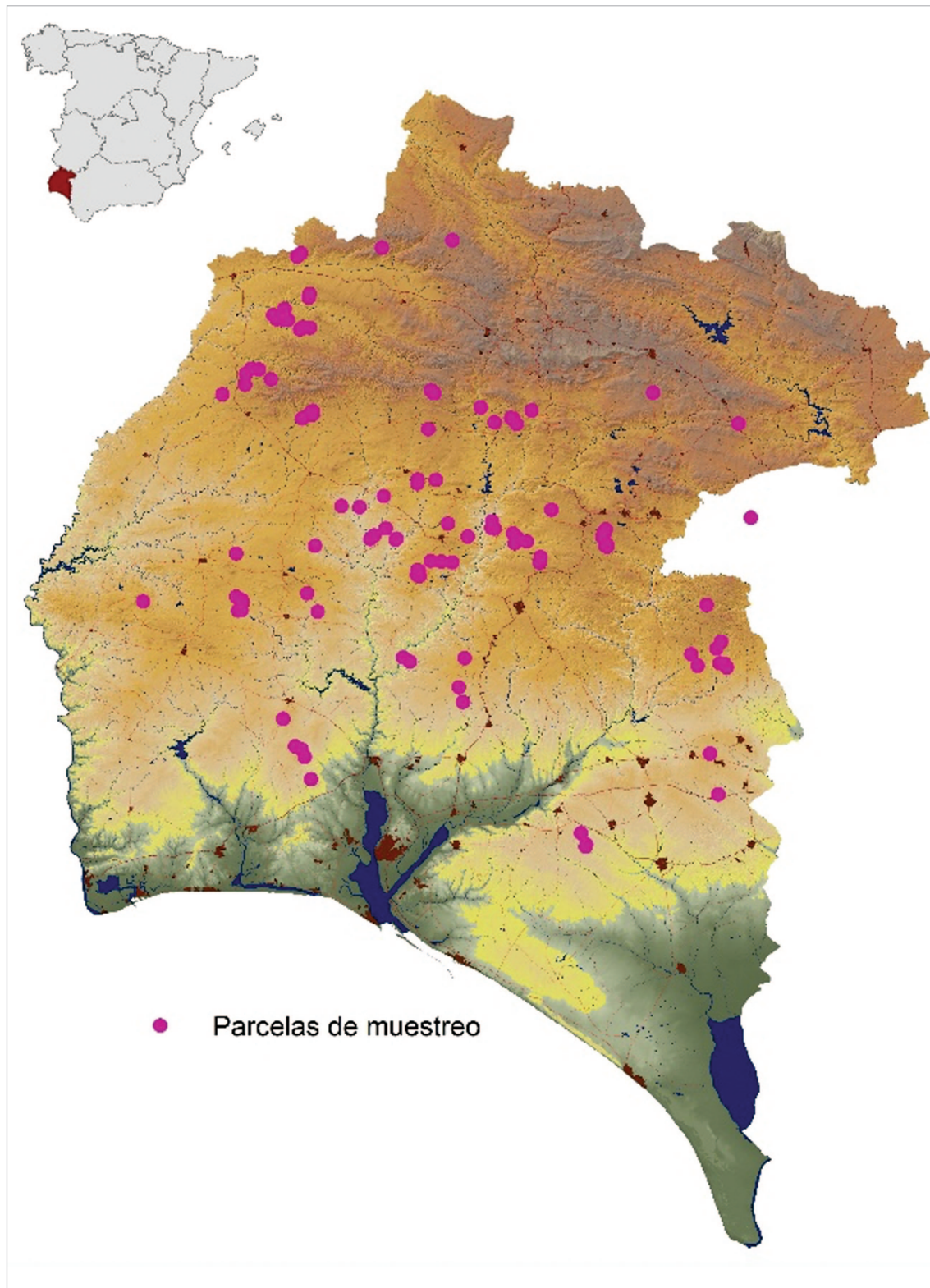


Figura 3. Distribución de las parcelas seleccionadas en la zona Sur para el proyecto “Modelos de estimación del impacto del Cambio Climático en la productividad de las zonas de actuación de Ence en la Península Ibérica”

2.2. Selección de las parcelas de estudio

Los datos ambientales georreferenciados que se utilizan en este trabajo proceden de montes del patrimonio gestionado por Ence (<https://ence.es/>). La información dasométrica está disponible en el Inventario Forestal Continuo (IFC-Ence) que Ence viene realizando en la zona sur, que proporciona, para cada parcela, la información de la masa forestal (densidad, altura dominante, área basimétrica, volumen por hectárea, etc.).

Disponemos inicialmente de información procedente de más de 5000 parcelas del IFC-Ence, con inventarios realizados entre los años 2002 y 2013. Para la realización del trabajo se ha llevado a cabo una depuración previa de datos, por lo que hemos prescindido de aquellas parcelas en las que se ha detectado algún tipo de incongruencia, como, por ejemplo, la falta de coordenadas que permitan su correcta georreferenciación, variación del tipo de especie entre inventarios, etc. Además, para poder utilizar el modelo 3PG se necesitan, al menos, dos inventarios realizados en la misma parcela.

Respecto a la información edáfica, esta procede del desarrollo de varios proyectos y contratos de investigación del Departamento de Ciencias Agroforestales de la Universidad de Huelva, con el patrocinio de Ence. Se han considerado todas las variables físicas y las principales variables químicas del suelo.

Tras este proceso selectivo, disponemos de 110 parcelas con información dasométrica procedente de los inventarios del IFC-Ence y con información edáfica. Estas parcelas se distribuyen por toda la provincia, tal y como se puede ver en la *Figura 3*.

La información disponible en los inventarios de estas 110 parcelas incluye datos sobre el número de pies por hectárea, el número de marras, el volumen por hectárea, el área basimétrica, la altura dominante y el incremento medio anual, entre otros. El número de inventarios disponible en cada parcela es variable, con un máximo de 8 inventarios en 2 de las parcelas y un mínimo de 1 inventario en 16 parcelas.

2.3. Cálculo de la irradiación solar

2.3.1 Datos disponibles

La energía solar que recibe la Tierra procedente del Sol, la irradiación solar, es una variable fundamental de entrada en el modelo 3PG, así como en otros modelos. Sin embargo, la disponibilidad de estos datos es muy reducida.

En Huelva sólo existen dos estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología con datos de radiación global diaria en plano horizontal, Huelva y El Arenosillo. La primera con datos desde 1996 y la segunda con datos desde 2009. Las parcelas de inventario que utilizamos tienen fechas de plantación desde 1994.

Otras redes de estaciones meteorológicas en Andalucía, tales como la Red de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIF), la Red de Información Agroclimática de la Junta de Andalucía (RIA) o la Red de Estaciones Automáticas y Remotas de Meteorología (CMAOT), también tienen algunas estaciones con datos de radiación,

pero su instalación es reciente, no se distribuyen por todo el territorio y no disponen de información correspondiente a los años de las plantaciones que estudiamos en este proyecto.

Otra posible fuente de información es la aplicación web *Photovoltaic Geographical Information System-PVGIS* (Huld et al., 2012; Joint Research Centre, 2020), una herramienta de la Unión Europea que permite obtener datos de radiación solar en cualquier lugar en la mayor parte del mundo. Es de uso completamente gratuito, sin restricciones de uso de los resultados y sin necesidad de registrarse. Los datos de radiación solar que utiliza se han calculado a partir de imágenes de satélite y han sido corregidos con datos de estaciones meteorológicas. La base de datos de radiación solar que se usa por defecto en Europa es PVGIS-SARAH2, con datos desde 2005 a 2020 y una resolución espacial de 4-5 km.

