



VNIVERSITAT  
DE VALÈNCIA

Doctoral Programme in Remote Sensing

**REMOTE SENSING  
AND ECOSYSTEM MODELING  
TO SIMULATE TERRESTRIAL  
CARBON FLUXES**

SERGIO SÁNCHEZ RUIZ

Advised by

M<sup>a</sup> Amparo Gilabert Navarro

Fabio Maselli

September 2018





# VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

María Amparo Gilabert Navarro, doctora en Física i catedràtica de Física Aplicada del Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Universitat de València, i

Fabio Maselli, doctor en Biologia i Dirigente di Ricerca en el Istituto di Biometeorologia, sedi di Firenze, del Consiglio Nazionale delle Ricerche,

## DECLAREN QUE

Dins del Programa de Doctorat en Teledetecció, Sergio Sánchez Ruiz ha realitzat sota la seua direcció la tesi titulada "Simulació de fluxos de carboni terrestres mitjançant teledetecció i modelització d'ecosistemes", que es presenta en aquesta memòria, i

## EMETEN INFORME FAVORABLE

perquè es pugua procedir a realitzar el dipòsit i la defensa de l'esmentada tesi doctoral per optar al grau de Doctor per la Universitat de València.

I perquè així conste i tinga els efectes que corresponga, signem aquest escrit a València el 7 de setembre de 2018.

M<sup>a</sup> Amparo Gilabert Navarro

Fabio Maselli



This thesis was developed in the framework of the project RESET CLIMATE CGL2012-35831 (Remote sensing of terrestrial essential climate variables: Water stress effect on carbon flux assessment) and ESCENARIOS CGL2016-75239-R (Monitoring carbon fluxes in forest ecosystems and simulation for climate change scenarios), both from the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness (MINECO), and co-financed by FEDER funds. The author was granted with the support of the *Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación* 2013-2016 (pre-doctoral scholarship BES-2013-064548).

According to the Doctorate Regulation of the University of Valencia\*, as a requirement of the Ph.D. International Mention, Catalan and English languages were used. In particular, Chapters from 1 to 7 and appendices A and B are written in Catalan, while the Summary, Conclusions and appendix C (containing publications) are written in English.

In the present report, the symbols and units rules to the conventions established by the National Institute of Standards and Technology (NIST) and the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) were adapted. Hence, they can differ from the standard usage in carbon flux studies (for example, the daily carbon fluxes are given in  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , and not in  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Similarly, the annual fluxes are given in  $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ .

The research was carried out at the Environmental Research Group of the University of Valencia, UV-ERS (GIUV2013-059).

Aquesta tesi s'ha realitzat en el marc de dos projectes del Ministeri de Economia, Indústria i Competitivitat: RESET CLIMATE CGL2012-35831 (*Teledetección de variables climáticas esenciales: Efectos del estrés hídrico en la estimación de flujos de carbono*), i ESCENARIOS CGL2016-75239-R (*Evaluación de los flujos de carbono en ecosistemas forestales y simulación para escenarios de cambio climático*). L'últim cofinançat per fons FEDER de la UE. L'autor ha sigut personal investigador en formació amb el contracte BES-2013-064548, dins del Subprograma Estatal de Formació finançat pel *Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación* 2013-2016.

D'acord amb la normativa que regula els estudis de doctorat en la Universitat de València\*, com a requisit del doctorat amb Menció Internacional, tant l'idioma valencià com l'anglès s'han utilitzat en la redacció d'aquesta memòria. En particular, els capítols 1-7 i els apèndixs A i B s'han redactat en valencià, mentre que el Resum, les Conclusions i l'apèndix C s'han redactat en anglès.

El text s'ha redactat seguint la normativa establerta per organismes internacionals com el NIST i la IUPAC. Per aquesta raó es pot trobar alguna discrepància amb relació a la literatura comú del tema (per exemple, els fluxos de carboni diaris s'expressen en  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , i no en  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ; de la mateixa forma, els fluxos de carboni anuals s'expressen en  $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ).

L'estudi s'ha desenvolupat en el grup de recerca Teledetecció Ambiental, UV-ERS (GIUV2013-059), en el Departament de Física de la Terra i Termodinàmica de la Facultat de Física de la Universitat de València.

---

\* Reglament sobre depòsit, avaluació i defensa de tesi doctoral. (Modificat CG 28-VI-2016, Vigent el 29 de juny de 2016. Modificat CG 31-X-2017)



---

# Agraïments

---

Actualment una tesi doctoral és un projecte personal ambiciós, però també un treball d'equip. Per això vull començar agraint l'ajuda prestada per totes les persones que hi han participat. A les dues persones que han dirigit aquesta tesi: Amparo i Fabio. Per tot el temps i l'esforç dedicats, els coneixements aportats, el patiment suportat, la paciència, el bon tracte i les facilitats donades.

Per extensió als grups de recerca que dirigeixen. A tota la gent que ha passat per l'UV-ERS durant aquests anys: Javi que em va comunicar la convocatòria de la beca d'Amparo, gràcies a la qual he treballat en aquest projecte; Álvaro que va actuar com un director més durant els primers anys; Bea amb qui he compartit línia de recerca, esmorzars, passejos, dinars... m'he entès de meravella i de qui he après molt; Manu amb qui vaig començar aquesta aventura i em va avançar per la dreta sense compassió, un gran exemple per a mi que no he sigut capaç de seguir; Gonçal a qui fregia a preguntes durant els esmorzars i els passejos; Manolo amb el seu entusiasme. A tota la gent de l'IBIMET per la seua gran acollida a Florència i per haver-me aguantat un total de deu mesos. Sobretot a Marta, amb qui vaig estar treballant diàriament, i a Luca per la seua ajuda amb el codi del Biome-BGC i la seua paciència. No em puc oblidar d'Arnaud, qui em va cedir les dades necessàries per a validar tot a quest treball.

També me'n recorde de moltes altres persones a nivell personal. Ma mare i mon pare, Maribel i Ramiro, per la seua preocupació diària i el seus ànims constants. Edgar que, a més de les seues infinites amista i confiança, fins i tot ha contribuït solucionant problemes informàtics; la resta de Kiwy (Bob,

Sahera i Catas) amb els nostres pseudo assajos plens de rialles i el coscosbol; Ximo i Artu que ens veiem cada mil i com si res encara que parega poc; Silvia amb les nostres infinites i alleujadores xarrades fins a l'alba; Xavi, Sandra, Víctor, Adri... La gent de la carrera: Mauro, Rafa, Sergi, Johnny, Mar, Lluís... part de la qual també ha passat per açò. Les amistats que he fet al departament: Drazen, Carolina, Níobe... Enric i la gent del GTT amb qui em vaig iniciar en la investigació. La gent del GROC-UJI amb qui vaig publicar el meu primer article (Álex, Lluís, Jesús...), la gent d'HIDRUS i del CIALE (Ángela, Nilda, Pepe, Patri...). La gent que vaig conèixer a l'Artemio Franchi, especialment a Filippo, que va actuar com un perfecte amfitrió des del primer dia i amb qui mantinc una gran amistat. Miguel i Cintia per la fàcil i agradable convivència.

*Sergio Sánchez Ruiz*

*Setembre 2018*



---

# Continguts

---

<b>Summary</b>	<b>i</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>1</b>
<b>2 Fonaments teòrics</b>	<b>7</b>
2.1 Fotosíntesi i respiració	8
2.2 Càlcul de fluxos de carboni a partir de dades EO	13
2.2.1 Model de Monteith	14
2.2.2 Biome-BGC	17
2.3 Càlcul de fluxos de carboni <i>in situ</i>	24
<b>3 Àrea d'estudi i dades emprades</b>	<b>27</b>
3.1 Descripció de l'àrea d'estudi	28
3.1.1 Espanya peninsular	28
3.1.2 Llocs de validació	30
<i>ES-CPa</i>	31
<i>ES-ES1</i>	31
<i>ES-LMa</i>	31
<i>ES-VDA</i>	31
3.2 Descripció de les dades	32
3.2.1 Dades puntuals	32
<i>Dades meteorològiques</i>	32
<i>Dades de torres EC</i>	32
<i>Dades de l'IFN3</i>	33

3.2.2 Dades distribuïdes espacialment	33
<i>Productes MODIS</i>	33
<i>Productes SEVIRI/MSG</i>	35
<i>Productes MIRAS/SMOS</i>	36
<i>Productes Landsat</i>	36
<i>Altres</i>	37
<b>4 Implementació de l'efecte de l'estrés hídric en el model de Monteith</b>	<b>41</b>
4.1 Caracterització de l'estrès hídric en el PEM: descripció dels escalars	42
4.2 Metodologia	44
4.3 Resultats	46
4.3.1 Avaluació de l'eficiència en l'ús de la radiació	46
4.3.2 Avaluació de la GPP	50
4.3.3 Generació d'imatges de GPP	53
4.4 Discussió	58
4.4.1 Avaluació de l'eficiència en l'ús de la radiació	58
4.4.2 Avaluació de la GPP	59
4.4.3 Generació d'imatges de GPP	60
4.5 Conclusions	61
<b>5 Model semi-empíric per al càlcul de la GPP anual mitjançant índexs de vegetació</b>	<b>63</b>
5.1 Model semi-empíric	64
5.2 Metodologia	67
5.3 Resultats	69
5.3.1 Comprovació de la hipòtesi H3	70
5.3.2 CAL/VAL del model	74
5.3.3 Obtenció de la GPP anual	81
5.4 Discussió	81
5.5 Conclusions	84
<b>6 Calibratge del Biome-BGC</b>	<b>85</b>
6.1 Aspectes rellevants del Biome-BGC	86
6.1.1 Conductància estomàtica	86
6.1.2 Profunditat radicular	90
6.2 Metodologia	92
6.2.1 Escala local	92
6.2.2 Escala regional	93
6.3 Resultats	93
6.3.1 Escala local	93
6.3.2 Escala regional	97
6.4 Discussió	101
6.5 Conclusions	103

---

<b>7 Cap a l'estimació de fluxos nets</b>	<b>105</b>
7.1 Fonaments teòrics	106
7.1.1 Desenvolupament i tendència a l'equilibri dels ecosistemes	106
7.1.2 GSV a partir d'imatges Landsat	107
7.2 Metodologia	109
7.2.1 Generació del mapa de GSV	109
<i>Càlcul de predictors</i>	109
<i>Selecció de predictors</i>	112
<i>Obtenció del mapa</i>	113
7.2.2 Càlcul de fluxos nets	114
<i>Càlcul de l'NPP i NEP</i>	114
<i>Càlcul del CAI</i>	116
7.3 Resultats	117
7.3.1 Mapa de GSV	117
<i>Selecció de predictors</i>	117
<i>Generació del mapa</i>	119
7.3.2 Fluxos nets: resultats preliminars	122
<i>NEP als llocs de validació</i>	122
<i>Validació indirecta de l'NPP<sub>A</sub> per comparació amb el CAI</i>	123
7.4 Discussió	124
7.4.1 Mapa de GSV	124
7.4.2 Fluxos nets	126
7.5 Conclusions	128
<b>Referències</b>	<b>135</b>
<b>Apèndix A</b>	<b>151</b>
<b>Apèndix B</b>	<b>157</b>
<b>Apèndix C</b>	<b>159</b>



---

# Summary

---

In last few decades, the possibility of anthropogenic modifications of the Earth's climate, commonly known as climate change or global warming, has become almost a reality, as shown by the reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, <http://www.ipcc.ch>). The underlying physical mechanism, often referred to as the greenhouse effect<sup>1</sup>, is a natural phenomenon and arises because certain gases in the Earth's atmosphere absorb part of the outgoing terrestrial long-wave radiation and, in turn, radiate in all directions including back to the surface (Salby, 2012). The net effect is that the Earth's surface receives more radiation than would be the case in the absence of a non-absorbing atmosphere and, to maintain thermal balance, the surface temperature is significantly higher (about 33 °C) than it would be if heated only by solar radiation. The carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and the water vapor are the most important drivers of this atmospheric process. Both are minor constituents of the atmosphere. At the global scale, our role in this process is mainly related to the CO<sub>2</sub> atmospheric concentration: our consumption of fossil fuels has increased its levels (from the pre-industrial 280 ppm up to more than 400 ppm) and possibly changed the way it is distributed in vegetation, soils, and atmosphere, with the aforementioned implication on global climate.

---

<sup>1</sup> The term "greenhouse effect" is misleading (Bohren *et al.*, 2007; Fleagle & Businger, 1980; Marshall & Plumb, 2008) because an actual greenhouse keeps warm mainly due to suppression of the heat change by convection because of the glass panes. Although some authors (Fleagle & Businger, 1980) proposed to denote it as "atmospheric effect", the term "greenhouse effect" has become too familiar, in particular in the popular literature, to be changed now.

---

Carbon flows between the atmosphere, land, and ocean in a cycle that encompasses nearly all life and sets the thermostat for Earth's climate. Plants in general, and forests in particular, play a crucial role in the carbon cycle<sup>2</sup>. It can be considered (Waring & Running, 2007) that carbon begins its cycle through forest ecosystems when plants assimilate atmospheric CO<sub>2</sub> through photosynthesis into reduced sugars. The flux of carbon that is fixed by photosynthesis is called gross primary production (GPP). Part of it is released back into atmosphere by means of the plant autotrophic respiration ( $R_a$ ), for the synthesis and maintenance of living cells, and by the heterotrophic respiration ( $R_{het}$ ) from soil organisms other than plants. The net primary production (NPP) equals to  $GPP - R_a$ , whereas the net ecosystem production (NEP), also known as net ecosystem exchange (NEE), accounts for  $R_{het}$  too ( $NPP - R_{het}$ ). In this thesis, the GPP is considered as positive (a gain to the system) and the respiration fluxes as negative (a loss to the system): the ecosystem may lose carbon if photosynthesis is suddenly reduced or when organic materials are removed as a result of disturbances.

The main goal of this thesis is the establishment of a framework to analyze the forest ecosystems in terms of their role in the carbon cycle. In particular, the carbon fluxes that they exchange with atmosphere are modeled to evaluate their potential as carbon sinks and biomass reservoirs. Forests currently cover about 40 % of Earth's ice-free land surface (Waring & Running, 2007), and around the 50 % of the peninsular Spain territory, which constitutes the study area. The assessment of the aforementioned carbon fluxes is performed using two different ecosystem model types driven by a combination of satellite and ground data, part of the latter being also employed as a complementary data source and in the validation process. Considering the peculiarities of the study area, *i.e.*, the diversity of the vegetation type dynamics and its spatial heterogeneity, the algorithm was developed to run the models on a daily basis and 1 km × 1 km spatial resolution (to assure that the spatial resolution of the remotely sensed carbon flux estimates is comparable to the footprint of ground flux estimates in the validation process). Thus, the inputs of the models were retrieved at these temporal and spatial resolutions.

The first model used in the study is a production efficiency model (PEM) relying on the well-known Monteith approach (Monteith, 1972), which considers GPP –the daily GPP in this case– as proportional to the absorbed amount of photosynthetically active radiation through a conversion efficiency factor  $\epsilon$  (also known as light-use efficiency factor). Then, GPP is the product of the incident photosynthetically active radiation (PAR), the fraction of this flux absorbed by vegetation ( $f_{APAR}$ ), and  $\epsilon$ . In previous studies within our research group (Moreno, 2014; Gilabert *et al.*, 2015), the three terms in Monteith's equation were

---

<sup>2</sup> It is worth to note also the role of ocean in the carbon cycle: CO<sub>2</sub> dissolves readily in seawater; its saturation-mixing ratio increases with decreasing temperature. More CO<sub>2</sub> can therefore be absorbed into solution with cold water than with warm water (Salby, 2012). On the other hand, phytoplankton also fixes carbon by means of photosynthesis.

obtained following procedures optimized for the study area, peninsular Spain. The «optimized model» was driven by meteorological and satellite data (MODIS/TERRA and SEVIRI/MSG).

In the present study, the emphasis is put in  $\varepsilon$ . It is usually modeled as the product of a maximum value  $\varepsilon_{\max}$  depending on the vegetation type and another term, which can be factorized in contributions that account for the reduction in efficiency due to different types of stress. In particular, the inter-annual variations of  $\varepsilon$  in Mediterranean ecosystems are significantly influenced by the water stress. A deep insight is carried out to evaluate the possibility of quantifying the dependence of this input on water stress using operational remotely sensed products exclusively. This constitutes the objective 1 (O1).

Therefore, the capacity of six water stress factors ( $\varepsilon'_i$ ) to track daily light-use efficiency ( $\varepsilon$ ) of water-limited ecosystems is evaluated. These factors are computed with remote sensing operational products and a limited amount of ground data:  $\varepsilon'_1$  uses ground precipitation and air temperature, and satellite incoming global solar radiation;  $\varepsilon'_2$  uses ground air temperature, and satellite actual evapotranspiration and incoming global solar radiation (DMET product from SEVIRI);  $\varepsilon'_3$  uses satellite actual and potential evapotranspiration (MOD16A2 product from MODIS);  $\varepsilon'_4$  uses satellite soil moisture (L4SMv3 product from SMOS);  $\varepsilon'_5$  uses satellite-derived photochemical reflectance index (calculated from MODIS MODCOGA product); and  $\varepsilon'_6$  uses ground vapor pressure deficit. These factors are implemented in the PEM in order to assess their performance for modeling daily GPP. Estimated GPP is compared to reference GPP from eddy covariance (EC) measurements ( $GPP_{EC}$ ) in four sites placed in the study area (named ES-CPa, ES-ES1, ES-LMa and ES-VDA according to Fluxnet, <http://fluxnet.fluxdata.org/>). These sites correspond to an open shrubland, a pine forest, a savanna and a high altitude meadow, respectively.  $\varepsilon'_i$  are correlated to  $\varepsilon$ , which was calculated by dividing  $GPP_{EC}$  by ground measured PAR and satellite-derived  $f_{APAR}$ . Best results are achieved by  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$ ,  $\varepsilon'_3$  and  $\varepsilon'_4$ , which explain up to 40 % and 60 % of  $\varepsilon$  variance in open shrublands and savanna, respectively. In terms of GPP,  $R^2 \approx 0.70$  is obtained in these cases. Although the best results are shown by  $\varepsilon'_1$ , the study concludes that both  $\varepsilon'_3$  and  $\varepsilon'_4$  are robust options to estimate daily GPP using exclusively satellite data. Nevertheless,  $\varepsilon'_1$  has been used to obtain a time series of daily GPP images from 2005 to 2012 over the whole study area and used as the reference GPP in the following chapters since input data were available. The other two inputs of the PEM ( $f_{APAR}$  and PAR) were obtained following the procedures adopted by the UV-ERS research group in the frame of previous projects (Moreno, 2014; Gilabert *et al.*, 2015).

---

Part of the research concerning the water stress characterization (O1) was published in paper below:

- P1. Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., Gilabert, M.A., 2017. Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data, *International Journal of Digital Earth*, 10:6, 623–638, doi: 10.1080/17538947.2016.1247301

The analysis of changes in the long-term estimates of the CO<sub>2</sub> terrestrial fluxes between ecosystems and atmosphere is important to establish the global carbon balance, especially in forest ecosystems, the main sinks of atmospheric carbon in the biosphere. However, obtaining long time series of annual GPP from daily GPP values is a time-consuming process that requires a huge number of inputs that might be unavailable, especially in retrospective studies. For this reason, a theoretically sound semi-empirical model, based on a linear relationship between the annual GPP and a PAR-weighted vegetation index (VI), is derived from the Monteith approach (O2). This semi-empirical model can be used to estimate the annual GPP from commonly available VI images and a representative PAR, which does not require actual meteorological data. A cross validation procedure is used to calibrate and validate the model predictions against reference data. As the calibration/validation process depends on the reference GPP product, the higher the quality of the reference GPP, the better the performance of the semi-empirical model. Using the semi-empirical model, the annual GPP has been estimated at 1-km spatial resolution from MODIS NDVI and EVI images for eight years (from 2005 to 2012). On the one hand, MODIS NDVI is included since it is referred as the “continuity index” to the existing 30+ year NOAA-AVHRR derived NDVI time series, which can be extended to provide a longer-term data record required in climatic studies. On the other hand, EVI has been shown to improve NDVI sensitivity in dense vegetation regions and a better performance to minimize soil and atmosphere influences. Two reference data sets have been used to calculate reference annual GPP: the time series of daily GPP from 2005 to 2012 above mentioned for the study area and the MOD17A3 product. Different statistics show a good agreement between the estimated and the reference GPP data, with coefficient of determination around 0.8 and relative RMSE around 20 %. The annual GPP is overestimated in semiarid areas and slightly underestimated in dense forest areas. With the above limitations, the model provides an excellent compromise between simplicity and accuracy for the calculation of long time series of annual GPP.



---

Part of the research concerning the development of the semi-empirical model was published in paper below:

- P2. Gilabert, M.A., Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., 2017. Annual gross primary production from vegetation indices: A theoretically sound approach, *Remote Sensing*, 9, 193, doi: 10.3390/rs9030193

The second modeling approach used in the study is not a PEM but an ecosystem process model or biogeochemical (BGC) model, the Biome-BGC (Running & Hunt, 1993; White *et al.*, 2000). BGC models are considered as an integral tool of ecosystem analysis (Waring & Running, 2007). Ecosystems are too complex to describe by a few equations; current ecosystem models have hundred of equations, which present interaction in non-continuous and non-linear ways. Furthermore, these models provide the organizational basis for both interpreting ecosystem behavior and simulating system behavior under normal conditions by comparing with ground data. In particular, a forest ecosystem includes the living organisms of the forest, and it extends vertically upward into the atmospheric layer enveloping forest canopies and downward to the lowest soil layers affected by roots and biotic processes (Waring & Running, 2007). In addition to meteorological data, Biome-BGC requires a huge amount of ecophysiological and soil-related inputs that are not always available. By this reason, the model is run with the default values for most of them. However, there are two inputs especially crucial and that can differ from the default values due to the relevant characteristics of Mediterranean areas: the stomatal conductance and the rooting depth, that is, the depth at which plants are able to grow roots. The first one was already optimized by the IBIMET research group with collaborates in this research. The second one is optimized in this thesis (which constitutes O3).

Then, a methodology for improving the application of Biome-BGC in the study area is developed focusing on the optimization of the rooting depth ( $z_{\text{root}}$ ), which is not available for the study area on a spatially distributed basis. The optimal  $z_{\text{root}}$  was identified by comparing daily GPP simulations from the Biome-BGC with varying  $z_{\text{root}}$  to daily GPP estimations from the PEM previously optimized for and validated in the study area (the time series of daily GPP from 2005 to 2012 above mentioned). The methodology was first tested in the four EC sites representative of Mediterranean ecosystems and next applied at a regional scale to the whole study area. As a result, daily GPP simulated maps for the 2005–2012 period and an optimal  $z_{\text{root}}$  map were obtained. Optimal  $z_{\text{root}}$  in the four EC sites was shallower than the default one (100 cm) and led to better simulation results. Realistic, spatially distributed GPP estimates were obtained at regional scale. Withal, some discrepancies appeared both at local and regional scale emphasizing the difficulty

---

to adequately simulate the site's water budget and the need for proper setting of inputs, including  $z_{\text{root}}$  for the correct functioning of Biome-BGC. The performed optimization opens the door for using Biome-BGC to simulate other main vegetation processes, such as net carbon fluxes, in the study area.

This research concerning the optimization of the rooting depth ( $z_{\text{root}}$ ) in the Biome-BGC was published in paper below:

- P3. Sánchez-Ruiz, S., Chiesi, M., Fibbi, L., Carrara, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Optimized application of Biome-BGC for modeling the daily GPP of natural vegetation over Peninsular Spain, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 531–546, doi: 10.1002/2017JG004360

Forest ecosystems are open systems in the sense that they exchange energy and matter with other systems (including the atmosphere). This exchange is essential for the continued persistence of the ecosystem. A forest ecosystem is never in complete equilibrium, a term appropriate only to closed systems in the laboratory (Waring & Running, 2007). However, the simulations of the Biome-BGC correspond to equilibrium conditions. Therefore, they have to be corrected to properly reproduce the ecosystem dynamics. The correction is applied using the growing stock volume GSV (*i.e.*, the volume of all living trees in a given area of forest or wooded land that have more than a certain diameter at breast height) as proposed by Maselli *et al.* (2009b). The last objective of this thesis (O4) develops in this framework. It is twofold: first, a GSV map is obtained to take into account the non-equilibrium conditions of the forest ecosystem; second, all carbon fluxes are preliminarily estimated to show how the GSV will be inserted in a net carbon flux processing chain, which will be fully operationally developed in the near future.

On the one hand, a wall-to-wall GSV map over peninsular Spain is produced by the combination of Third Spanish National Forest Inventory (NFI3) data and Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ imagery. Google Earth Engine was used, as a novelty, to deal with Landsat scenes covering more than 50 000 plots along the whole NFI3 period (1997-2007). 805 predictors were calculated by the combination of Landsat reflectance data, including time and texture metrics, vegetation indices, and band ratios. Guided regularized random forest (GRRF) was used to drastically reduce the dimensionality of the original partially correlated 805 predictors and identify the best performing ones, while maintaining the level of accuracy. Predictors involving short-wave infrared reflectance and texture metrics presented the highest importance. RF was then used to produce the

---

wall-to-wall GSV map for the whole study area at 30 m spatial resolution with the 29 selected predictors. RMSE around  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  was obtained at plot level. The GSV map was finally aggregated at 1-km spatial resolution, its non-forest pixels were masked using Land Cover and Use Information System data for Spain provided by ©Instituto Geográfico Nacional, and validated against NFI3 estimations at province level.  $R^2 = 0.91$  and  $\text{RMSE} = 15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  were obtained.

On the other hand, the GSV map was used to take into account the actual conditions of the forest ecosystems and to correct the carbon fluxes estimates corresponding to optimal ecosystem functioning. Preliminary results suggest that the aforementioned correction reduce the uncertainty of the estimates (as comparing with reference data). However, further research in relation to the implementation of this correction in the net carbon flux processing chain is proposed to improve the results.

A manuscript containing the research concerning the calculation of the GSV map to correct the estimations of the Biome-BGC is under preparation to be sent for publication:

- P4. Sanchez-Ruiz, S., Moreno, A., Izquierdo-Verdiguier, E., Chiesi, M., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Forest growing stock volume from Landsat images using Google Earth Engine.

---

Finally, the main objectives and the published papers with the results are summarized below.

---

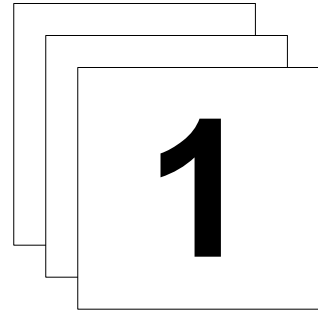
Main goal: REMOTE SENSING AND ECOSYSTEM MODELING TO SIMULATE TERRESTRIAL CARBON FLUXES

---

Objectives	Publication
O1. Quantifying the dependence of $\epsilon$ on water stress using operational remotely sensed products. Estimation of daily GPP.	P1. Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., Gilabert, M.A., 2017. Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data, <i>International Journal of Digital Earth</i> , 10:6, 623–638.  doi: 10.1080/17538947.2016.1247301
O2. Deriving a sound approach to estimate annual GPP from VIs.	P2. Gilabert, M.A., Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., 2017. Annual gross primary production from vegetation indices: A theoretically sound approach, <i>Remote Sensing</i> , 9, 193.  doi: 10.3390/rs9030193
O3. Optimization of the rooting depth in the Biome-BGC.	P3. Sánchez-Ruiz, S., Chiese, M., Fibbi, L., Carrara, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Optimized application of Biome-BGC for modeling the daily GPP of natural vegetation over Peninsular Spain, <i>Journal of Geophysical Research: Biogeosciences</i> , 123, 531–546.  doi: 10.1002/2017JG004360
O4. Deriving a GSV map to obtain actual net carbon fluxes.	P4. Sanchez-Ruiz, S., Moreno, A., Izquier-Verdiguier, E., Chiesi, M., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Forest growing stock volume from Landsat images using Google Earth Engine (under preparation).

---

The main advantage of the BGC models is that they can also predict responses to new conditions that do not exist yet. In this context, we can derive significant information on forest ecosystems using the available information related to the climate change scenarios (in the case of Spain, this information can be found in <http://adaptecca.es>). This will constitute the future work.

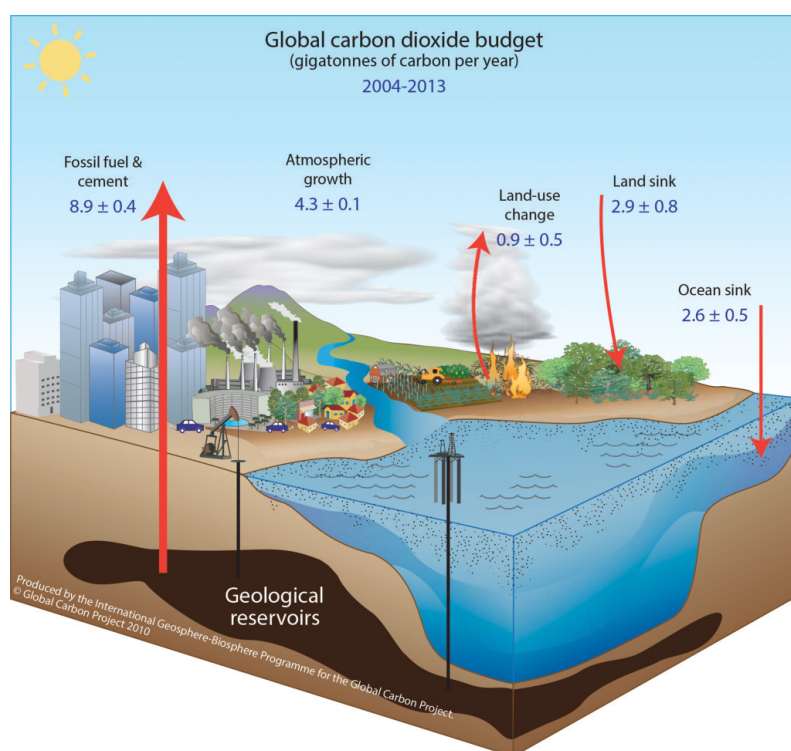


# Introducció

La temperatura mitjana de la superfície terrestre és aproximadament 15 °C gràcies a la presència d'una atmosfera absorbent com a conseqüència de l'efecte hivernacle, incorrectament anomenat a criteri de molts científics (Bohren *et al.*, 2007; Fleagle & Businger, 1980; Marshall & Plumb, 2008). Sense aquesta atmosfera, la temperatura seria 33 °C inferior. Aquest efecte natural permet que la vida es desenvolupi en el planeta, almenys, en la forma en que la coneixem. Els seus fonaments es van establir a principis del s. XIX per Joseph Fourier qui, mitjançant balanços d'energia, va posar de manifest el paper absorbent i emissor de radiació d'ona llarga de l'atmosfera (Pierrehumbert, 2004). Més tard, John Tyndall va realitzar diversos experiments per a mostrar que el vapor d'aigua i el CO<sub>2</sub> podien absorbir radiació (Hulme, 2009). Arrhenius (1896) va connectar la temperatura de la superfície terrestre i les seues variacions a llarg termini amb la concentració de CO<sub>2</sub>, en aquell temps anomenat àcid carbònic, en l'atmosfera.

Els estudis mencionats van posar de manifest que, encara que el  $\text{CO}_2$  és un dels components minoritaris de l'atmosfera, exerceix un paper rellevant en els balanços d'energia del planeta juntament amb el vapor d'aigua. Des de l'inici de la Revolució Industrial, la concentració atmosfèrica de  $\text{CO}_2$  s'ha incrementat a conseqüència de la utilització de combustibles fòssils. Aquest fet pot intensificar l'efecte hivernacle natural.

Encara que l'emissió de  $\text{CO}_2$  associada a l'ús de combustibles fòssils és la principal contribució a l'increment de l'esmentat gas a l'atmosfera, la seua concentració creix a un ritme inferior a l'esperat. Un flux net de carboni des de l'atmosfera a la superfície terrestre compensa parcialment aquesta emissió. Aquest flux presenta dues components: una oceànica i una terrestre. Ambdues formen part del cicle del carboni (figura 1.1).



**Figura 1.1.** Valors dels principals fluxos del cicle de carboni en Gt/a.

(Font: <http://whrc.org/project/global-carbon/>)

Les emissions de  $\text{CO}_2$  i la component oceànica estan relativament ben caracteritzades per mesures; però no ocorre el mateix amb la component terrestre, la qual s'estima freqüentment a partir dels residus del balanç global de carboni. Els ecosistemes terrestres, especialment els forestals, poden actuar com a fonts i embornals de carboni (IPCC, 2013).

Les emissions de  $\text{CO}_2$  antropogèniques engloben tant les procedents de l'activitat industrial com les degudes a canvis en l'ús del sòl. El 98 % del flux degut al canvi en l'ús

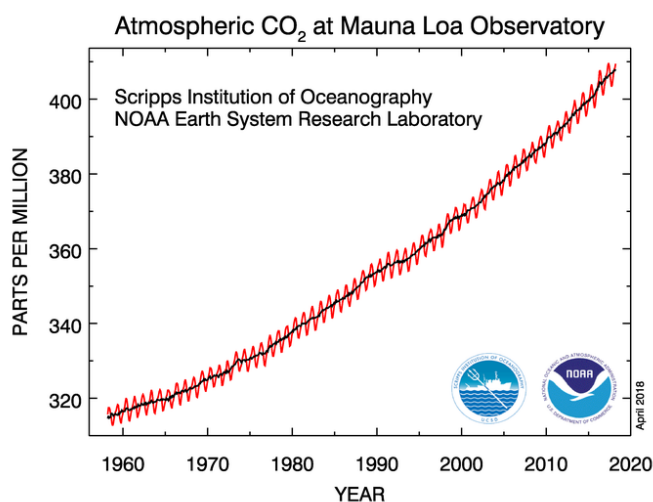
del sòl s'associa a la desforestació tropical. Durant les últimes dècades, s'ha avançat significativament en la caracterització de la desforestació i les emissions associades a aquesta mitjançant la utilització de dades d'Observació de la Terra (*Earth Observation*, EO). Aquestes dades possibiliten la realització d'estudis a diferents escales espacials i temporals. També permeten la realització d'anàlisis retrospectius estadísticament significatius gràcies a les sèries temporals d'imatges suficientment llargues.

La figura 1.2 mostra l'evolució temporal de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> durant les últimes dècades i, més detalladament, durant els últims cinc anys. Aquesta evolució es coneix com la corba de Keeling (Keeling *et al.*, 1968). S'observa que la concentració de CO<sub>2</sub> s'ha incrementat des de 315 ppm en 1958 fins a 409 ppm en l'actualitat. La corba de Keeling presenta, a més, una variabilitat intra-anual associada a la fenologia de la vegetació, posant de manifest la importància dels fluxos de carboni que la vegetació intercanvia amb l'atmosfera en la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>.

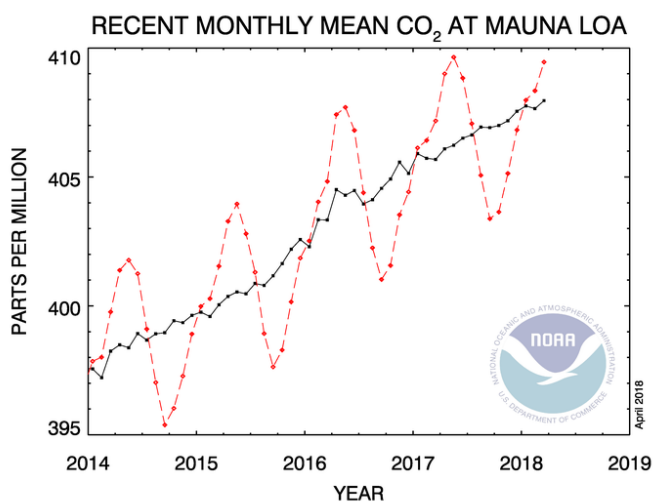
Segons l'IPCC (2013), la temperatura mitjana de la superfície terrestre experimentarà un ascens al llarg del s. XXI a conseqüència de l'increment de la concentració atmosfèrica dels gasos d'efecte hivernacle, especialment la del CO<sub>2</sub> d'emissió antropogènica. Els models climàtics utilitzats al *Fifth Assessment Report* ho prediuen amb una probabilitat molt elevada. El valor d'aquest ascens, que afectarà al cicle hidrològic i la circulació general, varia en els diferents escenaris plantejats, però el cas més optimista és d'1 °C. També es prevé que augmenten la temperatura del mar, el seu nivell mitjà i la seua acidesa. Aquests canvis no seran uniformes. En regions mediterrànies, les previsions dels models climàtics indiquen una probable accentuació del caràcter extrem del clima, és a dir, la possibilitat de que es desenvolupen, amb una freqüència major a l'actual, esdeveniments atmosfèrics extrems com sequeres, inundacions, tornados i tempestes violentes.

En aquest context, la importància de l'avaluació dels fluxos que intervenen en el cicle del carboni és indiscutible. Com s'ha mencionat prèviament, la biosfera constitueix un embornal de carboni. Absorbeix unes 2.9 Gt a<sup>-1</sup>, aproximadament un 30 % de les emissions degudes a l'ús de combustibles fòssils. Per altra banda, l'increment de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> estimula la fotosíntesi i, conseqüentment, el creixement de les plantes. Aquest efecte es coneix com CO<sub>2</sub> *fertilization* i alenteix lleugerament l'increment de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>, però no la deté (Keenan *et al.*, 2016). L'evidència científica actual suggereix que els boscos actuen com a embornals de carboni (Valentini *et al.*, 2000), però la seua capacitat i la de la resta d'ecosistemes per a acumular-lo és limitada. En primer lloc perquè la capacitat dels ecosistemes per a absorbir carboni està limitada per la disponibilitat de nutrients i per altres factors biofísics (Oren *et al.*, 2001). En segon lloc perquè la fotosíntesi presenta un punt de saturació amb la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> (Chapin III *et al.*, 2002). I en tercer lloc perquè el canvi

climàtic pot conduir els ecosistemes a una degradació (FAO, 2007). Per aquests motius la quantitat de carboni emmagatzemada als boscos és susceptible de patir pèrdues, cosa que augmentaria la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub>.



(a)



(b)

**Figura 1.2.** Concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> mesurat a l'observatori de Mauna Loa (Hawaii). (a) Des que es van iniciar las mesures en 1958, i (b) durant els últims cinc anys. Valors mitjans mensuals en roig, mitjana mòbil sense estacionalitat en negre.

(Font: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>)

En Espanya, al voltant del 50% del territori està ocupat per ecosistemes forestals (capítol 3) (<http://www.mapama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas>). La importància que les regions forestals poden adquirir en Espanya com a embornals de carboni és indiscutible. L'avaluació dels fluxos de carboni que s'intercanvien amb l'atmosfera en les esmentades regions a través del procés de fotosíntesi constitueix el nucli de l'estudi que



---

es desenvolupa en aquesta tesi. Amb independència de les incerteses associades a les previsions dels models climàtics, actualment no es dubta de la necessitat de disposar de ferramentes que permeten quantificar les diferents components del cicle de carboni. Aquestes es descriuen més detalladament al capítol 2.

El flux de carboni absorbit per la vegetació mitjançant la fotosíntesi s'anomena producció primària bruta (*gross primary production*, GPP). Els fluxos nets es calculen a partir de la GPP tenint en compte el flux de carboni retornat a l'atmosfera per processos de respiració. Per exemple, la producció primària neta<sup>1</sup> (*net primary production*, NPP) es calcula com la diferència entre la GPP i la respiració autòtrofa. Aquest flux quantifica la producció de biomassa per part de la vegetació. Els valors acumulats d'aquests fluxos, a més d'aportar informació sobre el comportament dels diversos ecosistemes en relació al cicle global de carboni, també permeten avaluar l'habitabilitat del planeta. Aquest concepte fa referència a la relació entre diversos factors limitadors per a la vida humana en el planeta (canvi climàtic, disponibilitat d'aigua, canvis en l'ús del sòl, pèrdua de biodiversitat...) i l'increment de la població humana en el planeta. Durant els últims anys, revistes com *Science* i *Nature* han publicat estudis sobre els esmentats factors limitadors. Aquestes variables individuals fan referència a processos diferents, però estan fortament acoblades. Segons Running (2012), l'NPP és una variable que integra alguns dels factors limitadors més determinants. Encara que aquestes repercussions socials dels fluxos de carboni queden fora d'aquesta tesi, la seua menció és necessària per a contextualitzar l'oportunitat del tema d'estudi i la potencial rellevància dels resultats obtinguts.

L'objectiu global que es planteja en la tesi és quantificar els diversos fluxos de carboni que les regions forestals de l'Espanya peninsular intercanvien amb l'atmosfera. Aquest objectiu es desglossa en quatre objectius específics:

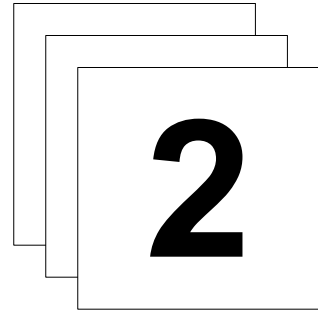
1. L'avaluació del potencial de diverses variables i fonts d'informació per a la quantificació de l'efecte de l'estrès hídric en la GPP diària calculada mitjançant el model de Monteith (1972).
2. El desenvolupament d'un nou model, a partir de l'anterior, que permeta l'estimació de sèries temporals llargues de GPP a escala anual quan els inputs del model de Monteith a escala diària no estan disponibles.
3. L'optimització dels inputs del Biome-BGC (Running & Hunt, 1993) relacionats amb l'estrès hídric per a l'adequació del model a la zona d'estudi i la simulació de la GPP i les diferents respiracions.
4. La generació de la capa d'informació que s'utilitzarà en la correcció dels fluxos simulats amb el Biome-BGC per a la caracterització de l'estat real dels ecosistemes i l'estimació dels fluxos nets de carboni a escala diària.

---

<sup>1</sup> Aquests fluxos es reprenen en el següent capítol, on es comenten amb més detalls.

---

El model de Monteith i el Biome-BGC es descriuen en el capítol 2. A més, també s'inclouen els principals fonaments teòrics del treball desenvolupat en aquesta tesi. S'utilitzen dades EO de diferents sensors combinades amb dades meteorològiques puntuals. Els diferents conjunts de dades i el seu processament preliminar es descriuen en el capítol 3 (i en l'apèndix A) conjuntament amb les característiques més rellevants de la zona d'estudi i els llocs de validació. L'escala espacial al llarg de tota la tesi és d'1 km×1 km. El període d'estudi comprèn els anys 2005-2012. La resolució temporal és preferentment diària, excepte en el cas de l'objectiu 2. Els capítols 4-7 tracten, respectivament, els objectius 1-4. En el capítol 4 s'avaluen sis alternatives que combinen dades EO i meteorològiques per a la caracterització de l'estrès hídric i la quantificació del seu efecte en la GPP diària. En el capítol 5 es proposa un model semi-empíric senzill per al càlcul de la GPP anual basat en el model de Monteith. Es calibra amb la GPP anual calculada a partir de la GPP diària obtinguda en el capítol 4. En el capítol 6 s'adequa el Biome-BGC per al seu ús en l'àrea d'estudi mitjançant el calibratge dels inputs relacionats amb la conductància estomàtica i la profunditat radicular i es calculen imatges diàries de GPP i respiracions suposant condicions d'equilibri per als ecosistemes. Atès que, en un cas real, els ecosistemes no es troben en tals condicions, en el capítol 7 es produeix la capa d'informació necessària (mapa de volum llenyós amb escorça) per a la correcció dels outputs del Biome-BGC obtinguts al capítol 6 i, amb ells, es possibilita el càlcul d'imatges diàries de fluxos nets de carboni. En tots aquests capítols es duen a terme diversos processos de validació que involucren el càlcul d'alguns estadístics que es descriuen a l'apèndix B. Finalment, el capítol 8 exposa les conclusions més rellevants de la tesi. En l'apèndix C es compilen les publicacions en revistes indexades en el *Science Citation Index* (SCI) que recullen els resultats dels capítols 4-6.



## Fonaments teòrics

Com s'ha esmentat al capítol 1, els fluxos biogeoquímics, en general, i els fluxos de carboni, en particular, juguen un paper crucial en l'estudi del clima (IPCC, 2013) i la seua estimació és necessària per a l'enteniment del comportament dels ecosistemes (Waring & Running, 2007). En aquest capítol s'exposen succintament els dos models utilitzats en la tesi per a l'estimació dels fluxos de carboni entre la vegetació i l'atmosfera. Abans s'inclou una descripció de la fotosíntesi per a millorar la comprensió dels fonaments dels dos models i dels principals factors que involucren. Finalment es descriu breument l'estimació *in situ* de fluxos de carboni mitjançant mesures preses en torres de covariància turbulenta (*eddy covariance*, EC).

## 2.1 Fotosíntesi i respiració

Els organismes vius obtenen energia a través de l'oxidació dels hidrats de carboni. Però la vida no pot dependre del metabolisme oxidatiu com a última font d'energia, ni continuar retornant indefinidament el carboni orgànic en forma de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. Aquesta reacció només representa la meitat del cicle energia-carboni de la natura.

La reacció inversa a l'oxidació dels hidrats de carboni s'anomena fotosíntesi. És el mecanisme mitjançant el qual els organismes autòtrofs o productors primaris (plantes, algues i alguns microorganismes) sintetitzen la matèria orgànica utilitzant radiació solar fotosintèticament activa (*photosynthetically active radiation*, PAR), aquella amb longitud d'ona compresa entre 400 nm i 700 nm. La fotosíntesi no només proporciona hidrats de carboni per a la producció d'energia en les plantes, també constitueix la principal via a través de la qual el carboni retorna a la biosfera, és a dir, el principal mitjà d'assimilació de carboni. A més, constitueix la principal font d'oxigen en l'atmosfera terrestre.

De manera molt esquemàtica, la fotosíntesi es descriu amb la següent reacció química (Chapin III et al., 2002):



Encara que en el context d'aquesta tesi la seua importància és relativa, cal mencionar que l'equació 2.1 constitueix una simplificació excessiva. En la fotosíntesi intervenen molts processos intermedis. A més, l'hexosa no és el principal hidrat de carboni obtingut del procés. Per tant, és preferible escriure la reacció fotosintètica com s'indica en l'equació 2.2, on el claudàtor indica un hidrat de carboni genèric:



L'energia del fotó causa tant l'excitació electrònica com el trencament indirecte dels enllaços del H<sub>2</sub>O, però no es pot utilitzar directament per a impulsar aquesta reacció. Per la seua banda, el H<sub>2</sub>O tampoc redueix al CO<sub>2</sub> directament en cap circumstància coneguda. Com s'ha mencionat prèviament, a través de la fotosíntesi es realitza la conversió de l'energia solar en energia química. Aquesta energia s'emmagatzema, en primera instància, en el trifosfat d'adenosina (ATP), que més tard s'utilitza per a sintetitzar molècules orgàniques de major estabilitat.

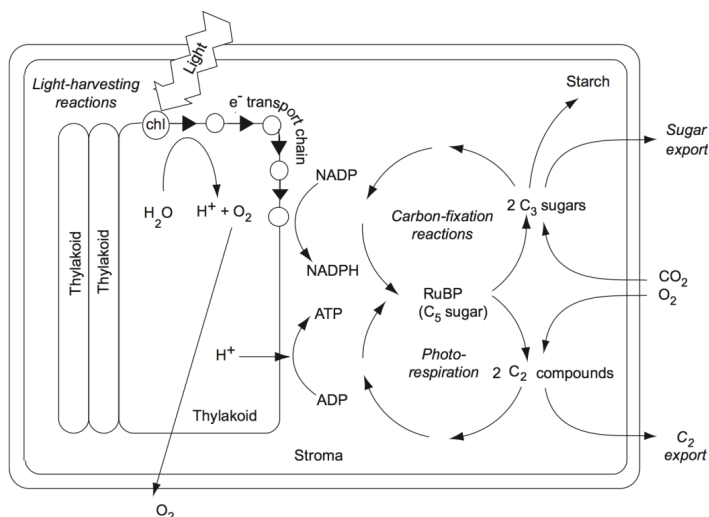
En la figura 2.1 es mostra com la fotosíntesi se separa en dues fases, tant químicament com física (Mathews et al., 2013):

- ✓ Fase lluminosa. Aquesta fase comprèn les reaccions en les quals s'absorbeixen fotons i s'utilitzen per a generar components altament energètics com l'ATP i la nicotinamida adenina dinucleòtid fosfat (NADPH), que actuen com a emmagatzemaments temporals de l'energia química. L'absorció de radiació per

part de la clorofil·la ocorre en la part de les cèl·lules anomenada cloroplast. A l'interior del cloroplast, la clorofil·la es troba apilada en forma de grana. Gràcies a la radiació absorbida per la clorofil·la es produeix l'excitació electrònica que, posteriorment, permet la síntesi de l'ATP i l'NADPH. Els electrons cedits per les molècules de clorofil·la són reposats mitjançant l'oxidació del  $\text{H}_2\text{O}$ . En aquest procés es genera el  $\text{O}_2$  que s'allibera a l'atmosfera. Després, l'ATP i l'NADPH es transporten a través del cloroplast i proporcionen l'energia necessària per a desencadenar altres reaccions metabòliques com, per exemple, la que converteix el  $\text{CO}_2$  en sucre.

- ✓ Fase fosca. En aquesta fase es fixa el  $\text{CO}_2$  a través de la seua reducció bioquímica per a formar sucres utilitzant l'ATP i l'NADPH. També s'anomena cicle de Calvin. Es realitza quan els productes de les reaccions de llum s'utilitzen per a formar enllaços covalents C-C. No requereix la presència de la radiació solar. En les reaccions de foscor, el  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera (o de l'aigua en el cas dels organismes aquàtics) es captura i redueix gràcies a l'hidrogen ( $\text{H}^+$ ) per a la formació d'hidrats de carboni ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). La incorporació del  $\text{CO}_2$  en compostos orgànics es coneix com fixament o assimilació de carboni. L'energia utilitzada en aquest procés prové de la fase lluminosa.

L'eficiència de la fotosíntesi, també coneguda com eficiència en l'ús de la radiació ( $\epsilon$ ), és relativament baixa (taula 2.1). Només un 1 % de la radiació global incident en una fulla verda s'inverteix en el procés, encara que aquest valor augmenta si es considera únicament la PAR. A més, només un 27 % de l'energia absorbida queda emmagatzemada en forma de matèria orgànica (Chapin III *et al.*, 2002).



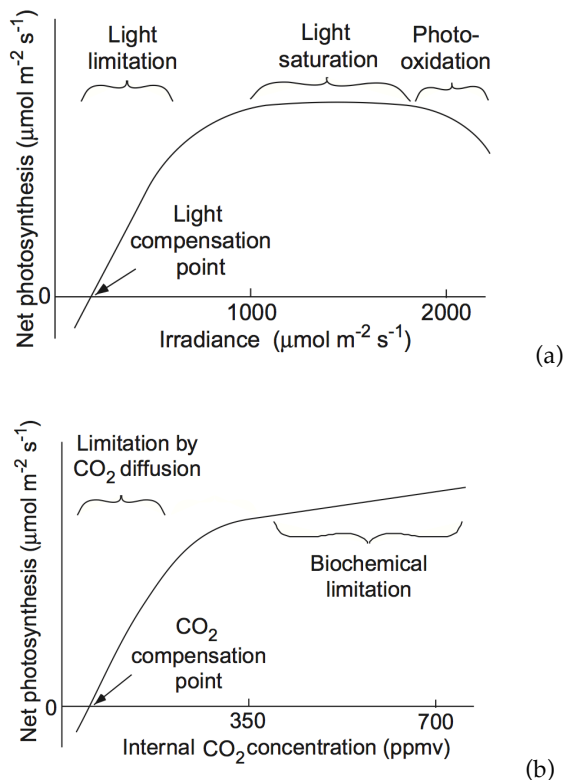
**Figura 2.1.** Diagrama esquemàtic de la fotosíntesi.  
(Font: Chapin III *et al.*, 2002)

**Taula 2.1.** Fracció de la radiació solar incident involucrada en els diferents processos d'interacció amb la vegetació. (Font: Chapin III *et al.*, 2002)

Fracció (%)	Procés
75	Evaporació d'aigua
15	Reflexió
5	Transmissió a través de la fulla
4	Increment de la temperatura
1	Fotosíntesi

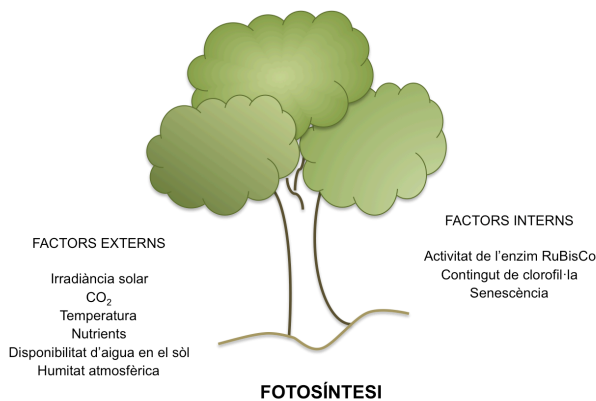
Existeixen molts factors que poden limitar l'eficiència fotosintètica de la vegetació (figura 2.2), tant relacionats amb alguna de les fases del procés com aliens a elles. A continuació s'enumeren de manera succinta (Chapin III *et al.*, 2002):

- ✓ La primera part de la fase lluminosa està limitada per la irradiància solar, que determina la PAR, i per la quantitat de clorofil·la. La velocitat de transferència d'electrons és sensible a la temperatura.
  - Cada espècie s'adapta a viure en un interval de PAR concret. Dins aquest interval, l'eficiència fotosintètica augmenta amb la PAR fins a un valor llindar. A partir d'aquest valor ocorre la fotooxidació irreversible dels pigments fotosintètics (figura 2.2 a).
  - Les plantes C4, adaptades a climes secs i càlids, presenten una major eficiència que les C3, és a dir, necessiten menys energia, i no solen assolir la saturació lumínica.
- ✓ La velocitat a la qual el CO<sub>2</sub> arriba als cloroplasts depèn de la seua difusivitat, que està limitada per dos factors:
  - La pressió parcial de CO<sub>2</sub> a l'interior del cloroplast, que és proporcional a la seua pressió parcial en l'atmosfera. Normalment l'eficiència fotosintètica augmenta amb la concentració fins a un valor llindar i s'estabilitza (figura 2.2 b).
  - La conductància estomàtica. Com que els estomes són els conductes a través dels quals l'aire entra i surt de les fulles, la seua obertura regula els fluxos de H<sub>2</sub>O i CO<sub>2</sub> en els espais intercel·lulars. Front la manca d'aigua, la planta tanca els estomes per evitar la pèrdua de H<sub>2</sub>O dificultant la difusió de CO<sub>2</sub>.
- ✓ La fase fosca està limitada per la concentració de CO<sub>2</sub> i per la temperatura, que incrementa l'agitació tèrmica i, conseqüentment, la mobilitat de les molècules. També es veu limitada per la disponibilitat de nitrogen i altres substàncies necessàries per a la síntesi de l'enzim RuBisCo (ribulosa-1,5-bisfosfat carboxilasa/oxygenasa), imprescindible per al fixament de CO<sub>2</sub> en aquesta fase.



**Figura 2.2.** Dependència de la fotosíntesi amb la irradiància solar (a) i la concentració de  $\text{CO}_2$  a l'interior de la fulla (b). (Font: Chapin III et al., 2002)

En general, la fotosíntesi és sensible als canvis en la irradiància solar i la concentració de  $\text{CO}_2$  a escales temporals entre mil·lsegons i minuts, mentre que la dependència amb altres factors com el nitrogen es manifesta en escales temporals d'entre dies a setmanes. La figura 2.3 resumeix els principals factors limitadors de la fotosíntesi.



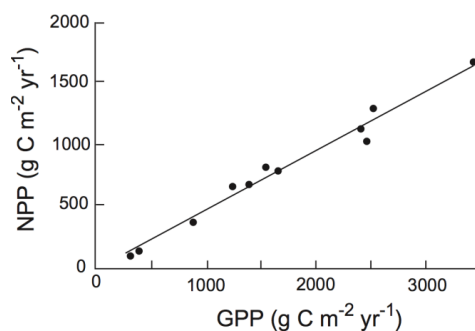
**Figura 2.3.** Factors limitadors de la fotosíntesi.

No tot el  $\text{CO}_2$  assimilat s'emmagatzema en forma de biomassa. Les plantes retornen a l'atmosfera una fracció de  $\text{CO}_2$  mitjançant la respiració autòtrofa, que els permet obtenir energia per a la síntesi i el manteniment de les seues cèl·lules (Waring & Running, 2007). Aquesta respiració constitueix el procés invers a la fotosíntesi: allibera energia (ATP) mitjançant l'oxidació de molècules orgàniques segons l'equació 2.3.



on es pot comprovar que també s'obtenen  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2\text{O}$  com a productes de la reacció.

En el context d'aquesta tesi, es pot considerar que el carboni comença el seu cicle als ecosistemes terrestres quan les plantes assimilen el  $\text{CO}_2$  atmosfèric mitjançant la fotosíntesi. La densitat de flux de carboni fixat per fotosíntesi s'anomena producció primària bruta (*gross primary production*, GPP) i fa referència a la suma de les contribucions de totes les fulles. Les plantes consumeixen aproximadament la meitat dels productes obtinguts amb la fotosíntesi en el procés de respiració autòtrofa, que es compon per la respiració de creixement ( $R_{gr}$ ) i la respiració de manteniment ( $R_{mn}$ ) i, a través d'ell, les plantes retornen  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera. La diferència entre la producció primària bruta i la respiració autòtrofa ( $\text{GPP} - R_{gr} - R_{mn}$ ) s'anomena producció primària neta (*net primary production*, NPP) i comprèn al carboni emmagatzemat en les fulles, les rames, les tiges, les arrels i els òrgans reproductius de les plantes (figura 2.4).



**Figura 2.4.** Relació entre la GPP i l'NPP en onze boscos dels EUA, Austràlia i Nova Zelanda. Tot i les diferències en humitat i temperatura entre les regions, s'observa que la respiració autòtrofa constitueix aproximadament el 53 % de la GPP i, per tant, l'NPP n'és el 47 %. (Font: Waring & Running, 2007).

Quan les plantes perden les fulles i les arrels o quan moren, la matèria orgànica morta forma el detritus. Aquesta substància sustenta a diversos animals i microbis que, mitjançant la respiració heteròtrofa ( $R_{het}$ ), emeten  $\text{CO}_2$  a l'atmosfera (figura 2.5). Al llarg d'un any, els ecosistemes que no han patit cap pertorbació presenten un guany net



derivat d'aquest intercanvi de fluxos de carboni amb l'atmosfera ( $GPP - R_{gr} - R_{mn} - R_{het}$ ), que s'anomena producció neta de l'ecosistema (*net ecosystem production, NEP*).

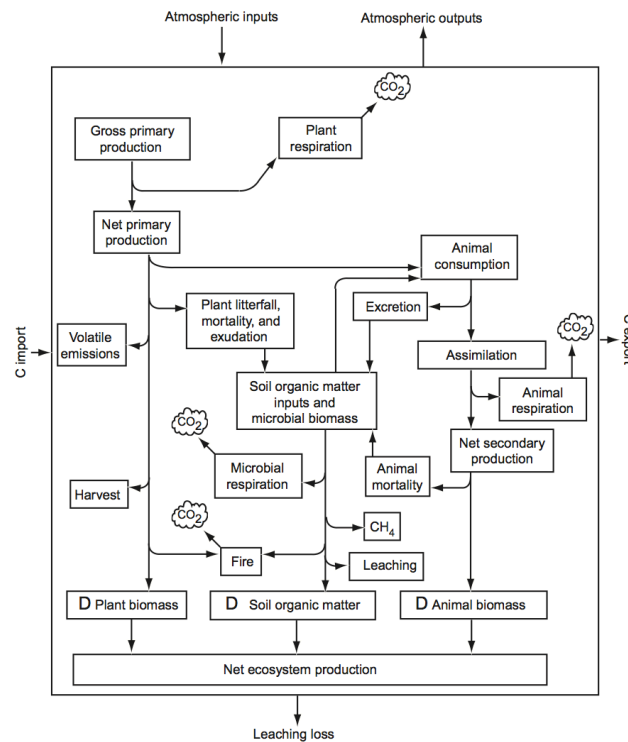


Figura 2.5. Esquema dels fluxos de carboni en un ecosistema.

(Font: Chapin III *et al.*, 2002)

## 2.2 Càlcul de fluxos de carboni a partir de dades EO

Els estudis sobre la fotosíntesi tant a nivell de fulla com de coberta vegetal que apareixen a la literatura mostren que (Chapin III *et al.*, 2002): (i) La variabilitat (temporal principalment, però també espacial) de la  $\epsilon$  és menuda en relació a la de la PAR, així que totes les plantes C3 solen presentar valors similars de  $\epsilon$  en règims de PAR entre moderada i baixa; (ii) la penetració de la radiació en la coberta vegetal i la dependència de la fotosíntesi amb la seua profunditat estenen el rang de valors de PAR al llarg del qual la  $\epsilon$  es pot considerar constant; i (iii) a curt termini, la  $\epsilon$  es redueix degut a l'efecte de diversos estressos ambientals, mentre que a llarg termini les plantes responen amb canvis estructurals.

Si s'admet que la  $\epsilon$  no presenta grans variacions, la GPP es pot estimar amb dades EO mitjançant el càlcul de la PAR absorbida per la vegetació. Aquest és el punt de partida

del model de Monteith (1972), que ha sigut àmpliament utilitzat durant les últimes dècades i es descriu a continuació.

Per altra banda, els models de funcionament de l'ecosistema (*ecosystem process models*) tenen en compte la majoria dels processos descrits en aquesta secció per a calcular els fluxos d'energia i massa entre els ecosistemes i l'atmosfera. El Biome-BGC (Running & Hunt, 1993), que també es descriu a continuació, n'és un exemple.

### 2.2.1 Model de Monteith

En la dècada dels setanta, Monteith (1972) va proposar una relació lineal entre la producció primària de la vegetació, bé siga bruta o neta, i la PAR que absorbeix (*absorbed photosynthetically active radiation*, APAR). En el mateix estudi va aplicar el concepte d'eficiència al procés de producció de matèria seca per part de la vegetació. Va definir aquesta eficiència com la quantitat d'energia solar que la vegetació emmagatzema mitjançant la fotosíntesi durant un període de temps determinat dividida per l'APAR integrada durant el mateix període i la va anomenar eficiència en l'ús de la radiació ( $\epsilon$ ). Monteith va modelitzar la  $\epsilon$  com el producte de set factors que la caracteritzen en funció del que depèn: (F1) la geometria Terra-Sol, (F2) la transparència de l'atmosfera, (F3) la composició espectral de la radiació solar i les propietats òptiques de la vegetació, (F4) els fotons necessaris per a la realització de la fotosíntesi, (F5) la fracció de radiació solar interceptada per la coberta vegetal, (F6) la difusió de CO<sub>2</sub> i (F7) la fracció de carboni assimilat no utilitzat en processos de respiració. Als models basats en l'eficiència en l'ús de la radiació se'ls anomena models d'eficiència de producció (*production efficiency models*, PEMs).

Precisament la teledetecció, gràcies a la seua àmplia cobertura espacial i la seua periodicitat temporal, permet l'aplicació dels PEMs a diferents escales espacials (local, regional, global) i temporals (diària, mensual, anual). Durant les tres últimes dècades, diferents PEMs han utilitzat dades de teledetecció per a estimar la producció primària de la vegetació. Com a mostra, la taula 2.2 recull els fluxos estimats i les resolucions espacials i temporals d'alguns d'ells. En aquests models, la  $\epsilon$  se sol modelitzar com el producte d'una eficiència màxima ( $\epsilon_{\max}$ ) per una sèrie d'escalars adimensionals que prenen valors entre 0 i 1 i redueixen la  $\epsilon_{\max}$  d'acord amb els estressos ambientals que pot patir la vegetació. La  $\epsilon_{\max}$  representa el funcionament òptim de l'ecosistema i depèn espacialment del tipus de vegetació. A més, actua com a convertidor d'unitats de radiació (energia) a unitats de massa. Tot i que els estressos ambientals més habitualment implementats en els PEMs són el tèrmic i l'hídric (taula 2.2), la  $\epsilon$  també es veu afectada per altres factors com l'edat de la massa forestal, les condicions físiques del sòl, la quantitat de nitrogen continguda en ell o l'etapa fenològica (Coops *et al.*, 2010; Hilker *et*

*al.*, 2008; McCallum *et al.*, 2009). Garbulsky *et al.* (2010) van trobar valors específics de  $\varepsilon_{\max}$  per a diferents tipus de vegetació, però la majoria d'ells presenten una incertesa elevada. Per això en aquesta tesi només s'utilitzen dos valors:  $1.2 \text{ g MJ}^{-1}$  per a vegetació llenyosa i  $1.6 \text{ g MJ}^{-1}$  per a praderies.

**Taula 2.2.** Fluxos de carboni estimats pels PEMs més rellevants de les tres últimes dècades, les seues resolucions espacials i temporals, els estressos ambientals que consideren i les seues corresponents referències bibliogràfiques.

Model	Flux de carboni	Resolució espacial	Resolució temporal	Estressos considerats	Referència
CASA	NPP	0.5 °	mensual	Tèrmic, hídric	Potter <i>et al.</i> (1993)
GLO-PEM	NPP	8 km	10 dies	Tèrmic, hídric	Cao <i>et al.</i> (2004)
VPM	GPP	1 km	8 dies	Tèrmic, hídric, fenològic	Xiao <i>et al.</i> (2004a, 2004b)
C-Fix	NPP, NEP	1 km	diària	Tèrmic, hídric	Veroustraete <i>et al.</i> (2002)
EC-LUE	GPP	1 km	diària	Tèrmic, hídric	Yuan <i>et al.</i> (2007)
PCM	GPP	500 m	8 dies	Hídric	Gao <i>et al.</i> (2014)
MOD17	GPP, NPP	1 km	8 dies, anual	Tèrmic, hídric	Running & Zhao (2015)

Actualment, l'APAR acostuma a calcular-se com el producte de la PAR incident i la fracció d'aquesta absorbida per la coberta vegetal (*fraction of absorbed photosynthetically active radiation*,  $f_{\text{APAR}}$ ). La  $f_{\text{APAR}}$  està relacionada amb l'estructura de la coberta vegetal i els pigments que conté i és una de les variables biofísiques tradicionalment millor caracteritzades mitjançant l'ús de dades EO. De fet, és la variable que permet establir un vincle directe entre el PEM i la teledetecció. Aquesta variable sol calcular-se mitjançant un índex de vegetació que utilitza les reflectàncies en les regions del roig i l'infraroig proper de l'espectre electromagnètic i pot, per tant, explicar canvis en la coberta vegetal (Fensholt *et al.*, 2004; Myneni & Williams, 1994; Roujean & Bréon, 1995; Viña & Gitelson, 2005). En el cas particular dels PEMs també és així (Gamon *et al.*, 1995; Ma *et al.*, 2014; Wagle *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2004b) i fins i tot s'utilitza el propi índex directament (Xiao *et al.*, 2004a). La  $f_{\text{APAR}}$  és capaç de reflectir canvis en la coberta vegetal causats per l'estress hídric. Però els canvis estructurals en la coberta vegetal que afecten la  $f_{\text{APAR}}$  apareixen després de llargs períodes de manca d'aigua.

En aquesta tesi en particular es calcula la GPP diària a una resolució espacial d'1 km × 1 km mitjançant el següent PEM:

$$GPP = \varepsilon_{\max} \varepsilon_T \varepsilon_W f_{APAR} PAR \quad (2.4)$$

on la GPP s'expressa en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ , la PAR en  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ , la  $\varepsilon_{\max}$  en  $g\ MJ^{-1}$  i la resta de factors són adimensionals. Només es consideren dos estressos ambientals: l'estrès tèrmic degut a les baixes temperatures de l'aire que poden donar-se en altes cotes o latituds elevades (quantificat per l'escalar  $\varepsilon_T$ ); i l'estrès hídric degut a la manca d'aigua (quantificat per l'escalar  $\varepsilon_W$ ), el més limitant en zones mediterrànies a causa de les infreqüents pluges i els estius càlids i secs (Gilabert *et al.*, 2015; Maselli *et al.*, 2014). Els inputs PAR i  $f_{APAR}$  del PEM s'han optimitzat durant els últims anys al grup de recerca en que s'ha realitzat aquesta tesi. La contribució de la mateixa al PEM radica en la implementació de l'escalar responsable de l'efecte de l'estrès hídric,  $\varepsilon_W$ , mentre que el responsable de l'estrès tèrmic,  $\varepsilon_T$ , es calcula com s'explica a l'algorisme del MOD17 (Running & Zhao, 2015).

Si es compara l'equació 2.4 amb la proposta de Monteith, es pot comprovar que els factors (F1) i (F2) queden implementats en el càlcul de la PAR, la composició espectral de la radiació solar i les propietats òptiques de la vegetació en el factor (F3) es tenen en compte en els càlcul de la PAR i la  $f_{APAR}$  respectivament, el factor (F4) queda recollit en la  $\varepsilon_{\max}$ , el factor (F5) en la  $f_{APAR}$ , el factor (F6) es pot considerar també inclòs en la  $\varepsilon_{\max}$  i el factor (F7) no es considera perquè la GPP és un flux brut.

Els estressos ambientals esmentats sempre redueixen la  $\varepsilon$ . No obstant això, existeixen altres factors ambientals que poden tant reduir-la com augmentar-la. D'una banda, l'efecte de fertilització de  $CO_2$ , és a dir, l'increment en l'assimilació de carboni degut a concentracions atmosfèriques de  $CO_2$  superiors als nivells de referència preindustrials (Veroustraete, 1994) augmenta la  $\varepsilon$  perquè la difusió de  $CO_2$  depèn de la concentració de  $CO_2$  al voltant de la fulla. Aquest efecte no s'ha considerat en aquesta tesi perquè afecta als fluxos de carboni a molt llarg termini.

D'altra banda, la radiació solar global incident es pot descompondre en dues components: la directa i la difusa, que interaccionen de manera diferent amb les cobertes vegetals. La component difusa incideix uniformement en la coberta vegetal des de totes les direccions i, per tant, pot penetrar més en ella que la component directa, sobretot quan la vegetació és densa. L'orientació de les fulles que componen la coberta pràcticament no té cap influència en la component difusa de l'APAR. En canvi, l'APAR directa presenta una gran dependència amb l'angle d'incidència i l'orientació de les fulles. Existeix evidència científica de que la radiació difusa augmenta la  $\varepsilon$  i presenta una menor tendència a la saturació (Gu *et al.*, 2002). Per exemple, Healey *et al.* (1998) van registrar un increment de la  $\varepsilon$  diària d'entre el 46 % i el 50 % quan la radiació incident sobre cultius

herbació era predominantment difusa, mentre que, segons Jenkins *et al.* (2007), la  $\epsilon$  diària dels boscos amb el cel cobert pot arribar a triplicar-se respecte al seu valor amb el cel clar. L'efecte de la fracció de radiació difusa respecte de la total en la GPP també s'ha implementat en alguns PEMs. El model proposat per Donohue *et al.* (2014) va aconseguir explicar un 83 % de la variància de la GPP mensual en diversos ecosistemes en Austràlia, mentre que el MOD17, que no té en compte la fracció de radiació difusa, només un 59 %. El model proposat per Wang *et al.* (2018) va aconseguir explicar un 2 % més de la variància de la GPP de boscos temperats caducifolis d'alta latitud quan incorpora la fracció de radiació difusa (94 % front a 92 %). Encara així, en aquesta tesi no s'ha arribat a implementar el seu efecte en el model. Cal destacar també que, encara que la  $\epsilon$  siga major amb l'APAR difusa que amb la directa, normalment una major proporció de radiació difusa ve acompanyada d'una menor quantitat de radiació global (Kanniah *et al.*, 2013) i, per tant, la GPP només serà major quan un efecte compense l'altre.

El model de Monteith s'utilitza en els capítols 4 i 5.

### 2.2.2 Biome-BGC

El Biome-BGC (Running & Hunt, 1993; White *et al.*, 2000) és un model biogeoquímic capaç d'estimar l'emmagatzematge i els fluxos de carboni, aigua i nitrogen en ecosistemes terrestres a escales diària, mensual i anual. En aquesta tesi s'utilitza la versió 4.2 del model, última disponible a la web del *Numerical Terradynamic Simulation Group* (NTSG), <http://www.ntsg.umd.edu/project/biome-bgc.php>.

Es tracta d'un model unidimensional que considera cada punt en l'espai amb els seus fluxos i emmagatzematges normalitzats per unitat de superfície. L'espai simulat es divideix en cel·les i les simulacions es realitzen independentment per a cadascuna d'elles. Els inputs necessaris per a cada simulació són de tres tipus: (1) propietats físiques del lloc (latitud, pendent, orientació, altitud, albedo, textura i profunditat del sòl...); (2) sèries meteorològiques diàries (temperatures de l'aire màxima i mínima, precipitació, durada del dia, i temperatura mitjana de l'aire, pressió parcial de vapor d'aigua i densitat de flux radiant d'ona curta diürnes); i (3) paràmetres ecofisiològics (conductància estomàtica màxima, quocient entre els continguts de carboni i nitrogen...). El model considera que el tipus d'ecosistema funcional descrit pels inputs és espacialment homogeni i invariant en el temps. També considera que l'ecosistema es troba en equilibri amb el seu entorn (White *et al.*, 2000), condició coneguda també com clímax (concepte que s'explica amb més profunditat al capítol 7). La taula 2.3 mostra els inputs físics del lloc i els paràmetres ecofisiològics necessaris per a utilitzar el Biome-BGC i els outputs obtinguts mitjançant el model en aquesta tesi. Cal mencionar que, en el cas de les sèries meteorològiques diàries, només són estrictament necessàries les temperatures de l'aire màxima i mínima i la

precipitació, ja que la resta es poden calcular mitjançant el programa MT-CLIM (Thornton *et al.*, 2000) versió 4.3, el codi de la qual també està disponible a la web de l'NTSG, <http://www.ntsg.umd.edu/project/mt-clim.php>.

**Taula 2.3.** Sobre el Biome-BGC: inputs físics del lloc, paràmetres ecofisiològics i outputs obtinguts en la present tesi.

Inputs físics del lloc	Paràmetres ecofisiològics (*)	Outputs obtinguts
<i>Climate change</i>	Woody/non-woody flag	GPP
offset for $T_{max}$ (**)	Evergreen/deciduous flag	$R_{mn}$
offset for $T_{min}$ (**)	C3/C4 flag	$R_{gr}$
multiplier for precipitation	Model phenology / user defined	$R_{het}$
multiplier for VPD	ONDAY	Dead stem carbon
multiplier for shortwave radiation	OFFDAY	$LAI_{max}$ (**)
<i>CO<sub>2</sub> control</i>	Transfer growth period as fraction of growing season (dimensionless)	
constant/variable	Litterfall as fraction of growing season	
constant atmospheric CO <sub>2</sub> concentration	Annual leaf and fine root turnover fraction (a <sup>-1</sup> )	
annual variable CO <sub>2</sub> filename	Annual live wood turnover fraction (a <sup>-1</sup> )	
<i>Site</i>	Annual whole plant mortality fraction (a <sup>-1</sup> )	
effective soil depth corrected for rock fraction (m)	Annual fire mortality fraction (a <sup>-1</sup> )	
sand percentage by volume in rock-free soil (%)	Allocation new fine root C / new leaf C	
silt percentage by volume in rock-free soil (%)	Allocation new stem C / new leaf C	
clay percentage by volume in rock-free soil (%)	Allocation new live wood C / new total wood C	
site elevation (m)	Allocation new coarse root C / new stem C	
site latitude (degrees)	Allocation current growth proportion	
site shortwave albedo	C/N of leaves	
wet+dry atmospheric deposition of nitrogen (kg m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	C/N of leaf litter	
symbiotic+asymbiotic fixation of nitrogen (kg m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	C/N of fine roots	

(\*) Totes les magnituds que fan referència a proporcions, fraccions o ràtios son adimensionals (excepte les quatre anuals que tenen unitats de a<sup>-1</sup>).

(\*\*)  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  i  $LAI_{max}$  fan referència a les temperatures màxima i mínima de l'aire, i a l'índex d'àrea foliar (*leaf area index*, LAI) màxim anual, respectivament.

Taula 2.3. Continuació.

Inpus físics del lloc	Paràmetres ecofisiològics (*)	Outputs obtinguts
<i>Ramped nitrogen deposition</i>	C/N of live wood	
yes/no	C/N of dead wood	
reference year for industrial nitrogen deposition (integer)	Leaf litter labile proportion	
industrial nitrogen deposition ( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	Leaf litter cellulose proportion	
<i>Water state</i>	Leaf litter lignin proportion	
water stored in snowpack ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Fine root labile proportion	
initial soil water as a proportion of saturation	Fine root cellulose proportion	
<i>Carbon state</i>	Fine root lignin proportion (dimensionless)	
first-year maximum leaf carbon ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Dead wood cellulose proportion	
first-year maximum stem carbon ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Dead wood lignin proportion	
coarse woody debris carbon ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Canopy water interception coefficient ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	
litter carbon, labile pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Canopy light extinction coefficient	
litter carbon, unshielded cellulose pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	All-sided to projected leaf area ratio	
litter carbon, shielded cellulose pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Canopy average specific leaf area ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ )	
litter carbon, lignin pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Ratio of shaded SLA/sunlit SLA	
soil carbon, fast microbial recycling pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Fraction of leaf N in RuBisCo	
soil carbon, medium microbial recycling pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Maximum stomatal conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	
soil carbon, slow microbial recycling pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Cuticular conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	
soil carbon, recalcitrant soil organic matter pool ( $\text{kg m}^{-2}$ )	Boundary layer conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	
	Leaf water potential: start of conductance reduction (MPa)	
	Leaf water potential: complete conductance reduction (MPa)	
	Vapor pressure deficit: start of conductance reduction (Pa)	
	Vapor pressure deficit: complete conductance reduction (Pa)	

(\*) Totes les magnituds que fan referència a proporcions, fraccions o ràtios son adimensionals (excepte les quatre anuals que tenen unitats de  $\text{a}^{-1}$ ).

Abans de començar les simulacions, el model realitza els següents càlculs preliminars: les condicions de saturació del sòl (contingut volumètric d'aigua, potencial matricial<sup>1</sup> i capacitat de camp) es calculen a partir dels inputs de la textura del sòl (percentatges de sorra, llim i argila); la PAR es calcula com el 45 % de la radiació solar incident d'ona curta (les pèrdues degudes a l'albedo s'eliminen durant el procés de simulació); la pressió atmosfèrica es calcula en funció de l'elevació del lloc; les fraccions de cel·lulosa protegida i sense protegir es calculen a partir dels paràmetres ecofisiològics. Per a la realització d'aquests càlculs i els que formen part de les simulacions, el model utilitza una sèrie de valors constants que bé poden ser constants físiques, part dels inputs o constants internes del propi model. Aquests valors constants no s'especifiquen en l'explicació del funcionament del Biome-BGC que s'exposa a continuació (esquematzada per la figura 2.6), però poden consultar-se a la taula 2.4 i a la taula 6.1 (capítol 6). Abans de simular els processos ecosistèmics, el model realitza una primera execució per a arribar a una situació d'equilibri entre els fluxos d'entrada i els d'eixida o utilitza un estat d'equilibri resultant d'una simulació prèvia.

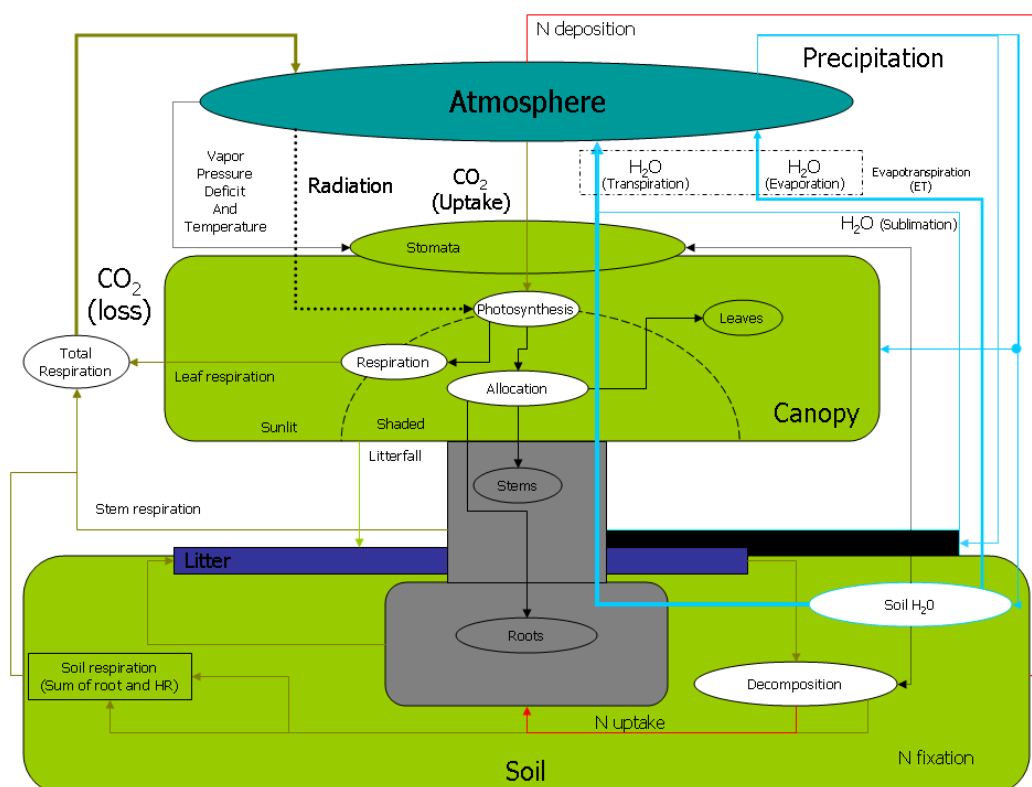


Figura 2.6. Diagrama de flux del model Biome-BGC.

(Font: <http://www.ntsg.umt.edu/images/biome-bgc/bgcfloor.png>)

<sup>1</sup> El potencial matricial també es denomina amb freqüència potencial capil·lar. No obstant açò, és preferible la primera opció perquè no solament inclou els fenòmens de capil·laritat, que fins i tot poden ser menyspreables quan el contingut d'aigua decreix molt, sinó també la retenció d'aigua per les partícules del sòl deguda a efectes associats a la tensió superficial (Kirkham, 2005).



**Taula 2.4.** Constants utilitzades pel Biome-BGC.

Constant	Valor	Unitats
<i>Physical constants</i>		
Standard gravitational acceleration	9.81	m s <sup>-2</sup>
Standard pressure at sea level	1.013 × 10 <sup>5</sup>	Pa
Standard air temperature at sea level	288.15	K
Molecular weight of dry air	28.96 × 10 <sup>-3</sup>	kg mol <sup>-1</sup>
Molecular weight of water	18.015 × 10 <sup>-3</sup>	kg mol <sup>-1</sup>
Specific heat of air	1010	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Standard air temperature lapse rate	-0.0065	K m <sup>-1</sup>
Universal gas constant	8.3143	m <sup>3</sup> Pa mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Stefan-Boltzmann constant	5.67 × 10 <sup>-8</sup>	W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup>
<i>Ecosystem constants</i>		
PAR/total short wave radiation	0.45	
PAR photon energy ratio	4.55	μmol J <sup>-1</sup>
C/N for fast microbial recycling pool	12	
C:N for medium microbial recycling pool	12	
C/N for slow microbial recycling pool	10	
C/N for recalcitrant soil organic matter pool	10	
Growth respiration per unit of grown carbon	0.3	
Proportion of storage growth respiration at fixation	1	
Photosynthetic photon flux density for 0.5 stomatal closure	75	μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Fraction of mineralization to volatilization of nitrogen	0.01	
Fraction of mineral nitrogen available for leaching	0.1	
<i>Respiration fractions for fluxes between compartments</i>		
Transfer from litter 1 to soil 1	0.39	
Transfer from litter 2 to soil 2	0.55	
Transfer from litter 3 to soil 3	0.29	
Transfer from soil 1 to soil 2	0.28	
Transfer from soil 2 to soil 3	0.46	
Transfer from soil 3 to soil 4	0.55	
<i>Base decomposition rate constants</i>		
Labile litter pool	0.7	d <sup>-1</sup>
Cellulose litter pool	0.07	d <sup>-1</sup>
Lignin litter pool	0.014	d <sup>-1</sup>
Fast microbial recycling pool	0.07	d <sup>-1</sup>
Medium microbial recycling pool	0.014	d <sup>-1</sup>
Slow microbial recycling pool	0.0014	d <sup>-1</sup>
Recalcitrant soil organic matter pool	0.0001	d <sup>-1</sup>
Physical fragmentation of coarse woody debris	0.001	d <sup>-1</sup>

---

Els esdeveniments fenològics poden ser imposats o calculats a partir de la temperatura de l'aire, la precipitació i la durada del dia, depenent del tipus d'ecosistema funcional, i afecten a la transferència de carboni i nitrogen (part del nitrogen present en les fulles es reserva per al creixement de la planta abans que les fulles caiguen) entre compartiments. El model presenta una forta dependència amb el clima i el LAI (Chen & Black, 1992), que es calcula diàriament en funció de la quantitat de carboni present en les fulles i se separa en dues components: la de les fulles ombrejades i la de les il·luminades pel sol (Jones, 1992). Aquesta separació afecta la l'absorbència de la radiació, el balanç hídric i els processos fotosintètics.

