

Vallés Iborra, M.; Campos Taberner, M.; Gilabert, M. Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

# Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

Vallés Iborra, M.<sup>1</sup> Campos Taberner, M.<sup>1</sup> Gilabert, M.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UV-ERS, Facultat de Física, Universitat de València

ORCID: Campos Taberner 0000-0001-5929-3942 Gilabert 0000-0002-3548-1524

Correspondencia: [vaima@alumni.uv.es](mailto:vaima@alumni.uv.es) [manuel.campos@uv.es](mailto:manuel.campos@uv.es) [m.amparo.gilabert@uv.es](mailto:m.amparo.gilabert@uv.es)

## RESUMEN

La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE), definida como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP) y la evapotranspiración (ET), constituye un indicador clave del acoplamiento entre los ciclos del carbono y del agua a escala global. En este trabajo se analiza la distribución espacial y la variabilidad temporal de la WUE durante el periodo 2000–2020 a partir del producto Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML\_V2). Se calculó la WUE a nivel de píxel para todo el periodo de estudio y se generó una climatología media global, que reveló una WUE media de 2,01 g kg<sup>-1</sup>, donde los valores máximos se concentran en bosques templados y zonas agrícolas del hemisferio norte, mientras que los mínimos corresponden a desiertos y tundra. Adicionalmente, se analizó la evolución temporal de la WUE en tres regiones representativas: Almería (España), el norte de la Amazonia (Venezuela) y la Meseta de Loess (China). Los resultados muestran tendencias diferentes, con un descenso significativo de la WUE en la región mediterránea semiárida, una respuesta interanual marcada por eventos extremos en Amazonia, y un incremento sostenido en la Meseta de Loess asociado a restauración ecológica. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad de la WUE para monitorizar la respuesta de los ecosistemas frente a la variabilidad climática y a gestiones de usos del suelo.

**Palabras clave:** Eficiencia del uso del agua (WUE), evapotranspiración (ET), productividad primaria bruta (GPP)


Fecha de recepción: 9 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026


# Eficiencia del uso del agua de los ecosistemas a nivel global a partir de datos de satélite

Vallés Iborra, María <sup>(1)</sup>, Campos-Taberner, Manuel <sup>(1)</sup>, Gilabert, María Amparo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> UV-ERS, Facultat de Física, Universitat de València, España,

vaima@alumni.uv.es

 0000-0001-5929-3942, manuel.campos@uv.es.

 0000-0002-3548-1524, m.amparo.gilabert@uv.es.

**Resumen:** La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE), definida como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP) y la evapotranspiración (ET), constituye un indicador clave del acoplamiento entre los ciclos del carbono y del agua a escala global. En este trabajo se analiza la distribución espacial y la variabilidad temporal de la WUE durante el periodo 2000–2020 a partir del producto Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML\_V2). Se calculó la WUE a nivel de píxel para todo el periodo de estudio y se generó una climatología media global, que reveló una WUE media de 2,01 g kg<sup>-1</sup>, donde los valores máximos se concentran en bosques templados y zonas agrícolas del hemisferio norte, mientras que los mínimos corresponden a desiertos y tundra. Adicionalmente, se analizó la evolución temporal de la WUE en tres regiones representativas: Almería (España), el norte de la Amazonia (Venezuela) y la Meseta de Loess (China). Los resultados muestran tendencias diferentes, con un descenso significativo de la WUE en la región mediterránea semiárida, una respuesta interanual marcada por eventos extremos en Amazonia, y un incremento sostenido en la Meseta de Loess asociado a restauración ecológica. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad de la WUE para monitorizar la respuesta de los ecosistemas frente a la variabilidad climática y a gestiones de usos del suelo.