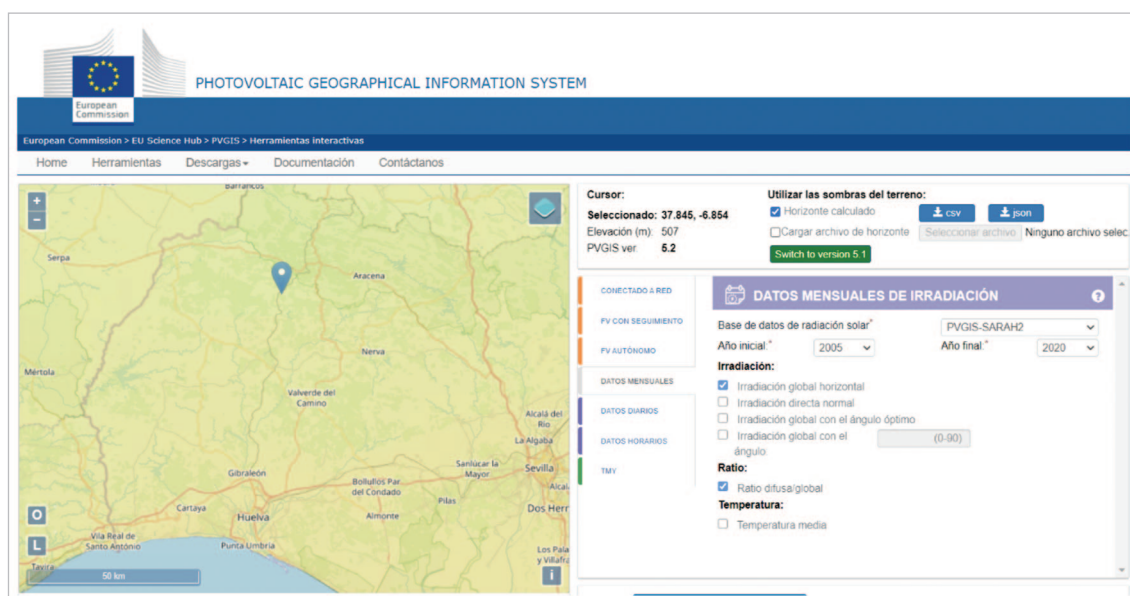


Figura 4. Imagen de la interfaz *Photovoltaic Geographical Information System* (PVGIS) que permite descargar datos de la irradiación global horizontal y la ratio difusa/global.

A través de esta aplicación (*Figura 4*) podemos obtener datos mensuales de irradiación para cualquier localización en Huelva. En concreto, las variables buscadas son:

- Irradiación global horizontal: suma mensual de la energía de radiación solar que incide en un metro cuadrado de plano horizontal, medida suministrada en $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$.
- Ratio difusa/global: fracción de la radiación total que llega al suelo que se debe a la radiación difusa (radiación que llega al suelo que no proviene directamente del sol, sino como resultado de la dispersión del aire, las nubes y la neblina).

La irradiación global horizontal incluirá la radiación directa, la difusa y la radiación reflejada, si bien esta última componente suele tener una importancia menor.

Otra cuestión a resolver es el efecto que la orientación de la ladera en estas localizaciones tiene sobre la cantidad de radiación recibida, sabiendo que los datos de radiación medidos en las estaciones meteorológicas se realizan sobre superficies horizontales. Al efecto de la orientación hay que añadirle también la influencia que las laderas próximas ejercen sobre la energía recibida en la ladera, por efecto de la sombra que puedan proyectar.

Ante la problemática expuesta, hemos decidido utilizar la aplicación PVGIS, que nos permite obtener el valor de la irradiación solar mensual en plano horizontal en cualquier punto de la provincia, así como el valor de la ratio de irradiación difusa respecto de la global (Joint Research Centre, 2020). Para calcular la irradiación global teniendo en cuenta la influencia del relieve se ha utilizado la herramienta de ArcMap *Solar Radiation* (ESRI, 2019), versión actualizada de *Solar Analyst* (Fu and Rich, 2000), según se describe en los próximos apartados.

2.3.2 Obtención de valores teóricos de irradiación global en terreno plano

Se han seleccionado 50 puntos repartidos aleatoriamente por la provincia de Huelva (*Figura 5*) en los que, conocidas sus coordenadas, obtenemos a través de PVGIS, los valores de irradiación global horizontal y la proporción entre la irradiación difusa y la global, valores mensuales desde 2005 hasta 2020.



Figura 5. Localización de los 50 puntos elegidos para obtener la información disponible en la aplicación PVGS.

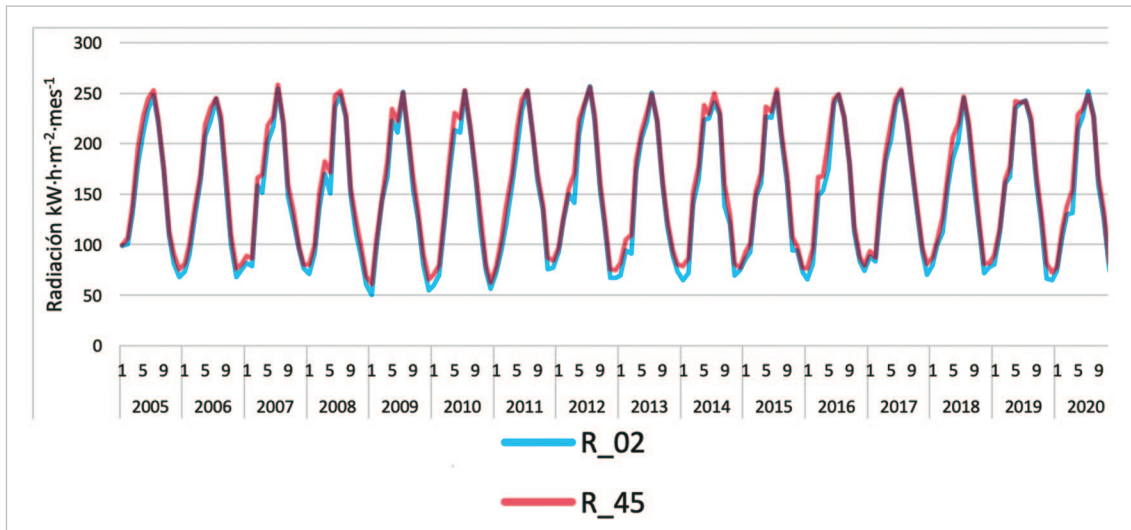


Figura 6. Valores mensuales de la irradiación solar en plano horizontal, en los dos puntos de la provincia de Huelva señalados en la Figura 5, proporcionados por PVGIS.

La *Figura 6* muestra los valores mensuales de la irradiación solar proporcionados por PVGIS en dos puntos destacados en la *Figura 5*. Se puede comprobar cómo el patrón de variación es muy similar cada año, algo que ocurre también para el resto de puntos analizados. Por ello, se ha tomado la decisión de utilizar datos mensuales de irradiación solar promedio en cada uno de los 50 puntos seleccionados, que definirían un año tipo a partir de datos de 15 años.