La precipitació arriba tant en forma de pluja com de neu. La pluja és interceptada per les fulles en primera instància i l'excés es trasllada a la reserva d'aigua del sòl. La neu és interceptada directament per la superfície del sòl i, si la temperatura és suficientment elevada per a fondre's, es trasllada a la reserva d'aigua del sòl. Si l'aigua entrant a la reserva del sòl és superior a la seua capacitat, que depèn de la seua textura, es produeix un primer escapament d'aigua. El potencial matricial del sòl es calcula a partir de la seua textura, la seua profunditat i de l'aigua que conté, i intervé en els processos d'evapotranspiració i fotosíntesi. El model té en compte l'evaporació de l'aigua retinguda per la coberta vegetal i la continguda en el sòl, la transpiració a través de les fulles i la sublimació de la neu interceptada per la superfície del sòl. L'últim procés depèn de la radiació incident i el calor latent de sublimació, mentre que els tres primers es calculen mitjançant l'equació de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Monteith & Unsworth, 2013; Penman, 1948). Aquesta equació utilitza dades meteorològiques (temperatura i pressió de l'aire, dèficit de pressió de vapor i radiació incident) i característiques de la superfície (resistència al flux de vapor d'aigua i resistència al flux de calor sensible) per a calcular un balanç energètic instantani (diari en el cas del Biome-BGC). La taxa d'evaporació es calcula com la diferència entre l'energia proporcionada per la radiació incident i la pèrdua d'energia en forma de calor sensible per convecció. En el cas de l'evaporació de l'aigua del sòl, ambdues resistències es calculen aplicant una correcció depenent de la temperatura i la pressió de l'aire a una resistència de referència. En el cas de l'evaporació de l'aigua interceptada per la coberta vegetal, ambdues resistències són iguals a la resistència al flux de vapor d'aigua de la capa límit de les fulles. En el cas de la transpiració, la resistència al flux de vapor d'aigua depèn de les conductàncies estomàtica i cuticular. A més, la conductància estomàtica màxima es multiplica per quatre escalars que prenen valors entre 0 i 1 i depenen de la densitat de flux de fotons, del potencial matricial del sòl, de la temperatura mínima de l'aire i del dèficit de pressió de vapor, respectivament. Finalment, si la quantitat d'aigua romanent en el sòl supera la seua capacitat de camp, que depèn de la seua textura, es produeix un segon escapament

d'aigua. Sempre que es produeix un escapament d'aigua, el 10 % del nitrogen contingut en el sòl s'elimina per drenatge.

La fotosíntesi és l'únic procés del model que aporta carboni a les reserves i depèn del contingut de nitrogen en les fulles i en l'enzim RuBisCo (ribulosa-1,5-bisfosfat carboxilasa/oxygenasa), la temperatura de l'aire, la PAR absorbida, la respiració autòtrofa de manteniment  $R_{mn}$  i la diferència entre les pressions parcials de  $CO_2$  interna i externa. La  $R_{mn}$  és proporcional al nitrogen contingut en els teixits i funció de la temperatura de l'aire de manera que, per cada variació de 10 °C, la  $R_{mn}$  varia un factor  $Q_{10}$ . El model considera tres processos capaços de limitar la fotosíntesi (la difusió de  $CO_2$ , la taxa de carboxilació i el transport d'electrons) i planteja un sistema de tres equacions acoblades que representen cadascun d'ells. La difusió de  $CO_2$  és la velocitat a la que aquest entra en la fulla a través dels estomes i l'equació corresponent expressa l'assimilació de carboni com el producte entre la conductància estomàtica i la diferència entre les pressions parcials de  $CO_2$  interna i externa. La carboxilació consisteix en fixar tres molècules de  $CO_2$  a un esquelet de carboni mitjançant l'enzim RuBisCo amb la ribulosa-1,5-bisfosfat (RuBP) com a substrat. En aquest cas, l'equació corresponent expressa l'assimilació de carboni en funció de la taxa màxima de carboxilació, el punt de compensació de  $CO_2$ , la pressió parcial interna de  $CO_2$ , la pressió parcial externa de  $O_2$ , les constants cinètiques de carboxilació i oxigenació del RuBisCo i la  $R_{mn}$  diürna. El transport d'electrons afecta la regeneració de la RuBP i l'equació corresponent relaciona l'assimilació de carboni amb la taxa màxima de transport d'electrons, la pressió parcial interna de  $CO_2$ , el punt de compensació de  $CO_2$  i la  $R_{mn}$  diürna. Per a resoldre el sistema, s'aïlla la pressió parcial interna de  $CO_2$  en la primera equació i se substitueix en les altres dues. Després es resolen les dues equacions quadràtiques resultants i s'escull l'assimilació de carboni com la mínima de les dues solucions. El carboni assimilat final és la suma de les components ombrejada i il·luminada i, a partir d'ell, es calcula la GPP. Més detalls es poden trobar als treballs de Farquhar *et al.* (1980), Woodrow & Berry (1988) i De Pury & Farquhar (1997).

Pel que fa a la descomposició, el model considera diferents compartiments de residus (fullaca i altres teixits morts) segons el material dominant en cadascun d'ells. A cada compartiment se li apliquen unes taxes de referència per a modelitzar la descomposició (passant als corresponents compartiments de matèria orgànica del sòl) i la pèrdua de biomassa via la respiració heteròtrofa  $R_{het}$ . Les taxes de referència es redueixen prèviament multiplicant-les per dos escalars que depenen de la temperatura del sòl (calculada a partir de la temperatura de l'aire) i del seu potencial matricial, respectivament. Finalment es calculen els ràtios carboni-nitrogen (C/N) de cada compartiment, tant de residus (que perden carboni) com de matèria orgànica del sòl (que accepten matèria descomposta) i, a partir d'ells, el nitrogen immobilitzable potencial, és a

dir, la quantitat potencial de nitrogen inorgànic present en el sòl que pot convertir-se en nitrogen orgànic.

Per a determinar la distribució de carboni entre les diferents parts de la planta, primer es calcula la quantitat de carboni disponible com la diferència entre la GPP i la  $R_{mn}$ . Després es calcula la quantitat de carboni necessària per al creixement en cadascuna de les parts de la planta en funció de la quantitat necessària per al creixement de les fulles. La respiració de creixement  $R_{gr}$  es calcula com el 30 % del carboni utilitzat per a la formació de nous teixits. A partir d'aquesta al·lometria i dels C/N es calcula el nitrogen necessari per al creixement. Finalment, si les quantitats de nitrogen reservat per al creixement de la planta i per a la immobilització (procés biològic que duen a terme els microorganismes del sòl) no són suficients per a satisfer les demandes de la planta i del sistema, s'apliquen taxes que redueixen els processos de distribució de carboni i descomposició, respectivament.

Aquest model s'utilitza al capítol 6.

### 2.3 Càlcul de fluxos de carboni *in situ*

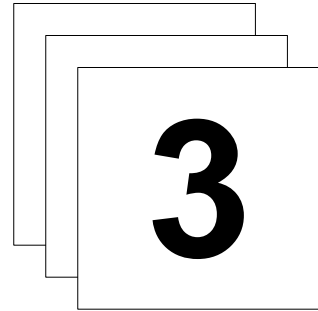
A l'atmosfera ocorren moviments turbulents de masses d'aire que circulen amunt i avall transportant, entre altres gasos,  $CO_2$ . El mètode micrometeorològic basat en la covariància turbulenta (EC) determina l'intercanvi net de  $CO_2$  en la interfície entre l'atmosfera i la coberta vegetal mitjançant la covariància entre la component vertical de la velocitat de les masses d'aire i la ràtio de mescla del  $CO_2$ . Per a això, combina mesures espectrals per a l'estimació de la concentració atmosfèrica de  $CO_2$  amb mesures de la velocitat del vent en totes les direccions. Com que no és possible mesurar la GPP directament, s'ha de estimar a partir de les mesures de l'NEP i la respiració total. Primer s'obté la respiració nocturna, ja que per la nit les plantes no realitzen la fotosíntesi i, per tant, la GPP és nul·la. Després s'aplica una correcció a la respiració nocturna per a obtenir la diürna i, a partir d'aquesta i l'NEP, s'obté la GPP. Les circumstàncies ideals per a aplicar el mètode EC són (i) unes condicions atmosfèriques (velocitat del vent, temperatura de l'aire, humitat i concentració de  $CO_2$ ) estables, (ii) una coberta vegetal homogènia i (iii) una superfície plana que s'estenga en contra de la direcció del vent. Quan aquestes condicions no es compleixen s'han de considerar l'emmagatzemament atmosfèric de  $CO_2$ , la divergència dels fluxos i l'advecció (moviment horitzontal de masses d'aire), i la precisió del mètode disminueix. En aquesta tesi s'utilitzen estimacions de GPP i NEP mitjançant aquest mètode en quatre llocs de validació (capítol 3) per a validar els resultats obtinguts. Tanmateix, ni l'aplicació del mètode ni la investigació

---

sobre ell són objectius de la tesi i, per tant, no es considera necessari incloure una descripció més detallada. Per a més informació es recomana consultar els treballs de Baldocchi *et al.* (1988) i Baldocchi (2003), així com les tesis de Paredes (2013) i de Pardo (2015).

En l'actualitat, la tècnica EC està orientada a la mesura de llargues sèries temporals en diversos emplaçaments i xarxes internacionals. Potser per ser la més coneguda s'ha d'esmentar la xarxa FLUXNET (<http://www.fluxdata.org/default.aspx>) que, al seu torn, inclou diverses xarxes regionals com EUROFLUX, CARBOEUROPE, AmeriFLUX i ASIANFLUX.





## Àrea d'estudi i dades emprades

L'àrea d'estudi està constituïda pel territori peninsular espanyol. És una zona especialment interessant per a ser estudiada a través de dades de teledetecció a causa de la seua heterogeneïtat, tant a nivell de les condicions climàtiques com en relació als tipus de vegetació que es desenvolupen en ella, clarament influenciats per les primeres. En aquest capítol es dóna primer una descripció succinta de les característiques de l'àrea d'estudi més rellevants en el context d'aquesta recerca i, en segon lloc, una descripció d'unes zones concretes on se situen torres EC, que s'utilitzen en el procés de validació dels resultats. El capítol es completa enumerant totes les fonts d'informació que s'utilitzen posteriorment per a aconseguir els objectius proposats i el seu tractament preliminar. Aquestes inclouen tant dades EO com dades *in situ*.

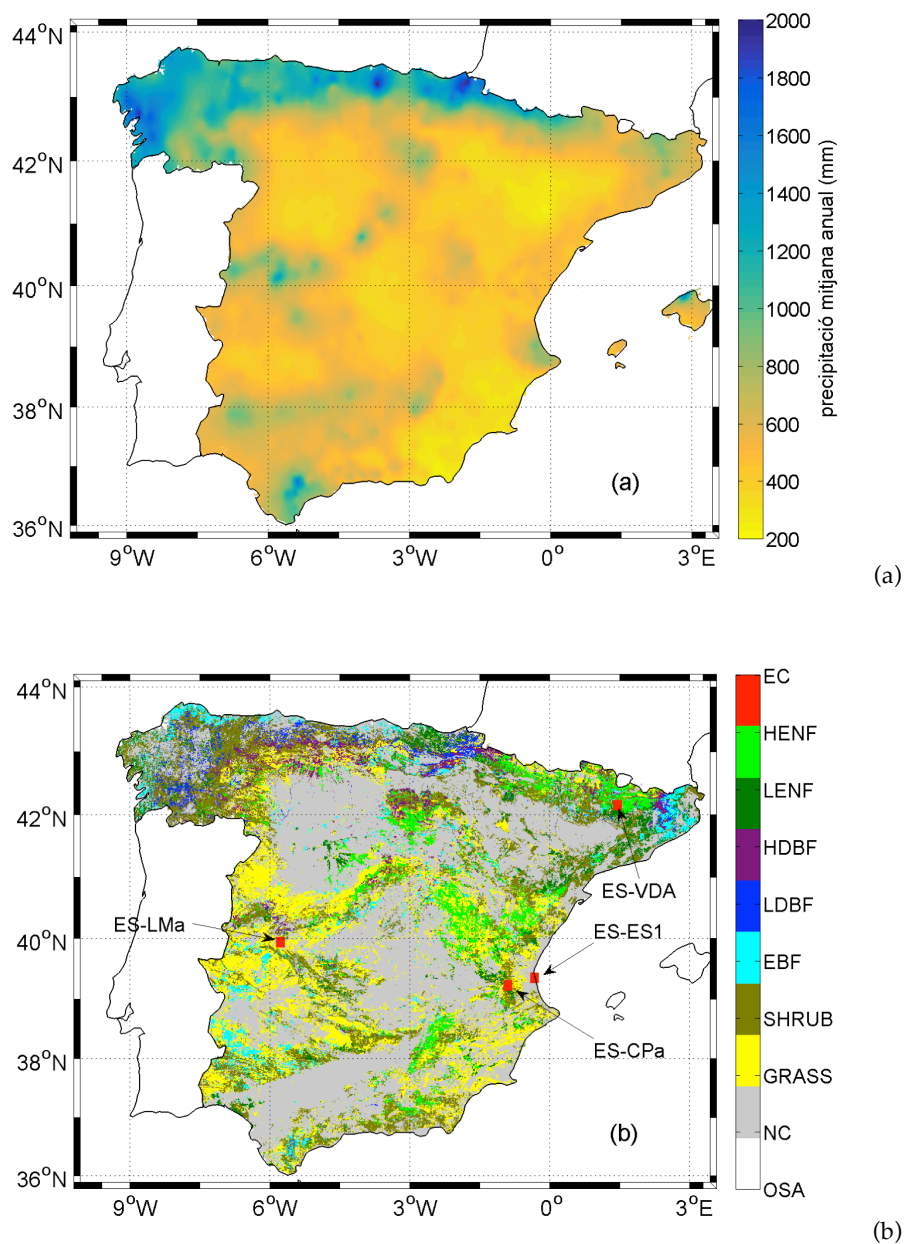
### 3.1 Descripció de l'àrea d'estudi

#### 3.1.1 Espanya peninsular

L'Espanya peninsular es troba al sud-oest d'Europa entre els 36 ° i els 44 ° de latitud i els -10 ° i els 3 ° de longitud aproximadament. La seua elevació oscil·la entre els 0 m i els 3479 m sobre el nivell del mar. Presenta diferents climes que segueixen un gradient nord-oest – sud-est amb clima atlàntic al nord-oest i semiàrid al sud-est. Les precipitacions anuals també ocorren d'una manera similar variant des de més de 2000 mm en el nord-oest a menys de 200 mm en el sud-est (figura 3.1 a). Durant l'hivern, el règim de precipitacions està dominat per l'advecció de masses d'aire procedents de l'oceà Atlàntic. Durant l'estiu, en canvi, tenen major protagonisme els episodis convectius. En la costa mediterrània en particular, el clima es caracteritza pels seus estius càlids i secs conseqüència d'anticiclons tropicals. En aquesta zona, la precipitació ocorre sobretot durant la tardor i la primavera. Solen produir-se episodis intensos de tipus convectiu (Immerzeel *et al.*, 2009).

Com a conseqüència de la localització geogràfica (zona de transició entre les regions eurosiberiana i mediterrània) i de la seua diversitat en relació al relleu, climes i característiques geològiques, l'àrea d'estudi (figura 3.1 b) presenta una gran varietat d'ecosistemes (Alcaraz *et al.*, 2006; Vicente-Serrano *et al.*, 2008). D'acord amb el *Tercer Inventario Forestal Nacional* (IFN3, 1997-2007, DGCN, 2006), de les 49 × 10<sup>6</sup> ha que ocupa l'àrea d'estudi, els ecosistemes forestals en cobreixen 27 × 10<sup>6</sup> ha, és a dir, un 55 % (segon país d'Europa per darrere de Suècia) i, d'aquestes, 18×10<sup>6</sup> ha són superfície arbrada (tercer país d'Europa per darrere de Suècia i Finlàndia), és a dir, un 37 % del territori aproximadament. D'aquest territori, les coníferes n'ocupen un 34 % i les frondoses un 46 %. Les espècies més abundants són, respectivament, *Pinus halepensis* i *Quercus ilex*. En superfície forestal desarbrada posseix més del 40 % dels matollars i les praderies d'Europa amb 9×10<sup>6</sup> ha. Aquestes formacions vegetals són pràcticament inexistents en molts països d'Europa i per això la Comissió Europea té un gran interès en protegir-les. La superfície forestal ha augmentat durant els últims 25 anys a un ritme de 180 000 ha a<sup>-1</sup> (Figura 3.2). Aquest augment es deu, segons l'estudi *Juntos por los Bosques* (<http://juntosporlosbosques.ingenierosdemontes.org/>), a dos motius: la repoblació forestal intencionada de terres agrícoles i l'expansió espontània dels boscos com a conseqüència de l'abandó rural.





**Figura 3.1.** (a) Precipitació mitjana anual durant el període 2005-2012. (b) Tipus de vegetació i llocs de validació. Llegenda: *non-classified* (NC), *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitude evergreen needleleaved forest* (HENF).

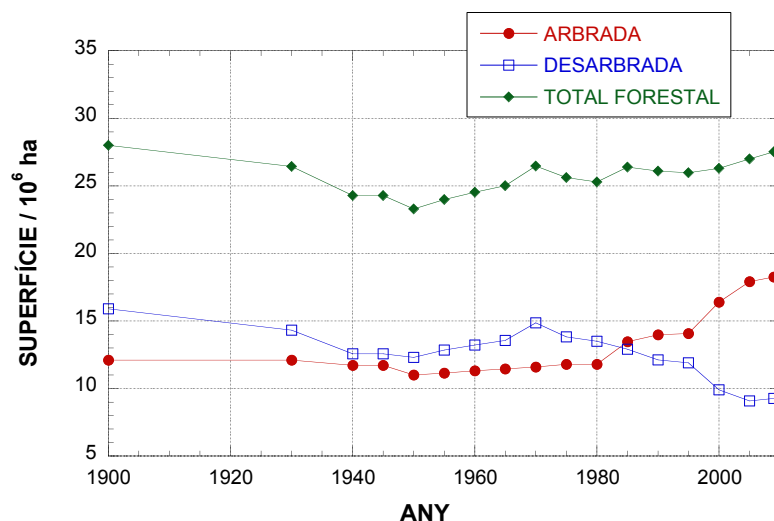


Figura 3.2. Evolució de la superfície forestal arbrada i desarbrada en Espanya durant l'últim segle. (Adaptada de <http://juntosporlosbosques.ingenierosdemontes.org/>)

### 3.1.2 Llocs de validació

En ocasions (capítols 4, 6 i 7), al llarg de la memòria, s'analitzen zones concretes on hi ha o ha hagut instal·lades torres EC. Aquestes zones s'utilitzen per a validar els resultats obtinguts. A continuació es descriuen les característiques més rellevants de les quatre zones escollides (taula 3.1). Cada zona s'identifica pel nom assignat a la torre EC que se situa en ella per la xarxa internacional FLUXNET (<http://fluxnet.fluxdata.org/sites/site-list-and-pages/>).

Taula 3.1. Informació descriptiva de les torres EC utilitzades en l'estudi i períodes de disponibilitat dels fluxos EC.

Lloc	lat (°)	lon (°)	<i>h</i> (m)	PRE (mm)	<i>T</i> (°)	PET (mm)	Tipus de vegetació	Període disponible
ES-CPa	39.2242	-0.9031	810	470	13	1310	Matollar obert	2009-2011
ES-ES1	39.3448	-0.3200	5	550	18	1450	Bosc perenne coníferes	2005-2006
ES-LMa	39.9403	-5.7746	260	650	17	1360	Devesa	2005-2012
ES-VDA	42.1511	1.4474	1770	1100	6	1010	Praderia	2005-2008

Nota: *h* és l'altitud, PRE la precipitació mitjana anual, *T* la temperatura mitjana anual de l'aire i PET l'evapotranspiració potencial mitjana anual.

**ES-CPa**

Matollar mediterrani de regeneració post-incendi situat en un altiplà a 810 m d'altitud a la província de València. Les espècies arbustives predominants són romer (*Rosmarinus officinalis* L.), argelaga (*Ulex parviflorus* Pourret), coscoll (*Quercus coccifera* L.), ginebre (*Juniperus oxycedrus* L.) i farigola (*Thymus vulgaris* L.). També hi conviuen espècies herbàcies anuals dominades pel llistó (*Brachypodium retusum*). La cobertura de matollar és d'entre un 50 % i un 60 % i, incloent l'herba, d'un 75 % aproximadament. El clima és mediterrani subàrid amb estius càlids i secs.

**ES-ES1**

Pinar mediterrani situat en un cordó litoral d'1 km d'amplada entre l'Albufera de València i la Mar Mediterrània a 5 m d'altitud a la província de València. La principal espècie arbòria, amb una alçada d'entre 10 m i 12 m, és el pi blanc (*Pinus halepensis* Mill.), encara que també es pot trobar pi pinyer (*Pinus pinea* L.) dispers. També hi conviuen espècies arbustives d'entre 1 m i 3 m d'alçada com llentisc (*Pistacia lentiscus* L.), coscoll (*Quercus coccifera* L.), aladern (*Rhamnus alaternus* L.), murta (*Myrtus comunis* L.), bruc d'hivern (*Erica multiflora* L.), estepa blanca (*Cistus albidus* L.) i estepa borrera (*Cistus salviifolius* L.). El clima és mediterrani subàrid amb estius càlids i secs, encara que també es pot considerar semiàrid mesotèrmic amb pràcticament nul excés d'aigua en hivern.

**ES-LMa**

Devesa d'alzines situada a 260 m d'altitud a la província de Càceres. La densitat arbòria és d'entre 20 i 25 arbres per hectàrea que resulta en una cobertura d'un 20 % aproximadament. L'única espècie arbòria és l'alzina (*Quercus ilex* L.) amb una alçada mitjana de 8 m. El sotabosc presenta una elevada biodiversitat on dominen espècies herbàcies anuals (gramínies como *Vulpia bromoides* L. i *Vulpia geniculata* L.), trèvol (*Trifolium subterraneum* L.) i ungl de canari (*Ornithopus compressus* L.). Aquestes espècies comencen a créixer a finals d'octubre i envelleixen a finals de maig. El clima és mediterrani subàrid amb estius càlids i secs, però amb hiverns relativament freds degut a la seua localització continental.

**ES-VDA**

Praderia de muntanya situada a 1770 m d'altitud a la província de Lleida. Les espècies dominants són les gramínies *Festuca nigrescens* L. i cua de rata (*Phleum pratense* L.). El

clima és subalpí amb hiverns freds, tardors i primaveres temperades i estius càlids. Generalment no esdevé mancança d'aigua.

## 3.2 Descripció de les dades

A continuació s'esmenten els conjunts de dades emprats al llarg de tot l'estudi i es descriu el seu contingut. S'explica també, en cada cas, el tractament preliminar que s'hi ha aplicat.

### 3.2.1 Dades puntuals

#### *Dades meteorològiques*

Estan constituïdes per sèries temporals diàries de temperatures de l'aire mínima ( $T_{\min}$ ) i màxima ( $T_{\max}$ ) i precipitació (PRE) mesurades en 400 estacions meteorològiques distribuïdes per l'Espanya peninsular cedides per l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMet, [www.aemet.es](http://www.aemet.es)) per al període 2005-2012.

Les sèries temporals de  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  i PRE van ser espacialitzades mitjançant la tècnica d'interpolació *ordinary kriging* (Alsamamra *et al.*, 2009) i, com a resultat, es van obtenir imatges d'1 km de resolució espacial per a l'Espanya peninsular. Aquestes imatges es van utilitzar com a inputs en xarxes neuronals artificials (Haykin, 1999) per a generar imatges de radiació solar incident global ( $R_g$ ) (Moreno *et al.*, 2011). Es van calcular imatges de  $T_m$  com la mitjana entre les imatges de  $T_{\min}$  i  $T_{\max}$ .

#### *Dades de torres EC*

Sèries temporals diàries de temperatura de l'aire mitjana ( $T_m$ ), precipitació i  $R_g$  mesurades en 4 torres EC que pertanyen a l'European Fluxes Database Cluster (EFDC, <http://www.europe-fluxdata.eu/>). Inclouen també dades de GPP i NEP estimades segons es descriu al capítol 1. Aquestes variables s'anomenen  $T_{m,EC}$ ,  $PRE_{EC}$ ,  $R_{g,EC}$ ,  $GPP_{EC}$  i  $NEP_{EC}$ , respectivament, per haver sigut mesurades o estimades en torres EC.

En els capítols 4 i 6 s'utilitzen sèries temporals de  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ,  $T_m$  i PRE extretes dels píxels que cobreixen els quatre llocs de validació de les imatges corresponents. En aquests casos, les sèries temporals esmentades en la subsecció anterior es van corregir per comparació amb les mesurades en les torres dels llocs de validació independentment per a cada lloc. Es va trobar una relació lineal entre  $T_m$  i  $T_{m,EC}$  i es va aplicar a  $T_m$ ,  $T_{\min}$  i  $T_{\max}$ .

En el cas de la precipitació, PRE es va multiplicar pel quocient entre les mitjanes de  $PRE_{EC}$  i PRE calculades amb les dades coincidents en ambdues sèries.

### *Dades de l'IFN3*

Estimacions de volum llenyós amb escorça (*growing stock volume, GSV*) de l'IFN3 (DGCN, 2006) disponibles a la web del *Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente* (MAPAMA, <http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>). L'IFN3 consta de més de 90000 punts de mostreig distribuïts regularment per tota Espanya sobre una malla d'1 km de costat. En cada punt de mostreig se situa una parcel·la que consta de quatre subparcel·les concèntriques amb radis de 5 m, 10 m, 15 m i 25 m. En cadascuna d'aquestes subparcel·les es mesuren, entre altres variables, l'alçada i el diàmetre normal a 130 cm del sòl (*diameter at breast height, DBH*), dels arbres amb  $75 \text{ mm} \leq \text{DBH} < 125 \text{ mm}$ ,  $125 \text{ mm} \leq \text{DBH} < 225 \text{ mm}$ ,  $225 \text{ mm} \leq \text{DBH} < 425 \text{ mm}$  i  $\text{DBH} \geq 425 \text{ mm}$ , respectivament. Les mesures es van prendre durant el període 1997-2007. El GSV s'estima a partir de l'alçada i el DBH dependent de l'espècie.

Les estimacions de GSV de l'IFN3 de totes les classes diamètriques van ser sumades per a cada parcel·la, ja que venen expressades per unitat de superfície després d'haver-hi aplicat un factor d'expansió que depèn, precisament, de la classe diamètrica, és a dir, de en quina subparcel·la es van prendre les mesures. Es van seleccionar 53928 parcel·les filtrant aquelles situades en boscos naturals amb cobertura arbòria igual o superior al 20 % en l'Espanya peninsular. També es van utilitzar les estimacions de GSV i el seu increment anual (*current annual increment, CAI*) a nivell provincial.

### **3.2.2 Dades distribuïdes espacialment**

#### *Productes MODIS*

Els productes MCD43A1, MCD43A2, MOD16A2, MOD0CGA, MOD13A2 i MOD17A3 es confeccionen a partir de mesures preses pel sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS, Salomonson *et al.*, 1989) a bord dels satèl·lits Terra i Aqua.

- ✓ MCD43A1 és un compost temporal de 16 dies produït cada 8 dies que conté els paràmetres  $k_0$ ,  $k_1$  i  $k_2$  de la funció de distribució bidireccional de la reflectància (*bidirectional reflectance distribution function, BRDF*) a 500 m de resolució espacial.
- ✓ MCD43A2 conté informació sobre la qualitat del producte anterior (Schaaf *et al.*, 2002).

- ✓ MOD16A2 (Mu *et al.*, 2013) és un compost temporal de 8 dies amb resolució espacial d'1 km que conté les evapotranspiracions real (*actual evapotranspiration*, AET) i potencial (*potential evapotranspiration*, PET) com a suma dels 8 dies, els calors latents real i potencial com a mitjana dels 8 dies i la informació sobre la qualitat de les dades.
- ✓ MOD0CGA (Vermote & Wolfe, 2015) es un producte diari amb 1 km de resolució espacial que conté les reflectàncies de les bandes 8 a la 16 i informació sobre la qualitat de les dades.
- ✓ MOD13A2 (Huete *et al.*, 2002) és un compost temporal de 16 dies amb una resolució espacial d'1 km que conté l'índex de vegetació de diferència normalitzada (*normalized difference vegetation index*, NDVI, Rouse *et al.*, 1973), l'índex de vegetació millorat (*enhanced vegetation index*, EVI, Huete *et al.*, 2002), les reflectàncies de les bandes 1 (roig), 2 (infraroig proper), 3 (blau) i 7 (infraroig mitjà), i informació sobre la qualitat de les dades.
- ✓ MOD17A3 (Running & Zhao, 2015) conté la GPP i l'NPP anuals a una resolució espacial d'1 km i la informació sobre la qualitat de les dades.

Aquests sis productes es van obtenir mitjançant el servei online Reverb, cortesia del NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, South Dakota, [reverb.echo.nasa.gov](http://reverb.echo.nasa.gov). En tots els casos, les quatre escenes necessàries per cobrir l'Espanya peninsular (*tiles* h17v04, h17v05, h18v04 i h18v05) es van unir en un únic mosaic.

La  $f_{\text{APAR}}$  es va calcular mitjançant l'algorisme proposat per Roujean & Bréon (1995) a partir d'una relació lineal amb l'índex de vegetació de diferència renormalitzada (*renormalized difference vegetation index*, RDVI),

$$\text{RDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}})^{1/2} \quad (3.1)$$

Al seu torn, les reflectàncies en l'infraroig proper ( $\rho_{\text{NIR}}$ ) i en el roig ( $\rho_{\text{R}}$ ) es calculen a partir dels paràmetres de la BRDF  $k_0$ ,  $k_1$  i  $k_2$  per a una geometria angular òptima al pla solar principal. Les imatges de  $f_{\text{APAR}}$  resultants es van reprojectar a coordenades geogràfiques amb una resolució espacial d'1 km. Posteriorment se'ls va aplicar un mètode per al farciment de buits i la reducció del soroll del senyal que depèn de la informació sobre la qualitat de les dades (Moreno *et al.*, 2014). Finalment es van interpolar temporalment per a obtenir valors diaris.

L'AET i la PET del producte MOD16A2,  $\text{AET}_{\text{MODIS}}$  i  $\text{PET}_{\text{MODIS}}$ , respectivament, es van interpolar temporalment mitjançant un filtre robust de tipus *local weighted scatterplot smoothing* (LOWESS) amb una finestra de 17 dies per a obtenir valors diaris. D'acord

amb la informació de qualitat de les dades, només es van utilitzar les dates de màxima qualitat lliures de núvols.

Les dates de màxima qualitat i lliures de núvols, d'acord amb la informació de la qualitat de les dades, de les bandes 12 (526-536 nm) i 11 (546-556 nm) del producte MOD0CGA es van utilitzar per a calcular l'índex de reflectància fotoquímica (*photochemical reflectance index*, PRI, Gamon *et al.*, 1992):

$$PRI = (\rho_{REF} - \rho_{531}) / (\rho_{REF} + \rho_{531}) \quad (3.2)$$

on  $\rho_{REF}$  i  $\rho_{531}$  són les reflectàncies en les bandes respectivament insensible (de referència) i sensible al cicle xantòfil (capítol 4). En aquest cas, s'utilitzen les bandes 11 i 12 com a banda sensible al cicle xantòfil i banda de referència, respectivament. Posteriorment, se li va aplicar un filtre LOWESS robust amb una finestra de 9 dies per a reduir el soroll del senyal i omplir els buits causats per l'eliminació de les dates amb baixa qualitat.

L'NDVI i l'EVI del producte MOD13A2 es van reprojectar a coordenades geogràfiques, se'ls va aplicar el mateix mètode per al farciment de buits i la reducció del soroll del senyal que a la  $f_{APAR}$  i també es van interpolar per tal d'obtindre valors diaris. Les sèries d'imatges resultants s'anomenen, respectivament,  $NDVI_{MODIS}$  i  $EVI_{MODIS}$ . La GPP del producte MOD17A3 ( $GPP_{MODIS}$  anual) es va reprojectar a coordenades geogràfiques filtrant els píxels amb la màxima qualitat.

### **Productes SEVIRI/MSG**

Els productes LSA-07, LSA-09, LSA-16 i LSA-17 s'estimen a partir de mesures preses pel sensor *Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager* (SEVIRI, Aminou, 2002) a bord del satèl·lit *Meteosat Second Generation* (MSG) dins la xarxa *Land Surface Analysis Satellite Application Facility* (LSA-SAF). LSA-07 conté el flux descendent d'ona curta que incideix sobre la superfície (*down-welling surface shortwave flux*, DSSF) estimat cada 30 minuts (LSA-SAF, 2011) i LSA-09 la seua versió integrada a escala diària (*daily integrated down-welling surface shortwave flux*, DIDSSF). LSA-16 (LSA-SAF, 2015) conté l'AET estimada cada 30 minuts (MET) i LSA-17 la seua versió integrada a escala diària (DMET). Els quatre productes presenten una resolució espacial de 3 km a nadir. Aquests quatre productes es van descarregar del servidor de la LSA-SAF, <http://landsaf.meteo.pf/>.

En el moment de realització de la tesi, els productes LSA-07 i LSA-16 cobrien períodes de temps diferents als coberts pels productes LSA-08 i LSA-17. LSA-08 i LSA-17 només estaven disponibles per als anys 2011 i 2012. En canvi, els productes LSA-07 i LSA-16 estaven disponibles des dels anys 2007 i 2009 respectivament. Per tant, DSSF i MET van ser integrats diàriament per a obtindre DIDSSF i DMET per als períodes 2007-2010 i 2009-2010 respectivament. Finalment, les imatges de DIDSSF i DMET es van retallar per a la

zona d'estudi i es van reprojectar a coordenades geogràfiques amb una resolució espacial d'1 km. A les imatges de DMET se'ls anomena  $AET_{SEVIRI}$ . Es va obtenir una relació entre els valors de les imatges de DIDSSF i els valors de les imatges de  $R_g$  obtingudes a partir de les imatges de  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  i PRE (secció 3.2.1). Aquesta relació es va aplicar a les imatges de  $R_g$  i amb elles es van omplir els buits de les imatges de DIDSSF i el període 2005-2006 complet. Com a resultat es van obtenir imatges de DIDSSF per al període 2005-2012, a les que s'anomena  $R_{g,SEVIRI}$ . Les imatges  $R_{g,SEVIRI}$  i  $T_m$  es van utilitzar per a calcular imatges de PET en  $mm\ d^{-1}$  mitjançant l'equació proposada per Jensen & Haise (1965):

$$PET_{J-H} = R_{g,SEVIRI} (0.025 T_m + 0.08) / 2450 \quad (3.3)$$

amb  $R_{g,SEVIRI}$  en  $kJ\ m^{-2}\ d^{-1}$  i  $T_m$  en  $^{\circ}C$ . També es van calcular imatges de PAR en  $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$  com el 46 % de la  $R_{g,SEVIRI}$  (Iqbal, 1983).

#### *Productes MIRAS/SMOS*

El producte L4SMv3D (Piles *et al.*, 2014) proporcionat pel *Barcelona Expert Center* (BEC, [bec.icm.csic.es](http://bec.icm.csic.es)) conté la humitat del sòl (*soil moisture*, SM) als primers 5 cm de profunditat a 1 km i 3 dies de resolucions espacial i temporal respectivament sobre la Península Ibèrica. S'estima mitjançant la combinació d'observacions del sensor *Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis* (MIRAS, McMullan *et al.*, 2008) a bord del satèl·lit *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS, Kerr *et al.*, 2001) i del sensor MODIS. Per a obtenir valors diaris del producte L4SMv3D, es va aplicar un filtre LOWESS amb un polinomi de segon grau i una finestra d'11 dies a les sèries temporals. A l'apèndix A es compara el producte L4SMv3D amb altres productes d'SM i altres mètodes de filtrat.

#### *Productes Landsat*

Totes les escenes disponibles de Landsat-5 TM i Landsat-7 ETM+ (Markham *et al.*, 2004), d'ara endavant anomenades Landsat, necessàries per a cobrir la península Ibèrica durant el període de l'IFN3 (1997-2007) es van descarregar de l'USGS/EROS a través de *Google Earth Engine* (GEE, Gorelick *et al.*, 2017), 8181 en total. GEE és una ferramenta que permet l'anàlisi i la visualització de dades geoespacionals a escala planetària amb un arxiu històric d'imatges de satèl·lit enregistrades pels sensors de l'USGS des més de quaranta anys que s'actualitza cada dia. Les dades descarregades contenen les reflectàncies de les bandes 1-5 i 7, que mesuren en les regions del visible, de l'infraroig proper i de l'infraroig d'ona curta de l'espectre electromagnètic. Aquestes reflectàncies estan corregides atmosfèricament utilitzant l'algorisme *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS, Masek *et al.*, 2013; Schmidt *et al.*, 2013), que inclou màscares per a



núvols, ombres, aigua i neu. Les seues resolucions espacial i temporal són, respectivament, 30 m i 16 dies.

Segons Ju & Roy (2008), el 35 % de les escenes Landsat registrades es veuen afectades pels núvols. Per tal d'obtenir sèries d'imatges lliures de núvols, es va construir una mena de sèrie típica combinant de les reflectàncies compreses en el període d'11 anys de l'IFN3, que permet omplir els buits en absència de dades. Es va utilitzar la informació sobre la qualitat de les dades per a emmascarar els valors lliures de núvols i ombres seguint un criteri de màxima confiança i, a partir d'ells, es va produir un conjunt de dades amb resolució temporal mensual (Hansen et al., 2013; Potapov et al., 2012).

### Altres

- ✓ Sèries temporals horàries de temperatura de l'aire i humitat específica proporcionades per la *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO, Rienecker et al., 2008) a  $0.5^\circ \times 0.67^\circ$  de resolució espacial. Valors diürns de temperatura de l'aire i diaris d'humitat específica es van obtenir, respectivament, de les sèries horàries inicials. La pressió de vapor saturat diürna es va calcular a partir de la temperatura de l'aire diürna i la pressió de vapor diària a partir de la humitat específica diària. Finalment, el dèficit de pressió de vapor (*vapor pressure deficit*, VDP, Anderson, 1936; Guyot, 1998) es va calcular com la diferència entre la pressió de vapor saturat diürna i la pressió de vapor diària, tal com s'explica a Running & Zhao (2015).
- ✓ Mapes de la proporció d'argila, sorra i llim en el sòl a 500 m de resolució espacial (Ballabio et al., 2016) proporcionats per l'*European Soil Data Center* (ESDAC, <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/european-soil-database-soil-properties>). Aquests mapes es van reprojectar a coordenades geogràfiques amb una resolució espacial d'1 km i retallar per a la zona d'estudi.
- ✓ El model digital d'elevació (*digital elevation model*, DEM) amb una resolució espacial de 3 segons d'arc (aproximadament 90 m) produït per la *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, Farr et al., 2007), disponible a la web <http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data>. Un mapa d'elevació es va extraure a partir del DEM de l'SRTM. Es van corregir els valors problemàtics mitjançant la triangulació de Delaunay i la capa resultant es va reprojectar a coordenades geogràfiques amb 1 km de resolució espacial i retallar per a l'àrea d'estudi.
- ✓ La base de dades de cobertura del sòl del *Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España* (SIOSE) proporcionada per ©*Instituto Geográfico Nacional* (IGN, 2011). Es tracta d'una base de dades de polígons a alta resolució espacial (escala

cartogràfica 1:25000) construïda mitjançant la fotointerpretació i digitalització de dades de referència com les imatges SPOT5 i Landsat-5 TM i dades suplementàries locals. Conté, per a cada polígon, el percentatge de superfície ocupada per cadascuna de les classes presents.

Les dades de SIOSE es van reprojectar a coordenades geogràfiques i rasteritzar per tal de construir una capa de 50 m de resolució espacial. La seua llegenda inicial es va reduir a les següents 18 classes: superfície artificial, aigua, aiguamoll, sòl nu, praderia, matollar, bosc de frondoses perenne, bosc de frondoses caducifoli, bosc de coníferes, pastura, conreus llenyosos, arbres fruitals, arbres de cítrics, vinya, oliverar, conreus de regadiu, arrossar i conreus de secà. Posteriorment es va re-escalar a una resolució espacial d'1 km. A partir d'aquestes 18 capes d'informació es va generar un mapa assignant a cada píxel la classe amb més percentatge d'ocupació. En aquest mapa es van emmascarar com a no classificat tots els píxels excepte aquells amb classe praderia, matollar, bosc de frondoses perenne, bosc de frondoses caducifoli o bosc de coníferes. Amb l'ajuda del mapa d'elevació, les classes bosc de frondoses caducifoli i bosc de coníferes es van subclassificar cadascuna en dues classes segons la seua elevació: baixa elevació quan l'elevació és igual o inferior a 800 m i alta elevació quan aquesta és superior a 800 m. D'aquesta manera la llegenda final amb només 8 classes (figura 3.1), en anglès per coherència amb la bibliografia, és aquesta: *non-classified* (NC), *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitude evergreen needleleaved forest* (HENF).

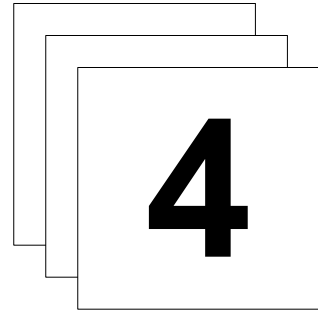
A continuació es mostra una taula resum amb les dades que s'utilitzen al llarg de la tesi després del processament preliminar.

**Taula 3.2.** Resum dels conjunts de dades utilitzats al llarg de l'estudi, amb indicació dels capítols on apareixen.

Nom	Espacial / puntual	Procedència	Capítol
$T_{\min, AEMET}$	Espacial	AEMet *	4, 6
$T_{\max, AEMET}$	Espacial	AEMet *	4, 6
$T_{m, AEMET}$	Espacial	AEMet *	4
PRE	Espacial	AEMet *	4, 6
$GPP_{EC}$	Puntual	EFDC	4, 6
$NEP_{EC}$	Puntual	EFDC	7
GSV	Puntual	IFN3	7
CAI	Puntual	IFN3	7
$f_{APAR}$	Espacial	LP DAAC *	4
$AET_{MODIS}$	Espacial	LP DAAC	4
$PET_{MODIS}$	Espacial	LP DAAC	4
PRI	Espacial	LP DAAC *	4
$NDVI_{MODIS}$	Espacial	LP DAAC	5
$EVI_{MODIS}$	Espacial	LP DAAC	5
$GPP_{MODIS}$ anual	Espacial	LP DAAC	5
$R_{g, SEVIRI}$	Espacial	LSA-SAF	4, 5, 6
$AET_{SEVIRI}$	Espacial	LSA-SAF	4
PAR	Espacial	AEMet * i LSA-SAF *	4
$PET_{J-H}$	Espacial	AEMet * i LSA-SAF *	4
L4SMv3	Espacial	SMOS-BEC	4
VPD	Espacial	GMAO *	4
Mapes argila, sorra i llim	Espacial	ESDAC	6
Mapa d'elevació	Espacial	SRTM *	6
Mapa de tipus de vegetació	Espacial	IGN i SRTM *	4, 6, 7
Landsat	Espacial	USGS/EROS	7

(\*) En aquests casos, les variables ofertes pel producte inicial són diferents de la variable utilitzada en la tesi (obtinguda a partir de les primeres) o s'ha aplicat un mètode per a espacialitzar-les.





# Implementació de l'efecte de l'estrès hídric en el model de Monteith

Com es menciona al capítol 2, la contribució d'aquesta tesi al PEM descrit al mateix capítol radica en la implementació de l'escalar responsable de l'efecte de l'estrès hídric,  $\varepsilon_w$ . És en aquest capítol on es duu a terme la tasca.

En particular, s'avaluen sis escalars per a caracteritzar l'efecte de l'estrès hídric sobre la  $\varepsilon$  diària en ecosistemes mediterranis utilitzant dades EO i la menor quantitat possible de dades auxiliars. Els sis escalars ( $\varepsilon'_i$  amb  $i = 1, \dots, 6$ ) es comparen amb una  $\varepsilon$  de referència ( $\varepsilon_{REF}$ ) calculada combinant mesures de  $R_g$  ( $R_{g,EC}$ ) i estimacions de GPP ( $GPP_{EC}$ ) als llocs de validació amb la  $f_{APAR}$  derivada a partir de mesures de satèl·lit (capítol 3). Posteriorment s'analitza l'efecte de cadascun dels sis escalars en la GPP diària quan aquests s'implementen en el PEM descrit al capítol 2. Finalment es discuteix quins són els més adequats per a la seua inclusió en una metodologia operativa per a l'estimació de la GPP

diària en l'àrea d'estudi i se n'escull un amb el que es calculen imatges de GPP diària en l'àrea d'estudi per al període 2005-2012.

La metodologia s'aplica en els llocs de validació descrits en el capítol 3. Els inputs necessaris per al càlcul dels diferents  $\varepsilon'_i$  i les dades mesurades i estimades als llocs de validació estan disponibles en períodes no coincidents. Per tant, en cada lloc de validació s'han utilitzat dades de períodes diferents, però coincidents per a tots els  $\varepsilon'_i$  considerats. És a dir, es considera cada lloc EC com un experiment independent. Els dies considerats en cada cas varien entre 532 amb la GPP en ES-CPa i 950 amb la LUE en ES-LMa.

La metodologia utilitzada en aquest capítol es va publicar en

Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., Gilabert, M.A., 2017. Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data, *International Journal of Digital Earth*, 10:6, 623–638, doi: 10.1080/17538947.2016.1247301

Nogensmenys, els resultats obtinguts són diferents als presentats en aquesta tesi pels següents motius: (a) en aquesta tesi el PEM inclou també un escalar responsable de l'estrès tèrmic ( $\varepsilon_T$ ); (b) els llocs de validació no coincideixen (en l'article s'utilitzen ES-CPa i ES-LMa, però no ES-ES1 ni ES-VDA; en la tesi no s'utilitza ES-LJu); i (c) en l'article es van utilitzar totes les dates disponibles per a cada escalar  $\varepsilon'_i$  en cada torre, mentre que en la tesi només les coincidents de tots els escalars disponibles en cada torre.

#### **4.1 Caracterització de l'estrès hídric en el PEM: descripció dels escalars**

Durant les últimes tres dècades, l'estrès hídric s'ha implementat en els PEMs de diferents maneres. El model CASA (Potter *et al.*, 1993), que estima l'NPP mensual a escala global, utilitza la precipitació (PRE) i l'evapotranspiració potencial (PET) per al càlcul de la humitat del sòl (SM). Maselli *et al.* (2009a) també les van utilitzar per a modelitzar l'efecte a curt termini de l'estrès hídric estival sobre la GPP mensual dels boscos mediterranis en Itàlia. El model GLO-PEM (Cao *et al.*, 2004) utilitza el dèficit de pressió de vapor (VPD) i l'SM com a inputs de dos dels escalars reductors de la  $\varepsilon$ . Els models VPM (Xiao *et al.*, 2004a, 2004b) i PCM (Gao *et al.*, 2014) utilitzen l'índex d'aigua de diferència normalitzada (*Normalized Difference Water Index*, NDWI), una diferència normalitzada entre les reflectàncies de l'infraroig proper i l'infraroig d'ona curta (Gao, 1996), per a caracteritzar l'estrès hídric en la GPP. El model de MODIS, MOD17 (Heinsch *et al.*, 2006; Running & Zhao, 2015), utilitza el VPD per a estimar la GPP i l'NPP globals des de l'any 2000. El

model C-Fix (Veroustraete *et al.*, 2002) utilitza la fracció evaporativa i l'SM per a millorar les estimacions d'NPP en diferents escenaris de limitació hídrica (Verstraeten *et al.*, 2006). El model EC-LUE (Yuan *et al.*, 2007) també utilitza la fracció evaporativa com a escalar reductor de la  $\epsilon$  per a l'estimació de la GPP diària.

Com s'ha esmentat abans, en aquest capítol s'avaluen sis escales ( $\epsilon'_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ ) per a caracteritzar l'efecte de l'estrès hídric sobre la  $\epsilon$  diària en ecosistemes mediterranis utilitzant dades EO i la menor quantitat possible de dades auxiliars. Els escales  $\epsilon'_1$ ,  $\epsilon'_2$  i  $\epsilon'_3$  es basen en un balanç hídric calculat com la ràtio entre l'evapotranspiració real (AET) i la PET que representen, respectivament, les condicions hídriques real i ideal de la vegetació. Aquest raonament es fonamenta en que l'obertura estomàtica en les plantes regula tant els fluxos de  $\text{CO}_2$  com de  $\text{H}_2\text{O}$  (Monson & Baldocchi, 2014). Quan la humitat relativa atmosfèrica disminueix, els estomes estrenyen la seua obertura per a reduir la conductància estomàtica i evitar la transpiració del  $\text{H}_2\text{O}$  des de l'interior de la planta cap a l'atmosfera. Per tant, es pot assumir que una reducció en la transpiració respecte de la transpiració en condicions hídriques favorables implica una reducció en l'assimilació de  $\text{CO}_2$  i, conseqüentment, una reducció de la fotosíntesi.

Com que les plantes generalment necessiten extraure el  $\text{H}_2\text{O}$  del sòl mitjançant les seues arrels,  $\epsilon'_4$  utilitza l'SM escalada per dos punts característics de la corba de retenció d'SM, és a dir, la relació entre l'SM i el potencial hídric del sòl pròpia de cada sòl: (1) la capacitat de camp (*field capacity*, FC) és la quantitat d'aigua retinguda en el sòl quan la taxa de drenatge causat per forces gravitatòries s'ha reduït tant que es pot considerar negligible (Colman, 1944; Hunt *et al.*, 2009; Romano *et al.*, 2011; Veihmeyer & Hendrickson, 1949, 1931); i (2) el punt de marcimient (*wilting point*, WP) és la quantitat d'aigua romanent en el sòl quan les partícules del sòl la retenen amb tanta força que les plantes no la poden extraure (Assouline & Or, 2014; Hunt *et al.*, 2009; Veihmeyer & Hendrickson, 1949). Tant l'FC com el WP són, com la corba de retenció d'SM, únics per a cada sòl. L'FC no és una constant ni un punt d'equilibri perquè l'aigua continua drenant-se, però a un ritme molt més baix respecte al que ocorre immediatament després de la saturació del sòl o comparat amb el ritme al que les plantes poden extraure-la. Aquest punt se sol assolir entre 2 i 3 dies després de que el sòl arribe a condicions de saturació, bé per un esdeveniment de precipitació o bé per irrigació. El WP està àmpliament acceptat per la comunitat científica com la quantitat d'aigua romanent en el sòl quan les partícules d'aquest el retenen amb un potencial de  $-1.5 \times 10^6$  Pa, encara que existeixen plantes que poden extraure aigua per davall d'aquest límit. Per tant, el WP tampoc és estrictament un valor constant. A partir d'aquestes definicions es pot considerar que les plantes comencen a patir estrès hídric quan l'SM és inferior a l'FC i estan totalment estressades, fins al punt de no poder recuperar la turgidesa, quan l'SM és inferior al WP.

$\varepsilon'_5$  és l'índex de reflectància fotoquímica (PRI). El PRI (Gamon *et al.*, 1992) es basa en la resposta espectral de la dissipació d'energia regulada pel cicle xantòfil (Demmig-Adams, 1990): quan la fulla rep una il·luminació sobtadament excessiva, tres xantofil·les es veuen involucrades en la dissipació d'aquest excés d'energia per a protegir l'aparell fotosintètic; per de-epoxidació, la violaxantina es transforma en anteraxantina i, finalment, en zeaxantina; aquest procés es reverteix per epoxidació en períodes des de minuts fins a dies quan l'APAR deixa de ser excessiva. La zeaxantina és la principal responsable de la dissipació d'energia i competeix amb l'energia d'excitació. En conseqüència, la  $\varepsilon$  es redueix. Les xantofil·les són un grup de carotenoides, pigments vegetals liposolubles fotosintètics, que contenen almenys un àtom d'oxigen a la seua estructura. L'increment de la quantitat de zeaxantina provoca canvis en les propietats òptiques de les fulles. Concretament un augment en la seua absorbància centrat en 505 nm (Bilger *et al.*, 1989) i un augment en la seua reflectància centrat en 531 nm (Gamon *et al.*, 1990). El PRI es calcula com una diferència normalitzada entre la reflectància en una banda centrada al voltant de 531 nm i una banda de referència insensible als efectes del cicle xantòfil. L'APAR pot resultar excessiva també a nivells baixos en presència d'altres factors ambientals. Per això la quantitat de zeaxantina és un potencial indicador de qualsevol estrès (o la combinació dels que estiguen actius), no només de l'hídric.

$\varepsilon'_6$  es basa en el VPD, que és la diferència entre la quantitat de vapor d'aigua present a l'atmosfera i la quantitat que aquesta podria contindre sense condensar a la mateixa temperatura (Anderson, 1936; Guyot, 1998) i s'ha demostrat la seua relació amb la  $\varepsilon$  (Stockle & Kiniry, 1990).

## 4.2 Metodologia

En la taula 4.1 es resumeix la descripció dels sis  $\varepsilon'_i$  i s'indica el procediment per al seu càlcul. La diferència entre els tres primers escalars radica en els inputs que utilitzen.  $\varepsilon'_1$  utilitza la PRE en lloc de l'AET. Quan la PRE és major que la PET,  $\varepsilon'_1$  pren el valor 1 (Maselli *et al.*, 2014, 2009a). L'ús de la PRE fa necessària l'acumulació retrospectiva tant de la PRE com de la PET abans de calcular el seu ràtio per a proporcionar informació sobre la disponibilitat d'aigua a partir dels esdeveniments de PRE passats. Els períodes d'acumulació són 30 dies, 45 dies, 45 dies i 60 dies per a praderia, matollar, devesa, i bosc, respectivament (Maselli *et al.*, 2013, 2009a; Potter *et al.*, 1993; Sánchez-Ruiz *et al.*, 2014). La PET en  $\varepsilon'_1$  i  $\varepsilon'_2$  es calcula a partir de  $R_{g,SEVIRI}$  i  $T_{m,AEMET}$  mitjançant l'equació 3.3 ( $PET_{J-H}$ ) com s'explica al capítol 3.  $\varepsilon'_2$  utilitza l'AET<sub>SEVIRI</sub>, mentre que  $\varepsilon'_3$  utilitza l'AET<sub>MODIS</sub> i la PET<sub>MODIS</sub>.



**Taula 4.1.** Descripció dels sis  $\varepsilon'_i$ . La descripció dels conjunts de dades utilitzats en cada cas es troba al capítol 3.

Escalar $\varepsilon'_i$	Descripció
$\varepsilon'_1 = \text{PRE}/\text{PET}_{\text{J-H}}$	PRE és la precipitació en $\text{mm m}^{-2} \text{d}^{-1}$ . PET <sub>J-H</sub> és l'evapotranspiració potencial en $\text{mm m}^{-2} \text{d}^{-1}$ calculada mitjançant l'equació 3.2.
$\varepsilon'_2 = \text{AET}_{\text{SEVIRI}}/\text{PET}_{\text{J-H}}$	AET <sub>SEVIRI</sub> és l'evapotranspiració real en $\text{mm m}^{-2} \text{d}^{-1}$ obtinguda a partir del producte DMET.
$\varepsilon'_3 = \text{AET}_{\text{MODIS}}/\text{PET}_{\text{MODIS}}$	AET <sub>MODIS</sub> és l'evapotranspiració real en $\text{mm m}^{-2} \text{d}^{-1}$ obtinguda a partir del producte MOD16A2. PET <sub>MODIS</sub> és l'evapotranspiració potencial en $\text{mm m}^{-2} \text{d}^{-1}$ obtinguda a partir del producte MOD16A2.
$\varepsilon'_4 = (\text{SM} - \text{WP})/(\text{FC} - \text{WP})$	SM és la humitat del sòl en els primers 5 cm de profunditat en $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . WP és el punt de marcimnt en $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . FC és la capacitat de camp en $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . Les tres variables es van obtenir a partir del producte L4SMv3. Si $\text{SM} > \text{FC}$ , $\varepsilon'_4 = 1$ Si $\text{SM} < \text{WP}$ , $\varepsilon'_4 = 0$
$\varepsilon'_5 = \text{PRI}$	PRI és l'índex de reflectància fotoquímica calculat aplicant l'equació 3.1 a les bandes 11 i 12 del producte MODOCGA.
$\varepsilon'_6 = n - m\text{VPD}$	VPD és el dèficit de pressió de vapor en Pa. Si $\text{VPD} < \text{VPD}_{\text{min}}$ , $\varepsilon'_6 = 1$ Si $\text{VPD} > \text{VPD}_{\text{max}}$ , $\varepsilon'_6 = 0$ VPD <sub>min</sub> i VPD <sub>max</sub> són constants que depenen del tipus de vegetació i s'utilitzen per a calcular $n$ i $m$ .

D'acord amb el raonament explicat en la secció anterior,  $\varepsilon'_4$  es defineix com

$$\varepsilon'_4 = (\text{SM} - \text{WP})/(\text{FC} - \text{WP}), \quad (4.1)$$

que quantifica la quantitat d'aigua retinguda en el sòl disponible per a que les plantes la puguin aprofitar (Kirkham, 2005). Així, quan  $\varepsilon'_4 > 1$  ( $\text{SM} > \text{FC}$ ), se suposa que la planta no pateix estrès hídric i se li assigna el valor 1; mentre que quan  $\varepsilon'_4 < 0$  ( $\text{SM} < \text{WP}$ ), se suposa que la planta està totalment estressada i se li assigna el valor 0. Amb la normalització (quocient de l'equació 4.1), necessària perquè FC i WP són característics de cada sòl, s'evita un possible biaix derivat de l'ús de l'SM sola (Sánchez-Ruiz *et al.*, 2014).  $\varepsilon'_4$  s'obté a partir de les sèries temporals d'SM, l'FC es va calcular com el 95è percentil,

mentre que el WP es va calcular com el 5è percentil (Hunt *et al.*, 2009; Martínez-Fernández *et al.*, 2016, 2015).

Per al càlcul del PRI es van utilitzar les reflectàncies de les bandes 11 (526-536 nm) i 12 (546-556 nm) del producte MODOCGA com a bandes sensible i insensible al cicle xantòfil, respectivament (equació 3.2). Finalment,  $\varepsilon'_6$  utilitza el VPD de la mateixa manera que l'algorisme del MOD17 (Running & Zhao, 2015):  $\varepsilon'_6$  és una funció rampa decreixent amb el valor de VPD que varia entre 0 i 1 limitada per dos valors llindar que depenen del tipus de vegetació.

Els sis escalars es van avaluar de dues maneres. Per una banda, es van comparar amb la  $\varepsilon_{REF}$ , calculada com

$$\varepsilon_{REF} = GPP_{EC} / (\varepsilon_T f_{APAR} PAR_{EC}), \quad (4.2)$$

on la  $PAR_{EC}$  és el 46 % de la  $R_{g,EC}$  i la  $f_{APAR}$  es va calcular a partir del producte MCD43 seguint l'algorisme proposat per Roujean & Bréon (1995) com s'explica al capítol 3. Cal destacar que aquesta  $\varepsilon_{REF}$  recull la contribució de la  $\varepsilon_{max}$  constant al llarg de tota la sèrie temporal, i de l'estrès hídric, que introdueix, per tant, la variació temporal.

Per altra banda, els escalars es van implementar en el PEM descrit al capítol 2 mitjançant l'equació 2.1 i la GPP resultant,  $GPP'_i$ , es va comparar amb la  $GPP_{EC}$ . Abans d'incloure's en el PEM (equació 2.1), els escalars  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$ ,  $\varepsilon'_3$ ,  $\varepsilon'_4$  i  $\varepsilon'_5$  es van reescalar entre 0.5 i 1 perquè es considera que part de la reducció de la  $\varepsilon$  causada per l'estrès hídric es manifesta a llarg termini i és registrada per la  $f_{APAR}$  (Maselli *et al.*, 2009a; Potter *et al.*, 1993; Squire *et al.*, 1986). En canvi, el rang de variació de  $\varepsilon'_6$  es va mantindre entre 0 i 1 per tal de no alterar la metodologia del MOD17. També es va calcular una GPP sense incloure l'escalar responsable de l'estrès hídric ( $\varepsilon_W$  en l'equació 2.1 i  $\varepsilon'_i$  en el present capítol) i se l'anomena  $GPP'_0$ .

## 4.3 Resultats

### 4.3.1 Avaluació de l'eficiència en l'ús de la radiació

Les figures 4.1–4.4 mostren les sèries temporals completes de la  $\varepsilon_{REF}$  i dels sis  $\varepsilon'_i$  en els llocs ES-CPa, ES-ES1, ES-LMa i ES-VDA, respectivament. En els quatre casos es pot comprovar que  $\varepsilon'_5$  presenta el rang de variació més estret, entre 0 i menys de 0.2, i que  $\varepsilon'_1$  i  $\varepsilon'_6$  són els escalars que més continuadament saturen a 1. També s'observa que  $\varepsilon'_3$  presenta la corba més suau, probablement degut a la interpolació temporal, seguit de  $\varepsilon'_1$  mentre que la resta d'escalars presenten variacions més agudes a curt termini.

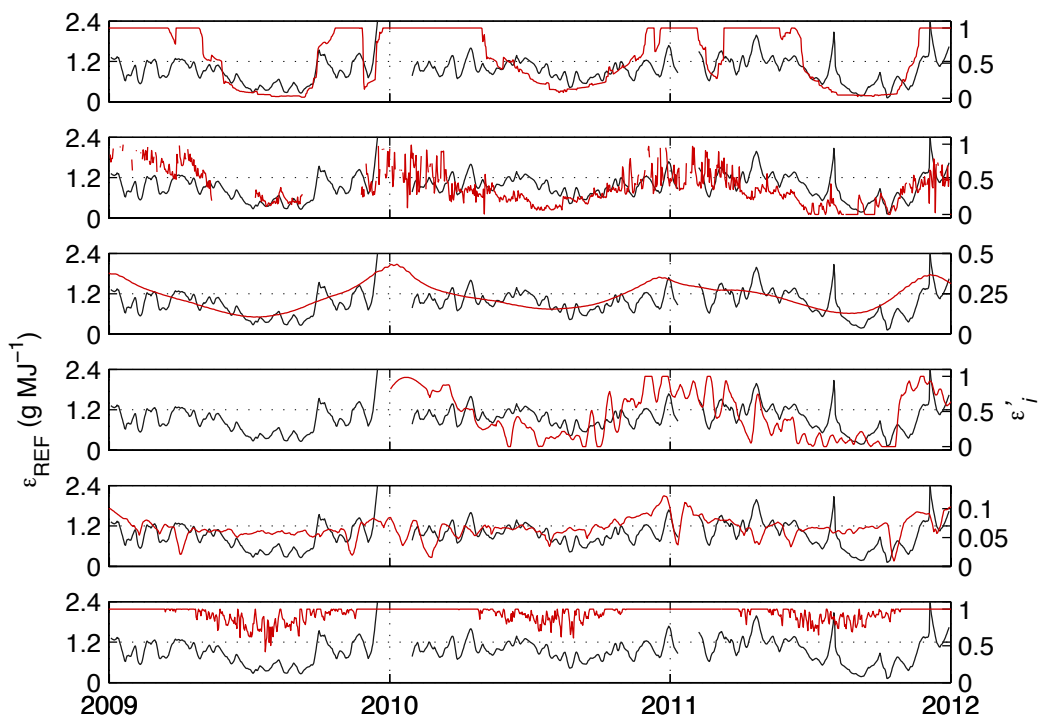


Figura 4.1. Sèries temporals de la  $\epsilon_{REF}$  (negre) i els  $\epsilon'_i$  (roig) en ES-CPa. De dalt a baix:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  i  $6$ .

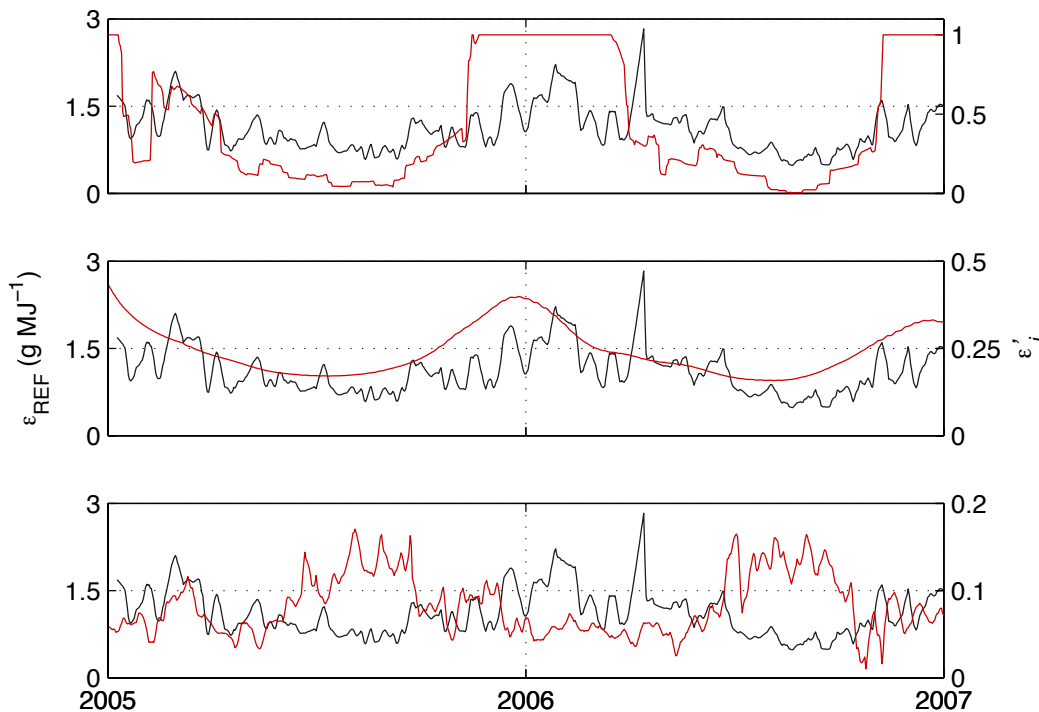


Figura 4.2. Sèries temporals de la  $\epsilon_{REF}$  (negre) i els  $\epsilon'_i$  (roig) en ES-ES1. De dalt a baix:  $i = 1, 3$  i  $5$ .

En el cas d'ES-CPa, pareix que els sis  $\varepsilon'_i$  estan anticorrelats durant la part central de l'any 2010 i cap d'ells és capaç de reproduir els dos màxims de la segona meitat de l'any 2011.  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$  i  $\varepsilon'_4$  presenten el rang de variació més ampli, entre 0 i 1; seguits de  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_6$  que varien aproximadament entre 0 i 0.5 i entre 0.5 i 1, respectivament.

En el cas d'ES-ES1 només es mostren els escalars  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_5$ . En els casos de  $\varepsilon'_2$  i  $\varepsilon'_4$ , no existeixen dates coincidents entre els productes de satèl·lit i les mesures EC. El  $\varepsilon'_6$  no està disponible degut a la poca distància entre ES-ES1 i les masses d'aigua que la rodegen (capítol 3) i a la resolució espacial de les capes d'informació involucrades en el seu càlcul. De fet, només hi ha 190 m entre ES-ES1 i l'Albufera de València i 870 m entre ES-ES1 i la Mar Mediterrània. Per això es va haver d'utilitzar el producte MOD13Q1, amb major resolució espacial, per a l'estimació de la  $f_{APAR}$  en ES-ES1. Aquest producte (Didan & Huete, 2015) conté, entre altres, un compost de 16 dies de l'índex de vegetació de diferència normalitzada (*normalized difference vegetation index*,  $NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$ , Rouse *et al.*, 1973) amb una resolució espacial de 250 m. La  $f_{APAR}$  es va calcular mitjançant la relació lineal proposada per Myneni & Williams (1994) i se li van aplicar els mateixos mètodes de farciment de buits, reducció del soroll del senyal i interpolació temporal que a la  $f_{APAR}$  estimada a partir del producte MCD43 descrit en el capítol 3.  $\varepsilon'_1$  pareix que satura massa dies seguits durant l'hivern, però segueix prou bé la variació general de la  $\varepsilon_{REF}$ .  $\varepsilon'_5$  està anticorrelat amb la  $\varepsilon_{REF}$  durant pràcticament tot el període.

En el cas d'ES-LMa, com s'esmenta al inici del paràgraf, tots els escalars excepte  $\varepsilon'_6$  segueixen les variacions interanuals de la  $\varepsilon_{REF}$ . En el cas d'ES-VDA, no existeixen dates coincidents entre  $\varepsilon'_2$  i  $\varepsilon'_4$  i les mesures EC. La  $\varepsilon_{REF}$  presenta molts buits.  $\varepsilon'_1$  i  $\varepsilon'_3$  segueixen les variacions interanuals de la  $\varepsilon_{REF}$ , encara que  $\varepsilon'_1$  satura massa sovint a 1 i  $\varepsilon'_3$  és incapaç de reproduir el màxim absolut de la  $\varepsilon_{REF}$  en 2008.  $\varepsilon'_5$  està anticorrelat amb la  $\varepsilon_{REF}$  en alguns períodes de l'any.  $\varepsilon'_6$  satura encara més sovint que  $\varepsilon'_1$ , de manera que pràcticament ignora les variacions temporals de la  $\varepsilon_{REF}$  per a valors intermedis i alts, però segueix bé les dels valors baixos.

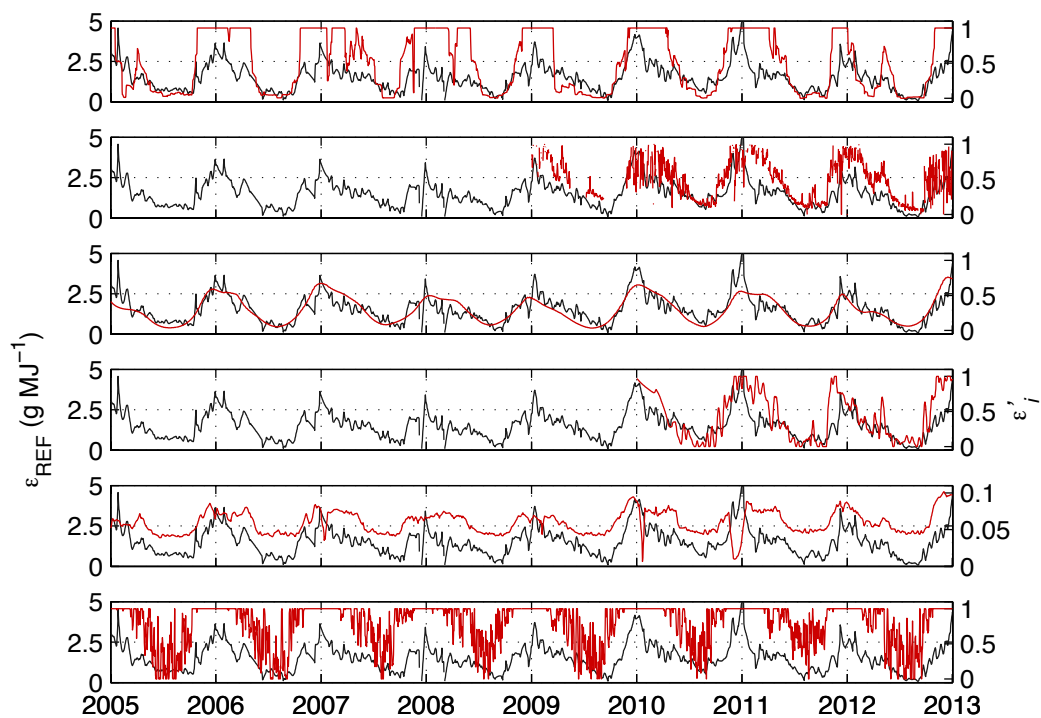


Figura 4.3. Sèries temporals de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$  (negre) i els  $\varepsilon'_i$  (roig) en ES-LMa.  
De dalt a baix:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  i  $6$ .

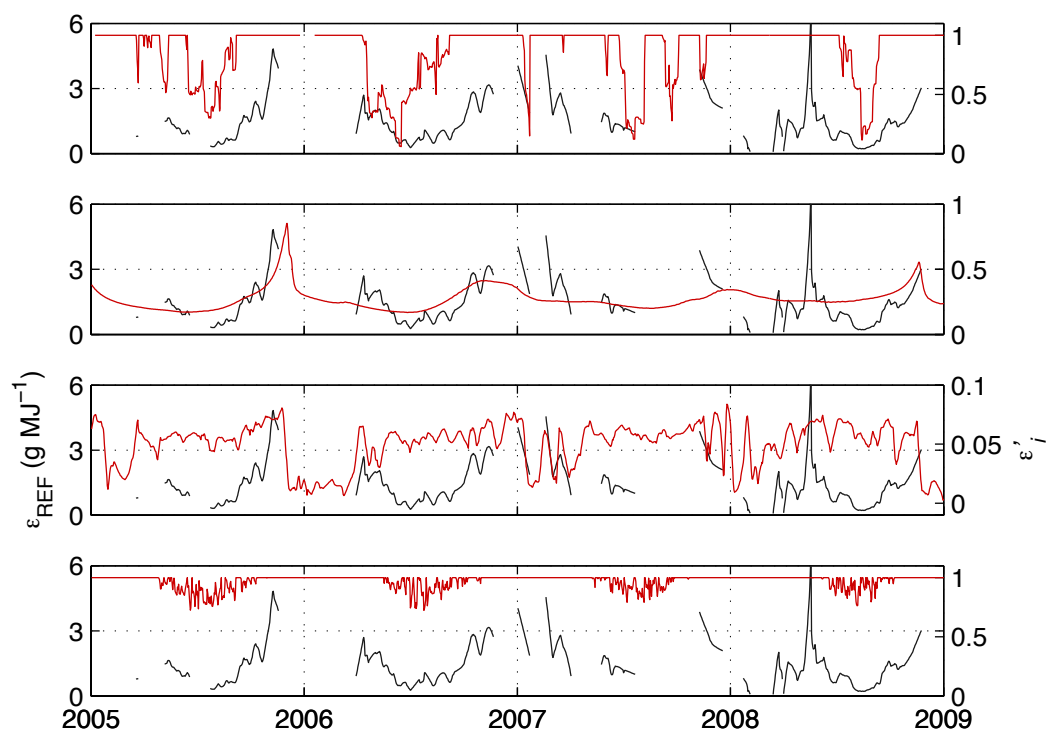


Figura 4.4. Sèries temporals de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$  (negre) i els  $\varepsilon'_i$  (roig) en ES-VDA.  
De dalt a baix:  $i = 1, 3, 5$  i  $6$ .

La taula 4.2 recull els coeficients de determinació entre els escalars  $\varepsilon'_i$  i la  $\varepsilon_{\text{REF}}$  calculats només amb les dates coincidents per a tots els  $\varepsilon'_i$  disponibles en cada lloc de validació.  $\varepsilon'_1$  és l'escalar que més variància de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$  aconsegueix explicar en ES-CPa (42 %), mentre que la resta n'expliquen entre un 15 % i un 20 % aproximadament, excepte  $\varepsilon'_5$ , per al que no s'obté una correlació significativa. Els tres escalars analitzats en ES-ES1 ( $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_5$ ) expliquen cadascun aproximadament un 30 % de la variància de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$ . Els millors resultats s'obtenen en ES-LMa, on tots els escalars són capaços d'explicar entre un 11 % ( $\varepsilon'_5$ ) i un 64 % ( $\varepsilon'_3$ ) de la variància de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$  aproximadament, destacant els tres escalars basats en el balanç hídric del lloc i el basat en l'SM ( $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$ ,  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_4$ ), que n'expliquen més d'un 45 %. Cap dels escalars analitzats en ES-VDA ( $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_2$ ,  $\varepsilon'_5$  i  $\varepsilon'_6$ ) és capaç d'explicar més d'un 30 % de la variància de la  $\varepsilon_{\text{REF}}$ . Encara que estudis anteriors han demostrat que l'efecte de l'estrès tèrmic en zones mediterrànies és generalment un ordre de magnitud inferior que el de l'hídric (Gilabert *et al.*, 2015), ES-VDA és el lloc situat a major altitud (1770 m) i major latitud (42.1511 °) dels quatre (capítol 3). A més, el balanç hídric anual mitjà (PRE = 1100 mm i PET = 1010 mm) indica que la vegetació no pateix estrès hídric a aquesta escala temporal. Per tant, a escala diària, els efectes d'ambdós podrien ser de magnituds comparables i la caracterització d'aquest lloc inadequada.

**Taula 4.2.** Coeficients de determinació ( $R^2$ ) entre els sis escalars ( $\varepsilon'_i$ ) i l'eficiència en l'ús de la radiació de referència ( $\varepsilon_{\text{REF}}$ ).

Escalar $\varepsilon'_i$	ES-CPa	ES-ES1	ES-LMa	ES-VDA
$\varepsilon'_1$	0.42	0.32	0.56	0.15
$\varepsilon'_2$	0.15	-	0.46	-
$\varepsilon'_3$	0.19	0.30	0.64	0.30
$\varepsilon'_4$	0.14	-	0.55	-
$\varepsilon'_5$	0.01*	0.29	0.11	0.04
$\varepsilon'_6$	0.14	-	0.37	0.22

Nota: totes les correlacions presenten un nivell de significació del 95 % excepte les marcades amb \*.

#### 4.3.2 Avaluació de la GPP

Les figures 4.5-4.8 mostren les sèries temporals completes de  $\text{GPP}_{\text{EC}}$ ,  $\text{GPP}'_0$  i  $\text{GPP}'_i$  en ES-CPa, ES-ES1, ES-LMa i ES-VDA. Tots els escalars han reduït la sobreestimació de  $\text{GPP}'_0$  especialment durant els períodes de baixa producció en primavera i estiu. En els casos de  $\varepsilon'_2$  i  $\varepsilon'_4$  en ES-CPa,  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_5$  en ES-ES1,  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_4$  en ES-LMa i  $\varepsilon'_3$  en ES-VDA, aquesta reducció afecta també a la resta de la sèrie i provoca una infravaloració de la GPP, sobretot durant els màxims de producció. Per altra banda,  $\varepsilon'_1$  i  $\varepsilon'_6$  en ES-LMa i  $\varepsilon'_1$ ,  $\varepsilon'_5$  i  $\varepsilon'_6$  en ES-VDA sobreestimen la GPP en alguns casos com el màxim de producció en 2008.

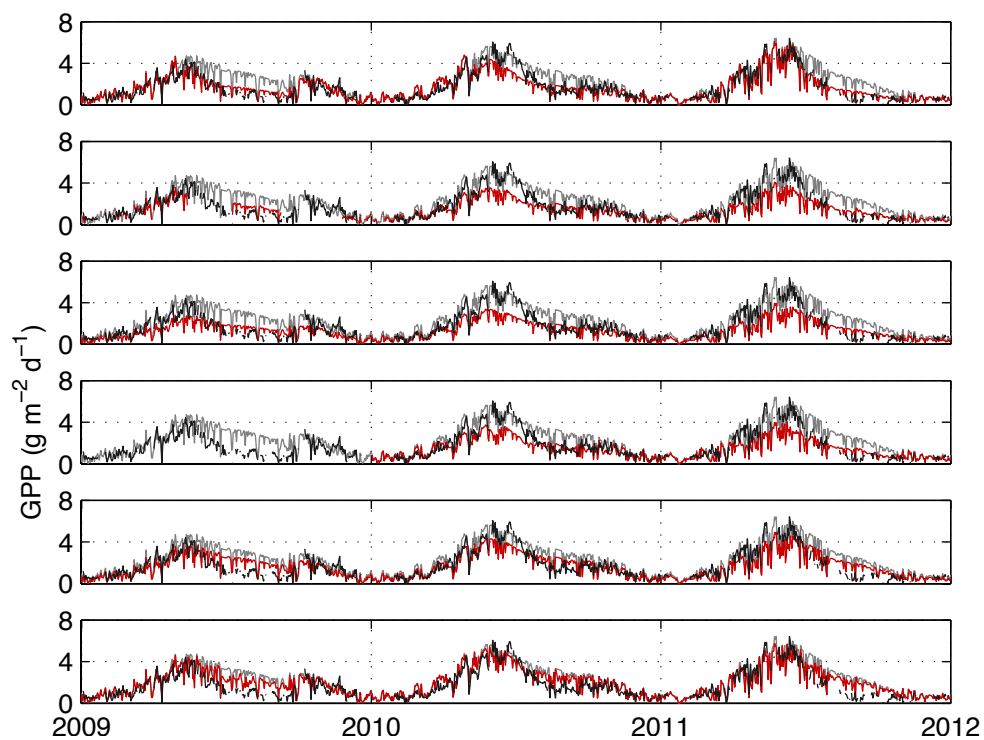


Figura 4.5. Sèries temporals de  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  (negre),  $\text{GPP}'_0$  (gris) i  $\text{GPP}'_i$  (roig) en ES-CPa. De dalt a baix:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  i  $6$ .

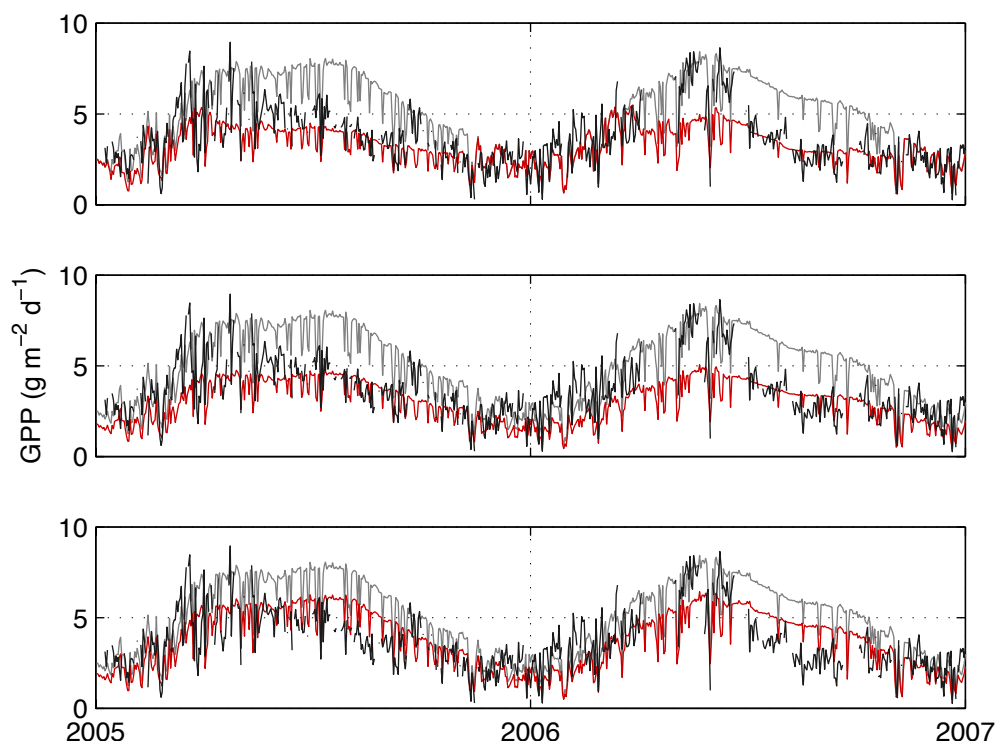


Figura 4.6. Sèries temporals de  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  (negre),  $\text{GPP}'_0$  (gris) i  $\text{GPP}'_i$  (roig) en ES-ES1. De dalt a baix:  $i = 1, 3$  i  $5$ .

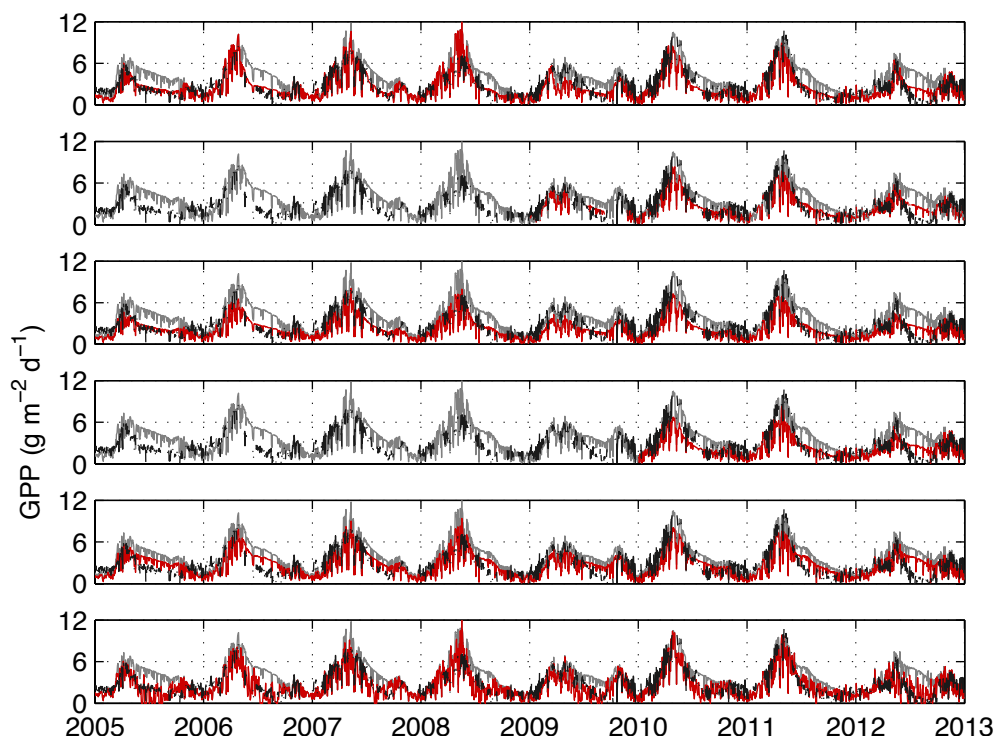


Figura 4.7. Sèries temporals de  $GPP_{EC}$  (negre),  $GPP'_0$  (gris) i  $GPP'_i$  (roig) en ES-LMa. De dalt a baix:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  i  $6$ .