**Palabras clave:** Evapotranspiración (ET), productividad primaria bruta (GPP), Penman–Monteith–Leuning versión 2 (PML\_V2), Google Earth Engine (GEE)

## English Title

**Abstract:** *Ecosystem Water Use Efficiency (WUE), defined as the ratio between Gross Primary Production (GPP) and Evapotranspiration (ET), constitutes a key indicator of the coupling between carbon and water cycles at a global scale. This work analyzes the spatial distribution and temporal variability of WUE during the period 2000–2020 based on the Penman–Monteith–Leuning version 2 (PML\_V2) product. WUE was calculated at the pixel level for the entire study period, and a global mean climatology was generated, revealing a mean WUE of 2.01 g kg<sup>-1</sup>, where maximum values are concentrated in temperate forests and agricultural zones of the Northern Hemisphere, while minimums correspond to deserts and tundra. Additionally, the temporal evolution of WUE was analyzed in three representative regions: Almería (Spain), Northern Amazonia (Venezuela), and the Loess Plateau (China). Results show contrasting trends, with a significant decrease in WUE in the semi-arid Mediterranean region, an interannual response marked by extreme events in Amazonia, and a sustained increase in the Loess Plateau associated with land use changes. These results highlight the utility of WUE for monitoring ecosystem response to climate variability and land use management.*

**Keywords:** *Evapotranspiration (ET), Gross Primary Production (GPP), Penman–Monteith–Leuning version 2 (PML\_V2), Google Earth Engine (GEE)*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres juegan un papel fundamental en la regulación de los ciclos globales del carbono y del agua. Caracterizar y comprender el acoplamiento entre estos ciclos es clave para una mejor adaptación en el

actual contexto de cambio climático (Wang *et al.*, 2026). La eficiencia del uso del agua de los ecosistemas (WUE, por sus siglas en inglés), definida comúnmente en ecología como el cociente entre la productividad primaria bruta (GPP, por sus siglas en inglés) y la evapotranspiración (ET), es un indicador útil para

describir este acoplamiento biológico y físico (Tang *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2016). Este indicador no solo refleja la capacidad de la vegetación para asimilar carbono por unidad de agua perdida, sino que también es esencial para evaluar la respuesta de los ecosistemas ante fenómenos climáticos extremos, como las sequías, y para la gestión sostenible de los recursos hídricos.

A escala global, la WUE presenta una alta variabilidad espacial y temporal influenciada por factores bióticos y abióticos. Investigaciones previas han demostrado respuestas contrastadas de la WUE frente a la sequía dependiendo de la zona climática; por ejemplo, se ha observado que tiende a aumentar en ecosistemas áridos debido a limitaciones físicas, mientras que disminuye en regiones semiáridas y subhúmedas donde dominan los procesos biológicos (Yang *et al.*, 2016). Asimismo, la dinámica temporal de la WUE está fuertemente condicionada por variables como el déficit de presión de vapor (VPD, por sus siglas en inglés) y el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), los cuales modulan tanto la fotosíntesis como la transpiración (Lu & Zhuang, 2010). Tradicionalmente, la estimación de la WUE se ha basado en mediciones in situ mediante torres *eddy covariance*. Sin embargo, aunque estas mediciones son precisas, su cobertura espacial es limitada y discontinua, lo que dificulta la caracterización de patrones a escala global (Tang *et al.*, 2014). En este sentido, la teledetección se presenta como una herramienta indispensable, permitiendo la observación continua y consistente de la superficie terrestre. El uso de productos satelitales, como los derivados de sensores MODIS, ha permitido escalar las estimaciones de GPP y ET para monitorear la WUE a nivel regional y planetario (Lu & Zhuang, 2010). No obstante, la precisión de estas estimaciones depende intrínsecamente de la calidad de los productos de GPP y ET utilizados, siendo necesaria la validación y el uso de modelos avanzados que integren mejor la conductancia estomática y la evaporación del suelo.

El objetivo de este trabajo es caracterizar la distribución espacio-temporal de la eficiencia del uso del agua a escala global durante las últimas dos décadas (2000-2020). Para ello, se ha utilizado el producto Penman-Monteith-Leuning versión 2 (PML\_V2) (Zhang *et al.*, 2019), disponible en la plataforma de procesamiento en la nube Google Earth Engine (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017).

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Datos de satélite

Se utiliza el producto de teledetección PML\_V2 (colección CAS/IGSNRR/PML/V2\_v018), accesible en el catálogo de datos de GEE. Este producto proporciona estimaciones globales de ET y GPP con una resolución espacial de 500 m y una frecuencia temporal de 8 días. El algoritmo que utiliza el producto PML\_V2 se basa en un modelo de conductancia de la cubierta vegetal que explota los productos de LAI, albedo y emisividad de la superficie de MODIS. Estos datos de teledetección se combinan con forzamientos meteorológicos del sistema de asimilación GLDAS (radiación solar, temperatura,

humedad y velocidad del viento) para resolver la ecuación de Penman-Monteith.