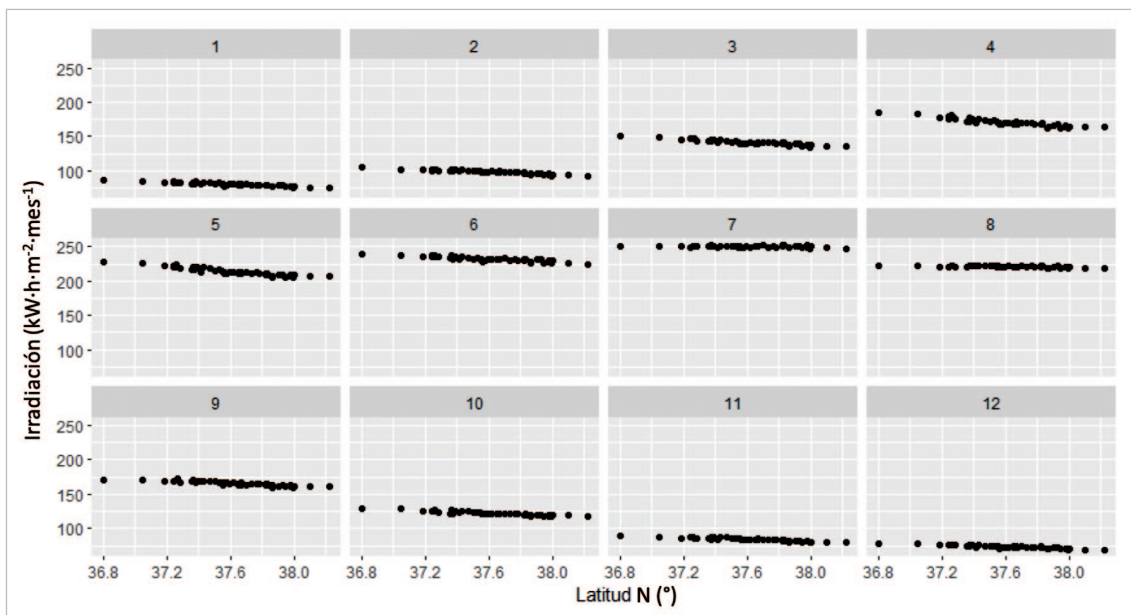


Figura 7. Representación de los valores de la irradiación mensual media en los 50 puntos seleccionados proporcionados por PVGIS (Joint Research Centre, 2020) en función de la latitud.

En la *Figura 7* hemos representado los valores medios mensuales de la irradiación solar proporcionada por PVGIS en los 50 puntos seleccionados. Además de la variación mensual, que alcanza valores máximos en julio y mínimos en diciembre, se puede apreciar también el efecto de la latitud. Lógicamente, al aumentar la latitud los valores de irradiación disminuyen, debido a una mayor inclinación de los rayos solares. El efecto es menos visible en julio, época del año en que los rayos se acercan más a la verticalidad en latitudes bajas y la duración de la exposición solar es mayor en latitudes superiores.

2.3.3 Metodología para el cálculo de la irradiación en las parcelas

La información que proporciona PVGIS es la irradiación global sobre plano horizontal que llega a un punto del territorio. Nuestro objetivo es calcular cómo se modifica esa irradiación por efecto de la topografía. Para este fin conocemos, al menos, dos herramientas: *Solar Radiation*, que funciona sobre la plataforma ArcMap (ESRI, 2019), y *r.sun* (Hofierka *et al.*, 2007), desarrollado para GRASS GIS (GRASS Development Team, 2022).

La herramienta *Solar Radiation* calcula la radiación en una zona específica utilizando los métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica desarrollados por Rich (1990) y Rich *et al.* (1994), y ampliados por Fu and Rich (2002, 2000, 1999). Es una herramienta de gran eficiencia, si bien se le debe suministrar como entrada manual el parámetro denominado transmisividad.

La herramienta *r.sun*, desarrollada por Hofierka and Sári (2002), precisa cargar en una capa raster el coeficiente de turbidez atmosférica de Linke. Este valor se encuentra tabulado para cada mes del año en distintas zonas geográficas y distintos usos del suelo (Hofierka *et al.*, 2007), y tiene una función similar a la de la transmisividad para el cálculo de la irradiación global.

Se ha escogido la herramienta *Solar Radiation* por su manejo simple y mayor precisión. Hofierka and Sári (2002) señalan el inconveniente de que se debe conocer la transmisividad atmosférica, pero este problema queda resuelto en el presente trabajo.

La cantidad de irradiación total calculada por medio de la herramienta *Solar Radiation* se proporciona como irradiación global, suma de la irradiación directa y la irradiación difusa. Es capaz de calcularla para cualquier periodo: instantáneo, diario, mensual, etc. Además del modelo digital de elevaciones (MDE) en su correspondiente proyección geográfica, la herramienta precisa los siguientes datos de entrada:

- *Diffuse proportion* (ratio difusa/global): es la proporción del flujo de radiación normal global que corresponde a la radiación difusa. Los valores varían de 0 a 1, creciendo a medida que aumenta la nubosidad. Se trata de un dato que proporciona directamente PVGIS.
- *Transmittivity* (transmisividad): es la fracción de radiación que pasa a través de la atmósfera (en términos del promedio del conjunto de longitudes de

onda). Sus valores varían de 0, sin transmisión, hasta 1, en el caso de transmisión completa. Este parámetro no viene suministrado directamente por PVGIS, por lo que debe obtenerse.

Para estimar el valor de la transmisividad se ha utilizado la malla de 50 puntos aleatorios, de los cuales tenemos información procedente de PVGIS sobre su localización (coordenadas y altitud), así como los valores mensuales promedio de la irradiación sobre el plano horizontal y la ratio de radiación difusa respecto de la global (K_d). En la *Tabla 1* se puede ver un ejemplo del tipo de datos disponible.