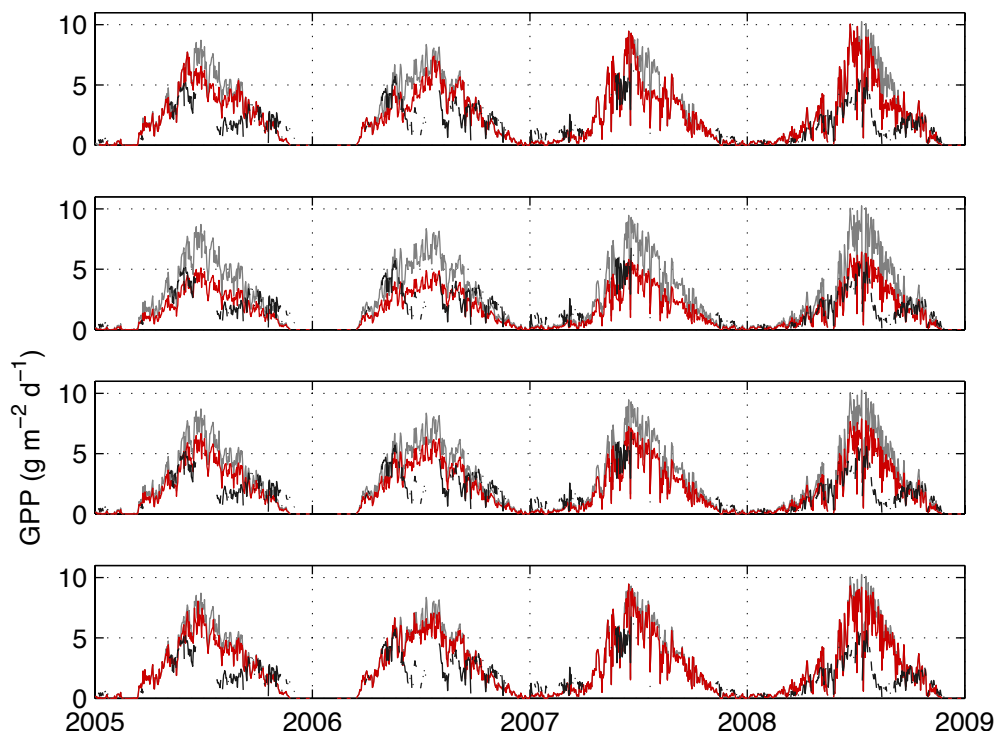


Figura 4.8. Sèries temporals de  $GPP_{EC}$  (negre),  $GPP'_0$  (gris) i  $GPP'_i$  (roig) en ES-VDA. De dalt a baix:  $i = 1, 3, 5$  i  $6$ .



La taula 4.3 recull els estadístics de la comparació entre  $GPP_{EC}$ ,  $GPP'_0$  i  $GPP'_i$ . S'aconsegueix augmentar el coeficient de determinació respecte a  $GPP'_0$  en tots els casos excepte en els casos de  $GPP'_5$  en ES-CPa i de  $GPP'_3$  i  $GPP'_5$  en ES-VDA, que l'igualen, i  $GPP'_4$  en ES-CPa i  $GPP'_5$  en ES-ES1, que el redueixen explicant un 1 % menys de la variància de  $GPP_{EC}$ .

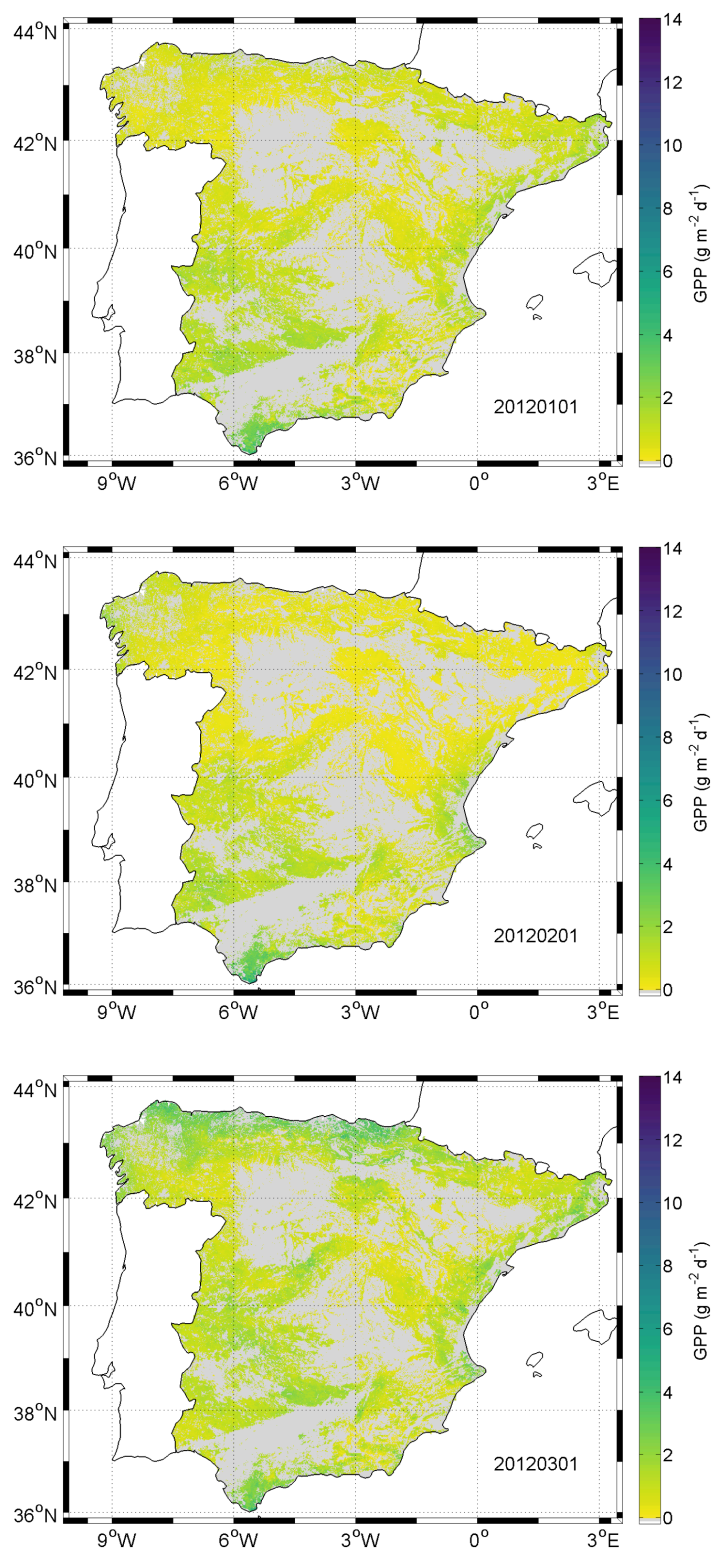
**Taula 4.3.** Estadístics de la comparació entre  $GPP'_i$  i  $GPP_{EC}$ .  $GPP'_0$  és la GPP calculada mitjançant l'equació 2.1 sense el terme  $\varepsilon_w$ . MBE, MAE i RMSE estan expressats en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ .

	ES-CPa	ES-ES1	ES-LMa	ES-VDA	ES-CPa	ES-ES1	ES-LMa	ES-VDA
	$R^2$				MBE			
$GPP'_0$	0.71	0.39	0.49	0.41	0.4	1.0	0.7	1.0
$GPP'_1$	0.76	0.41	0.73	0.47	-0.16	-0.6	-0.4	.07
$GPP'_2$	0.73	-	0.69	-	-0.5	-	-0.4	-
$GPP'_3$	0.72	0.40	0.64	0.41	-0.6	-0.8	-0.7	-0.19
$GPP'_4$	0.70	-	0.66	-	-0.5	-	-0.6	-
$GPP'_5$	0.71	0.38	0.50	0.41	-0.17	-0.08	-0.2	0.3
$GPP'_6$	0.74	-	0.71	0.44	0.2	-	-0.3	0.8
	MAE				RMSE			
$GPP'_0$	0.7	1.5	1.4	1.5	0.9	1.9	1.8	2
$GPP'_1$	0.6	1.0	1.0	1.3	0.7	1.4	1.2	1.7
$GPP'_2$	0.7	-	1.0	-	1.0	-	1.3	-
$GPP'_3$	0.8	1.2	1.2	1.0	1.0	1.5	1.6	1.3
$GPP'_4$	0.7	-	1.2	-	1.0	-	1.5	-
$GPP'_5$	0.6	1.2	1.3	1.1	0.8	1.4	1.6	1.5
$GPP'_6$	0.6	-	0.9	1.3	0.8	-	1.2	1.9

Nota: totes les correlacions presenten un nivell de significació del 95 %.

### 4.3.3 Generació d'imatges de GPP

En la figura 4.9 es mostren, com a exemple, les imatges diàries de la GPP calculada mitjançant l'equació 2.1 amb  $\varepsilon_w = \varepsilon'_1$  (d'ara endavant anomenades  $GPP_{PEM}$ ) per al primer dia de cada mes de l'any 2012. Especialment s'aprecia com la GPP segueix el mateix patró que la PRE, amb un gradient nord-oest – sud-est (figura 3.1 a). Les zones de màxima i mínima producció coincideixen amb les de màxima i mínima precipitació. Les zones forestals són generalment més productives que les zones ocupades per espècies herbàcies o matolls (figura 3.1 b) i, de les forestals, les més productives estan situades al nord de l'àrea d'estudi excepte un bosc de sureres en la província de Cadis. Pel que fa a la variació temporal, la GPP segueix el cicle anual de la PAR: es manté en valors mínims durant l'hivern, comença a augmentar en abril, arriba al seu màxim en juny-juliol i comença a disminuir en agost. En algunes zones el cicle fenològic de la vegetació no coincideix amb el de la PAR i el model ho manifesta a través de la  $f_{APAR}$ .



**Figura 4.9.** Imatges de GPP calculades mitjançant l'equació 2.1 amb  $\varepsilon_W = \varepsilon'_1$  ( $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ ). La data de cada imatge apareix en la seua part inferior dreta en format YYYYMMDD.

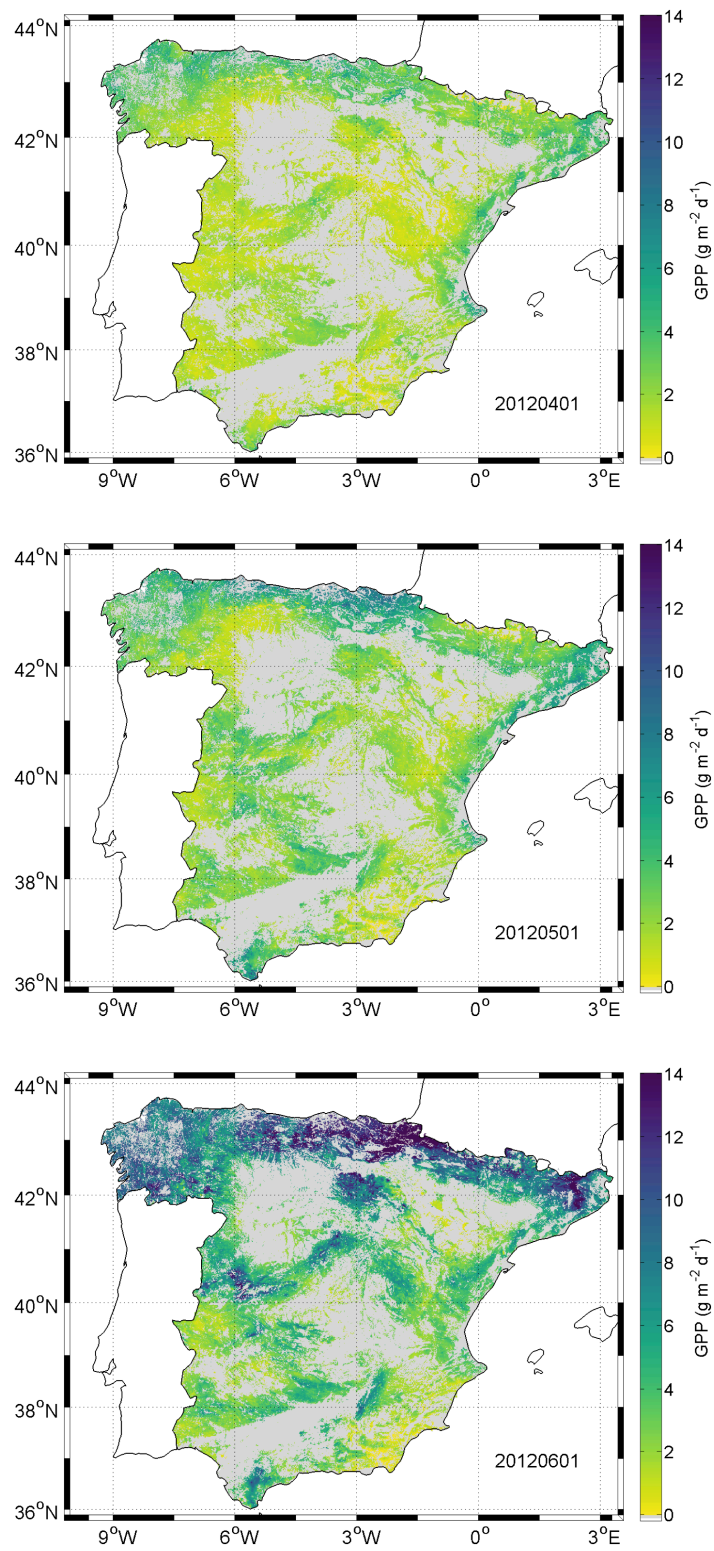


Figura 4.9. Continuació.

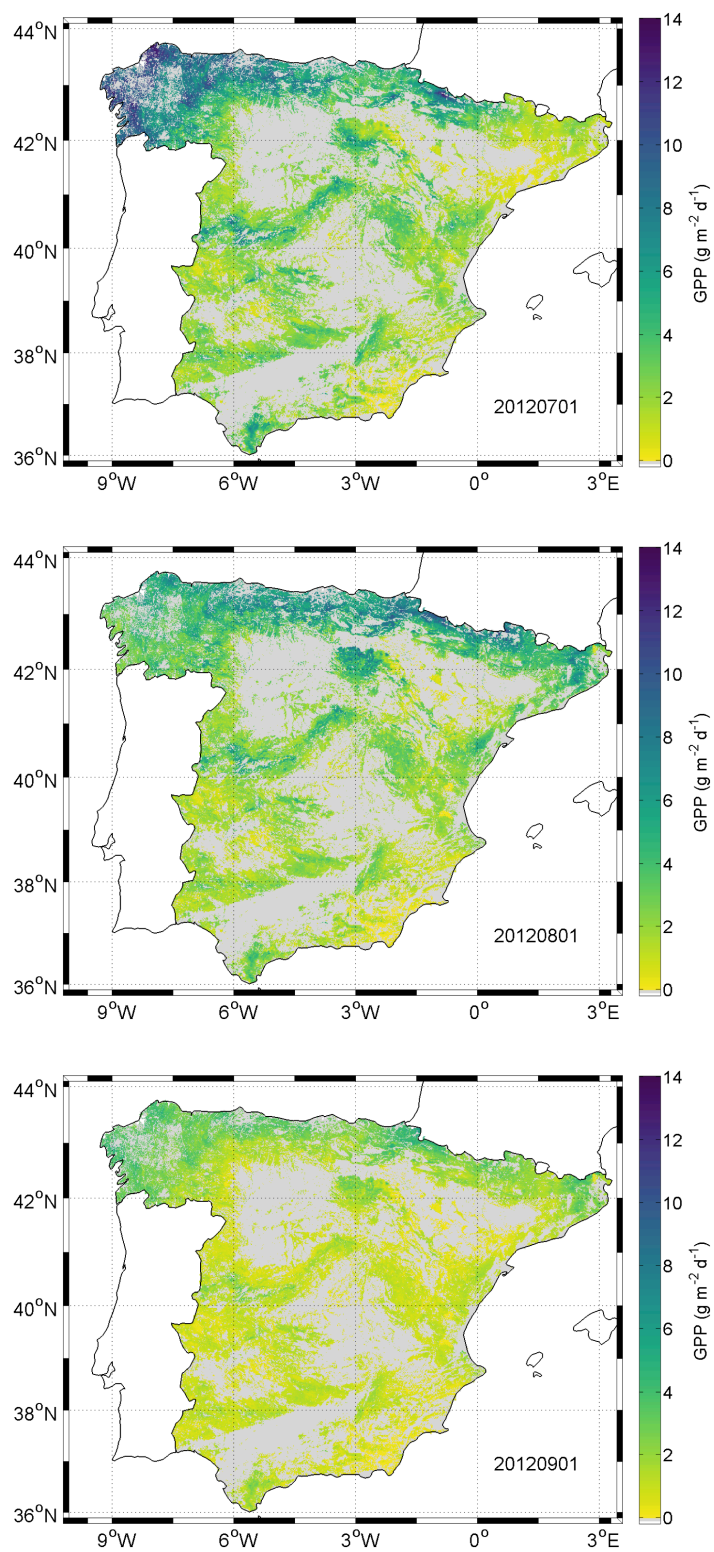


Figura 4.9. Continuació.

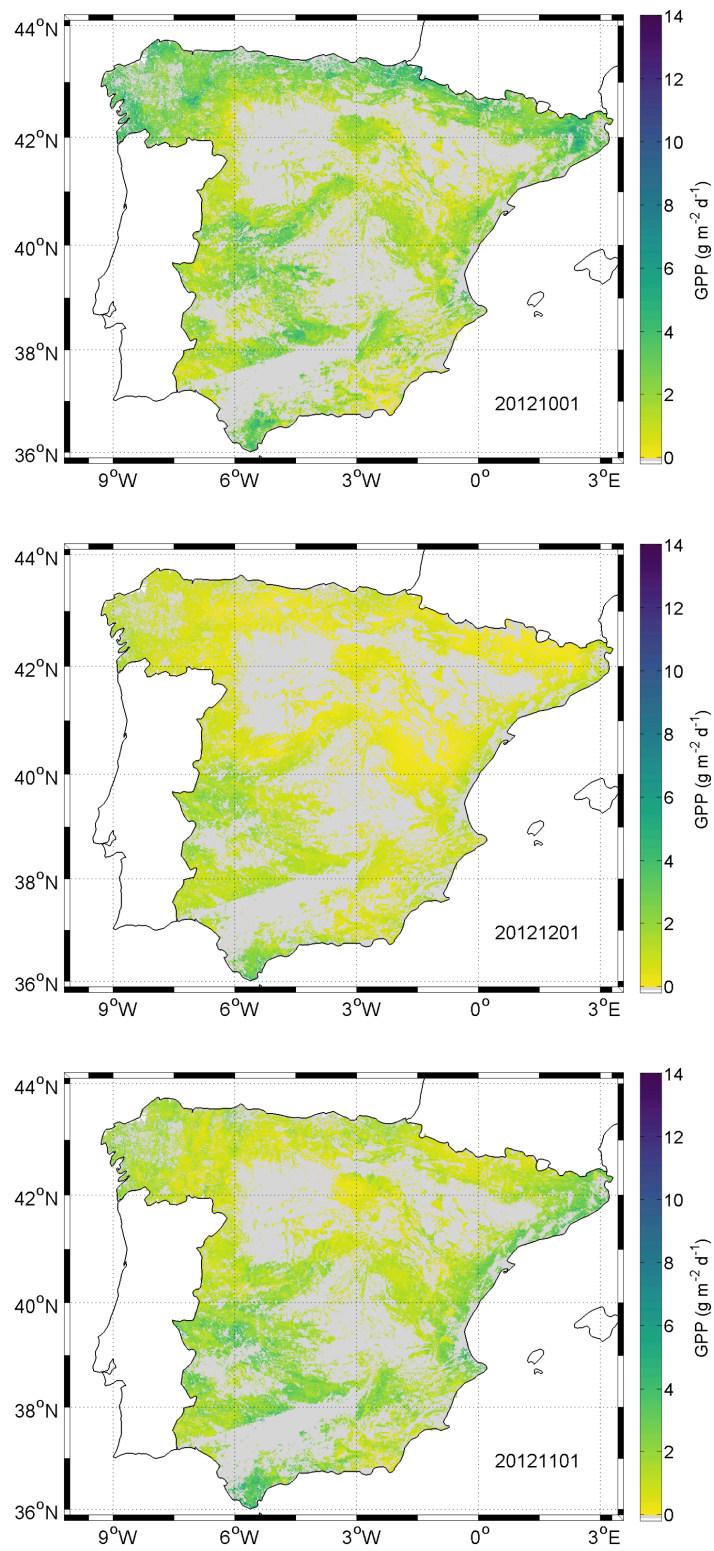


Figura 4.9. Continuació.

## 4.4 Discussió

### 4.4.1 Avaluació de l'eficiència en l'ús de la radiació

Com s'esmenta al capítol 2, en els PEMs basats en el model de Monteith, la  $f_{\text{APAR}}$  sol calcular-se mitjançant un índex de vegetació que utilitza les reflectàncies en les regions del roig i l'infraroig proper de l'espectre electromagnètic i pot, per tant, explicar canvis en la coberta vegetal (Gamon *et al.*, 1995). La  $f_{\text{APAR}}$  proporciona un vincle entre la capacitat d'absorció d'energia de la coberta vegetal, la seua estructura i la seua condició. Així doncs, és capaç de reflectir canvis en la coberta vegetal causats per l'estrès hídric. Però els canvis estructurals en la coberta vegetal que afecten la  $f_{\text{APAR}}$  apareixen després de llargs períodes de manca d'aigua. Per tant, la implementació d'un escalar responsable de l'estrès hídric a curt termini en el model de Monteith és necessària si es treballa a escala diària.

Els resultats obtinguts amb  $\varepsilon'_1$  concorden amb els obtinguts en zones mediterrànies per Maselli *et al.* (2009a) i Maselli *et al.* (2013) per a boscos i praderies, respectivament (excepte en ES-VDA). Aquest escalar requereix la interpolació espacial de mesures meteorològiques diàries. Açò pot resultar problemàtic en terrenys abruptes, especialment en el cas de la PRE. Per altra banda, les mesures meteorològiques permeten una detecció ràpida dels increments en la disponibilitat hídrica a través de la PRE.  $\varepsilon'_2$  només presenta els problemes de la interpolació espacial de la temperatura de l'aire perquè utilitza la mateixa PET que  $\varepsilon'_1$ , però necessita incrementar la resolució espacial de l'AET i la  $R_g$  de satèl·lit. En canvi, cal aplicar una interpolació temporal per a utilitzar  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_4$  a escala diària. El producte original de  $\varepsilon'_3$ , MOD16A2, es compon a partir de mesures diàries durant 8 dies amb la conseqüent pèrdua de detalls temporals. En el cas de  $\varepsilon'_4$ , només es disposa d'un valor d'L4SMv3 aproximadament cada 3 dies. Quant a  $\varepsilon'_5$ , s'ha demostrat que el PRI respon a canvis en la  $\varepsilon$  a nivell de fulla (Garbulsky *et al.*, 2011; Nakaji *et al.*, 2006). Però quan es calcula amb les bandes de MODIS a escales regional o global, el senyal que es pretén detectar és del mateix ordre de magnitud que la ràtio senyal/soroll del sensor. A més, altres factors com els angles d'il·luminació i d'observació, la correcció atmosfèrica o la falta de la banda de referència recomanada centrada en 570 nm també poden afectar negativament a l'índex (Barton & North, 2001; Drolet *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2012). Finalment, el VPD emprat en  $\varepsilon'_6$ , tot i ser utilitzat pel MOD17 a escala global, no funciona tan bé com caldria esperar en ecosistemes no forestals com ES-CPa (matollar), ES-LMa (devesa) o ES-VDA (praderia). Altres estudis indiquen que variables com l'SM podrien millorar el funcionament del MOD17 en zones àrides (Kanniah *et al.*, 2009) i que els escalars que regulen la  $\varepsilon$  s'haurien d'escollir i ajustar adequadament per a cada lloc d'estudi (Turner *et al.*, 2006). En ecosistemes mediterranis, el VPD varia fonamentalment amb la temperatura de l'aire. Aquest fet sol portar a una relació estadística entre les

variacions intra-anuals de l'estrès hídric. Malgrat això, el VPD només és capaç de reflectir parcialment les recàrregues irregulars de l'aigua del sòl causades per esdeveniments de PRE estivals. En aquests casos, la  $\varepsilon$  pot augmentar considerablement i durant períodes relativament llargs, mentre que les reduccions del VPD són menudes i transitòries.

#### 4.4.2 Avaluació de la GPP

En general, els resultats de la comparació entre  $GPP_{EC}$  i  $GPP'_i$  són satisfactoris independentment de l'escalar  $\varepsilon'_i$  utilitzat. Nogensmenys,  $GPP'_2$ ,  $GPP'_3$ ,  $GPP'_4$  i  $GPP'_5$  presenten alguns avantatges sobre  $GPP'_1$  i  $GPP'_6$ : no necessiten període d'acumulació ni dades meteorològiques auxiliars, excepte en el cas de  $GPP'_2$  que necessita només la temperatura de l'aire. És possible estimar aquesta variable a partir de la temperatura de la superfície terrestre (Nieto *et al.*, 2011; Stisen *et al.*, 2007; Vancutsem *et al.*, 2010), que s'estima amb mesures de satèl·lit, així que  $GPP'_2$  tampoc requeriria dades meteorològiques auxiliars. Des del punt de vista operatiu,  $GPP'_3$  i  $GPP'_4$  es mostren com opcions sòlides que demostren que es pot caracteritzar l'efecte de l'estrès hídric en la GPP diària utilitzant únicament productes de satèl·lit. Aquestes dues opcions es podrien utilitzar en un model per a calcular la GPP diària a nivell global ( $GPP'_3$ ) o regional ( $GPP'_4$ ), ja que el producte L4SMv3, de moment, només està disponible per a la Península Ibèrica. Encara que cap esperar que, per a la detecció o el seguiment de l'estrès hídric a curt termini, els escalars basats en l'AET o l'SM funcionen millor que el que utilitza la PRE, la PRE utilitzada és el resultat de la interpolació espacial de mesures d'estacions meteorològiques i, per tant, evita els problemes que normalment afecten les dades de teledetecció. L'AET<sub>SEVIRI</sub> utilitzada en  $\varepsilon'_2$  s'obté mitjançant prediccions meteorològiques del *European Centre for Medium-range Weather Forecast* (ECMWF) i altres productes de l'LSA-SAF com els fluxos descendents d'ones curta i llarga incidents sobre la superfície terrestre i l'albedo d'aquesta (LSA-SAF, 2010). Les tres últimes es veuen afectades pel funcionament del sensor, la identificació de núvols, la correcció atmosfèrica, l'heterogeneïtat de la superfície i la classificació d'usos del sòl. Qualsevol incertesa en els inputs de l'algorisme repercuteix en el producte final. Les prediccions meteorològiques de l'ECMWF presenten una resolució espacial prou baixa respecte a la utilitzada en aquesta tesi, 0.25° i 1 km respectivament. Açò també afegeix incertesa a l'AET<sub>SEVIRI</sub>, especialment a través de la temperatura i la humitat específica de l'aire. Els mateixos problemes afecten l'AET<sub>MODIS</sub> i la PET<sub>MODIS</sub> utilitzades en el  $\varepsilon'_3$ . En aquest cas, la resolució espacial de les dades meteorològiques emprades és encara menor, 0.5° × 0.6° (Mu *et al.*, 2013). En el cas de  $\varepsilon'_4$ , encara que l'efecte de la contribució atmosfèrica, la PRE i els núvols sobre les observacions en banda L (1-2 GHz) és pràcticament negligible (Kerr *et al.*, 2001), la baixa resolució espacial de l'SM d'SMOS (30-50 km) i el propi procés de reducció d'escala, que utilitza la temperatura de la superfície terrestre i l'NDVI de MODIS que es

veuen afectats pels mateixos problemes que  $AET_{SEVIRI}$ ,  $AET_{MODIS}$  i  $PET_{MODIS}$ , poden introduir incerteses en l'escalar. Per la seua banda, el  $\varepsilon'_5$  (PRI) pateix els problemes típics dels índex de vegetació calculats amb dades de teledetecció: la contribució del sòl, la correcció atmosfèrica i la distribució angular de les fulles i altres elements dispersius com les branques o les tiges (Garbulsky *et al.*, 2014). A més, les dues bandes de MODIS utilitzades són suficientment amples com per a patir interferències provocades per les reaccions d'altres pigments (Grace *et al.*, 2007).

#### 4.4.3 Generació d'imatges de GPP

Pel que fa a les imatges diàries de  $GPP_{PEM}$  calculades mitjançant l'equació 2.1 amb  $\varepsilon_W = \varepsilon'_1$ , els afecten les incerteses derivades tant del propi model com dels inputs utilitzats. El model combina diverses capes d'informació provinents de diferents fonts amb diferents resolucions espacials i temporals. Per tant, com a conseqüència dels processos de canvi d'escala i/o interpolació, poden sorgir errors com la pèrdua d'informació o el *subpixel shift*. Quant a la PAR, encara que obtinguda majoritàriament dels productes LSA-07 i LSA-09 validats en l'àrea d'estudi (Moreno *et al.*, 2013), el procés de farciment de buits utilitza imatges de  $R_g$  obtingudes a partir d'imatges de  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  i PRE que, al seu torn, van ser especialitzades a partir de mesures de l'AEMet (capítol 3). Aquesta interpolació espacial pot resultar problemàtica en zones amb terreny accidentat especialment en el cas de la PRE, que presenta una variació espacial abrupta, mentre que la de la temperatura de l'aire és més suau. Pel que fa a la  $f_{APAR}$ , els problemes que la poden afectar s'han comentat als apartats anteriors. L'input més controvertit del PEM és la  $\varepsilon$ . Encara que s'ha demostrat que la seua variació temporal en l'àrea d'estudi depèn principalment de l'estrès hídric (Gilabert *et al.*, 2015), l'estrès tèrmic també s'implementa en el PEM perquè la seua contribució és notable en zones elevades. La PRE i la  $T_{min}$  afectades pels problemes mencionats en aquest mateix paràgraf, s'utilitzen respectivament en els escalars que modelitzen els efectes dels estressos hídric i tèrmic. La variació espacial de la  $\varepsilon_{max}$ , que depèn del tipus de vegetació, condiona la magnitud de tota la sèrie temporal de la  $GPP_{PEM}$  perquè és un valor constant per a cada píxel. Garbulsky *et al.* (2010) van trobar valors específics de  $\varepsilon_{max}$  per a diferents tipus de vegetació, però la majoria d'ells presenten una incertesa elevada. Per això en aquesta tesi només s'utilitzen dos valors:  $1.2 \text{ g MJ}^{-1}$  per a vegetació llenyosa i  $1.6 \text{ g MJ}^{-1}$  per a praderies. Mentre que la PAR i la  $f_{APAR}$  són independents del tipus de vegetació, la  $\varepsilon_{max}$  i alguns paràmetres en  $\varepsilon_W$  i  $\varepsilon_T$  depenen totalment d'ell. El tipus de vegetació s'assigna d'acord amb el mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3, que indica el tipus de vegetació predominant en cada píxel. Per tant, el PEM pot presentar certes limitacions en la modelització de les contribucions dels tipus de vegetació cohabitants en els píxels no purs. Tot i això, aquestes limitacions són les esperables de qualsevol producte operatiu de



---

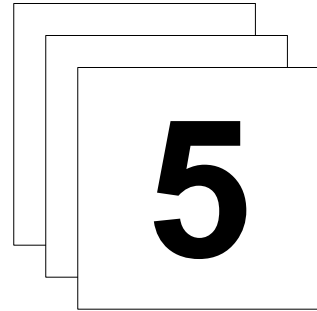
GPP i no impedeixen utilitzar aquestes imatges com a referència per a la validació d'una metodologia alternativa per al càlcul de la GPP anual de manera senzilla (capítol 5) i per al calibratge del Biome-BGC (capítol 6).

## 4.5 Conclusions

Dels sis escalars avaluats, els basats en el balanç hídric AET/PET són els que major quantitat de variància de la  $\varepsilon_{REF}$  són capaços d'explicar. Però, en general, la inclusió de la majoria d'ells en el PEM millora la qualitat de les estimacions de GPP.

Com que  $\varepsilon'_1$  està disponible per al període d'estudi i presenta millors resultats que la resta d'escalars, s'escull per a caracteritzar l'estrès hídric en el PEM representat per l'equació 2.1 i s'utilitza per a calcular imatges de GPP diària durant el període 2005-2012 ( $GPP_{PEM}$ ). Aquestes imatges (figura 4.9) presenten totes les garanties per a ser utilitzades com a referència en capítols posteriors. Encara que els resultats de la comparació entre  $GPP_{EC}$  i  $GPP'_i$  són satisfactoris independentment de l'escalar  $\varepsilon'_i$  utilitzat, es recomana l'ús de  $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_4$  per a l'estimació de la GPP diària en l'àrea d'estudi perquè, des del punt de vista operatiu,  $GPP'_3$  i  $GPP'_4$  es mostren com opcions sòlides que demostren que es pot caracteritzar l'efecte de l'estrès hídric en la GPP diària utilitzant únicament productes de satèl·lit. Aquestes dues opcions ( $\varepsilon'_3$  i  $\varepsilon'_4$ ) es podrien utilitzar en un model operatiu per a calcular la GPP diària en temps quasi real a nivell global ( $GPP'_3$ ) o regional ( $GPP'_4$ ), ja que el producte L4SMv3, de moment, només està disponible per a la Península Ibèrica.





# Model semi-empíric per al càlcul de la GPP anual mitjançant índexs de vegetació

L'estat dels ecosistemes es pot analitzar avaluant els canvis que experimenta la vegetació a mitjà i llarg termini, per exemple, utilitzant sèries temporals llargues a mitjana i baixa resolució espacial d'índexs de vegetació (IVs) com l'NDVI. Els IVs estan íntimament relacionats amb la quantitat de biomassa verda i amb la seua activitat fotosintètica (Gilabert *et al.*, 2010), és a dir, el verdor de la vegetació (traducció del terme anglosaxó *greenness*, comunament emprat per la comunitat internacional). Durant l'última dècada s'ha incrementat el nombre d'estudis basats en l'anàlisi de sèries temporals de variables biofísiques (*e.g.* LAI,  $f_{\text{APAR}}$ ) derivades tant a través de relacions semi-empíriques amb IVs com fent ús de procediments més sofisticats basats en la inversió de models de transferència radiativa (Martínez *et al.*, 2013). En aquest context, l'anàlisi de sèries temporals de GPP pot aportar informació molt rellevant, tant pel que fa als estats dels ecosistemes, com en relació al cicle del carboni i la seua repercussió en la variabilitat climàtica.

Com s'ha vist al capítol 4, l'obtenció d'imatges de GPP diària utilitzant el model de Monteith (1972) requereix una gran quantitat d'informació que, no només és costosa d'obtenir, sinó també de processar quan es pretén construir sèries temporals llargues. A més, aquesta informació no sempre està disponible, sobretot en estudis retrospectius. Una possibilitat per a superar aquests inconvenients és simplificar el procediment i obtenir directament la GPP anual. Sense dubte, l'anàlisi de sèries temporals de GPP anual no aporta tanta informació com el de sèries de GPP diària perquè es perd la component associada amb la variabilitat intra-anual de la vegetació, però la possibilitat d'estudiar sèries més llargues permet millorar l'estudi de la variabilitat interanual, que també és interessant en estudis vinculats amb el canvi climàtic.

En aquest capítol s'introdueix un model semi-empíric senzill, basat en el model de Monteith, per a l'obtenció de la GPP anual mitjançant IVs i una PAR característica de l'àrea d'estudi. Primer es fonamenta teòricament i, a continuació, es valida amb una sèrie d'imatges obtinguda a partir de la sèrie de GPP diària calculada al capítol 4 ( $GPP_{PEM}$ ) que, tot i ser relativament curta (8 anys) serveix per a mostrar els avantatges que pot aportar aquesta aproximació.

La metodologia utilitzada en aquest capítol es va publicar en

Gilabert, M.A., Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., 2017. Annual Gross Primary Production from Vegetation Indices: A Theoretically Sound Approach. *Remote Sens.* 9, 193. doi:10.3390/rs9030193

Nogensmenys, els resultats obtinguts són diferents als presentats en aquesta tesi pels següents motius: (a) la GPP de referència va ser calculada mitjançant un PEM que inclou també un escalar responsable de l'estrès tèrmic ( $\varepsilon_T$ , capítols 2 i 4) i utilitza una  $\varepsilon_{\max}$  menor; (b) el mapa de tipus de vegetació utilitzat considera una classificació diferent de tipus de vegetació (capítol 3) que només inclou zones de vegetació natural i semi-natural (ecosistemes forestals).

## 5.1 Model semi-empíric

La GPP anual per a un any  $Y$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ), d'acord amb el model de Monteith (1972), es pot expressar com la suma de la GPP diària,

$$GPP_{\text{annual}}^Y = \sum_i GPP_i^Y = \sum_i \varepsilon_i^Y f_{APAR,i}^Y PAR_i^Y \quad (5.1)$$

on el subíndex  $i$  indica el dia de l'any. Aquesta expressió es pot simplificar notablement si s'admeten com a vàlides tres hipòtesis (taula 5.1) que s'expliquen a continuació (l'última es demostra en la secció 5.3).

**Taula 5.1.** Hipòtesis que s'apliquen al model de Monteith per al càlcul de la GPP anual.

Hipòtesis		Descripció
H1	$\epsilon_i^Y = \epsilon_{\max}$	A escala anual, l'eficiència en l'ús de la radiació es considera independent del temps i igual al seu valor màxim, que depèn exclusivament del tipus de vegetació.
H2	$f_{APAR,i}^Y = a + bIV_i^Y$	La $f_{APAR}$ es pot obtenir a través d'una relació lineal amb un IV.
H3	$PAR_i^Y = PAR_i^\circ$	Les variacions interanuals de la PAR introdueixen variacions negligibles interanuals en la GPP anual. Per tant, $PAR_i^Y$ es pot reemplaçar per una funció representativa de l'àrea d'estudi que depèn del dia de l'any però no de l'any.

L'eficiència en l'ús de la radiació  $\epsilon_i$  varia espacialment en funció del tipus de vegetació i temporalment com a conseqüència de diverses limitacions fisiològiques. Com s'ha esmentat al capítol 2,  $\epsilon_i$  es pot modelitzar com el producte d'una eficiència màxima i una sèrie d'escalars que quantifiquen la seua reducció en presència de diversos tipus d'estressos (hídric i tèrmic en la nostra àrea d'estudi, Gilabert *et al.*, 2015). Quan es treballa a escala diària, és imprescindible incloure aquests escalars en temps quasi-real, cosa que introdueix una certa complexitat perquè es requereixen moltes dades meteorològiques. Però a escala anual, donat que els stressos acaben modificant a més llarg termini (un o dos mesos) també els paràmetres estructurals de les plantes (*e.g.* disminució del LAI i la  $f_{APAR}$ ), l'efecte de qualsevol tipus d'estrès es pot caracteritzar mitjançant IVs com l'NDVI. De fet, hi ha evidències que aquest índex és sensible a l'estrès hídric (Davenport & Nicholson, 1993; Ichii *et al.*, 2002). Conseqüentment, es pot considerar que, a escala anual, la  $\epsilon$  és constant i que la variabilitat introduïda en ella pels stressos ambientals queda recollida en la  $f_{APAR}$ .

La  $f_{APAR}$  com queda suficientment demostrat en la bibliografia, es pot obtenir a través d'una relació lineal amb IVs. Tant l'NDVI com l'EVI semblen útils per a aquesta tasca (Fensholt *et al.*, 2004; Gitelson *et al.*, 2006; Sims *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2010).

La irradiància extraterrestre, és a dir, la irradiància solar que arriba al sostre de l'atmosfera, és pràcticament constant excepte per les variacions que el cicle de les taques solars introdueix en ella (menors al 0.1 %). Però la irradiància que arriba a la superfície de la Terra depèn de la transmissivitat atmosfèrica, lligada a les condicions atmosfèriques, que introdueix una variabilitat interanual en la mateixa. No obstant açò, cada punt de la superfície es pot caracteritzar per un valor mitjà ( $\pm$  desviació estàndard) de la irradiància solar que, si ha sigut obtingut d'una sèrie temporal significativament llarga, roman pràcticament constant (Black *et al.*, 2006).

Per tant, es pot reemplaçar  $PAR_i^Y$  en l'equació 5.1 per  $PAR_i^\circ$ , que dóna el valor de la PAR representatiu per a cada píxel en funció del dia de l'any. D'aquesta manera, la periodicitat que mostra la PAR incident depèn exclusivament de factors geomètrics.

Si s'apliquen les aproximacions esmentades (taula 5.1) a l'equació 5.1, s'obté que

$$GPP_{\text{annual}}^Y = \varepsilon_{\text{max}} \sum_i [(a + bIV_i^Y) PAR_i^\circ] \quad (5.2)$$

Aleshores,

$$GPP_{\text{annual}}^Y = C_1 + C_2 \overline{IV}^Y \quad (5.3)$$

on

$$C_1 = \varepsilon_{\text{max}} a \sum_i PAR_i^\circ \quad (5.4)$$

$$C_2 = \varepsilon_{\text{max}} b \sum_i PAR_i^\circ \quad (5.5)$$

$C_1$  i  $C_2$  son constants per a un tipus de vegetació, i

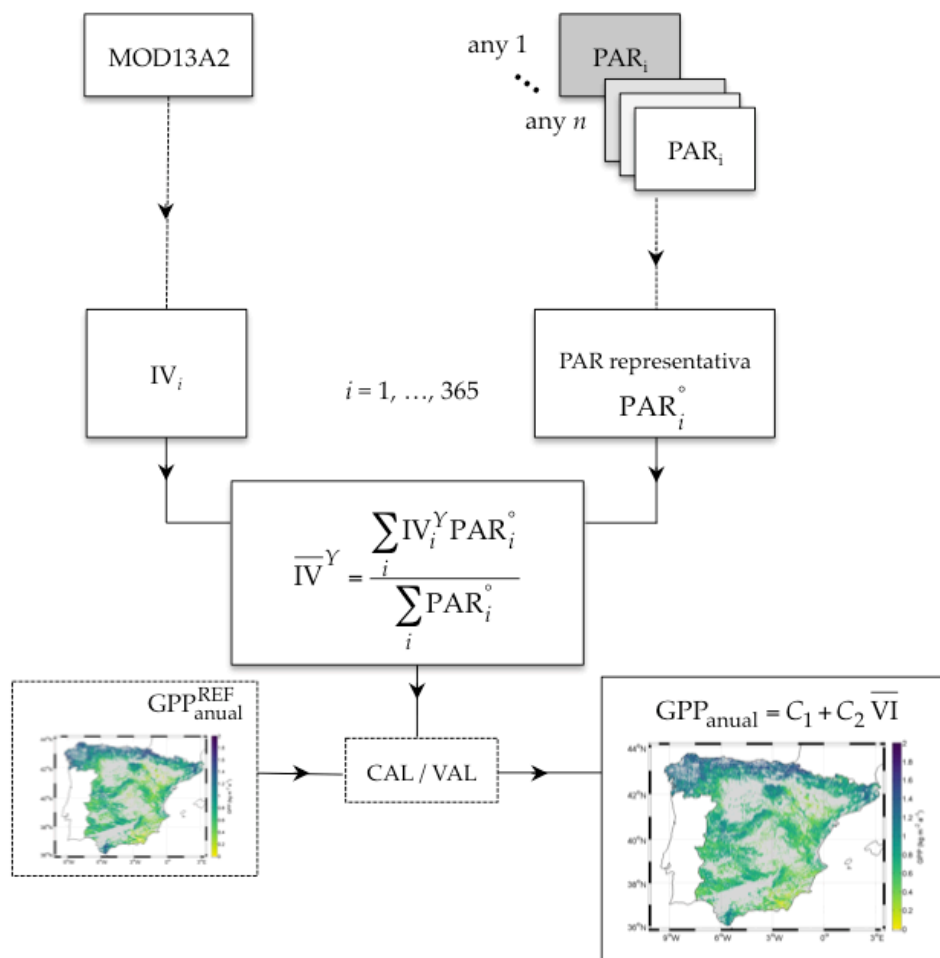
$$\overline{IV}^Y = \frac{\sum_i IV_i^Y PAR_i^\circ}{\sum_i PAR_i^\circ} \quad (5.6)$$

és la mitjana ponderada de l'índex de vegetació utilitzant com a pes l'energia solar diària rebuda per unitat de superfície.

Segons les equacions 5.3 i 5.6, per a calcular la GPP anual només es necessiten les sèries temporals de  $PAR_i^\circ$  (independent de l'any  $Y$ ) i  $IV_i^Y$ .

### 5.2 Metodologia

La figura 5.1 mostra un esquema del procediment seguit per al càlcul de la GPP anual utilitzant el model semi-empíric proposat en la secció anterior.



**Figura 5.1.** Esquema del procediment seguit per al càlcul de la GPP anual utilitzant el model semi-empíric.

Per a cadascun dels anys  $Y$  es van calcular, per una banda, les imatges corresponents a la mitjana ponderada de dos IVs ( $\overline{NDVI}^Y$  i  $\overline{EVI}^Y$ ) utilitzant NDVI i EVI, respectivament, del MOD13A2 (descriu al capítol 3) i la sèrie diària d'imatges de la PAR representativa o típica de la zona d'estudi  $PAR_i^o$  (equació 5.6) i, per altra banda, les imatges de GPP anual

de referència,  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$ , aplicant l'equació 5.1 a la sèrie de GPP diària obtinguda al capítol 4 ( $GPP_{\text{PEM}}$ ). La  $PAR_i^\circ$  es va calcular a partir de la sèrie de PAR diària al llarg de huit anys. La PAR anual representativa es va calcular sumant l'anterior,  $\Sigma PAR_i^\circ$ .

Cal dir que, d'acord amb els arxius de l'AEMet ([www.aemet.es](http://www.aemet.es)), durant el període 2005–2012 es poden trobar tant anys humits com amb sequera. A més, aquestes característiques varien espacialment. Aleshores és tracta d'un període prou representatiu. No obstant açò, els resultats que es mostren en el següent apartat serien encara més precisos si la sèrie temporal de PAR fóra més llarga. Però es considera que és suficient per a demostrar la validesa del model proposat.

Després es van analitzar les correlacions entre les imatges dels IVs ( $\overline{NDVI}^Y$  i  $\overline{EVI}^Y$ ) i de  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$  per a establir el conjunts de coeficients  $C_1$  i  $C_2$  (en principi, diferents per a cada tipus de vegetació). El calibratge (determinació dels coeficients) i la validació del model semi-empíric (CAL/VAL en la figura 5.1) es va dur a terme simultàniament mitjançant la tècnica de validació creuada (Hastie *et al.*, 2009), que garanteix que l'avaluació dels resultats d'una anàlisi estadística és independent de la partició entre dades d'entrenament i prova. Es tracta d'un procediment no paramètric que separa sistemàticament un subconjunt de dades del conjunt de dades total, deriva una predicció amb les dades restants, i la valida amb el subconjunt separat.

A continuació es descriu com es va aplicar l'algorisme de la validació creuada en aquest estudi:

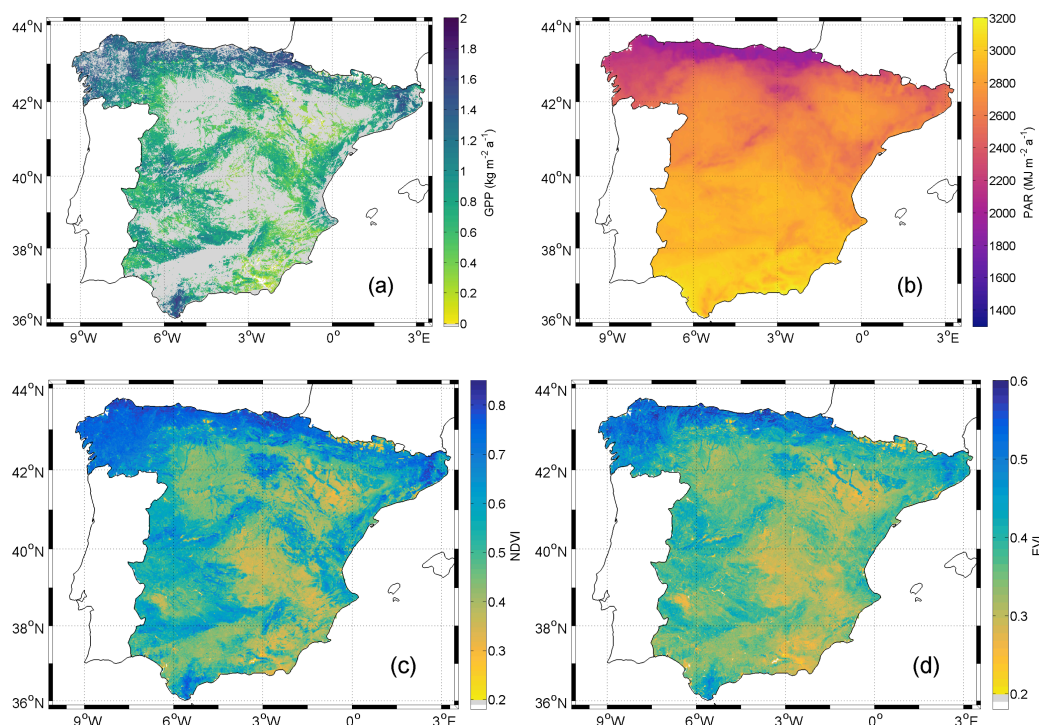
- i. Les dades es van dividir en huit particions, cadascuna contenint les dades d'un any.
- ii. Per a l'any  $Y \in (2005-2012)$ , les imatges dels anys  $\neq Y$  es van utilitzar per a entrenar el model lineal.
- iii. Es van calcular els estadístics següents:  $R^2$  (coeficient de determinació), MBE (*mean bias error*), MAE (*mean absolute error*) i RMSE (*root mean square error*).
- iv. Es van calcular la mitjana i la desviació estàndard dels coeficients de les regressions, que es consideren definitivament com els coeficients finals del model ( $C_1$  i  $C_2$ ) i les seues respectives incerteses.

Aquests passos es van aplicar dues voltes: (1) suposant que  $C_1$  i  $C_2$  no depenen del tipus de vegetació, i (2) calculant-los per a cadascun dels tipus de vegetació considerats pel mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3.



### 5.3 Resultats

Per a facilitar la comprensió dels resultats, la seua anàlisi i la seua discussió, la figura 5.2 mostra, complementant la informació de l'àrea de estudi mostrada en la figura 3.1 i per al període 2005-2012, la GPP mitjana anual de referència (figura 5.2 a), l'NDVI mitjà (figura 5.2 c) i l'EVI mitjà (figura 5.2 d). Les tres presenten un patró espacial molt semblant. Comparat amb l'EVI, l'NDVI presenta valors més elevats i tendeix a la saturació.



**Figura 5.2.** Per al període 2005-2012: (a) GPP mitjana anual de referència, (b) PAR típica mitjana anual, (c) NDVI mitjà i (d) EVI mitjà.

#### 5.3.1 Comprovació de la hipòtesi H3

Tot i ser H3 una hipòtesi raonable, aquesta aproximació aplicada al model de Monteith es demostra en aquesta secció. S'assumeix implícitament que la variabilitat introduïda en la GPP anual per les variacions interanuals de la PAR és molt menys important que la introduïda pels canvis interanuals de la  $f_{APAR}$ .

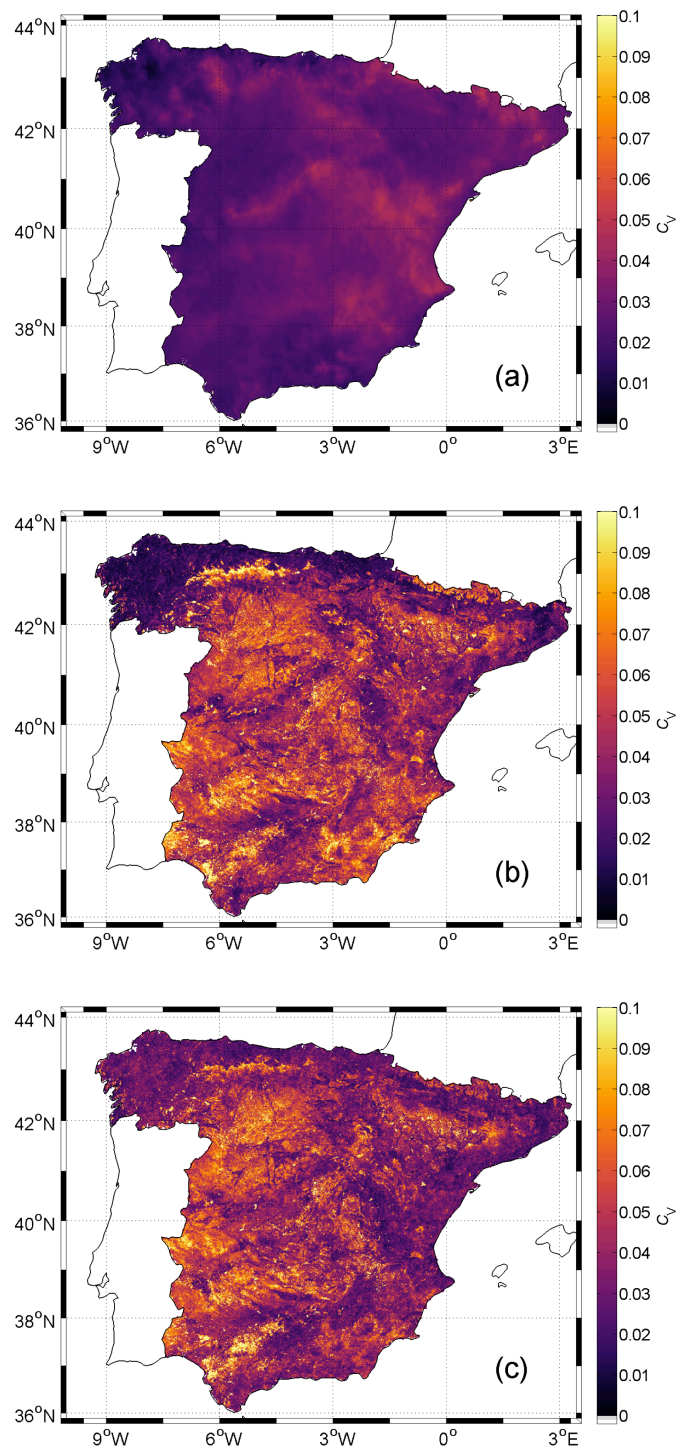
D'acord amb la figura 5.3 a, el coeficient de variació  $C_V$  (quocient entre la desviació estàndard i la mitjana) de la PAR anual es menor del 3 % en l'àrea de estudi al llarg del

---

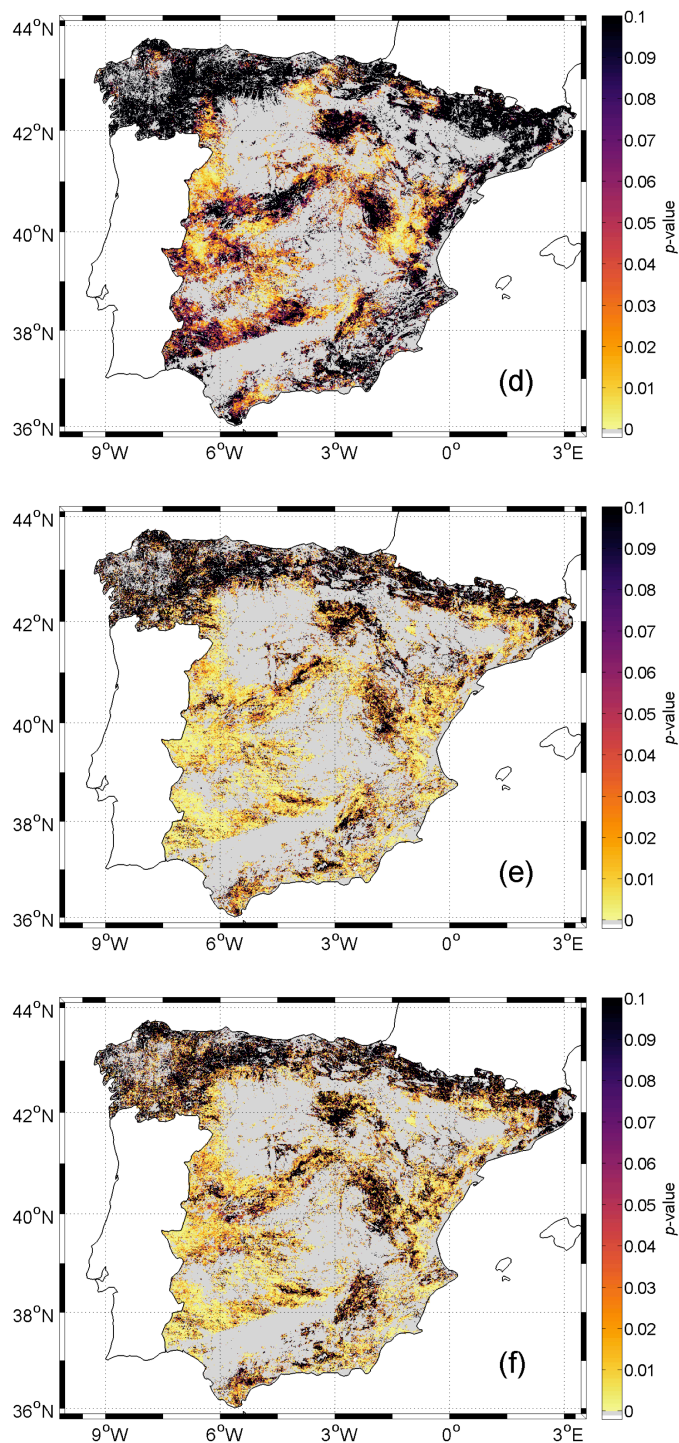
període 2005–2012. Per tant, la PAR es pot caracteritzar per una valor mitjà amb una xicoteta desviació estàndard associada. La seua variació és prop d'un 25 % menor que la dels IVs ( $C_V$  mitjà 0.03 front a 0.04, figures 5.3 b i 5.3. c).

Per altra banda, es va analitzar la contribució de la variabilitat interanual de la PAR i de cadascun dels IVs en la variabilitat interanual de la GPP anual de referència. El resultat de la correlació GPP/PAR mostra que només un 34 % del píxels presenta un valor  $p \leq 0.05$ , (i.e., amb un nivell de significació del 95 %, amb coeficient de determinació mitjà  $R^2 = 0.65$ ), mentre que un 60 % del píxels el presenta (amb  $R^2 = 0.73$ ) per a GPP/NDVI, i un 58 % (amb  $R^2 = 0.74$ ) per a GPP/EVI. Per tant, els índexs NDVI i EVI exerceixen un paper molt més rellevant a l'hora de justificar la variabilitat de la GPP anual al llarg de la sèrie temporal.

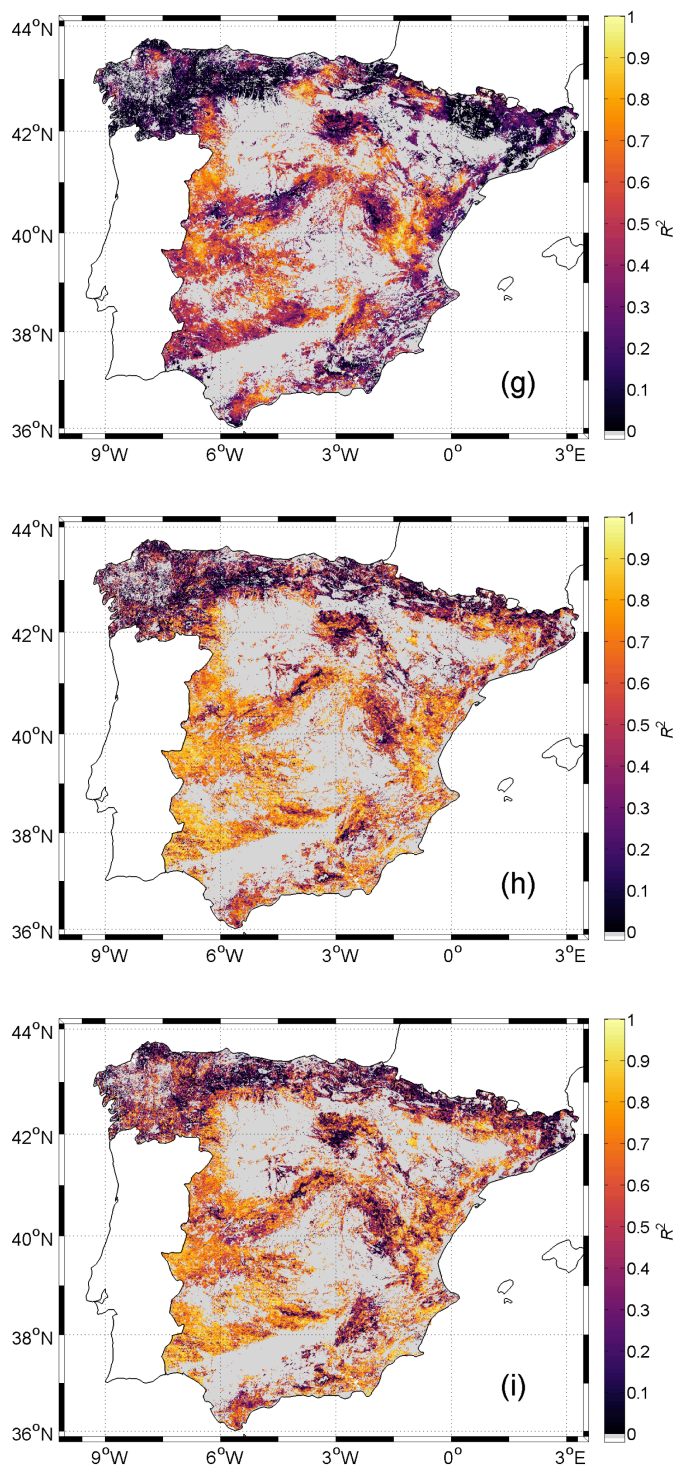
Atès que tant la variabilitat de la PAR com la seua influència en la GPP anual es menor que la dels IVs, es considera que cadascun dels píxels de la imatge es pot caracteritzar per una sèrie de PAR típica o representativa,  $PAR_i^\circ$ . Aquesta PAR típica es va calcular, per a cada dia de l'any, com la mitjana de tots els valors corresponents al dia de l'any considerat durant el període 2005-2012. A més, per a compensar la curtedat de la sèrie temporal, cadascun dels valors diaris de cada any es va calcular prèviament com la mitjana dels valors del dia de l'any corresponent amb una finestra temporal de 5 anys. D'aquesta manera es redueix el pes de possibles dies no típics. La PAR típica anual,  $\Sigma PAR_i^\circ$ , es mostra en la Figura 5.2 b.



**Figura 5.3.** Coeficient de variació entre la sèrie de huit anys de les variables: (a) PAR anual, (b) mitjana anual de l'NDVI, i (c) mitjana anual de l'EVI.



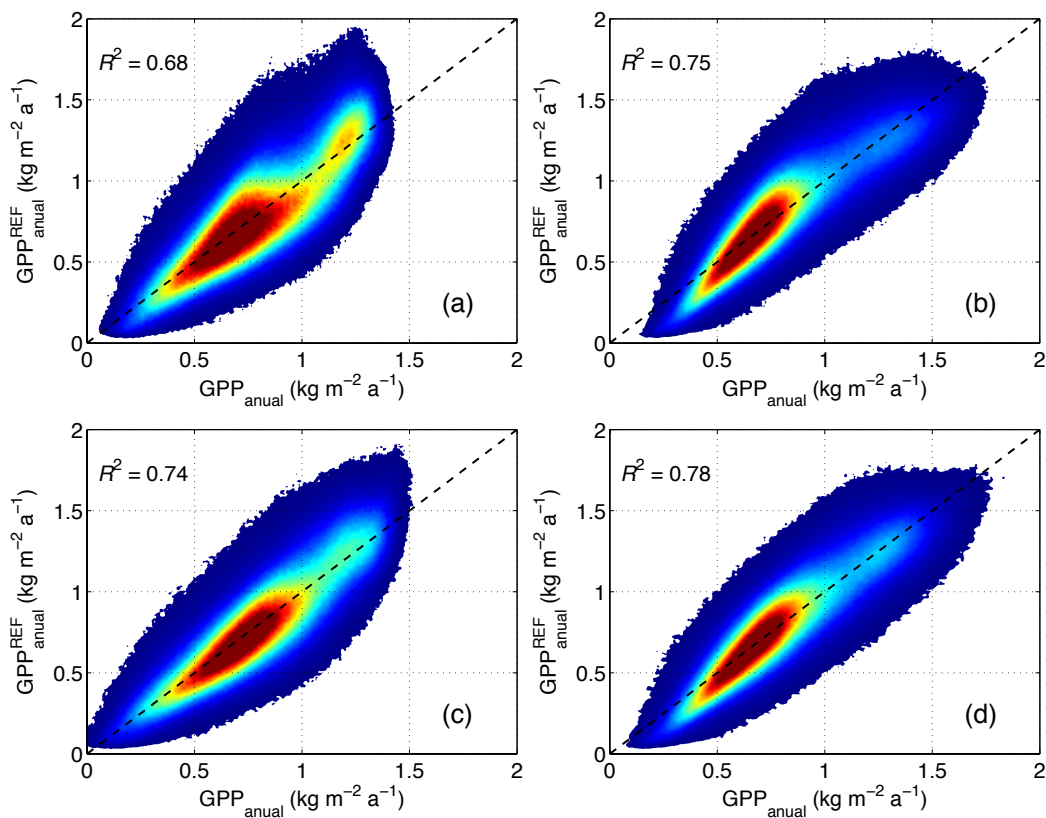
**Figura 5.3 (continuació).** Valor  $p$  de les correlacions entre les variacions interanuals de la GPP anual i les de les variables: (d) PAR anual, (e) mitjana anual de l'NDVI, i (f) mitjana anual de l'EVI.



**Figura 5.3 (continuació).** Coeficient de determinació de les correlacions anteriors: (g) GPP/PAR, (h) GPP/NDVI, i (i) GPP/EVI.

### 5.3.2 CAL/VAL del model

Les figures 5.4 a i 5.4 b mostren els diagrames de dispersió de  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$  vs.  $GPP_{\text{anual}}$  estimada mitjançant  $\overline{NDVI}^Y$  i  $\overline{EVI}^Y$ , respectivament, utilitzant  $C_1$  i  $C_2$  constants en el model semi-empíric amb les dades de tots els píxels considerats pel mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3 i de tots els anys. Tot i que resulta evident la relació pràcticament lineal entre  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$  i cadascun dels IVs, l' $\overline{NDVI}$  (figura 5.4 a) presenta molta més dispersió (i, per tant, un  $R^2$  més baix) que l' $\overline{EVI}$  (figura 5.4 b), i un xicotet núvol de punts relativament dens separat del gran núvol principal.



**Figura 5.4.** El bon funcionament del model semi-empíric proposat s'evidencia per l'elevada correlació entre les estimacions de  $GPP_{\text{anual}}$  i la  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$ , tant utilitzant coeficients de regressió independents del tipus de vegetació (part superior, amb NDVI (a) i EVI (b)) com dependents (part inferior, amb NDVI (c) i EVI (d)). La tonalitat roja indica major densitat de punts. En traç discontinu es mostra la línia 1:1.

La taula 5.2 mostra els valors dels coeficients  $C_1$  i  $C_2$  de l'equació 5.4 obtinguts mitjançant la validació creuada suposant  $\varepsilon$  independent del tipus de vegetació per a cadascun dels dos IVs. La taula 5.3 mostra els estadístics associats al procés de validació.

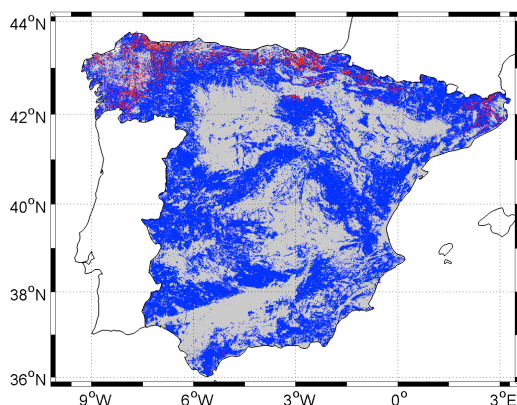
**Taula 5.2.** Valors dels coeficients  $C_1$  i  $C_2$  (en  $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) per a cadascuna de les iteracions i valors mitjans amb la seua desviació estàndard ( $\sigma$ ). Es mostren els resultats tant per NDVI com per l'EVI.

NDVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Mitjana	$\sigma$
$C_1$	-0.596	-0.623	-0.603	-0.609	-0.596	-0.607	-0.613	-0.599	-0.606	0.009
$C_2$	2.386	2.414	2.376	2.388	2.375	2.385	2.395	2.388	2.386	0.012
EVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Mitjana	$\sigma$
$C_1$	-0.779	-0.810	-0.801	-0.811	-0.786	-0.800	-0.808	-0.789	-0.798	0.012
$C_2$	4.03	4.08	4.05	4.08	4.02	4.04	4.06	4.04	4.05	0.02

**Taula 5.3.** Estadístics associats al procés de validació amb els dos IVs, per a cadascuna de les iteracions i per al conjunt global de les dades (en aquest cas, utilitzant la mitjana del coeficients  $C_1$  i  $C_2$  mostrada en la taula 5.2). MBE, MAE i RMSE s'expressen in en  $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ .

NDVI									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Totes les dades
$R^2$	0.73	0.62	0.69	0.68	0.70	0.64	0.65	0.72	0.68
MBE	0.05	-0.03	-0.04	-0.04	0.005	-0.04	-0.03	0.04	-0.010
MAE	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14
RMSE	0.18	0.19	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.17	0.18
EVI									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Totes les dades
$R^2$	0.81	0.71	0.76	0.75	0.78	0.73	0.71	0.79	0.75
MBE	0.07	-0.017	-0.03	-0.02	0.0008	-0.04	-0.05	0.03	-0.008
MAE	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.11	0.12
RMSE	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.15	0.16

La  $GPP_{\text{anual}}$  estimada mitjançant el model semi-empíric amb els coeficients de la taula 5.2 es mostra en la figura 5.4 per als dos IVs. Sobretot quan s'utilitza l'EVI (figura 5.4 b) s'observa que les estimacions es distribueixen al llarg de la línia 1:1, cosa que permet visualitzar de forma molt directa l'acord entre els resultats del model proposat i les dades de referència. Però, quan s'utilitza l'NDVI (figura 5.4 a), la GPP estimada presenta lleugeres desviacions –en concret, el model infravalora la GPP– respecte a la de referència per a valors molt alts de la productivitat. Els píxels corresponents es localitzen en boscos molt densos (figura 5.5).



**Figura 5.5.** Quan utilitza l'NDVI amb coeficients independents del tipus de vegetació, el model infravalora la  $GPP_{\text{anual}}$  en les àrees boscoses denses, assenyalades en la figura en color roig.

El fet de considerar diferents tipus de vegetació implica l'ajust de les distribucions dels diagrames de dispersió de  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$  vs.  $\overline{NDVI}^Y$  i de  $GPP_{\text{anual}}^{\text{REF}}$  vs.  $\overline{EVI}^Y$  (no mostrats, però amb una aparença semblant a la de les figures 5.4 a y 5.4 b, respectivament) utilitzant diferents línies de regressió (coeficients  $C_1$  i  $C_2$  dependents del tipus de vegetació). Per a analitzar aquesta dependència amb el tipus de vegetació es va utilitzar el mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3, que considera les classes GRASS, SHRUB, EBF, LDBF, HDBF, LENF i HENF. Els valors dels coeficients es van calcular per a cadascuna de les iteracions i per a cadascun dels tipus de vegetació. No obstant açò, la taula 5.4 resumeix el valor mitjà i la desviació típica dels coeficients  $C_1$  i  $C_2$  en funció del tipus de vegetació, i la taula 5.5 els estadístics corresponents a la validació global del model amb els dos IVs.



**Taula 5.4.** Valor mitjà i desviació estàndard (baix, entre parèntesi) dels coeficients  $C_1$  i  $C_2$  (en  $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) per a cadascun dels tipus de vegetació. Es mostren els resultats tant per l'NDVI como per l'EVI.

		NDVI						
		GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF
$C_1$		-0.786	-0.778	-0.701	-0.775	-0.898	-0.746	-0.523
		(0.005)	(0.009)	(0.018)	(0.015)	(0.013)	(0.005)	(0.009)
$C_2$		2.885	2.606	2.56	2.71	2.841	2.532	2.056
		(0.017)	(0.015)	(0.02)	(0.02)	(0.020)	(0.008)	(0.015)

		EVI						
		GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF
$C_1$		-1.112	-0.878	-0.82	-0.363	-0.71	-0.860	-0.915
		(0.012)	(0.011)	(0.02)	(0.015)	(0.02)	(0.010)	(0.008)
$C_2$		5.02	4.19	4.14	3.06	3.69	4.225	4.34
		(0.03)	(0.02)	(0.04)	(0.03)	(0.04)	(0.020)	(0.02)

Codi: *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitud evergreen needleleaved forest* (HENF).

**Taula 5.5.** Estadístics associats al procés de validació amb els dos IVs, per a cadascun dels tipus de vegetació i per al conjunt global de les dades. MBE, MAE i RMSE s'expressen en  $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ .

		NDVI							
		GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF	Global
$R^2$		0.65	0.75	0.76	0.55	0.54	0.78	0.59	0.74
<b>MBE</b>		-0.011	-0.007	-0.005	-0.0017	-0.008	-0.007	-0.012	-0.009
<b>MAE</b>		0.13	0.12	0.12	0.11	0.15	0.12	0.11	0.12
<b>RMSE</b>		0.18	0.16	0.16	0.15	0.19	0.15	0.15	0.17

		EVI							
		GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF	Global
$R^2$		0.69	0.78	0.77	0.57	0.63	0.83	0.70	0.78
<b>MBE</b>		-0.006	-0.006	-0.0019	-0.0012	-0.005	-0.0020	-0.004	-0.006
<b>MAE</b>		0.17	0.15	0.13	0.09	0.12	0.12	0.13	0.12
<b>RMSE</b>		0.2	0.20	0.17	0.12	0.16	0.16	0.17	0.15

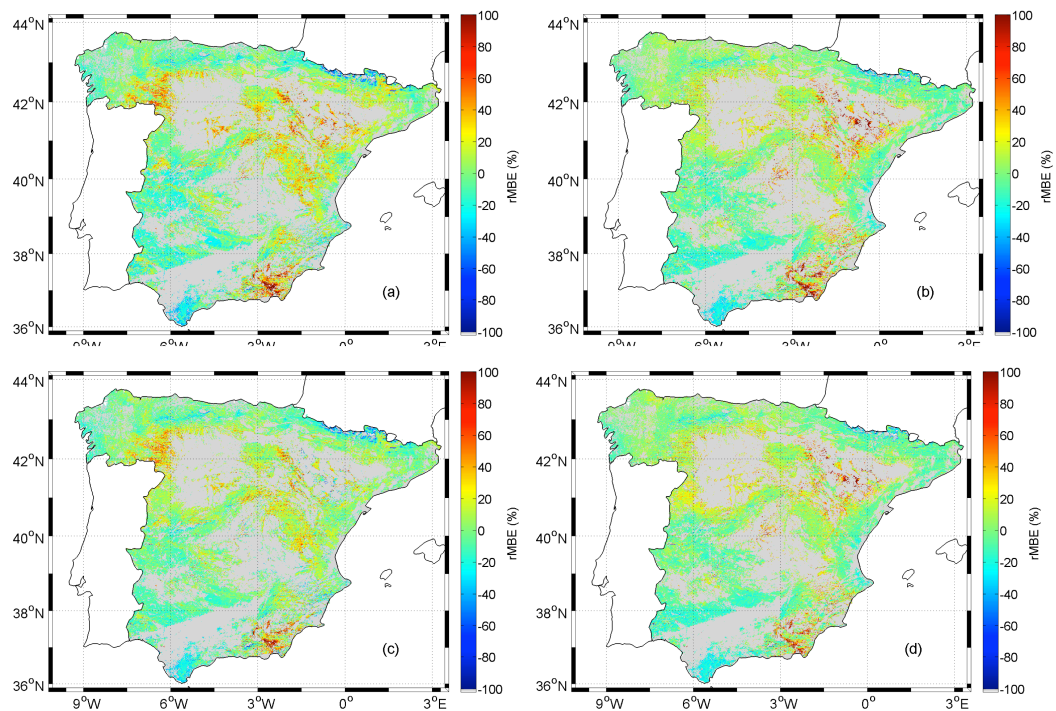
Codi: *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitud evergreen needleleaved forest* (HENF).

El resultat d'aplicar el model amb els coeficients  $C_1$  i  $C_2$  dependents del tipus de vegetació es mostra en les figures 5.4 c i 5.4 d. S'aprecia que incorporar en el model aquesta dependència introdueix millores en la GPP anual estimada quan s'utilitza l'NDVI (figura 5.4 c). Efectivament, el núvol de punts corresponent a boscos densos que prèviament es desviava de les dades de referència ara també se situa sobre la línia 1:1 (el coeficient de determinació s'incrementa de 0.68 a 0.74; última columna en taula 5.5). Quan s'utilitza l'EVI (figura 5.4 d) el resultat només millora lleugerament (el coeficient de determinació s'incrementa de 0.75 a 0.78). Per tant, el funcionament del model amb l'EVI és bastant bo, fins i tot sense incorporar la dependència amb la vegetació, cosa que suposa un avantatge considerable tant en requeriments (un mapa de vegetació adequat a l'àrea de estudi) com en temps de càlcul.

No s'observa una influència molt forta en les incerteses dels diversos tipus de vegetació, però sí en els coeficients de determinació. Els tipus de vegetació SHRUB (matollar), EBF (bosc perenne de full ampla) i LENF (bosc perenne de coníferes de baixa altitud) presenten els valors més alts, mentre que LDBF i HDBF (bosc caducifoli de fulla ampla de baixa i alta altitud, respectivament) els més baixos.

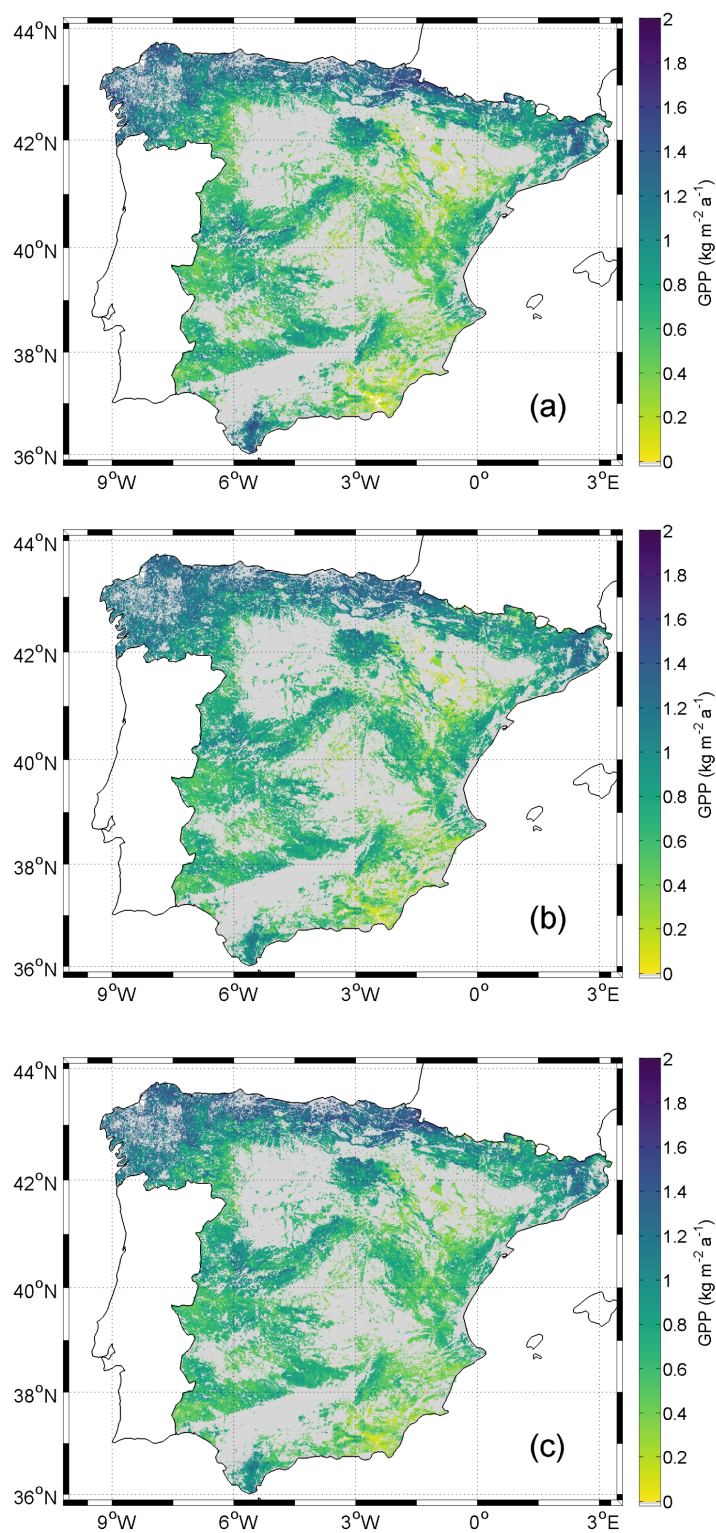
La figura 5.6 mostra l'MBE relatiu, és a dir, dividit per la mitjana, entre la GPP anual de referència i la simulada pel model semi-empíric amb els coeficients independents i dependents del tipus de vegetació i els dos IVs. Quan s'utilitza l'NDVI amb coeficients constants (figura 5.6 a), el 19 % dels píxels presenten  $|rMBE| \leq 5\%$  i el 66 % dels píxels  $|rMBE| \leq 20\%$ . En el cas de l'EVI (figura 5.6 b), el 23 % dels píxels presenten  $|rMBE| \leq 5\%$  i el 74 % dels píxels  $|rMBE| \leq 20\%$ .

Després d'incorporar la dependència amb el tipus de vegetació, en el cas de l'NDVI (figura 5.6 c), el 23 % dels píxels presenten  $|rMBE| \leq 5\%$  i el 74 % dels píxels  $|rMBE| \leq 20\%$ . En el cas de l'EVI (figura 5.6 d), el 25 % dels píxels presenten  $|rMBE| \leq 5\%$  i el 76 % dels píxels  $|rMBE| \leq 20\%$ . És a dir, en aquests últims casos, el biaix del model semi-empíric es redueix lleugerament i, conseqüentment, es redueixen les zones on es produeixen sobre-estimacions o infravaloracions de la GPP anual. No obstant això, quan s'utilitza l'NDVI algunes àrees del sud-est mostren sobre-estimacions al voltant del 100%. El mateix s'observa en la conca de l'Ebre quan s'utilitza l'EVI. Totes aquestes àrees són zones amb molt baixa densitat de vegetació. De fet, algunes estan considerades com a zones semi-àrides, amb nivells de productivitat molt baixos (figura 5.2 a). Doncs, encara que el biaix és important en termes relatius, involucra quantitats menyspreables de GPP anual en termes absoluts.



**Figura 5.6.** rMBE (%) mostrant la distribució espacial de les discrepàncies entre la GPP anual de referència i la simulada utilitzant el model semi-empíric amb valors constants de  $C_1$  i  $C_2$  amb (a) NDVI i (b) EVI i amb valors de  $C_1$  i  $C_2$  dependents del tipus de vegetació amb (c) NDVI i (d) EVI. La tonalitat roja/blava indica sobreestimació/infravaloració del model respecte de les dades de referència.

Com a exemple, la figura 5.7 mostra, per a l'any 2012, la GPP anual de referència (figura 5.7 a) i les simulades amb l'NDVI (figura 5.7 b) i amb l'EVI (figura 5.7 c), utilitzant coeficients dependents del tipus de vegetació en ambdós casos. El patró espacial entre elles presenta una elevada correspondència, encara que es posa de manifest que el model (sobretot quan utilitza l'NDVI) subestima la productivitat en zones forestals molt denses.