### 2.2. Procesado y análisis

El procesado de datos para el cálculo de la WUE se lleva a cabo íntegramente en la plataforma GEE, en la nube. Las imágenes obtenidas a partir del producto PMLV2 se corresponden con observaciones globales donde la WUE se calcula como  $WUE = GPP/ET$  expresada en gramos de carbono fijado por kilogramo de agua transpirada ( $g\ kg^{-1}$ ). La WUE se calcula a nivel de píxel para cada imagen disponible comprendida entre el 26 de febrero del 2000 (primera fecha disponible) hasta el 31 de diciembre de 2020, abarcando así dos décadas de datos a escala global.

Posteriormente, se realiza una agregación temporal para obtener la climatología media del periodo 2000-2020. Se calcula la media de la WUE para cada píxel considerando las observaciones válidas disponibles en la serie, generando un mapa global que representa la WUE media a largo plazo de los ecosistemas terrestres (Fig. 1). Finalmente, se realiza un estudio preliminar de la evolución temporal de la WUE. En concreto se seleccionaron tres zonas de estudio potencialmente vulnerables a eventos que alteren el estado de los ecosistemas: Almería (estrés hídrico en clima mediterráneo), Amazonia (sensibilidad a eventos climáticos extremos como El Niño) y la Meseta de Loess (afectada por políticas de restauración ecológica). Para cada zona, se extrajo el valor medio de  $3 \times 3$  píxeles para asegurar representatividad espacial de los resultados.

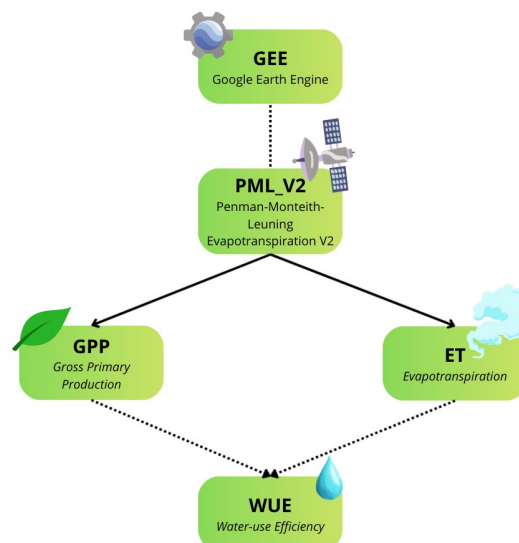


Figura 1. Esquema del flujo de trabajo realizado.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra estimaciones de la WUE media a nivel de píxel durante el período 2000-2020. Se puede observar que los valores medios de WUE oscilan globalmente mostrando una heterogeneidad espacial influenciada latitudinalmente por los regímenes climáticos y también por la distribución de los biomas terrestres. Estas distribuciones vienen caracterizadas por la disponibilidad hídrica y la productividad primaria bruta en cada zona. En concreto, los valores más

elevados de WUE se concentran predominantemente en las latitudes medias del hemisferio norte. Estas zonas, dominadas por bosques templados caducifolios y mixtos,

así como por áreas de agricultura intensiva, muestran una alta capacidad de asimilación de carbono en relación con la transpiración.