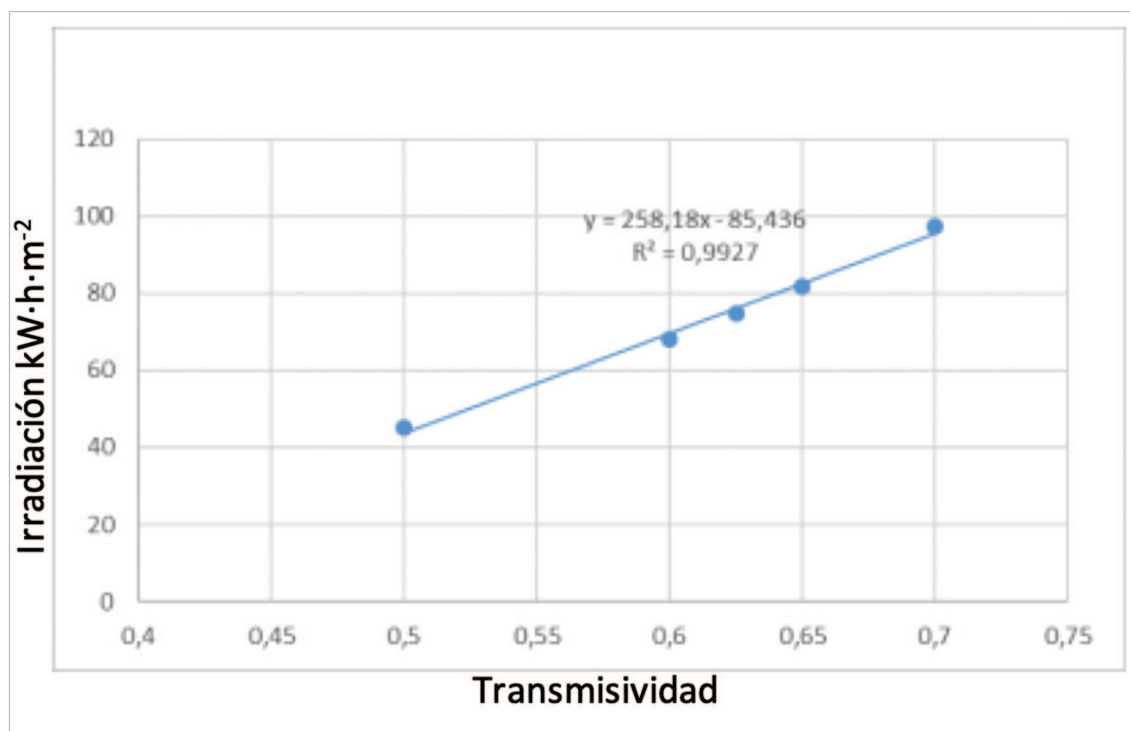
Tabla 1. Ejemplo en el punto R_10 de la información disponible para realizar la estimación de la transmisividad. Conocemos la latitud y longitud de cada punto, su altitud, la irradiación sobre plano horizontal ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mes}^{-1}$) y la ratio difusa/ global (K_d).

Codigo punto	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	month	Irrad ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$)	K_d
R_10	37.767	-6.975	282	Jan	79.54	0.363
				Feb	97.60	0.375
				Mar	140.94	0.384
				Apr	169.73	0.375
				May	212.39	0.337
				Jun	231.71	0.288
				Jul	250.97	0.226
				Aug	222.28	0.241
				Sep	165.56	0.313
				Oct	121.92	0.359
				Nov	83.81	0.39
				Dec	72.68	0.362

Aplicamos a continuación la herramienta de ArcMap *Solar Radiation* en cada punto, para cada mes, utilizando el valor conocido de K_d . Para ello simulamos un modelo digital de elevaciones plano, a la altitud del punto en cuestión, y ejecutamos la herramienta con diferentes valores de la transmisividad, para comprobar el efecto que tiene este parámetro sobre el valor de irradiación que proporciona (*Tabla 2*).

Tabla 2. Ejemplo en el punto R_10 del cálculo, en el mes de enero, de la radiación con la herramienta *Solar Radiation* utilizando diferentes valores de transmisividad.

Cod_rad	K_d	Transmisividad	Irradiación ($\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$)
R_10	0.363	0.500	45.1
R_10	0.363	0.600	67.9
R_10	0.363	0.625	74.6
R_10	0.363	0.650	81.7
R_10	0.363	0.700	97.4



Según podemos comprobar en la *Tabla 2*, en el ejemplo del punto R_10 y para el mes de enero, un valor de transmisividad comprendido entre 0.625 y 0.650 es el que proporcionaría un valor de irradiación de 79.5 kW·h·m⁻², valor procedente de la aplicación PVGIS y que aceptamos como real. Para calcular este valor realizamos una regresión lineal, que proporciona un valor de transmisividad de 0.642.

Repetimos esta operación para todos los meses del año en cada uno de los 50 puntos seleccionados y conseguimos así una estimación de los valores mensuales de transmisividad. En la *Figura 8* (dcha.) podemos ver el resultado de estos cálculos de transmisividad para el mes de enero. En esta figura se ve claramente cómo la transmisividad aumenta a medida que nos desplazamos desde la zona de la sierra hacia la costa, es decir, la radiación que pasa a través de la atmósfera es mayor en la costa que en la sierra. Estos resultados coinciden con la distribución de la ratio de irradiación difusa/global promedio, tal y como se puede ver en la *Figura 8* (izq.), donde se observa cómo este parámetro K_d , obtenido directamente de la aplicación PVGIS, crece desde la costa hacia la sierra, indicador de que la nubosidad, en el mes de enero, es mayor en la sierra que en la costa.

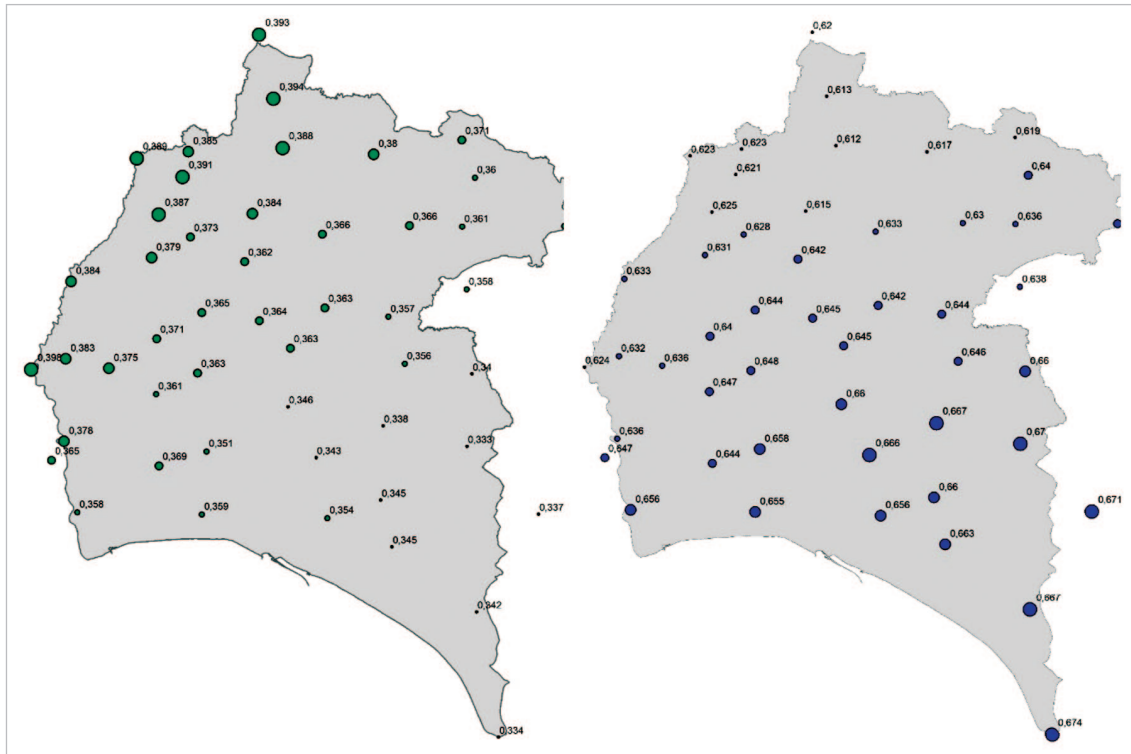


Figura 8. (Izq.): Valores promedio de la ratio irradiación difusa / irradiación global (K_d) del mes de enero en los 50 puntos seleccionados. Se trata de un valor proporcionado por PVGIS. (Dcha.): Valores de la transmisividad en el mes de enero en cada uno de los 50 puntos seleccionados. Valores calculados con la metodología propuesta.