**Figura 5.7.** Per a l'any 2012, GPP anual de referència (a) , i GPP anual calculada amb el model utilitzant NDVI (b) i EVI (c) amb coeficients dependents del tipus de vegetació.

### 5.3.3 Obtenció de la GPP anual

La figura 5.8 proporciona la GPP anual per al període 2005-2012, calculada amb el model semi-empíric proposat, amb l'EVI i considerant els coeficients dependents del tipus de vegetació de la taula 5.4. La variabilitat interanual queda incorporada en el model a través de l'EVI, que és sensible als canvis estructurals experimentats per la vegetació i que s'atribueixen sobretot als canvis en el règim de precipitacions. Així, quan la precipitació disminueix, per exemple l'any 2005 (AEMet, 2005), s'observa una reducció en la productivitat. El contrari s'observa en un any més humit com el 2010 (AEMet, 2010).

## 5.4 Discussió

El procés de calibratge/validació és essencial en la metodologia i d'aquest depèn la qualitat de la GPP anual estimada pel model. Per tant, el resultat depèn del conjunt de dades de GPP anual de referència utilitzat per al calibratge. Quant millor siga la GPP de referència, millor serà la GPP modelada. Els resultats presentats es basen en una GPP diària calculada utilitzant el model de Monteith amb els inputs optimitzats per a l'àrea d'estudi (capítol 4). Aquesta GPP presenta una consistència temporal alta amb la de MODIS, però un millor funcionament global perquè utilitza un producte PAR millor, un *land cover* més apropiat i una millor caracterització de l'estrès hídric (Gilabert *et al.*, 2015).

El model, sobretot quan opera amb l'NDVI, sobre-estima la GPP anual en zones semi-àrides i la subestima en zones forestals denses. La primera deficiència podria ser conseqüència del fet que l'NDVI no normalitza correctament l'efecte del sòl de fons, més important en cobertes vegetals disperses. Aquest efecte disminueix, encara que no desapareix totalment, quan s'utilitza l'EVI. Aquesta lleugera sobre-estimació de la GPP en zones semi-àrides també podria ser conseqüència del fet que l'efecte de l'estrès hídric no queda suficientment ben caracteritzat pel model. És a dir, que la primera hipòtesi (taula 5.1) no és vàlida en aquestes zones. No obstant açò, com ja s'ha comentat prèviament, en termes quantitius aquest efecte és menyspreable perquè la productivitat d'aquestes zones és molt baixa.

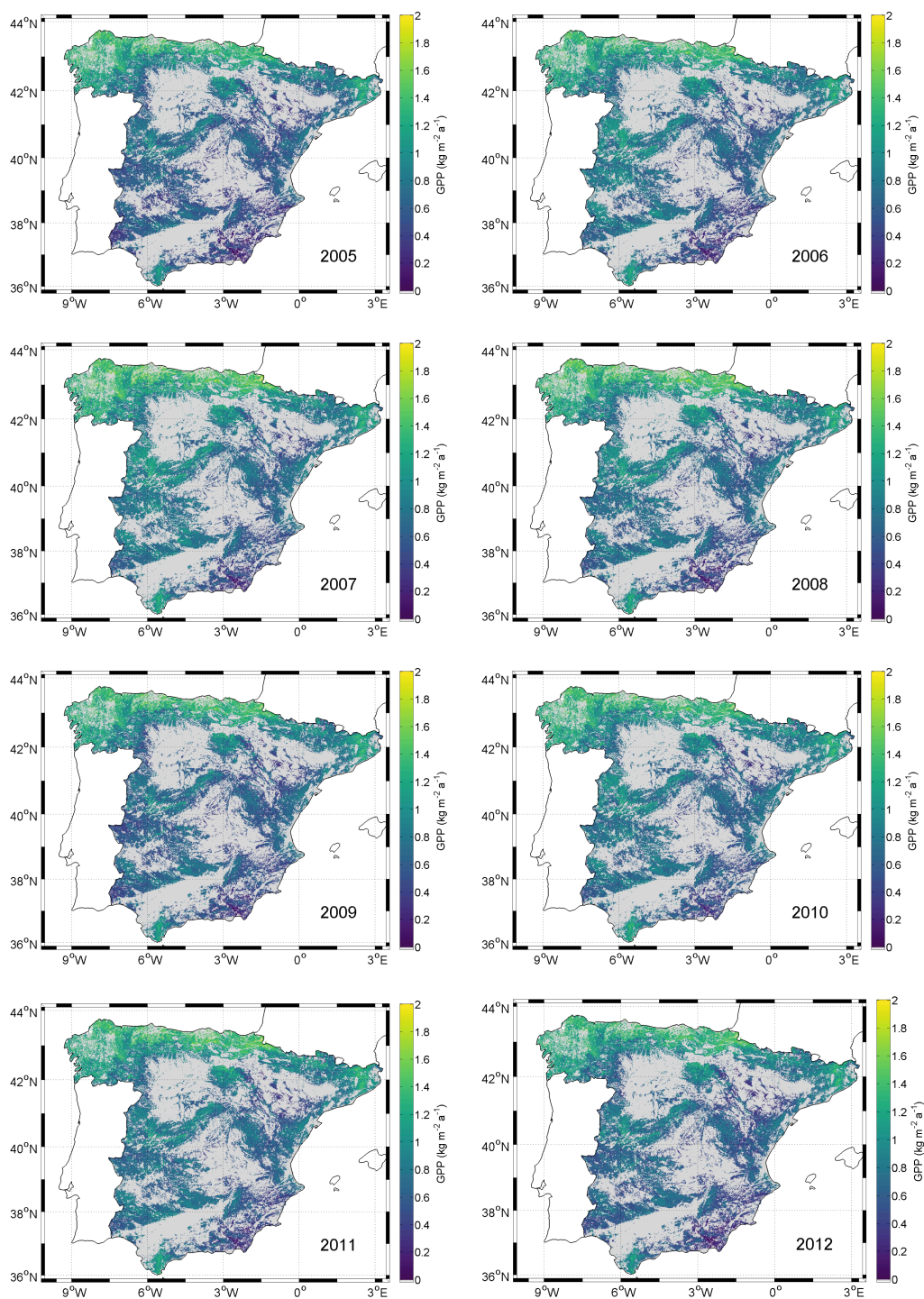


Figura 5.8. GPP anual ( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) calculada pel model amb l'EVI i coeficients dependents del tipus de vegetació (taula 5.4) per al període 2005-2012.

La segona deficiència (GPP menor que la de referència en zones forestals de vegetació molt densa) podria ser conseqüència de que l'NDVI satura a partir d'un valor llindar de LAI; es a dir, l'NDVI roman constant per a valor alts de LAI. En general, aquest valor llindar depèn de l'índex. El de l'EVI és més alt. Per tant, el càlcul de la GPP es beneficia d'aquest rang dinàmic major de l'EVI, com també s'ha mostrat en estudis previs (Schubert *et al.*, 2010). Però no és suficient, amb l'EVI encara es produeix una infravaloració de la GPP. L'explicació d'aquest comportament podria ser que la fotosíntesi està vinculada amb la radiació mitjançant un procés no lineal. La no linearitat, que afecta més a boscos densos, disminueix a mesura que s'integra en períodes de temps més grans (Medlyn *et al.*, 2003) però no desapareix totalment. Tanmateix, aquesta explicació no es pot comprovar amb les dades disponibles.

També es va realitzar el mateix procediment amb el producte MOD17A3 (Running & Zhao, 2015) com a GPP anual de referència. Els resultats obtinguts amb l'NDVI van ser  $R^2 = 0.76$  i  $RMSE = 0.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , mentre que amb l'EVI  $R^2 = 0.72$  i  $RMSE = 0.3 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ . Els bons resultats obtinguts també amb aquest producte amplien l'horitzó d'aplicació del model semi-empíric proposat. A més, fins i tot es pot obtenir una bona aproximació de la GPP anual en absència d'un mapa de tipus de vegetació i, potencialment, es poden utilitzar imatges de mitjana-baixa resolució espacial com les de SEVIRI en estudis de caràcter global.

Tot i treballar a resolució temporal diària en aquest capítol, el model semi-empíric no necessàriament requereix imatges diàries d'IV. També funciona relativament bé quan s'utilitza, per exemple, el producte MOD13A2 (NDVI i EVI) amb una resolució temporal de 16 dies (és a dir, sense aplicar-li un filtre per a l'obtenció de valors diaris). Els estadístics obtinguts són pràcticament idèntics als mostrats en les taules 5.3 i 5.5: utilitzant l'NDVI es van obtenir  $R^2 = 0.68$  i  $RMSE = 0.18 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  amb coeficients independents del tipus de vegetació i  $R^2 = 0.74$  i  $RMSE = 0.17 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  amb coeficients dependents del tipus de vegetació, mentre que amb l'EVI, respectivament,  $R^2 = 0.76$  i  $RMSE = 0.16 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  i  $R^2 = 0.78$  i  $RMSE = 0.15 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ .

També cal mencionar que es va realitzar el mateix experiment amb les diferències mencionades al principi del capítol (especialment un *land cover* diferent que inclou més tipus de vegetació). En particular, les classes *irrigated lands*, *cultivated areas* i *cropland mosaic* no es consideren en aquest capítol i presenten resultats rellevants (Gilabert *et al.*, 2017): mentre que *irrigated lands* presenta pitjors resultats que la majoria de les classes considerades en aquest capítol ( $R^2 = 0.56$  amb l'NDVI,  $R^2 = 0.58$  amb l'EVI i  $RMSE = 0.4 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  amb els dos IVs), les altres dues classes els milloren parcialment ( $R^2$  entre 0.79 i 0.81,  $RMSE$  entre  $0.18 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  i  $0.2 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ). Per tant, també queda demostrada la utilitat del model semi-empíric per a cultius.

## 5.5 Conclusions

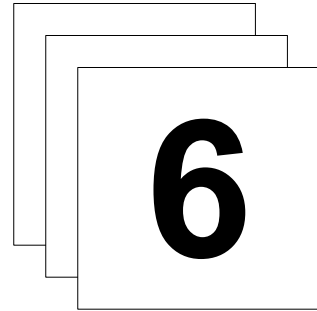
El model semi-empíric proposat presenta l'avantatge de ser independent de variables meteorològiques actuals (en temps real). Només requereix imatges diàries d'un IV (MOD13A2 en aquest cas) i la seqüència anual de la PAR diària representativa per a la zona d'estudi ( $PAR_i^\circ$ ), que permet calcular la mitjana ponderada de l'IV. Per tant, redueix de forma molt significativa el nombre d'inputs necessari per a l'estimació de la GPP anual amb el model de Monteith.

Com més llarga siga la sèrie de PAR utilitzada per al càlcul de la PAR típica, més representativa serà des del punt de vista estadístic. No obstant açò, tampoc és necessària una sèrie extremadament llarga d'anys, ja que la PAR típica només actua com a funció pes per a calcular la mitjana ponderada de l'IV esmentada abans. També cal dir que és precisament aquesta mitjana ponderada la que li dóna originalitat a la proposta i la justifica des d'un punt de vista teòric. No es tracta d'una mera correlació entre l'IV y la GPP que no queda sustentada físicament (Goward *et al.*, 1985; Huete *et al.*, 2015; Running *et al.*, 2004). L'IV és una mesura de la fracció de PAR absorbida durant el procés de fotosíntesi; aleshores, si la PAR és baixa, encara que l'IV siga alt, la productivitat no ho serà. Un mateix IV pot donar lloc a diferents valors de GPP, depenent de la radiació incident, que mostra una estacionalitat molt marcada i que pot afectar de forma diferent els diversos tipus de vegetació en funció de la seua fenologia.

Per altra banda, el calibratge del model és clau i d'aquest depèn la qualitat de les simulacions de la GPP anual. Quant millor siga la GPP de referència, millor serà la GPP modelada.

En aquest cas, els resultats obtinguts amb l'EVI són lleugerament millors que els obtinguts amb l'NDVI i, sobretot, permeten el càlcul de la GPP anual fins i tot en absència d'un *land cover*. No obstant açò, l'EVI de MODIS només està disponible des de l'any 2000, mentre que existeixen sèries temporals d'NDVI al llarg de diverses dècades (per exemple, les de NOAA-AVHRR). Per aquest motiu, convé tenir present que, tot i que la seua incertesa és lleugerament superior, l'NDVI pot exercir un paper molt rellevant en estudis retrospectius a més llarg termini. El model semi-empíric proposat proporciona un excel·lent compromís entre funcionalitat i simplicitat per a aquest tipus d'estudis retrospectius.





## Calibratge del Biome-BGC

Aquest capítol centra la seua atenció en dos inputs del Biome-BGC capaços de modelitzar els efectes de l'estrès hídric en la fotosíntesi de les plantes: la conductància estomàtica màxima i la profunditat radicular. Com es comenta més endavant, s'escullen valors de conductància estomàtica màxima obtinguts en estudis previs realitzats a Itàlia, que presenta característiques ecoclimàtiques similars a les de l'àrea d'estudi. Per altra banda, es realitza un calibratge per a obtindre els valors òptims de profunditat radicular, ja que no es troba disponible per a l'àrea d'estudi. Per a això, se simulen diferents sèries de GPP amb el Biome-BGC ( $GPP_{BGC}$ ) utilitzant diferents valors de profunditat radicular i es comparen amb les sèries temporals de GPP obtingudes en el capítol 4 ( $GPP_{PEM}$ ), que en el present capítol es consideren també la GPP de referència.

La metodologia i els resultats presentats en aquest capítol es van publicar en

Sanchez-Ruiz, S., Chiesi, M., Fibbi, L., Carrara, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Optimized application of Biome-BGC for modeling the daily GPP of natural vegetation over Peninsular Spain, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 531–546. doi: 10.1002/2017JG004360

## 6.1 Aspectes rellevants del Biome-BGC

El Biome-BGC es va utilitzar en la modalitat *spin-up-and-go*, és a dir, realitzant una primera execució per a arribar a una situació d'equilibri entre els fluxos d'entrada i els d'eixida (capítol 2). Com a inputs es van fer servir els conjunts de dades següents (capítol 3):  $T_{\min, \text{AEMET}}$ ,  $T_{\max, \text{AEMET}}$ , PRE i  $R_{g, \text{SEVIRI}}$ , mapes d'argila, sorra i llim (textura del sòl) i mapa d'elevació. La durada del dia, la temperatura mitjana de l'aire i la pressió parcial de vapor d'aigua es van calcular mitjançant el programa MT-CLIM (capítol 2) a partir de  $T_{\min, \text{AEMET}}$ ,  $T_{\max, \text{AEMET}}$  i PRE. Els paràmetres ecofisiològics utilitzats per a cada tipus de vegetació considerat pel mapa de tipus de vegetació (capítol 3) es recullen en la taula 6.1 i es van obtenir com a resultat d'estudis realitzats a Itàlia que, com s'ha esmentat abans, presenta característiques ecolimàtiques similars a les de l'àrea d'estudi. En particular, el procediment del calibratge del model per a l'obtenció dels valors s'explica en el treball de Chiesi *et al.* (2007), mentre que el procediment de la parametrització pot trobar-se als treballs de Chirici *et al.* (2015) i Maselli *et al.* (2013) respectivament per a boscos i matollars i per a praderies. En el cas dels inputs no mencionats en aquest paràgraf, es van utilitzar els valors per defecte (taula 2.2).

### 6.1.1 Conductància estomàtica

La conductància estomàtica és la velocitat a la que s'intercanvien gasos entre l'atmosfera i l'interior de les plantes a través dels estomes de les seues fulles. En el cas del vapor d'aigua, aquest ix de la planta. En el cas del  $\text{CO}_2$ , per al propòsit d'aquest capítol, que només tracta fluxos bruts, es considera que entra en la planta, encara que també és expulsat d'aquesta mitjançant els processos de respiració. Els estomes són orificis situats a la superfície de les fulles que, mitjançant la seua obertura, controlen l'esmentat intercanvi de gasos amb l'objectiu de minimitzar la pèrdua d'aigua que implica l'assimilació de carboni (Farquhar & Sharkey, 1982).

**Taula 6.1.** Paràmetres ecofisiològics per a cadascun dels tipus de vegetació considerats.

KEYWORD (*)	GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF
Woody/non-woody flag	0	1	1	1	1	1	1
Evergreen/deciduous flag	0	1	1	0	0	1	1
C3/C4 flag	1	1	1	1	1	1	1
Model phenology	0	1	1	1	1	1	1
ONDAY	0	0	0	66	0	0	0
OFFDAY	364	0	0	341	0	0	0
Transfer growth period as fraction of growing season	1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Litterfall as fraction of growing season	1	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3
Annual leaf and fine root turnover fraction (a <sup>-1</sup> )	1	0.25	0.33	1	1	0.33	0.33
Annual live wood turnover fraction (a <sup>-1</sup> )	0	0.7	0.70	0.7	0.7	0.7	0.7
Annual whole plant mortality fraction (a <sup>-1</sup> )	0.1	0.02	0.00625	0.01	0.007143	0.005	0.007692
Annual fire mortality fraction (a <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0	0
Allocation new fine root C/new leaf C	2	1	1	1.2	1.2	1.4	1.4
Allocation new stem C/new leaf C	0	0.22	2.2	2.2	2.2	1.2	2.2
Allocation new live wood C/new total wood C	0	1	0.16	0.16	0.16	0.071	0.071
Allocation new coarse root C/new stem C	0	0.3	0.22	0.23	0.22	0.29	0.29
Allocation current growth proportion	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5
C/N of leaves	24	42	42	25	25	42	42
C/N of leaf litter	49	93	49	55	55	93	93
C/N of fine roots	42	42	42	48	48	58	58
C/N of live wood	0	50	42	48	48	58	58
C/N of dead wood	0	729	300	550	550	730	730
Leaf litter labile proportion	0.39	0.32	0.32	0.38	0.38	0.31	0.31
Leaf litter cellulose prop.	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.45	0.45
Leaf litter lignin prop.	0.17	0.24	0.24	0.18	0.18	0.24	0.24
Fine root labile prop.	0.30	0.3	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Fine root cellulose prop.	0.45	0.45	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44

(\*) Totes les magnituds que fan referència a proporcions, fraccions o ràtios son adimensionals (excepte les quatre anuals que tenen unitats de a<sup>-1</sup>).

Codi: *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitude evergreen needleleaved forest* (HENF).

Taula 6.1. Continuació.

KEYWORD (*)	GRASS	SHRUB	EBF	LDBF	HDBF	LENF	HENF
Fine root lignin prop.	0.25	0.25	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Dead wood cellulose prop.	0.75	0.76	0.76	0.77	0.77	0.71	0.71
Dead wood lignin prop.	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.29	0.29
Canopy water interception coefficient ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )	0.021	0.041	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Canopy light extinction coefficient (dimensionless)	0.6	0.5	0.7	0.54	0.54	0.51	0.51
All-sided to projected leaf area ratio	2	2.6	2	2	2	2.6	2.6
Canopy average specific leaf area ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ )	45	12	12	32	32	12	12
Shaded SLA / sunlit SLA	2	2	2	2	2	2	2
Fraction of leaf N in Rubisco	0.38	0.021	0.029	0.09	0.162	0.022	0.027
Maximum stomatal conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.0027	0.0018	0.0016	0.002	0.0045	0.0024	0.0032
Cuticular conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.000027	0.000018	0.000016	0.00002	0.000045	0.000024	0.000032
Boundary layer conductance ( $\text{m s}^{-1}$ )	0.04	0.08	0.01	0.01	0.01	0.08	0.08
Leaf water potential: start of conductance reduction (MPa)	-0.6	-0.6	-0.54	-0.306	-0.34	-0.65	-0.65
Leaf water potential: complete conductance reduction (MPa)	-2.3	-2.3	-3.51	-1.98	-2.2	-2.5	-2.5
VPD: start of conductance reduction (Pa)	930	930	1620	990	1100	610	610
VPD: complete conductance reduction (Pa)	4100	4100	3690	2340	3600	3100	3100

Codi: *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitude evergreen needleleaved forest* (HENF).

Com s'explica al capítol 2, els tres principals factors que limiten la fotosíntesi són la difusió de  $\text{CO}_2$ , la taxa de carboxilació i el transport d'electrons. Encara que s'han trobat relacions entre la conductància estomàtica i la taxa de carboxilació i el transport d'electrons en diferents espècies quan pateixen estrès hídric (Medrano *et al.*, 2002), aquestes relacions saturen ràpidament de manera que la variació en la conductància estomàtica només afecta considerablement la taxa de carboxilació i el transport d'electrons quan aquestes variables presenten valor baixos. Tanmateix, la relació trobada entre la conductància estomàtica i l'assimilació de carboni és més forta que les anteriors i més uniforme entre el mateix rang de valors, és a dir, no satura o satura molt més tard.

En canvi, la trobada entre la conductància estomàtica i l'assimilació de carboni en condicions de saturació de CO<sub>2</sub> es similar a les trobades entre la conductància estomàtica i la taxa de carboxilació i entre la conductància estomàtica i el transport d'electrons. Per tant, es conclou experimentalment que la conductància estomàtica afecta l'assimilació de carboni quan la fotosíntesi està limitada per la difusió de CO<sub>2</sub>. En aquest cas, l'assimilació de carboni és directament proporcional a la conductància estomàtica (Farquhar & Sharkey, 1982). Una menor conductància estomàtica implica una major resistència a la difusió de CO<sub>2</sub>, de manera que una menor quantitat d'aquest gas arriba als llocs de carboxilació per unitat de temps i l'assimilació de carboni es veu conseqüentment reduïda.

En el Biome-BGC, la conductància estomàtica  $g_s$  (m s<sup>-1</sup>) es calcula com el producte de la conductància estomàtica màxima  $g_{s,max}$  (m s<sup>-1</sup>) i cinc escalars adimensionals (capítol 2). Quatre d'ells –els relacionats amb la densitat del flux de fotons, el potencial matricial del sòl, la temperatura mínima de l'aire i el dèficit de pressió de vapor– varien entre 0 i 1. L'altre és un factor corrector que depèn de la pressió i la temperatura de l'aire. La conductància de la fulla per a la transpiració del vapor d'aigua  $g_{T,W}$  (m s<sup>-1</sup>) es calcula a partir de la  $g_s$ :

$$g_{T,W} = g_{bl} (g_s + g_c) / (g_{bl} + g_s + g_c) \quad (6.1)$$

on  $g_{bl}$  és la conductància de la capa límit de la fulla i  $g_c$  la conductància cuticular. Després la  $g_{T,W}$  es transforma en una conductància per al CO<sub>2</sub> en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ,

$$g_{T,C} = 10^6 g_{T,W} / (1.6 R T_{day}) \quad (6.2)$$

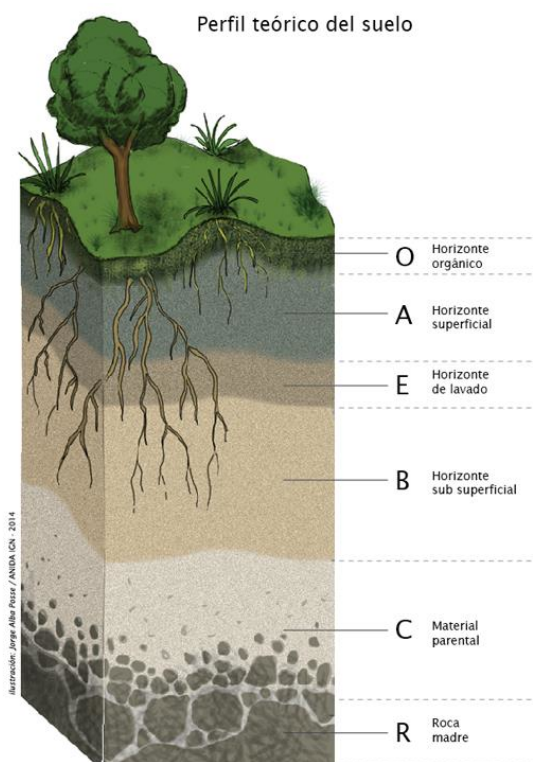
on  $R$  és la constant universal dels gasos ideals i  $T_{day}$  la temperatura diürna de l'aire en K. Finalment es plantegen les tres equacions que representen els tres casos que limiten l'assimilació de carboni i es resolen com s'explica al capítol 2.

El Biome-BGC utilitza com a input una conductància estomàtica màxima projectada sobre l'àrea que se simula i, per tant, representa el valor efectiu de totes les plantes compreses en l'esmentada àrea (píxels d'1 km<sup>2</sup> en aquesta tesi). Basant-se en els estudis realitzats fins a aquell moment, que no havien trobat diferències significatives entre la  $g_{s,max}$  de diferents tipus de vegetació natural, White *et al.* (2000) van utilitzar  $g_{s,max} = 0.006 \text{ m s}^{-1}$  (i  $g_c = g_{s,max}/100$ ) indistintament. No obstant això, en aquesta tesi s'utilitzen  $g_{s,max}$  i  $g_c$  dependents del tipus de vegetació, d'acord amb el resultat del calibratge realitzat a Itàlia (taula 6.1).

### 6.1.2 Profunditat radicular

La profunditat radicular és aquella fins la qual les arrels de les plantes poden créixer. Aquesta profunditat determina la part activa del sòl amb capacitat de restituir aigua a

l'atmosfera mitjançant la transpiració de les plantes (Yang *et al.*, 2016) i afecta significativament a l'intercanvi energètic i de carboni entre la superfície terrestre i l'atmosfera degut a l'acoblament entre els cicles terrestres de l'aigua, l'energia i el carboni (Guswa, 2010). La profunditat radicular varia segons l'espècie. Cal, per tant, diferenciar-la de la profunditat fins a l'horitzó D (també anomenat R, de roca mare), la que normalment proporcionen els mapes de sòls.



**Figura 6.1.** Tipus d'horitzons que pot presentar el perfil d'un sòl.

(Font: [http://www.sociedadgeologica.es/archivos\\_pdf](http://www.sociedadgeologica.es/archivos_pdf))

Canadell *et al.* (1996) van recollir les profunditats radiculars màximes de les principals espècies del planeta. Generalment, les espècies llenyoses presenten una major profunditat radicular que les espècies herbàcies. Els valors més elevats es van trobar per a arbres en zones desèrtiques. Unes arrels més profundes els capaciten per a absorbir aigua de capes freàtiques permanents que solen trobar-se a majors profunditats i, conseqüentment, augmenten la seua probabilitat de supervivència. Algunes espècies mediterrànies també presenten aquestes característiques. De fet, segons Schenk & Jackson (2002), la profunditat radicular està relacionada amb el clima a nivell global i els valors més elevats es troben en ecosistemes situats en zones des de temperades fins a tropicals que pateixen

limitació hídrica estacional. Les característiques del sòl també són importants. Per exemple, unes arrels que s'estenen lateralment són més apropiades per a absorbir aigua i nutrients després d'esdeveniments curts de precipitació o en sòls poc profunds que concentren els nutrients en els horitzons més superficials (Guerrero-Campo *et al.*, 2006). Biogeogràficament la profunditat radicular augmenta amb la precipitació mitjana anual, la demanda evaporativa, la durada del període vegetatiu i la infiltració (Canadell *et al.*, 1996; Schenk & Jackson, 2005, 2002; Yang *et al.*, 2016).

La profunditat radicular ( $z_{\text{root}}$ ) és un paràmetre rellevant en el Biome-BGC pels motius que s'exposen a continuació. L'extracció de l'aigua del sòl per part de les plantes no depèn únicament de l'aigua continguda en el sòl, també depèn de l'energia amb la que el sòl la reté. Es defineix el potencial total de l'aigua del sòl com l'energia necessària per a separar un volum unitat de la matriu del sòl. Es pot expressar en unitats d'energia per unitat de volum, és a dir, en unitats de pressió. Com que l'aigua es mou de major a menor potencial, els gradients de potencial són clau. En general, aquest potencial total de l'aigua del sòl es pot expressar com la suma algebraica de quatre potencials diferents (Kirkham, 2005): l'osmòtic, el gravitatori, el de pressió i el matricial (que inclou al capil·lar). Uns són positius (faciliten l'extracció de l'aigua) i altres negatius (en faciliten la seua retenció). El potencial osmòtic és negatiu degut als gradients de concentració de soluts (en el sòls amb alta concentració de sals, la planta ha de realitzar un gran esforç per a absorbir aigua a través de les membranes cel·lulars de les seues arrels). El signe del potencial gravitatori depèn de l'altura de referència considerada, encara que aquesta se sol escollir per a que el signe siga positiu. El potencial matricial és nul en sòls saturats i només actua en sòls no saturats. És conseqüència de les forces d'adhesió i de cohesió entre les molècules d'aigua i les de sòl i, per tant, negatiu. Com més sec està el sòl, més energia es necessita per a extraure'n l'aigua. Aquest potencial i el de pressió (que és positiu i, com és degut a la pressió hidrostàtica, només es dóna en sòls saturats) són excloents<sup>1</sup>. Com en la pràctica el potencial osmòtic es manté constant en el perfil del sòl, es considera que l'aigua en el sòl es mou en el sentit que marca el potencial hidràulic (suma dels altres tres potencials) decreixent.

En el Biome-BGC, el potencial matricial es calcula com:

$$\Psi_m = \Psi_{m,s} (\theta/\theta_s)^b \quad (6.3)$$

on  $\Psi_{m,s}$  i  $\theta_s$  són el potencial matricial i el contingut volumètric d'aigua en el sòl en condicions de saturació. Aquestes dues variables i l'exponent  $b$  depenen de les proporcions d'argila i sorra en el sòl (Cosby *et al.*, 1984).

<sup>1</sup> És a dir, no poden ser els dos diferents de zero al mateix temps.

El contingut volumètric d'aigua en el sòl  $\theta$  s'obté a partir del contingut d'aigua en el sòl per unitat de superfície  $m_W$  en  $\text{kg m}^{-2}$ , la densitat de l'aigua  $\rho_W$  ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ) i la  $z_{\text{root}}$  (en m) mitjançant

$$\theta = m_W / (\rho_W z_{\text{root}}) \quad (6.4)$$

Amb  $\Psi_m$  es calcula un dels escalars que redueixen la  $g_{s,\text{max}}$ :

$$m_\Psi = (\Psi_{m,\text{close}} - \Psi_m) / (\Psi_{m,\text{close}} - \Psi_{m,\text{open}}) \quad (6.5)$$

on  $\Psi_{m,\text{close}}$  i  $\Psi_{m,\text{open}}$  representen, respectivament, el límit inferior per davall del qual els estomes estan totalment tancats i el límit superior per damunt del qual els estomes estan totalment oberts. Per tant, quan  $\Psi_m < \Psi_{m,\text{close}}$ ,  $m_\Psi$  pren el valor 0 i quan  $\Psi_m > \Psi_{m,\text{open}}$ ,  $m_\Psi$  pren el valor 1. A l'apartat 6.1.1 ja s'ha explicat com afecta la  $g_{s,\text{max}}$  a l'assimilació de carboni.

## 6.2 Metodologia

El Biome-BGC utilitza una profunditat radicular que té en compte la fracció de la zona radicular ocupada per roques i representa el valor efectiu de totes les plantes contingudes en l'àrea modelitzada ( $1 \text{ km}^2$ ). En aquesta tesi no es va utilitzar el valor per defecte de  $z_{\text{root}}$  (100 cm), sinó que es va obtenir un valor òptim en cada cas, definit com aquell que minimitza l'RSME entre la GPP simulada pel Biome-BGC ( $GPP_{\text{BGC}}$ ) i l'obtinguda pel model de Monteith en el capítol 4 ( $GPP_{\text{PEM}}$ ), que en aquest capítol es considera la GPP de referència. Primer es va realitzar un calibratge a nivell local en els quatre llocs de validació descrits en el capítol 3 per a demostrar que l'ús d'una  $z_{\text{root}}$  optimitzada en lloc del seu valor per defecte millora significativament els resultats de les simulacions. Després es va aplicar la mateixa metodologia a cada píxel de tota l'àrea d'estudi.

### 6.2.1 Escala local

En primer lloc, es van comparar les sèries de  $GPP_{\text{PEM}}$  amb les de  $GPP_{\text{EC}}$  als quatre llocs de validació descrits al capítol 3. Després es van simular les sèries de  $GPP_{\text{BGC}}$  variant  $z_{\text{root}}$  entre 5 cm i 200 cm cada 5 cm. La  $z_{\text{root}}$  òptima es va trobar comparant la  $GPP_{\text{BGC}}$  amb la  $GPP_{\text{PEM}}$  i seleccionant aquella amb la qual es va obtenir el menor RMSE. Finalment, les sèries de  $GPP_{\text{BGC}}$  simulades amb el valor de  $z_{\text{root}}$  per defecte ( $GPP_{\text{BGC,DEF}}$ , amb  $z_{\text{root}} = 100 \text{ cm}$ ) i les simulades amb la  $z_{\text{root}}$  òptima ( $GPP_{\text{BGC,X}}$ , on X indica el valor de la  $z_{\text{root}}$  òptima en cm) es van comparar amb les sèries de  $GPP_{\text{EC}}$ .



L'aplicació de la metodologia en els quatre llocs de validació utilitza sèries temporals de variables meteorològiques corregides amb l'ajuda de mesures de camp (capítol 3).

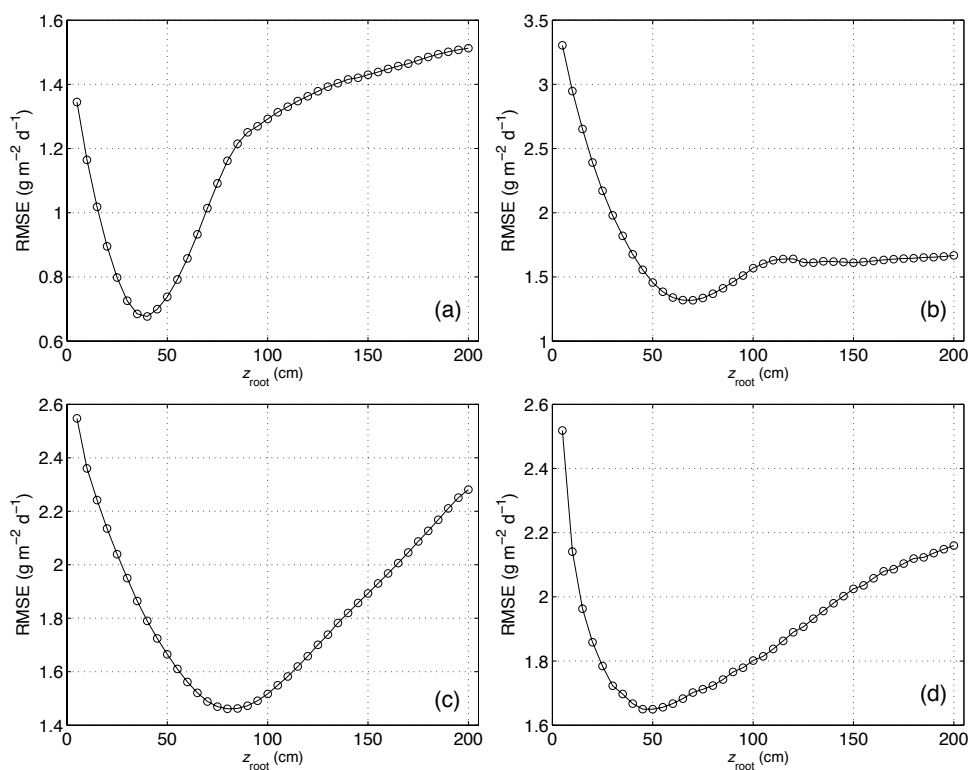
## 6.2.2 Escala regional

Com s'explica al capítol 2, el Biome-BGC divideix l'espai de simulació en cel·les i realitza les simulacions individualment per a cadascuna d'elles, és a dir, treballa unidimensionalment. En aquest cas les cel·les són píxels d'1 km<sup>2</sup>. En primer lloc es van simular les sèries de  $GPP_{BGC}$  per a cadascun del píxels que contenen un dels tipus de vegetació considerats pel mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3 variant  $z_{root}$  des de 20 cm fins a 160 cm cada 20 cm. Després es van comparar les sèries temporals de  $GPP_{BGC}$  amb les de  $GPP_{PEM}$  i es va trobar una  $z_{root}$  òptima per a cada píxel identificant-la, de nou, com aquella que va obtenir el menor RMSE. Com a resultat, es va generar un mapa de  $z_{root}$  òptima que es va analitzar en funció del tipus de vegetació. També es van generar mapes d'RMSE entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC,DEF}$  i entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC,OPT}$  ( $GPP_{BGC}$  simulada amb la  $z_{root}$  òptima).

## 6.3 Resultats

### 6.3.1 Escala local

La figura 6.2 mostra l'RMSE entre la  $GPP_{PEM}$  i la  $GPP_{BGC}$  en funció de la  $z_{root}$  per als quatre llocs de validació. ES-CPa presenta un mínim molt agut (RMSE = 0.7 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) en  $z_{root}$  = 40 cm. En ES-ES1, l'RMSE disminueix ràpidament fins a  $z_{root}$  = 70 cm, on arriba al seu mínim (1.3 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Després augmenta progressivament i s'estabilitza al voltant d'1.6 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. El mínim RMSE (1.5 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) en ES-LMa es troba a  $z_{root}$  = 80 cm i no dista molt del valor obtingut quan  $z_{root}$  = 100 cm. En el cas d'ES-VDA, s'observa una disminució brusca de l'RMSE fins a arribar al seu mínim (1.6 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) en  $z_{root}$  = 50 cm i després creix suaument fins a arribar a RMSE = 2 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> en  $z_{root}$  = 200 cm.



**Figura 6.2.** RMSE entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC}$  en funció de  $z_{root}$  per a ES-CPa (a), ES-ES1 (b), ES-LMa (c) i ES-VDA (d).

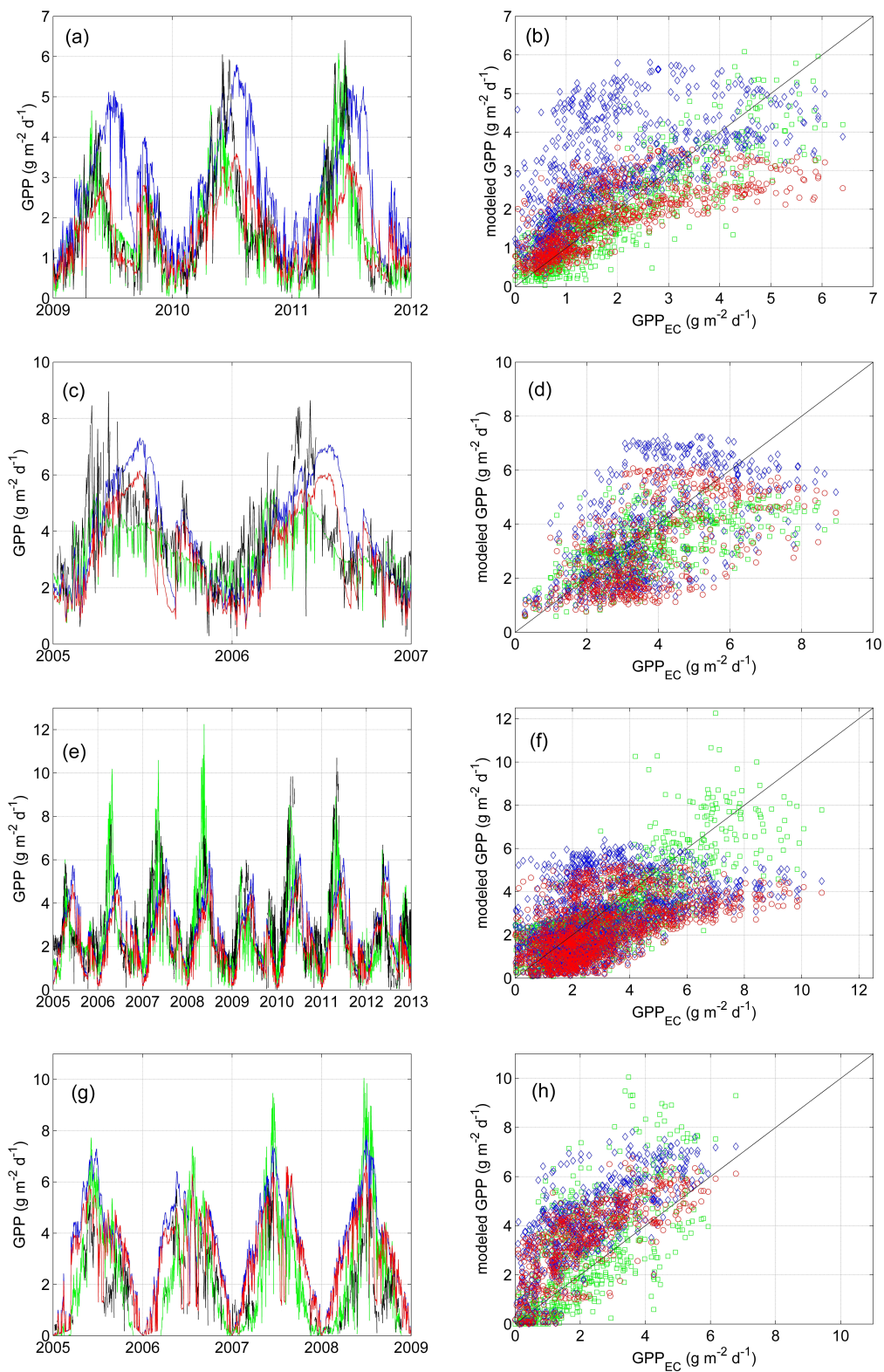
La taula 6.2 mostra els estadístics resultants de la comparació entre  $GPP_{EC}$  i  $GPP_{PEM}$ ,  $GPP_{BGC,DEF}$  i  $GPP_{BGC,X}$  en els quatre llocs de validació. En ES-CPa,  $GPP_{PEM}$  presenta els millors resultats i  $GPP_{BGC,40}$  millora tots els estadístics obtinguts per  $GPP_{BGC,DEF}$ , especialment l'MBE. En ES-ES1, les tres sèries ( $GPP_{PEM}$ ,  $GPP_{BGC,DEF}$  i  $GPP_{BGC,70}$ ) presenten resultats similars.  $GPP_{BGC,DEF}$  presenta el menor MBE, però generalment  $GPP_{PEM}$  presenta els millors resultats i  $GPP_{BGC,70}$  millora  $GPP_{BGC,DEF}$ .  $GPP_{PEM}$  presenta molt bons resultats en ES-LMa, però els resultats obtinguts per les sèries simulades amb el Biome-BGC són considerablement pitjors.  $GPP_{BGC,80}$  presenta un coeficient de determinació més alt que  $GPP_{BGC,DEF}$ , però un MBE també més alt, mentre que la resta d'estadístics són iguals. El cas d'ES-VDA és l'únic en el qual els coeficients de determinació obtinguts per  $GPP_{BGC}$  són superiors als obtinguts per  $GPP_{PEM}$ . A més,  $GPP_{BGC,50}$  redueix els errors obtinguts per  $GPP_{BGC,DEF}$ .

Les sèries temporals de les distintes GPPs i els diagrames de dispersió de les simulades amb els models front a les estimades en les torres EC es mostren en la figura 6.3. En ES-CPa (figura 6.3 a), s'observa com  $GPP_{EC}$  presenta un màxim absolut anual seguit d'una disminució deguda sobretot a l'estrès hídric típic dels estius mediterranis. Quan la vegetació ja s'ha recuperat d'aquest estrès,  $GPP_{EC}$  presenta un màxim relatiu anual cap al

final de l'any. Generalment,  $GPP_{PEM}$  presenta un molt bon acord amb  $GPP_{EC}$  durant els 3 anys, mentre que  $GPP_{BGC,DEF}$  sobreestima clarament tant  $GPP_{EC}$  com  $GPP_{PEM}$  durant el període d'estrès hídric.  $GPP_{BGC,40}$  pràcticament elimina aquesta sobreestimació, però al mateix temps subestima els màxims de producció anuals. El perfil temporal de  $GPP_{EC}$  en ES-ES1 (figura 6.3 c) és molt similar a l'observat en ES-CPa, però en aquest cas la disminució de la producció no és tan pronunciada. Encara que amb una subestimació sistemàtica notable,  $GPP_{PEM}$  reproduïx la variació temporal de  $GPP_{EC}$ . En canvi,  $GPP_{BGC,DEF}$  subestima  $GPP_{EC}$  des de l'inici del període vegetatiu fins al seu màxim absolut anual, però la sobreestima fortament durant el període d'estrès hídric.

**Taula 6.2.** Estadístics resultants de la comparació entre  $GPP_{EC}$  i  $GPP_{PEM}$ ,  $GPP_{BGC,DEF}$  i  $GPP_{BGC,X}$  en els quatre llocs de validació. (MBE, MAE i RMSE en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ ).

<b>ES-CPa</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{PEM}$	0.74	-0.07	0.5	0.7
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,DEF}$	0.41	1.0	1.2	1.5
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,40}$	0.55	-0.09	0.7	0.9
<b>ES-ES1</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{PEM}$	0.41	-0.6	1.0	1.4
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,DEF}$	0.35	0.05	1.3	1.6
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,70}$	0.38	-0.6	1.2	1.5
<b>ES-LMa</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{PEM}$	0.66	-0.4	0.9	1.2
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,DEF}$	0.23	-0.3	1.4	1.8
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,80}$	0.27	-0.7	1.4	1.8
<b>ES-VDA</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{PEM}$	0.48	0.7	1.3	1.7
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,DEF}$	0.56	1.8	1.8	2
$GPP_{EC}$ vs. $GPP_{BGC,50}$	0.56	1.2	1.4	1.6



**Figura 6.3.** Esquerra: sèries temporals de  $GPP_{EC}$  (negre),  $GPP_{PEM}$  (verd),  $GPP_{BGC,DEF}$  (blau) i  $GPP_{BGC,X}$  (roig). Dreta: diagrames de dispersió de  $GPP_{PEM}$  (quadrats verds),  $GPP_{BGC,DEF}$  (rombes blaus) i  $GPP_{BGC,X}$  (cercles rojos) front a  $GPP_{EC}$ . De dalt a baix: ES-CPa, ES-ESI, ES-LMa i ES-VDA.

$GPP_{BGC,70}$  només aconsegueix reduir parcialment aquesta sobreestimació al temps que accentua la subestimació inicial. En ES-LMa (figura 6.3 e) el perfil temporal de  $GPP_{EC}$  també és similar als anteriors, però l'amplitud és major.  $GPP_{PEM}$  reproduïx molt bé aquest comportament i inclús sobreestima els màxims absoluts anuals en alguns casos. Contràriament, cap de les  $GPP_{BGC}$  és capaç de reproduir aquests màxims, sinó que els subestimen notablement. A més,  $GPP_{BGC,DEF}$  sobreestima  $GPP_{EC}$  durant els períodes d'estrès hídric i  $GPP_{BGC,80}$  només redueix lleugerament aquesta sobreestimació.  $GPP_{EC}$  en ES-VDA presenta una quantitat considerable de buits i presenta els màxims absoluts anuals a l'estiu, coincidint amb el període de màxima irradiació solar. De fet, la seua reducció posterior es deu a la pastura que té lloc des de mitjans de juny fins a principis d'octubre (capítol 3), ja que aquest lloc no pateix estrès hídric generalment.  $GPP_{PEM}$  sobreestima alguns mínims relatius de  $GPP_{EC}$ .  $GPP_{BGC,DEF}$  sobreestima sistemàticament  $GPP_{EC}$  durant tot el període.  $GPP_{BGC,50}$  només redueix aquesta sobreestimació lleugerament, però reproduïx els mínims relatius de  $GPP_{EC}$  millor que  $GPP_{PEM}$ .

Als diagrames de dispersió (figura 6.3) s'aprecia com l'ús de la  $z_{root}$  òptima fa que el núvol de punts de  $GPP_{BGC}$  s'aproxime al de  $GPP_{PEM}$ , que generalment es distribueix sobre la línia 1:1. Particularment, ES-ES1 (figura 6.3 d) presenta una dispersió elevada, mentre que  $GPP_{BGC}$  en ES-CPa (figura 6.3 b) i ES-LMa (figura 6.3 f) evidencia la saturació causada per la subestimació dels màxims de producció anuals.

### 6.3.2 Escala regional

La figura 6.4 mostra la GPP diària mitjana del període 2005-2012 per a l'àrea d'estudi. Els patrons espacials de  $GPP_{PEM}$  (figura 6.4 a),  $GPP_{BGC,DEF}$  (figura 6.4 b) i  $GPP_{BGC,OPT}$  (figura 6.4 c) són quasi idèntics i pràcticament coincideixen amb el gradient de precipitacions de l'àrea d'estudi (figura 3.1). Nogensmenys,  $GPP_{BGC,DEF}$  sobreestima sistemàticament  $GPP_{PEM}$ , mentre que  $GPP_{BGC,OPT}$  també reproduïx acuradament la magnitud de  $GPP_{PEM}$ . Es pot apreciar un patró espacial clar entre la  $z_{root}$  òptima (figura 6.6) i la GPP: excepte en una regió menuda situada al SE de l'àrea d'estudi, com més elevada és la GPP, més profunda és la  $z_{root}$ .

La figura 6.5 mostra l'RMSE obtingut entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC,DEF}$  (figura 6.5 a) i entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC,OPT}$  (figura 6.5 b). En general l'RMSE obtingut per la  $GPP_{BGC,OPT}$  (figura 6.5 b) és menor que l'obtingut per la  $GPP_{BGC,DEF}$  (figura 6.5 a) i les diferències entre ambdós són majors quan menys profunda és la  $z_{root}$ .

La Taula 6.3 mostra els estadístics resultants de la comparació entre  $GPP_{PEM}$  i les diferents  $GPP_{BGC}$ . La  $GPP_{BGC,OPT}$  augmenta clarament la similitud amb  $GPP_{PEM}$  respecte a la  $GPP_{BGC,DEF}$ , destacant la importància de  $z_{root}$ .

**Taula 6.3.** Estadístics resultants de la comparació entre  $GPP_{PEM}$  i  $GPP_{BGC}$  (MBE, MAE i RMSE en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ ).

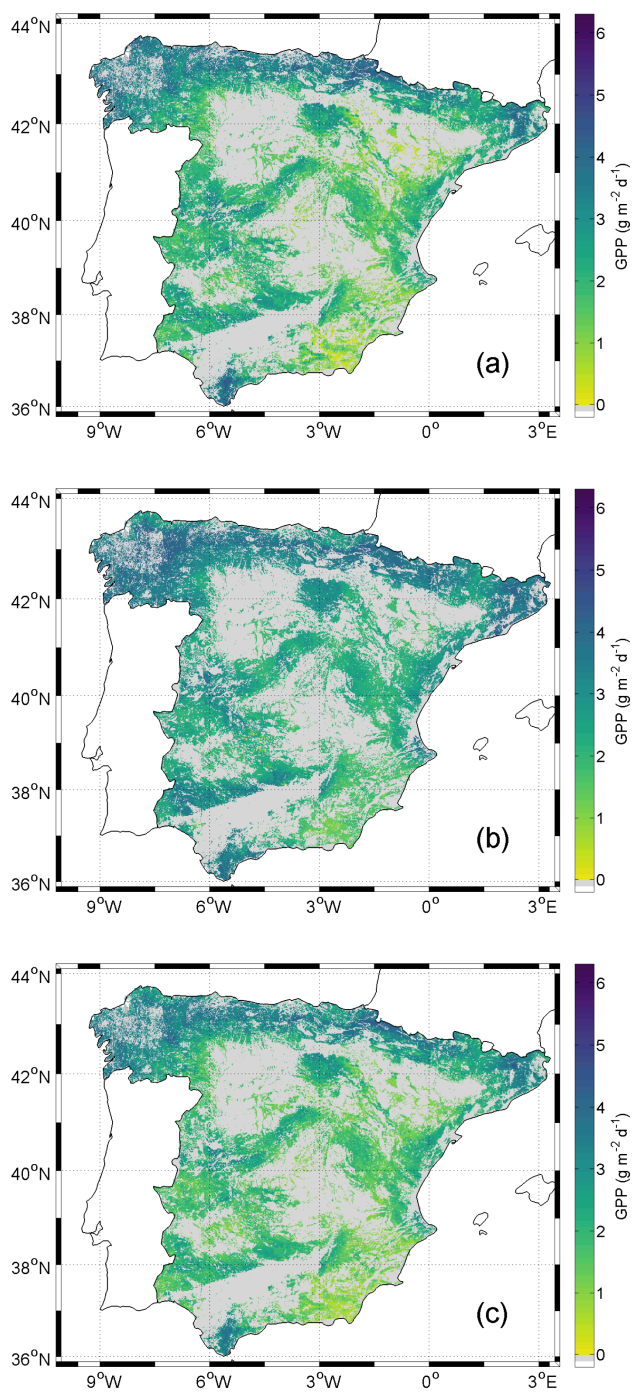
	$GPP_{PEM}$ vs. $GPP_{BGC,DEF}$	$GPP_{PEM}$ vs. $GPP_{BGC,OPT}$
$R^2$	0.42	0.83
MBE	0.5	0.08
MAE	0.7	0.2
RMSE	0.8	0.4

La Taula 6.4 mostra les diferents GPP diàries mitjanes i la  $z_{root}$  òptima mitjana en funció dels tipus de vegetació considerats. En general, les espècies herbàcies que acostumen a créixer en els llocs més secs, presenten les produccions més baixes. Contràriament, les espècies llenyoses frondoses presenten les produccions més elevades, especialment quan creixen en zones humides. La  $GPP_{PEM}$  reflexa clarament aquest patró, el qual reproduceix la  $GPP_{BGC,DEF}$  amb una sobreestimació generalitzada que s'aguditza en el cas del matollar (SHRUB) i que la  $GPP_{BGC,OPT}$  redueix convenientment. Els tipus de vegetació SHRUB i LDBF presenten els valors de  $z_{root}$  més reduïts, mentre que HDBF i HENF presenten els més elevats. Nogensmenys, les desviacions estàndard són tan àmplies que abasten els valors de tots els tipus de vegetació. Per tant, no es pot establir una dependència de  $z_{root}$  amb el tipus de vegetació.

**Taula 6.4.** Valors mitjants i desviacions estàndard (entre parèntesi), per a cadascun dels tipus de vegetació considerats, de la GPP diària per al període 2005-2012 (en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) i la  $z_{root}$  (en cm).

Vegetation type	$GPP_{PEM}$	$GPP_{BGC,DEF}$	$GPP_{BGC,OPT}$	$z_{root}$
GRASS	1.98 (0.77)	2.26 (0.55)	1.87 (0.74)	69 (37)
SHRUB	2.14 (0.86)	2.93 (0.78)	2.18 (0.88)	53 (31)
EBF	2.51 (0.84)	2.75 (0.49)	2.26 (0.68)	72 (35)
LDBF	3.38 (0.56)	3.98 (0.46)	3.16 (0.60)	58 (27)
HDBF	2.94 (0.72)	3.16 (0.62)	2.75 (0.85)	79 (29)
LENF	2.37 (0.85)	2.66 (0.81)	2.15 (0.78)	62 (37)
HENF	2.15 (0.61)	2.57 (0.66)	2.11 (0.71)	71 (41)

Codi: *grassland* (GRASS), *shrubland* (SHRUB), *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitud evergreen needleleaved forest* (HENF).



**Figura 6.4.** GPP diària mitjana (en  $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) del període 2005-2012:  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  (a),  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  (b) i  $\text{GPP}_{\text{BGC,OPT}}$  (c).

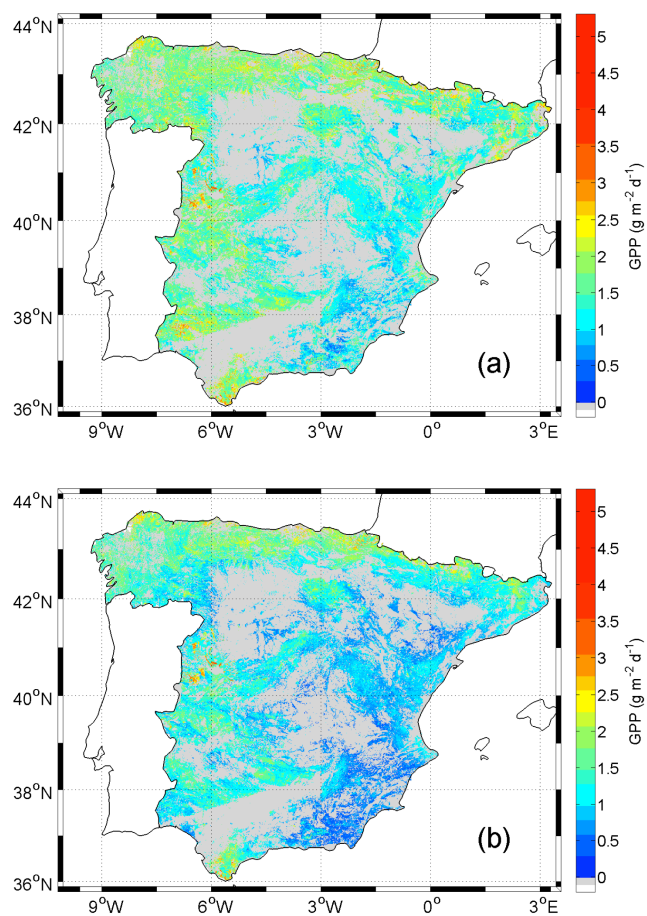


Figura 6.5. RMSE entre  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  i  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  (a) i entre  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  i  $\text{GPP}_{\text{BGC,OPT}}$  (b).

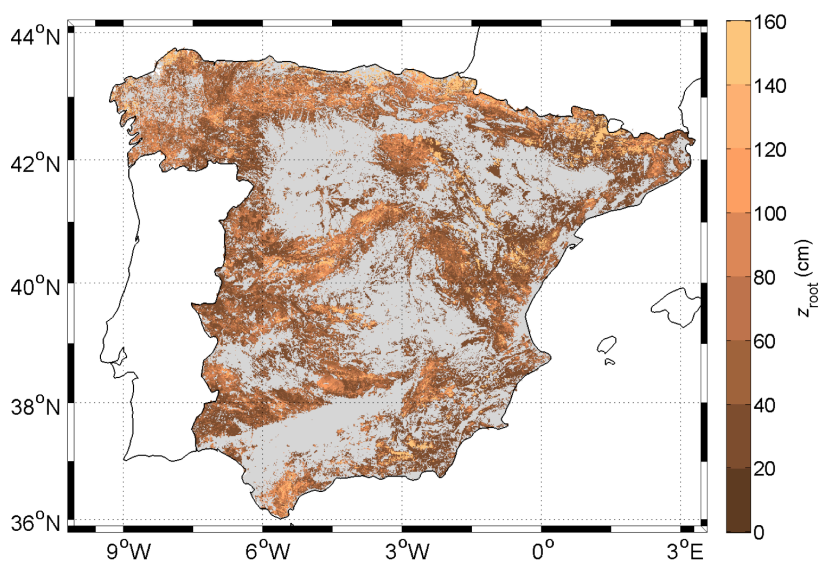


Figura 6.6. Mapa de  $z_{\text{root}}$  òptima.



## 6.4 Discussió

Com s'ha esmentat abans, l'aplicació de la metodologia en els quatre llocs de validació utilitza sèries temporals de variables meteorològiques corregides amb l'ajuda de mesures de camp (capítol 3). Encara així, aquestes variables meteorològiques poden presentar incerteses. Sobretot en el cas de la precipitació, que es va corregir considerant únicament els seus valors anuals i no la seua distribució temporal. La incertesa en les mesures EC també pot afectar els resultats obtinguts en els llocs de validació. En general, aquestes mesures pateixen errors tant aleatoris com sistemàtics deguts sobretot a l'aplicació de diferents protocols de processament i a les condicions ambientals de cada lloc (Jung *et al.*, 2011). A més, alguns dels llocs presenten problemes específics aliens a la metodologia EC. Per exemple, ES-ES1 està rodejat per masses d'aigua (capítol 3) i es va haver d'utilitzar una  $f_{APAR}$  diferent per al càlcul de la  $GPP_{PEM}$  (capítol 4). Per la seua banda, ES-LMa presenta un ecosistema format per dos tipus de vegetació tant diferents (GRASS i EBF) que resulta impossible utilitzar un únic conjunt de paràmetres ecofisiològics per a la simulació de la  $GPP_{BGC}$ . Per això es van haver de simular dues sèries amb cadascun dels dos tipus de vegetació presents a l'ecosistema i combinar-les proporcionalment (80 % de GRASS i 20 % d'EBF).

Totes les fonts d'incertesa dificulten l'aplicació del Biome-BGC en els llocs de validació. En general, la reducció de la  $GPP_{BGC}$  deguda a l'estrès hídric apareix retardada en comparació amb la variació temporal que presenten la  $GPP_{EC}$  i la  $GPP_{PEM}$ . A més, aquesta reducció és insuficient en el cas de la  $GPP_{BGC,DEF}$ . La  $GPP_{BGC,X}$  sempre amb  $X < 100$  cm (valor per defecte), presenta una reducció més intensa, però igualment retardada. A més, com a conseqüència de la reducció en la producció que ajuda a reproduir millor l'efecte de l'estrès hídric, s'infravaloren els màxims anuals de la  $GPP_{EC}$ .

Malgrat els problemes comentats, l'aplicació del Biome-BGC amb la  $z_{root}$  optimitzada millora els resultats en els quatre casos. Les  $z_{root}$  trobades són menors en els llocs amb tipus de vegetació poc productius (40 cm per a SHRUB en ES-CPa i 50 cm per a GRASS en ES-VDA) que en els llocs amb presència d'arbres (70 cm per a LENF en ES-ES1 i 80 cm en ES-LMa amb un 20 % d'EBF), cosa que resulta raonable.

El Biome-BGC simula el cicle hidrològic mitjançant un model unidimensional (Kimball *et al.*, 1997) que no considera l'heterogeneïtat del sòl (ni vertical ni horitzontal). Aquesta simplificació excessiva, encara que autoconsistent amb el funcionament del model, pot portar a aproximacions molt dràstiques en alguns casos. En particular, afecta a la  $z_{root}$  que determina la quantitat disponible per a les plantes i implica que (1) la profunditat del sòl proporcionada pels mapes de sòls convencionals (fins a la roca mare) no es pot utilitzar en el Biome-BGC i, conseqüentment, s'utilitza el valor per defecte (100 cm) per a l'aplicació del Biome-BGC a escala regional, i (2) l'estimació de la quantitat d'aigua

emmagatzemada en el sòl i el seu consum en funció del temps resulten crítiques per a la simulació de l'efecte de l'estrès hídric en zones mediterrànies perquè aquestes presenten una forta recàrrega d'aigua durant la primavera que ha de durar la resta de l'any (Bolle *et al.*, 2006). Jung *et al.* (2007) van trobar que, en zones amb manca d'aigua, el Biome-BGC no reproduïx adequadament el contingut volumètric d'aigua en el sòl o és molt sensible a les seues variacions.

Això no obstant, els resultats a escala regional són realistes. La  $z_{\text{root}}$  trobada es pot interpretar considerant el funcionament del model en les diferents condicions ambientals. En general, la distribució espacial de la  $z_{\text{root}}$  coincideix tant amb la de la  $GPP_{\text{PEM}}$  com amb la de la  $GPP_{\text{BGC,OPT}}$  ( $R^2 = 0.77$  en ambdós casos), és a dir, major  $z_{\text{root}}$  en les zones més productives. Açò coincideix amb principis ecofisiològics generals (Waring & Running, 2007): el creixement dels ecosistemes més productius, especialment els boscos, necessita majors precipitació i profunditat radicular que les praderies i els matollars, que poden créixer en zones més àrides i amb sòls menys profunds.

Nogensmenys, aquest comportament no es compleix en les zones amb condicions climàtiques extremes, on ocorre el contrari. En les zones més àrides, el procés d'optimització de la  $z_{\text{root}}$  l'augmenta. Açò ocorre degut a la presència de plantes adaptades al medi i resistents a l'estrès hídric que només presenten una reducció lenta i lleugera en la  $f_{\text{APAR}}$  i, per tant, en la  $GPP_{\text{PEM}}$ . Per a simular aquest comportament, el Biome-BGC augmenta la  $z_{\text{root}}$  per a poder emmagatzemar una quantitat d'aigua major durant el període de recàrrega. Aquest comportament està justificat per la necessitat de les plantes d'absorbir aigua de capes més profundes del sòl. En canvi, en les zones més humides, el procés d'optimització de la  $z_{\text{root}}$  la redueix. L'aigua no és un factor limitant en aquestes zones i, per tant, les plantes no necessiten emmagatzemar-ne grans quantitats. Per això, per a reproduir la variació temporal de la  $GPP_{\text{PEM}}$ , el Biome-BGC redueix la  $z_{\text{root}}$ .

Les profunditats obtingudes (taula 6.4) són menors que les trobades per Canadell *et al.* (1996). Com s'ha mencionat abans, açò podria ser degut a la diferència en les definicions de les profunditats. De fet, la profunditat radicular pot ser molt menor que la profunditat fins a la roca mare (Kleidon, 2004). La comparació seria més adequada amb les profunditats obtingudes a partir de perfils radiculars o en estudis basats en la inversió de models (Guswa, 2010; Kleidon, 2004; Schenk & Jackson, 2002; Yang *et al.*, 2016; Zeng, 2001). Tanmateix, les profunditats obtingudes en aquests estudis són extremadament variables i fortament lligades al clima. Encara que la majoria de les profunditats oscil·len entre 0.5 m i 2 m, els valors més baixos es van trobar per als matollars, no tan baixos per a les praderies i els més elevats per als boscos, coincidint amb els resultats obtinguts en aquest capítol.

## 6.5 Conclusions

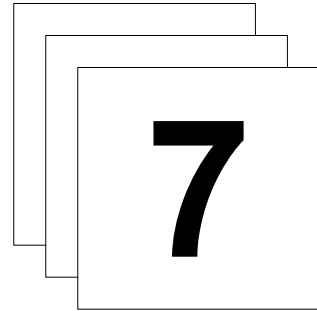
La profunditat radicular afecta significativament l'intercanvi d'energia i de carboni entre la superfície terrestre i l'atmosfera degut a l'acoblament entre els cicles terrestres de l'aigua, l'energia i el carboni. En aquest capítol es demostra la seua rellevància per a la correcta simulació del balanç hídric en el funcionament intern del Biome-BGC en ecosistemes mediterranis com l'àrea d'estudi.

S'ha proposat una metodologia que analitza la correlació entre la GPP simulada amb el Biome-BGC ( $GPP_{BGC}$ ) utilitzant diferents valors de profunditat radicular i la GPP de referència obtinguda en el capítol 4 ( $GPP_{PEM}$ ), que assigna a cada píxel el valor de  $z_{root}$  òptim corresponent al valor de profunditat radicular que proporciona el mínim RSME entre les dos series temporals de GPP esmentades. Aquesta metodologia ha resultat efectiva per a obtindre un mapa de  $z_{root}$  (mostrat en la figura 6.6) que resulta impossible obtindre dels mapes de profunditat del sòl habituals per motius tant teòrics com pràctics.

La  $z_{root}$  òptima és menor que el valor per defecte en el Biome-BGC (100 cm) en els quatre llocs de validació i en el 89 % dels píxels de l'àrea d'estudi. Com a conseqüència de l'optimització de la  $z_{root}$  es milloren els resultats de les simulacions dels fluxos de carboni tant a escala local com regional.

El mapa de  $z_{root}$  òptima produït és el punt de partida per a la correcta simulació d'altres processos ecosistèmics en l'àrea d'estudi. Particularment els fluxos nets de carboni, que determinen el paper dels ecosistemes terrestres com a embornals de carboni i s'aborden en el següent capítol.





# Cap a l'estimació de fluxos nets

Els fluxos nets de carboni es calculen a partir de la GPP obtinguda mitjançant el PEM del capítol 4 ( $GPP_{PEM}$ ) i les respiracions proporcionades pel Biome-BGC calibrat en el capítol 6. En el cas dels boscos, tots aquests fluxos han de ser corregits. La GPP perquè representa el flux de tota la vegetació continguda en la unitat de superfície considerada i no solament la dels boscos i les respiracions perquè el Biome-BGC considera que els ecosistemes simulats es troben en condicions d'equilibri o clímax amb el seu entorn (White *et al.*, 2000). Aquesta correcció es basa en el concepte de distància al clímax dels ecosistemes (Maselli *et al.*, 2009b; Odum & Barrett, 2005), que s'explica en la següent secció i, per a ser aplicada, requereix un mapa de volum llenyós amb escorça (*growing stock volume, GSV*).

El GSV, volum amb escorça de tots els arbres vius amb diàmetre normal<sup>1</sup> igual o superior a 75 mm (IPCC, 2006), és una de les variables més rellevants necessàries per a la gestió forestal (McRoberts & Tomppo, 2007; Waring & Running, 2007). De fet, les mesures de GSV s'han utilitzat durant dècades per a quantificar la fusta comercial que es pot obtenir del bosc i els inventaris forestals s'han dut a terme per a planificar i avaluar la gestió d'aquest recurs renovable a escales local, regional i nacional. Des de l'aplicació del Protocol de Kyoto (United Nations, 1998), la importància dels boscos com a embornals potencials de carboni i la necessitat de monitoritzar els canvis que sofreixen deguts a perturbacions naturals i/o antropogèniques han augmentat (Lindner *et al.*, 2010).

En aquest capítol es genera un mapa de GSV que s'utilitzarà en futurs estudis per a corregir els fluxos de carboni obtinguts en aquesta tesi (GPP i respiracions) i calcular, finalment, els fluxos nets. No obstant això, s'inclou un estudi per a mostrar succintament com serà aquest procediment. Cal tenir en compte, doncs, que els resultats mostrats al respecte (secció 7.3.2) són encara preliminars.

La metodologia i els resultats presentats en aquest capítol referents al GSV s'enviaran a publicar en breu

Sanchez-Ruiz, S., Moreno, A., Izquierdo-Verdiguier, E., Chiesi, M., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Forest growing stock volume from Landsat images using Google Earth Engine (en preparació).

## 7.1 Fonaments teòrics

### 7.1.1 Desenvolupament i tendència a l'equilibri dels ecosistemes

Els ecosistemes es poden considerar com sistemes termodinàmics oberts que intercanvien contínuament energia i matèria amb el seu entorn, és a dir, no es troben en equilibri amb ell (Odum & Barrett, 2005). Gràcies a aquest intercanvi continu poden generar i mantindre un nivell baix d'entropia interna a costa d'augmentar-ne l'externa. En particular, la baixa entropia s'aconsegueix transformant l'energia d'alta qualitat (*e.g.* PAR) en energia de baixa qualitat (*e.g.* energia dissipada en forma de calor) a través de la respiració.

A l'inici de la formació d'un ecosistema (per exemple després d'una perturbació intensa com un gran incendi o una erupció volcànica), existeix una diferència entre la producció primària bruta i la respiració ( $GPP \neq R$ ).  $R$  és la suma de les respiracions de creixement,

---

<sup>1</sup> El diàmetre normal es el diàmetre del tronc d'un arbre mesurat a 1.30 m (a l'altura del pit) per sobre del terra (*diameter at breast height*, DBH) ([http://www.creaf.uab.es/iefc/pub\\_glossari.htm](http://www.creaf.uab.es/iefc/pub_glossari.htm)).

manteniment i heteròtrofa (capítol 2). Encara que existeixen casos en els que  $GPP < R$  (entorn orgànic), generalment  $GPP > R$  (entorn inorgànic). I en ambdós casos el sistema evoluciona cap a  $R/GPP = 1$ , condició coneguda com a clímax, en la qual l'ecosistema es troba aproximadament en equilibri amb el seu entorn físic (Odum & Barrett, 2005).

Durant el desenvolupament de l'ecosistema (mentre  $GPP > R$ ), aquest acumula biomassa i ocorre un desplaçament funcional dels fluxos energètics que hi intervenen (Odum & Pinkerton, 1955): la quantitat de biomassa acumulada per unitat de temps augmenta fins a arribar a un màxim i després tendeix a zero ( $R/GPP = 1$ ) perquè l'energia necessària per al manteniment de l'ecosistema augmenta. En altres paraules, a mesura que l'estructura orgànica de l'ecosistema creix, es necessita més energia per a mantenir un nivell baix d'entropia i roman menys energia per a la producció de biomassa. D'aquesta manera, el quocient  $R/GPP$  es pot interpretar com un indicador de l'estat de desenvolupament de l'ecosistema o la distància recorreguda en la seua evolució cap al clímax.

En el cas dels boscos, el seu desenvolupament dura dècades i es veu afectat per perturbacions externes d'origen natural i/o antropogènic que l'alteren retardant-lo o, fins i tot, reiniciant-lo (Odum & Barrett, 2005). Per això en aquest capítol s'utilitza el GSV per a corregir els fluxos de carboni involucrats en el càlcul dels fluxos nets. En particular, s'utilitza el quocient entre el GSV real (indicador de la biomassa acumulada fins al moment) i el GSV potencial (indicador de la biomassa que hauria acumulat si es trobara en el seu clímax). El GSV real s'obté del mapa generat també en aquest capítol a partir de dades del *Tercer Inventario Forestal Nacional* (IFN3, DGCN, 2006), i el GSV potencial a partir dels outputs del Biome-BGC. De fet, el quocient entre els volums real i potencial es pot considerar equivalent al quocient  $R/GPP$  (figura 1 en Maselli *et al.*, 2009b).

### 7.1.2 GSV a partir d'imatges Landsat

Tradicionalment, el GSV s'ha estimat a partir de mesures *in situ* de l'altura dels arbres i el seu DBH preses durant campanyes de camp o inventaris forestals (Tomppo *et al.*, 2008). Tanmateix, aquestes mesures solen ser escasses i disperses espacialment degut als elevats costos materials i temporals que impliquen, raó per la qual també resulta difícil mantindre-les en el temps d'una manera regular. En aquest context, la teledetecció s'ha recomanat i utilitzat per a espacialitzar diferents variables forestals a partir de variables puntuals, ja que ofereix les capacitats adequades per a aquest propòsit (McRoberts & Tomppo, 2007; Tomppo *et al.*, 2008; UNFCCC, 2010).

Històricament, l'estimació del GSV s'ha realitzat sobretot mitjançant imatges registrades pels sensors Landsat. Encara que aquesta mena d'estudis daten des dels anys 80, durant els últims anys s'han centrat en la comparació de diferents metodologies, el càlcul de

---

nous predictors i la selecció dels predictors més rellevants. La majoria d'aquests estudis s'han dut a terme en regions menudes cobertes per una única escena Landsat. Per exemple, Tamm & Remm (2009) van estimar el GSV en una regió de 100 km<sup>2</sup> a Estònia mitjançant l'*stepwise linear regression* (SWLR) utilitzant predictors d'una única imatge Landsat-7 ETM+ i van trobar que els predictors més rellevants van ser els calculats utilitzant la reflectància de les bandes de l'infraroig d'ona curta (*short wave infrared*, SWIR). També a partir d'una única imatge Landsat-7 ETM+, Mohammadi *et al.* (2010) van estimar el GSV en una regió de 78 km<sup>2</sup> a Iran amb una cobertura forestal del 70 % i van trobar que la combinació lineal de l'índex de vegetació de verdor (*greenness vegetation index*, GVI) i l'índex de vegetació diferència (*difference vegetation index*, DVI) explicava més variància del GSV que altres combinacions de reflectàncies i altres índexs de vegetació. Zheng *et al.* (2014) van estimar el GSV en una regió de 4507 km<sup>2</sup> a Xina també a partir d'una única imatge de Landsat-5 TM utilitzant tant l'SWLR com una xarxa neuronal artificial (*artificial neural network*, ANN). Encara que la validació dels mapes generats amb l'ANN va obtenir els millors resultats, l'SWLR va identificar els millors predictors (mètriques de textura de les reflectàncies en el blau i el roig i la tercera component de l'anàlisi de components principals). Saarela *et al.* (2015) també van estimar el GSV a partir d'una única imatge de Landsat-7 ETM+ en una regió de 300 km<sup>2</sup> a Finlàndia, dos tercers parts de la qual cobertes per boscos. Chrysafis *et al.* (2017a) van estimar el GSV a partir d'una sèrie temporal d'imatges Landsat-8 OLI en una regió de 317 km<sup>2</sup> a Grècia i van trobar, mitjançant l'ús de *random forest* (RF), que les reflectàncies en el blau i el SWIR són els predictors més rellevants. En la mateixa regió, Chrysafis *et al.* (2017b) van trobar que la reflectància en el SWIR d'una única imatge Landsat-8 OLI està més correlacionada amb el GSV que les reflectàncies d'altres bandes i d'altres índexs de vegetació. Mura *et al.* (2018) també van estimar el GSV en dues regions d'Itàlia amb una superfície forestal total de 559 km<sup>2</sup> a partir de les reflectàncies d'una única imatge Landsat-8 OLI per a cada regió.

En aquest capítol es troben relacions entre dades derivades de la sèrie mensual de reflectàncies d'escenes Landsat (capítol 3) i les estimacions de GSV de l'IFN3 (DGCN, 2006) per a generar un mapa de GSV que, finalment, es valida amb les estimacions provincials de GSV de l'IFN3.



## 7.2 Metodologia

Aquesta secció es divideix en dos apartats clarament diferenciats: la generació del mapa de GSV i el càlcul dels fluxos nets, ambdues amb les seues respectives validacions. En el primer apartat es descriu el càlcul de predictors a partir de les reflectàncies Landsat i la selecció dels més rellevants mitjançant el mètode *guided regularized random forest* (GRRF) per a la generació del mapa de GSV. El segon apartat conté les equacions utilitzades per al càlcul dels fluxos nets de carboni (NPP i NEP, capítol 2), la correcció dels fluxos involucrats en el seu càlcul (GPP i respiracions) en el cas dels boscos i el càlcul del *current annual increment* (CAI) de GSV per a la validació indirecta de les imatges d'NPP.

### 7.2.1 Generació del mapa de GSV

#### Càlcul de predictors

De les 53 928 parcel·les de l'IFN3 considerades en el capítol 3, es van seleccionar les 51 448 cobertes per un mínim de 50 escenes Landsat. Per a cadascuna d'elles, es van calcular un total de 805 predictors a partir dels valors mensuals de reflectàncies en les 6 bandes (1-5 i 7) obtinguts com es descriu al capítol 3. En primer lloc, es van calcular 4 índexs de vegetació IVs (taula 7.1) i 15 ràtios de reflectàncies. Les ràtios de reflectàncies ( $b_{ij}$ , on  $i$  i  $j$  fan referència al número de banda, capítol 3) es van calcular com  $b_i/b_j$  amb  $j > i$ . Després es van calcular 5 mètriques temporals: suma (sum), mediana (med), màxim (max), mínim (min), i desviació estàndard (std) dels valors mensuals de la reflectància en cada banda ( $b_i$ ), dels IVs i de les  $b_{ij}$ . Els 125 predictors d'aquest primer conjunt se simbolitzen mitjançant *característica\_espectral\_mètrica\_temporal*, on *característica\_espectral* fa referència a les reflectàncies de les 6 bandes considerades, els 4 IVs o les 15 ràtios; mentre que *mètrica\_temporal* fa referència a cadascuna de les 5 mètriques temporals. Per exemple,  $br23max$  és el màxim de la ràtio de les reflectàncies en les bandes 2 i 3.

Taula 7.1. Descripció dels quatre índexs de vegetació considerats.

IV	Fórmula	Referència
<i>Normalized difference vegetation index</i>	$NDVI = (b_{NIR} - b_R) / (b_{NIR} + b_R)$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
<i>Enhanced vegetation index</i>	$EVI = 2.5 (b_{NIR} - b_R) / (b_{NIR} + 6 b_R - 7.5 b_B + 1)$	Huete <i>et al.</i> (2002)
<i>Normalized difference water index 1</i>	$NDWI1 = (b_{NIR} - b_{SWIR1}) / (b_{NIR} + b_{SWIR1})$	Gao (1996)
<i>Normalized difference water index 2</i>	$NDWI2 = (b_{NIR} - b_{SWIR2}) / (b_{NIR} + b_{SWIR2})$	Gao (1996)

Nota: els subíndex R, B, NIR i SWIR es refereixen, respectivament, a *red*, *blue*, *near infrared* i *short wave infrared*.

Taula 7.2. Descripció de les 17 mètriques de textura considerades.

Mètrica de textura	Fórmula
Angular second moment	$\text{asm} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p^2(i, j)$
Contrast	$\text{contrast} = \sum_{k=0}^{L-1} k^2 \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j)_{k= i-j }$
Correlation	$\text{corr} = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L ij p(i, j) - \mu_x \mu_y$
Difference entropy	$\text{dent} = - \sum_{k=0}^{L-1} p_{x-y}(k) \ln p_{x-y}(k)$
Dissimilarity	$\text{diss} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L  i-j  p(i, j)$
Difference variance	$\text{d var} = \text{var}(p_{x-y})$
Entropy	$\text{ent} = - \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p(i, j) \ln p(i, j)$
Inverse difference moment	$\text{idm} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \frac{p(i, j)}{1 + (i-j)^2}$
Information measure of correlation 1	$\text{imcorr1} = \frac{\text{ent} - \text{ent}_x - \text{ent}_y}{\max[\text{ent}_x, \text{ent}_y]}, \text{ amb}$ $\text{ent}_x = - \sum_{i=1}^L p_x(i) \ln p_x(i) \quad \text{i} \quad \text{ent}_y = - \sum_{j=1}^L p_y(j) \ln p_y(j)$
Information measure of correlation 2	$\text{imcorr2} = \sqrt{1 - \exp \left[ 2 \left( \text{ent} + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L p_x(i) p_y(j) \ln (p_x(i) p_y(j)) \right) \right]}$
Inertia	$\text{inertia} = \sum_{i=1}^{L-1} \sum_{j=1}^{L-1} (i-j)^2 p(i, j)$
Cluster prominence	$\text{prom} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i+j - \mu_x - \mu_y)^4 p(i, j)$
Sum average	$\text{savg} = - \sum_{k=2}^{2L} k p_{x+y}(k)$

Taula 7.2. Descripció de les 17 mètriques de textura considerades (continuació).

Mètrica de textura	Fórmula
Sum entropy	$\text{sent} = - \sum_{k=2}^{2L} p_{x+y}(k) \ln p_{x+y}(k)$
Cluster shade	$\text{shade} = \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L (i+j-\mu_x-\mu_y)^3 p(i,j)$
Sum variance	$\text{svar} = \sum_{k=2}^{2L} (k-\text{sent})^2 p_{x+y}(k)$
Variance	$\text{var} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i-\mu)^2 p(i,j)$

Nota:  $p(i,j)$  és la  $(i,j)$ -èsima entrada en una GLCM normalitzada.  $L$  és el nombre de nivells de gris.  $\mu$  és la mitjana de totes les  $p(i,j)$ .  $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, i \sigma_y$  són les mitjanes i les desviacions estàndard de  $p_x$  i  $p_y$ .  $p_x(i) = \sum_{j=1}^L p(i,j)$  és la  $i$ -èsima entrada en la matriu de probabilitat marginal calculada sumant les files de  $p(i,j)$ .  $p_y(j) = \sum_{i=1}^L p(i,j)$  és la  $j$ -èsima entrada en la matriu de probabilitat marginal calculada sumant les columnes de  $p(i,j)$ .

$$\text{A més, } p_{x+y}(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{\substack{j=1 \\ i+j=k}}^L p(i,j) \quad \text{amb } k = 2, 3, \dots, 2L. \text{ I } p_{x-y}(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{\substack{j=1 \\ k=|i-j|}}^L p(i,j) \quad \text{amb } k = 0, 1, \dots, L-1.$$

El següent conjunt de predictors (del 126 al 550) el componen, en primer lloc, 17 mètriques de textura (taula 7.2) calculades mitjançant *Google Earth Engine* (GEE) a partir de les medianes de les reflectàncies mensuals. Les mètriques de textura es van extraure d'una matriu de coocurrència de nivells de gris (*gray level co-occurrence matrix*, GLCM) construïda a partir d'una finestra de  $3 \times 3$  píxels centrada en cadascuna de les parcel·les de l'IFN3 considerades. Es va utilitzar un *offset*  $[0,-1]$ . Es recomana consultar els treballs de Haralick *et al.* (1973) i Connors *et al.* (1984) per a trobar més informació sobre les GLCMs i les mètriques de textura. Amb aquestes mètriques de textura es van calcular els mateixos 4 IVs i les mateixes 15 ràtios. Els predictors d'aquest segon conjunt se simbolitzen com *característica\_espectral\_mètrica\_textura*, on *mètrica\_textura* fa referència a cadascuna de les 17 mètriques de textura considerades.

Per a l'últim conjunt de predictors (del 551 al 805) es van calcular les 17 mètriques de textura de les 5 mètriques temporals de l'NDVI, l'EVI i l'NDWI1. La diferència respecte del conjunt de predictors anterior és que, en aquest cas, primer es calcula l'IV, després la

mètrica temporal i, finalment, la mètrica de textura; mentre que en el cas anterior primer es calcula la mètrica temporal (només la mediana), després la mètrica de textura i, finalment, l'IV. Els predictors d'aquest tercer conjunt se simbolitzen com *mètrica\_textura\_característica\_espectral\_mètrica\_temporal*.