Finalmente, a partir de los datos de estos 50 puntos, mediante una interpolación, se obtiene un mapa *raster* de tamaño de pixel de 500 m, tanto de la ratio mensual promedio de la irradiación difusa respecto de la global (K_d) como de la transmisividad mensual para toda la provincia de Huelva. Estos raster obtenidos también se podrán utilizar en el futuro para calcular la irradiación en cualquier otro punto de la provincia de Huelva. La interpolación se ha realizado mediante ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado (IDW) (Shepard, 1968) por tratarse de un método sencillo y porque no se considera que la distribución espacial de los valores presente anisotropía u otras situaciones que hagan inadecuado su uso según expresaron Walter and Philip (1985).

Una vez conocida la transmisividad y K_d estamos en condiciones de calcular la irradiación mensual en cada parcela, utilizando la misma herramienta de ArcMap *Solar Radiation*. En este caso se utilizará el MDT de cada zona (con tamaño de pixel de 5 m), de manera que se incluya el efecto de la topografía en el cálculo de la irradiación solar.

2.4. Aplicación del modelo 3PG

Para evaluar la incidencia que puede tener la mejora en la estimación de la radiación solar sobre la aplicación de modelos de crecimiento de masas forestales, se ha testado la sensibilidad del modelo 3PG a las variaciones de este parámetro.

Se ha aplicado el modelo a las parcelas de inventario forestal, comparando los resultados entre la radiación medida para una topografía plana y la radiación evaluada para el relieve real, manteniendo constantes el resto de parámetros del modelo.

3. Resultados

3.1. Cálculo de irradiación solar

Como aclaración previa señalaremos que se presentan todos los resultados de radiación solar en las unidades de salida de las aplicaciones utilizadas, esto es, kW·h. Sin embargo, para su utilización en el modelo 3PG, estos valores deberán transformarse al estándar de la magnitud de energía en el Sistema Internacional, que sería el Julio (J) o, en función del orden de magnitud, el MJ ($1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$).

En la *Figura 9* se muestran los valores promedio mensuales de la ratio irradiación difusa respecto de la irradiación global (K_d) obtenidos para toda la provincia de Huelva, resultado de la interpolación a partir de los datos puntuales obtenidos con la aplicación PVGIS. Los valores máximos de K_d ocurren en noviembre, disminuyendo progresivamente hasta alcanzar el mínimo en el mes de julio, con otro máximo relativo en marzo. Los valores altos de K_d son indicativos de mayor nubosidad. Para cada mes, los valores de este parámetro son siempre mayores en la sierra que

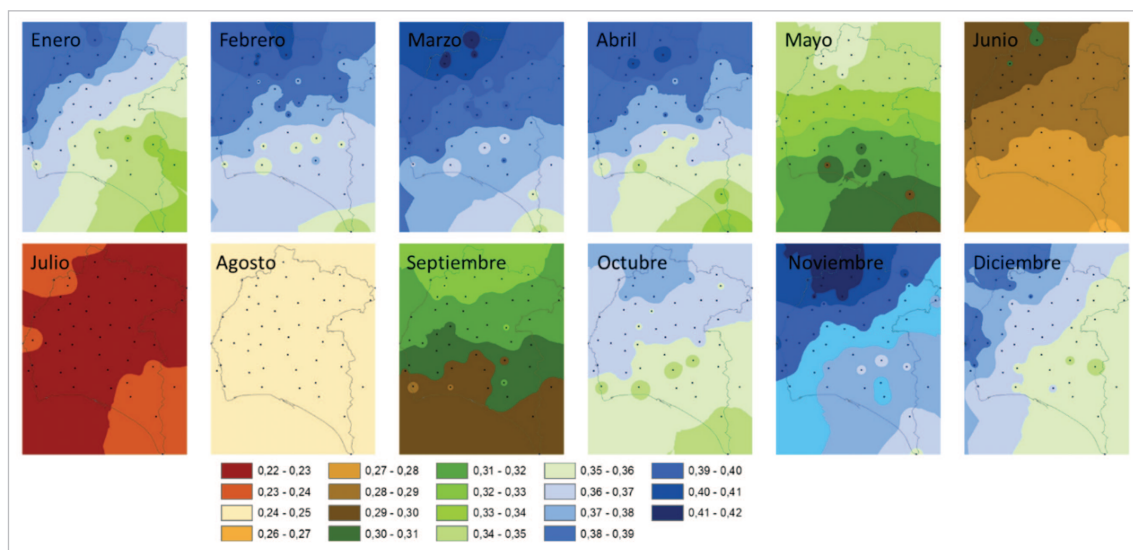


Figura 9. Valores promedio mensuales de la ratio irradiación difusa / irradiación global, (K_d), en la provincia de Huelva. Elaborado a partir de datos de la aplicación PVGIS.

en la costa, excepto en el mes de julio y, sobre todo, en el mes de agosto, con una gran uniformidad en toda la zona.

En la *Figura 10* se representan los valores de transmisividad calculados con la metodología expuesta para toda la provincia de Huelva. Los valores máximos, indicativos de mayor claridad atmosférica, ocurren en julio y agosto, con otro máximo relativo en el mes de diciembre. El periodo en que la transmisión de la radiación es menor corresponde a los meses de marzo, abril y mayo.

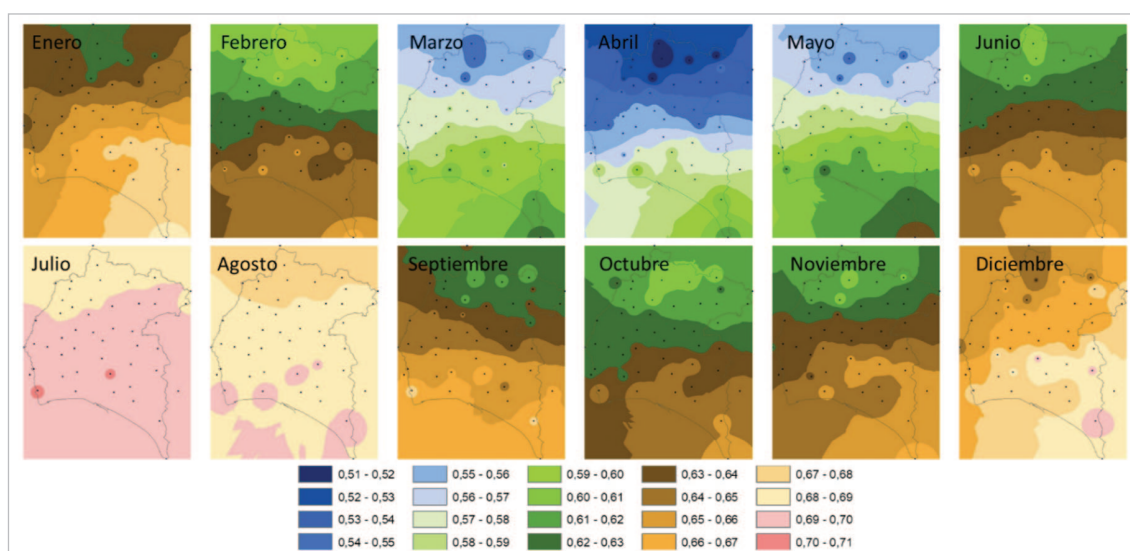


Figura 10. Valores mensuales de la transmisividad estimados para toda la provincia de Huelva. Elaborado utilizando la metodología desarrollada para el presente estudio.