### *Selecció de predictors*

Per a reduir el nombre inicial de predictors i trobar-ne els més rellevants es va utilitzar el mètode GRRF. Aquest mètode s'ha aplicat recentment per a tasques de classificació en estudis de genètica (Deng & Runger, 2013) i identificació de cultius en minifundis (Izquierdo-Verdiguier *et al.*, 2017). A més, el treball d'Izquierdo-Verdiguier & Zurita-Milla (2018) presenta uns resultats preliminars en l'obtenció de variables biofísiques. La idea principal del GRRF és regularitzar la importància de cada predictor obtinguda mitjançant el RF estàndard. El paràmetre de regularització penalitza el guany del RF quan el predictor no se selecciona en nodes anteriors.

Per a contextualitzar, el RF (Breiman, 2001) és un mètode d'aprenentatge conjunt d'arbres de decisió que es pot utilitzar tant per a classificació com per a regressió. Aquest mètode utilitza el *bagging* (Breiman, 1996), també conegut com *bootstrap aggregating*, i afegeix una nova dosi d'aleatorietat en la selecció de predictors per a cada decisió. El *bagging* consisteix en la divisió del conjunt inicial de dades d'entrenament en diversos subconjunts de la mateixa mida les mostres dels quals s'escullen aleatòriament amb reposició, és a dir, cada subconjunt s'escull del conjunt inicial sense descartar les mostres escollides per als altres conjunts, de manera que poden existir mostres que estiguen presents en més d'un subconjunt. Després s'entrena un model diferent per a cada subconjunt de dades d'entrenament i, finalment, es combinen tots els models per a obtenir les prediccions. En el cas de la classificació s'escull l'opció més freqüent entre tots els models, mentre que en el cas de la regressió es calcula el valor mitjà de totes les prediccions. Seguidament es descriu l'algorisme RF:

1. Es mostregen amb reposició  $n_{\text{tree}}$  subconjunts d'entrenament.
2. Es genera un arbre de decisió per a cada subconjunt  $n_{\text{tree}}$  amb  $m_{\text{try}}$  predictors seleccionats aleatòriament en cada node.
3. Es combinen les prediccions dels  $n_{\text{tree}}$  arbres de decisió segons s'estiga utilitzant classificació o regressió.

Per defecte, el valor de  $m_{\text{try}}$  per a classificació és l'arrel quadrada del nombre de predictors, mentre que per a regressió és un terç del nombre de predictors. En el cas de la classificació el mínim nombre d'observacions utilitzades en cada node,  $L_{\text{min}}$ , es 1, mentre que en el cas de la regressió és 5.

Tornant al GRRF, el seu guany d'informació es defineix com

$$G_{GRRF}(\mathbf{x}_j, \mathbf{v}) = \begin{cases} G(\mathbf{x}_j, \mathbf{v}) & \text{si } j \in M \\ \alpha_j G(\mathbf{x}_j, \mathbf{v}) & \text{si } j \notin M \end{cases} \quad (7.1)$$

on  $G(\mathbf{x}_j, \mathbf{v})$  és el guany del RF calculat utilitzant la suma dels quadrats dels residus per a regressió,  $\mathbf{x}_j \in \mathbb{R}^{N \times 1}$  és el vector de predictors  $j$  (amb  $N$  el nombre de mostres),  $\mathbf{v}$  un node de decisió,  $\alpha_j = (1 - \gamma)\lambda + \gamma \frac{\text{importància}_j}{\max_{j=1, \dots, p}(\text{importància}_j)}$  és el paràmetre de regularització del predictor  $j$ ,  $\lambda \in (0,1]$  és el factor de penalització,  $\gamma \in [0,1]$  és el pes de la importància del predictor normalitzada,  $p$  és el nombre de predictors i  $M$  és el conjunt de predictors utilitzats per a decidir en nodes anteriors.

Per a entrenar el model i obtenir els predictors més rellevants en funció del paràmetre de regularització, es van seleccionar aleatòriament 10 particions del conjunt de dades d'entrenament amb 2300 mostres cadascuna. L'optimització es va limitar al paràmetre  $\gamma$ , mentre que es va fixar  $\lambda = 0.2$  per a reduir dràsticament el nombre de predictors sense perdre informació (Deng & Runger, 2013).

#### *Obtenció del mapa*

Com que els arbres de decisió dins el GRRF no són independents, el mètode només és capaç de seleccionar els predictors més rellevants, però no d'estimar la variable a predir. Per això, el RF estàndard amb les 51 448 mostres es va utilitzar per a entrenar el model final amb els predictors seleccionats mitjançant el GRRF. Primer es van calibrar els paràmetres  $n_{\text{tree}}$ ,  $m_{\text{try}}$  i  $L_{\text{min}}$  mitjançant una validació creuada de 10 particions i es van obtenir els valors  $n_{\text{tree}} = 200$ ,  $m_{\text{try}} = 10$  i  $L_{\text{min}} = 5$ . Després el model amb els paràmetres optimitzats es va aplicar a través de GEE per a generar un mapa de GSV en  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  a 30 m de resolució espacial (la resolució de Landsat) per a tota la Península Ibèrica. Finalment, aquest mapa es va degradar fins a un 1 km per a utilitzar-lo amb les imatges de fluxos de carboni obtingudes en els capítols anteriors i se li va aplicar una màscara per a considerar únicament els píxels de bosc. La màscara es va construir a partir de les dades SIOSE descrites al capítol 3 considerant bosc tots els píxels de vegetació amb una cobertura arbòria mínima del 20 % (*monte arbolado* en l'IFN3). Els valors mitjans de cada província del mapa de GSV a 1 km emmascarat es van comparar amb les estimacions provincials de GSV de l'IFN3.

## 7.2.2 Càlcul dels fluxos nets

### *Càlcul de l'NPP i l'NEP*

Es van simular imatges diàries de respiracions de creixement ( $R_{gr}$ ), manteniment ( $R_{mn}$ ) i heterotròfica ( $R_{het}$ ) per al període 2005-2012 mitjançant el Biome-BGC amb la configuració obtinguda en el capítol 6 (profunditat radicular optimitzada i paràmetres ecofisiològics obtinguts en estudis realitzats a Itàlia). Aquestes imatges i les de GPP obtingudes al capítol 4 ( $GPP_{PEM}$ ) es van utilitzar per a calcular imatges de producció primària neta (NPP) i producció neta de l'ecosistema (NEP):

$$NPP = GPP - R_{gr} - R_{mn} \quad (7.2)$$

$$NEP = GPP - R_{gr} - R_{mn} - R_{het} \quad (7.3)$$

Com s'ha esmentat abans, es va aplicar una correcció (Maselli *et al.*, 2009b) als fluxos de les equacions 7.2 i 7.3 per a obtenir els fluxos nets reals. A continuació es discuteixen els fonaments de la correcció.

Per una banda, cal recordar que la classe forestal (el tipus de vegetació estudiat en aquesta tesi) se subdivideix en:

- ✓ Bosc: caracteritzat per un recobriment de capçades d'espècies arbòries en qualsevol proporció (bosc dens, clar i repoblacions recents) que pot, a més, incloure un sotabosc, format per matolls o espècies herbàcies.
- ✓ Matollars: terreny amb un recobriment d'espècies arbòries inferior al 5%; hi predominen les capçades d'espècies arbustives encara que també pot estar recobert per espècies herbàcies.
- ✓ Praderies i herbassars: poden presentar alguna espècie arbustiva, però hi predomina el recobriment per espècies herbàcies, amb una proporció variable de terreny nu.

En base a aquestes descripcions s'explica que la  $GPP_{PEM}$ , encara que només es consideren zones forestals mitjançant l'aplicació d'una màscara, representa la GPP de tota la vegetació present en la superfície considerada a través de la  $f_{APAR}$ , és a dir, la d'espècies arbòries i no arbòries, que poden coexistir en un píxel d'1 km<sup>2</sup>. Precisament aquestes espècies no arbòries (arbustives i herbàcies) es comporten de manera pareguda als arbres en termes de fotosíntesi (GPP), però pràcticament no acumulen carboni (NPP, NEP) perquè arriben a condicions de clímax molt més ràpidament. Per tant, la  $GPP_{PEM}$  ha de corregir-se per a considerar només la fracció de superfície coberta per arbres i es fa multiplicant-la per la fracció de cobertura arbòria real respecte a la potencial  $F \equiv FC_A/FC_P$  (el subíndex A fa referència a *actual* en anglès i el P a potencial). S'utilitza la fracció de cobertura arbòria perquè representa la fracció de la PAR incident interceptada per la pròpia coberta arbòria.

Per la seua banda, les respiracions simulades mitjançant el Biome-BGC representen les d'un tipus de bosc concret en condicions de clímax o equilibri (White *et al.*, 2000). Per tant, també és necessari aplicar una correcció per a considerar l'ecosistema (bosc) en el seu estat de desenvolupament real. La  $R_{gr}$  es corregeix igual que la GPP perquè presenten comportaments similars. Les altres components de la respiració, la  $R_{mn}$  i la  $R_{het}$ , es multipliquen pel quocient entre els volums real i potencial ( $V \equiv GSV_A / GSV_P$ ) perquè es considera que varien linealment amb ell. De fet, a la secció 7.1.1 ja s'ha explicat que la respiració total augmenta a mesura que l'ecosistema s'apropa al seu clímax i augmenta la biomassa acumulada. En  $V$  s'utilitza el GSV del mapa generat en aquest capítol com a GSV real ( $GSV_A$ ), mentre que el GSV potencial ( $GSV_P$ ) en  $m^3 ha^{-1}$  es calcula a partir del carboni acumulat en forma de matèria llenyosa seca ( $\sigma$ , en  $g m^{-2}$ ) simulat pel Biome-BGC (*dead stem carbon* en la taula 2.3):

$$GSV_P = 0.02 \frac{\sigma}{\rho C} \quad (7.4)$$

on  $\rho$  és la densitat basal de la matèria llenyosa en  $Mg m^{-3}$ ,  $C$  és un factor d'expansió de biomassa (quocient entre el volum de les rames i el tronc i el volum del tronc, en  $m^3 m^{-3}$ ) i el factor 0.02 té en compte tant la transformació de massa de carboni a massa de matèria seca ( $2 kg kg^{-1}$ ) com la conversió d'unitats a  $m^3 ha^{-1}$ . La taula 7.3 recull, entre altres, els valors de  $\rho$  i  $C$  per als 5 tipus de bosc considerats pel mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3.

**Taula 7.3.** Valors dels factors involucrats en els càlculs del GSV potencial i el CAI (Federici *et al.*, 2008).  $\rho$  és la densitat basal,  $C$  un factor d'expansió de biomassa i  $D$  és la ràtio de carboni distribuït en el tronc.

Tipus de bosc	$\rho$ ( $Mg m^{-3}$ )	$C$ ( $m^3 m^{-3}$ )	$D$ (adimensional)
EBF	0.70	1.45	0.47
LDBF	0.69	1.33	0.45
HDBF	0.61	1.36	0.45
LENF	0.53	1.53	0.42
HENF	0.38	1.31	0.42

Codi: *evergreen broadleaved forest* (EBF), *low altitude deciduous broadleaved forest* (LDBF), *high altitude deciduous broadleaved forest* (HDBF), *low altitude evergreen needleleaved forest* (LENF) i *high altitude evergreen needleleaved forest* (HENF).

La fracció de cobertura arbòria es calcula a partir de l'índex d'àrea foliar (*leaf area index*, LAI) utilitzant la relació  $FC = 1 - e^{-LAI}$ . Per a la potencial s'utilitza el LAI simulat pel Biome-BGC (LAI<sub>max</sub> en la taula 2.3), mentre que per a la real s'utilitza el mateix multiplicat per  $V$ :

$$FC_P = 1 - e^{-LAI} \quad (7.5)$$

$$FC_A = 1 - e^{-V \times LAI} \quad (7.6)$$

Així que, en el cas dels píxels de bosc, la correcció proposada per Maselli *et al.* (2009b) per a obtenir els fluxos nets reals es:

$$NPP_A = F (GPP - R_{gr}) - V R_{mn} \quad (7.7)$$

$$NEP_A = F (GPP - R_{gr}) - V (R_{mn} + R_{het}). \quad (7.8)$$

L'NEP es va validar als quatre llocs de validació descrits en el capítol 3 per comparació amb les mesures preses mitjançant el mètode *eddy covariance* (EC),  $NEP_{EC}$ . Si els ecosistemes on estan instal·lades les torres EC es consideren boscos, l'estimació de GSV de l'IFN3 més propera al lloc es va utilitzar com a  $GSV_A$  en la  $V$  de l'equació 7.8.

#### *Càlcul del CAI*

Com que l'NPP no es pot validar als llocs de validació perquè el mètode EC no l'estima, es va calcular una imatge d'increment anual (*current annual increment*, CAI) de GSV a partir de les d'NPP (Maselli *et al.*, 2010):

$$CAI = NPP_A \frac{0.02D}{\rho C} \quad (7.9)$$

on  $NPP_A$  és la mitjana anual de l'NPP real dels píxels de bosc en  $g\ m^{-2}\ a^{-1}$  i  $D$  és la ràtio de carboni distribuït en el tronc (*stem carbon allocation ratio*). La taula 7.3 recull també els valors de  $D$  per als 5 tipus de bosc considerats pel mapa de tipus de vegetació descrit al capítol 3.

Els valors mitjans de cada província de la imatge de CAI es van comparar amb les estimacions provincials de CAI de l'IFN3.



## 7.3 Resultats

### 7.3.1 Mapa de GSV

#### *Selecció de predictors*

La taula 7.4 mostra els estadístics per a cadascuna de les 10 particions amb els seus valors òptims del pes de la importància dels predictors normalitzada ( $\gamma$ ) i el nombre de predictors seleccionats. Els estadístics obtinguts amb els 805 predictors ( $\gamma = 0$  i  $\lambda = 1$ ) s'indiquen entre parèntesi. Els resultats obtinguts amb la  $\gamma$  òptima no presenten diferències significatives respecte als obtinguts amb tots els predictors ni tampoc entre les diferents particions. La reducció més dràstica en el nombre de predictors s'obté en la partició 8 (de 805 a 28 amb  $\gamma = 0.9$ ).

**Taula 7.4.** Estadístics obtinguts mitjançant el GRRF per a cadascuna de les 10 particions. MBE, MAE i RMSE en  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ .

Partició	$\gamma$	Nombre de predictors	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
1	0.9	30	0.35 (0.36)	-3 (-5)	44 (44)	66 (65)
2	0.4	43	0.38 (0.38)	-2 (-1.9)	43 (43)	64 (65)
3	0.9	29	0.38 (0.37)	0.10 (-0.9)	42 (43)	64 (64)
4	0.4	43	0.39 (0.38)	-0.5 (-1.1)	42 (43)	64 (64)
5	0.1	64	0.38 (0.37)	-3 (-4)	43 (44)	64 (65)
6	0.8	31	0.39 (0.38)	0.3 (-0.03)	42 (43)	64 (64)
7	0.2	56	0.37 (0.38)	-3 (-4)	44 (44)	64 (64)
8	0.9	28	0.38 (0.38)	-2 (-3)	43 (43)	64 (64)
9	0.2	51	0.38 (0.38)	-0.02 (-0.14)	42 (43)	64 (64)
10	0.3	51	0.37 (0.37)	-1.9 (-3)	43 (44)	65 (65)

Nota: Els valors entre parèntesi es van obtenir amb els 805 predictors ( $\gamma = 0$  i  $\lambda = 1$ ). Encara que en capítols anteriors s'ha utilitzat el criteri d'arrodonir els errors a la primera xifra significativa (o a la segona si la primera és 1), en aquesta taula s'arrodoneixen a la segona per a posar de manifest que, després de reduir dràsticament el nombre de predictors, no només es mantenen els resultats, sinó que fins i tot es milloren lleugerament en alguns casos.

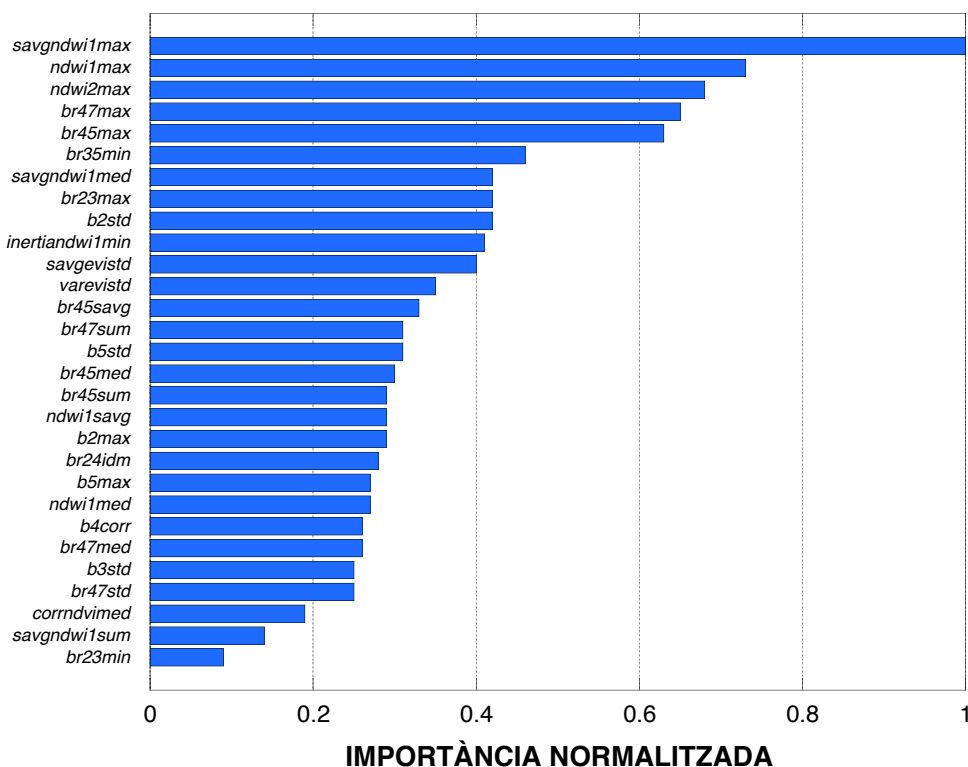
Com que les diferències entre les particions amb diferent  $\gamma$  són menudes, només es considera el cas més restrictiu ( $\gamma = 0.9$ ). La taula 7.5 mostra l'RMSE obtingut en cadascuna de les 10 particions i el nombre de predictors seleccionats quan  $\gamma = 0.9$ . De nou, els resultats entre particions són molt pareguts. I també el nombre de predictors seleccionats, que varia entre 28 i 31. Com que la partició 6 presenta l'RMSE més baix, s'escullen els 29 predictors seleccionats pel GRRF en aquest cas per a entrenar un RF i estimar el GSV per a tota l'àrea d'estudi.

**Taula 7.5.** Nombre de predictors seleccionats pel GRRF i RMSE obtingut per a cadascuna de les 10 particions amb  $\gamma = 0.9$ .

Partició	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de predictors	30	31	29	31	30	29	31	28	30	28
RMSE ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ )	65.60	64.39	64.25	64.10	64.56	63.82	64.91	63.89	65.37	65.25

Nota: en aquest cas es mostren dues xifres decimals en l'RMSE per a poder escollir els resultats d'una de les particions.

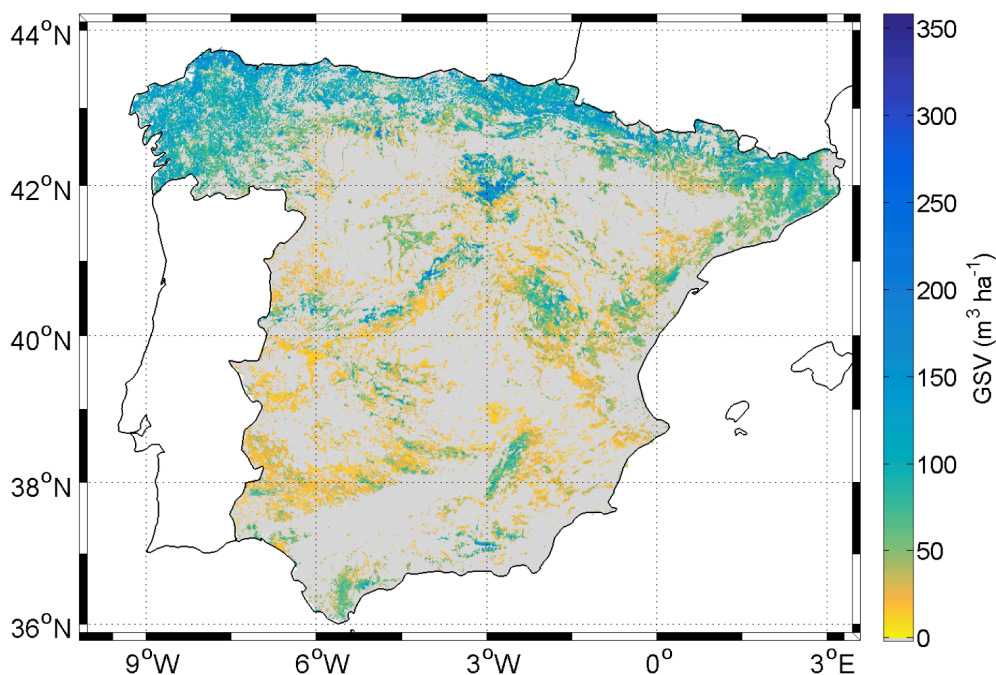
La figura 7.1 mostra la importància normalitzada dels 29 predictors seleccionats en la partició 6 amb  $\gamma = 0.9$  ordenada de manera descendent. 16 dels 29 predictors seleccionats inclouen la combinació de les reflectàncies registrades per la banda del NIR i una de les del SWIR en el seu càlcul. Altres 3 dels 29 es calculen únicament a partir de la reflectància registrada per la primera banda del SWIR o en combinació amb la reflectància registrada per bandes en regions de l'espectre diferents del NIR i del SWIR. Els cinc predictors més importants són *savgndwi1max*, *ndwi1max*, *ndwi2max*, *br47max* i *br45max*. Els cinc es calculen a partir de les reflectàncies registrades per les bandes del NIR i del SWIR. La resta de predictors presenten una importància normalitzada inferior al 50 %.



**Figura 7.1.** Importància normalitzada dels 29 predictors seleccionats en la partició 6 amb  $\gamma = 0.9$ .

### Generació del mapa

Es va entrenar un RF amb els 29 predictors seleccionats en la partició 6. El 90 % de les 51 448 mostres es va utilitzar per a entrenament i el 10 % romanent per a test, obtenint respectivament  $RMSE = 44 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  i  $RMSE = 61 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . La figura 7.2 mostra el mapa de GSV resultant degradat a 1 km de resolució espacial. Es pot apreciar com els valors més alts de GSV apareixen repartits per tot el nord de l'àrea d'estudi, especialment en el nord-oest (Galícia), el nord-est (els Pirineus) i una regió menuda situada entre Burgos, Logronyo i Sòria. Per altra banda, els valors intermedis apareixen en els sistemes muntanyosos que rodegen la part central de l'àrea d'estudi i en la *Sierra de Cazorla*, la *Sierra Nevada* i el *Parque natural de los alcornocales* (Cadis). Finalment, els valors més baixos apareixen sobretot en el sud-oest de l'àrea d'estudi (Extremadura i Andalusia).



**Figura 7.2.** Mapa de GSV generat mitjançant un RF entrenat amb els 29 predictors seleccionats pel GRRF en la partició 6. En gris els píxels que no pertanyen a zones forestals.

Els valors mitjans per a cada província del mapa de GSV a 1 km es van validar amb les estimacions provincials de GSV de l'IFN3 (taula 7.6) obtenint-se els següents estadístics:  $R^2 = 0.91$ ,  $MBE = 0.9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ,  $MAE = 11 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , i  $RMSE = 15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

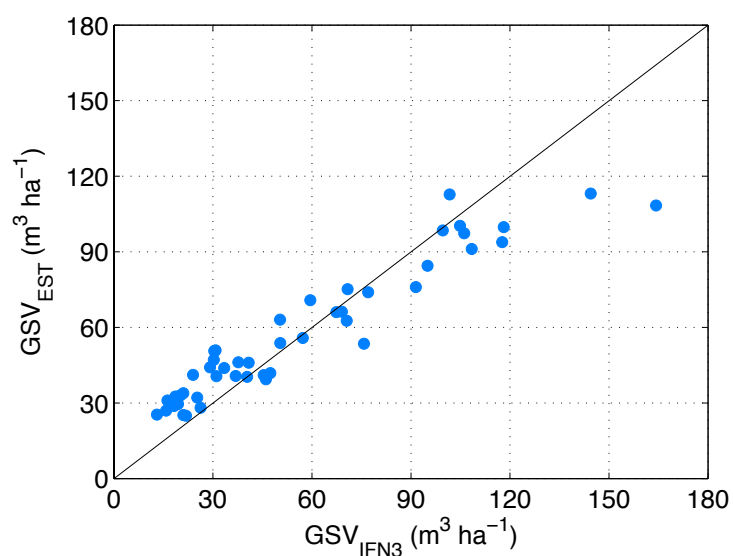
**Taula 7.6.** Valors provincials de GSV ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) i CAI ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) de l'IFN3,  $\text{GSV}_{\text{IFN3}}$  i  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}$ , i valors mitjans calculats,  $\text{GSV}_{\text{EST}}$  i  $\text{CAI}_{\text{EST}}$ .  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}^*$  s'ha obtingut a partir de  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}$  eliminant la contribució de les espècies de ràpid creixement.

Província	$\text{GSV}_{\text{IFN3}}$	$\text{GSV}_{\text{EST}}$	$\text{CAI}_{\text{IFN3}}$	$\text{CAI}_{\text{IFN3}}^*$	$\text{CAI}_{\text{EST}}$
Àlaba	108.44	91.17	4.21	3.17	3.36
Albacete	26.26	28.09	1.12	1.12	0.92
Alacant	21.01	25.19	0.78	0.78	0.54
Almeria	23.94	41.15	1.20	1.2	1.25
Àvila	50.39	53.78	2.44	2.44	2.07
Badajoz	15.82	27.02	0.45	0.39	0.79
Barcelona	69.06	66.18	2.53	2.53	1.97
Burgos	67.41	66.10	2.73	2.59	2.13
Càceres	18.6	32.62	0.80	0.80	1.01
Cadis	30.34	50.60	0.89	0.77	2.29
Castelló	31.07	40.61	1.21	1.21	1.11
Ciudad Real	16.25	30.99	0.91	0.91	1.29
Còrdova	18.20	28.80	0.79	0.77	1.00
La Corunya	101.71	112.79	10.59	6.60	4.22
Conca	47.39	41.85	1.54	1.54	1.24
Girona	95.05	84.49	3.54	3.54	3.04
Granada	30.26	47.10	1.44	1.44	1.58
Guadalajara	36.91	40.68	1.49	1.49	1.16
Guipúscoa	164.26	108.38	12.05	7.81	4.08
Huelva	20.21	33.01	1.01	0.75	0.91
Oscas	59.51	70.77	2.22	2.22	2.50
Jaén	40.88	45.99	1.41	1.41	1.81
Lleó	50.36	63.12	2.53	2.37	2.06
Lleida	77.00	73.90	2.21	2.21	2.25
La Rioja	91.52	75.99	4.29	4.29	2.67
Lugo	99.65	98.55	7.73	4.84	3.81
Madrid	40.34	40.35	1.46	1.46	1.42
Màlaga	30.80	50.84	1.25	1.12	1.97
Múrcia	21.88	24.92	0.76	0.76	0.56
Navarra	118.12	99.81	3.88	3.81	4.18
Ourense	70.81	75.16	4.16	4.07	2.82
Astúries	104.85	100.31	7.00	5.15	4.19
Palència	57.24	55.80	3.48	3.48	1.82
Pontevedra	106.13	97.36	8.41	5.99	3.61
Salamanca	21.00	33.89	0.93	0.93	1.59

**Taula 7.6.** Valors provincials de GSV ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) i CAI ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) de l'IFN3,  $\text{GSV}_{\text{IFN3}}$  i  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}$ , i valors mitjans calculats,  $\text{GSV}_{\text{EST}}$  i  $\text{CAI}_{\text{EST}}$ .  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}^*$  s'ha obtingut a partir de  $\text{CAI}_{\text{IFN3}}$  eliminant la contribució de les espècies de ràpid creixement (continuació).

Província	$\text{GSV}_{\text{IFN3}}$	$\text{GSV}_{\text{EST}}$	$\text{CAI}_{\text{IFN3}}$	$\text{CAI}_{\text{IFN3}}^*$	$\text{CAI}_{\text{EST}}$
Cantàbria	117.65	93.82	11.56	4.41	3.62
Segòvia	75.76	53.54	3.34	3.34	1.50
Sevilla	13.04	25.34	0.47	0.35	0.85
Sòria	70.54	62.67	3.09	3.09	1.87
Tarragona	37.66	46.14	1.17	1.17	1.17
Terol	45.38	41.08	1.49	1.49	1.14
Toledo	19.42	29.55	0.97	0.97	1.03
València	25.25	32.12	0.92	0.92	0.66
Valladolid	46.02	39.43	2.00	2.00	0.72
Biscaia	144.47	113.13	13.89	6.39	3.65
Zamora	33.40	43.88	2.15	2.15	1.24
Saragossa	29.14	44.18	1.36	1.36	1.17

La figura 7.3 mostra el diagrama de dispersió entre els valors provincials extrets del mapa de GSV (figura 7.2) i les estimacions provincials de l'IFN3. Els valors de la majoria de les províncies es distribueixen al llarg de la línia 1:1 excepte els de les dues províncies amb major GSV (Guipúscoa i Biscaia), que se subestimen.

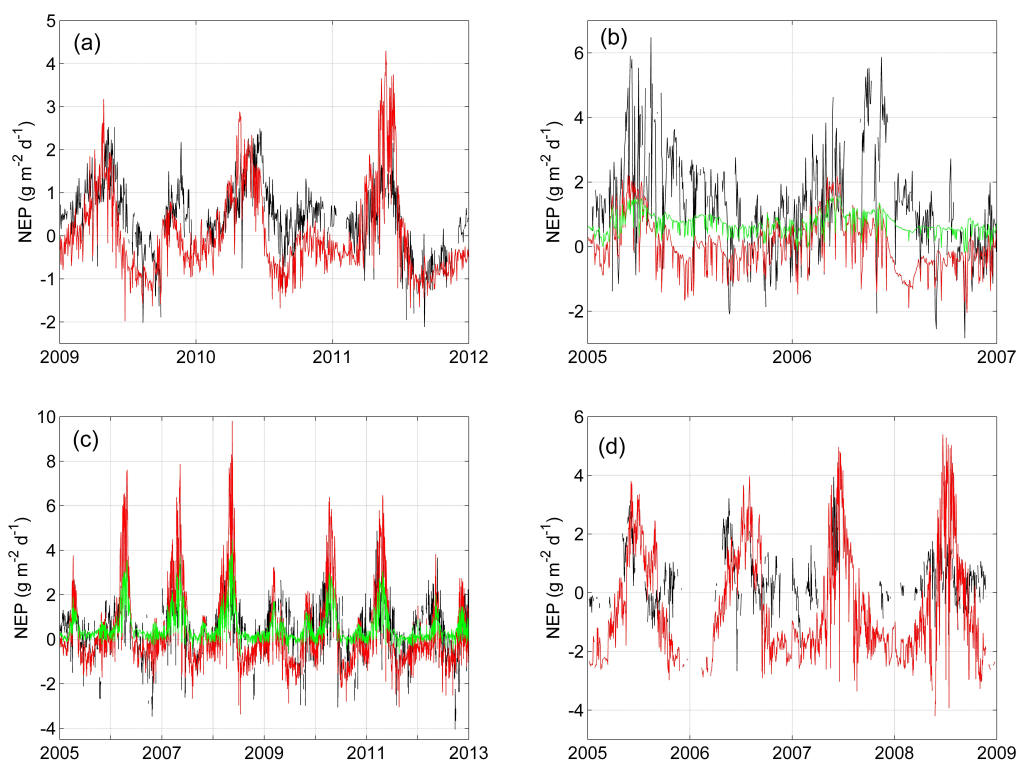


**Figura 7.3.** Diagrama de dispersió dels valors provincials extrets del mapa de GSV ( $\text{GSV}_{\text{EST}}$ , figura 7.2) vs. les estimacions provincials de l'IFN3 ( $\text{GSV}_{\text{IFN3}}$ ). Línia 1:1 en negre.

### 7.3.2 Fluxos nets: resultats preliminars

#### NEP als llocs de validació

La figura 7.4 mostra les sèries temporals de la producció neta de l'ecosistema potencial, és a dir, sense corregir (NEP, en roig) i la real ( $NEP_A$ , en verd) estimades a partir de la GPP del PEM ( $GPP_{PEM}$ ) i de les respiracions del Biome-BGC ( $R_{gr}$ ,  $R_{mn}$  i  $R_{het}$ ) mitjançant les equacions 7.3 i 7.8, respectivament. També es mostra, en negre, la mesurada en les torres EC ( $NEP_{EC}$ , en negre) per als quatre llocs de validació.



**Figura 7.4.** Sèries temporals d'NEP en ES-CPa (a), ES-ES1 (b), ES-LMa (c) i ES-VDA (d).  $NEP_{EC}$  en negre, NEP en roig i  $NEP_A$  en verd.

En ES-CPa (figura 7.4 a), NEP reproduïx la variació temporal d' $NEP_{EC}$  però subestima lleugerament la seua magnitud durant els anys 2009 i 2010. En ES-ES1 (figura 7.4 b), NEP subestima sistemàticament  $NEP_{EC}$  durant tot el període.  $NEP_A$  (amb  $GSV_A = 146 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) presenta una amplitud menor que la d'NEP, però redueix sensiblement la subestimació d'NEP. En ES-LMa (figura 7.4 c), NEP reproduïx la variació temporal d' $NEP_{EC}$  però sobreestima la majoria dels màxims anuals.  $NEP_A$  (amb  $GSV_A = 16 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) presenta una amplitud menor que NEP, de manera que redueix la sobreestimació dels màxims però

també sobreestima els mínims. En ES-VDA (figura 7.4 d), NEP pareix presentar una oscil·lació major que  $NEP_{EC}$  encara que aquesta presenta molts buits per a dur a terme una comparació efectiva.

La taula 7.7 recull els estadístics resultants de la comparació entre  $NEP_{EC}$ , NEP i  $NEP_A$  en els quatre llocs de validació. En ES-CPa (matollar) s'obtenen els millors resultats amb NEP explicant un 37 % de la variància d' $NEP_{EC}$ . En ES-ES1,  $NEP_A$  explica un 8 % més de la variància d' $NEP_{EC}$  que NEP i redueix tots els errors (sobretot l'MBE). En ES-LMa, en canvi,  $NEP_A$  explica un 5 % menys de la variància d' $NEP_{EC}$  que NEP i augmenta l'MBE, mentre que redueix l'MAE i l'RMSE. En ES-VDA és on menys variància de l' $NEP_{EC}$  s'aconsegueix explicar (només un 11 %).

**Taula 7.7.** Estadístics resultants de la comparació entre  $NEP_{EC}$  i NEP i  $NEP_A$  en els quatre llocs de validació. MBE, MAE i RMSE en  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ .

<b>ES-CPa</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$NEP_{EC}$ vs. NEP	0.37	-0.3	0.7	0.9
<b>ES-ES1</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$NEP_{EC}$ vs. NEP	0.13	-1.3	1.6	2.0
$NEP_{EC}$ vs. $NEP_A$	0.21	-0.6	1.2	1.6
<b>ES-LMa</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$NEP_{EC}$ vs. NEP	0.29	-0.07	1.1	1.5
$NEP_{EC}$ vs. $NEP_A$	0.23	-0.2	0.9	1.2
<b>ES-VDA</b>				
	$R^2$	MBE	MAE	RMSE
$NEP_{EC}$ vs. NEP	0.11	-0.7	1.7	1.9

#### *Validació indirecta de l' $NPP_A$ per comparació amb el CAI*

Els valors mitjans per a cada província del mapa de CAI es van validar amb les estimacions provincials de CAI de l'IFN3 (taula 7.6) obtenint-se els següents estadístics:  $R^2 = 0.69$ ,  $MBE = -1.1\ m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ,  $MAE = 1.4\ m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$ , i  $RMSE = 3\ m^3\ ha^{-1}\ a^{-1}$ . La figura 7.5 mostra el diagrama de dispersió entre els valors mitjans provincials del CAI estimat a partir de l' $NPP_A$  mitjançant l'equació 7.9 front a les estimacions provincials de CAI de

l'IFN3. Encara que el CAI estimat a partir de l' $NPP_A$  reproduïx acuradament els valors de les províncies amb CAI inferior a  $5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , subestima notablement el CAI de les set províncies per damunt d'aquest valor (La Corunya, Guipúscoa, Lugo, Astúries, Pontevedra, Cantàbria i Biscaia).

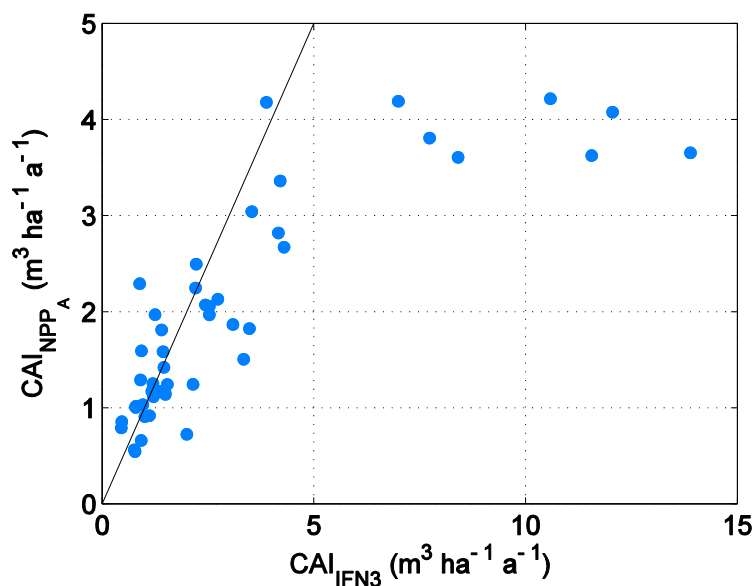


Figura 7.5. Diagrama de dispersió dels valors mitjans provincials del CAI estimat a partir de l' $NPP_A$  front a les estimacions provincials de CAI de l'IFN3.

## 7.4 Discussió

### 7.4.1 Mapa de GSV

A través del GRRF es va reduir dràsticament el nombre inicial de predictors alhora que es va mantindre el nivell de precisió en els resultats. Concretament només es van utilitzar 29 predictors dels 805 inicials (un 4 %) i els estadístics resultants fins i tot van millorar en alguns casos. 19 dels 29 predictors seleccionats, inclosos els 7 amb major importància normalitzada, es calculen a partir de la reflectància registrada per les bandes del SWIR, que està influenciada pel contingut en aigua de la vegetació i, per tant, vinculada amb la biomassa (Ahamed *et al.*, 2011). Aquest resultat coincideix amb els obtinguts per altres estudis recents (Chrysafis *et al.*, 2017a, 2017b; Tamm & Remm, 2009; Zheng *et al.*, 2014). 7 dels 29, el de major importància normalitzada entre ells, inclouen en el seu càlcul mètriques de textura, que capturen les característiques espacials i els patrons d'ombres del paisatge. Altres estudis recents sobre estimació de biomassa, la qual sovint s'estima a partir del GSV (Shvidenko *et al.*, 2007; Somogyi *et al.*, 2008), també van obtenir millors



resultats quan els models utilitzats inclouen mètriques de textura (Dube & Mutanga, 2015; Karlson *et al.*, 2015; Kelsey & Neff, 2014).

El fet que la mètrica temporal utilitzada pels 5 predictors amb major importància normalitzada siga el màxim (max) suggereix que no es podrien obtenir els mateixos resultats utilitzant escenes Landsat simples en lloc de sèries multitemporals, a diferència del que van assenyalar Chrysafis *et al.* (2017a). De fet, també apareixen altres mètriques temporals entre els 29 predictors seleccionats, cosa que demostra que la multitemporalitat aporta una contribució significativa a les prediccions. Karlson *et al.* (2015) van trobar que els resultats milloraven considerablement si utilitzaven una sèrie multitemporal d'imatges Landsat en lloc d'una única escena en l'estimació de la biomassa i la cobertura arbòria. La contribució aportada pel caràcter multitemporal del present estudi ha estat possible gràcies a l'ús del GEE, que permet tractar la ingent quantitat d'escenes Landsat necessàries per a cobrir tota l'àrea d'estudi al llarg del període d'11 anys.

Els resultats obtinguts són del mateix ordre de magnitud que els obtinguts per Saarela *et al.* (2015), tant en termes de  $R^2$  com d'RMSE. Tanmateix, no són tan precisos com els obtinguts en altres estudis (Chrysafis *et al.*, 2017a, 2017b; Mohammadi *et al.*, 2010; Mura *et al.*, 2018; Tamm & Remm, 2009; Zheng *et al.*, 2014). Segons Saarela *et al.* (2016), la diferència entre les superfícies considerades per les parcel·les de l'IFN3 (2000 m<sup>2</sup> aproximadament) i els píxels de les imatges Landsat (900 m<sup>2</sup> o 8100 m<sup>2</sup> quan s'utilitza una finestra de 3 × 3 píxels) i la precisió de les seues respectives localitzacions en són possibles causes. Quant a la diferència entre les superfícies considerades, Ohmann *et al.* (2014) van trobar que, quan s'estima el GSV a partir de píxels Landsat, es pot obtenir un elevat grau de dispersió i un RMSE relatiu superior al 100 % si es consideren parcel·les homogènies i heterogènies (com en el cas d'aquest estudi), ja que el píxel (amb menor superfície que la parcel·la) és incapaç de representar arbres (o inclús boscos) en diferents estats de desenvolupament distribuïts per diferents llocs de la parcel·la. Pel que fa a la no coincidència entre les localitzacions de les parcel·les i els píxels, normalment els governs distribueixen les localitzacions de les parcel·les desplaçades dins un marge de 0.0083° per a protegir-les (Moreno *et al.*, 2017). L'efecte d'aquest desplaçament és més intens quan es treballa a alta resolució espacial, com els 30 m de Landsat. Per a solucionar aquest problema, Moreno *et al.* (2016), qui també van trobar un baix nivell d'acord entre la classificació del tipus de bosc mitjançant teledetecció i les dades de l'inventari forestal espanyol, recomanen degradar les dades de teledetecció i de l'inventari forestal fins a entre 8 i 32 vegades la seua resolució espacial original. D'aquesta manera s'elimina una gran quantitat de dispersió i, òbviament, s'augmenta la precisió, però també es perd gran quantitat d'informació espacial.

Encara així, tenint en compte que el mateix model es va entrenar per a tota l'àrea d'estudi que presenta tantes regions climàtiques i tantes espècies diferents, els resultats obtinguts

es poden considerar un èxit. Especialment quan es comparen amb estudis portats a terme en regions menudes cobertes per una única escena i/o que contenen una única espècie, o altres que entrenen un model diferent per a cada espècie o grup d'espècies. La satisfactòria validació a nivell provincial avala aquests resultats.

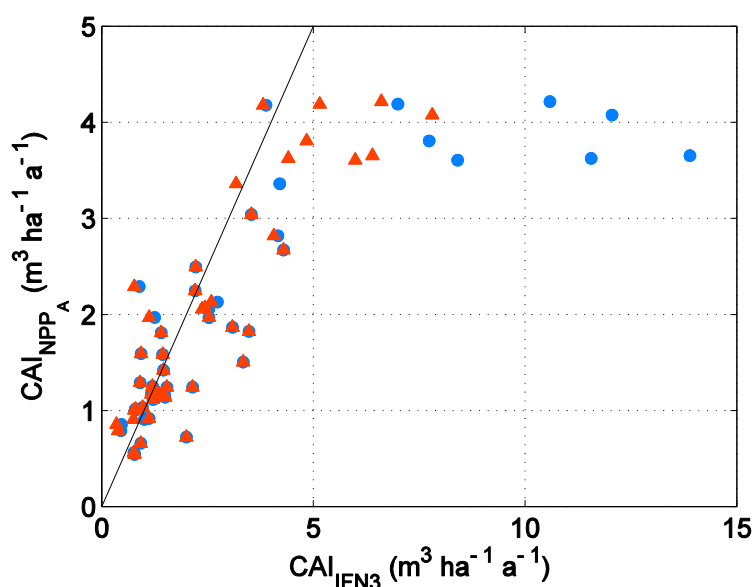
#### 7.4.2 Fluxos nets

Abans de començar aquesta secció, convé recordar que els resultats obtinguts en la secció 7.3.2 són encara preliminars, com s'ha mencionat a l'inici del capítol. En primer lloc, cal justificar l'elecció de la GPP estimada mitjançant el PEM ( $GPP_{PEM}$ ) per al càlcul dels fluxos nets en lloc de la GPP simulada amb el Biome-BGC ( $GPP_{BGC}$ ). Podria parèixer més coherent utilitzar la  $GPP_{BGC}$  perquè les respiracions també se simulen amb el Biome-BGC i aquesta  $GPP_{BGC}$  va ser calibrada respecte a la  $GPP_{PEM}$  (capítol 6). Nogensmenys, els resultats de la comparació entre  $GPP_{EC}$  (estimada als llocs de validació mitjançant el mètode *eddy covariance*) i  $GPP_{PEM}$  en els quatre llocs de validació són generalment millors que els de la comparació entre  $GPP_{EC}$  i  $GPP_{BGC}$  (capítol 6). En particular, la  $GPP_{BGC}$  presenta un retard respecte a la  $GPP_{EC}$  en la reducció deguda a l'estrès hídric que la  $GPP_{PEM}$  sí és capaç de reproduir acuradament. També per coherència la  $GPP_{PEM}$  ha sigut la GPP de referència des del capítol 4.

Quant a la comparació entre  $l'NEP_{EC}$  i  $l'NEP$  (i  $l'NEP_A$ ) als quatre llocs de validació, els resultats no són tan acurats com els de la GPP (capítols 4 i 6). S'aconsegueix explicar menys quantitat de variància de la variable de referència i els errors són del mateix ordre de magnitud però, com que  $l'NEP$  és menor que la GPP, són més elevats en termes relatius. Encara així, la correcció aplicada per a estimar  $l'NEP$  real dels boscos ( $NEP_A$ ) en l'únic lloc de validació considerat bosc (ES-ES1) és encoratjadora perquè millora tots els estadístics de la validació. El cas d'ES-LMa (devesa) és controvertit perquè la correcció millora  $l'MAE$  i  $l'RMSE$ , però empitjora la variància explicada i  $l'MBE$ . De fet, en el capítol 6 s'explica que es van haver de combinar les simulacions dels tipus de vegetació GRASS i EBF per a l'obtenció de la  $GPP_{BGC}$  de la devesa i que podia representar una dificultat per a l'aplicació del Biome-BGC en aquest lloc. En aquest capítol es va repetir el procediment per a obtenir-ne les respiracions i, finalment, considerant la devesa com un bosc, es va aplicar la correcció per a calcular  $l'NEP_A$ . Els resultats no són conclusius, però suggereixen que la correcció aplicada pot no ser adequada per a aquest tipus d'ecosistema.

Pel que fa a la validació indirecta a nivell provincial de  $l'NPP_A$  a través del CAI (equació 7.9), la metodologia aplicada funciona acuradament per a un rang de valors de CAI reduït però representatiu de l'àrea d'estudi. Tanmateix, les set províncies on se subestima el CAI, encara que representen un nombre menut respecte del total de províncies

considerades (7 de 47), són de les més productives (taula 7.6) i, per tant, cal tenir en compte la seua importància. Comparant les espècies considerades per a la determinació dels factors involucrats en el càlcul del CAI a partir de l' $NPP_A$  (taula 7.3) i les recollides per l'IFN3 (DGCN, 2006), es va observar que algunes espècies de ràpid creixement presents sobretot en les províncies on se subestima el CAI (principalment *Pinus radiata* i diferents espècies d'eucaliptus) no havien estat considerades per Federici *et al.*, (2008). Aquestes espècies poden disparar el CAI mitjà de les regions on habiten. Per a solucionar aquest problema, es van multiplicar les estimacions provincials de CAI de l'IFN3 pel quocient entre el CAI mitjà de totes les parcel·les contingudes en cada província sense considerar les espècies de ràpid creixement i considerant-les. Els estadístics obtinguts de la comparació entre el CAI provincial extret del mapa estimat a partir de les imatges d' $NPP_A$  i aquests nous valors provincials de CAI de l'IFN3 ( $CAI_{IFN3}^*$  en la taula 7.6) van ser  $R^2 = 0.77$ ,  $MBE = -0.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ,  $MAE = 0.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , i  $RMSE = 1.1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . D'aquesta manera s'aconsegueix explicar un 8% més de variància i els errors es redueixen molt considerablement (l'MBE i l'MAE fins a la meitat, i l'RMSE fins a una tercera part). La sèrie roja en la figura 7.6 mostra com el CAI de la majoria de les províncies roman pràcticament inalterat, mentre que el de les set províncies afectades es redueix notablement.



**Figura 7.6.** Diagrama de dispersió dels valors mitjans provincials del CAI estimat a partir de l' $NPP_A$  front a les estimacions provincials de CAI de l'IFN3. En cercles blaus les estimacions oficials de l'IFN3, en triangles roigs sense considerar les espècies de ràpid creixement. Línia 1:1 en negre.

## 7.5 Conclusions

El principal objectiu d'aquest capítol era generar un mapa de GSV que s'utilitzarà en futurs estudis per a corregir els fluxos de carboni obtinguts en aquesta tesi i, a partir d'ells, calcular els fluxos nets.

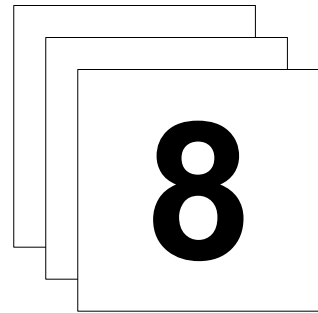
Aquest objectiu s'ha aconseguit. Per a això, s'ha desenvolupat una metodologia que utilitza una gran quantitat de predictors calculats a partir de les reflectàncies d'imatges Landsat, en selecciona els més importants mitjançant el mètode GRRF i, finalment, utilitza un RF estàndard per a entrenar un model amb els millors predictors i generar així el mapa de GSV. L'aplicació d'aquesta metodologia a tota l'àrea d'estudi és possible gràcies al GEE, que permet treballar amb la ingent quantitat d'imatges necessàries per a cobrir-la.

Quant a l'aplicació del GRRF per a regressió, s'ha demostrat que és capaç de reduir dràsticament el nombre de predictors inicial alhora que manté el nivell de precisió dels resultats. S'ha comprovat també que, d'acord amb estudis anteriors, els predictors més importants són els que incorporen la reflectància en el SWIR així com diverses mètriques de textura. En canvi, s'ha demostrat que l'anàlisi multitemporal aporta informació rellevant i imprescindible, al menys en zones d'una grandària i heterogeneïtat semblants a l'àrea d'estudi.

Com a resultat de l'aplicació de la metodologia, s'ha obtingut un mapa de GSV a 30 m de resolució espacial la qualitat del qual ha sigut avaluada mitjançant una validació amb les estimacions provincials de GSV de l'IFN3.

El mapa obtingut ha sigut degradat a una resolució espacial d'1 km per a corregir els fluxos de carboni involucrats en la cadena de processament que s'està desenvolupant per a l'obtenció de fluxos nets a partir del PEM i del Biome-BGC. S'han mostrat alguns resultats de fluxos nets. Encara que són preliminars, tot apunta a que la correcció aplicada per tindre en compte l'estat real de l'ecosistema millora la precisió de les estimacions dels fluxos nets. No obstant això, el procediment relatiu a aquesta correcció es refinarà en futurs estudis.

El càlcul dels fluxos nets mitjançant la metodologia proposada es presenta com una alternativa prometedora per a analitzar l'evolució futura dels ecosistemes utilitzant les sèries temporals llargues que proveeixen els escenaris de canvi climàtic.



# Conclusions

The main goal of the present thesis was to analyze carbon flux exchange between terrestrial ecosystems and atmosphere in forest regions over peninsular Spain, strongly affected by water stress (Gilabert *et al.*, 2015).

Four specific objectives were proposed (see Summary and chapter 1). The main conclusions regarding each of them are summarized.

---

### **O1. Quantifying the dependence of $\epsilon$ on water stress using operational remotely sensed products. Estimation of daily GPP**

Six water stress factors were evaluated in terms of their capability to track light use efficiency ( $\epsilon$ ) and, eventually, daily GPP when implemented in a PEM based on Monteith's approach (Monteith, 1972).

1. The inclusion of a water stress factor in the PEM improved the quality of GPP estimates in all six cases. Among the six evaluated water stress factors, the ones based on the water balance accounted by the ratio of actual evapotranspiration (AET) over potential evapotranspiration (PET) were able to explain the highest amount of  $\epsilon$  variance.
2. Particularly, the water stress factor that used the precipitation as a proxy of AET and the air temperature to estimate PET through Jensen & Haise (1965) empirical relationship, both ancillary meteorological data, performed best.
3. That water stress factor was selected to calculate daily GPP images at 1-km spatial resolution over the whole study area for the 2005-2012 period through its implementation in the PEM despite it used ancillary data since the data were available. These images were used as reference data along the thesis.
4. Nevertheless, the water stress factors that used AET and PET from MODIS and soil moisture from SMOS are recommended, respectively, as solid alternatives to estimate daily GPP at global and regional scale in near real time since this way the PEM would be driven solely by remote sensing operative products.
5. It was demonstrated that the effect of water stress on  $\epsilon$ , and therefore on daily GPP, can be characterized and quantified using only remotely sensed data.

### **O2. Deriving a sound approach to estimate annual GPP from VIs**

A theoretically sound semi-empirical model also based on Monteith's approach was developed to estimate annual GPP from vegetation indices (VIs). The semi-empirical model was calibrated and validated using the previously calculated GPP images as reference data.

6. The proposed semi-empirical model presents a relevant advantage: it does not depend on actual meteorological data. It only needs daily estimates of a common VI and a daily series of a typical photosynthetically active radiation (PAR) representative of the study area, which is used as a weight function for the VI.

- 
7. The daily VI series can be easily interpolated from monthly estimates. Therefore, the amount of inputs needed for the estimation of annual GPP through Monteith's approach is very significantly reduced.
  8. The longer the PAR series used to calculate the typical PAR, the more statistically representative the latter will be. Nonetheless, an extremely long series is not necessary for its calculation since it does not present large variations over time and it only acts as a weight function for the VI series.
  9. This weighting is an original contribution and justifies the model from a theoretical point of view. It is not a non-physically founded correlation between a VI and GPP. The VI is a measure of the fraction of absorbed PAR during the photosynthesis process. Therefore, if the PAR is low, the GPP will be low too even if the VI is high. A VI value can lead to different GPP estimates depending on the incident PAR, which presents a marked seasonality and can affect the different vegetation types depending on its phenology.
  10. The calibration of the model is crucial and depends on the reference data. The higher the quality of the reference GPP, the higher the accuracy of the modeled GPP.
  11. The results obtained with the EVI were slightly better than the ones obtained with the NDVI and, most importantly, non-dependent on the vegetation type so a land cover map is not needed either. Notwithstanding, MODIS EVI is available only since 2000, while NDVI time series date from several decades ago (*e.g.* from NOAA-AVHRR). This is why although its accuracy is not as high as the one of EVI, NDVI can be really useful in long term retrospective studies.
  12. The proposed semi-empirical model presents an excellent compromise between functionality and simplicity for this kind of studies.

### **O3. Optimization of the rooting depth in the Biome-BGC**

The daily GPP images from chapter 4 were used to calibrate the ecosystem process model Biome-BGC (Running and Hunt, 1993; White et al., 2000) in terms of the rooting depth ( $z_{\text{root}}$ ) and GPP and respirations were simulated using the optimized configuration. Rooting depth significantly affects the energy and carbon exchange between land surface and atmosphere due to the coupling of terrestrial water, energy, and carbon cycles.

13. The relevance of  $z_{\text{root}}$  in the correct simulation of water balance through Biome-BGC in Mediterranean ecosystems such as the study area was demonstrated.

- 
14. A methodology for the optimization of  $z_{\text{root}}$  was developed. This methodology compares daily GPP simulated by Biome-BGC with a reference GPP and identifies the optimum  $z_{\text{root}}$  as the one the lowest RMSE between the compared GPP series is obtained with. It was first tested in the four validation sites and then extended at regional scale over the whole study area. In both cases, optimized  $z_{\text{root}}$  was shallower than the default value (100 cm) considered by the Biome-BGC.
  15. An optimal  $z_{\text{root}}$  map was obtained, where 89% of the pixels obtained a shallower rooting depth than the default ones.

This map could not have been derived from existing soil depth maps, which refer to the depth to bedrock, due to both theoretical and practical reasons. In turn, it sets/serves as a starting point for the correct simulation of other ecosystem processes in the study area such as net carbon fluxes, which mainly determine the role of terrestrial ecosystems as carbon sinks and are preliminarily addressed in chapter 7.

16. As a consequence of the  $z_{\text{root}}$  optimization, the GPP simulations were improved at both local and regional scales.

#### **O4. Deriving a GSV map to obtain actual net carbon fluxes**

A growing stock volume (GSV) map over peninsular Spain was produced by the combination of Third Spanish National Forest Inventory (NFI3) data and Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ imagery. This map was used to take into account the actual conditions of the forest ecosystems and to correct the carbon fluxes estimates corresponding to optimal ecosystem functioning derived from both the PEM and the Biome-BGC.

17. An original methodology has been developed. It relies on the Google Earth Engine (GEE) tool and the guided regularized random forest (GRRF) procedure, which respectively allow to deal with massive amount of data and to reduce its dimensionality.
18. Combinations of reflectance data, vegetation indices, textural metrics and time metrics were considered as predictors. While commonly used for classification purposes, it was demonstrated how the GRRF can drastically reduce the dimensionality of predictors (from 805 to 29) without a loss of accuracy when used for regression.



- 
19. The best performing predictors included the SWIR reflectance as well as texture metrics, confirming previous research.
  20. Contrarily to previous findings using single scenes, the study also revealed the necessity of using multitemporal data, at least in heterogeneous regions as the study area.
  21. A GSV map for the whole study area at 30 m spatial resolution was produced, aggregated at 1-km spatial resolution, and validated against NFI3 estimations at province level.
  22. The GSV map was used to take into account the actual conditions of the forest ecosystems and to correct the carbon fluxes estimates corresponding to optimal ecosystem functioning. Preliminary results suggest that the aforementioned correction reduce the uncertainty of the estimates (as comparing with reference data).
  23. Further research in relation to the correction implementation in the net carbon flux processing chain is proposed to improve the results.

Net carbon flux estimates based on the proposed methodology seem to be a promising tool to analyze the evolution of forest ecosystems using the available information related to the climate change scenarios.



---

# Referències

---

AEMet, 2010. *Resumen Climatológico Anual* 2010.

AEMet, 2005. *Resumen Climatológico Anual* 2005.

Ahamed, T., Tian, L., Zhang, Y., Ting, K.C., 2011. A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass and Bioenergy* 35, 2455–2469. (doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.028)

Alcaraz, D., Paruelo, J., Cabello, J., 2006. Identification of current ecosystem functional types in the Iberian Peninsula. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 15, 200–212. (doi:10.1111/j.1466-822X.2006.00215.x)

Alsamamra, H., Ruiz-Arias, J.A., Pozo-Vázquez, D., Tovar-Pescador, J., 2009. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1343–1357. (doi:10.1016/j.agrformet.2009.03.005)

Aminou, D.M.A., 2002. MSG 's SEVIRI Instrument. *ESA Bull.* 15–17.

Anderson, D.B., 1936. Relative Humidity or Vapor Pressure Deficit. *Ecology* 17, 277–282. (doi:10.2307/1931468)

Arrhenius, S., 1896. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philos. Mag. J. Sci. Ser.* 5 41, 237–276. (doi:10.1080/14786449608620846)

Assouline, S., Or, D., 2014. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage. *Water Resour. Res.* 50, 4787–4802.

Baldocchi, D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Glob. Chang. Biol.* 9, 479–492. (doi:10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x)

- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B., Meyers, T.P., 1988. Measuring Biosphere- Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gasses with Micrometeorological methods. *Ecology* 69, 1331–1340. (doi:10.2307/1941631)
- Ballabio, C., Panagos, P., Monatanarella, L., 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261, 110–123. (doi:10.1016/j.geoderma.2015.07.006)
- Barton, C.V., North, P.R., 2001. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index model and sensitivity analysis. *Remote Sens.* 78, 264–273.
- Bilger, W., Björkman, O., Thayer, S.S., 1989. Light-Induced Spectral Absorbance Changes in Relation to Photosynthesis and the Epoxidation State of Xanthophyll Cycle Components in Cotton Leaves. *Plant Physiol.* 91, 542–551. (doi:10.1104/pp.91.2.542)
- Black, K., Davis, P., Lynch, P., Jones, M., McGettigan, M., Osborne, B., 2006. Long-term trends in solar irradiance in Ireland and their potential effects on gross primary productivity. *Agric. For. Meteorol.* 141, 118–132. (doi:10.1016/j.agrformet.2006.09.005)
- Bohren, C.F., Clothiaux, E.E., Johnson, N.D., 2007. Fundamentals of Atmospheric Radiation, *American Journal of Physics*. Wiley-VCH, Weinheim. (doi:10.1119/1.2733693)
- Bolle, H.J., Eckardt, M., Koslowsky, D., Maselli, F., Meliá-Miralles, J., Menenti, M., Olesen, F.S., Petkov, L., Rasool, I., Van de Griend, A., 2006. *Mediterranean Land-surface Processes Assessed from Space*. Springer, Berlin.
- Breiman, L., 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 45, 5–32. (doi:10.1023/A:1010933404324)
- Breiman, L., 1996. Bagging predictors. *Mach. Learn.* 24, 123–140. (doi:10.1007/BF00058655)
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.B., Mooney, H.A., Sala, O.E., Schulze, E.-D., 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia* 108, 583–595. (doi:10.1007/BF00329030)
- Cao, M., Prince, S.D., Small, J., Goetz, S.J., 2004. Remotely Sensed Interannual Variations and Trends in Terrestrial Net Primary Productivity 1981-2000. *Ecosystems* 7, 233–242. (doi:10.1007/s10021-003-0189-x)
- Chapin III, F.S., Matson, P.A., Mooney, H.A., 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Chen, J.M., Black, T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell Environ.* 15, 421–429. (doi:10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x)
- Chiesi, M., Maselli, F., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., Running, S.W., 2007. Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecol. Modell.* 206, 179–190. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.03.032)
- Chirici, G., Chiesi, M., Corona, P., Salvati, R., Papale, D., Fibbi, L., Sirca, C., Spano, D., Duce, P., Marras, S., Matteucci, G., Cescatti, A., Maselli, F., 2015. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 121, 266–279. (doi:10.1002/2015JG003019)
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Gitas, I., Tsakiri-Strati, M., 2017a. Estimating Mediterranean forest parameters using multi seasonal Landsat 8 OLI imagery and an ensemble learning method. *Remote Sens. Environ.* 199, 154–166. (doi:10.1016/j.rse.2017.07.018)

- 
- Chrysafis, I., Mallinis, G., Siachalou, S., Patias, P., 2017b. Assessing the relationships between growing stock volume and sentinel-2 imagery in a mediterranean forest ecosystem. *Remote Sens. Lett.* 8, 508–517. (doi:10.1080/2150704X.2017.1295479)
- Colman, E.A., 1944. The dependence of field capacity upon the depth of wetting of field soils. *Soil Sci.* 58, 43–50.
- Connors, R.W., Trivedi, M.M., Harlow, C.A., 1984. Segmentation of a high-resolution urban scene using texture operators. *Comput. Vision, Graph. Image Process.* 25, 273–310. doi:10.1016/0734-189X(84)90197-X
- Coops, N.C., Hilker, T., Hall, F.G., Nichol, C.J., Drolet, G.G., 2010. Estimation of Light-use Efficiency of Terrestrial Ecosystems from Space: A Status Report. *Bioscience* 60, 788–797. (doi:10.1525/bio.2010.60.10.5)
- Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B., Ginn, T.R., 1984. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resour. Res.* 20, 682–690. (doi:10.1029/WR020i006p00682)
- Davenport, M.L., Nicholson, S.E., 1993. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. *Int. J. Remote Sens.* 14, 2369–2389. (doi:10.1080/01431169308954042)
- De Pury, D.G.G., Farquhar, G.D., 1997. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant, Cell Environ.* 20, 537–557. (doi:10.1111/j.1365-3040.1997.00094.x)
- Demmig-Adams, B., 1990. Carotenoids and photoprotection in plants: a role for the xanthophyll zeaxanthin. *Biochim. Biophys. Acta* 1020, 1–24.
- Deng, H., Runger, G., 2013. Gene selection with guided regularized random forest. *Pattern Recognit.* 46, 3483–3489. (doi:10.1016/j.patcog.2013.05.018)
- DGCN, 2006. III Inventario Forestal Nacional 1997-2007.
- Didan, K., Huete, A., 2015. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. (doi:10.5067/MODIS/MOD13Q1.006)
- Donohue, R.J., Hume, I.H., Roderick, M.L., McVicar, T.R., Beringer, J., Hutley, L.B., Gallant, J.C., Austin, J.M., van Gorsel, E., Cleverly, J.R., Meyer, W.S., Arndt, S.K., 2014. Evaluation of the remote-sensing-based DIFFUSE model for estimating photosynthesis of vegetation. *Remote Sens. Environ.* 155, 349–365. doi:10.1016/j.rse.2014.09.007
- Drolet, G.G., Huemmrich, K.F., Hall, F.G., Middleton, E.M., Black, T.A., Barr, A.G., Margolis, H.A., 2005. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sens. Environ.* 98, 212–224. (doi:10.1016/j.rse.2005.07.006)
- Dube, T., Mutanga, O., 2015. Investigating the robustness of the new Landsat-8 Operational Land Imager derived texture metrics in estimating plantation forest aboveground biomass in resource constrained areas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 108, 12–32. (doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.06.002)

- FAO, 2007. Secuestro de carbono en tierras áridas. Informe sobre recursos mundiales de suelos 102. Organizació de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Rome.
- Farquhar, G.D., Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta* 149, 78–90. (doi:10.1007/BF00386231)
- Farquhar, G.D., Sharkey, T.D., 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 33, 317–345.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* 45, RG2004 (doi:10.1029/2005RG000183)
- Federici, S., Vitullo, M., Tulipano, S., De Laurets, R., Seufert, G., 2008. An approach to estimate carbon stocks change in forest carbon pools under the UNFCCC: the Italian case. *iForest - Biogeosciences For.* 1, 86–95.
- Fensholt, R., Sandholt, I., Rasmussen, M.S., 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sens. Environ.* 91, 490–507. (doi:10.1016/j.rse.2004.04.009)
- Fleagle, R., Businger, J.A., 1980. An Introduction to Atmospheric Physics, 2nd ed. Academic Press, New York.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Bilger, W., Björkman, O., Fredeen, A.L., Peñuelas, J., 1990. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. *Oecologia* 85, 1–7. (doi:10.1007/BF00317336)
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Peñuelas, J., Valentini, R., 1995. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecol. Appl.* 5, 28–41.
- Gamon, J.A., Peñuelas, J., Field, C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* (doi:10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- Gao, B.C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58, 257–266. doi:10.1016/S0034-4257(96)00067-3
- Gao, Y., Yu, G., Yan, H., Zhu, X., Li, S., Wang, Q., Zhang, J., Wang, Y., Li, Y., Zhao, L., Shi, P., 2014. A MODIS-based Photosynthetic Capacity Model to estimate gross primary production in Northern China and the Tibetan Plateau. *Remote Sens. Environ.* 148, 108–118. (doi:10.1016/j.rse.2014.03.006)
- Garbulsky, M.F., Filella, I., Verger, A., Peñuelas, J., 2014. Photosynthetic light use efficiency from satellite sensors: From global to Mediterranean vegetation. *Environ. Exp. Bot.* 103, 3–11. (doi:10.1016/j.envexpbot.2013.10.009)
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., Filella, I., 2011. The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies: A review and meta-analysis. *Remote Sens. Environ.* 115, 281–297. (doi:10.1016/j.rse.2010.08.023)

- 
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Papale, D., Ardö, J., Goulden, M.L., Kiely, G., Richardson, A.D., Rotenberg, E., Veenendaal, E.M., Filella, I., 2010. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 253–267. (doi:10.1111/j.1466-8238.2009.00504.x)
- Gilabert, M.A., González-Piqueras, J., Martínez, B., 2010. Theory and applications of vegetation indices, in: Maselli, F., Menenti, M., Brivio, P.A. (Eds.), *Remote Sensing Optical Observations of Vegetation Properties*. Research Signpost, pp. 1–43.
- Gilabert, M.A., Moreno, A., Maselli, F., Martínez, B., Chiesi, M., Sánchez-Ruiz, S., García-Haro, F.J., Pérez-Hoyos, A., Campos-Taberner, M., Pérez-Priego, O., Serrano-Ortiz, P., Carrara, A., 2015. Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 102, 184–197. (doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.017)
- Gitelson, A.A., Viña, A., Verma, S.B., Rundquist, D.C., Arkebauer, T.J., Keydan, G., Leavitt, B., Ciganda, V., Burba, G.G., Suyker, A.E., 2006. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *J. Geophys. Res. Atmos.* 111, 1–13. (doi:10.1029/2005JD006017)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* 202, 18–27. (doi:10.1016/j.rse.2017.06.031)
- Goward, S.N., Tucker, C.J., Dye, D.G., 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio* 64, 3–14.
- Grace, J., Nichol, C., Disney, M., Lewis, P., Quaife, T., Bowyer, P., 2007. Can we measure terrestrial photosynthesis from space directly, using spectral reflectance and fluorescence? *Glob. Chang. Biol.* 13, 1484–1497. (doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01352.x)
- Gu, L., Baldocchi, D., Verma, S.B., Black, T.A., Vesala, T., Falge, E.M., Dowty, P.R., 2002. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *J. Geophys. Res. Atmos.* 107, ACL 2–1–ACL 2–23. (doi:10.1029/2001JD001242)
- Guerrero-Campo, J., Palacio, S., Pérez-Rontomé, C., Montserrat-Martí, G., 2006. Effect of root system morphology on root-sprouting and shoot-rooting abilities in 123 plant species from eroded lands in north-east Spain. *Ann. Bot.* 98, 439–447. (doi:10.1093/aob/mcl122)
- Guswa, A.J., 2010. Effect of plant uptake strategy on the water-optimal root depth. *Water Resour. Res.* 46, 1–5. (doi:10.1029/2010WR009122)
- Guyot, G., 1998. *Physics of the Environment and Climate*. John Wiley & Sons, Paris.
- Hansen, M.C.C., Potapov, P. V, Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A. a, Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V. V, Goetz, S.J.J., Loveland, T.R.R., Kommareddy, a, Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O.O., Townshend, J.R.G.R.G., Patapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A. a, Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V. V, Goetz, S.J.J., Loveland, T.R.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O.O., Townshend, J.R.G.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science* 342, 850–854. (doi:10.1126/science.1244693)

- 
- Haralick, R.M., Shanmugan, K., Dinstein, I., 1973. Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 3, 610–621. (doi:10.1109/TSMC.1973.4309314)
- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed. Springer, New York.
- Haykin, S., 1999. *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd ed. Prentice Hall International, Inc, New Jersey.
- Healey, K.D., Hammer, G.L., Rickert, K.G., Bange, M.P., 1998. Radiation use efficiency increases when the diffuse component of incident radiation is enhanced under shade. *Aust. J. Agric. Res.* 49, 665. (doi:10.1071/A97100)
- Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S.W., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Davis, K.J., Bolstad, P. V., Cook, B.D., Desai, A.R., Ricciuto, D.M., Law, B.E., Oechel, W.C., Kwon, H., Luo, H., Wofsy, S.C., Dunn, A.L., Munger, J.W., Baldocchi, D.D., Xu, L., Hollinger, D.Y., Richardson, A.D., Stoy, P.C., Siqueira, M.B.S., Monson, R.K., Burns, S.P., Flanagan, L.B., 2006. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 44, 1908–1923. (doi:10.1109/TGRS.2005.853936)
- Hilker, T., Coops, N.C., Wulder, M.A., Black, T.A., Guy, R.D., 2008. The use of remote sensing in light use efficiency based models of gross primary production: A review of current status and future requirements. *Sci. Total Environ.* 404, 411–423. (doi:10.1016/j.scitotenv.2007.11.007)
- Huete, A., Didan, K., Miura, H., Rodriguez, E.P., Gao, X., Ferreira, L.F., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83, 195–213.
- Huete, A., Ponce-Campos, G., Zhang, Y., Restrepo-Coupe, N., Ma, X., Moran, M.S., 2015. Monitoring photosynthesis from space, in: Thenkabail, P.S. (Ed.), *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing*. CRC Press, Boca Raton, pp. 3–22.
- Hulme, M., 2009. On the origin of “the greenhouse effect”: John Tyndall’s 1859 interrogation of nature. *Weather* 64, 121–123. (doi:10.1002/wea.386)
- Hunt, E.D., Hubbard, K.G., Wilhite, D.A., Arkebauer, T.J., Dutcher, A.L., 2009. The development and evaluation of a soil moisture index. *Int. J. Climatol.* 29, 747–759.
- Ichii, K., Kambawata, A., Yamaguchi, Y., 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990, *Int. J. Remote Sens.* 23, 3873–3878. (doi:10.1080/01431160110119416)
- IGN, 2011. Documento Técnico SIOSE 2011.
- Immerzeel, W.W., Rutten, M.M., Droogers, P., 2009. Spatial downscaling of TRMM precipitation using vegetative response on the Iberian Peninsula. *Remote Sens. Environ.* 113, 362–370. (doi:10.1016/j.rse.2008.10.004)
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. (doi:10.1017/CBO9781107415324)



- 
- IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- Iqbal, M., 1983. *An introduction to solar radiation*. Academic Press, Toronto.
- Izquierdo-Verdiguier, E., Zurita-Milla, R., 2018. Use of guided regularized random forest for biophysical parameter retrieval, in: Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Valencia, Spain (forthcoming).
- Izquierdo-Verdiguier, E., Zurita-Milla, R., By, R.A. de, 2017. On the use of guided regularized random forests to identify crops in smallholder farm fields, in: 2017 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). pp. 1–3. (doi:10.1109/Multi-Temp.2017.8035248)
- Jenkins, J.P., Richardson, A.D., Braswell, B.H., Ollinger, S. V., Hollinger, D.Y., Smith, M.L., 2007. Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements. *Agric. For. Meteorol.* 143, 64–79. (doi:10.1016/j.agrformet.2006.11.008)
- Jensen, M.E., Haise, H.R., 1965. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drain. Div.* 89, 15–41.
- Jones, H.G., 1992. *Plants and Microclimate*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Ju, J., Roy, D.P., 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. *Remote Sens. Environ.* 112, 1196–1211. (doi:10.1016/j.rse.2007.08.011)
- Jung, M., Le Maire, G., Zaehle, S., Luysaert, S., Vetter, M., Churkina, G., Ciais, P., Viovy, N., Reichstein, M., 2007. Assessing the ability of three land ecosystem models to simulate gross carbon uptake of forests from boreal to Mediterranean climate in Europe. *Bioosciences* 4, 647–656. (doi:10.5194/bgd-4-1353-2007)
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H.A., Cescatti, A., Richardson, A.D., Arain, M.A., Arneth, A., Bernhofer, C., Bonal, D., Chen, J., Gianelle, D., Gobron, N., Kiely, G., Kutsch, W., Lasslop, G., Law, B.E., Lindroth, A., Merbold, L., Montagnani, L., Moors, E.J., Papale, D., Sottocornola, M., Vaccari, F., Williams, C., 2011. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *J. Geophys. Res. Biosciences* 116, 1–16. (doi:10.1029/2010JG001566)
- Kanniah, K.D., Beringer, J., Hutley, L., 2013. Exploring the link between clouds, radiation, and canopy productivity of tropical savannas. *Agric. For. Meteorol.* 182–183, 304–313. (doi:10.1016/j.agrformet.2013.06.010)
- Kanniah, K.D., Beringer, J., Hutley, L.B., Tapper, N.J., Zhu, X., 2009. Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity product and algorithm improvement at a tropical savanna site in northern Australia. *Remote Sens. Environ.* 113, 1808–1822. (doi:10.1016/j.rse.2009.04.013)
- Karlson, M., Ostwald, M., Reese, H., Sanou, J., Tankoano, B., Mattsson, E., 2015. Mapping tree canopy cover and aboveground biomass in Sudano-Sahelian woodlands using Landsat 8 and random forest. *Remote Sens.* 7, 10017–10041. (doi:10.3390/rs70810017)

- 
- Keeling, C.D., Harris, T.B., Wilkins, E.M., 1968. Concentration of atmospheric carbon dioxide at 500 and 700 millibars. *J. Geophys. Res.* 73, 4511–4528. (doi:10.1029/JB073i014p04511)
- Keenan, T.F., Prentice, I.C., Canadell, J.G., Williams, C.A., Wang, H., Raupach, M.R., Collatz, G.J., 2016. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO<sub>2</sub> due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nat. Commun.* 7, 1–9. (doi:10.1038/ncomms13428)
- Kelsey, K.C., Neff, J.C., 2014. Estimates of aboveground biomass from texture analysis of landsat imagery. *Remote Sens.* 6, 6407–6422. (doi:10.3390/rs6076407)
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J., Martinuzzi, J., Font, J., Berger, M., 2001. Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39, 1729–1735. (doi: 10.1109/36.942551)
- Kimball, J.S., White, M. a., Running, S.W., 1997. BIOME-BGC simulations of stand hydrologic processes for BOREAS. *J. Geophys. Res.* 102, 29043. (doi:10.1029/97JD02235)
- Kirkham, M.B., 2005. Principles of Soil and Plant Water Relations. Elsevier Academic Press, Burlington.
- Kleidon, A., 2004. Global datasets and rooting zone depth inferred from inverse methods. *J. Clim.* 17, 2714–2722. (doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2714:GDORZD>2.0.CO;2)
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259, 698–709. (doi:10.1016/j.foreco.2009.09.023)
- LSA-SAF, 2015. Product User Manual Evapotranspiration (ET).
- LSA-SAF, 2011. Product User Manual Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF).
- LSA-SAF, 2010. Algorithm Theoretical Basis Document Meteosat Second Generation Evapotranspiration (MET) Product Daily MET (DMET) Product.
- Ma, X., Huete, A., Yu, Q., Restrepo-Coupe, N., Beringer, J., Hutley, L.B., Kanniah, K.D., Cleverly, J., Eamus, D., 2014. Parameterization of an ecosystem light-use-efficiency model for predicting savanna GPP using MODIS EVI. *Remote Sens. Environ.* 154, 253–271. (doi:10.1016/j.rse.2014.08.025)
- Markham, B.L., Storey, J.C., Williams, D.L., Irons, J.R., 2004. Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42, 2691–2694. (doi:10.1109/TGRS.2004.840720)
- Marshall, J., Plumb, R.A., 2008. *Atmopshere, Ocean, and Climate Dynamics*. Academic Press, Burlington.
- Martínez, B., Camacho, F., Verger, A., García-Haro, F.J., Gilabert, M.A., 2013. Intercomparison and quality assessment of MERIS, MODIS and SEVIRI FAPAR products over the Iberian Peninsula. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 21, 463–476. (doi:10.1016/j.jag.2012.06.010)

- 
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., 2015. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *J. Hydrol.* 522, 265–273. (doi:10.1016/j.jhydrol.2014.12.051)
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., Herrero-Jiménez, C.M., 2016. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sens. Environ.* 177, 277–286. (doi:10.1016/j.rse.2016.02.064)
- Masek, J.G., Vermote, E.F., Saleous, N., Wolfe, R., Hall, F.G., Huemmrich, K.F., Gao, F., Kutler, J., Lim, T.K., 2013. LEDAPS Calibration, Reflectance, Atmospheric Correction Preprocessing Code, Version 2. Model product. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. (doi:10.3334/ornldaac/1146)
- Maselli, F., Argenti, G., Chiesi, M., Angeli, L., Papale, D., 2013. Simulation of grassland productivity by the combination of ground and satellite data. *Agric. Ecosyst. Environ.* 165, 163–172. (doi:10.1016/j.agee.2012.11.006)
- Maselli, F., Cherubini, P., Chiesi, M., Gilabert, M.A., Lombardi, F., Moreno, A., Teobaldelli, M., Tognetti, R., 2014. Start of the dry season as a main determinant of inter-annual Mediterranean forest production variations. *Agric. For. Meteorol.* 194, 197–206. (doi:10.1016/j.agrformet.2014.04.006)
- Maselli, F., Chiesi, M., Barbati, A., Corona, P., 2010. Assessment of forest net primary production through the elaboration of multisource ground and remote sensing data. *J. Environ. Monit.* 12, 1082–1091. (doi:10.1039/b924629k)
- Maselli, F., Chiesi, M., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., Running, S.W., 2009b. Modelling the forest carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data. *Ecol. Modell.* 220, 330–342. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.10.002)
- Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., Corona, P., 2009a. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sens. Environ.* 113, 657–667. (doi:10.1016/j.rse.2008.11.008)
- Mathews, C.K., Van Holde, K.E., Appling, D.R., Anthony-Cahill, S.J., 2013. *Biochemistry*, 4th ed. Pearson, Toronto.
- McCallum, I., Wagner, W., Schmulius, C., Shvidenko, A., Obersteiner, M., Fritz, S., Nilsson, S., 2009. Satellite-based terrestrial production efficiency modeling. *Carbon Balance Manag.* 4, 8. (doi:10.1186/1750-0680-4-8)
- McMullan, K.D., Brown, M.A., Martín-Neira, M., Rits, W., Ekholm, S., Marti, J., Lemanczyk, J., 2008. SMOS: The payload. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 594–605. (doi:10.1109/TGRS.2007.914809)
- McRoberts, R.E., Tomppo, E.O., 2007. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sens. Environ.* 110, 412–419. (doi:10.1016/j.rse.2006.09.034)
- Medlyn, B., Barrett, D., Landsberg, J., Sands, P., Clement, R., 2003. Conversion of canopy intercepted radiation to photosynthate: Review of modelling approaches for regional scales. *Funct. Plant Biol.* 30, 153–169. (doi:10.1071/FP02088)

- 
- Medrano, H., Escalona, J.M., Bota, J., Gulías, J., Flexas, J., 2002. Regulation of Photosynthesis of C<sub>3</sub> Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Ann. Bot.* 89, 895–905. (doi:10.1093/aob/mcf079)
- Mohammadi, J., Joibary, S.S., Yaghmaee, F., Mahiny, A.S., 2010. Modelling forest stand volume and tree density using landsat ETM+ data. *Int. J. Remote Sens.* 31, 2959–2975. (doi:10.1080/01431160903140811)
- Monson, R., Baldocchi, D., 2014. *Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes*. Cambridge University Press, New York.
- Monteith, J.L., 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747–766.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205–234.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 2013. *Principles of Environmental Physics. Plants, Animals, and the Atmosphere*, Fourth Edition, Academic Press, Oxford. (doi:10.1016/B978-0-12-386910-4.00019-6)
- Moreno, A., 2014. Retrieval and assessment of CO<sub>2</sub> uptake by Mediterranean ecosystems using remote sensing and meteorological data, Ph.D. Thesis, Universitat de València (en <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?fichero=47930>).
- Moreno, Á., García-Haro, F., Martínez, B., Gilabert, M.A., 2014. Noise Reduction and Gap Filling of fAPAR Time Series Using an Adapted Local Regression Filter. *Remote Sens.* 6, 8238–8260. (doi:10.3390/rs6098238)
- Moreno, A., Gilabert, M.A., Camacho, F., Martínez, B., 2013. Validation of daily global solar irradiation images from MSG over Spain. *Renew. Energy* 60, 332–342. (doi:10.1016/j.renene.2013.05.019)
- Moreno, A., Gilabert, M.A., Martínez, B., 2011. Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches. *Sol. Energy* 85, 2072–2084. (doi:10.1016/j.solener.2011.05.017)
- Moreno, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., Chiesi, M., Martínez, B., Seufert, G., 2012. Assessment of MODIS imagery to track light-use efficiency in a water-limited Mediterranean pine forest. *Remote Sens. Environ.* 123, 359–367. (doi:10.1016/j.rse.2012.04.003)
- Moreno, A., Neumann, M., Hasenauer, H., 2017. Forest structures across Europe. *Geosci. Data J.* 4, 17–28. (doi:10.1002/gdj3.45)
- Moreno, A., Neumann, M., Hasenauer, H., 2016. Optimal resolution for linking remotely sensed and forest inventory data in Europe. *Remote Sens. Environ.* 183, 109–119. (doi:10.1016/j.rse.2016.05.021)
- Mu, Q., Zhao, M., Running, S.W., 2013. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Algorithm Theoretical Basis Document Collection 5.
- Mura, M., Botalico, F., Giannetti, F., Bertani, R., Giannini, R., Mancini, M., Orlandini, S., Travaglini, D., Chirici, G., 2018. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 66, 126–134. (doi:10.1016/j.jag.2017.11.013)

- 
- Myneni, R.B., Williams, D.L., 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.* 49, 200–211. (doi:10.1016/0034-4257(94)90016-7)
- Nakaji, T., Oguma, H., Fujinuma, Y., 2006. Seasonal changes in the relationship between photochemical reflectance index and photosynthetic light use efficiency of Japanese larch needles. *Int. J. Remote Sens.* 27, 493–509. (doi:10.1080/01431160500329528)
- Nieto, H., Sandholt, I., Aguado, I., Chuvieco, E., Stisen, S., 2011. Air temperature estimation with MSG-SEVIRI data: Calibration and validation of the TVX algorithm for the Iberian Peninsula. *Remote Sens. Environ.* 115, 107–116. (doi:10.1016/j.rse.2010.08.010)
- Odum, E.P., Barrett, G., 2005. *Fundamentals of ecology*, 5th ed. Thompson Brooks/Cole, Belmont, CA.
- Odum, H.T., Pinkerton, R.C., 1955. Times speed regulator, the optimum efficiency for maximum output in physical and biological systems. *Am. Sci.* 43, 331–343.
- Ohmann, J.L., Gregory, M.J., Roberts, H.M., 2014. Scale considerations for integrating forest inventory plot data and satellite image data for regional forest mapping. *Remote Sens. Environ.* 151, 3–15. (doi:10.1016/j.rse.2013.08.048)
- Oren, R., Ellsworth, D.S., Johnsen, K.H., Phillips, N., Ewers, B.E., Maier, C., Schäfer, K.V.R., McCarthy, H., Hendrey, G., McNulty, S.G., Katul, G.G., 2001. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. *Nature* 411, 469–472. (doi:10.1038/35078064)
- Pardo, N., 2015. Medida y modelización de los flujos de energía y CO<sub>2</sub> en una parcela agrícola en Castilla y León. Universidad de Valladolid.
- Paredes, V., 2013. Medida y parametrización de los flujos de CO<sub>2</sub> en un uso de suelo agrícola de la meseta utilizando datos en superficie y teledetección. Universidad de Valladolid.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.* 193, 120–145. (doi:10.1098/rspa.1948.0037)
- Pierrehumbert, R.T., 2004. Warming the world. *Nature* 432, 677. (doi:10.0.4.14/432677a)
- Piles, M., Sánchez, N., Vall-llossera, M., Camps, A., Martínez-Fernández, J., Martínez, J., González-Gambau, V., 2014. A Downscaling Approach for SMOS Land Observations: Evaluation of High-Resolution Soil Moisture Maps Over the Iberian Peninsula. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* (doi:10.1109/JSTARS.2014.2325398)
- Potapov, P. V., Turubanova, S.A., Hansen, M.C., Adusei, B., Broich, M., Altstatt, A., Mane, L., Justice, C.O., 2012. Quantifying forest cover loss in Democratic Republic of the Congo, 2000–2010, with Landsat ETM+ data. *Remote Sens. Environ.* 122, 106–116. (doi:10.1016/j.rse.2011.08.027)
- Potter, C.S., Randerson, J.T., Field, C.B., Matson, P.A., Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Klooster, S.A., 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochem. Cycles* 7, 811–841.