3.2. Estimación de la irradiación global recibida sobre las parcelas experimentales en el suroeste

En la *Figura 11* se puede apreciar la variación de la radiación según la orientación, mes a mes, para el conjunto de las 110 parcelas evaluadas. Queda patente que los mayores contrastes se producen fuera de los meses veraniegos; puede verse que, entre octubre y febrero, la radiación recibida en las orientaciones más favorables puede duplicar a las menos favorables, mientras que, entre abril y agosto, las diferencias relativas en la radiación recibida son mucho menores.

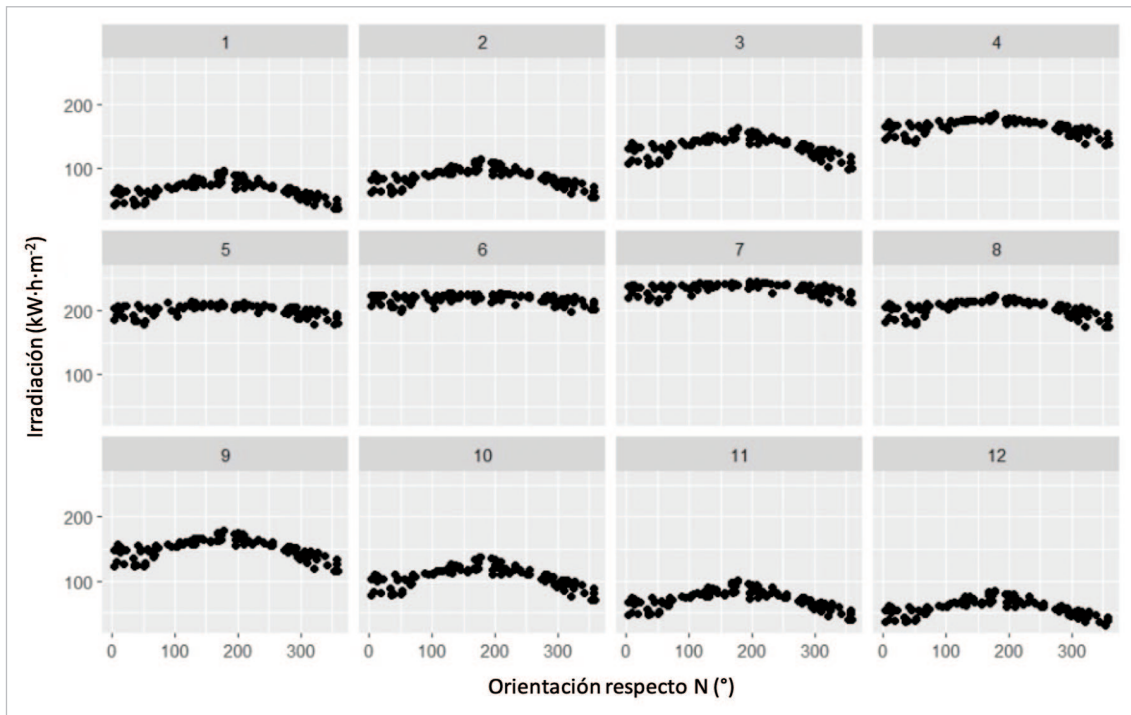


Figura 11. Valores de radiación solar mensual calculados en las 110 parcelas del IFC, en función de la orientación (azimut respecto al norte) de cada parcela.

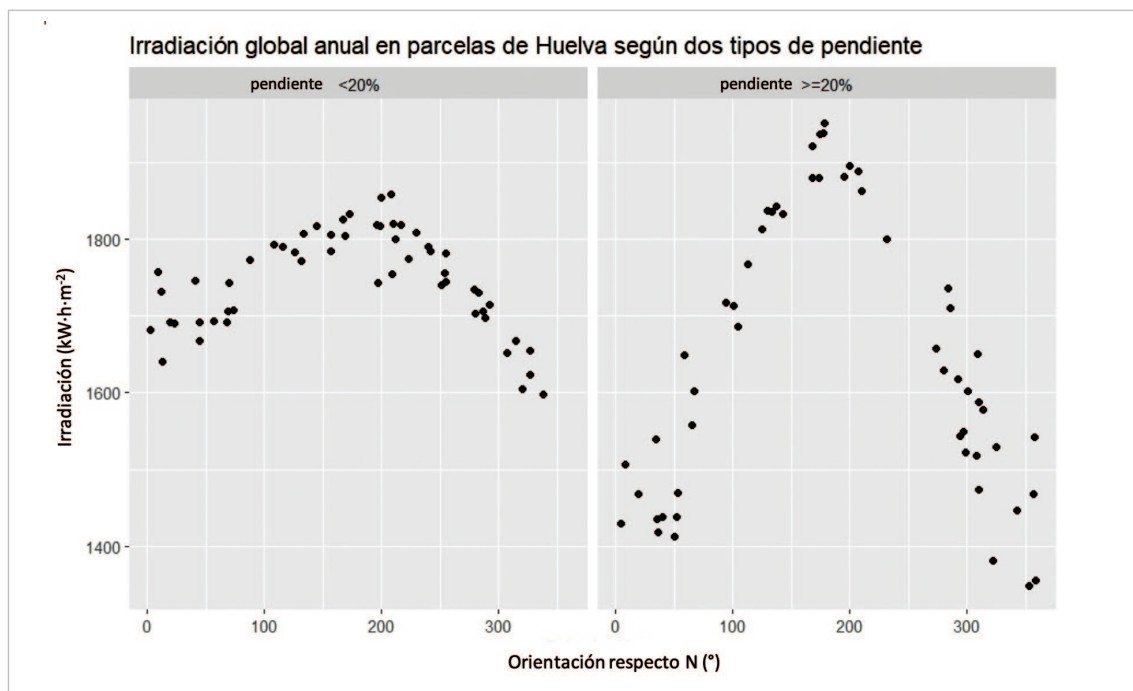


Figura 12. Irradiación anual calculada en función de la orientación (azimut respecto al norte) para las 110 parcelas seleccionadas del IFC-3PG. En el gráfico de la izquierda aparecen las parcelas con una pendiente inferior al 20% (menor influencia de la orientación) y en el gráfico de la derecha las parcelas con una pendiente mayor o igual que 20% (el contraste entre distintas orientaciones es mucho mayor).

En la *Figura 12* se presenta el cómputo anual de la radiación según las distintas orientaciones de las parcelas, separado según dos intervalos de pendiente (mayor o menor del 20%). Puede apreciarse que el efecto de la pendiente potencia notablemente los contrastes entre las orientaciones norte y sur.

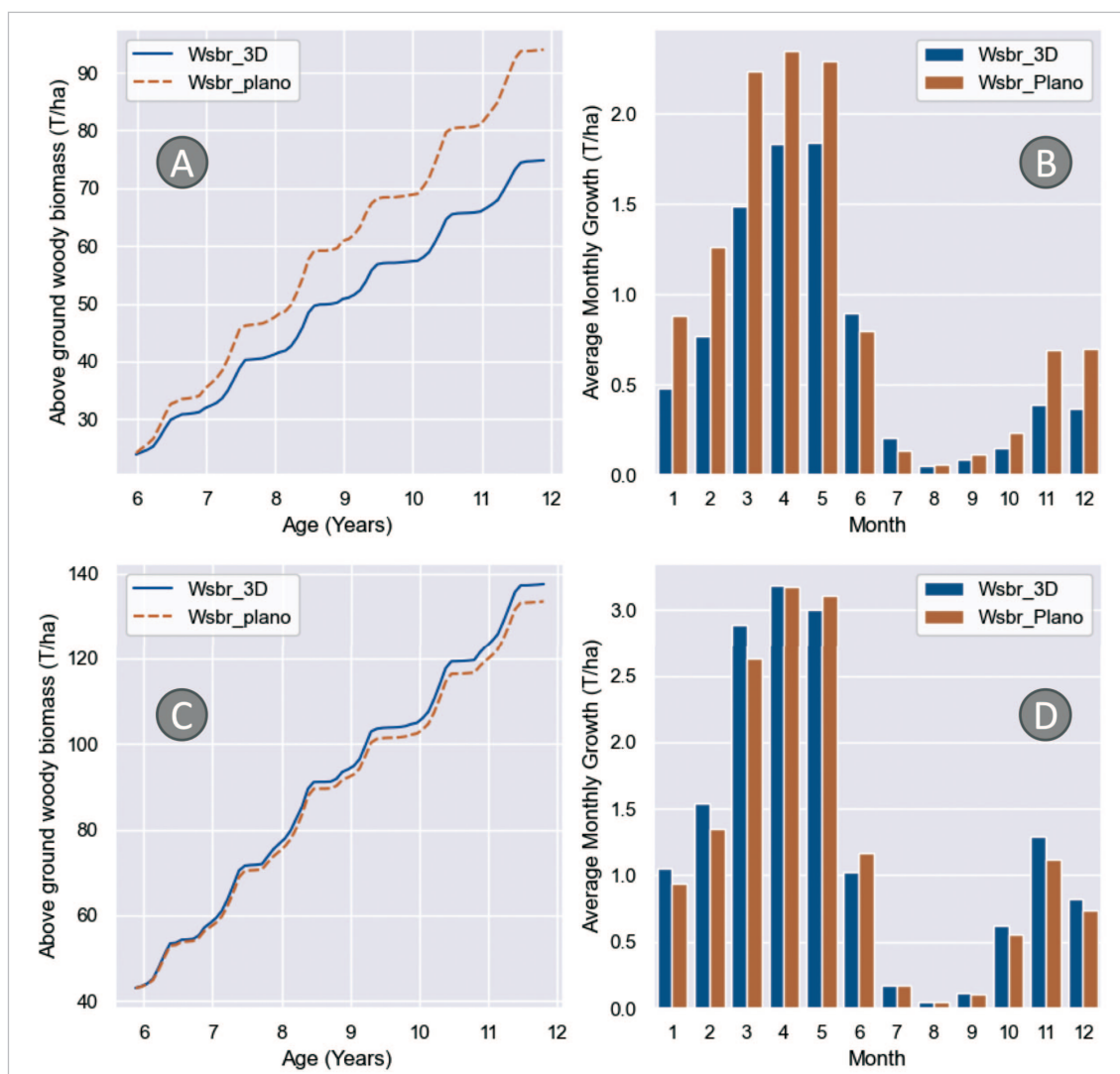


Figura 13. Resultados de la aplicación del modelo 3 PG en dos parcelas. En la primera parcela (A y B) la irradiación real queda reducida a causa del relieve (umbría) y puede apreciarse que la biomasa aérea producida es menor en relación a una irradiación teórica si el terreno fuera plano, salvo en el inicio del verano. En la segunda (C y D) la irradiación real se ve aumentada por el relieve (solana). Aunque las diferencias son menores, sí se aprecia un mayor crecimiento invernal, mientras que en los meses de mayo y junio el relieve plano superaría ligeramente en productividad.

3.3. Influencia de la irradiación global sobre el crecimiento

La aplicación del modelo 3PG muestra una diferencia notable en la producción de biomasa total entre la consideración de la irradiación para topografías planas y para el relieve real de la parcela. Estas diferencias son mayores para los casos en los cuales el relieve ejerce un mayor efecto modificador sobre la radiación recibida.

En la *Figura 13* se muestran dos situaciones de alto contraste. En la primera, el relieve favorece una menor irradiación (umbría) y en la segunda aumenta la irradiación total (solana). Puede apreciarse que la mayor irradiación genera producciones mayores (*Figura 13 C*) y viceversa (*Figura 13 A*), siempre comparando con la situación teórica de relieve plano.

Si evaluamos el crecimiento medio por meses (*Figura 13 B y D*), se aprecia que durante los meses invernales se generan las mayores diferencias de crecimiento. En la parcela de umbría se aprecia un menor crecimiento, pero más sostenido hasta el principio del verano.

4. Discusión

Al resultar escasa la disponibilidad de datos de radiación solar procedentes de estaciones meteorológicas, la plataforma PVGIS proporciona información de radiación global para todo el territorio. Para evaluar la irradiación sobre masas forestales es importante incorporar el efecto del relieve, especialmente en formaciones forestales mediterráneas. Este cálculo se ha hecho utilizando la herramienta *Solar Radiation* (Fu and Rich, 2000), la cual precisa conocer espacio-temporalmente la ratio de radiación difusa respecto de la global, así como la transmisividad de la atmósfera. La ratio mencionada se ha obtenido directamente de PVGIS, pero la transmisividad no viene dada por la plataforma. Utilizando *Solar Radiation* para un MDT totalmente plano se ha hecho un ajuste con distintos valores de transmisividad hasta que la irradiación obtenida coincide con la que proporciona PVGIS en el mismo punto. Esta operación se ha hecho para la irradiación global mensual, por lo que la transmisividad tendrá un carácter de media mensual. Ejecutando esta operación para un conjunto de puntos escogidos aleatoriamente, se ha interpolado un modelo digital de la transmisividad de cada mes para toda la provincia de Huelva.

Una vez conocida la transmisividad se han obtenido los valores mensuales de irradiación global en cada parcela de inventario con la herramienta *Solar Radiation*. Esta operación requiere mejoras de implementación por la configuración de *Solar Radiation*, que no es capaz de leer la variabilidad espacial de la transmisividad. Sería muy conveniente generar un código de programa que lleve a cabo estos cálculos de forma automática, incorporando en cada punto el valor ajustado de la transmisividad.

Como alternativa de software libre para *Solar Radiation*, se podría considerar el uso de *r.sun* para GRASS GIS (Hofierka *et al.*, 2007), si bien presenta la limitación del cálculo del coeficiente de turbidez atmosférica de Linke, cuyo desarrollo actual no presenta la suficiente precisión espacial. La ventaja de la metodología presenta-

da es que el valor de la transmisividad se obtiene de forma distribuida, a partir de mediciones de irradiación realizadas por los satélites.

Estas mejoras en el cálculo de la irradiación se muestran relevantes en su aplicación a modelos de desarrollo de masas forestales, como el modelo fisiológico 3PG. En el trabajo se ha mostrado que el modelo presenta sensibilidad a las diferencias obtenidas en la cuantificación de la irradiación por la consideración del relieve. Esta mejora permite análisis de mayor detalle de los resultados que proporciona 3PG.