- 
- Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Todling, R., Bacmeister, J., Takacs, L., Liu, H.C., Gu, W., Sienkiewicz, M., Koster, R.D., Gelaro, R., Stajner, I., Nielsen, J.E., 2008. The GEOS-5 data assimilation system – Documentation of versions 5.0.1, 5.1.0. Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, Ed Suarez, M. J., Washington, D. C.
- Romano, N., Palladino, M., Chirico, G.B., 2011. Parameterization of a bucket model for soil-vegetation-atmosphere modeling under seasonal climatic regimes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 3877–3893. (doi:10.5194/hess-15-3877-2011)
- Roujean, J., Bréon, F., 1995. Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sens. Environ.* 51, 375–384.
- Rouse, J.W., Hasas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type II Report, Greenbelt, Md.
- Running, S.W., Hunt, E.R.J., 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe* (ed.: Ehleringer, J. R., Field, C.B.). San Diego, Academic Press, 141-158.
- Running, S.W., 2012. A Measurable Planetary Boundary for the Biosphere. *Science* 337, 1458–1460. (doi:10.1126/science.1227620)
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H., 2004. A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience* 54, 547. (doi:10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2)
- Running, S.W., Zhao, M., 2015. User's Guide: Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. Version 3.0.
- Saarela, S., Grafström, A., Ståhl, G., Kangas, A., Holopainen, M., Tuominen, S., Nordkvist, K., Hyypä, J., 2015. Model-assisted estimation of growing stock volume using different combinations of LiDAR and Landsat data as auxiliary information. *Remote Sens. Environ.* 158, 431–440. (doi:10.1016/j.rse.2014.11.020)
- Saarela, S., Schnell, S., Tuominen, S., Balázs, A., Hyypä, J., Grafström, A., Ståhl, G., 2016. Effects of positional errors in model-assisted and model-based estimation of growing stock volume. *Remote Sens. Environ.* 172, 101–108. (doi:10.1016/j.rse.2015.11.002)
- Salby, M.L., 2012. *Physics of the Atmosphere and Climate*, Cambridge University Press, 666 pp.
- Salomonson, V. V., Barnes, W.L., Maymon, P.W., Montgomery, H.E., Ostrow, H., 1989. MODIS: Advanced Facility Instrument for Studies of the Earth as a System. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 27, 145–153. (doi:10.1109/36.20292)
- Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Martínez, B., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Gilabert, M.A., 2014. Impact of water stress on GPP estimation from remote sensing data in Mediterranean ecosystems, in: Proc. IV Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. pp. 338–343, Torrent, Spain.

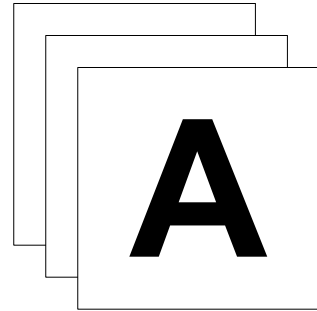
- 
- Schaaf, C.B., Gao, F., Strahler, A.H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., Strugnell, N.C., Zhang, X., Jin, Y., Muller, J.-P., Lewis, P., Barnsley, M., Hobson, P., Disney, M., Roberts, G., Dunderdale, M., 2002. Global albedo, BRDF and nadir BRDF-adjusted reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ.* 83, 135–148.
- Schenk, H.J., Jackson, R.B., 2005. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma* 126, 129–140. (doi:10.1016/j.geoderma.2004.11.018)
- Schenk, H.J., Jackson, R.B., 2002. Rooting depths, lateral root spreads and belowground aboveground allometries of plants in water limited ecosystems. *J. Ecol.* 90, 480–494. (doi:10.1046/j.1365-2745.2002.00682.x)
- Schmidt, G., Jenkerson, C.B., Masek, J., Vermote, E., Gao, F., 2013. Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system (LEDAPS) algorithm description, Open-File Report. Reston, VA.
- Schubert, P., Eklundh, L., Lund, M., Nilsson, M., 2010. Estimating northern peatland CO<sub>2</sub> exchange from MODIS time series data. *Remote Sens. Environ.* 114, 1178–1189. (doi:10.1016/j.rse.2010.01.005)
- Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Nilsson, S., Bouloui, Y., 2007. Semi-empirical models for assessing biological productivity of Northern Eurasian forests. *Ecol. Modell.* 204, 163–179. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.12.040)
- Sims, D.A., Rahman, A.F., Cordova, V.D., El-Masri, B.Z., Baldocchi, D.D., Flanagan, L.B., Goldstein, A.H., Hollinger, D.Y., Misson, L., Monson, R.K., Oechel, W.C., Schmid, H.P., Wofsy, S.C., Xu, L., 2006. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 111, 1–16. (doi:10.1029/2006JG000162)
- Somogyi, Z., Teobaldelli, M., Federici, S., Matteucci, G., Pagliari, V., Grassi, G., Seufert, G., 2008. Allometric biomass and carbon factors database. *IForest* 1, 107–113. (doi:10.3832/ifor0463-0010107)
- Squire, G.R., Marshall, B., Ong, C.K., 1986. Development and growth of pearl millet (*Pennisetum typhoides*) in response to water supply and demand. *Exp. Agric.* 22, 289–299.
- Stisen, S., Sandholt, I., Norgaard, A., Fensholt, R., Eklundh, L., 2007. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sens. Environ.* 110, 262–274. (doi:10.1016/j.rse.2007.02.025)
- Stockle, C.O., Kiniry, J.R., 1990. Variability in crop radiation-use efficiency associated with vapor-pressure deficit. *F. Crop. Res.* 25, 171–181. (doi:10.1016/0378-4290(90)90001-R)
- Tamm, T., Remm, K., 2009. Estimating the parameters of forest inventory using machine learning and the reduction of remote sensing features. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 11, 290–297. (doi:10.1016/j.jag.2009.03.006)
- Thornton, P.E., Hasenauers, H., White, M.A., 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. *Agric. For. Meteorol.* 104, 255–271.

- 
- Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O., Katila, M., 2008. Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sens. Environ.* 112, 1982–1999. (doi:10.1016/j.rse.2007.03.032)
- Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Running, S.W., Zhao, M., Costa, M.H., Kirschbaum, A.A., Ham, J.M., Saleska, S.R., Ahl, D.E., 2006. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sens. Environ.* 102, 282–292. (doi:10.1016/j.rse.2006.02.017)
- UNFCCC, 2010. Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009, Addendum, Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its fifteenth session, Unfccc. (doi:10.1038/news.2009.1156)
- United Nations, 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>)
- Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, a J., Schulze, E.D., Rebmann, C., Moors, E.J., Granier, a, Gross, P., Jensen, N.O., Pilegaard, K., Lindroth, a, Grelle, a, Bernhofer, C., Grünwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, a S., Vesala, T., Rannik, U., Berbigier, P., Loustau, D., Gudmundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, a, Morgenstern, K., Clement, R., 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404, 861–865. (doi:10.1038/35009084)
- Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., Connor, S.J., 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. *Remote Sens. Environ.* 114, 449–465. (doi:10.1016/j.rse.2009.10.002)
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1949. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil Sci.* 68, 75–94.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H., 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.* 32, 181–194. (doi:10.1097/00010694-193109000-00003)
- Vermote, E., Wolfe, R., 2015. MODOCGA MODIS/Terra Ocean Reflectance Daily L2G-Lite Global 1km SIN Grid V006. (doi: 10.5067/MODIS/MODOCGA.006)
- Veroustraete, F., 1994. On the use of a simple deciduous forest model for the interpretation of climate change effects at the level of carbon dynamics. *Ecol. Modell.* 75-76, 221–237. (doi:10.1016/0304-3800(94)90021-3)
- Veroustraete, F., Sabbe, H., Eerens, H., 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sens. Environ.* 83, 376–399. (doi: 10.1016/S0034-4257(02)00043-3)
- Verstraeten, W.W., Veroustraete, F., Feyen, J., 2006. On temperature and water limitation of net ecosystem productivity: Implementation in the C-Fix model. *Ecol. Modell.* 199, 4–22. (doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.06.008)
- Vicente-Serrano, S.M., Pérez-Cabello, F., Lasanta, T., 2008. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. *Remote Sens. Environ.* 112, 3916–3934. (doi:10.1016/j.rse.2008.06.011)
- Viña, A., Gitelson, A.A., 2005. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32, 1–4. (doi:10.1029/2005GL023647)



- 
- Wagle, P., Xiao, X., Torn, M.S., Cook, D.R., Matamala, R., Fischer, M.L., Jin, C., Dong, J., Biradar, C., 2014. Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought. *Remote Sens. Environ.* 152, 1–14. (doi:10.1016/j.rse.2014.05.010)
- Wang, S., Ibrom, A., Bauer-Gottwein, P., Garcia, M., 2018. Incorporating diffuse radiation into a light use efficiency and evapotranspiration model: An 11-year study in a high latitude deciduous forest. *Agric. For. Meteorol.* 248, 479–493. (doi:10.1016/j.agrformet.2017.10.023)
- Waring, H.R., Running, S.W., 2007. *Forest Ecosystems*, 3rd ed. Academic Press, San Diego.
- White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., Nemani, R.R., 2000. Parameterization and Sensitivity Analysis of the BIOME–BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net Primary Production Controls. *Earth Interact.* 4, 1–85. (doi:10.1175/1087-3562(2000)004<0003:PASAOT>2.0.CO;2)
- Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1988. Enzymatic control of photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation in C<sub>3</sub> plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 39, 533–594.
- Wu, C., Niu, Z., Gao, S., 2010. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. *J. Geophys. Res. Atmos.* 115, 1–11. (doi:10.1029/2009JD013023)
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E.A., Zhang, Q., Moore, B., 2004a. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sens. Environ.* 89, 519–534. (doi:10.1016/j.rse.2003.11.008)
- Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., Moore III, B., Ojima, D., 2004b. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sens. Environ.* 91, 256–270. (doi:10.1016/j.rse.2004.03.010)
- Yang, Y., Donohue, R.J., McVicar, T.R., 2016. Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. *Water Resour. Res.* 52, 8260–8276. (doi:10.1002/2016WR019392)
- Yuan, W., Liu, S., Zhou, G., Zhou, G., Tieszen, L.L., Baldocchi, D., Bernhofer, C., Gholz, H., Goldstein, A.H., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., Hu, Y., Law, B.E., Stoy, P.C., Vesala, T., Wofsy, S.C., 2007. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agric. For. Meteorol.* 143, 189–207. (doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.001)
- Zeng, X., 2001. Global Vegetation Root Distribution for Land Modeling. *J. Hydrometeorol.* 2, 525–530. (doi:10.1175/1525-7541(2001)002<0525:GVRDFL>2.0.CO;2)
- Zheng, S., Cao, C., Dang, Y., Xiang, H., Zhao, J., Zhang, Y., Wang, X., Guo, H., 2014. Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images. *Int. J. Remote Sens.* 35, 29–43. (doi:10.1080/01431161.2013.860567)





# Elecció i tractament de les dades d'humitat del sòl

## A.1 Productes avaluats

Es van considerar tres productes EO d'SM generats al BEC: SMOS L3 *daily global SM v.1*, SMOS L4 v.2 i SMOS L4 v.3. D'ací endavant s'anomenen, respectivament, L3SM, L4SMv2 i L4SMv3 i, diferenciant entre les òrbites ascendent (A) i descendent (D) del satèl·lit, L3SMA, L3SMD, L4SMv2A, L4SMv2D, L4SMv3A i L4SMv3D. El producte L3SM s'obté a partir del producte SMOS L2 SMUDP2 v5.51 de la *European Space Agency*. Les dades del producte original es filtren segons la seua qualitat i després se'ls aplica una mitjana ponderada a nivell espacial de manera que el producte final queda projectat sobre una malla regular amb píxels de 25 km<sup>2</sup> tipus EASE-ML (González-Zamora et al., 2015). Els productes L4 es generen mitjançant un algorisme de reducció d'escala que combina dades L1 i L2 d'SMOS amb l'NDVI i la temperatura de la superfície terrestre (*land surface temperature*, LST) de MODIS per a obtenir una resolució espacial d'1 km×1 km (Piles et

al., 2014). El producte L4SMv2 ha sigut satisfactòriament validat en diferents estudis (Piles et al., 2011; Sánchez-Ruiz et al., 2014b; Piles et al., 2014) i utilitzat en diverses aplicacions com l'estudi del deteriorament dels boscos (Chaparro et al., 2014), la prevenció d'incendis forestals (Chaparro et al., 2015) o l'estimació de la GPP (Sánchez-Ruiz et al., 2014a). El producte L4SMv3, desenvolupat recentment, inclou mesures auxiliars d'LST preses *in situ* per a quan les de MODIS pateixen contaminació per núvols, de manera que augmenta la cobertura temporal del producte L4SMv2.

La taula A.1 recull la cobertura temporal dels productes normalitzada a la unitat per al període 2010-2012 en els llocs de validació ES-CPa i ES-LMa, ja que no hi ha dades SMOS disponibles abans de l'any 2010 i les dades dels llocs ES-ES1 i ES-VDA només estan disponibles fins als anys 2006 i 2008, respectivament.

**Taula A.1.** Cobertura temporal normalitzada a la unitat dels productes avaluats en els llocs de validació ES-CPa i ES-LMa per al període 2010-2012.

Producte	ES-CPa	ES-LMa
L3SMA	0.54	0.69
L3SMD	0.78	0.79
L4SMv2A	0.25	0.26
L4SMv2D	0.26	0.26
L4SMv3A	0.41	0.43
L4SMv3D	0.43	0.44

## A.2 Validació

Les sèries temporals dels tres productes durant el període 2010-2012 es van extraure per als llocs ES-CPa i ES-LMa. D'acord amb Entekhabi et al. (2010), per a la seua avaluació, es van calcular el coeficient de correlació  $R$ , l'error quadràtic mitjà RMSE, el biaix MBE i l'RMSE corregit per l'MBE (ubRMSE) entre els productes i les mesures *in situ* als llocs de validació. Els resultats es mostren en la taula A.2.

En general els productes L4 presenten millors resultats que els L3, possiblement degut a la inhomogeneïtat de l'àrea que conté els llocs de validació a l'escala de 25 km<sup>2</sup>. El producte L4SMv3D obté les correlacions més altes i els errors més baixos en la majoria dels casos. Per això es va escollir com a estimació de l'SM en aquesta tesi.

**Taula A.2.** Estadístics de la validació dels productes EO d'SM. RMSE, MBE i ubRMSE s'expressen en  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ .

	ES-CPa	ES-LMa	ES-CPa	ES-LMa
	R		RMSE	
L3SMA	0.51	0.84	0.11	0.05
L3SMD	0.53	0.87	0.09	0.06
L4SMv2A	0.67	0.86	0.07	0.04
L4SMv2D	0.74	0.90	0.05	0.05
L4SMv3A	0.75	0.85	0.07	0.05
L4SMv3D	0.78	0.90	0.04	0.04
	MBE		ubRMSE	
L3SMA	-0.09	-0.006	0.06	0.05
L3SMD	-0.06	0.03	0.06	0.05
L4SMv2A	-0.05	-0.012	0.05	0.04
L4SMv2D	-0.015	0.03	0.04	0.04
L4SMv3A	-0.05	-0.010	0.05	0.05
L4SMv3D	-0.009	0.02	0.04	0.04

Nota: totes les correlacions presenten un nivell de significació del 95 %.

### A.3 Filtratge

Es van aplicar tres mètodes de filtratge al producte L4SMv3D per tal d'obtenir sèries temporals contínues: (i) mitjana mòbil simple, (ii) Savitzky-Golay i (iii) LOESS. La mitjana mòbil simple és un filtre *lowpass* els coeficients del qual depenen de la finestra temporal utilitzada. El filtre Savitzky-Golay és una mitjana mòbil generalitzada els coeficients de la qual es determinen mitjançant una regressió lineal per mínims quadrats no ponderada i un model polinòmic (de primer grau en aquest cas). El filtre LOESS és una regressió que utilitza mínims quadrats ponderats i un model polinòmic de segon grau. Es van provar finestres temporals entre 1 i 91 dies (només nombres senars), encara que en les figures només es mostren els resultats entre 1 i 21 dies.

Les sèries filtrades del producte L4SMv3D es van validar amb les mesures *in situ* dels llocs de validació de la mateixa manera que a la secció anterior. Les figures A.1 i A.2 mostren els estadístics  $R$  i ubRMSE en funció de la finestra temporal utilitzada per a ES-CPa i ES-LMa, respectivament.

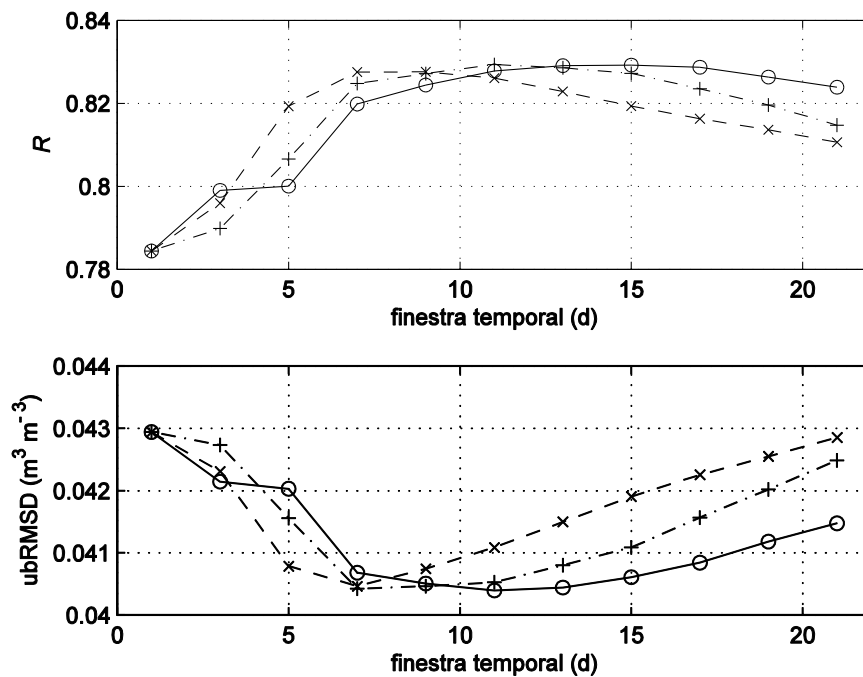


Figura A.1. Coeficient de correlació (dalt) i error quadràtic mitjà corregit pel biaix (baix) entre les sèries filtrades del producte L4SMv3D i les mesures *in situ* en funció de la finestra temporal utilitzada en ES-CPa. Mitjana mòbil simple amb línia discontinúta i ×, Savitzky-Golay amb línia-punt i +, LOESS amb línia contínua i o.

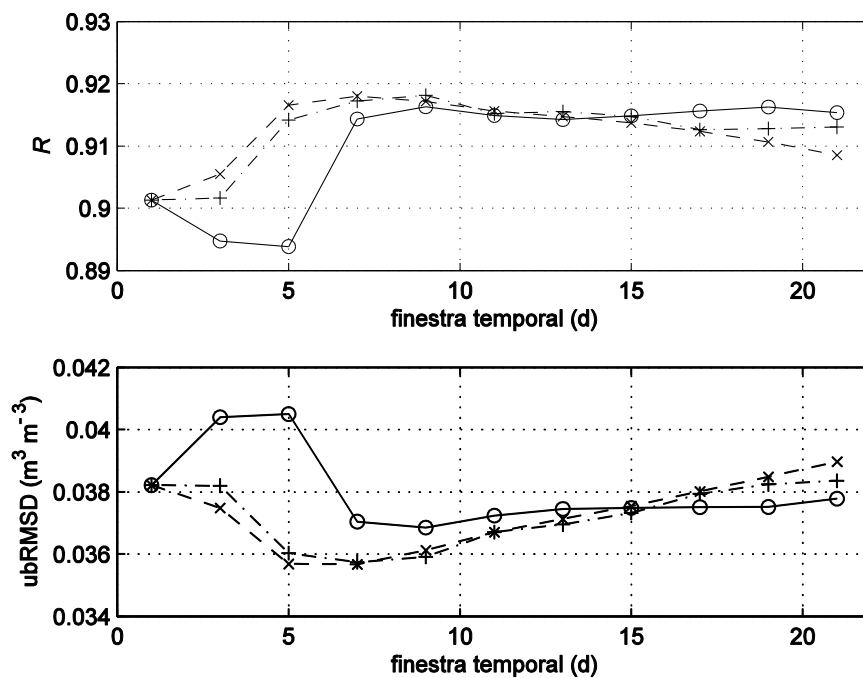


Figura A.2. Coeficient de correlació (dalt) i error quadràtic mitjà corregit pel biaix (baix) entre les sèries filtrades del producte L4SMv3D i les mesures *in situ* en funció de la finestra temporal utilitzada en ES-LMa. Mitjana mòbil simple amb línia discontinúta i ×, Savitzky-Golay amb línia-punt i +, LOESS amb línia contínua i o.

Els tres filtres presenten resultats similars, però només el LOESS proporciona cobertura temporal completa i valors dins el rang de validesa d'SMOS (entre  $0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  i  $0.8 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Per això s'escull el LOESS front als altres dos. En ES-CPa, els millors resultats s'obtenen amb una finestra temporal d'entre 11 i 13 dies, mentre que en ES-LMa s'obtenen amb una de 9 dies. En ambdós casos els resultats són fins i tot millors que el producte L4SMv3 sense filtrar (en cada figura, el primer punt començant per l'esquerra). Per tant, s'escull el producte L4SMv3D filtrat amb un LOESS utilitzant una finestra temporal d'11 dies com a estimació de l'SM en aquesta tesi.

En la figura A.3 es mostren les sèries temporals de les mesures *in situ*, el producte L4SMv3D i el producte L4SMv3D filtrat amb un LOESS utilitzant una finestra temporal d'11 dies en ES-CPa i ES-LMa. Es pot apreciar com, en general, el producte L4SMv3D filtrat és capaç de reproduir la dinàmica de l'SM, encara que subestima i sobreestima lleugerament els majors i menors valors, respectivament.

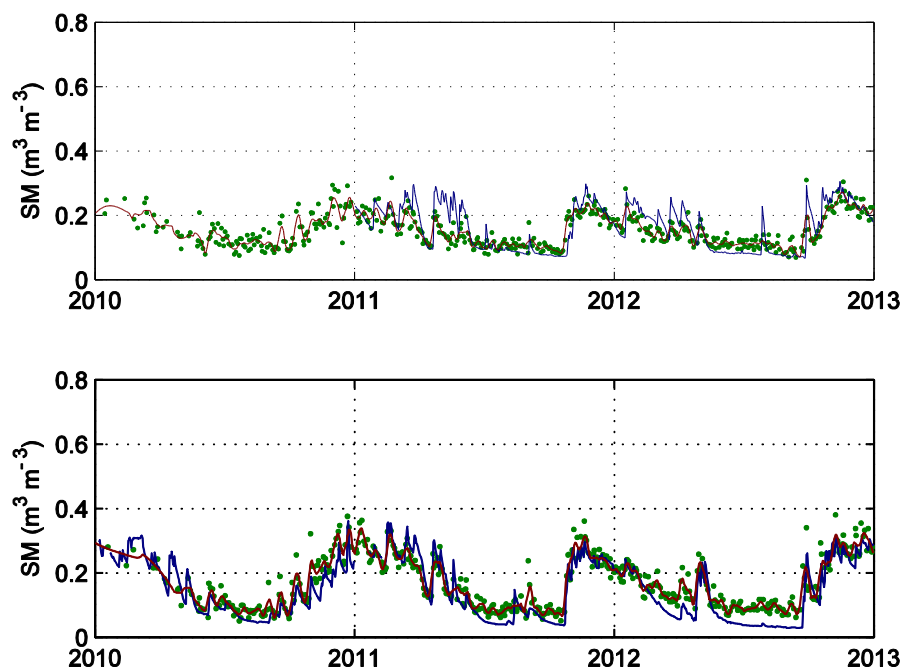
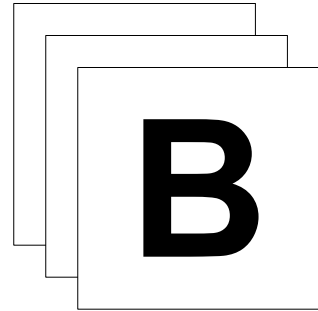


Figura A.3. Sèries temporals d'SM mesurada *in situ* (línia blava), producte L4SMv3 (punts verds) i producte L4SMv3 filtrat amb un LOESS utilitzant una finestra temporal d'11 dies (línia roja) en ES-CPa (dalt) i ES-LMa (baix).







# Estadístics per a l'avaluació de les estimacions

Per a quantificar els errors de les estimacions en els diversos processos de validació s'han utilitzat els estadístics que s'enumeren a continuació.

Aclariment sobre la notació:

- ✓  $y'$  és el valor estimat pel procediment que s'està validant;
- ✓  $y$  és el valor de referència (mesurat o estimat per un altre procediment) de la variable a estimar;
- ✓  $n$  és el nombre de mesures/estimacions.

**Biaix mitjà** (*mean bias error*, MBE)

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y'_k - y_k). \quad (\text{B.1})$$

L'MBE indica si existeix un biaix entre les estimacions del model i els valors de referència.

**Error absolut mitjà** (*mean absolute error*, MAE):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y'_k - y_k|. \quad (\text{B.2})$$

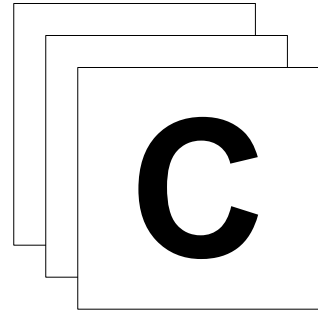
**Arrel de l'error quadràtic mitjà** (*root mean square error*, RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y'_k - y_k)^2}, \quad (\text{B.3})$$

L'RMSE es més sensible a errors aleatoris grans. En absència d'aquests, l'MAE resulta adequat per quantificar l'error.

**Coefficient de determinació** ( $R^2$ , és a dir, és el quadrat del coeficient de correlació de Pearson,  $R$ ). Dóna la proporció de variància de la variable  $y$  explicada per  $y'$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y'_k - y_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y'_k - \bar{y})^2}. \quad (\text{B.4})$$



# Publicacions en revistes indexades en el SCI

S'adjunten a continuació les tres publicacions en revistes del *Science Citation Index* (SCI) que recullen els resultats dels capítols 4-6:

- P1. Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., Gilabert, M.A., 2017. Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data, *International Journal of Digital Earth*, 10:6, 623–638, DOI: 10.1080/17538947.2016.1247301
- P2. Gilabert, M.A., Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., 2017. Annual gross primary production from vegetation indices: A theoretically sound approach, *Remote Sensing*, 9, 193, DOI: 10.3390/rs9030193

- P3. Sánchez-Ruiz, S., Chiesi, M., Fibbi, L., Carrara, A., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Optimized application of Biome-BGC for modeling the daily GPP of natural vegetation over Peninsular Spain, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 531–546, DOI: 10.1002/2017JG004360

No s'inclou el manuscrit amb els resultats del capítol 7, que es troba en elaboració per a ser enviat en breu:

- P4. Sánchez-Ruiz, S., Moreno, A., Izquierdo-Verdiguier, E. Chiesi, M., Maselli, F., Gilabert, M.A., 2018. Forest growing stock volume from Landsat images using Google Earth Engine (en preparació).



## Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data

Sergio Sanchez-Ruiz <sup>ib a</sup>, Alvaro Moreno <sup>ib b</sup>, Maria Piles <sup>ib c</sup>, Fabio Maselli <sup>ib d</sup>,  
 Arnaud Carrara <sup>ib e</sup>, Steven Running <sup>ib b</sup> and Maria Amparo Gilabert <sup>ib a</sup>

<sup>a</sup>Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, Burjassot, Spain; <sup>b</sup>Numerical Terradynamic Simulation Group, University of Montana, Missoula, MT, USA; <sup>c</sup>Barcelona Expert Center, Institut de Ciències del Mar, ICM-CSIC, Barcelona, Spain; <sup>d</sup>BIMET-CNR, Sesto Fiorentino, Italy; <sup>e</sup>Fundación CEAM, Paterna, Spain

### ABSTRACT

The capacity of six water stress factors ( $\epsilon'_i$ ) to track daily light use efficiency ( $\epsilon$ ) of water-limited ecosystems was evaluated. These factors are computed with remote sensing operational products and a limited amount of ground data:  $\epsilon'_1$  uses ground precipitation and air temperature, and satellite incoming global solar radiation;  $\epsilon'_2$  uses ground air temperature, and satellite actual evapotranspiration and incoming global solar radiation;  $\epsilon'_3$  uses satellite actual and potential evapotranspiration;  $\epsilon'_4$  uses satellite soil moisture;  $\epsilon'_5$  uses satellite-derived photochemical reflectance index; and  $\epsilon'_6$  uses ground vapor pressure deficit. These factors were implemented in a production efficiency model based on Monteith's approach in order to assess their performance for modeling gross primary production (GPP). Estimated GPP was compared to reference GPP from eddy covariance (EC) measurements ( $GPP_{EC}$ ) in three sites placed in the Iberian Peninsula (two open shrublands and one savanna).  $\epsilon'_i$  were correlated to  $\epsilon$ , which was calculated by dividing  $GPP_{EC}$  by ground measured photosynthetically active radiation (PAR) and satellite-derived fraction of absorbed PAR. Best results were achieved by  $\epsilon'_1$ ,  $\epsilon'_2$ ,  $\epsilon'_3$  and  $\epsilon'_4$  explaining around 40% and 50% of  $\epsilon$  variance in open shrublands and savanna, respectively. In terms of GPP,  $R^2 \approx 0.70$  were obtained in these cases.

### ARTICLE HISTORY

Received 5 May 2016  
 Accepted 25 September 2016

### KEYWORDS

Light use efficiency; water stress; GPP; Monteith; Mediterranean ecosystems

## 1. Introduction

Carbon exchange fluxes between biosphere and atmosphere play a critical role in the study of climate variability (IPCC 2007; Waring and Running 2007). Remote sensing appears as a convenient tool for monitoring these fluxes since it offers the possibility of estimating them from local to global scale and at different temporal resolutions. In this context, gross primary production (GPP), that is, the amount of carbon dioxide that vegetation uptakes from atmosphere when performing photosynthesis, can be calculated through production efficiency models (PEMs) using Monteith's approach (Monteith 1972). This approach assumes GPP as the product of absorbed photosynthetically active radiation by vegetation (APAR) and light use efficiency ( $\epsilon$ ). Light use efficiency (also known as efficiency conversion) takes into account the efficiency of the photosynthetic process as well as the unit conversion (from energy units to mass units). PEMs usually compute APAR as the product of PAR

**CONTACT** Sergio Sanchez-Ruiz [sergio.sanchez@uv.es](mailto:sergio.sanchez@uv.es) Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, Doctor Moliner 50, 46100 Burjassot, Spain

Supplemental data for this article can be accessed at [doi:10.1080/17538947.2016.1247301](https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1247301)

© 2016 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

624  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

(incoming solar radiation between 400 and 700 nm) and  $f_{\text{APAR}}$  (fraction of absorbed PAR), which is often estimated through a linear relationship with a vegetation spectral index (Ma et al. 2014; Wagler et al. 2014; Xiao et al. 2004b) or through the use of the index itself (Xiao et al. 2004a). PAR can be retrieved from meteorological stations or remote sensing data (Moreno et al. 2013).

$\epsilon$  is the most controversial input in PEMs (Garbulsky et al. 2010), and its relationship with air temperature, water availability and solar radiation conditions has been reported in the literature (Coops et al. 2010; Garbulsky et al. 2010). For operational applications,  $\epsilon$  can be expressed as the product of an  $\epsilon_{\text{max}}$ , which is a biome-specific physiological parameter describing photosynthetic activity under optimal conditions (Garbulsky et al. 2010), and a series of dimensionless factors that account for the reduction in efficiency due to different types of stress and range between 0 (total inhibition) and 1 (no inhibition). The most important stresses, depending on local eco-climatic conditions, are those due to thermal and water limitations (Garbulsky et al. 2010). It has been demonstrated that, in Mediterranean environments, water stress affects significantly  $\epsilon$ , explaining most of its inter-annual variability (Garbulsky et al. 2008; Moreno et al. 2012), whereas air temperature contributes only marginally (Gilabert et al. 2015).

Different methods have been proposed in the last years to account for water stress within PEMs. Precipitation and potential evapotranspiration (PET) are the inputs of the soil moisture (SM) submodel in the CASA model (Potter et al. 1993, 2003) for the estimation of monthly global net ecosystem exchange. A similar approach was used by Maselli et al. (2009) in order to account for the short-term effect of summer water stress in Mediterranean forests. Vapor pressure deficit (VPD, Anderson 1936) and SM are the inputs of two of the  $\epsilon$  reducing factors in GLO-PEM (Cao et al. 2004). Land surface water index (a normalized difference between reflectance in the near infrared and in the shortwave infrared regions) was included in the vegetation photosynthesis model (Xiao et al. 2004a, 2004b) and in the photosynthetic capacity model (Gao et al. 2014). VPD has been continuously used in MOD17 algorithm (Heinsch et al. 2006; Running and Zhao 2015) for the estimation of global gross and net primary productivity since March 2000. SM and evaporative fraction were included in C-Fix by Verstraeten, Veroustraete, and Feyen (2006) to improve the net ecosystem productivity estimation in different water-limited scenarios. Evaporative fraction was used as the downward-regulation factor accounting for water stress in EC-LUE for the estimation of daily gross primary productivity (Yuan et al. 2007).

The primary goal of the present work is to evaluate six alternatives to account for the short-term water stress when implemented in a PEM by using remote sensing imagery and the least possible amount of ancillary data, and to choose one of them for its regular use in an operative methodology for the estimation of daily GPP in Mediterranean ecosystems. The first four alternatives rely on different approaches of a water balance, the fifth one uses the photochemical reflectance index (PRI, Gamon, Peñuelas, and Field 1992), and the sixth one uses VPD.

The assessment of the six water stress factors was carried out by comparison between estimated  $\epsilon$  ( $\epsilon'_i$  with  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , and 6) and reference  $\epsilon$  derived from eddy covariance (EC) GPP ( $\text{GPP}_{\text{EC}}$ ) and APAR calculated multiplying *in situ* measured PAR by satellite-derived  $f_{\text{APAR}}$ . An additional analysis was performed by comparing the different GPP estimates ( $\text{GPP}'_i$  with  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , and 6) to  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  observations. In all cases, daily values throughout several years were used depending on the length of the EC data series. The study provides indications to choose one of the six factors for the operational estimation of daily GPP in Mediterranean environments.

## 2. Data and sites description

### 2.1. Flux data

Daily Net Ecosystem Exchange data collected from three EC towers placed in the Iberian Peninsula belonging to the European Fluxes Database Cluster (<http://www.europe-fluxdata.eu>) were used to

estimate daily GPP as explained in Reichstein et al. (2005). The main characteristics of the study sites are provided in Table 1.

The ES-CPa site is a Mediterranean shrubland located on a plateau at 810 m in the province of Valencia. Climate is typically Mediterranean subarid with warm and dry summers. Vegetation corresponds to a typical Mediterranean shrubland dominated by shrub species, such as *Rosmarinus officinalis* L., *Ulex parviflorus* Pourret, *Quercus coccifera* L., *Juniperus oxycedrus*, and *Thymus* sp. mixed with annual herbaceous species dominated by *Brachypodium retusum*. Shrub cover is about 50–60% and total vegetation cover (including herbaceous species) is about 75%.

The ES-LJu site is a Mediterranean shrubland located on a subalpine plateau at an altitude of 1590 m in the Sierra de Gádor in the province of Almería. Climate is Mediterranean subhumid. The total vegetation cover is about 50%. The actual vegetation is the result of natural regeneration after fire and it is dominated by two perennial species: *Festuca scariosa* and *Genista pumila*, with cover fractions of 19% and 12%, respectively.

The ES-LMa site is a holm oak savanna located at approximately 260 m in the province of Cáceres. Climate is Mediterranean with warm and dry summers, but with relatively cold winters due to its rather continental location. The long-term historical management at the site has resulted in a holm oak (*Quercus ilex*) savanna with a tree density of ca. 20–25 trees per hectare, with a mean height of 8 m. The understory vegetation is dominated by a high biodiversity of annual herbaceous species, with typical senescence by the end of May.

## 2.2. Meteorological data

Daily incoming global solar radiation and mean air temperature time series measured at the sites where EC towers are placed were used.

Daily maximum and minimum air temperatures and precipitation time series from *in situ* measurements provided by AEMet taken in 400 meteorological stations distributed around the Iberian Peninsula were interpolated by ordinary kriging to build 1-km spatial resolution images during the period 2005–2012.

Daytime daily VPD was calculated as the difference between daytime saturated vapor pressure and daily vapor pressure (Running and Zhao 2015). Hourly average air temperature and specific humidity and vapor pressure data provided by Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) were aggregated to daily values for the calculation of daytime saturated vapor pressure and daily vapor pressure, respectively. As daily GMAO data presents a coarser spatial resolution (0.5 latitude degrees by 0.67 longitude degrees) than AEMet-derived meteorological maps (1 km), the same spatial non-linear interpolation approach of MOD17 product to match all meteorological inputs at the same projection and spatial resolution was followed.

## 2.3. Satellite data

Table 2 outlines the satellite products used in this study. MODIS products MCD43A1, MCD43A2 (Schaaf et al. 2002), MOD16A2 (Mu, Zhao, and Running 2013), and MODIS/Terra Ocean Reflectance Daily L2G-Lite Global 1 km SIN Grid V006 (MOD0CGA, Vermote and Wolfe 2015) for the period 2005–2013 were retrieved from the online Reverb, courtesy of the NASA EOSDIS

**Table 1.** Descriptive information of the study sites.

Site	Lat (°)	Lon (°)	<i>h</i> (m)	<i>T</i> (°C)	PRE (mm)	PET (mm)	Vegetation type	Data period
ES-CPa	39.2242	−0.9031	810	13	470	1448	Open shrubland	2009–2011
ES-LJu	36.9266	−2.7521	1590	12	475	1507	Open shrubland	2005, 2008, 2011
ES-LMa	39.9415	−5.7734	260	17	600	1358	Savanna	2005–2013

Note: *h* is the elevation from the sea level, *T* is the average mean annual air temperature, PRE is the average annual precipitation, and PET is the average annual potential evapotranspiration.

626  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.**Table 2.** Satellite products used in the study.

	Product	Variables	Use
MODIS	MCD43A1	BRDF parameters $k_0$ , $k_1$ , and $k_2$ (8-day composites at 500-m spatial resolution).	$f_{\text{APAR}}$ calculation
	MCD43A2	MCD43A1 quality flags.	$f_{\text{APAR}}$ calculation
	MOD16A2	AET and PET (8-day composites at 1-km spatial resolution).	$\epsilon'_3$ calculation
	MOD0CGA	Daily reflectance data from AQUA bands 11 and 12 at 1-km spatial resolution and their quality flag band.	$\epsilon'_5$ calculation
SEVIRI	LSA-07	30-minute downward surface shortwave flux at 3-km spatial resolution (MDSSF).	PAR and $\epsilon'_1$ and $\epsilon'_2$ calculations
	LSA-09	Daily integrated LSA-07 (DIDSSF).	PAR and $\epsilon'_1$ and $\epsilon'_2$ calculations
	LSA-16	30-minute AET at 3-km spatial resolution (MET).	$\epsilon'_2$ calculation
SMOS-derived	LSA-17	Daily integrated LSA-16 (DMET).	$\epsilon'_2$ calculation
	L4SMv3D	Daily SM in the first top 5 cm at 1-km spatial resolution from the synergy between SMOS L2 SM descending orbits and MODIS-derived LST and NDVI.	$\epsilon'_4$ calculation
	Land cover	Hybrid land-cover map for Spain obtained from CGL2000, CORINE, IGBP, and GlobCover at 1-km spatial resolution.	Vegetation type assignment for $\epsilon'_6$ calculation and $\epsilon_{\text{max}}$ assignment

Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota, [reverb.echo.nasa.gov](http://reverb.echo.nasa.gov). MCD43A1 is an 8-day composite which contains the BRDF parameters  $k_0$ ,  $k_1$ , and  $k_2$  at 500-m spatial resolution. MCD43A2 contains the quality flags for MCD43A1. MOD16A2 is an 8-day composite which contains actual evapotranspiration (AET), PET, actual latent heat, potential latent heat and a quality control band at 1-km spatial resolution. AET, PET, and quality control were used. MOD0CGA is a daily product that contains 1-km reflectance data from Aqua MODIS bands 8–16, which are bands mostly used to produce ocean products, but the tiles contain land reflectance in this case. Bands 11, 12, and quality control were used.

SEVIRI products LSA-07 (down-welling surface shortwave flux estimated every 30 minutes, MDSSF) and LSA-09 (daily integrated down-welling surface shortwave flux, DIDSSF) (Product User Manual Down-welling Surface Shortwave Flux (DSSF) 2011) for the period 2007–2013, and LSA-16 (AET estimated every 30 minutes, MET) and LSA-17 (daily integrated AET, DMET) (Product User Manual Evapotranspiration (ET) 2015) for the period 2009–2013, were downloaded from the LSA SAF Server (<http://landsaf.meteo.pt>). These images were reprojected to a 1-km spatial resolution latitude/longitude regular grid (Moreno et al. 2013). DIDSSF and DMET were used when available or calculated by daily integration of MDSSF and MET, respectively, when not available. DIDSSF gaps were filled with global incoming solar radiation images obtained by the application of artificial neural networks to the air temperature and precipitation images mentioned above (Moreno, Gilabert, and Martínez 2011). Both products have been previously validated (Moreno, Gilabert, and Martínez 2011; Moreno et al. 2013) and a relationship between the two sources was found to apply the gap-filling procedure. DIDSSF for years 2005 and 2006 was also obtained this way.

The SMOS L4 daily regional SM product v.3 descending orbits (L4SMv3D) from the Barcelona Expert Center (BEC) were used (Piles et al. 2014). It was found after several validation exercises that, for this study, descending orbits perform systematically better than ascending ones and that a LOESS filter is a better gap-filling option for temporal gap-filling than other tested filters. Detailed information on the choice and treatment of this product can be found in Appendix A (see Supplemental data).

A hybrid land-cover map for Spain obtained by the synergistic combination of four land-cover classifications (CGL2000, CORINE, IGBP, and GlobCover) (Pérez-Hoyos, García-Haro, and San-Miguel-Ayanz 2012) was used.

### 3. Methodology

The description of the six water stress factors employed in this study is summarized in Table 3.  $\epsilon'_1$ ,  $\epsilon'_2$ , and  $\epsilon'_3$  are based on a simple water balance calculated as the ratio between AET and PET, which



**Table 3.** Description of the six water stress factors.

Water stress factor	Description and data source
$\epsilon'_1 = \text{PRE}/\text{PET}_{J-H}$	PRE is the precipitation in $\text{mm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ . PRE images at 1-km spatial resolution were obtained by ordinary kriging to ground data from meteorological stations. $\text{PET}_{J-H}$ is the potential evapotranspiration in $\text{mm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ calculated using the Jensen-Haise empirical relationship (Equation (1)).
$\epsilon'_2 = \text{AET}_{\text{SEVIRI}}/\text{PET}_{J-H}$	$\text{AET}_{\text{SEVIRI}}$ is the actual evapotranspiration in $\text{mm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ obtained from SEVIRI DMET.
$\epsilon'_3 = \text{AET}_{\text{MODIS}}/\text{PET}_{\text{MODIS}}$	$\text{AET}_{\text{MODIS}}$ is the actual evapotranspiration in $\text{mm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ obtained from MOD16A2. $\text{PET}_{\text{MODIS}}$ is the potential evapotranspiration in $\text{mm m}^{-2} \text{day}^{-1}$ obtained from MOD16A2.
$\epsilon'_4 = (\text{SM}-\text{WP})/(\text{FC}-\text{WP})$	SM is the soil moisture in the first top 5 cm in $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{day}^{-1}$ . WP is the wilting point in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . FC is the field capacity in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . The three variables were obtained from L4SMv3.
$\epsilon'_5 = \text{PRI}$	PRI is the photochemical reflectance index (Equation (2)) calculated as the normalized difference between reflectance from MODIS bands 12 (546–556 nm) and 11 (526–536 nm).
$\epsilon'_6 = n-m\text{VPD}$	VPD is vapor pressure deficit in Pa calculated as in the MOD17 algorithm (see Section 2.2). Range of application: $\text{VPD}_{\text{min}} < \text{VPD} < \text{VPD}_{\text{max}}$ with $\text{VPD}_{\text{min}}$ and $\text{VPD}_{\text{max}}$ depending on the vegetation type. They are used to calculate $n$ and $m$ , which are empirical parameters also depending on the vegetation type. If $\text{VPD} < \text{VPD}_{\text{min}}$ , $\epsilon'_6$ is set to 1. If $\text{VPD} > \text{VPD}_{\text{max}}$ , $\epsilon'_6$ is set to 0.

represent, respectively, the real and the ideal moist conditions of vegetation. This rationale is supported by the fact that stomata closure controls both  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$  fluxes in plants (Monson and Baldocchi 2014). Therefore, it can be assumed that a reduction in transpiration rate is associated with a reduction in carbon uptake and, eventually, to a reduction in photosynthesis.  $\epsilon'_1$  uses precipitation as a proxy of AET when it is lower than PET, otherwise  $\epsilon'_1$  is set to 1 (Maselli et al. 2009, 2014). The use of precipitation implies the need of accumulation of both precipitation and PET over past days in order to retrieve information about water availability from past rain events. Both in  $\epsilon'_1$  and  $\epsilon'_2$ , PET was calculated using the empirical relationship proposed by Jensen and Haise (1965):

$$\text{PET} = R_g(0.025T_a + 0.08)/2450, \tag{1}$$

where  $R_g$  is the incoming global solar radiation in  $\text{kJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$  and  $T_a$  is the mean daily air temperature in  $^\circ\text{C}$ . The difference between  $\epsilon'_2$  and  $\epsilon'_3$  resides in the source of their inputs: in  $\epsilon'_3$  both AET and PET are obtained from MOD16A2, whereas DMET is used as AET in  $\epsilon'_2$ .  $\epsilon'_4$  relies on SM since plants need to absorb water from soil and cannot absorb it directly from rain. From the definitions of field capacity (FC, amount of water retained in the soil against gravitation forces once drainage rate has become negligible [Colman 1944; Hunt et al. 2009; Romano, Palladino, and Chirico 2011; Veihmeyer and Hendrickson 1931, 1949]) and wilting point (WP, SM content when soil particles hold water around them so tight that plants cannot extract water from it [Assouline and Or 2014; Hunt et al. 2009; Veihmeyer and Hendrickson 1949]), one can consider that plants start suffering water stress when SM falls below FC and become totally stressed when SM falls below WP. Following this reasoning,  $\epsilon'_4$  was conceived as the difference between SM and WP (SM-WP) normalized by the available water capacity (AWC = FC-WP, amount of water retained in the soil readily available for plants to use it (Kirkham 2005)). This way, when  $\epsilon'_4$  is greater than 1 (no stress), it is set to 1 and, when it is lower than 0 (totally stressed), it is set to 0. In addition, bias problems in GPP when using SM alone as a water stress factor in a PEM (Sánchez-Ruiz et al. 2014) are solved.  $\epsilon'_5$  is the PRI (Gamon, Peñuelas, and Field 1992). PRI uses changes in xanthophyll pigments to track  $\epsilon$  variations. It is a narrow band index calculated as the normalized difference between reflectance in a reference band ( $\rho_{\text{REF}}$ ) that is non sensitive to changes in xanthophyll pigments and reflectance in a band centered at 531 nm ( $\rho_{531}$ ), which is sensitive to changes in xanthophyll pigments:

$$\text{PRI} = (\rho_{\text{REF}} - \rho_{531})/(\rho_{\text{REF}} + \rho_{531}). \tag{2}$$

628  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

MODCOGA bands 12 (546–556 nm) and 11 (526–536 nm) were used as the reference band and the sensitive to xanthophyll pigments band, respectively (Coops et al. 2010; Wu et al. 2010).  $\epsilon'_6$  was calculated using VPD exactly as the VPD\_scalar used in the MOD17 algorithm (Running and Zhao 2015). It is obtained by means of a linear ramp function that varies between 0 and 1 according to threshold values depending on the vegetation type (see Table 3).

PRE and PET in  $\epsilon'_1$  were accumulated over the last 60 days in the cases of ES-CPa and ES-LJu and over the last 45 days in the case of ES-LMa, according to model calibrations in previous studies (Maselli et al. 2009, 2013; Potter et al. 1993; Sánchez-Ruiz et al. 2014). For the calculation of PET in  $\epsilon'_1$  and  $\epsilon'_2$ , DIDSSF was used as  $R_g$  and  $T_a$  was calculated using 1-km spatial resolution maximum and minimum air temperature images, which were obtained by applying ordinary kriging to ground data taken at meteorological stations. Since MOD16A2 is an 8-day composite,  $AET_{MODIS}$  and  $PET_{MODIS}$  were obtained applying a robust local weighted scatterplot smoothing (LOWESS) with a 17-day span to original MOD16A2 AET and PET in order to attain daily values. According to the quality control band, only the good quality land pixels with clear sky conditions were used. Both 8-day composites and daily interpolated time series were validated against data from EC towers and no significant differences were found. Correlations between 8-day MOD16A2 composites and EC estimations accumulated over the same period were 0.67, 0.13, and 0.70 for ES-CPa, ES-LJu, and ES-LMa, respectively, in the case of AET. Correlations between daily EC estimates and daily values obtained by applying the LOWESS filter to MOD16A2 8-day composites were 0.73, 0.12, and 0.69, respectively. In the case of PET, correlations between MOD16A2 8-day composites and EC estimations accumulated over the same period were 0.96, 0.85, and 0.96 for ES-CPa, ES-LJu, and ES-LMa, respectively. And correlations between daily EC estimates and daily values obtained by applying the LOWESS filter to MOD16A2 8-day composites were 0.86, 0.80, and 0.91, respectively. L4SMv3D time series from 2010 to 2013 were used as SM in  $\epsilon'_4$ , being the first time that SMOS data are used to implement a water stress factor in a PEM. WP and FC were estimated as the 5th percentile and as the 95th percentile of the long-term L4SMv3D time series, respectively (Hunt et al. 2009; Martínez-Fernández et al. 2015, 2016). In  $\epsilon'_5$ , only the highest quality cloud free pixels according to the quality flag information were used to calculate PRI. The result was filtered using a robust LOWESS with a 9-day span in order to reduce its noise and fill the temporal gaps produced by the removing of bad quality values. The hybrid land-cover map (Pérez-Hoyos, García-Haro, and San-Miguel-Ayanz 2012) was used to assign the vegetation type to the pixels in VPD images.

The performance of the six water stress factors (denoted as  $\epsilon'_i$  with  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , and 6) is evaluated both in terms of  $\epsilon$  and in terms of GPP.

In the first case, estimated  $\epsilon'$  data were compared to reference  $\epsilon$  obtained as the ratio between  $GPP_{EC}$  and APAR, which was, in turn, calculated as the product of PAR and  $f_{APAR}$ . PAR is the 46% of incoming global solar radiation (Iqbal 1983). Daily incoming global solar radiation time series measured at the EC towers were used for the calculation of PAR.  $f_{APAR}$  was calculated as proposed by Roujean and Breon (1995). This algorithm relies on a linear relationship between  $f_{APAR}$  and the renormalized difference vegetation index (RDVI), which is calculated using near infrared ( $\rho_{NIR}$ ) and red ( $\rho_{RED}$ ) reflectances ( $RDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED})^{1/2}$ ) for an optimal angular geometry in the solar principal plane from BRDF parameters in MCD43A1. Reference  $\epsilon$  time series were filtered using a robust LOWESS with a 9-day span in order to reduce its noise and fill missing data due to the presence of temporal gaps in  $GPP_{EC}$ , PAR, and/or  $f_{APAR}$  time series.

In the second case, daily  $GPP_{EC}$  data were compared to daily GPP data calculated according to the Monteith approach (Monteith 1972) using the inputs formerly described as:

$$GPP'_i = \epsilon_{\max} \epsilon'_i f_{APAR} PAR, \quad (3)$$

where the maximum light use efficiency  $\epsilon_{\max}$  was assigned to each pixel according to the hybrid land-cover map (Pérez-Hoyos, García-Haro, and San-Miguel-Ayanz 2012) and all water stress factors but

$\epsilon'_6$  were rescaled between 0.5 and 1 since long-term water stress is already reflected in  $f_{APAR}$  and they only aim to track short-term water stress (Maselli et al. 2009; Potter et al. 1993). Although  $\epsilon'_6$  also aims to track only short-term water stress in this study, it was not rescaled between 0.5 and 1 in order to keep the MOD17 methodology unaltered.

In summary, after calculating all the variables described in Table 3, the methodology consisted in driving a PEM with the six different water stress factors and assessing their performance by the comparison between estimated or modeled data ( $\epsilon'_i$  and  $GPP'_i$ ) and reference data ( $\epsilon$  and GPP). A correlation analysis was carried out both between  $\epsilon'_i$  and  $\epsilon$  and between  $GPP'_i$  (the GPP estimated using a PEM driven by the water stress factor  $\epsilon'_i$ ) and  $GPP_{EC}$ . Different statistics (Table 4) such as the relative mean biased error (rMBE), the relative mean absolute error (rMAE), and the relative root mean squared error (rRMSE) between estimated and reference GPP were calculated. In order to avoid the use of dates when low temperatures can affect photosynthesis – which can happen especially in ES-CPa and ES-LJu due to their elevation and would be counter-productive for evaluating the effect of water stress – only the dates when daily mean air temperature was greater than 15°C were considered in the correlation analysis and the calculation of statistics. This threshold in daily mean air temperature was chosen taking into account the thresholds in daily minimum air temperature used in the MOD17 algorithm for the application of the TMIN\_scalar in wooded grasslands and open shrublands (Running and Zhao 2015).

#### 4. Results

##### 4.1. Evaluation of light use efficiency

As an example,  $\epsilon'_i$  time series are shown in Figure 1 together with reference  $\epsilon$  data for ES-LMa. It is observed that  $\epsilon'_1$  and  $\epsilon'_6$  saturate to 1 very often and present the highest range of variation, whereas the rest of the alternatives hardly saturate, with  $\epsilon'_3$  and  $\epsilon'_5$  presenting considerably reduced dynamic ranges. Although due to the interpolation from 8-day values  $\epsilon'_3$  appears very smoothed, it tracks very well the inter-annual variation of  $\epsilon$ .  $\epsilon'_2$  and  $\epsilon'_4$  provide a good representation of the  $\epsilon$  inter-annual variation but also rapid temporal fluctuations.

The coefficients of determination ( $R^2$ ) between water stress factors ( $\epsilon'$ ) and reference light use efficiency ( $\epsilon$ ) are presented in Table 5. The water stress factors based on a simple water balance achieved the best results in the three sites, explaining up to the 39% ( $\epsilon'_1$ ), the 42% ( $\epsilon'_4$ ), and the 48% ( $\epsilon'_1$  and  $\epsilon'_2$ ) of the reference  $\epsilon$  variance in ES-CPa, ES-LJu, and ES-LMa, respectively. In the cases of ES-CPa and ES-LJu (open shrublands) only two ( $\epsilon'_1$  and  $\epsilon'_3$ ) and three ( $\epsilon'_1$ ,  $\epsilon'_2$ , and  $\epsilon'_4$ ) water factors explained more than one-fifth of the reference  $\epsilon$  variance, whereas in the case of ES-LMa (savanna) all the water stress factors explained at least one-fifth of this variance. No significant correlations were obtained by  $\epsilon'_5$  in ES-CPa and ES-LJu and by  $\epsilon'_3$  and  $\epsilon'_6$  in ES-LJu.

**Table 4.** Formulation of the statistics used to compare estimated ( $GPP'_i$ ) and reference ( $GPP_{EC}$ ) GPP.

Statistic	Definition
Relative mean biased error	$rMBE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n  GPP'_{ij} - GPP_{ECj}  \right] / \overline{GPP_{EC}}$
Relative mean absolute error	$rMAE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n  GPP'_{ij} - GPP_{ECj}  \right] / \overline{GPP_{EC}}$
Relative root mean squared error	$rRMSE = \sqrt{\left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (GPP'_{ij} - GPP_{ECj})^2 \right] / \overline{GPP_{EC}}}$

Note:  $n$  is the number of data pairs.

630 S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

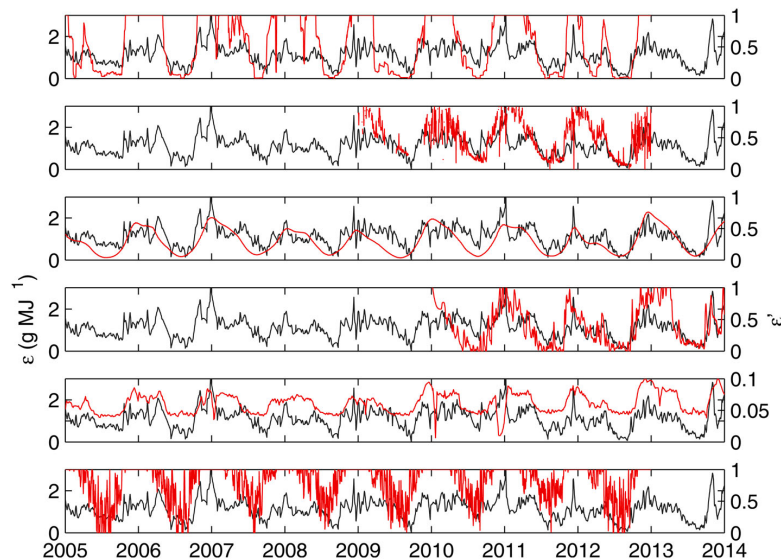


Figure 1. Temporal variation of  $\epsilon$  (black) and  $\epsilon'_i$  (red) in ES-LMa. From top to bottom:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , and 6.

#### 4.2. Evaluation of gross primary production

Figure 2 shows, for ES-LMa, (i) the daily  $GPP_{EC}$  time series, (ii) the daily  $GPP'_0$  time series calculated through Equation (3) with no water stress factor, and (iii) the daily  $GPP'_i$  time series calculated using Equation (3) with the six water stress factors. It can be appreciated how all alternatives reduced the  $GPP'_0$  overestimation of GPP, especially in the spring and summer low production periods (when water stress manifests).  $GPP'_1$  and  $GPP'_6$  still overestimate the maximum production periods in some cases.

Main statistics of the comparison between estimated ( $GPP'_i$ ) and reference ( $GPP_{EC}$ ) GPP data are collected in Table 6. GPP estimates without any water stress factor ( $GPP'_0$ ) were also considered. All alternatives improved coefficients of determination with respect to  $GPP'_0$  except  $GPP'_5$ , which obtained the same  $R^2$  as  $GPP'_0$  in ES-CPa and ES-LJu, and  $GPP'_6$  in ES-LJu that decreased  $R^2$  explaining a 16% less of the  $GPP_{EC}$  variance than  $GPP'_0$ . In the case of ES-CPa,  $GPP'_1$  obtained the highest coefficient of determination ( $R^2 = 0.70$ ), although the improvement with respect to  $GPP'_0$  was small and the six alternatives presented similar results. In the case of ES-LJu,  $GPP'_4$  obtained the highest coefficient of determination ( $R^2 = 0.73$ ) explaining a 30% more of the  $GPP_{EC}$  variance than  $GPP'_0$ . Very similar results were obtained by  $GPP'_2$  ( $R^2 = 0.71$ ).  $GPP'_1$  explained a 7% more of this variance than  $GPP'_0$ , whereas  $GPP'_3$  practically did not increase  $R^2$ . In the case

Table 5. Coefficients of determination ( $R^2$ ) between water stress factors ( $\epsilon'$ ) and reference light use efficiency ( $\epsilon$ ).

	ES-CPa	ES-LJu	ES-LMa
$\epsilon'_1$	<b>0.39</b>	0.39	<b>0.48</b>
$\epsilon'_2$	0.08	0.31	<b>0.48</b>
$\epsilon'_3$	0.24	0.01*	0.40
$\epsilon'_4$	0.12	<b>0.42</b>	0.22
$\epsilon'_5$	0.00*	0.02*	0.35
$\epsilon'_6$	0.12	0.00*	0.20

Note: Correlations were statistically significant at 95% confidence level except when marked with \*. Best results appear in bold.

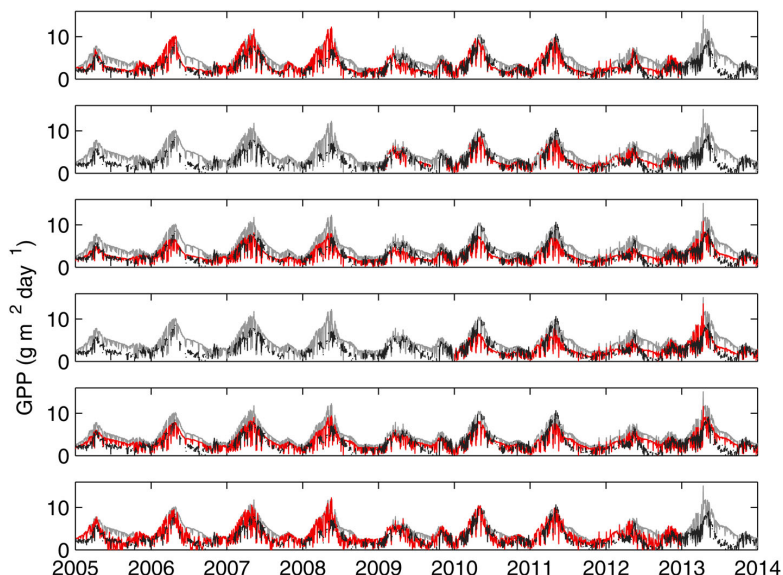


Figure 2. Temporal variation of  $GPP_{EC}$  (black),  $GPP'_0$  (gray), and  $GPP'_i$  (red) in ES-LMa. From top to bottom:  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , and  $6$ .

of ES-LMa,  $GPP'_1$  and  $GPP'_2$  obtained the highest coefficients of determination ( $R^2 = 0.73$  and  $R^2 = 0.78$ , respectively) explaining around a 20% more of the  $GPP_{EC}$  variance than  $GPP'_0$ , whereas  $GPP'_3$ ,  $GPP'_4$  and  $GPP'_6$  only explained between a 7% and an 11% more of this variance than  $GPP'_0$ . When a water stress factor was implemented in the PEM, errors were always reduced or remained the same. The reduction of rMBE was especially strong even changing its sign in some cases.

It must be mentioned that different samples were used in the comparison between estimated and reference light use efficiency and GPP depending on the availability of each data source. Results were also calculated constraining the data subset to the dates when all data sources were available and they were better ( $R^2$  up to 0.46, 0.59, and 0.83 for ES-CPa, ES-LJu, and ES-LMa, respectively, in the case of

Table 6. Statistics of the evaluation of water stress factors by comparing  $GPP'_i$  with  $GPP_{EC}$ .  $GPP_0$  refers to the GPP calculated by means of Equation (3) without  $\epsilon'_i$ .

	ES-CPa	ES-LJu	ES-LMa	ES-CPa	ES-LJu	ES-LMa
	$R^2$			rMBE		
$GPP'_0$	0.62	0.43	0.56	0.3	2	0.6
$GPP'_1$	<b>0.70</b>	0.50	0.73	-0.14	0.7	0.08
$GPP'_2$	0.68	0.71	<b>0.78</b>	-0.3	0.6	0.03
$GPP'_3$	0.65	0.44	0.65	-0.2	0.6	-0.02
$GPP'_4$	0.68	<b>0.73</b>	0.63	-0.3	0.9	<b>-0.011</b>
$GPP'_5$	0.62	0.43	0.57	<b>-0.018</b>	1.3	0.25
$GPP'_6$	0.69	0.27	0.67	0.05	<b>0.3</b>	0.04
	rMAE			rRMSE		
$GPP'_0$	0.4	2	0.7	0.5	2	0.8
$GPP'_1$	<b>0.3</b>	0.8	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	0.9	<b>0.4</b>
$GPP'_2$	0.4	<b>0.7</b>	<b>0.3</b>	0.5	<b>0.8</b>	<b>0.4</b>
$GPP'_3$	0.4	0.8	<b>0.3</b>	0.5	0.9	<b>0.4</b>
$GPP'_4$	0.4	0.9	0.4	0.6	1.0	0.5
$GPP'_5$	<b>0.3</b>	1.3	0.5	<b>0.4</b>	1.4	0.5
$GPP'_6$	<b>0.3</b>	<b>0.7</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>0.8</b>	<b>0.4</b>

Note: Correlations were statistically significant at 95% confidence level. Best results appear in bold.

$\varepsilon$ ; and  $R^2$  up to 0.73, 0.75, and 0.89, respectively, in the case of GPP). However, after filtering for low temperatures, only 51, 38, and 77 dates were available for ES-CPa, ES-LJu, and ES-LMa, respectively. Therefore, those results were considered as non-statistically reliable enough and all available dates in each case were used to obtain the results shown in the present study. The number of considered dates ranged from 90 when evaluating  $GPP'_2$  in ES-LJu to 1692 when evaluating  $\varepsilon'_3$  and  $\varepsilon'_5$  in ES-LMa.

## 5. Discussion

Within PEMs based on Monteith's approach,  $f_{APAR}$  is usually calculated from a vegetation index derived from the reflectances in the red and the near infrared regions of the electromagnetic spectrum (Roujean and Breon 1995), and it is therefore able to explain changes in the vegetation canopy (Gamon et al. 1995).  $f_{APAR}$  provides a link between the energy absorption capacity of the vegetation canopy and its structure and condition. Thus, it is able to account for changes in the vegetation canopy due to water stress. In the context of the present study, these changes would be caused by long periods of water shortage. However, these changes require some days to manifest, a delay exists between the water shortage and the structural changes that finally affect  $f_{APAR}$  so it cannot account for short-term water stress suffered by vegetation. Therefore, the application of Monteith's approach to model vegetation production on a daily basis must implement a water stress factor in arid or semi-arid environments (Maselli et al. 2009).

The current experimental results indicate that the reference  $\varepsilon$  was best explained in ES-LMa (savanna) by all the water stress factors, except by  $\varepsilon'_4$  that explained the most variance of reference  $\varepsilon$  in ES-LJu (dry open shrubland). In ES-LMa, vegetation cover is approximately distributed as 80% grassland and 20% trees (holm oaks). Grassland generally presents a very marked phenology also well explained by  $f_{APAR}$  (Li et al. 2010; Maselli et al. 2013; Nestola et al. 2016). When grassland dries, trees keep doing photosynthesis and water stress factors can track some of their  $\varepsilon$  decrease due to water shortage. The better performance of  $\varepsilon'_4$  in ES-LJu than in the other two sites could be attributed to its lower vegetation fractional cover since SMOS SM estimates present higher errors over vegetated areas (Kerr et al. 2016; Lee et al. 2002), especially when vegetation is heterogeneous; and SMOS L2 successful retrievals are higher for bare soil and lower vegetation areas than for vegetated areas ([http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS\\_blog/?page\\_id=1393](http://www.cesbio.ups-tlse.fr/SMOS_blog/?page_id=1393)).

As mentioned in the previous section, the water stress factors based on a water balance generally obtained the best results when trying to explain reference  $\varepsilon$  variance. Regarding to  $\varepsilon'_1$ , these results are in accordance with those found by Maselli et al. (2009) and Maselli et al. (2013) for Mediterranean forests and grasslands, respectively. This water stress factor requires the spatial interpolation of daily ground meteorological measurements, which may be problematic in rugged terrain particularly for rainfall. On the other hand, the use of ground meteorological data allows tracking rapid increases in water availability consequent on rainfall. This is only partially the case for  $\varepsilon'_2$ , which requires the spatial interpolation of ground air temperature measurements, although a downscaling of satellite AET and incoming solar global radiation must also be applied.

A temporal interpolation is needed in the cases of  $\varepsilon'_3$  and  $\varepsilon'_4$  to solve temporal resolution issues presented by the original products (MOD16A2 and L4SMv3D, respectively). In the case of  $\varepsilon'_3$ , an 8-day composite from daily measurements is used as input, with a consequent loss of temporal details associated with the compositing procedure. In the case of  $\varepsilon'_4$ , the applied temporal interpolation addresses the temporal undersampling (approximately one measurement each three days) of the sensor. For more details on the generation of the inputs, the reader is addressed to the references mentioned in the Section 2 of this study.

Although it has been demonstrated that PRI can track  $\varepsilon$  at plant level and local scale (Garbulsky et al. 2011; Nakaji, Oguma, and Fujinuma 2006), when calculating it through MODIS bands at regional or global scale, the signal to be detected is of the same order of magnitude of that of the sensor signal-to-noise ratio. Moreover, other factors such as geometry (view and solar angles), atmospheric correction, and the lack of the recommended reference band (centered at 570 nm)

can also affect this index (Barton and North 2001; Drolet et al. 2005; Moreno et al. 2012). These issues could explain the poor performance of  $\epsilon'_5$  in this study.

VPD is used in MOD17 algorithm to account for changes in  $\epsilon$  due to water stress at global scale across different ecosystem types. However, it seems not to perform as well as it would be expected in non-forest ecosystems (ES-CPa and ES-LJu) and in dry ecosystems such as savanna (ES-LMa). Other studies also found that water stress factors based on other variables than VPD such as SM improve the performance of the MOD17 production efficiency model in dry sites such as savanna (Kanniah et al. 2009) and that the  $\epsilon$  downregulating factors should be appropriately chosen and adjusted to each study site (Turner et al. 2006).

It is notable that  $\epsilon'_1$  performs consistently good across the three sites, while the other five water stress factors fail in one of the sites or only achieve significant results in one of them. Although it could be expected that alternatives based on AET or SM perform better than the one based on PRE in these three Mediterranean arid sites, PRE is spatialized from ground measurements and, therefore, avoids problems that usually affect remotely sensed data.

AET in  $\epsilon'_2$  uses other LSA products in its algorithm such as DSSF, down-welling surface longwave flux (DSLFL), and surface albedo (AL), in addition to numerical weather prediction data from the European centre for medium-range weather forecast (ECMWF), and a land-cover classification. DSSF, DSLFL, and AL are affected by sensor performance, identification of clouds, atmospheric correction, surface heterogeneity, and land-cover classification. So finally the inaccuracies in the input data influence the output of the algorithm. Also the coarse spatial resolution of meteorological data ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) from ECMWF adds uncertainties in the AET estimation, especially air temperature and specific humidity. This information can be found in 'Algorithm Theoretical Basis Document Meteosat Second Generation Evapotranspiration (MET) Product Daily MET (DMET) Product' (2010).

The same problems affect the estimation of AET and PET in  $\epsilon'_3$ , which use an even coarser spatial resolution in the meteorological input data ( $0.5^\circ \times 0.6^\circ$ ) (Mu, Zhao, and Running 2013).

In the case of  $\epsilon'_4$ , although atmospheric contribution, rain, and clouds have a negligible effect in L-band observations (Kerr et al. 2001), the original coarse spatial resolution of SMOS SM estimates and the downscaling procedure itself, which uses MODIS LST and NDVI that are affected by the problems mentioned above, could introduce some uncertainties.

$\epsilon'_5$  (PRI) presents the common problems associated with the use of remotely sensed vegetation indices such as the contribution of the soil (specially in ES-CPa and ES-LJu due to their lower vegetation cover fraction), atmospheric correction, and the angular distribution of leaves and other scatterers (stems, branches, etc.), among others (Garbulsky et al. 2014). In addition, the two MODIS bands used in the study are broad enough to present interferences from other pigments reactions (Grace et al. 2007). This may partly deteriorate the performance of  $\epsilon'_5$  in the examined ecosystems.

In Mediterranean ecosystems, VPD varies mainly with air temperature and solar radiation, which are maximum in summer, when rainfall is almost absent. This usually yields a statistical relationship between intra-annual variation of VPD and water stress. VPD, however, can only partially account for irregular soil water recharges due to rare summer rain events, which are typical of dry Mediterranean ecosystems. In these cases,  $\epsilon$  can increase considerably and for relatively long periods while the decreases of VPD are small and transient. This implies that also in Mediterranean areas the water stress factors based on the direct or indirect estimation of SM content should perform theoretically better than  $\epsilon'_6$ , which was actually found in the present study and supported by previous studies (Mu et al. 2007).

Generally, the water stress factors that explained the highest amount of reference  $\epsilon$  variance also contributed most to the improvement of the GPP estimates. Furthermore, the water stress factors that explained the less amount of reference  $\epsilon$  variance or produced not significant correlations between reference ( $\epsilon$ ) and estimated ( $\epsilon'_i$ ) light use efficiency did not improve or even declined the performance of the PEM.

Overall, the PEM implemented in Equation (3) obtained satisfactory results independently of the used water stress factor in all the study sites. However,  $GPP'_2$ ,  $GPP'_3$ ,  $GPP'_4$ , and  $GPP'_5$  present some

634  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

advantages over  $GPP'_1$  and  $GPP'_6$ : they do not need an accumulation period, and they do not require meteorological ground data except in the case of  $GPP'_2$  that needs daily mean air temperature. This variable could be estimated from satellite land surface temperature (Nieto et al. 2011; Stisen et al. 2007; Vancutsem et al. 2010) so  $GPP'_2$  would not require ground data either. The possibility of the estimation of daily mean air temperature from SEVIRI or MODIS land surface temperature to calculate PET and use it in  $GPP'_2$  will be addressed in future studies.  $GPP'_3$  and  $GPP'_4$  presented a solid behavior among all three sites always improving the GPP estimates with respect to  $GPP'_0$ .  $GPP'_5$  did not present any improvement in terms of  $R^2$  and did not especially contribute to the reduction of uncertainties either.  $GPP'_6$  was not the best alternative in terms of coefficient of determination between estimated and reference GPP, and it even decreased it in the case of ES-LJu, but it notably contributed to the reductions of uncertainties in the three sites.

## 6. Summary and conclusions

Six water stress factors calculated from operative satellite products and a limited contribution of meteorological data were proposed for their utilization as inputs in a PEM. Their performance was assessed in terms of their capacity to track intra-annual  $\varepsilon$  and GPP variability, as obtained from EC measurements taken in water-limited ecosystems. In the latter case, the water stress factors were used as drivers of a PEM (Equation (3)). Data along several years (2005–2013) from three EC tower sites located in the Iberian Peninsula were employed.

When comparing reference and estimated light use efficiency, the best results were obtained in ES-LMa (savanna), where all the water stress factors explained between 20% ( $\varepsilon'_6$ ) and 48% ( $\varepsilon'_1$  and  $\varepsilon'_2$ ) of the reference  $\varepsilon$  variance. However, in ES-CPa and ES-LJu (open shrublands) not all the water stress factors achieved significant correlations and the explained reference  $\varepsilon$  variance ranged between 8% ( $\varepsilon'_2$ ) and 39% ( $\varepsilon'_1$ ) in ES-CPa and between 31% ( $\varepsilon'_2$ ) and 42% ( $\varepsilon'_4$ ) in ES-LJu.

The water stress factors were then implemented in a PEM to obtain daily GPP. The introduction of the water stress factors in the PEM generally improved its performance increasing its capability to track daily GPP intra-annual variation and reducing the difference between estimated ( $GPP'_i$ ) and reference GPP data from EC measurements ( $GPP_{EC}$ ). The most relevant improvements in terms of  $R^2$  were achieved by  $\varepsilon'_1$  (ratio between accumulated precipitation and Jensen–Haise PET),  $\varepsilon'_2$  (ratio between SEVIRI AET and Jensen–Haise PET),  $\varepsilon'_3$  (ratio between MOD16A2 AET and PET), and  $\varepsilon'_4$  (SMOS-derived SM). Since the water stress factors based on a water balance using meteorological data ( $\varepsilon'_1$  and  $\varepsilon'_2$ ) obtained more reliable results, it is recommended to use them when the mentioned input data are available. However, one of the aims of the present study was to select a water stress factor able to track daily vegetation water stress for its implementation in a PEM using only remotely sensed data if possible. Therefore,  $\varepsilon'_3$  (MOD16A2) and  $\varepsilon'_4$  (SMOS-derived), obtaining similar results, appear as solid alternatives from an operational point of view to be included in a PEM and estimate GPP in Mediterranean ecosystems because they rely exclusively on the use of remote sensing products in their calculation and they are available at nearly real time at 1-km spatial resolution and daily temporal resolution. Until SMOS enhanced spatial resolution images are provided globally,  $\varepsilon'_4$  could only be used for studies in the Iberian Peninsula.  $\varepsilon'_3$ , in turn, could already be applied at the global scale with the rest of the inputs of the PEM assigning a constant  $\varepsilon_{max}$  to all vegetation types or using a global land-cover product such as the MODIS global land-cover product MOD12.

## Acknowledgements

Part of the data was kindly provided by the Spanish Meteorological Agency (AEMet), by the SMOS Barcelona Expert Center (SMOS\_BEC), and by Penelope Serrano-Ortiz.

## Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.



## Funding

This work was partially funded by the RESET CLIMATE (CGL2012-35831), the ESCENARIOS (CGL2016-75239-R), and the PROMISES (ESP2015-67549-C3) projects from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness, and by the LSA SAF CDOP-2 project from the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT).

## ORCID

Sergio Sanchez-Ruiz  <http://orcid.org/0000-0002-4849-9918>  
 Alvaro Moreno  <http://orcid.org/0000-0003-2990-7768>  
 Maria Piles  <http://orcid.org/0000-0002-1169-3098>  
 Fabio Maselli  <http://orcid.org/0000-0001-6475-4600>  
 Arnaud Carrara  <http://orcid.org/0000-0002-9095-8807>  
 Steven Running  <http://orcid.org/0000-0001-6906-3841>  
 Maria Amparo Gilabert  <http://orcid.org/0000-0002-3548-1524>

## References

- Algorithm Theoretical Basis Document Meteosat Second Generation Evapotranspiration (MET) Product Daily MET (DMET) Product. 2010. "The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF)".
- Anderson, Donald B. 1936. "Relative Humidity or Vapor Pressure Deficit." *Ecology* 17 (2): 277–282. doi:10.2307/1931468.
- Assouline, S., and D. Or. 2014. "The Concept of Field Capacity Revisited: Defining Intrinsic Static and Dynamic Criteria for Soil Internal Drainage." *Water Resources Research* 50 (6): 4787–4802.
- Barton, C. V. M., and P. R. J. North. 2001. "Remote Sensing of Canopy Light Use Efficiency Using the Photochemical Reflectance Index Model and Sensitivity Analysis." *Remote Sensing of Environment* 78: 264–273. <http://hdl.handle.net/10512/999992087>.
- Cao, Mingkui, Stephen D. Prince, Jennifer Small, and Scott J. Goetz. 2004. "Remotely Sensed Interannual Variations and Trends in Terrestrial Net Primary Productivity 1981–2000." *Ecosystems* 7: 233–242. doi:10.1007/s10021-003-0189-x.
- Colman, E. A. 1944. "The Dependence of Field Capacity upon the Depth of Wetting of Field Soils." *Soil Science* 58 (1): 43–50.
- Coops, Nicholas C., Thomas Hilker, Forrest G. Hall, Caroline J. Nichol, and Guillaume G. Drolet. 2010. "Estimation of Light-use Efficiency of Terrestrial Ecosystems from Space: A Status Report." *BioScience* 60 (10): 788–797. doi:10.1525/bio.2010.60.10.5.
- Drolet, Guillaume G., Karl F. Huemmrich, Forrest G. Hall, Elizabeth M. Middleton, T. Andrew Black, Alan G. Barr, and Hank A. Margolis. 2005. "A MODIS-Derived Photochemical Reflectance Index to Detect Inter-annual Variations in the Photosynthetic Light-use Efficiency of a Boreal Deciduous Forest." *Remote Sensing of Environment* 98 (2–3): 212–224. doi:10.1016/j.rse.2005.07.006.
- Gamon, John A., Christopher B. Field, Michael L. Goulden, Kevin L. Griffin, Anne E. Hartley, Geeske Joel, Josep Peñuelas, and Riccardo Valentini. 1995. "Relationships between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types." *Ecological Applications* 5 (1): 28–41.
- Gamon, J. A., J. Peñuelas, and C. B. Field. 1992. "A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency." *Remote Sensing of Environment*. doi:10.1016/0034-4257(92)90059-5.
- Gao, Yanni, Guirui Yu, Huimin Yan, Xianjin Zhu, Shengong Li, Qiufeng Wang, Junhui Zhang, et al. 2014. "A MODIS-Based Photosynthetic Capacity Model to Estimate Gross Primary Production in Northern China and the Tibetan Plateau." *Remote Sensing of Environment* 148: 108–118. doi:10.1016/j.rse.2014.03.006.
- Garbulsky, M. F., I. Filella, A. Verger, and J. Peñuelas. 2014. "Photosynthetic Light Use Efficiency from Satellite Sensors: From Global to Mediterranean Vegetation." *Environmental and Experimental Botany* 103: 3–11. doi:10.1016/j.envexpbot.2013.10.009.
- Garbulsky, Martín F., Josep Peñuelas, John Gamon, Yoshio Inoue, and Iolanda Filella. 2011. "The Photochemical Reflectance Index (PRI) and the Remote Sensing of Leaf, Canopy and Ecosystem Radiation Use Efficiencies: A Review and Meta-analysis." *Remote Sensing of Environment* 115 (2): 281–297. doi:10.1016/j.rse.2010.08.023.
- Garbulsky, Martín F., Josep Peñuelas, Dario Papale, Jonas Ardó, Michael L. Goulden, Gerard Kiely, Andrew D. Richardson, Eyal Rotenberg, Elmar M. Veenendaal, and Iolanda Filella. 2010. "Patterns and Controls of the Variability of Radiation Use Efficiency and Primary Productivity across Terrestrial Ecosystems." *Global Ecology and Biogeography* 19 (2): 253–267. doi:10.1111/j.1466-8238.2009.00504.x.
- Garbulsky, Martín F., Josep Peñuelas, Dario Papale, and Iolanda Filella. 2008. "Remote Estimation of Carbon Dioxide Uptake by a Mediterranean Forest." *Global Change Biology* 14 (12): 2860–2867.