Resulta plausible que, en Huelva, donde las temperaturas invernales permiten el crecimiento forestal, haya un mayor crecimiento en las zonas de mayor irradiación en los momentos de mayor disponibilidad hídrica, que coinciden con el final del otoño, el invierno y el principio de la primavera. Así mismo, el modelo muestra que, en zonas de baja irradiación, el crecimiento invernal es menor, pero el periodo de crecimiento se alarga al retardarse el momento de la sequía fisiológica. Sin duda, queda pendiente para el futuro corroborar que los crecimientos de la masa forestal en condiciones reales se corresponden con los resultados del modelo, teniendo siempre en cuenta la complejidad del conjunto de factores ecológicos que interaccionan.

Otra aplicación de esta mejora metodológica puede ser el aumento de la precisión de la distribución potencial de especies, con vistas a la adaptación al cambio climático.

5. Conclusiones

Las zonas forestales suelen presentar relieves pronunciados, por lo que la irradiación global que reciben puede variar notablemente de un punto a otro. La herramienta GIS *Solar Radiation* (Fu and Rich, 2000) para ArcMap (ESRI), permite calcular la irradiación global teniendo en cuenta el conjunto del relieve (pendiente, orientación y sombreado).

La aplicación *Solar Radiation* (Fu and Rich, 2000) precisa que se le suministre la ratio de radiación difusa respecto de la global y la transmisividad atmosférica. Ambos son parámetros clave, pues presentan importantes variaciones espaciales y estas variaciones significan cambios notables en la irradiación solar.

La plataforma web PVGIS proporciona valores de irradiación global y la ratio de radiación difusa respecto de la global. La metodología desarrollada en este trabajo permite calcular la variación espacial de la transmisividad, que no es un dato facilitado por PVGIS.

La combinación del uso de PVGIS y de *Solar Radiation* permite una aproximación al cálculo de la irradiación global; PVGIS posibilita la obtención de forma directa de la ratio de radiación difusa respecto de la global; en el trabajo se desarrolla una metodología para obtener la transmisividad atmosférica que precisa la herramienta de ArcMap.

El procedimiento de cálculo puede ser mejorado mediante una programación que automatice y estandarice el cálculo para grandes superficies.

En el suroeste peninsular se ha apreciado un importante cambio en los resulta-

dos que da el modelo de crecimiento 3PG si se considera el relieve, con respecto a la irradiación medida en plano, por lo cual se considera muy relevante que este cálculo se haga correctamente.

Agradecimientos

Contrato Ence-Universidad de Huelva-Universidad de Santiago de Compostela: “Modelos de estimación del impacto del cambio climático en la productividad de las zonas de actuación de Ence en la Península Ibérica”.

Programa de Recualificación de Profesorado de la Universidad Española, Fondos Next Generation.

6. Bibliografía

- Alegria, C.; Roque, N.; Albuquerque, T.; Gerassis, S.; Fernandez, P.; Ribeiro, M.M.; 2020. Species ecological envelopes under climate change scenarios: A case study for the main two wood-production forest species in Portugal. *Forests* 11. <https://doi.org/10.3390/f11080880>
- Booth, T.H.; 2016. Estimating potential range and hence climatic adaptability in selected tree species. *For. Ecol. Manage.* 366, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.009>
- Booth, T.H.; 2013. Eucalypt plantations and climate change. *For. Ecol. Manage.* 301, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.04.004>
- Cao, R.; Gong, X.; Feng, J.; Yang, R.; 2022. Niche and range dynamics of Tasmanian blue gum (*Eucalyptus globulus* Labill.), a globally cultivated invasive tree. *Ecol. Evol.* 12, 1–11. <https://doi.org/10.1002/ece3.9305>
- Cerasoli, S.; Caldeira, M.; Pereira, J.; Caudullo, G.; de Rigo, D.; 2016. *Eucalyptus globulus* and other eucalypts in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *Eur. Atlas For. Tree Species* 90–91. ESRI, 2019. ArcGIS Desktop.
- Fick, S.E.; Hijmans, R.J.; 2017. WorldClim 2: new 1_km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fu, P.; Rich, P.M.; 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Comput. Electron. Agric.* 37, 25–35. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1)
- Fu, P.; Rich, P.M.; 2000. The Solar Analyst 1 .0 User Manual.
- Fu, P.; Rich, P.M.; 1999. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. *19th Annu. ESRI User Conf.* 1–24.
- GRASS Development Team, 2022. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software, Version 8.2.
- Hofierka, J.; Suri, M.; 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. International GRASS users conference in Trento, Italy, September 2002. *Proc. Open Source Gis - Grass Users Conf.* 11–13.
- Hofierka, J.; Sùri, M.; Huld, T.; 2007. r.sun - Solar irradiance and irradiation model, in: GRASS Development Team, GRASS GIS 8.3.1dev Reference Manual.
- Huld, T.; Müller, R.; Gambardella, A.; 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol. Energy* 86, 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>

- Hutchinson, M.; Xu, T.; Houlder, D.; Nix, H.; McMahon, J.; 2009. ANUCLIM V.6.0 User's Guide. Australian National University, Fenner School of Environment and Society.
- Joint Research Centre, 2020. PVGIS data sources & calculation methods. *Eur. Comm.*
- Karger, D.N.; Conrad, O.; Böhner, J.; Kawohl, T.; Kreft, H.; Soria-Auza, R.W.; Zimmermann, N.E.; Linder, H.P.; Kessler, M.; 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Sci. Data* 4, 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kriticos, D.J.; Webber, B.L.; Leriche, A.; Ota, N.; Macadam, I.; Bathols, J.; Scott, J.K.; 2012. Cli-Mond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods Ecol. Evol.* 3, 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00134.x>
- Landsberg, J.J.; Waring, R.H.; 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95, 209–228. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00026-1)
- MAGRAMA, 2013. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Cantabria. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- MAGRAMA, 2012. Cuarto inventario forestal nacional. Principado de Asturias. Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- MITECO, 2021. Anuario de Estadística Forestal 2019.
- MMAMMR, 2011. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Montero, G., Ruiz-peinado, R., Muñoz, M., 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles, Monografías INIA.
- Rich, P.M., 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sens. Rev.* 5, 13–29. <https://doi.org/10.1080/02757259009532119>
- Rich, P.M.; Dubayah, R.; Hetrick, W.A.; Saving, S.C.; 1994. Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *Am. Soc. Photogramm. Remote Sens. Tech. Pap.* 524–529.
- Sands, P.J.; Landsberg, J.J.; 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *For. Ecol. Manage.* 163, 273–292. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00586-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00586-2)
- Shepard, D.; 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *Proc. 1968 23rd ACM Natl. Conf. ACM 1968* 517–524. <https://doi.org/10.1145/800186.810616>
- Venegas Troncoso, J.; Guzmán Álvarez, J.R.; Seseña Rengel, A.; 2018. Distribución actual de los eucaliptares en andalucía y modelos de crecimiento y producción de biomasa, in: *Actas VIII Congreso Forestal Español*. Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Watson, D.F.; Philip, G.M.; 1985. Comment on “a nonlinear empirical prescription for simultaneously interpolating and smoothing contours over an irregular grid” by F. Duggan. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 50, 195–198. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(85\)90090-8](https://doi.org/10.1016/0045-7825(85)90090-8)
- Xu, T.; Hutchinson, M.; 2011. ANUCLIM version 6.1 user guide. The Australian National University - Fenner School of Environment and Society.