636  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

- Gilabert, M. A., A. Moreno, F. Maselli, B. Martínez, M. Chiesi, S. Sánchez-Ruiz, F. J. García-Haro, et al. 2015. "Daily GPP Estimates in Mediterranean Ecosystems by Combining Remote Sensing and Meteorological Data." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS)* 102: 184–197. doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.017.
- Grace, J., C. Nichol, M. Disney, P. Lewis, T. Quaife, and P. Bowyer. 2007. "Can We Measure Terrestrial Photosynthesis from Space Directly, Using Spectral Reflectance and Fluorescence?" *Global Change Biology* 13: 1484–1497. doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01352.x.
- Heinsch, Faith Ann, Maosheng Zhao, Steven W. Running, John S. Kimball, Ramakrishna R. Nemani, Kenneth J. Davis, Paul V. Bolstad, et al. 2006. "Evaluation of Remote Sensing Based Terrestrial Productivity from MODIS Using Regional Tower Eddy Flux Network Observations." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (7): 1908–1923. doi:10.1109/TGRS.2005.853936.
- Hunt, E. D., K. G. Hubbard, D. A. Wilhite, T. J. Arkebauer, and A. L. Dutcher. 2009. "The Development and Evaluation of a Soil Moisture Index." *International Journal of Climatology* 29: 747–759.
- IPCC. 2007. "Coupling Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry." In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, 499–588. Cambridge: Cambridge University Press.
- Iqbal, M. 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Toronto: Academic Press.
- Jensen, M. E., and H. R. Haise. 1965. "Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation." *Journal of Irrigation and Drainage Division* 89: 15–41.
- Kanniah, K. D., J. Beringer, L. B. Hutley, N. J. Tapper, and X. Zhu. 2009. "Evaluation of Collections 4 and 5 of the MODIS Gross Primary Productivity Product and Algorithm Improvement at a Tropical Savanna Site in Northern Australia." *Remote Sensing of Environment* 113 (9): 1808–1822. doi:10.1016/j.rse.2009.04.013.
- Kerr, Y. H., A. Al-yaari, N. Rodriguez-fernandez, M. Parrens, B. Molero, D. Leroux, S. Bircher, et al. 2016. "Overview of SMOS Performance in Terms of Global Soil Moisture Monitoring after Six Years in Operation." *Remote Sensing of Environment* 180: 40–63. doi:10.1016/j.rse.2016.02.042.
- Kerr, Yann H., Philippe Waldteufel, Jean-pierre Wigneron, Jean-michel Martinuzzi, Jordi Font, and Michael Berger. 2001. "Soil Moisture Retrieval from Space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) Mission." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (8): 1729–1735.
- Kirkham, M. B. 2005. *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Burlington, MA: Elsevier Academic Press.
- Lee, Khil-ha, Eleanor J. Burke, W. James Shuttleworth, and R. Chawn Harlow. 2002. "Influence of Vegetation on SMOS Mission Retrievals." *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (2): 153–166.
- Li, Gang, Daolong Wang, Shimin Liu, Wenjie Fan, Hua Zhang, Xiaoping Xin, and Hongbin Zhang. 2010. "Validation of Modis Fapar Products in Hulunber Grassland of China." 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1047–1050, Honolulu.
- Ma, Xuanlong, Alfredo Huete, Qiang Yu, Natalia Restrepo-Coupe, Jason Beringer, Lindsay B. Hutley, Kasturi Devi Kanniah, James Cleverly, and Derek Eamus. 2014. "Parameterization of an Ecosystem Light-Use-Efficiency Model for Predicting Savanna GPP Using MODIS EVI." *Remote Sensing of Environment* 154 (1): 253–271. doi:10.1016/j.rse.2014.08.025.
- Martínez-Fernández, J., A. González-Zamora, N. Sánchez, and A. Gumuzzio. 2015. "A Soil Water Based Index as a Suitable Agricultural Drought Indicator." *Journal of Hydrology* 522: 265–273. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.12.051.
- Martínez-Fernández, J., A. González-Zamora, N. Sánchez, A. Gumuzzio, and C. M. Herrero-Jiménez. 2016. "Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of the SMOS Derived Soil Water Deficit Index." *Remote Sensing of Environment* 177: 277–286. doi:10.1016/j.rse.2016.02.064.
- Maselli, F., G. Argenti, M. Chiesi, L. Angeli, and D. Papale. 2013. "Simulation of Grassland Productivity by the Combination of Ground and Satellite Data." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 165: 163–172. doi:10.1016/j.agee.2012.11.006.
- Maselli, Fabio, Paolo Cherubini, Marta Chiesi, María Amparo Gilabert, Fabio Lombardi, Alvaro Moreno, Maurizio Teobaldelli, and Roberto Tognetti. 2014. "Start of the Dry Season as a Main Determinant of Inter-Annual Mediterranean Forest Production Variations." *Agricultural and Forest Meteorology* 194: 197–206. doi:10.1016/j.agrformet.2014.04.006.
- Maselli, Fabio, Dario Papale, Nicola Puletti, Gherardo Chirici, and Piermaria Corona. 2009. "Combining Remote Sensing and Ancillary Data to Monitor the Gross Productivity of Water-Limited Forest Ecosystems." *Remote Sensing of Environment* 113 (3): 657–667. doi:10.1016/j.rse.2008.11.008.
- Monson, Russell, and Dennis Baldocchi. 2014. *Terrestrial Biosphere-Atmosphere Fluxes*. New York: Cambridge University Press.
- Monteith, J. L. 1972. "Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems." *The Journal of Applied Ecology* 9 (3): 747–766.
- Moreno, A., M. A. Gilabert, F. Camacho, and B. Martínez. 2013. "Validation of Daily Global Solar Irradiation Images from MSG over Spain." *Renewable Energy* 60: 332–42. doi:10.1016/j.renene.2013.05.019.
- Moreno, A., M. A. Gilabert, and B. Martínez. 2011. "Mapping Daily Global Solar Irradiation over Spain: A Comparative Study of Selected Approaches." *Solar Energy* 85 (9): 2072–2084. doi:10.1016/j.solener.2011.05.017.

- Moreno, A., F. Maselli, M. A. Gilabert, M. Chiesi, B. Martínez, and G. Seufert. 2012. "Assessment of MODIS Imagery to Track Light-Use Efficiency in a Water-Limited Mediterranean Pine Forest." *Remote Sensing of Environment* 123: 359–367. doi:10.1016/j.rse.2012.04.003.
- Mu, Qiaozhen, Maosheng Zhao, Faith Ann Heinsch, Mingliang Liu, Hanqin Tian, and Steven W. Running. 2007. "Evaluating Water Stress Controls on Primary Production in Biogeochemical and Remote Sensing Based Models." *Journal of Geophysical Research* 112. doi:10.1029/2006JG000179.
- Mu, Qiaozhen, Maosheng Zhao, and Steven W. Running. 2013. *MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3) Algorithm Theoretical Basis Document Collection 5*. Missoula: University of Montana.
- Nakaji, T., H. Oguma, and Y. Fujinuma. 2006. "Seasonal Changes in the Relationship between Photochemical Reflectance Index and Photosynthetic Light Use Efficiency of Japanese Larch Needles." *International Journal of Remote Sensing* 27 (3): 493–509. doi:10.1080/01431160500329528.
- Nestola, Enrica, Carlo Calfapietra, Craig A. Emmerton, Christopher Y S. Wong, Donnette R. Thayer, and John A. Gamon. 2016. "Monitoring Grassland Seasonal Carbon Dynamics, by Integrating MODIS NDVI, Proximal Optical Sampling, and Eddy Covariance Measurements." *Remote Sensing* 8 (3): 260–284. doi:10.3390/rs8030260.
- Nieto, Héctor, Inge Sandholt, Inmaculada Aguado, Emilio Chuvieco, and Simon Stisen. 2011. "Air Temperature Estimation with MSG-SEVIRI Data: Calibration and Validation of the TVX Algorithm for the Iberian Peninsula." *Remote Sensing of Environment* 115 (1): 107–116. doi:10.1016/j.rse.2010.08.010.
- Pérez-Hoyos, A., F. J. García-Haro, and J. San-Miguel-Ayanz. 2012. "A Methodology to Generate a Synergetic Land-Cover Map by Fusion of Different Land-Cover Products." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19 (1): 72–87. doi:10.1016/j.jag.2012.04.011.
- Piles, María, Nilda Sánchez, Mercè Vall-llosera, Adriano Camps, José Martínez-Fernández, Justino Martínez, and Verónica González-Gambau. 2014. "A Downscaling Approach for SMOS Land Observations: Evaluation of High-Resolution Soil Moisture Maps Over the Iberian Peninsula." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*. doi:10.1109/JSTARS.2014.2325398.
- Potter, Christopher S., Steven Klooster, Ranga Myneni, Vanessa Genovese, Pang Ning Tan, and Vipin Kumar. 2003. "Continental-Scale Comparisons of Terrestrial Carbon Sinks Estimated from Satellite Data and Ecosystem Modeling 1982–1998." *Global and Planetary Change* 39: 201–213. doi:10.1016/j.gloplacha.2003.07.001.
- Potter, Christopher S., James T. Randerson, Christopher B. Field, Pamela A. Matson, Peter M. Vitousek, Harold A. Mooney, and Steven A. Klooster. 1993. "Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model Based on Global Satellite and Surface Data." *Global Biogeochemical Cycles* 7 (4): 811–841.
- "Product User Manual Down-Welling Surface Shortwave Flux (DSSF)." 2011. "The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF)".
- "Product User Manual Evapotranspiration (ET)." 2015. "The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF)".
- Reichstein, Markus, Eva Falge, Dennis Baldocchi, Dario Papale, Marc Aubinet, Paul Berbigier, Christian Bernhofer, et al. 2005. "On the Separation of Net Ecosystem Exchange into Assimilation and Ecosystem Respiration: Review and Improved Algorithm." *Global Change Biology* 11 (9): 1424–1439. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.
- Romano, N., M. Palladino, and G. B. Chirico. 2011. "Parameterization of a Bucket Model for Soil-Vegetation-Atmosphere Modeling under Seasonal Climatic Regimes." *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (12): 3877–3893. doi:10.5194/hess-15-3877-2011.
- Roujean, Jean-louis, and Francois-marie Breon. 1995. "Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements." *Remote Sensing of Environment* 51: 375–384.
- Running, Steven W., and Maosheng Zhao. 2015. *User's Guide: Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. Version 3.0*. Missoula: University of Montana.
- Sánchez-Ruiz, S., A. Moreno, B. Martínez, M. Piles, F. Maselli, A. Carrara, and M. A. Gilabert. 2014. "Impact of Water Stress on GPP Estimation from Remote Sensing Data in Mediterranean Ecosystems." Proceedings 4th International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, Torrent (Spain), September 22–26.
- Schaaf, Crystal B., Feng Gao, Alan H. Strahler, Wolfgang Lucht, Xiaowen Li, Trevor Tsang, Nicholas C. Strunell, et al. 2002. "Global Albedo, BRDF and Nadir BRDF-Adjusted Reflectance Products from MODIS." *Remote Sensing of Environment* 83: 135–148.
- Stisen, Simon, Inge Sandholt, Anette Norgaard, Rasmus Fensholt, and Lars Eklundh. 2007. "Estimation of Diurnal Air Temperature Using MSG SEVIRI Data in West Africa." *Remote Sensing of Environment* 110 (2): 262–274. doi:10.1016/j.rse.2007.02.025.
- Turner, David P., William D. Ritts, Warren B. Cohen, Stith T. Gower, Steve W. Running, Maosheng Zhao, Marcos H. Costa, et al. 2006. "Evaluation of MODIS NPP and GPP Products across Multiple Biomes." *Remote Sensing of Environment* 102 (3–4): 282–292. doi:10.1016/j.rse.2006.02.017.
- Vancutsem, Christelle, Pietro Ceccato, Tufa Dinku, and Stephen J. Connor. 2010. "Evaluation of MODIS Land Surface Temperature Data to Estimate Air Temperature in Different Ecosystems over Africa." *Remote Sensing of Environment* 114 (2): 449–465. doi:10.1016/j.rse.2009.10.002.
- Veihmeyer, F. J., and A. H. Hendrickson. 1931. "The Moisture Equivalent as a Measure of the Field Capacity of Soils." *Soil Science* 32: 181–194. doi:10.1097/00010694-193109000-00003.

638  S. SANCHEZ-RUIZ ET AL.

- Veihmeyer, F. J., and A. H. Hendrickson. 1949. "Methods of Measuring Field Capacity and Permanent Wilting Percentage of Soils." *Soil Science* 68 (1): 75–94.
- Vermote, E., and R. Wolfe. 2015. "MODOCGA MODIS/Terra Ocean Reflectance Daily L2G-Lite Global 1 km SIN Grid V006." NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/MODIS/MODOCGA.006.
- Verstraeten, Willem W., Frank Veroustraete, and Jan Feyen. 2006. "On Temperature and Water Limitation of Net Ecosystem Productivity: Implementation in the C-Fix Model." *Ecological Modelling* 199 (1): 4–22. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.06.008.
- Wagle, Pradeep, Xiangming Xiao, Margaret S. Torn, David R. Cook, Roser Matamala, Marc L. Fischer, Cui Jin, Jinwei Dong, and Chandrashekhar Biradar. 2014. "Sensitivity of Vegetation Indices and Gross Primary Production of Tallgrass Prairie to Severe Drought." *Remote Sensing of Environment* 152: 1–14. doi:10.1016/j.rse.2014.05.010.
- Waring, H. R., and S. W. Running. 2007. *Forest Ecosystems*. 3rd ed. San Diego, CA: Academic Press.
- Wu, Chaoyang, Zheng Niu, Quan Tang, and Wenjiang Huang. 2010. "Revised Photochemical Reflectance Index (PRI) for Predicting Light Use Efficiency of Wheat in a Growth Cycle: Validation and Comparison." *International Journal of Remote Sensing* 31 (11): 2911–2924.
- Xiao, Xiangming, David Hollinger, John Aber, Mike Goltz, Eric A. Davidson, Qingyuan Zhang, and Berrien Moore. 2004a. "Satellite-Based Modeling of Gross Primary Production in an Evergreen Needleleaf Forest." *Remote Sensing of Environment* 89 (4): 519–534. doi:10.1016/j.rse.2003.11.008.
- Xiao, Xiangming, Qingyuan Zhang, Bobby Braswell, Shawn Urbanski, Stephen Boles, Steven Wofsy, Berrien Moore III, and Dennis Ojima. 2004b. "Modeling Gross Primary Production of Temperate Deciduous Broadleaf Forest Using Satellite Images and Climate Data." *Remote Sensing of Environment* 91 (2): 256–270. doi:10.1016/j.rse.2004.03.010.
- Yuan, Wenping, Shuguang Liu, Guangsheng Zhou, Guoyi Zhou, Larry L. Tieszen, Dennis Baldocchi, Christian Bernhofer, et al. 2007. "Deriving a Light Use Efficiency Model from Eddy Covariance Flux Data for Predicting Daily Gross Primary Production across Biomes." *Agricultural and Forest Meteorology* 143: 189–207. doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.001.



RightsLink®

[Home](#)

[Account Info](#)

[Help](#)



**Taylor & Francis**  
Taylor & Francis Group

**Title:** Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data  
**Author:** Sergio Sanchez-Ruiz, Alvaro Moreno, Maria Piles, et al  
**Publication:** International Journal of Digital Earth  
**Publisher:** Taylor & Francis  
**Date:** Jun 3, 2017  
Rights managed by Taylor & Francis

Logged in as:  
Sergio Sánchez Ruiz  
Account #: 3001286094  
[LOGOUT](#)

**Thesis/Dissertation Reuse Request**

Taylor & Francis is pleased to offer reuses of its content for a thesis or dissertation free of charge contingent on resubmission of permission request if work is published.

[BACK](#)

[CLOSE WINDOW](#)





Article

## Annual Gross Primary Production from Vegetation Indices: A Theoretically Sound Approach

María Amparo Gilabert \*, Sergio Sánchez-Ruiz and Álvaro Moreno

Environmental Remote Sensing Group (UV-ERS), Departament Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, Spain; sergio.sanchez@uv.es (S.S.-R.); alvaro.moreno@uv.es (Á.M.)

\* Correspondence: m.amparo.gilabert@uv.es; Tel.: +34-963-543-118

Academic Editors: Lenio Soares Galvao and Prasad S. Thenkabail

Received: 29 November 2016; Accepted: 16 February 2017; Published: 23 February 2017

**Abstract:** A linear relationship between the annual gross primary production (GPP) and a PAR-weighted vegetation index is theoretically derived from the Monteith equation. A semi-empirical model is then proposed to estimate the annual GPP from commonly available vegetation indices images and a representative PAR, which does not require actual meteorological data. A cross validation procedure is used to calibrate and validate the model predictions against reference data. As the calibration/validation process depends on the reference GPP product, the higher the quality of the reference GPP, the better the performance of the semi-empirical model. The annual GPP has been estimated at 1-km scale from MODIS NDVI and EVI images for eight years. Two reference data sets have been used: an optimized GPP product for the study area previously obtained and the MOD17A3 product. Different statistics show a good agreement between the estimates and the reference GPP data, with correlation coefficient around 0.9 and relative RMSE around 20%. The annual GPP is overestimated in semiarid areas and slightly underestimated in dense forest areas. With the above limitations, the model provides an excellent compromise between simplicity and accuracy for the calculation of long time series of annual GPP.

**Keywords:** annual GPP; MODIS; NDVI; EVI; PAR; Monteith model

### 1. Introduction

The analysis of changes in the long-term estimates of the CO<sub>2</sub> ecosystem–atmosphere fluxes is important to establish the global carbon balance, especially in forest ecosystems, the main sinks of atmospheric carbon in the biosphere. A key factor of this balance is the gross primary production (GPP), which represents the total carbon uptake through photosynthesis per unit of time and per unit of area. Although GPP is the source of carbon for all carbon fluxes in the ecosystem, there is no direct method of measurement. GPP is calculated from in situ net primary production data acquired in eddy covariance (EC) towers after correction for respiration losses [1,2]. Ecosystem models [3] validated against EC data and combined with meteorological and remotely sensed data [4,5] allow for the estimation of GPP across space and time and, hence, for the quantification of carbon fluxes at regional to global scales [2].

The GPP is the rate at which vegetation converts light into chemical energy by photosynthesis. As the photosynthesis is driven by solar radiation, GPP can be estimated using the Monteith equation [6].

$$GPP = \varepsilon f_{APAR} PAR \quad (1)$$

where PAR is the flux density of photosynthetically-active radiation, i.e., the global incident radiation in the range 400–700 nm;  $f_{\text{APAR}}$  is a structural variable that represents the fraction (between 0 and 1) of incident PAR absorbed by the canopy; and  $\epsilon$  ( $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ) is the conversion efficiency (also known as light-use efficiency (LUE)). When the quantities in Equation (1) are defined on a daily basis, a subscript  $i$  ranging from 1 to 365 is added to them. The units of  $\text{GPP}_i$  and  $\text{PAR}_i$  are  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  and  $\text{MJ}\cdot\text{day}^{-1}$ , respectively.

The annual GPP for the year  $Y$ , in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ , is the sum of the corresponding daily values:

$$\text{GPP}_{\text{annual}}^Y = \sum_i \text{GPP}_i^Y = \sum_i \epsilon_i^Y f_{\text{APAR},i}^Y \text{PAR}_i^Y \quad (2)$$

Taking into account the loss due to autotrophic respiration, the  $\text{GPP}_{\text{annual}}$  can be used to assess the carbon sequestration into dry matter during a year (annual net primary production), and hence to quantify the changes in biomass over long periods of time. However, obtaining long time series of  $\text{GPP}_{\text{annual}}$  from daily GPP values is a time-consuming process that requires a huge number of inputs that might be unavailable, especially in retrospective studies [4].

In this work, a semi-empirical model that avoids the calculation of all the factors in Equation (1) is proposed to estimate the annual GPP. As the next section will show, our approach relies on vegetation indices (VIs) products commonly available such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [7] and the Enhanced Vegetation Index (EVI) [8]. In this case, the two MODIS standard VI products have been used. On the one hand, MODIS NDVI is included since it is referred as the “continuity index” [8] to the existing 30+ year NOAA-AVHRR derived NDVI time series, which can be extended to provide a longer-term data record required in climatic studies. On the other hand, EVI has been shown to improve NDVI sensitivity in dense vegetation regions and a better performance to minimize soil and atmosphere influences [8].

## 2. A Theoretically Sound Approach

The incident irradiance at the surface depends on the extraterrestrial irradiance and on the atmospheric conditions. The brightness variation of the Sun due to the sunspot cycle (with a period of ca. 11 years) provokes changes in the extraterrestrial global irradiance smaller than 0.1% [9]. Hence, the extraterrestrial irradiance is practically constant. However, the surface global irradiance at a given location might be highly variable since it is affected by random changes due to atmospheric conditions, which introduce an inter-annual variation. Regarding the long-term trends in the global irradiance at the surface, a general decrease (“global dimming”) has been reported during the last half century both in the northern and southern hemisphere, which might be related to a decrease of atmospheric transmittance due to changes in cloud characteristics and in atmospheric aerosols [10,11]. Nevertheless, in the last three decades, these changes have been less significant or even ceased [12].

According to the above considerations, the inter-annual variations of the annual PAR should be negligible. Although  $\text{PAR}_i^Y$  in Equation (2) might show random inter-annual variations associated to atmospheric state, it can be approximated (at each location) by a typical or representative value  $\text{PAR}_i^{\circ}$  that shows the main seasonal periodicity (associated exclusively to geometric factors). This assumption means that the effect of the changes of solar irradiance on annual GPP is less important than that due to vegetation changes (as discussed in Section 4). Radiation explains most of the variation in canopy photosynthesis over short periods, but environmental factors such as water availability become more important over long periods [12–15]. Since alterations in global solar irradiance only have a small impact on  $\text{GPP}_{\text{annual}}$ , the observed inter-annual variability in  $\text{GPP}_{\text{annual}}$  has to be related to structural changes that affect the  $f_{\text{APAR}}$ , such as changes in leaf area index (LAI) or leaf area duration.



The  $f_{APAR}$  is related to the vegetation structure and pigment content. It is frequently obtained from remote sensing data using vegetation indices (VIs) [16–20]. Some authors use the VIs as proxies of both  $\epsilon$  and  $f_{APAR}$  and rewrite Equation (1) as  $GPP = VI \times VI \times PAR$  [21,22]. In the latter case, both broad-band VIs and narrow-band indices can be considered. The Photochemical Reflectance Index (PRI) is a narrow-band VI [23] that is potentially connected with  $\epsilon$  [24]. The GPP has also been directly related to PAR through the chlorophyll content, which is in turn closely related to green  $f_{APAR}$  [25,26]. In any case, a linear relation with a vegetation index, such as the NDVI and the EVI, is a realistic approximation for the evaluation of  $f_{APAR}$ . This has been sufficiently shown by several authors, as mentioned above, and does not require further analysis.

As commented by some authors [27], whereas  $f_{APAR,i}$  is related to the vegetation structure and pigment pools, the conversion efficiency is related to the physiology. The daily conversion efficiency  $\epsilon_i$  can vary spatially between biomes, ecosystems, and plant species, and temporally during the growing season due to environmental and physiological limitations [28–32]. The daily conversion efficiency is generally taken as the product of a biome-specific maximum value ( $g \cdot MJ^{-1}$ ) and several dimensionless factors accounting for the efficiency reduction due to different types of stress, such as the thermal and the water stress. Our study area is characterized by different Mediterranean ecosystems where the water stress introduces most of the inter-annual variability in  $\epsilon_i$  [4,13]. On a daily scale, the different types of stress must be accounted for at quasi-real time, which is rather difficult and frequently requires actual meteorological data. Nevertheless, it has been shown that after relatively long stress periods, the plant photosynthetic apparatus is damaged and ultimately leads to structural canopy alteration (i.e., a decrease in green LAI and therefore in  $f_{APAR}$ ). This alteration can be noticed, with a time delay of one or two months [33,34], in broad-band spectral indices such as the NDVI and narrow-band indices such as the PRI. In particular, numerous studies carried out in different environments have shown that NDVI is sensitive to vegetation water stress [35,36].

It can be safely assumed that the effects of the different down-regulating factors at annual scale affect the  $f_{APAR}$ , since stresses acting on the canopy finally produce either less chlorophyll and/or less foliage and reduce the VI value. Hence, at annual scale, the conversion efficiency  $\epsilon$  can be considered to be independent of time, and approximated by the ecosystem maximum efficiency. As  $f_{APAR,i}$  and  $\epsilon_i$  can be confounded to varying degrees depending on the underlying dynamic biological processes and on their exact definition [27], with this approach we are avoiding a further insight in these concepts and in their exact operational definition. In fact, this approach takes into account the coordinate response or functional convergence [27] of both variables in the presence of nutrient or water constraints that limit plant growth as well as plant structure and pigment content.

Table 1 summarizes the hypotheses concerning the estimation of  $GPP_{annual}^Y$  (H1 is analyzed in next section). Hence, the variations from one year  $Y$  to another are attributed to those of  $f_{APAR}$ , i.e., to VI. From Equation (2) and the hypotheses in Table 1, an approximated  $GPP_{annual}^Y$  can thus be calculated as

$$GPP_{annual}^Y = \epsilon_{max} \sum_i \left[ (a + b VI_i^Y) PAR_i^\circ \right] \tag{3}$$

$$GPP_{annual}^Y = C_1 + C_2 \overline{VI}^Y \tag{4}$$

$$C_1 = \epsilon_{max} a \sum_i PAR_i^\circ \tag{5}$$

where

$$C_2 = \epsilon_{max} b \sum_i PAR_i^\circ \tag{6}$$

That is,  $C_1$  and  $C_2$  are constant for a specific vegetation type, and

$$\overline{VI}^Y = \frac{\sum_i VI_i^Y PAR_i^\circ}{\sum_i PAR_i^\circ} \quad (7)$$

This average VI is physically sound as it is an average over the energy received per surface area. Equations (3)–(7) require the series  $VI_i^Y$  and  $PAR_i^\circ$  (which is the same for all years), and the parameters,  $a$ ,  $b$  and  $\varepsilon_{\max}$ .

In this work, the annual GPP is obtained at 1-km spatial resolution from the MODIS VI standard products (NDVI and EVI) using the semi-empirical model in Equation (4). After a brief analysis of H1, the coefficients  $C_1$  and  $C_2$  are obtained and discussed as a function of the vegetation type. For the sake of clarity,  $GPP_{\text{annual}}^{\text{REF}}$  refers to annual GPP values obtained using Equation (2) since they are considered our “reference values”, whereas  $GPP_{\text{annual}}$  refers to estimated values using the semi-empirical model. Data from 2005 to 2012 are employed in the study. The performance of the model is assessed in its ability to reproduce annual GPP inter-annual variations in close agreement with those shown by the reference data.

**Table 1.** Hypotheses underlying the estimation of annual GPP by means of the semi-empirical model.

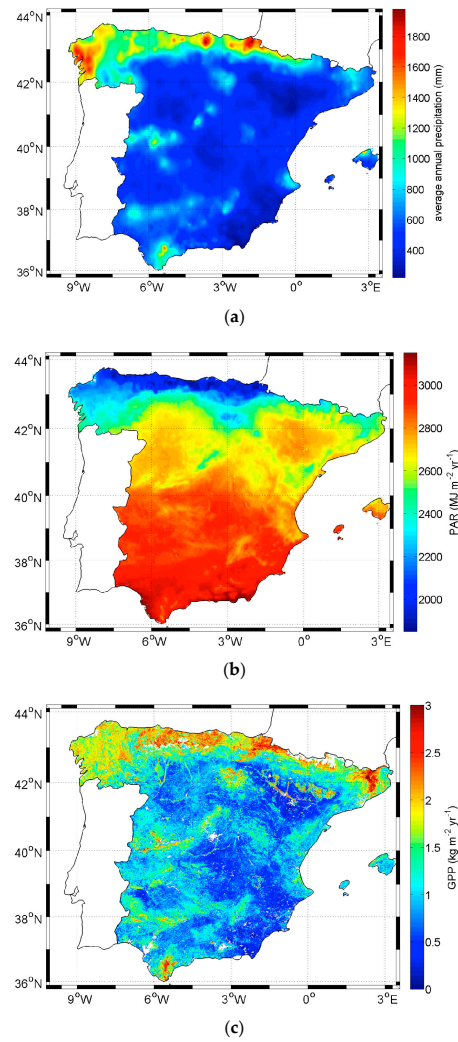
Hypothesis		Description
H1	$PAR_i^Y = PAR_i^\circ$	PAR inter-annual variations effects on annual GPP are negligible. A typical or representative PAR series, $PAR_i^\circ$ , can be used to characterize its seasonal pattern, independently of the year.
H2	$f_{APAR,i}^Y = a + b VI_i^Y$	A linear relation with a VI (such as NDVI and EVI) is a reasonable approximation for $f_{APAR}$ evaluation.
H3	$\varepsilon_i^Y = \varepsilon_{\max}$	The conversion efficiency is independent of time and approximated by the ecosystem maximum efficiency at annual scale.

### 3. Materials and Methods

#### 3.1. Study Area

Spain has remarkable landscape diversity and a wide range of ecosystems due to its geographic position in southwestern Europe, climate, geological features and relief, with elevation varying from sea level to 3479 m. A vast plateau surrounded by a number of mountain ranges dominates the central part of Spain. Synoptic air masses create a NW to SE gradient of water availability (total annual precipitation varies from 2000 mm to 120 mm), ranging from Atlantic humid climate zones on the north coast to Mediterranean climate on the east coast, the SE corner becoming the most arid zone of Europe [37]. Spain has a mosaic of land cover that includes significant areas of traditional and newly developed agriculture (49% of land), dominated by non-irrigated land. These areas are embedded in a matrix of natural and semi-natural vegetation (47% of land), mainly occupied by shrublands, and broadleaved or coniferous forests [38]. Vegetation distribution is strongly controlled by aridity, and drought conditions have a marked influence on vegetation cover and activity. The droughts that affect the semiarid areas represent an important factor in environmental degradation.

Figure 1 shows a precipitation map obtained averaging the annual precipitation of the eight years analyzed in this study (2005–2012), an average annual PAR image and the reference annual GPP for 2011 (both products will be described later).



**Figure 1.** Average annual precipitation (a); and average annual PAR (b) for the study area using the eight years analyzed in the study (2005–2012); and (c) annual reference GPP for 2011.

### 3.2. Images

#### 3.2.1. Daily PAR Images

Daily PAR images were obtained from daily irradiation images over Spain. The latter were calculated using two different procedures, previously inter-compared to ensure their homogeneity. Only the first procedure uses a satellite product, the down-welling surface short-wave radiation

flux (DSSF) from SEVIRI/MSG images [39]. Therefore, it is preferred from an operational point of view. In this procedure, the DSSF product was integrated along a day to obtain the daily irradiation. The DSSF data are, in the native geostationary projection, centered at  $0^\circ$  longitude and with a sampling distance of 3 km at the sub-satellite point. DSSF data were downsampled using the spatial disaggregation of the irradiance with a digital elevation model, DEM [40]. First, these data were re-projected and spatially smoothed by means of a linear interpolation to obtain 1-km lat/lon global irradiance images. This procedure removed the sharp borders or discontinuities between adjacent pixels. When no surrounding data were available (e.g., in the coastline), a fast technique to interpolate the images was developed. A further topographic correction was applied, which included the elevation correction and slope and aspect effects by means of a DEM. This procedure was used from 2007 to 2012. The resulting PAR images at 1-km spatial resolution present a mean absolute error (MAE) ranging from  $0.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  to  $0.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$  in rugged terrain. Although the DSSF product is preferred from an operational point of view, a second procedure was employed when DSSF images were not available. This second procedure [41] applies artificial neural networks to temperature and precipitation maps generated by ordinary kriging from in situ data. Unlike temperature and precipitation, solar radiation data are recorded only at a limited number of weather stations in Spain and thus solar radiation maps cannot be obtained directly interpolating those data. However, they can be estimated using extraterrestrial irradiation and air temperature and precipitation, which serve to characterize atmospheric transmittance. The MAE for PAR was also rather low in this case, about  $1.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ . A relationship between both series was found and used to fill the gaps in the first series.

According to climate records ([www.aemet.es](http://www.aemet.es)), the study period (2005–2012) presents remarkable weather heterogeneity. It comprises hot and dry years as well as hot and humid ones. However, these general features depend on each particular region, and the drought events are non-uniform and affect different regions on different years.

### 3.2.2. Daily GPP Images

Daily GPP images at 1-km resolution were obtained for the period 2005–2012 following a procedure based on the optimization of Monteith's approach, Equation (1), by adjusting the inputs ( $f_{\text{APAR}}$ , PAR and  $\epsilon$ ) for the study area. This optimized GPP product is driven by meteorological and satellite data (MODIS/TERRA and SEVIRI/MSG). Daily PAR was obtained as described above.  $f_{\text{APAR}}$  was calculated by applying to MODIS data (at 1-km spatial resolution and 8-day temporal resolution) the algorithm that is actually used to derive the SEVIRI/MSG  $f_{\text{APAR}}$  product, delivered by the LSA SAF network (EUMETSAT) (<http://landsaf.meteo.pt>) at 3.1-km spatial resolution (sub-satellite point) and daily frequency over the geostationary MSG grid. This algorithm uses the Renormalized Difference Vegetation Index, RDVI [42]. Subsequently, the  $f_{\text{APAR}}$  series were filtered and interpolated using an adapted (iteratively reweighted) local regression filter (LOESS) [43]. This procedure takes into account the data quality flags and has shown a very good performance; it is particularly resistant to outliers and offers an optimal reconstruction even in most extreme situations with long seasonal gaps. In order to assign a value of  $\epsilon_{\text{max}}$  to the different cover types, a hybrid land-cover map for Spain [44] was used (see below). Meteorological data were used to characterize the  $\epsilon$  inter-annual variability due to water stress, which produces the most significant efficiency reduction in the study area. In particular, the water stress factor  $C_{\text{ws}}$  [5], which accounts for limited photosynthetic activity in case of short-term water stress, was obtained from a local water budget based on actual and potential evapotranspiration.

This daily GPP product was validated for 2008 and 2011 [4] by comparison with in situ GPP estimates from EC data (direct validation) and by inter-comparison with the MODIS GPP product (MOD17A3) [45], which will be also used in this work. The direct validation has evidenced an excellent agreement with correlations up to 0.98 in 2008 and 0.92 in 2011 in some sites. The inter-comparison has shown that the two GPP products are consistent temporally. However, a slightly decrease of the correlation has been observed in high precipitation areas (Northern Spain) and in semiarid areas

(Southern Spain). Whereas the discrepancies on the northern region could be explained due to differences in the PAR (which seems to be better estimated in our approach), the discrepancies on the southern region could be related to the different way that the two GPP products account for the water stress. Our results evidence that the water stress factor  $C_{ws}$  outperforms the VPD (vapor pressure deficit) used in the official MODIS product. A further analysis on the explanatory power of the optimized GPP in terms of its inputs showed, as expected, that PAR and  $f_{APAR}$  are the most relevant inputs. Their relative importance depends on the location of the vegetation annual maximum so that the  $f_{APAR}$  plays a major role on the GPP estimation when that maximum is not reached during solar solstice. Nevertheless,  $\epsilon$  has to be evaluated accurately in order to explain the GPP inter-annual variability associated with the water shortage typical of Mediterranean landscapes [4].

### 3.2.3. Daily VI Images

The MODIS standard VI product MOD13A2 [8] includes two gridded vegetation indices (NDVI and EVI) at 1-km spatial resolution and 16-day temporal resolution (<https://reverb.echo.nasa.gov/>), and quality analysis (QA) with statistical data that indicate the quality of the VI product and input reflectance data. The VI products are corrected for molecular scattering, ozone absorption, and aerosols. The MODIS VI algorithm operates on a per-pixel basis and relies on multiple observations over a 16-day period to generate a composited VI.

The VI time series were filtered and interpolated using an adapted LOESS, the same procedure applied to  $f_{APAR}$  series [43], to generate daily NDVI and EVI images.

### 3.2.4. Vegetation Type Images

Two vegetation classifications were used: (i) a hybrid land-cover map obtained by the synergistic combination of four land-cover classifications (CGL2000, CORINE, IGBP and GlobCover) that improves the performance of individual classifications by reconciling their best characteristics while avoiding their main weaknesses [44]; and (ii) an ecosystem functional type map that characterizes the patterns of diversity and status from functional attributes such as the NDVI, land surface temperature and albedo [38].

## 3.3. Methodology

Hypotheses 2 and 3 are supported by literature (see Section 1) and, therefore, they are accepted as a stating point of our methodology. Although H1 is also a sound hypothesis, its adequacy to our study area is assessed by statistical tests. They allow us to evaluate whether PAR inter-annual variations introduce negligible changes in annual GPP as compared to those due to the inter-annual variability of the VI.

As mentioned at the end of Section 2, once H1 is confirmed,  $PAR_i^\circ$  is calculated. This is considered as a typical or representative daily PAR series for each pixel of the study area. It is obtained by averaging the daily PAR for the eight-year dataset. The representative annual PAR is computed by summing the daily values,  $\Sigma PAR_i^\circ$ . For each year  $Y$  from 2005 to 2012, the average VI images ( $\overline{NDVI}^Y$  and  $\overline{EVI}^Y$ ) are obtained using Equation (7) and the  $GPP_{annual}^{REF}$  images are calculated using Equation (2) with the daily GPP images at 1-km spatial resolution described in Section 3.2.2.

Next, correlations between  $\overline{NDVI}^Y$  and  $GPP_{annual}^{REF}$  images, and between  $\overline{EVI}^Y$  and  $GPP_{annual}^{REF}$  images, are analyzed to establish two sets of coefficients  $C_1$  and  $C_2$ . The calibration (obtaining  $C_1$  and  $C_2$ ) and testing of the semi-empirical model are performed simultaneously by means of a cross-validation procedure [46]. This procedure allowed us to calculate and test the model parameters from the eight years data used in this study. The cross-validation method systematically removes one case in a dataset (a year data in our case), derives a forecast from the remaining cases, and tests it on the removed case. The procedure is nonparametric and can be applied to any automated model-building technique.

To carry out the cross-validation procedure, data are divided into eight partitions corresponding to each one of the eight available annual images of GPP and weighted NDVI. The procedure is as follows. For year  $Y$  ( $=2005-2012$ ), the images of years  $\neq Y$  are used to train a linear model. The model is validated using the images of year  $= Y$ . The coefficient of correlation ( $R$ ), MBE (mean bias error), MAE (mean absolute error), RMSE (root mean square error), and their relative values (rMBE, rMAE, and rRMSE) are calculated. Finally, the mean and standard deviation of the regression coefficients are calculated and considered as the final regression coefficients of the model and their associated errors.

The cross validation is carried out in two ways: (i) considering a constant value of the conversion efficiency ( $C_1$  and  $C_2$  are independent of the land-cover class); and (ii) considering that  $C_1$  and  $C_2$  depend on vegetation, according to the two thematic maps described in Section 3.2. A flowchart for  $GPP_{\text{annual}}$  estimation using the semi-empirical model is shown in Figure 2.

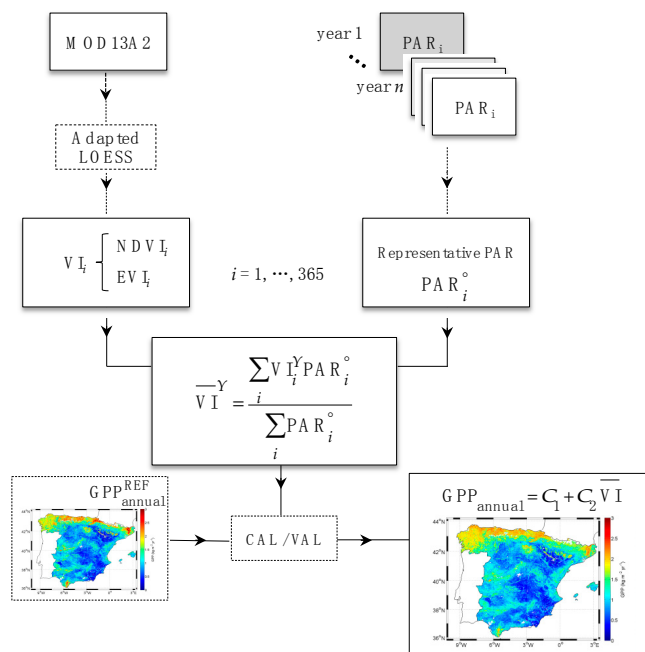


Figure 2. Flowchart of  $GPP_{\text{annual}}$  estimation using the PAR-weighted VI (being  $VI = NDVI, EVI$ ).

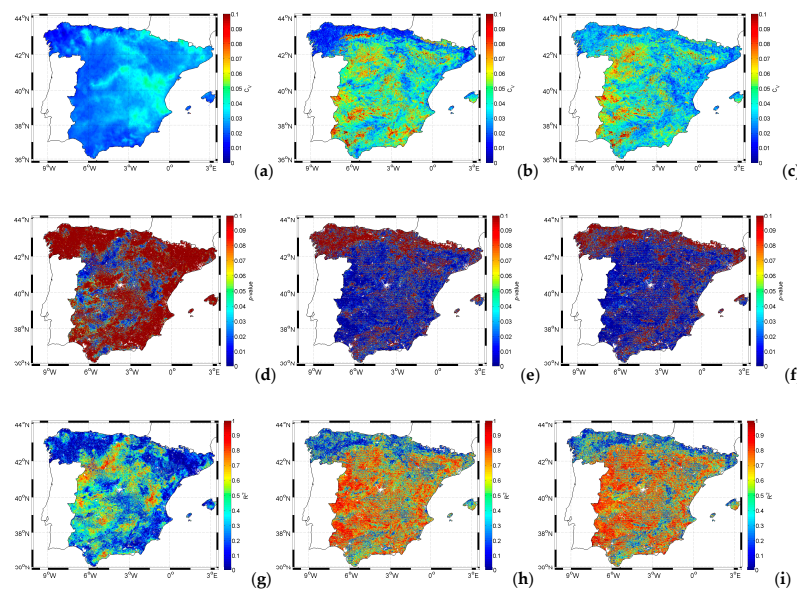
### 4. Results

#### 4.1. H1 Hypothesis Testing

Annual PAR images for the eight years (see Section 3.1) and a coefficient of variation image were calculated (Figure 3a). The coefficient of variation (mean value equal to 0.026) shows the inter-annual variability of the annual PAR throughout the period 2005–2012, which is less than 5%, in the entire study area. Thus, the annual PAR can be considered practically constant. Its variation is ca. 50% lower than that corresponding to the annual mean NDVI and EVI (Figure 3b,c). Annual-mean VI and reference annual GPP series (not shown) present rather similar spatial patterns. A further analysis has

been carried to assess the effects of both the daily PAR, NDVI and EVI inter-annual variability on the reference annual GPP.

The results of the correlations GPP/PAR (Figure 3d) show that only the 25% of the pixels present a  $p$ -value  $\leq 0.05$ , (i.e., statistically significant, with mean  $R^2 = 0.62$ ), whereas 64% of the pixels show a  $p$ -value  $\leq 0.05$  for the correlation GPP/NDVI ( $R^2 = 0.73$ ) and 65% for the GPP/EVI ( $R^2 = 0.74$ ). Therefore, the NDVI (and EVI) inter-annual variations play a significant role in the GPP inter-annual variations. As the daily PAR series of all eight years show similar characteristic seasonal patterns, hypothesis H1 is accepted. That is, we assume that annual PAR is practically constant (as compared with NDVI and EVI) and each pixel can be characterized by a representative  $PAR_i^o$  series. The annual representative PAR ( $\Sigma PAR_i^o$ ) coincides with the average PAR shown in Figure 1b.

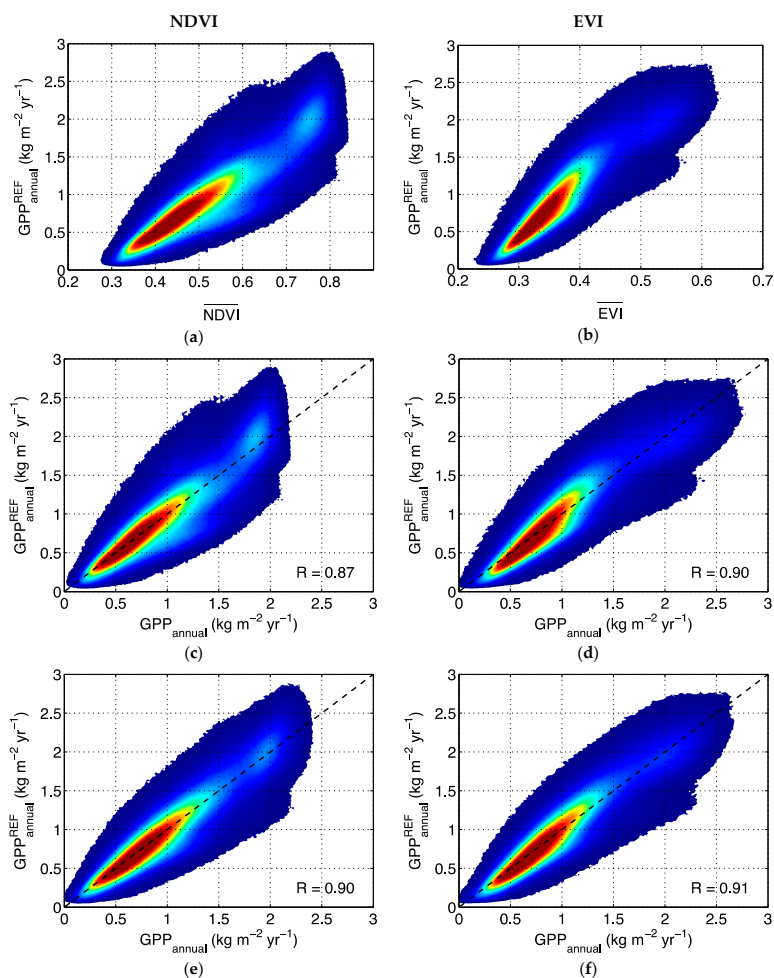


**Figure 3.** Coefficient of variation among the eight-year dataset of: (a) annual PAR; (b) annual mean NDVI; and (c) annual mean EVI.  $p$ -value of correlations between inter-annual variations for the eight years of annual GPP and those from: (d) annual PAR; (e) annual mean NDVI; and (f) annual mean EVI.  $R^2$  for the above correlations: (g) GPP/PAR; (h) GPP/NDVI; and (i) GPP/EVI.

#### 4.2. Calibration and Validation of the Semi-Empirical Model

The density scatterplot of  $GPP_{annual}^{REF}$  as a function of both  $\overline{NDVI}^Y$  and  $\overline{EVI}^Y$  for all the image pixels and all years (Figure 4a,b, respectively) evidences a practically linear correlation. Therefore, in a first step, the regression coefficients  $C_1$  and  $C_2$  (Equation (4), using reference annual GPP data) are obtained assuming a constant conversion efficiency value  $\epsilon$ . The cross-validation procedure is applied to these data to obtain  $C_1$  and  $C_2$  using NDVI and EVI (Tables 2 and 3). The corresponding estimated  $GPP_{annual}$  values using NDVI and EVI are shown in Figure 4c,d, respectively. Most of the estimates distribute along the 1:1 line, which indicates a good agreement between the reference and the estimated GPP. However, when using the NDVI, there is a cluster located at high levels of GPP that does not lie along the 1:1 line, which indicates an underestimation of the model for high GPP values. The corresponding

pixels are located in dense forest areas (Figure 5). The last column in Table 3 shows the statistics of the correlation between estimated and reference annual GPP using the mean values of  $C_1$  and  $C_2$ .



**Figure 4.** A density plot including all image pixels and all years evidences the correlation between: (a)  $GPP_{annual}^{REF}$  and  $\overline{NDVI}^Y$ ; and (b)  $GPP_{annual}^{REF}$  and  $\overline{EVI}^Y$ . Correlation between  $GPP_{annual}^{REF}$  and  $GPP_{annual}$  estimated by the semi-empirical model with a constant conversion efficiency using: (c) NDVI; and (d) EVI. Correlation between  $GPP_{annual}^{REF}$  and  $GPP_{annual}$  estimated by the semi-empirical model with a conversion efficiency depending on the land-cover type using: (e) NDVI; and (f) EVI (Reddish areas correspond to the highest point density. The dashed line is the 1:1 bisector).

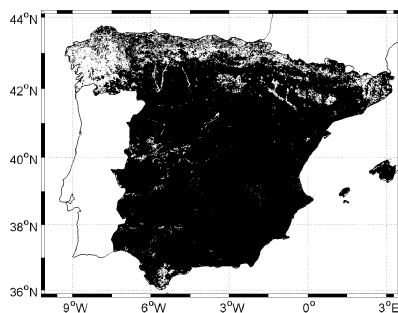


**Table 2.** Regression coefficients  $C_1$  and  $C_2$  (in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) for each iteration and their final values and errors. For each year, each coefficient has been obtained using the rest of the years. Results are shown for NDVI and EVI.

NDVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Mean	Std
$C_1$	-1.031	-1.050	-1.030	-1.027	-1.021	-1.029	-1.038	-1.022	-1.031	0.009
$C_2$	3.843	3.862	3.819	3.818	3.818	3.826	3.848	3.828	3.833	0.017
EVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Mean	Std
$C_1$	-1.611	-1.625	-1.615	-1.619	-1.592	-1.605	-1.613	-1.604	-1.160	0.010
$C_2$	6.97	6.99	6.96	6.98	6.91	6.93	6.96	6.94	6.96	0.03

**Table 3.** Validation statistics for each iteration and for the whole data set (in this case, using the mean values of  $C_1$  and  $C_2$  shown in Table 2). MBE, MAE and RMSE are expressed in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ . Results are shown for NDVI and EVI.

NDVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	All	
R	0.88	0.85	0.86	0.87	0.88	0.86	0.86	0.88	0.87	
MBE	0.03	-0.03	-0.05	-0.03	0.005	-0.02	0.0008	0.04	-0.008	
MAE	0.18	0.20	0.2	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
RMSE	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
rMBE	0.03	-0.03	-0.04	-0.03	0.005	-0.02	0.0008	0.04	-0.006	
rMAE	0.20	0.19	0.18	0.18	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	
rRMSE	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	
EVI										
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	All	
R	0.91	0.89	0.90	0.90	0.91	0.89	0.89	0.90	0.90	
MBE	0.03	-0.011	-0.017	-0.010	-0.012	-0.04	-0.03	0.008	-0.009	
MAE	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.17	0.17	
RMSE	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
rMBE	0.04	-0.011	-0.015	-0.009	-0.013	-0.03	-0.03	0.008	-0.008	
rMAE	0.18	0.17	0.15	0.16	0.17	0.16	0.17	0.18	0.17	
rRMSE	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	



**Figure 5.** The model underestimates the annual GPP in the lighter pixels when using NDVI.

The consideration of different vegetation types implies adjusting the distributions in Figure 4a,b using different regression lines. The hybrid land-cover map for the study area [44] has been used to apply the cross-validation procedure for each vegetation class: (1) irrigated lands; (2) cultivated areas; (3) cropland mosaic; (4) broad-leaved forest; (5) needle-leaved forest; (6) mixed forest; (7) shrubs; (8) herbaceous; and (9) sparse vegetation. As a result, values of  $C_1$  and  $C_2$  have been obtained for each

iteration and for each land-cover type. For the sake of brevity, Tables 4 and 5 summarize the mean value and standard deviation of  $C_1$  and  $C_2$  for each land-cover type, as well as the global validation statistics. The correlation between the estimates and the reference annual GPP using the coefficients in Table 4 is shown in Figure 4e,f for NDVI and EVI, respectively. In Figure 4e, the cluster corresponding to highest GPP pixels distributes also along the 1:1 line and, thus, the global correlation between NDVI estimated and reference annual GPP data increases from 0.87 to 0.90 (last column in Table 5) when considering different values of  $C_1$  and  $C_2$  for each land-cover type. However, when using the EVI the estimates hardly improve. Therefore, with EVI the uncertainties of the estimates are rather good even without using a vegetation map.

**Table 4.** Mean value and standard deviation (below each value, between brackets) of the regression coefficients for each land-cover type. Code: (1) irrigated lands; (2) cultivated areas; (3) cropland mosaic; (4) broad-leaved forest; (5) needle-leaved forest; (6) mixed forest; (7) shrubs; (8) herbaceous; and (9) sparse vegetation.  $C_1$  and  $C_2$  are expressed in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ . Results are shown for NDVI and EVI.

		NDVI								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_1$		−1.610 (0.009)	−1.143 (0.007)	−1.190 (0.017)	−1.50 (0.03)	−1.046 (0.011)	−1.44 (0.02)	−0.975 (0.009)	−1.194 (0.013)	−1.019 (0.008)
$C_2$		5.682 (0.018)	4.164 (0.018)	4.20 (0.03)	4.68 (0.04)	3.561 (0.019)	4.40 (0.04)	3.302 (0.017)	4.15 (0.02)	3.62 (0.02)
		EVI								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_1$		−1.825 (0.011)	−1.562 (0.007)	−1.311 (0.018)	−1.15 (0.02)	−1.498 (0.009)	−1.01 (0.02)	−1.421 (0.007)	−1.337 (0.013)	−1.735 (0.007)
$C_2$		7.99 (0.03)	6.68 (0.02)	6.25 (0.04)	6.15 (0.05)	6.95 (0.03)	5.77 (0.06)	6.319 (0.017)	6.25 (0.03)	7.29 (0.03)

The different vegetation types present rather similar statistics. Cultivated areas, croplands and herbaceous show high coefficient of correlation values, and irrigated lands and shrubs show the lowest values, though still relatively high. The lower rMBE values correspond to herbaceous and needle-leaved forest. When analyzing the spatial dependence of the estimates uncertainties (average for all the years) in terms of the rMBE, it is observed that most of the estimates present a bias around zero (Figure 6), and the different vegetation types present rather similar values. When using constant regressions coefficients, for the estimates from both NDVI (Figure 6a) and EVI (Figure 6b), 20% of the pixels have  $|rMBE| \leq 5\%$  (and 68% of the pixels have  $|rMBE| \leq 20\%$ ). When using coefficients depending on the vegetation type, the 24% of pixels have  $|rMBE| \leq 5\%$  (and 73% have  $|rMBE| \leq 20\%$ ) for NDVI (Figure 6c) and EVI (Figure 6d). The rMBE image using both constant and vegetation-type dependent values of  $C_1$  and  $C_2$ , shows that in the second case the red and blue areas (overestimation and underestimation) are reduced (Figure 6). That is, when considering variable  $C_1$  and  $C_2$ , the bias of the semi-empirical model is slightly reduced. However, when using NDVI some areas located in W (small area with very low vegetation cover) and SE Spain still present overestimates of ca. 100%. Something similar occurs in the semiarid Ebro basin in NE Spain when using instead the EVI. Those areas located in SE and NW Spain comprise semiarid lands with a very low productivity (see Figure 1c). Then, although the bias is important in relative terms, it is not so in absolute terms because the aforementioned areas have very low GPP. Other areas presenting bias between 20% and 40% can also be identified, which are not clearly associated with a vegetation type. The presence of some areas with significant bias might be associated with the thematic map used. However, the use of an ecosystem functional type map [38] produces no improvement. The global statistics for the validation when using this alternative map with NDVI are  $R = 0.88$ ,  $rMBE = -0.010$ ,  $rMAE = 0.18$ , and  $rRMSE = 0.2$ . That is, the correlation between the model estimates and the reference GPP is

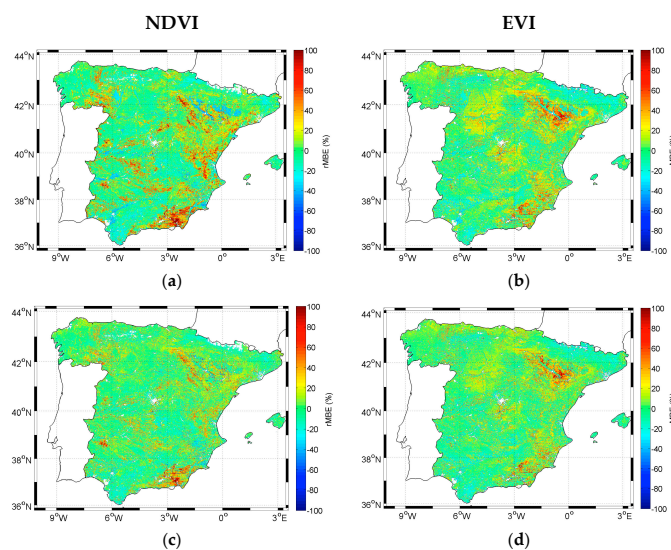
decreased, and the uncertainties are slightly increased, with respect to those obtained using the hybrid classification map.

**Table 5.** Validation statistics for each vegetation type and for the whole data set. Code: (1) irrigated lands; (2) cultivated areas; (3) cropland mosaic; (4) broad-leaved forest; (5) needle-leaved forest; (6) mixed forest; (7) shrubs; (8) herbaceous; and (9) sparse vegetation. MBE, MAE and RMSE are expressed in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ . Results are shown NDVI and EVI.

NDVI										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Global
<b>R</b>	0.75	0.90	0.89	0.83	0.79	0.83	0.75	0.89	0.84	0.90
<b>MBE</b>	0.0011	-0.005	0.007	0.006	-0.002	-0.0003	-0.013	-0.004	-0.013	-0.007
<b>MAE</b>	0.3	0.13	0.18	0.2	0.18	0.2	0.2	0.16	0.16	0.17
<b>RMSE</b>	0.4	0.18	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
<b>rMBE</b>	0.0008	-0.007	0.005	0.004	-0.0017	-0.00018	-0.015	-0.004	-0.018	-0.007
<b>rMAE</b>	0.2	0.16	0.13	0.15	0.15	0.12	0.2	0.15	0.2	0.16
<b>rRMSE</b>	0.3	0.2	0.18	0.19	0.2	0.16	0.3	0.2	0.3	0.2

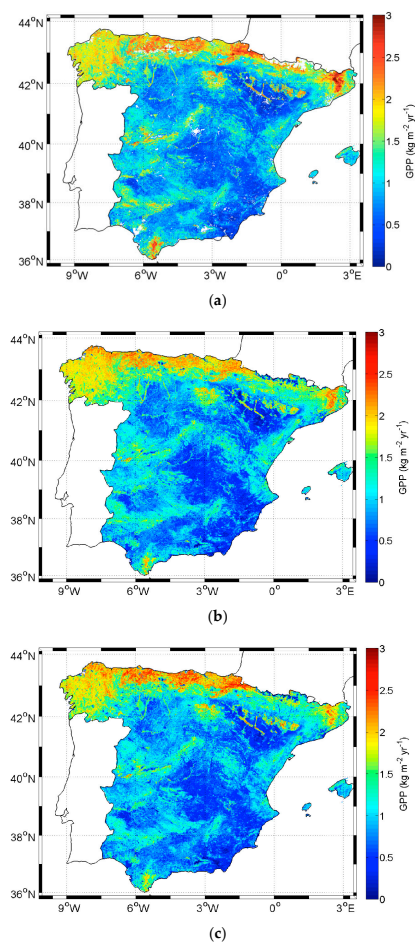
  

EVI										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Global
<b>R</b>	0.76	0.90	0.90	0.84	0.81	0.85	0.80	0.90	0.87	0.91
<b>MBE</b>	0.005	-0.009	0.0005	0.002	0.004	-0.0019	-0.007	-0.006	-0.008	-0.009
<b>MAE</b>	0.3	0.13	0.18	0.2	0.17	0.18	0.19	0.16	0.14	0.16
<b>RMSE</b>	0.4	0.18	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.19	0.2
<b>rMBE</b>	0.004	-0.011	0.0004	0.0015	0.004	-0.0012	-0.008	-0.005	-0.011	-0.009
<b>rMAE</b>	0.2	0.16	0.13	0.14	0.14	0.11	0.2	0.15	0.19	0.16
<b>rRMSE</b>	0.3	0.2	0.18	0.18	0.19	0.15	0.3	0.19	0.3	0.2



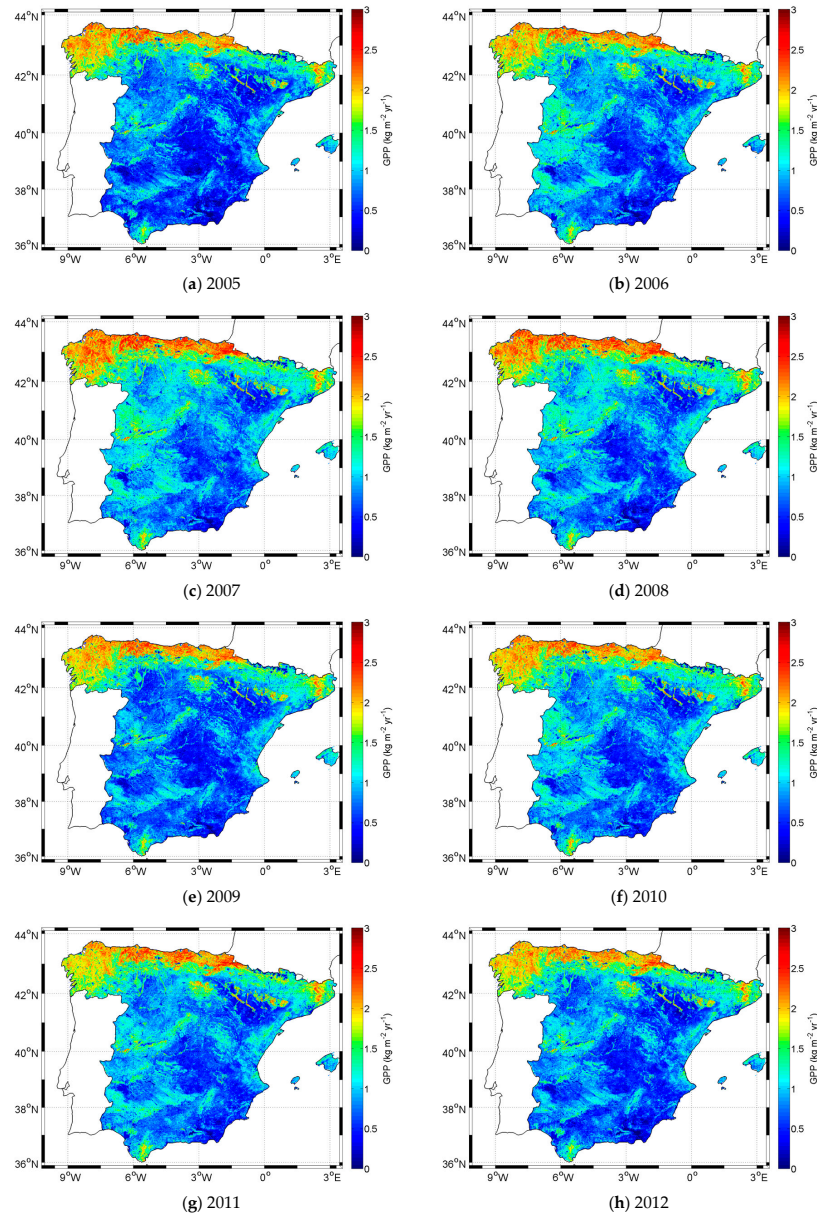
**Figure 6.** Mean rMBE (%) image showing the spatial distribution of the discrepancies between the estimated and the reference annual GPP: (a) Estimated annual GPP using the semi-empirical model with NDVI and with constant values of  $C_1$  and  $C_2$ ; and (c) considering  $C_1$  and  $C_2$  as a function of the land-cover type; (b) Estimated annual GPP using the semi-empirical model with EVI and with constant values of  $C_1$  and  $C_2$ ; and (d) considering  $C_1$  and  $C_2$  as a function of the land-cover type (red colors correspond to overestimates and blue color to underestimates).

As mentioned above, Figure 6 shows average uncertainties for all the years when using the hybrid classification map. For the year 2011, the comparison between reference and estimated annual GPP data (Figure 7) shows a similar spatial pattern, although the model slightly underestimates GPP in highly productive areas corresponding to dense forests (Figure 5), more noticeable when using NDVI.



**Figure 7.** (a) Reference annual GPP and estimated  $GPP_{\text{annual}}$  (in  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) for 2011 using: (b) NDVI; and (c) EVI.

Finally, as an example, Figure 8 shows the annual GPP images for the 2005–2012 period obtained using the proposed model with EVI and the coefficients in Table 4. The observed inter-annual variability in GPP is influenced mostly by changes in structural parameters of the vegetation, and thus by the EVI, which is connected with precipitation pattern. When precipitation diminishes, for example in 2005 [47], a reduction in GPP is observed. In a wetter year, such as 2010, an increase of GPP is shown.



**Figure 8.** Images of  $\text{GPP}_{\text{annual}}$  (in  $\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ) for the 2005–2012 period obtained using the semi-empirical model with EVI and the coefficients in Table 4.

## 5. Discussion

The proposed semi-empirical model to estimate GPP does not require actual meteorological data. It exclusively relies on a vegetation index product commonly available—the MOD13A2 in this case—and on a representative PAR.

The underlying assumption of the model is that VI is the main factor determining the GPP inter-annual variations. The use of a representative PAR in our model marks a qualitative distinction from those approaches based on a linear relationship between an annual cumulative or mean VI and the annual GPP [2,48,49]. The rationale of our model is also different from the greenness-radiation models that consider GPP equal to the product of a VI and PAR [50]. Certainly, a key factor accounting for the annual GPP is the annual cumulative or mean VI, but our model calculates a PAR-weighted annual mean VI. The use of the representative daily PAR as a weighting factor is important because VI gives the fraction of PAR absorbed but not the total absolute PAR absorbed. The same VI can produce different GPP depending on the incident radiation, and the latter shows a marked seasonal variability that affects differently the different vegetation types, depending on their phenology.

The calibration/validation process, however, does require a reference GPP product and, obviously, the higher the quality of the reference GPP product, the better the performance of the semi-empirical model. In this study, a daily GPP product optimized for the study area has been used to calculate the reference annual GPP instead of using the annual GPP from MODIS (MOD17A3). Although both products show a temporal consistency [4], our product benefits from: an accurate PAR product, a land-cover map more adapted to the study area and a water stress factor that better accounts for the photosynthesis reduction during the summer water shortage. Nevertheless, the MOD17A3 product can be also used as reference to calibrate the model (and could even be recommended for a global study). In order to further test the methodology robustness, the calibration/validation process has been repeated using MOD17A3 as reference for both VIs and considering both constant regression coefficients and coefficients depending on the vegetation type (Table 6).

**Table 6.** Summary of the validation statistics (R, rRMSE, rMBE and rMAE) of the semi-empirical model estimates when driven by NDVI and EVI (with and without a vegetation map) and using as reference  $GPP_{\text{annual}}^{\text{REF}}$ , the aforementioned GPP product optimized for the study area ( $GPP_{\text{OPT}}$ ) as well as the official MODIS GPP product MOD17A3 ( $GPP_{\text{MODIS}}$ ).

	NDVI		EVI	
	Constant Values of $C_1$ and $C_2$	$C_1$ and $C_2$ Values Depending on Vegetation	Constant Values of $C_1$ and $C_2$	$C_1$ and $C_2$ Values Depending on Vegetation
<b>REFERENCE: <math>GPP_{\text{OPT}}</math></b>	R = 0.87	R = 0.90	R = 0.90	R = 0.91
	rRMSE = 0.3	rRMSE = 0.2	rRMSE = 0.2	rRMSE = 0.2
	rMBE = -0.008	rMBE = -0.007	rMBE = -0.009	rMBE = -0.009
	rMAE = 0.19	rMAE = 0.16	rMAE = 0.17	rMAE = 0.16
<b>REFERENCE: <math>GPP_{\text{MODIS}}</math></b>	R = 0.87	R = 0.87	R = 0.84	R = 0.86
	rRMSE = 0.3	rRMSE = 0.3	rRMSE = 0.3	rRMSE = 0.3
	rMBE = -0.07	rMBE = -0.05	rMBE = -0.07	rMBE = -0.05
	rMAE = 0.17	rMAE = 0.16	rMAE = 0.2	rMAE = 0.18

Table 6 confirms that the MOD17A3 product can be also used as reference to calibrate the model, which significantly extends the range of applicability of the methodology. The additional requisite is the availability of a representative PAR image that could be estimated at the cost of a coarser spatial resolution from databases such as GMAO (Global Modeling Assimilation Office) or ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast).

Since the results have shown a good agreement with reference data, the proposed methodology can be used to generate long series of annual GPP to detect regional changes without requiring actual PAR,  $f_{\text{APAR}}$  and  $\epsilon$ . As commented in the literature [27], the absorbed photosynthetic radiation and  $\epsilon$  are somehow linked; in this work, the link is established by means of the vegetation indices NDVI

and EVI. The time series of EVI is shorter than the NDVI one and it is limited to sensors with the blue band. Nevertheless, a longer series could be generated using the two-band enhanced vegetation index, EVI2 [51], which is an acceptable and accurate substitute of EVI without the blue band.

Annual GPP could be obtained even when no classification map is available with similar uncertainty when using EVI (and with a slightly higher uncertainty in the case of using NDVI), or even in global studies using lower spatial resolution images such as SEVIRI-MSG. On the other hand, there is no need to work with daily images. It is possible to work directly with the original MODIS products, for example, the NDVI at 16-day temporal resolution, or even with a monthly NDVI without losing functionality. To assess their performance, the annual GPP has been calculated using both products with constant  $C_1$  and  $C_2$ . The validation statistics using the 16-day and 30-day products are exactly the same as those from the daily product shown in Table 3. Only a negligible change in the bias (from  $-0.008$  to  $-0.007$ ) is observed when using monthly NDVI values.

The model, mainly when it is driven with NDVI, overestimates the annual GPP in semiarid areas and slightly underestimates it in dense forest areas. This conclusion has been reached when using both a vegetation class map and an ecosystem functional type map. The overestimation in semiarid areas when using NDVI might be a consequence of NDVI sensitivity to canopy background variations, especially important in sparse vegetation areas (as bare soil NDVI does not equal to zero, then  $f_{APAR}$  is slightly overestimated). This overestimation, although reduced, is not completely removed when using EVI. A light, general, GPP overestimation is found in semiarid areas. It could be a consequence of the photosynthesis reduction due to water stress that is not completely taken into account by the semi-empirical model, which evidences that the hypothesis H3 might be somehow inaccurate, that is, the vegetation index decrease does not fully characterize the photosynthesis reduction by water stress. However, the GPP in these areas is very low and therefore the absolute value of the uncertainty is low.

On the other hand, the underestimation in dense forest areas could be attributed to the NDVI saturation at high LAI levels. Generally, most vegetation indices approach a saturation level asymptotically in high biomass regions and for a certain range of LAI values [8]. The dynamic range and the saturation depend on the particular VI. We found the NDVI to asymptotically saturate in dense forest areas while the EVI remained sensitive to canopy variations (Figure 4b). Thus the model benefits from the wider dynamic range of EVI, slightly improving the GPP estimation over dense forests as previously shown in closed forest stands (for example in Sweden [52]). Despite this improvement, a very light, general underestimation of GPP in dense forest areas is still observed and it might be attributed to the fact that the leaf photosynthetic response to light is a non-linear process. Although the integration over time scales of two weeks or more tends to linearize the photosynthesis response curve to light [15], it seems that the non-linearity has not been completely removed. Boreal forest, much denser than Mediterranean forest, would be potentially more affected by this effect and thus no conclusions can be derived on the performing of our model in these areas.

## 6. Conclusions

The annual GPP has been estimated at 1-km spatial resolution from the MODIS standard VI products (NDVI and EVI) and the semi-empirical model, Equation (4), with  $C_1$  and  $C_2$  obtained, as a function of the vegetation type, as the coefficients of the linear regression between the reference annual GPP—calculated using Equation (2) with daily GPP data [4]—and the PAR-weighted average VI (Equation (7)).

The main advantage of the semi-empirical model to estimate annual GPP is that it does not require actual meteorological data, thus solving a problem that is often faced, especially in retrospective studies. The model exclusively relies on a vegetation index product commonly available—the MOD13A2 in this case—and on a representative PAR (calculated for a time period sufficiently long although that might not be the same as the period when GPP is estimated). The calibration/validation process, however, does require a reference GPP product and, obviously, the higher the quality of the reference GPP product, the better the performance of the semi-empirical model.

The performance of the model has been assessed in its ability to reproduce inter-annual variations of GPP in close agreement with those shown by the reference data. A total of eight essays have been performed using all the possible combination among the model driven by: NDVI or EVI, with or without vegetation map, and using as reference a previous GPP product generated by the authors [4] or the MODIS GPP product. The different statistics (Table 6) have shown a good agreement between the estimates and the reference data sets, with correlation coefficient between 0.84 and 0.91 and relative RMSE between 20% and 30% in all the cases, enhancing the robustness of the method and its applicability to other regions and potentially to other sensors with similar or lower spatial and temporal resolutions. However, special attention must be given to its applicability in semiarid areas, where the semi-empirical model overestimates the annual GPP, and in very dense forest areas, where the model slightly underestimates GPP. In the latter case, uncertainties are lower when using EVI instead of NDVI. Besides improving vegetation monitoring over high biomass conditions, EVI offers some other advantage: its performance does not depend on a vegetation map and hence this map is not a crucial requirement to apply the methodology.

With the above limitations, it is concluded that the proposed semi-empirical model provides an excellent compromise between simplicity and accuracy for the calculation of long time series of annual GPP.

**Acknowledgments:** This work has been partially supported by ESCENARIOS (MINECO, CGL2016-75239-R), RESET CLIMATE (MINECO, CGL2012-35831) and LSA SAF (EUMETSAT) projects. Special thanks are due to José A. Manzanares for their valuable suggestions. The MOD13A2 and MOD17A3 products were retrieved from the online Reverb, courtesy of the NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (reverb.earth.nasa.gov). The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments.

**Author Contributions:** All authors contributed equally to the development of this research.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Reichstein, M.; Falge, E.; Baldocchi, D.; Papale, D.; Aubinet, M.; Berbigier, P.; Bernhofer, C.; Buchmann, N.; Gilmanov, T.; Granier, A.; et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Glob. Chang. Ecol.* **2005**, *11*, 1424–1439. [[CrossRef](#)]
2. Huete, A.; Ponce-Campos, G.; Zhang, Y.; Restrepo-Coupe, N.; Ma, X.; Moran, M.S. Monitoring photosynthesis from space. In *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing*; Thenkabail, P.S., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2015; pp. 3–22.
3. Mäkelä, A.; Kolari, P.; Karimäki, J.; Nikinmaa, E.; Perämäki, M.; Hari, P. Modelling five years of weather-driven variation of GPP in a boreal forest. *Agric. For. Meteorol.* **2006**, *139*, 382–398. [[CrossRef](#)]
4. Gilabert, M.A.; Moreno, A.; Maselli, F.; Martínez, B.; Chiesi, M.; Sánchez-Ruiz, S.; García-Haro, F.J.; Pérez-Hoyos, A.; Campos-Taberner, M.; Pérez-Priego, O.; et al. Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2015**, *102*, 184–197. [[CrossRef](#)]
5. Maselli, F.; Papale, D.; Puletti, N.; Chirici, G.; Corona, P. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sens. Environ.* **2009**, *113*, 657–667.
6. Monteith, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* **1972**, *9*, 747–766. [[CrossRef](#)]
7. Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; Harlan, J.C. *Monitoring the Vernal Advancements and Retrogradation of Natural Vegetation*; Final Report; NASA Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA, 1974; pp. 1–137.
8. Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* **2002**, *83*, 195–213. [[CrossRef](#)]
9. Lean, J.L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *WIREs Clim. Chang.* **2010**, *1*, 111–122. [[CrossRef](#)]



10. Stanhill, G.; Cohen, S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.* **2001**, *107*, 255–278. [[CrossRef](#)]
11. Wild, M.; Gilgen, H.; Roesch, A.; Ohmura, A.; Long, C.N.; Dutton, E.G.; Forgan, B.; Kallis, A.; Russak, V.; Tsvetkov, A. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science* **2005**, *308*, 845–850. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Black, K.; Davis, P.; Lynch, P.; Jones, M.; McGettigan, M.; Osborne, B. Long-term trends in solar irradiance in Ireland and their potential effects on gross primary productivity. *Agric. For. Meteorol.* **2006**, *141*, 118–132. [[CrossRef](#)]
13. Jongen, M.; Pereira, J.S.; Aires, L.M.I.; Pio, C.A. The effects of drought and timing of precipitation on the inter-annual variation in ecosystem-atmosphere exchange in a Mediterranean grassland. *Agric. For. Meteorol.* **2011**, *151*, 595–606. [[CrossRef](#)]
14. Higuchi, K.; Shashkov, A.; Chan, D.; Saigusa, N.; Murayama, S.; Yamamoto, S.; Kondo, H.; Chen, J.; Liu, J.; Chen, B. Simulations of seasonal and inter-annual variability of gross primary productivity at Takayama with BEPS ecosystem model. *Agric. For. Meteorol.* **2005**, *134*, 143–150. [[CrossRef](#)]
15. Medlyn, B.; Barrett, D.; Landsberg, J.; Sands, J.; Sands, P.; Clement, R. Conversion of canopy intercepted radiation to photosynthate: Review of modelling approaches for regional scales. *Funct. Plant Biol.* **2003**, *30*, 153–169. [[CrossRef](#)]
16. Fensholt, R.; Sandholt, I.; Rasmussen, M.S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sens. Environ.* **2004**, *91*, 490–507. [[CrossRef](#)]
17. Huemmrich, K.F.; Gamon, J.A.; Tweedie, C.E.; Oberbauer, S.F.; Kinoshita, G.; Houston, S.; Kuchy, A.; Hollister, R.D.; Kwon, H.; Mano, M.; et al. Remote sensing of tundra gross ecosystem productivity and light use efficiency under varying temperature and moisture conditions. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 481–489. [[CrossRef](#)]
18. Sims, D.A.; Rahman, A.F.; Cordova, V.D.; El-Masri, B.Z.; Baldocchi, D.D.; Flanagan, L.B.; Goldstein, A.H.; Hollinger, D.Y.; Misson, L.; Monson, R.K.; et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *J. Geophys. Res.* **2006**. [[CrossRef](#)]
19. Viña, A.; Gitelson, A.A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops. *Geophys. Res. Lett.* **2005**. [[CrossRef](#)]
20. Wu, C.; Chen, J.M.; Desai, A.R.; Hollinger, D.Y.; Arain, M.A.; Margolis, H.A.; Gough, C.M.; Staebler, R.M. Remote sensing of canopy light use efficiency in temperate and boreal forests of North America using MODIS imagery. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *118*, 60–72. [[CrossRef](#)]
21. Wu, C.; Niu, Z.; Gao, S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize. *J. Geophys. Res.* **2010**. [[CrossRef](#)]
22. Dong, J.; Xiao, X.; Wagle, P.; Zhang, G.; Zhou, Y.; Jin, C.; Torno, M.S.; Meyers, T.P.; Suyker, A.E.; Wang, J.; et al. Comparison of four EVI-based models for estimating gross primary production of maize and soybean croplands and tallgrass prairie under severe drought. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *162*, 154–168. [[CrossRef](#)]
23. Gamon, J.A.; Peñuelas, J.; Field, C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sens. Environ.* **1992**, *41*, 35–44. [[CrossRef](#)]
24. Soudani, K.; Hmimina, G.; Dufrene, E.; Berbeiller, D.; Delpierre, N.; Ourcival, J.-M.; Rambal, S.; Joffre, R. Relationships between photochemical reflectance index and light-use efficiency in deciduous and evergreen broadleaf forests. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *144*, 73–84. [[CrossRef](#)]
25. Gitelson, A.; Peng, Y.; Arkebauer, T.J.; Schepers, J. Relationships between gross primary production, green LAI, and canopy chlorophyll content in maize: Implications for remote sensing of primary production. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *144*, 65–72. [[CrossRef](#)]
26. Gitelson, A.A.; Viña, A.; Verma, S.B.; Rundquist, D.C.; Arkebauer, T.J.; Keydan, G.; Leavitt, B.; Ciganda, V.; Burba, G.G.; Suyker, A.E. Relationship between gross primary production and chlorophyll content in crops: Implications for the synoptic monitoring of vegetation productivity. *Geophys. Res. Lett.* **2006**. [[CrossRef](#)]
27. Gitelson, A.; Gamon, J.A. The need for a common basis for defining light-use efficiency: Implications for productivity estimation. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *156*, 196–201. [[CrossRef](#)]

28. Connolly, J.; Roulet, N.T.; Seaquist, J.W.; Holden, N.M.; Lafleur, P.M.; Humphreys, E.R.; Heumann, B.W.; Ward, S.M. Using MODIS derived fPAR with ground based flux tower measurements to derive the light use efficiency for two Canadian peatlands. *Biogeosciences* **2009**, *6*, 225–234. [[CrossRef](#)]
29. Coops, N.C.; Hilker, T.; Hall, F.G.; Nichol, C.J.; Drolet, G.G. Estimation of light-use efficiency of terrestrial ecosystems from space: A status report. *BioScience* **2010**, *60*, 788–797. [[CrossRef](#)]
30. Garbulsky, M.F.; Peñuelas, J.; Papale, D.; Ardö, J.; Goulden, M.L.; Kiely, G.; Richardson, A.D.; Rotenberg, E.; Veenendaal, E.M.; Filella, I. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2010**, *19*, 253–267. [[CrossRef](#)]
31. Kanniah, K.D.; Beringer, J.; Hutley, L.B. Response of savanna gross primary productivity to inter-annual variability in rainfall: Results of a remote sensing based light use efficiency model. *Prog. Phys. Geogr.* **2013**, *37*, 642–663. [[CrossRef](#)]
32. Turner, D.P.; Urbanski, S.; Bremer, D.; Wofsy, S.C.; Meyers, T.; Gower, S.T.; Gregory, M. A cross-biome comparison of daily light use efficiency for gross primary production. *Glob. Chang. Biol.* **2003**, *9*, 383–395. [[CrossRef](#)]
33. Moreno, A.; Maselli, F.; Gilabert, M.A.; Chiesi, M.; Martínez, B.; Seufert, G. Assessment of MODIS imagery to track light-use efficiency in a water-limited Mediterranean pine forest. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *123*, 359–367. [[CrossRef](#)]
34. Moreno, A.; Maselli, F.; Chiesi, M.; Genesis, L.; Vaccari, F.; Seufert, G.; Gilabert, M.A. Monitoring water stress in Mediterranean semi-natural vegetation with satellite and meteorological data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2014**, *26*, 246–255. [[CrossRef](#)]
35. Davenport, M.L.; Nicholson, S.E. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa. *Int. J. Remote Sens.* **1993**, *14*, 2369–2389. [[CrossRef](#)]
36. Ichii, L.; Kawabata, A.; Yamaguchi, Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990. *Int. J. Remote Sens.* **2002**, *23*, 3873–3878. [[CrossRef](#)]
37. Del Barrio, G.; Puigdefábregas, J.; Sanjuan, M.E.; Stellmes, M.; Ruiz, A. Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989–2000. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1817–1832. [[CrossRef](#)]
38. Pérez-Hoyos, A.; Martínez, B.; García-Haro, F.J.; Moreno, A.; Gilabert, M.A. Identification of ecosystem functional types from coarse resolution imagery using a self-organizing map approach: A case study for Spain. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 11391–11419. [[CrossRef](#)]
39. LSA SAF. Product User Manual “Down-Welling Surface Shotwave Flux (DSSF)”, Version 2.6. 2011. Available online: <http://landsaf.meteo.pt/algorithms.jsp?seltab=1&starttab=1> (accessed on 15 November 2016).
40. Moreno, A.; Gilabert, M.A.; Camacho, F.; Martínez, B. Validation of daily global solar irradiation images from MSG over Spain. *Renew. Energy* **2013**, *60*, 332–342. [[CrossRef](#)]
41. Moreno, A.; Gilabert, M.A.; Martínez, B. Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches. *Sol. Energy* **2011**, *85*, 2072–2084. [[CrossRef](#)]
42. Roujean, J.L.; Bréon, F.M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* **1995**, *51*, 373–384. [[CrossRef](#)]
43. Moreno, A.; García-Haro, F.J.; Martínez, B.; Gilabert, M.A. Noise reduction and gap filling of fAPAR series using an adapted local regression filter. *Remote Sens.* **2014**, *6*, 8238–8260. [[CrossRef](#)]
44. Pérez-Hoyos, A.; García-Haro, F.J.; San Miguel Ayanz, J. A methodology to generate a synergetic land-cover map by fusion of different land-cover products. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2012**, *19*, 72–87. [[CrossRef](#)]
45. Running, S.W.; Zhao, M. *User’s Guide: Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2/A3) Products NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm*, Version 3.0; University of Montana: Missoula, MT, USA, 2015; pp. 1–28.
46. Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*; Series in Statistics; Springer: New York, NY, USA, 2009; p. 763.
47. AEMet (Meteorological Agency, Spanish Government). Resumen Climatológico Annual 2005. Available online: [http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/resumenes\\_climat/anuales/res\\_anual\\_clim\\_2005.pdf](http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes_climat/anuales/res_anual_clim_2005.pdf) (accessed on 23 July 2016).
48. Goward, S.N.; Tucker, C.; Dye, D. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio* **1985**, *64*, 3–14. [[CrossRef](#)]
49. Running, S.W.; Heinsch, F.A.; Zhao, M.; Reeves, M.; Hashimoto, H.; Nemani, R.R. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience* **2004**, *54*, 547–560. [[CrossRef](#)]

*Remote Sens.* **2017**, *9*, 193

21 of 21

50. Peng, Y.; Gitelson, A.A.; Sakamoto, T. Remote estimation of gross primary productivity in crops using MODIS 250 m data. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *128*, 186–196. [[CrossRef](#)]
51. Jiang, Z.; Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 3833–3845. [[CrossRef](#)]
52. Shubert, P.; Eklundh, L.; Lund, M.; Nilsson, M. Estimating northern peatland CO<sub>2</sub> exchange from MODIS time series data. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 1178–1189. [[CrossRef](#)]



© 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

**Maria Amparo Gilabert**  
 Para: support@mdpi.com  
 Obtaining Permission

7 de mayo de 2018 12:00

In relation to the paper:

Annual Gross Primary Production from Vegetation Indices: A Theoretically Sound Approach  
 by Maria Amparo Gilabert, Sergio Sanchez-Ruiz and Alvaro Moreno  
 Remote Sens. 2017, 9(3), 193; <https://doi.org/10.3390/rs9030193>

This publication is part of the PhD Thesis of Sergio Sanchez-Ruiz. Therefore, we ask for permission to include it (as an Appendix of the Thesis Report) and reproduce it in all formats (including electronic media).

Sincerely,

Maria Amparo Gilabert  
 UV-ERS (Environmental Remote Sensing group, [www.uv.es/uv/ers](http://www.uv.es/uv/ers))  
 Universitat de València

**CONFIDENTIALITY CLAUSE**

This message has been sent from a Universitat de València email account for the institution's own purposes. Its content and any files transmitted with it are intended solely for the use of the individual or entity to whom they are addressed and are considered confidential, except where justified by their specific nature. If you are not the named addressee, you should not disseminate, distribute or copy this email without consent. If you received this email in error, please notify the sender immediately and delete this email from your system. Please check out terms of use and privacy policies regarding the sending of emails (<http://links.uv.es/BBz6HG5>, <http://links.uv.es/GAk63v0>) at the Universitat de València institutional website. Any incident arising from the reception of our e-mails and, specifically from security and confidentiality issues, can be communicated to [lopd@uv.es](mailto:lopd@uv.es).

☆ Support <support@mdpi.com>

Para: Maria Amparo Gilabert  
 Re: Obtaining Permission

8 de mayo de 2018 08:47



Dear Dr. Gilabert,

Thank you very much for your inquiry. As per our open access policy, authors have the authority to reuse and reproduce the article in the Thesis without asking publisher for a permission. Please feel free to reuse it, with proper acknowledgment of the source.

Kind regards,  
 Jade Lu  
 MDPI Support

--  
 Disclaimer: The information and files contained in this message are confidential and intended solely for the use of the individual or entity to whom they are addressed. If you have received this message in error, please notify me and delete this message from your system. You may not copy this message in its entirety or in part, or disclose its contents to anyone.

On 2018/5/7 18:00, Maria Amparo Gilabert wrote:  
 In relation to the paper:

Annual Gross Primary Production from Vegetation Indices: A Theoretically Sound Approach  
 by Maria Amparo Gilabert, Sergio Sanchez-Ruiz and Alvaro Moreno  
 Remote Sens. 2017, 9(3), 193; <https://doi.org/10.3390/rs9030193>

This publication is part of the PhD Thesis of Sergio Sanchez-Ruiz. Therefore, we ask for permission to include it (as an Appendix of the Thesis Report) and reproduce it in all formats (including electronic media).

Sincerely,

Maria Amparo Gilabert  
 UV-ERS (Environmental Remote Sensing group, [www.uv.es/uv/ers](http://www.uv.es/uv/ers))  
 Universitat de València

**CONFIDENTIALITY CLAUSE**

This message has been sent from a Universitat de València email account for the institution's own purposes. Its content and any files transmitted with it are intended solely for the use of the individual or entity to whom they are addressed and are considered confidential, except where justified by their specific nature. If you are not the named addressee, you should not disseminate, distribute or copy this email without consent. If you received this email in error, please notify the sender immediately and delete this email from your system. Please check out terms of use and privacy policies regarding the sending of emails (<http://links.uv.es/BBz6HG5>, <http://links.uv.es/GAk63v0>) at the Universitat de València institutional website. Any incident arising from the reception of our e-mails and, specifically from security and confidentiality issues, can be communicated to [lopd@uv.es](mailto:lopd@uv.es).

## RESEARCH ARTICLE

10.1002/2017JG004360

## Key Points:

- Biome-BGC was optimized for its application at spatially distributed level over peninsular Spain
- The rooting depth parameter was adjusted using daily GPP series from a previously optimized and validated PEM in the study area as reference
- After this study, other main vegetation processes such as net carbon fluxes can also be properly simulated in the study area

## Supporting Information:

- Supporting Information S1
- Data Set S1
- Data Set S2
- Data Set S3

## Correspondence to:

S. Sanchez-Ruiz,  
sergio.sanchez@uv.es

## Citation:

Sanchez-Ruiz, S., Chiesi, M., Fibbi, L., Carrara, A., Maselli, F., & Gilabert, M. A. (2018). Optimized application of Biome-BGC for modeling the daily GPP of natural vegetation over peninsular Spain. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 531–546. <https://doi.org/10.1002/2017JG004360>

Received 12 DEC 2017




Accepted 28 JAN 2018

Accepted article online 7 FEB 2018

Published online 21 FEB 2018

©2018. American Geophysical Union.  
All Rights Reserved.

## Optimized Application of Biome-BGC for Modeling the Daily GPP of Natural Vegetation Over Peninsular Spain

Sergio Sanchez-Ruiz<sup>1</sup> , Marta Chiesi<sup>2</sup>, Luca Fibbi<sup>2</sup> , Arnaud Carrara<sup>3</sup> , Fabio Maselli<sup>2</sup>, and María Amparo Gilabert<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Environmental Remote Sensing Group, Departament de Física de la Terra i Termodinàmica, Facultat de Física, Universitat de València, Burjassot, Spain, <sup>2</sup>Istituto di Biometeorologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Sesto Fiorentino, Italy, <sup>3</sup>Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, Paterna, Spain

**Abstract** A methodology for improving the application of Biome-BGC in peninsular Spain was developed focusing on the optimization of the rooting depth ( $z_{root}$ ), which is not available for the study area on a spatially distributed basis. The optimal  $z_{root}$  was identified by comparing daily gross primary production (GPP) simulations with varying  $z_{root}$  to GPP estimations from a production efficiency model previously optimized for and validated in the study area. The methodology was first tested in four eddy covariance (EC) sites representative of Mediterranean ecosystems and next applied at a regional scale to the whole study area. As a result, daily GPP simulated maps for the 2005–2012 period and an optimal  $z_{root}$  map were obtained. Optimal  $z_{root}$  in the four EC sites was shallower than the default one (100 cm) and led to better simulation results. Realistic, spatially distributed GPP estimates were obtained at regional scale. Withal, some discrepancies appeared both at local and regional scale emphasizing the difficulty to adequately simulate the site's water budget and the need for proper setting of inputs, including  $z_{root}$  for the correct functioning of Biome-BGC. The performed optimization opens the door for using Biome-BGC to simulate other main vegetation processes, such as net carbon fluxes, in the study area.

### 1. Introduction

Biogeochemical fluxes, that is, carbon, water, and nitrogen fluxes, play a critical role in the study of climate variability (IPCC, 2013), and their estimation is necessary for the understanding of ecosystems behavior from local to global scale (Waring & Running, 2007). According to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Mediterranean regions are experiencing an increase in droughts duration and intensity (Kovats et al., 2014) that affects vegetation productivity. These changes make Mediterranean regions very sensitive to soil degradation caused by short and intense rainfall episodes and to wildfires caused by extreme drought events, consequently leading to desertification. Therefore, particular interest must be paid to the study of biogeochemical fluxes in Mediterranean areas.

In the particular case of carbon exchange between terrestrial ecosystems and atmosphere, two main categories of models have been used to estimate fluxes. On the one hand, production efficiency models (PEMs) based on Monteith's approach (Monteith, 1972) make use of remote sensing measurements for the estimation of ecosystem primary production from daily to annual scale (e.g., Cao et al., 2004; Potter et al., 1993; Running & Zhao, 2015; Xiao, Hollinger, et al., 2004; Xiao, Zhang, et al., 2004). Several applications of optimized PEMs have been carried out locally and regionally in Mediterranean areas (Gilabert et al., 2015, 2017; Maselli, Chiesi, et al., 2009; Sanchez-Ruiz et al., 2017) reporting improvements in the estimation accuracy of gross primary production (GPP) with respect to global PEMs such as MOD17 (Heinsch et al., 2006; Running & Zhao, 2015) or C-Fix (Veroustraete et al., 2002). On the other hand, ecosystem process models, such as Biome-BGC (Running & Hunt, 1993; White et al., 2000), are able to simulate the main vegetation processes and have been successfully applied in Mediterranean areas (Chiesi et al., 2007, 2012; Maselli, Papale, et al., 2009). However, they need a rather high amount of inputs that can be divided into drivers (meteorological time series and site data) and parameters (referring to ecophysiological data). Previous studies (Moreno et al., 2013, 2011) have addressed the production of the main daily meteorological forcing data sets (maximum and minimum air temperature, precipitation, and incoming solar radiation) in the study area (peninsular Spain, see section 3); while other specific forcing variables, such as day length, and daylight air temperature and humidity can be derived from microclimate simulation models such as MT-CLIM (Thornton et al., 2000). Ecophysiological parameters have been set for the principal vegetation types in

Mediterranean areas accounting for the characterization of the water stress, which is typical in these regions (Chiesi et al., 2007). Other inputs such as land cover maps (IGN, 2011), digital elevation models (Farr et al., 2007), and soil texture (Ballabio et al., 2016) maps have also been produced for the study area.

One controversial site variable of Biome-BGC which has important implications for simulating all terrestrial ecosystem processes, is the effective soil depth ( $z_{\text{root}}$ ), that is, the depth at which plants are able to grow roots (Running & Hunt, 1993). This site data variable, which determines the active soil zone that has potential to return water back into the atmosphere via plant transpiration (Yang et al., 2016), significantly affects the exchange of energy and carbon between the land surface and the atmosphere, due to the close coupling among the terrestrial water, energy, and carbon cycles (Guswa, 2010).  $z_{\text{root}}$  is, therefore, functionally different from the depth to bedrock, which is reported by usual soil maps, and will be hereinafter indicated as rooting depth.

Canadell et al. (1996) summarized observations of the maximum rooting depth of species belonging to the major terrestrial biomes. In general, perennial grasses have a shallower  $z_{\text{root}}$  than woody species (shrubs and trees). The maximum values were found for trees growing in desert areas. Their deep roots may improve water uptake from permanent water tables, which can be located at rather deep depths, and increase their probability of survival. This also happens in some species in Mediterranean communities. In fact, Schenk and Jackson (2002) found that rooting depths are globally related to climate and that the deepest rooting depths are most likely to occur in seasonal water-limited ecosystems of warm-temperate to tropical regions. However, soil characteristics are also important: extended lateral roots are advantageous for water and nutrient uptake after small rainfall events, or to survive in areas with shallow soils, where the highest nutrient concentration is found in the superficial soil horizons (Guerrero-Campo et al., 2006). Biogeographically,  $z_{\text{root}}$  increases as a function of mean annual precipitation, evaporative demand, length of the growing season, and deep infiltration (Canadell et al., 1996; Schenk & Jackson, 2002, 2005; Yang et al., 2016).

$z_{\text{root}}$  observations are only representative of a rather small area, and their values usually differ from an effective depth over a modeling unit. This highlights the need of producing  $z_{\text{root}}$  maps in a flux-modeling framework. Some efforts based on the extrapolation of the aforementioned observations or even on different model simulation strategies have been conducted. Yang et al. (2016) describe the main approaches used as well as their complexity and limitations, and produced a  $z_{\text{root}}$  global map at  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  spatial resolution. The difficulty of applying these approaches at higher spatial resolution has obstructed the production of relevant  $z_{\text{root}}$  maps at regional level, particularly for the study area.

Additionally, the approach adopted by Biome-BGC to simulate the site water balance relies on the model's underlying formulation, which is not always consistent with conventional soil definitions (see model description in section 2.2). Thus, alternative methods aimed at optimizing the rooting depth that is required by the model for the specific ecosystem must be developed. In other words, the optimal  $z_{\text{root}}$  for each ecosystem could be identified by taking into account its effect on the model reproduction of major ecophysiological processes.

Based on this premise, the present study aims at improving the application of Biome-BGC to simulate daily GPP in peninsular Spain at spatially distributed level dealing with the heterogeneity of soil properties, particularly  $z_{\text{root}}$ . To achieve this goal, the above mentioned previously developed simulation setups and information layers are used. GPP time series simulated by Biome-BGC are compared with the ones estimated by an optimized previously validated PEM, which are taken as reference, and the  $z_{\text{root}}$  that leads to the lowest root mean squared error (RMSE) between the two GPP time series is selected. This methodology is first tested in four eddy covariance (EC) sites to demonstrate that the use of an optimized  $z_{\text{root}}$  significantly improves the results of the simulations with respect to the use of the default  $z_{\text{root}}$  and next applied to the whole study area on a per-pixel basis. Finally, the daily GPP maps obtained at 1 km spatial resolution for the 2005–2012 period are analyzed. It is worthwhile highlighting that the optimal  $z_{\text{root}}$  obtained in the present study represents the effective rooting depth over a 1 km<sup>2</sup> pixel rather than the actual rooting depth of an individual plant.

## 2. Description of the Models

### 2.1. Optimized Production-Efficiency Model

The Monteith approach (Monteith, 1972) assumes that GPP is directly proportional to the absorbed photosynthetically active radiation (APAR), being the light use efficiency ( $\epsilon$ ) the proportionality constant. APAR



can be calculated as the product of the photosynthetically active radiation (PAR), that is, the incoming solar radiation with a wavelength between 400 and 700 nm, and the fraction of this radiation absorbed by the vegetation canopy ( $f_{APAR}$ ).  $\epsilon$  acts both as an efficiency factor and as a unit conversion (from radiation to mass units) factor. It is usually modeled as the product of a maximum efficiency ( $\epsilon_{max}$ ) and several scalars ranging between 0 and 1 that account for its reduction caused by different environmental stresses.  $\epsilon_{max}$  represents the optimal ecosystem functioning and depends spatially on the vegetation canopy type. Only thermal and water stresses were considered in this study. According to that, the daily GPP ( $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) is modeled as

$$\text{GPP} = \text{PAR } f_{APAR} \epsilon_{max} \epsilon_T \epsilon_W \tag{1}$$

PAR ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) was calculated as the 46% of the daily incoming solar radiation (Iqbal, 1983).  $f_{APAR}$  was estimated using the algorithm proposed by Roujean and Breon (1995). This algorithm estimates  $f_{APAR}$  as a linear function of renormalized difference vegetation index ( $\text{RDVI} = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED})^{1/2}$ ), where near infrared ( $\rho_{NIR}$ ) and red ( $\rho_{RED}$ ) reflectances are calculated for an optimal angular geometry in the solar principal plane using bidirectional reflectance distribution function (BRDF) parameters  $k_0$ ,  $k_1$ , and  $k_2$ .  $\epsilon_{max}$  is set as  $1.2 \text{ g MJ}^{-1}$  for shrublands and forests, and  $1.6 \text{ g MJ}^{-1}$  for grasslands.  $\epsilon_T$  is the  $\text{TMIN\_scalar}$  used in the MOD17 algorithm (Heinsch et al., 2006; Running & Zhao, 2015) to characterize the thermal stress due to low temperatures, that is, a linear ramp function of daily minimum air temperature through a threshold depending on the vegetation type.  $\epsilon_W$  is the water stress coefficient ( $C_{WS}$ ) used in CASA (Potter et al., 1993) and modified C-Fix (Maselli, Chiesi, et al., 2009) models.  $C_{WS}$  derives from a simple water balance calculated as the ratio between actual (AET) and potential (PET) evapotranspirations and accounts for short-term water stress. Precipitation (PRE) was used as a proxy of AET since it was shown that it performed better than other AET operative remote sensing products in the study area (Sanchez-Ruiz et al., 2017) and, because of this, both PRE and PET must be accumulated over past days in order to retrieve information about water availability from past rain events. The accumulation periods were 30, 45, and 60 days for grasslands, shrublands, and forests, respectively. PET was calculated using the empirical relationship proposed by Jensen and Haise (1965):

$$\text{PET} = R_g (0.025 T_a + 0.08) / 2450 \tag{2}$$

where  $R_g$  is the daily incoming solar radiation in  $\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$  and  $T_a$  is the daily mean air temperature in  $^{\circ}\text{C}$ . PRE/PET was set to 1 when PRE was greater than PET and eventually rescaled between 0.5 and 1 assuming that long-term water stress is already accounted by the  $f_{APAR}$ .

The GPP estimates of this PEM have been widely validated for Spain (Gilbert et al., 2015; Sanchez-Ruiz et al., 2017), which justifies their current use as reference for optimizing the application of Biome-BGC at both local and regional scales.

### 2.2. Biome-BGC

Biome-BGC (Running & Hunt, 1993; White et al., 2000) is a biogeochemical model able to mechanistically estimate daily, monthly and annual carbon, water and nitrogen storage and fluxes into and out of a terrestrial ecosystem. It is a one-dimensional model that considers every point in space with its fluxes and storages normalized by area unit. The simulated space is divided in cells and simulations are performed independently for each cell. Inputs needed for each simulation are as follows: (1) site physical properties (e.g., latitude, slope, aspect, elevation, albedo, soil texture, and rooting depth), (2) daily meteorological series (maximum and minimum air temperature, daylight average air temperature, precipitation, daylight average partial water vapor pressure, daylight average shortwave radiant flux density, and daylength), and (3) ecophysiological parameters (e.g., carbon to nitrogen ratio and maximum stomatal conductance) describing an ecosystem functional type assumed to be spatially homogeneous and not to change through time. The model usually finds an initial equilibrium condition with balance between input and output fluxes through a first spin-up run; otherwise, it uses an end state provided by a previous simulation. Then it continues running forward in time.

The model adopts a modified big-leaf approach in which separate sunlit and shaded vegetation canopies are treated as single surfaces proportional to their corresponding leaf area index, of which the sunlit to shaded ratio is user defined. The photosynthetic activity is computed using Farquhar's approach (Farquhar et al., 1980). Autotrophic respiration is separated into maintenance and growth respirations. The former is computed as a function of the nitrogen content in living tissues, whereas the latter is calculated proportionally

to the carbon allocated into the vegetation pools. Concerning the hydrological cycle, it is simulated considering precipitation entering the system, being it rainfall or snow. Part of the precipitation is intercepted by leaves and litter, while another part infiltrates into the soil. The snowpack can either melt or sublimate, therefore contributing to water in the soil and vapor in the atmosphere, respectively. A one-dimensional bucket model then defines the soil water holding capacity. The input to the soil derives from precipitation, while the outputs are transpiration, soil evaporation, and outflow due to water in excess of field capacity. This bucket model adopted by Biome-BGC is therefore very simple: it considers only outflow from soil occurring when the soil water content exceeds field capacity and does not include movements of water in deeper layers (Thornton et al., 2002). Some authors tried to modify the original subroutine by introducing more complicated modules (e.g., Hidy et al., 2012; Pietsch et al., 2003), aiming at including groundwater flux and distribution within soil layers. These modifications are, however, not considered in the current investigation, which is based on the last model version (4.2) released by Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG); the code of which is freely available at <http://www.ntsug.umd.edu/project/biome-bgc.php>. Further details on the model functioning can be found in Thornton et al. (2002).

The above mentioned version provides complete parameter settings for the main biome types (White et al., 2000). These settings were modified to adapt to Mediterranean ecosystems, which cope with peculiar ecoclimatic features (e.g., dry and hot summer seasons and mild winter seasons). Specific information on the model calibration procedure is provided by Chiesi et al. (2007), while on the model parameterization is given by Chirici et al. (2015) and Maselli et al. (2013) for forests/shrublands and for grasses, respectively (see supporting information).

### 3. Study Area and Sites Description

#### 3.1. Study Area

Peninsular Spain is located in the southwestern Europe approximately between 36° and 44° latitude and between -10° and 3° longitude. Its elevation ranges from sea level to 3,479 m. Several climates are present in the study area following a NW-SE gradient with Atlantic climate in the NW and semiarid in the SE. Annual precipitation ranges from more than 2,000 mm in the NW to less than 200 mm in the SE. According to the Third Spanish National Forest Inventory (1997–2007), forest ecosystems cover almost  $28 \times 10^6$  ha, that is, around the 55% of the territory. Needleleaved forests represent the 34% of the mentioned ecosystems, while broadleaved forests represent the 46%, being the most abundant species *Pinus halepensis* and *Quercus ilex*, respectively.

A vegetation type (more details in section 5.2) map of the study area is shown in Figure 1 and the main ecoclimatic characteristics of the vegetation types are summarized in Table 1.

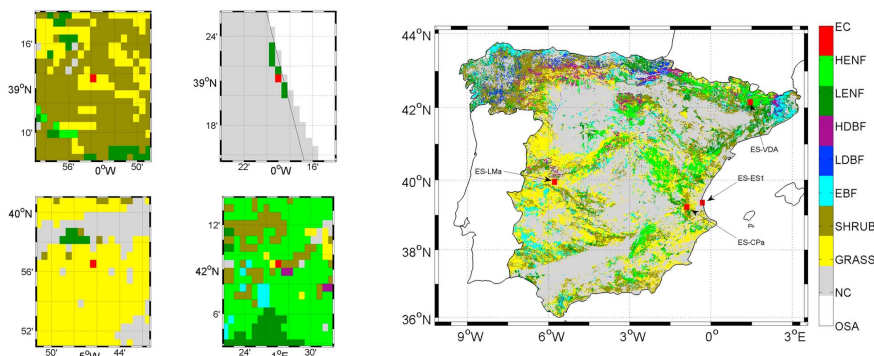
#### 3.2. Sites Description

The four EC towers used in the present study are located in flat areas, which are covered by vegetation representative of different typical ecosystems present in the study area.

The ES-CPa site is a Mediterranean shrubland located on a plateau at 810 m above sea level in the province of Valencia. Vegetation corresponds to a typical postfire regeneration shrubland dominated by *Rosmarinus officinalis*, *Ulex parviflorus*, *Quercus coccifera*, *Juniperus oxycedrus*, and *Thymus* sp. mixed with annual herbaceous species dominated by *Brachypodium retusum*. Shrub cover is about 50–60% and total vegetation cover (including herbaceous species) is about 75%. Climate is typically Mediterranean subarid with warm and dry summers.

The ES-ES1 site is a Mediterranean maquis forest located at an altitude of 5 m in a coastal land barrier about 1 km wide between the Albufera lagoon and the Mediterranean Sea, in the province of Valencia. The vegetation consists of a high maquis (1 m to 3 m high) and pine trees (10 m to 12 m high). Tree canopy is largely dominated by *Pinus halepensis* with some scattered *Pinus pinea*. The main present maquis species are *Pistacia lentiscus*, *Quercus coccifera*, *Rhumus alaternus*, *Myrtus comunis*, *Erica multiflora*, *Cistus albidus*, and *Cistus salvifolius*. The climate is Mediterranean subarid with dry and warm summers and can be considered as semiarid mesothermal, with non or low excess of water in winter.





**Figure 1.** Study area (right) and location and surroundings of the EC sites (left): EC-CPa in top left, EC-ES1 in top right, ES-LMa in bottom left, and ES-VDA in bottom right. In the legend, OSA, NC, GRASS, SHRUB, EBF, LDBF, HDBF, LENF, HENF, and EC refer, respectively, to out of the study area, nonclassified, grassland, shrubland, evergreen broadleaved forest, low-altitude deciduous broadleaved forest, high-altitude deciduous broadleaved forest, low-altitude evergreen needleleaved forest, high-altitude evergreen needleleaved forest, and eddy covariance site. The vegetation types are defined in section 5.2.

The ES-LMa site is a holm oak savanna located at approximately 260 m in the province of Caceres. The long-term historical management at the site has resulted in a holm oak (*Quercus ilex*) savanna with a tree density of approximately 20–25 trees per hectare and a resulting canopy cover of about 20%. Trees have a mean diameter at breast height of 46 cm and a mean height of 8 m. The understory herbaceous layer presents high biodiversity and is dominated by annual herbaceous species such as *Vulpia bromoides*, *Vulpia geniculata*, *Trifolium subterraneum*, and *Ornithopus compressus*. The herbaceous cover typically senesces by the end of May and regrowth about the end of October. Climate is Mediterranean with warm and dry summers but with relatively cold winters due to its rather continental location. The site is continuously grazed by cattle (stocking rate about 0.3 LU ha<sup>-1</sup>) with transhumance of the cattle herd to nearby mountains in summer (typically from June to September).

The ES-VDA site is a mountain grassland located at 1,770 m in the province of Lleida. The dominant species are *Festuca nigrescens* and *Phleum pratense*. Climate is subalpine with cold winters, mild springs and autumns, and warm summers. No water limitation befalls generally. The site is submitted to extensive pasture by cattle from the middle of June to the beginning of October with a stocking rate of 0.15–0.20 LU ha<sup>-1</sup>.

The location of the four study sites is shown in Figure 1, and their geographic coordinates and main ecoclimatic characteristics are provided in Table 2.

**Table 1**  
Descriptive Information of the Vegetation Types Considered in the Present Study

Vegetation type	<i>h</i> (m)	PRE (mm)	<i>R<sub>g</sub></i> (MJ m <sup>-2</sup> )	<i>T</i> (°C)	PET (mm)
GRASS	758 (424)	562 (197)	6,038 (412)	14.51 (2.37)	1,265 (211)
SHRUB	764 (416)	719 (312)	5,686 (629)	13.99 (2.22)	1,157 (241)
EBF	584 (335)	711 (300)	5,725 (666)	14.53 (1.97)	1,193 (235)
LDBF	520 (186)	1,084 (307)	4,863 (524)	12.73 (0.97)	910 (139)
HDBF	1,099 (205)	850 (267)	5,272 (420)	11.48 (1.19)	936 (118)
LENF	484 (223)	714 (360)	5,586 (635)	14.38 (1.68)	1,153 (209)
HENF	1,198 (290)	604 (183)	5,742 (348)	12.53 (1.84)	1,089 (165)

*Note.* The vegetation types GRASS, SHRUB, EBF, LDBF, HDBF, LENF, and HENF refer, respectively, to grassland, shrubland, evergreen broadleaved forest, low-altitude deciduous broadleaved forest, high-altitude deciduous broadleaved forest, low-altitude evergreen needleleaved forest, and high-altitude evergreen needleleaved forest (defined in section 5.2). Standard deviation between brackets. *h* is the elevation from the sea level, PRE is the average annual precipitation, *R<sub>g</sub>* is the average annual incoming global solar radiation, *T* is the average mean annual air temperature, and PET is the average annual potential evapotranspiration.

**Table 2**  
Descriptive Information of the Study Sites and Period of EC Data Availability

Site	Latitude (deg)	Longitude (deg)	$h$ (m)	PRE (mm)	$T$ (°C)	PET (mm)	Vegetation type	Data period
ES-CPa	39.2242	-0.9031	810	470	13	1,310	Open shrubland	2009–2011
ES-ES1	39.3448	-0.3200	5	550	18	1,450	Evergreen needleleaved forest	2005–2006
ES-LMa	39.9403	-5.7746	260	650	17	1,360	Savanna	2005–2012
ES-VDA	42.1511	1.4474	1,770	1,100	6	1,010	Grassland	2005–2008

Note.  $h$  is the elevation above the sea level, PRE is the mean annual precipitation,  $T$  is the mean annual air temperature, and PET is the mean annual potential evapotranspiration.

#### 4. Data Description and Preprocessing

In situ measurements of daily maximum and minimum air temperatures and precipitation were provided by the Spanish Meteorological Agency (AEMet) from 400 meteorological stations distributed throughout the study area. These data were interpolated by ordinary kriging to build 1 km spatial resolution maps during the period 2005–2012 (some samples are included as supporting information). Minimum air temperature was used to calculate  $e_T$ . Maximum and minimum air temperatures were used to calculate mean air temperature, which was used together with precipitation to obtain  $e_W$  as explained in section 2.1. Maximum and minimum air temperatures and precipitation were also used to calculate daily average air temperature, daylight average partial pressure of water vapor, and daylength through MT-CLIM (Thornton et al., 2000). The code of the used version (4.3) is freely available at the NTSG website, <http://www.ntsug.umt.edu/project/mt-clim.php>.

SEVIRI product LSA-07 (downwelling surface shortwave flux estimated every 30 min, MDSSF) and LSA-09 (daily integrated downwelling surface shortwave flux, DIDSSF) (LSA-SAF, 2011) for the period 2007–2012 were downloaded from the LSA SAF Server (<http://landsaf.meteo.pt>). These images were reprojected to a 1 km spatial resolution latitude/longitude regular grid. DIDSSF was used when available or calculated from MDSSF when not available. DIDSSF gaps were filled with global incoming radiation obtained by the application of artificial neural networks to the air temperature and precipitation mentioned above (Moreno et al., 2011). Both products were previously validated (Moreno et al., 2013, 2011), and a relationship between the two sources was found to apply the gap filling procedure. DIDSSF for the years 2005 and 2006 was also obtained this way. DIDSSF was used to calculate both PAR and  $e_W$ .

MODerate resolution Imaging Spectroradiometer products MCD43A1 and MCD43A2 (Schaaf et al., 2002) for the period 2005–2012 were retrieved from the online Reverb, courtesy of the NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center, USGS/Earth Resources Observation and Science Center, Sioux Falls, South Dakota, [reverb.echo.nasa.gov](http://reverb.echo.nasa.gov). MCD43A1 is an 8 day composite that contains the BRDF parameters  $k_0$ ,  $k_1$ , and  $k_2$  at 500 m spatial resolution. MCD43A2 contains the quality flags for MCD43A1. MCD43A1 images were reprojected to 1 km spatial resolution latitude/longitude and then used to calculate  $f_{APAR}$  through the Roujean and Breon (1995) algorithm as mentioned in section 2.1. Then a gap-filling and noise-reduction method was applied (Moreno et al., 2014). It consists of an iteratively reweighted local regression filter with weights depending on the quality (MCD43A2) of the used data (the higher the quality, the higher the weight). Finally, a linear interpolation was performed to obtain daily  $f_{APAR}$  data sets.

The SIOSE (Land Cover and Use Information System of Spain) land cover database, provided by ©Instituto Geográfico Nacional (<http://www.siose.es/web/guest/descargar>), was used to determine land use class. It is a very high resolution (cartographic scale 1:25000) polygon database built by means of photointerpretation and digitalization of reference data such as SPOT5 and Landsat TM 5 images and local ground ancillary data (IGN, 2011; Valcarcel et al., 2008). For each polygon, it contains the percentage of surface occupied by each of the present classes. SIOSE data were reprojected and rasterized to a latitude/longitude 50 m spatial resolution layer; its legend was reduced to 18 classes (artificial surface, water bodies, wetlands, bare areas, evergreen broadleaved, shrublands, deciduous broadleaved, grasslands, pastures, coniferous forest, woody crops, fruit trees, citrus trees, vineyards, olive groves, irrigated crops, rice fields, and nonirrigated crops) and finally aggregated to 1 km spatial resolution. The resulting land use map was used to produce a vegetation-type map (see section 5.2), which is shown in Figure 1 and included as supporting information.

An elevation map was obtained from the global 3 arc second digital elevation model from the Shuttle Radar Topography Mission (Farr et al., 2007), which was downloaded from <http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data>. Delaunay triangulation was used to correct bad values and the part covering peninsular Spain was reprojected to a 1 km spatial resolution latitude/longitude grid.

Soil clay, sand, and silt content maps (Ballabio et al., 2016) were downloaded from the European Soil Database (<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/european-soil-database-soil-properties>) and reprojected to 1 km spatial resolution latitude/longitude grid comprising the study area.

Daily net ecosystem exchange data collected from the four EC towers abovementioned belonging to the European Carbon Database Cluster (<http://www.europe-fluxdata.eu>) were used to estimate daily GPP as explained in Reichstein et al. (2005). The sites' codes in the database coincide with the names used along the present study. Mean air temperature and daily accumulated precipitation measured at these sites were used to correct the maximum and minimum air temperature and daily accumulated precipitation time series extracted from the abovementioned maps for the four sites' locations.

## 5. Methodology

### 5.1. Local Scale

The daily data series (2005–2012 period) needed for driving the two used models were extracted from the data sets mentioned in previous sections for each of the four EC site locations. Daily GPP estimates calculated through equation (1) ( $GPP_{PEM}$ ) were validated against GPP obtained from the EC towers measurements ( $GPP_{EC}$ ) by calculating the coefficient of correlation ( $R$ ), the mean biased error (MBE), the mean absolute error (MAE), and the RMSE. Then  $GPP_{BGC}$  time series were obtained from Biome-BGC simulations varying the  $z_{root}$  from 5 cm to 200 cm by 5 cm steps. Biome-BGC was run in a spin-up-and-go mode. The optimal  $z_{root}$  was found by comparing  $GPP_{BGC}$  to reference  $GPP_{PEM}$  and selecting the one which produced the lowest RMSE between the two GPP series. Finally,  $GPP_{BGC}$  time series with both the optimal  $z_{root}$  ( $GPP_{BGC,X}$ , where X refers to the optimal  $z_{root}$  in cm) and the default one ( $GPP_{BGC,DEF}$ , with  $z_{root} = 100$  cm) were validated against  $GPP_{EC}$  by calculating the statistics mentioned above.

When air temperature and/or precipitation time series were required (for the calculation of  $\epsilon_T$  and  $\epsilon_W$  in the optimized PEM, for the simulation of daylight average air temperature, daylight average partial pressure of water vapor through MT-CLIM, and for the simulation of GPP through Biome-BGC), they were previously corrected after comparison with the same variables measured at the EC towers. A linear relationship was found and used in the case of air temperature, and a ratio between the whole series means was used in the case of precipitation. The corrections were applied independently for each site. When the vegetation type was required (for  $\epsilon_{max}$ ,  $\epsilon_T$ , and  $\epsilon_W$  in the optimized PEM; and for the ecophysiological parameters in Biome-BGC), the one provided by the responsible of the EC sites was used.

In the particular case of ES-ES1,  $f_{APAR}$  at 1 km spatial resolution was not available because the tower is surrounded by three water bodies: the Albufera lagoon at 350 m to the west, a small pond at 290 m to the east, and the Mediterranean sea at 800 m to the east. Therefore, a finer resolution product had to be used for the  $f_{APAR}$  estimation. The 16 day Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) at 250 m spatial resolution from MOD13Q1 (Didan & Huete, 2015) was used to estimate  $f_{APAR}$  with the linear relationship proposed by Myneni and Williams (1994), and the same gap filling, noise reduction, and interpolation methods were applied afterward obtaining a daily time series.

### 5.2. Regional Scale

A vegetation-type map was generated in three steps: (1) a most common class map from the SIOSE-derived layer mentioned in section 4 was generated; (2) only the pixels with one of the following five classes were considered: grasslands, shrublands, evergreen broadleaved, deciduous broadleaved, and coniferous forest; (3) the elevation ( $h$ ) map was used to divide both deciduous broadleaved and coniferous forest in low ( $h \leq 800$  m) and high ( $h > 800$  m) altitude forests. As a result, a 1 km spatial resolution map with seven vegetation types was obtained (Figure 1): grasslands (GRASS), shrublands (SHRUB), evergreen broadleaf forests (EBF), low-altitude deciduous broadleaved forests (LDBF), high-altitude deciduous broadleaved forests (HDBF), low-altitude evergreen needleleaved forests (LENF), and high-altitude evergreen needleleaved

forests (HENF). The calculation of  $\epsilon_{\max}$ ,  $\epsilon_T$ , and  $\epsilon_W$  for the use of the optimized PEM and the ecophysiological parameters used in Biome-BGC rely on this vegetation-type map.

Next, daily GPP maps for the 2005–2012 period were calculated using the optimized PEM described in section 2.1. Daily GPP maps for the same period were then obtained from Biome-BGC using eight different  $z_{\text{root}}$  values for each vegetation type: from 20 cm to 160 cm by 20 cm steps. As mentioned in section 2.2, Biome-BGC divides the space in cells and simulations are performed individually for each cell, that is, it works one dimensionally. Therefore, Biome-BGC was run in a spin-up-and-go mode for each of the cells of a 1 km spatial resolution grid that presented one of the considered vegetation types. The daily time series of  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  and  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  were compared and an optimal  $z_{\text{root}}$  was found for each pixel based on the minimum RMSE criterion.  $R$ , MBE, MAE, and RMSE were calculated between  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  and both  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  and optimized  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  ( $\text{GPP}_{\text{BGC,OPT}}$ ). RMSE maps for both  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  and  $\text{GPP}_{\text{BGC,OPT}}$  were generated. The optimal  $z_{\text{root}}$  was also analyzed in terms of vegetation type.

## 6. Results

### 6.1. Local Scale

The RMSE between  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  and  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  as a function of  $z_{\text{root}}$  for the four EC sites is shown in Figure 2. A very sharp minimum RMSE ( $0.7 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) is located at  $z_{\text{root}} = 40 \text{ cm}$  in the case of ES-CPa. In the case of ES-ES1, the minimum RMSE ( $1.3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) is located at  $z_{\text{root}} = 70 \text{ cm}$ . Then it increases and stabilizes around  $1.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . The minimum RMSE ( $1.5 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) in ES-LMa is located at  $z_{\text{root}} = 80 \text{ cm}$ ; it is similar to the default one (100 cm). In the case of ES-VDA, an abrupt decay from 5 cm to 50 cm is observed, where the minimum RMSE =  $1.6 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  is located. Then the RMSE smoothly increases until almost  $2 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  at  $z_{\text{root}} = 200 \text{ cm}$ .

Table 3 shows the statistics from the comparisons between  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  and  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ ,  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ , and  $\text{GPP}_{\text{BGC,X}}$  in the four EC sites. In the case of ES-CPa,  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  shows the best statistics (highest correlation and lowest errors) when compared with  $\text{GPP}_{\text{EC}}$ .  $\text{GPP}_{\text{BGC,40}}$  improves all the statistics obtained by  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ , especially the correlation coefficient and the MBE. In the case of ES-ES1, all three profiles ( $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ ,  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ , and  $\text{GPP}_{\text{BGC,X}}$ ) perform similar when compared to  $\text{GPP}_{\text{EC}}$ .  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  shows the best results overall and  $\text{GPP}_{\text{BGC,70}}$  improves  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  overall. In both cases the exception is MBE, which is closest to zero in the case of  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ . Very good results are obtained by  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  when compared with  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  in the case of ES-LMa. Nevertheless, results obtained by both  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  and  $\text{GPP}_{\text{BGC,80}}$  considerably worsen with the exception of MBE in the case of  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ . The rest of statistics are only slightly improved by  $\text{GPP}_{\text{BGC,80}}$ . ES-VDA is the only case in which correlations obtained by  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  are higher than the one obtained by  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ , which performs better in terms of errors. Besides,  $\text{GPP}_{\text{BGC,50}}$  improves all the statistics obtained by  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ .

GPP profiles are shown in Figure 3 for the four EC sites. In the case of ES-CPa (Figure 3a), it can be observed how  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  presents a yearly absolute maximum in spring followed by a decrease mostly due to water stress, a typical characteristic of Mediterranean areas during summer. Once the vegetation has recovered from water stress, it presents a yearly relative maximum toward the end of the year.  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  generally presents very good agreement with  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  along the 3 years, while the  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  clearly overestimates both  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  and  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  during the period affected by water stress (Figure 3a). It responds too late to water shortage and with a too low intensity. This overestimation is reduced by  $\text{GPP}_{\text{BGC,40}}$ , although at the same time an underestimation appears in the maximum production of each year.

In the case of ES-ES1 (Figure 3c), the temporal profile of  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  is very similar to the one in ES-CPa, but the decrease in productivity of the former is not so marked. The general temporal variation of  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  is accounted for by  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ . Withal, a systematically notable underestimation is present.  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ , however, underestimates  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  from the beginning of the growing season until the maximum but it strongly overestimates it during the water stress period. This overestimation is only partially reduced by  $\text{GPP}_{\text{BGC,70}}$  at the same time that the underestimation is accentuated.

In the case of ES-LMa (Figure 3e), the temporal profile is similar to the one presented by ES-CPa, but the maxima are higher in this case. A very good agreement between  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  and  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  can be observed, but none of the  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  can reproduce the maxima of  $\text{GPP}_{\text{EC}}$ , which are strongly underestimated. In addition,  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$

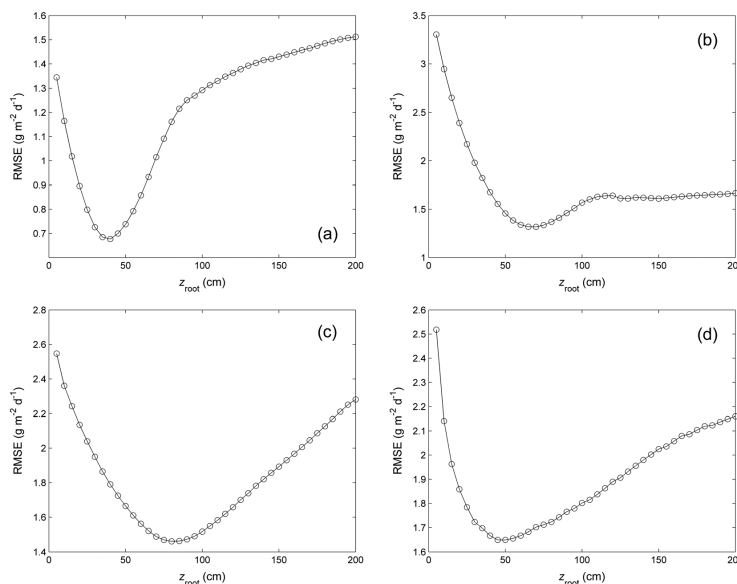


Figure 2. Root mean squared error (RMSE) between GPP<sub>PEM</sub> and GPP<sub>BGC</sub> as a function of  $z_{root}$  for ES-CPa (a), ES-ES1 (b), ES-LMa (c), and ES-VDA (d) sites.

**Table 3**  
 Statistics From the Comparisons Between GPP<sub>EC</sub> and GPP<sub>PEM</sub> (GPP<sub>EC</sub>/GPP<sub>PEM</sub>), GPP<sub>EC</sub> and GPP<sub>BGC,DEF</sub> (GPP<sub>EC</sub>/GPP<sub>BGC,DEF</sub>), and GPP<sub>EC</sub> and GPP<sub>BGC,X</sub> (GPP<sub>EC</sub>/GPP<sub>BGC,X</sub>) for the Four Sites (ES-CPa, ES-ES1, ES-LMa, and ES-VDA)

	R	MBE	MAE	RMSE
<i>ES-CPa</i>				
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>PEM</sub>	0.86	-0.07	0.5	0.7
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,DEF</sub>	0.64	1.0	1.2	1.5
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,40</sub>	0.74	-0.09	0.7	0.9
<i>ES-ES1</i>				
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>PEM</sub>	0.64	-0.6	1.0	1.4
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,DEF</sub>	0.59	0.05	1.3	1.6
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,70</sub>	0.62	-0.6	1.2	1.5
<i>ES-LMa</i>				
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>PEM</sub>	0.81	-0.4	0.9	1.2
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,DEF</sub>	0.48	-0.3	1.4	1.8
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,80</sub>	0.52	-0.7	1.4	1.8
<i>ES-VDA</i>				
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>PEM</sub>	0.69	0.7	1.3	1.7
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,DEF</sub>	0.75	1.8	1.8	2
GPP <sub>EC</sub> /GPP <sub>BGC,50</sub>	0.75	1.2	1.4	1.6

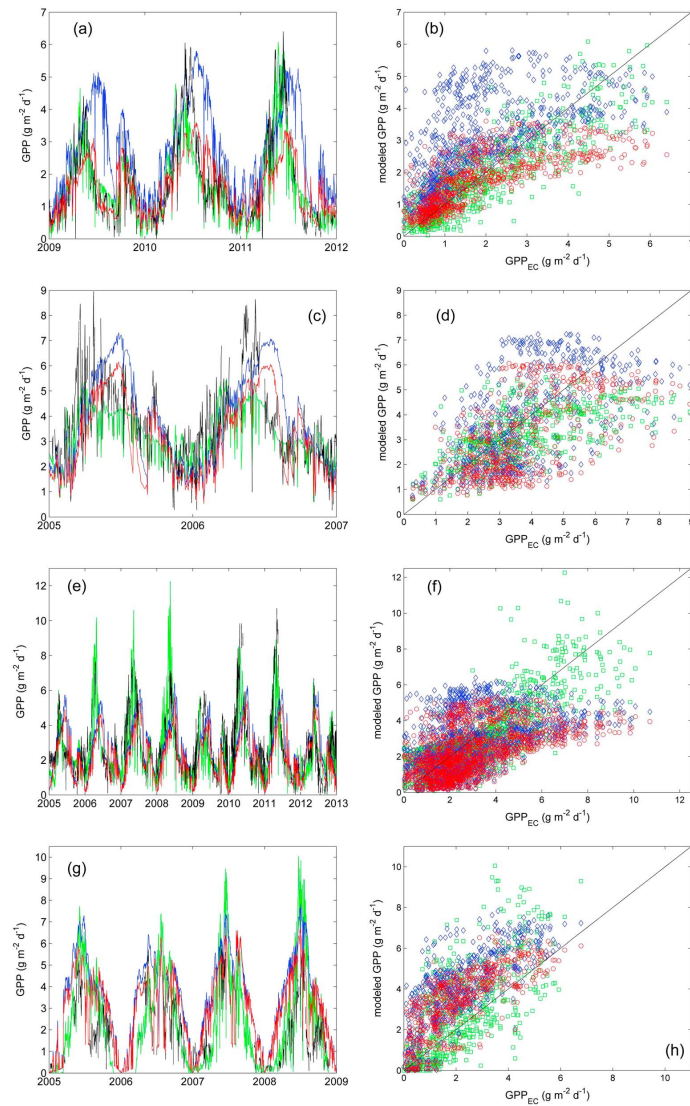
Note. MBE, MAE, and RMSE are expressed in  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ . Correlations (R) were statistically significant at 95% confidence level.

overestimates GPP<sub>EC</sub> in water stress periods. This overestimation is notably reduced by GPP<sub>BGC,80</sub>. In the case of ES-VDA (Figure 3g), GPP<sub>EC</sub> presents a considerably high amount of gaps. GPP<sub>PEM</sub> seems to reproduce quite well the temporal variation of GPP<sub>EC</sub> except in some minima, especially in 2005 and 2008. GPP<sub>BGC,DEF</sub> systematically overestimates GPP<sub>EC</sub>. GPP<sub>BGC,50</sub> slightly reduces the overestimation but also fits better the GPP<sub>EC</sub> minima, even better than GPP<sub>PEM</sub>.

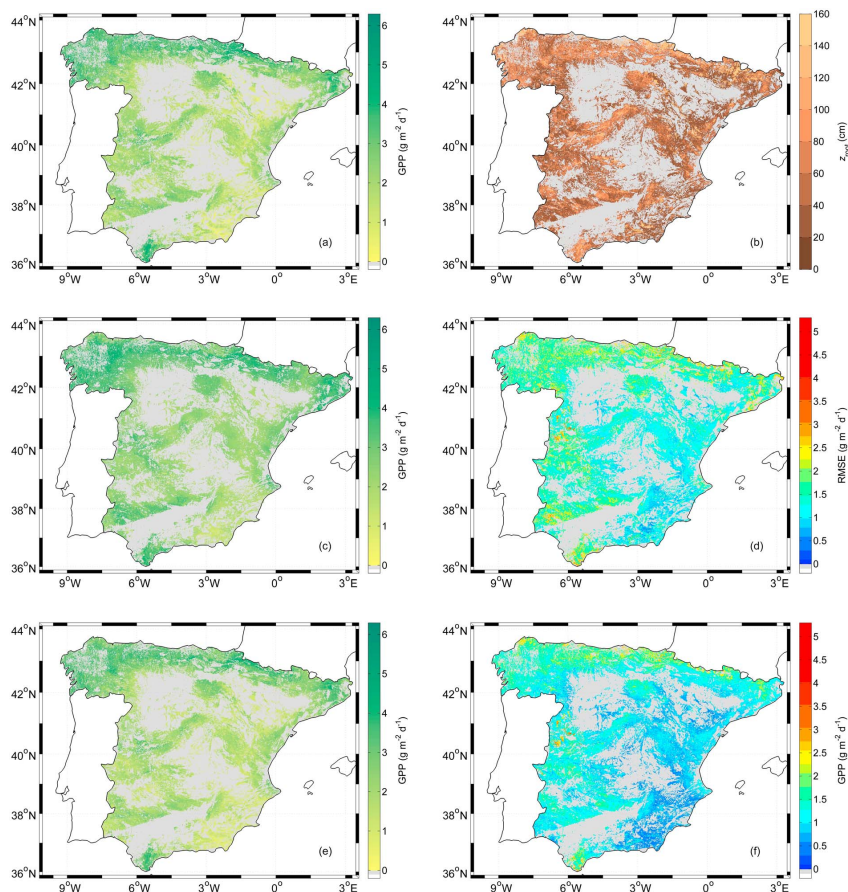
It can be appreciated in the scatterplots (Figures 3b, 3d, 3f, and 3h) that the use of the optimal  $z_{root}$  makes GPP<sub>BGC</sub> approach the apportionment presented by GPP<sub>PEM</sub>, which is generally well distributed along the 1:1 line. Particularly, ES-ES1 (Figure 3d) presents a high scattering, and saturation happens in ES-CPa (Figure 3b) and ES-LMa (Figure 3f).

**6.2. Regional Scale**

Figure 4 shows the mean daily GPP for the whole study area in the pixels selected in section 5.2. The spatial patterns of GPP<sub>PEM</sub> (Figure 4a) and both GPP<sub>BGC,DEF</sub> (Figure 4c) and GPP<sub>BGC,OPT</sub> (Figure 4e) are almost identical and mostly follow the humidity gradient of the country. Nevertheless, GPP<sub>BGC,DEF</sub> systematically overestimates GPP<sub>PEM</sub>, whereas GPP<sub>BGC,OPT</sub> also accurately reproduces the magnitude of GPP<sub>PEM</sub>. The per-pixel optimal  $z_{root}$  is presented in Figure 4b and also included as supporting information. A general pattern can be observed: with the exception of a small region in the SE; the



**Figure 3.** Gross primary production (GPP) temporal profiles (left) and scatterplots (right). From top to bottom: ES-CPa, ES-ES1, ES-LMa, and ES-VDA.  $GPP_{EC}$  in black,  $GPP_{PEM}$  in green,  $GPP_{BGC\_DEF}$  in blue, and  $GPP_{BGC\_X}$  in red in the temporal profiles.  $GPP_{PEM}$  in green squares,  $GPP_{BGC\_DEF}$  in blue diamonds, and  $GPP_{BGC\_OPT}$  in red circles in the scatterplots.



**Figure 4.** Mean daily gross primary production (GPP) calculated over the study period (2005–2012):  $GPP_{PEM}$  (a),  $GPP_{BGC,DEF}$  (c), and  $GPP_{BGC,OPT}$  (e). RMSE between  $GPP_{PEM}$  and  $GPP_{BGC,DEF}$  (d) and between  $GPP_{BGC,OPT}$  (f). Optimal  $z_{root}$  (b).

**Table 4**  
Statistics From the Comparison Between  $GPP_{PEM}$  and  $GPP_{BGC,DEF}$  and  $GPP_{BGC,OPT}$

	$GPP_{PEM}/GPP_{BGC,DEF}$	$GPP_{PEM}/GPP_{BGC,OPT}$
<i>R</i>	0.65	0.91
MBE	0.5	0.08
MAE	0.7	0.2
RMSE	0.8	0.4

Note. MBE, MAE, and RMSE are expressed in  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$ . Correlations (*R*) were statistically significant at 95% confidence level.

higher the productivity, the deeper the  $z_{root}$ . RMSE between  $GPP_{PEM}$  and  $GPP_{BGC,DEF}$  and  $GPP_{BGC,OPT}$  is presented, respectively, in Figures 4d and 4f. The optimized RMSE is generally lower than the default one and the differences are higher where the shallowest  $z_{root}$  was obtained.

Table 4 reports the statistics from the comparison between  $GPP_{PEM}$  and  $GPP_{BGC,DEF}$  and  $GPP_{BGC,OPT}$ .  $GPP_{BGC,OPT}$  clearly increases the similarity between the two estimated series, which highlights the importance of  $z_{root}$ .

**Table 5**  
Mean Daily  $GPP_{PEM}$ ,  $GPP_{BGC,DEF}$ , and  $GPP_{BGC,OPT}$ , and  $z_{root}$  for Each Considered Vegetation Type

Vegetation type	$GPP_{PEM}$	$GPP_{BGC,DEF}$	$GPP_{BGC,OPT}$	$z_{root}$
GRASS	1.98 (0.77)	2.26 (0.55)	1.87 (0.74)	69 (37)
SHRUB	2.14 (0.86)	2.93 (0.78)	2.18 (0.88)	53 (31)
EBF	2.51 (0.84)	2.75 (0.49)	2.26 (0.68)	72 (35)
LDBF	3.38 (0.56)	3.98 (0.46)	3.16 (0.60)	58 (27)
HDBF	2.94 (0.72)	3.16 (0.62)	2.75 (0.85)	79 (29)
LENF	2.37 (0.85)	2.66 (0.81)	2.15 (0.78)	62 (37)
HENF	2.15 (0.61)	2.57 (0.66)	2.11 (0.71)	71 (41)

Note. Their standard deviations are written between brackets. GPP is expressed in  $g\ m^{-2}\ d^{-1}$  as a mean of the whole study period (2005–2012) and  $z_{root}$  in cm.

The mean daily  $GPP_{PEM}$ ,  $GPP_{BGC,DEF}$ , and  $GPP_{BGC,OPT}$ , and  $z_{root}$  (with their standard deviations) are reported in Table 5 as a function of the vegetation type. In general, herbaceous species, which generally grow in the driest areas, exhibit the lowest production; on the contrary, the highest production is simulated for the broadleaved species, especially if growing in fresh and rainy areas (see also Table 1). This pattern is evident from  $GPP_{PEM}$  and is reproduced by  $GPP_{BGC,DEF}$  with a slight overestimation that is reduced by  $GPP_{BGC,OPT}$ . The vegetation types with the lowest  $z_{root}$  are SHRUB and LDBF, while the ones with the highest  $z_{root}$  are HDBF and HENF. However, their standard deviations are so high that all values overlap. Therefore, a dependence of  $z_{root}$  on the vegetation type cannot be clearly appreciated.

## 7. Discussion

Biome-BGC is a process-based model that can simulate the main biogeochemical fluxes through terrestrial ecosystems using relatively limited information about site environmental features and meteorology (Running & Hunt, 1993). The simulation of the water cycle is based on a one-dimensional bucket approach, which does not consider horizontal and vertical soil heterogeneity (Kimball et al., 1997). This is actually an oversimplification of real site conditions that can lead to strong approximations in specific cases and anyway implies an autoconsistency in the model functioning. This particularly concerns the rooting depth, which directly determines the amount of water available to plants, implying the following relevant considerations:

1. The depth indicated in conventional soil maps, referring to the depth to bedrock, cannot be directly used to drive Biome-BGC. This has been experimentally confirmed for several European sites and often leads to use the standard soil depth (100 cm) for the application of Biome-BGC on a regional scale (Chiesi et al., 2016; Chirici et al., 2015).
2. Due to their climatic features, Mediterranean areas present a soil water recharge in winter/spring followed by its consumption during summer months (Bolle et al., 2006). The estimation of soil water storage and its consumption through time is therefore particularly critical in these areas for a correct simulation of water stress impact on vegetation.

The application of the current methodology at both local and regional scale had to cope with several error sources that are briefly reviewed. First, there is the uncertainty that affects the used PEM, which is due to both the model logic and the drivers used. Several raster layers of information from different sources with distinct spatial and temporal resolutions were combined, so errors such as loss of information or subpixel shift could arise from upscaling, downscaling, reprojecting, and/or interpolation processes. Besides, remote sensing data are usually affected by sensor performance, identification of clouds, atmospheric correction, and surface heterogeneity. Soil contribution and angular distribution of leaves could affect to  $f_{APAR}$  since it is retrieved from a vegetation index.

$\epsilon$  is the most controversial input in the PEM. Although it has been demonstrated that its temporal variation in the study area is mainly accounted by water stress (Gilbert et al., 2015), also thermal stress was included in the PEM because it notably contributes in high-elevation zones. Precipitation is used in  $\epsilon_W$ , and its spatial interpolation could be problematic in rugged terrain and high-elevation areas due to its irregular spatial variation. A critical issue might be the spatial variability of  $\epsilon_{max}$  linked with the vegetation-type assignment. Specific  $\epsilon_{max}$  values for several vegetation types are reported in the literature (see Figure 3 in Garbulsy et al., 2010). Nevertheless, most of these values present a high inaccuracy so only two values were used in the present study ( $1.2\ g\ MJ^{-1}$  for woody vegetation and  $1.6\ g\ MJ^{-1}$  for grassland).  $\epsilon_{max}$  is a constant value for each pixel; hence, it affects the magnitude of the whole GPP temporal profile. As  $\epsilon_{max}$  and some parameters present in  $\epsilon_W$  and  $\epsilon_T$  depend entirely on the vegetation type and it is assigned according to the most common class from the vegetation map, the contribution of the other cohabitant vegetation types in nonpure pixels is not optimally modeled by the PEM.

As concerns Biome-BGC, a possible drawback is related to the one-dimensional bucket approach to define the soil water holding capacity, as mentioned above. This approach can imply notable approximations,



particularly concerning the simulation of water consumption in summer dry periods. Jung et al. (2007) found that in water-limited areas the model does not reproduce soil moisture appropriately (e.g., due to overestimation of evaporation and transpiration) or is too sensitive to soil moisture variations.

The model settings utilized were identified in previous investigations conducted in Italy (Chirici et al., 2015; Maselli et al., 2013). Though the main ecoclimatic features of the two countries are very similar, a complete correspondence cannot be hypothesized, particularly concerning the driest ecosystems of Spain. The climate of these areas is more arid than those of southern Italy, which could require a slight modification of the parameter settings previously identified. This model recalibration, however, was not attempted due to the current focus on other research purposes.

The application of the modeling strategy at the four study areas was based on site information and meteorological drivers corrected against ground observations. All these drivers, however, could be still affected by uncertainties. This concerns particularly precipitation, for which only the total annual amount was corrected, without considering its temporal distribution. In the four specific cases, the slope and the intercept for the temperature and the ratio for the precipitation were, respectively, 1.01, 2.15°C, and 1.08 in ES-CPa; 0.96, 0.57°C, and 1.33 in ES-ES1; 1.03, 0.33°C, and 0.85 in ES-LMa; and 0.90, -4.66°C, and 2.64 in ES-VDA.

The accuracy obtained for the four study sites is also influenced by the uncertainty in the EC observations. In general, these observations are affected by both random and systematic errors, due mainly to different processing protocols or to specific environmental conditions (Jung et al., 2011).

Moreover, other problems not related to the EC technique could affect some of the sites. The limited land surface around ES-ES1 (less than 650 m between water bodies in the horizontal direction) complicates the estimation of  $f_{\text{APAR}}$  from remote sensing data. Since the 1 km spatial resolution BRDF-derived  $f_{\text{APAR}}$  used in the rest of the sites and for the whole study area was not available in this site, an NDVI-derived  $f_{\text{APAR}}$  at 250 m spatial resolution was used instead. In the case of ES-LMa, the two cohabitant vegetation types (GRASS and EBF) present so different ecophysiological features that they could not be simulated using a single Biome-BGC parameter file. Thus, the GPP of the two vegetation types was simulated by different Biome-BGC versions and proportionally combined according to the 20% tree coverage fraction.

Another issue is related to the impact that possible disturbances (e.g., wildfires and grazing) can have on the examined ecosystems. The adopted PEM accounts for the biomass reduction due to these factors through the observed  $f_{\text{APAR}}$ . Consequently, these effects are implicitly considered by the applied optimization process.

All these problems constrain the performance of Biome-BGC at the four sites. In general, the reduction of productivity in  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  (both default and optimized) due to water stress appears to be delayed in comparison to  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  and  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ . In the case of  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$ , this decrease is not intense enough either.  $\text{GPP}_{\text{BGC,X}}$  achieves a better agreement with  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  than  $\text{GPP}_{\text{BGC,DEF}}$  in this issue, being the optimal  $z_{\text{root}}$  lower than the default one (100 cm) in the four sites. However, the decrease still starts too late and, as a consequence of the general productivity reduction that helps fitting the water stress period, the absolute yearly maxima of  $\text{GPP}_{\text{EC}}$  tend to be underestimated.

In spite of these issues, the use of Biome-BGC with optimized rooting depth increases the accordance between the estimated and observed GPP in nearly all cases. The optimal  $z_{\text{root}}$  identified can be interpreted taking into account the model functioning in the specific environmental situation. In general,  $z_{\text{root}}$  is mostly related to the main GPP patterns (i.e., highest to the most productive zones). This is in agreement with general ecophysiological principles; the growth of most productive ecosystems, and particularly forests, requires higher rainfall and deeper soils, while grasses and shrubs can grow in drier areas with shallower soils (Waring & Running, 2007).

This rationale explains almost completely the findings obtained for the four EC sites. The shallower rooting depths are identified for the lowly productive shrub (ES-CPa) and grass (ES-VDA) ecosystems (40 cm and 50 cm, respectively), while deeper rooting depths are found for the more productive environments covered by trees (70 cm and 80 cm).

The results obtained at regional scale also appear realistic: the spatial distribution of  $z_{\text{root}}$  in fact, mostly follows that of the GPP estimated by both the PEM and optimized Biome-BGC with a correlation coefficient of 0.88 in both cases. This general pattern, however, is complicated by a contrasting factor that is particularly influential in the examined Mediterranean situation. The applied modeling strategy, indeed, tends to increase

the rooting depth identified as optimal for vegetation growing in dry conditions. This is due to the prevalence of plants that are resistant to water stress and consequently show a slow and limited summer reduction of remotely sensed  $f_{\text{APAR}}$ . The simulation of this temporal pattern by Biome-BGC is optimized by storing more water during the winter-spring rainy period, which corresponds to increasing the rooting depth.

This modeling tendency reproduces the increase of  $z_{\text{root}}$  that has been experimentally observed in water limited areas and is justified by ecophysiological reasons (i.e., the need for absorbing water from deeper soil layers). This issue degrades the spatial agreement between  $z_{\text{root}}$  and GPP particularly for the most arid and humid ecosystems, that is, GRASS and LDBF, respectively. In the first case the mean optimized  $z_{\text{root}}$  is relatively high due to the need for reproducing the mentioned low impact of summer soil water depletion on  $\text{GPP}_{\text{PEM-LDBF}}$  instead grows in humid environments where rainfall is not a major limiting factor and a high soil water storage capacity is not needed for reproducing the annual evolution of  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$ .

The rooting depths currently obtained (Tables 3 and 5) are generally shallower than the ones reported in the literature (e.g., Canadell et al., 1996). This can be mainly attributed to the previously mentioned different definitions of these depths, since the rooting zone can be much shallower than the soil depth to the bedrock (Kleidon, 2004). The current rooting depths should logically be more comparable to those derived from inverse modeling approaches or biomass rooting profiles (i.e., Guswa, 2010; Kleidon, 2004; Schenk & Jackson, 2002; Yang et al., 2016; Zeng, 2001). The depths found by these studies, however, are extremely variable, mainly depending on the prevailing climatic features. In general, most of these depths ranged from 0.5 m to 2 m. Lower values were found for temperate grasses with respect to forests, and even slightly lower for shrubs, which is generally in agreement with the results of the present study. These differences can be mainly attributed to both the mentioned autoconsistency of Biome-BGC functioning and the approach currently applied for the model optimization, particularly concerning the contrasting needs for increasing the simulated rooting depths in both most productive and arid zones.

## 8. Conclusions

The current study dealt with the optimization of a parameter not tested before for the simulation of daily GPP through Biome-BGC: the rooting depth. This optimization yielded improved simulation results both at local (shallower rooting depths presented the best results when compared to ground data) and regional (correlation between  $\text{GPP}_{\text{PEM}}$  and  $\text{GPP}_{\text{BGC}}$  was risen from 0.65 to 0.91, while the RMSE was reduced from  $0.8 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  to  $0.4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ) scales. Besides, the study yielded the following main conclusions:

1. The simulation of site water budget is a critical issue for the use of Biome-BGC in semiarid Mediterranean areas.
2. This simulation requires that proper parameter settings and drivers are combined with a rooting depth optimized for the model functioning.
3. Due to both theoretical and practical reasons, this rooting depth cannot be derived from existing soil maps.
4. A method is proposed and tested to address this issue and achieve an optimized simulation of vegetation GPP over peninsular Spain.

The obtained optimization of GPP simulation is a starting point for improving Biome-BGC modeling of other main ecosystem processes in the study area. This issue will be addressed in future studies particularly concerning net carbon fluxes, which mainly determine the role of terrestrial ecosystems as carbon sinks.

## References

- Ballabio, C., Panagos, P., & Monatanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma*, 261, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.006>
- Bolle, H. J., Eckardt, M., Koslowsky, D., Maselli, F., Meliá-Miralles, J., Menenti, M., et al. (2006). In H. J. Bolle, et al. (Eds.), *Mediterranean land-surface processes assessed from space*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-45310-9>
- Canadell, J., Jackson, R. B., Ehleringer, J. B., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E.-D. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108(4), 583–595. <https://doi.org/10.1007/BF00329030>
- Cao, M., Prince, S. D., Small, J., & Goetz, S. J. (2004). Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000. *Ecosystems*, 7(3), 233–242. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0189-x>
- Chiesi, M., Cherubini, P., & Maselli, F. (2012). Adaptation of a modelling strategy to predict the NPP of even-aged forest stands. *European Journal of Forest Research*, 131(4), 1175–1184. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0588-z>

### Acknowledgments

Most of the used data can be retrieved from the links provided in section 4. Biome-BGC 4.2 and MT-CLIM 4.3 are freely available through the links provided in sections 2.2 and 4, respectively. The ecophysiological parameters used for each of the considered vegetation types are included as supporting information. Daily precipitation and maximum and minimum air temperature series were obtained by means of a personal agreement with AEMet ([www.aemet.es](http://www.aemet.es)). Some samples of the spatially distributed layers produced from the latter are included as supporting information. This work was partially funded by the BES-2013-64548 grant and the ESCENARIOS (CGL2016-75239-R) project from the Ministerio de Economía y Competitividad (Spain), and by the LSA SAF CDOP-3 project from the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT). The authors would like to specially thank the help provided by Álvaro Moreno and Francisco Javier García-Haro in the spatialization of meteorological data and the elaboration of the SIOSE land cover database, respectively.



- Chiesi, M., Chirici, G., Marchetti, M., Hasenauer, H., Moreno, A., Knohl, A., et al. (2016). Testing the applicability of BIOME-BGC to simulate beech gross primary production in Europe using a new continental weather dataset. *Annals of Forest Science*, 73(3), 713–727. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0560-7>
- Chiesi, M., Maselli, F., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., & Running, S. W. (2007). Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecological Modelling*, 206(1–2), 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.032>
- Chirici, G., Chiesi, M., Corona, P., Salvati, R., Papale, D., Fibbi, L., et al. (2015). Estimating daily forest carbon fluxes using a combination of ground and remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121, 266–279. <https://doi.org/10.1002/2015JG003019>
- Didan, K., & Huete, A. (2015). MOD13Q1 MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN grid. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>
- Farquhar, G. D., Caemmerer, S., & Berry, J. A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149(1), 78–90. <https://doi.org/10.1007/BF00386231>
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Garbulska, M. F., Peñuelas, J., Papale, D., Ardó, J., Goulden, M. L., Kiely, G., et al. (2010). Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 253–267. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00504.x>
- Gilabert, M. A., Moreno, A., Maselli, F., Martínez, B., Chiesi, M., Sánchez-Ruiz, S., et al. (2015). Daily GPP estimates in Mediterranean ecosystems by combining remote sensing and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.01.017>
- Gilabert, M. A., Sánchez-Ruiz, S., & Moreno, A. (2017). Annual gross primary production from vegetation indices: A theoretically sound approach. *Remote Sensing*, 9(3), 193. <https://doi.org/10.3390/rs9030193>
- Guerrero-Campo, J., Palacio, S., Pérez-Rontomé, C., & Montserrat-Martí, G. (2006). Effect of root system morphology on root-sprouting and shoot-rooting abilities in 123 plant species from eroded lands in north-east Spain. *Annals of Botany*, 98(2), 439–447. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl122>
- Guswa, A. J. (2010). Effect of plant uptake strategy on the water-optimal root depth. *Water Resources Research*, 46, W09601. <https://doi.org/10.1029/2010WR009122>
- Heinsch, F. A., Zhao, M., Running, S. W., Kimball, J. S., Nemani, R. R., Davis, K. J., et al. (2006). Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1908–1925. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.853936>
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., & Nagy, Z. (2012). Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modelling*, 226, 99–119. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.11.008>
- IGN (2011). Documento Técnico SIOSE 2011. Equipo Técnico Nacional SIOSE. Retrieved from [http://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Doc\\_tec\\_SIOSE2011\\_v1.1.pdf](http://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Doc_tec_SIOSE2011_v1.1.pdf)
- IPCC (2013). In T. F. Stocker, et al. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1965). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89, 15–41.
- Jung, M., Le Maire, G., Zaehle, S., Luysaert, S., Vetter, M., Churkina, G., et al. (2007). Assessing the ability of three land ecosystem models to simulate gross carbon uptake of forests from boreal to Mediterranean climate in Europe. *Biogeosciences*, 4(2), 1353–1375. <https://doi.org/10.5194/bgd-4-1353-2007>
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H. A., Cescatti, A., Richardson, A. D., Arain, M. A., et al. (2011). Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research*, 116, G00J07. <https://doi.org/10.1029/2010JG001566>
- Kimball, J. S., White, M. A., & Running, S. W. (1997). BIOME-BGC simulations of stand hydrologic processes for BOREAS. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), 29043–29051. <https://doi.org/10.1029/97JD02235>
- Kleidon, A. (2004). Global datasets and rooting zone depth inferred from inverse methods. *Journal of Climate*, 17(13), 2714–2722. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2714:GDORZD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2714:GDORZD%3E2.0.CO;2)
- Kovats, R. S., Valentini, R., Bouwer, L. M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., et al. (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press. Retrieved from [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIARS-Chap23\\_FINAL.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIARS-Chap23_FINAL.pdf)
- LSA-SAF. (2011). Product user manual down-welling surface shortwave flux (D55F). The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF).
- Maselli, F., Argenti, G., Chiesi, M., Angeli, L., & Papale, D. (2013). Simulation of grassland productivity by the combination of ground and satellite data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 165, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.11.006>
- Maselli, F., Chiesi, M., Moriondo, M., Fibbi, L., Bindi, M., & Running, S. W. (2009). Modelling the forest carbon budget of a Mediterranean region through the integration of ground and satellite data. *Ecological Modelling*, 220(3), 330–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.002>
- Maselli, F., Papale, D., Puletti, N., Chirici, G., & Corona, P. (2009). Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 657–667. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.11.008>
- Monteith, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3), 747–766. <https://doi.org/10.2307/2401901>
- Moreno, Á., García-Haro, F., Martínez, B., & Gilabert, M. A. (2014). Noise reduction and gap filling of fAPAR time series using an adapted local regression filter. *Remote Sensing*, 6(12), 8238–8260. <https://doi.org/10.3390/rs6098238>
- Moreno, A., Gilabert, M. A., Camacho, F., & Martínez, B. (2013). Validation of daily global solar irradiation images from MSG over Spain. *Renewable Energy*, 60, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.05.019>
- Moreno, A., Gilabert, M. A., & Martínez, B. (2011). Mapping daily global solar irradiation over Spain: A comparative study of selected approaches. *Solar Energy*, 85(9), 2072–2084. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.05.017>
- Myneni, R. B., & Williams, D. L. (1994). On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49(3), 200–211. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90016-7)



- Pietsch, S. A., Hasenauer, H., Kučera, J., & Cermak, J. (2003). Modeling effects of hydrological changes on the carbon and nitrogen balance of oak in floodplains. *Tree Physiology*, 23(11), 735–746. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.11.735>
- Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., & Klooster, S. A. (1993). Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(4), 811–841. <https://doi.org/10.1029/93GB02725>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., et al. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424–1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01002.x>
- Roujean, J., & Breon, F. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51(3), 375–384. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)
- Running, S., & Hunt, E. (1993). Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-233440-5.00014-2>
- Running, S. W., & Zhao, M. (2015). *User's guide: Daily GPP and annual NPP (MOD17A2/A3) products NASA Earth observing system MODIS land algorithm. Version 3.0*. Missoula: University of Montana.
- Sanchez-Ruiz, S., Moreno, A., Piles, M., Maselli, F., Carrara, A., Running, S., & Gilabert, M. A. (2017). Quantifying water stress effect on daily light use efficiency in Mediterranean ecosystems using satellite data. *International Journal of Digital Earth*, 10(6), 623–638. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1247301>
- Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X., Tsang, T., et al. (2002). Global albedo, BRDF and nadir BRDF-adjusted reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 135–148. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00091-3)
- Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2002). Rooting depths, lateral root spreads and belowground aboveground allometries of plants in water limited ecosystems. *Journal of Ecology*, 90(3), 480–494. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2002.00682.x>
- Schenk, H. J., & Jackson, R. B. (2005). Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics. *Geoderma*, 126(1–2), 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.018>
- Thornton, P., Law, B., Gholz, H. L., Clark, K., Falge, E., Ellsworth, D. S., et al. (2002). Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1–4), 185–222. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00108-9)
- Thornton, P. E., Hasenauer, H., & White, M. A. (2000). Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: An application over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104(4), 255–271. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00170-2)
- Valcarcel, N., Villa, G., Arozarena, A., García-Asensio, L., Caballero, M. E. E., Porcuna, A., et al. (2008). SIOSE, a successful test bench towards harmonization and integration of land cover/use information as environmental reference data. In *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences* (Vol. 37, pp. 1159–1164). Beijing: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) or Copernicus.
- Veroustraete, F., Sabbe, H., & Eeren, H. (2002). Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 83(2), 376–399. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00043-3)
- Waring, H. R., & Running, S. W. (2007). *Forest ecosystems* (3rd ed.). San Diego, CA: Academic Press.
- White, M. A., Thornton, P. E., Running, S. W., & Nemani, R. R. (2000). Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions*, 4(3), 1–85. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2000\)004%3C0003:PASAOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2000)004%3C0003:PASAOT%3E2.0.CO;2)
- Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., & Moore, B. (2004). Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 519–534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- Xiao, X., Zhang, Q., Braswell, B., Urbanski, S., Boles, S., Wofsy, S., et al. (2004). Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91(2), 256–270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.010>
- Yang, Y., Donohue, R. J., & McVicar, T. R. (2016). Global estimation of effective plant rooting depth: Implications for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 52, 8260–8276. <https://doi.org/10.1002/2016WR019392>
- Zeng, X. (2001). Global vegetation root distribution for land modeling. *Journal of Hydrometeorology*, 2(5), 525–530. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002%3C0525:GVRDFL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002%3C0525:GVRDFL%3E2.0.CO;2)

24/7/2018

RightsLink Printable License

**JOHN WILEY AND SONS LICENSE  
TERMS AND CONDITIONS**

Jul 24, 2018

This Agreement between Mr. Sergio Sánchez Ruiz ("You") and John Wiley and Sons ("John Wiley and Sons") consists of your license details and the terms and conditions provided by John Wiley and Sons and Copyright Clearance Center.

License Number	4395320432417
License date	Jul 24, 2018
Licensed Content Publisher	John Wiley and Sons
Licensed Content Publication	Journal of Geophysical Research: Biogeosciences
Licensed Content Title	Optimized Application of Biome-BGC for Modeling the Daily GPP of Natural Vegetation Over Peninsular Spain
Licensed Content Author	Sergio Sanchez-Ruiz, Marta Chiesi, Luca Fibbi, et al
Licensed Content Date	Feb 21, 2018
Licensed Content Volume	123
Licensed Content Issue	2
Licensed Content Pages	16
Type of use	Dissertation/Thesis
Requestor type	Author of this Wiley article
Format	Print and electronic
Portion	Full article
Will you be translating?	No
Title of your thesis / dissertation	REMOTE SENSING AND ECOSYSTEM MODELING TO SIMULATE TERRESTRIAL CARBON FLUXES
Expected completion date	Sep 2018
Expected size (number of pages)	230
Requestor Location	Mr. Sergio Sánchez Ruiz C/Camí molí nou, 5, A5  L'Alcora, Castelló 12110 Spain Attn: Mr. Sergio Sánchez Ruiz
Publisher Tax ID	EU826007151
Total	0.00 EUR
Terms and Conditions	

**TERMS AND CONDITIONS**

This copyrighted material is owned by or exclusively licensed to John Wiley & Sons, Inc. or one of its group companies (each a "Wiley Company") or handled on behalf of a society with which a Wiley Company has exclusive publishing rights in relation to a particular work (collectively "WILEY"). By clicking "accept" in connection with completing this licensing transaction, you agree that the following terms and conditions apply to this transaction (along with the billing and payment terms and conditions established by the Copyright Clearance Center Inc., ("CCC's Billing and Payment terms and conditions"), at the time that you opened your RightsLink account (these are available at any time at <http://myaccount.copyright.com>).

24/7/2018

RightsLink Printable License

### Terms and Conditions

- The materials you have requested permission to reproduce or reuse (the "Wiley Materials") are protected by copyright.
- You are hereby granted a personal, non-exclusive, non-sub licensable (on a stand-alone basis), non-transferable, worldwide, limited license to reproduce the Wiley Materials for the purpose specified in the licensing process. This license, **and any CONTENT (PDF or image file) purchased as part of your order**, is for a one-time use only and limited to any maximum distribution number specified in the license. The first instance of republication or reuse granted by this license must be completed within two years of the date of the grant of this license (although copies prepared before the end date may be distributed thereafter). The Wiley Materials shall not be used in any other manner or for any other purpose, beyond what is granted in the license. Permission is granted subject to an appropriate acknowledgement given to the author, title of the material/book/journal and the publisher. You shall also duplicate the copyright notice that appears in the Wiley publication in your use of the Wiley Material. Permission is also granted on the understanding that nowhere in the text is a previously published source acknowledged for all or part of this Wiley Material. Any third party content is expressly excluded from this permission.
- With respect to the Wiley Materials, all rights are reserved. Except as expressly granted by the terms of the license, no part of the Wiley Materials may be copied, modified, adapted (except for minor reformatting required by the new Publication), translated, reproduced, transferred or distributed, in any form or by any means, and no derivative works may be made based on the Wiley Materials without the prior permission of the respective copyright owner. **For STM Signatory Publishers clearing permission under the terms of the [STM Permissions Guidelines](#) only, the terms of the license are extended to include subsequent editions and for editions in other languages, provided such editions are for the work as a whole in situ and does not involve the separate exploitation of the permitted figures or extracts**, You may not alter, remove or suppress in any manner any copyright, trademark or other notices displayed by the Wiley Materials. You may not license, rent, sell, loan, lease, pledge, offer as security, transfer or assign the Wiley Materials on a stand-alone basis, or any of the rights granted to you hereunder to any other person.
- The Wiley Materials and all of the intellectual property rights therein shall at all times remain the exclusive property of John Wiley & Sons Inc, the Wiley Companies, or their respective licensors, and your interest therein is only that of having possession of and the right to reproduce the Wiley Materials pursuant to Section 2 herein during the continuance of this Agreement. You agree that you own no right, title or interest in or to the Wiley Materials or any of the intellectual property rights therein. You shall have no rights hereunder other than the license as provided for above in Section 2. No right, license or interest to any trademark, trade name, service mark or other branding ("Marks") of WILEY or its licensors is granted hereunder, and you agree that you shall not assert any such right, license or interest with respect thereto
- NEITHER WILEY NOR ITS LICENSORS MAKES ANY WARRANTY OR REPRESENTATION OF ANY KIND TO YOU OR ANY THIRD PARTY, EXPRESS, IMPLIED OR STATUTORY, WITH RESPECT TO THE MATERIALS OR THE ACCURACY OF ANY INFORMATION CONTAINED IN THE MATERIALS, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY, ACCURACY, SATISFACTORY QUALITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, USABILITY, INTEGRATION OR NON-INFRINGEMENT AND ALL SUCH WARRANTIES ARE HEREBY EXCLUDED BY WILEY AND ITS LICENSORS AND WAIVED

24/7/2018

RightsLink Printable License

BY YOU.

- WILEY shall have the right to terminate this Agreement immediately upon breach of this Agreement by you.
- You shall indemnify, defend and hold harmless WILEY, its Licensors and their respective directors, officers, agents and employees, from and against any actual or threatened claims, demands, causes of action or proceedings arising from any breach of this Agreement by you.
- IN NO EVENT SHALL WILEY OR ITS LICENSORS BE LIABLE TO YOU OR ANY OTHER PARTY OR ANY OTHER PERSON OR ENTITY FOR ANY SPECIAL, CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, INDIRECT, EXEMPLARY OR PUNITIVE DAMAGES, HOWEVER CAUSED, ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE DOWNLOADING, PROVISIONING, VIEWING OR USE OF THE MATERIALS REGARDLESS OF THE FORM OF ACTION, WHETHER FOR BREACH OF CONTRACT, BREACH OF WARRANTY, TORT, NEGLIGENCE, INFRINGEMENT OR OTHERWISE (INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, DAMAGES BASED ON LOSS OF PROFITS, DATA, FILES, USE, BUSINESS OPPORTUNITY OR CLAIMS OF THIRD PARTIES), AND WHETHER OR NOT THE PARTY HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. THIS LIMITATION SHALL APPLY NOTWITHSTANDING ANY FAILURE OF ESSENTIAL PURPOSE OF ANY LIMITED REMEDY PROVIDED HEREIN.
- Should any provision of this Agreement be held by a court of competent jurisdiction to be illegal, invalid, or unenforceable, that provision shall be deemed amended to achieve as nearly as possible the same economic effect as the original provision, and the legality, validity and enforceability of the remaining provisions of this Agreement shall not be affected or impaired thereby.
- The failure of either party to enforce any term or condition of this Agreement shall not constitute a waiver of either party's right to enforce each and every term and condition of this Agreement. No breach under this agreement shall be deemed waived or excused by either party unless such waiver or consent is in writing signed by the party granting such waiver or consent. The waiver by or consent of a party to a breach of any provision of this Agreement shall not operate or be construed as a waiver of or consent to any other or subsequent breach by such other party.
- This Agreement may not be assigned (including by operation of law or otherwise) by you without WILEY's prior written consent.
- Any fee required for this permission shall be non-refundable after thirty (30) days from receipt by the CCC.
- These terms and conditions together with CCC's Billing and Payment terms and conditions (which are incorporated herein) form the entire agreement between you and WILEY concerning this licensing transaction and (in the absence of fraud) supersedes all prior agreements and representations of the parties, oral or written. This Agreement may not be amended except in writing signed by both parties. This Agreement shall be binding upon and inure to the benefit of the parties' successors, legal representatives, and authorized assigns.
- In the event of any conflict between your obligations established by these terms and conditions and those established by CCC's Billing and Payment terms and conditions, these terms and conditions shall prevail.

24/7/2018

RightsLink Printable License

- WILEY expressly reserves all rights not specifically granted in the combination of (i) the license details provided by you and accepted in the course of this licensing transaction, (ii) these terms and conditions and (iii) CCC's Billing and Payment terms and conditions.
- This Agreement will be void if the Type of Use, Format, Circulation, or Requestor Type was misrepresented during the licensing process.
- This Agreement shall be governed by and construed in accordance with the laws of the State of New York, USA, without regards to such state's conflict of law rules. Any legal action, suit or proceeding arising out of or relating to these Terms and Conditions or the breach thereof shall be instituted in a court of competent jurisdiction in New York County in the State of New York in the United States of America and each party hereby consents and submits to the personal jurisdiction of such court, waives any objection to venue in such court and consents to service of process by registered or certified mail, return receipt requested, at the last known address of such party.

#### **WILEY OPEN ACCESS TERMS AND CONDITIONS**

Wiley Publishes Open Access Articles in fully Open Access Journals and in Subscription journals offering Online Open. Although most of the fully Open Access journals publish open access articles under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) License only, the subscription journals and a few of the Open Access Journals offer a choice of Creative Commons Licenses. The license type is clearly identified on the article.

##### **The Creative Commons Attribution License**

The [Creative Commons Attribution License \(CC-BY\)](#) allows users to copy, distribute and transmit an article, adapt the article and make commercial use of the article. The CC-BY license permits commercial and non-

##### **Creative Commons Attribution Non-Commercial License**

The [Creative Commons Attribution Non-Commercial \(CC-BY-NC\) License](#) permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.(see below)

##### **Creative Commons Attribution-Non-Commercial-NoDerivs License**

The [Creative Commons Attribution Non-Commercial-NoDerivs License \(CC-BY-NC-ND\)](#) permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited, is not used for commercial purposes and no modifications or adaptations are made. (see below)

##### **Use by commercial "for-profit" organizations**

Use of Wiley Open Access articles for commercial, promotional, or marketing purposes requires further explicit permission from Wiley and will be subject to a fee.

Further details can be found on Wiley Online Library

<http://olabout.wiley.com/WileyCDA/Section/id-410895.html>

#### **Other Terms and Conditions:**

##### **v1.10 Last updated September 2015**

**Questions? [customer@copyright.com](mailto:customer@copyright.com) or +1-855-239-3415 (toll free in the US) or +1-978-646-2777.**