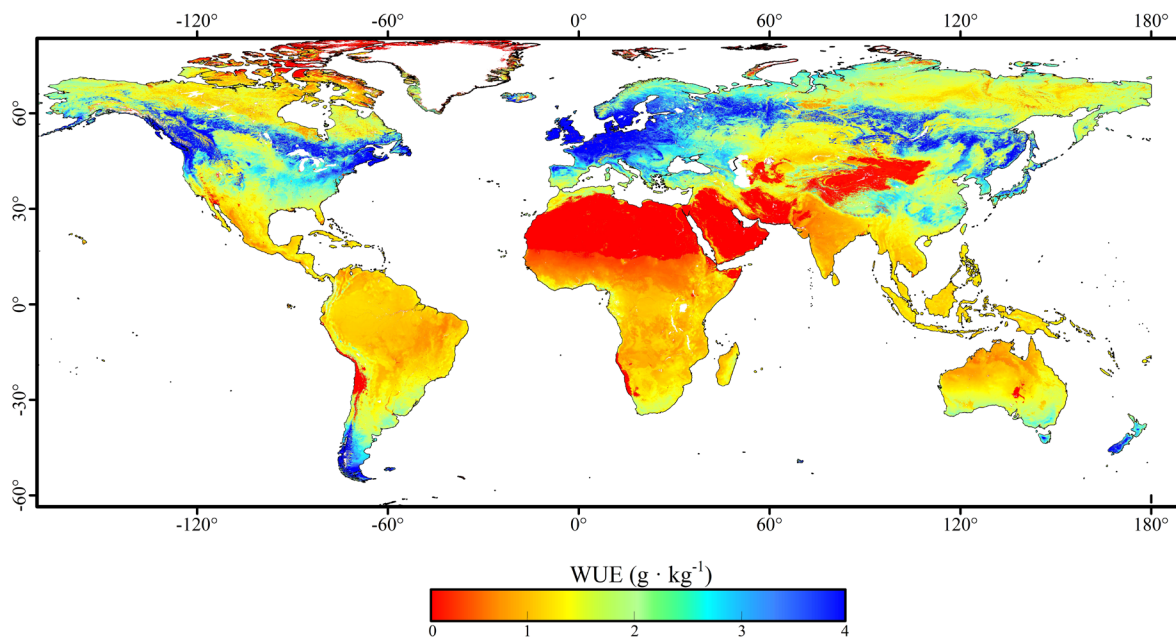


Figura 2. WUE media global durante el período 2000-2020.

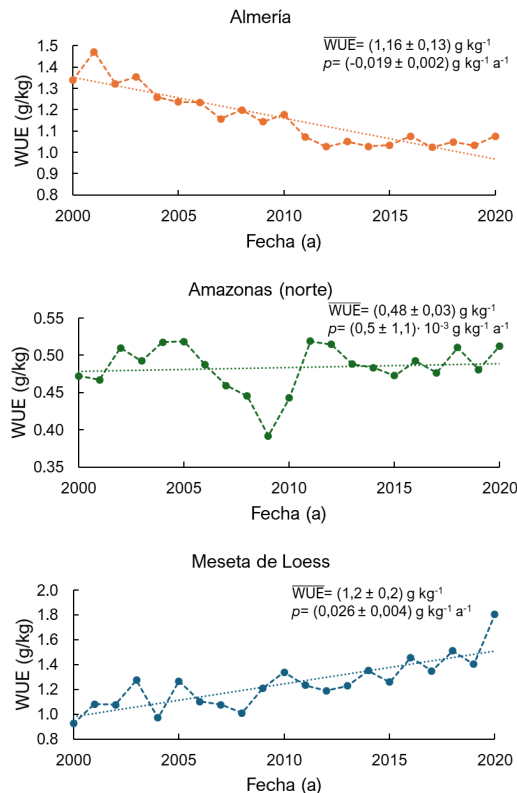
Además, también se reportan valores elevados de WUE en zonas de Rusia y Canadá. En estas zonas, aunque la ET es moderada debido a bajas temperaturas, la GPP es lo suficientemente alta para proporcionar un valor elevado del cociente GPP/ET. Por su parte, las regiones tropicales húmedas, como la cuenca del Amazonas y el Congo, presentan valores de WUE intermedios a moderados. Aunque la GPP en estos biomas es de las más elevadas del planeta (Campos-Taberner *et al.*, 2024), la ET también lo es (Zhang *et al.*, 2019), resultando en una eficiencia moderada por unidad de agua transpirada. Finalmente, los valores más bajos de WUE se reportan sobre desiertos (productividad nula), y sobre biomas de Tundra en latitudes extremas donde las bajas temperaturas reducen mucho más la GPP en comparación con la ET, resultando en una baja eficiencia. Agregando todos los valores, se obtuvo un valor de  $2.01 \text{ g kg}^{-1}$  para la WUE global media durante el período 2000-2020. Este valor es ligeramente superior al obtenido por otros estudios como Xue *et al.* (2015), que reportó  $1.70 \text{ g kg}^{-1}$  en el período 2000-2013.

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la WUE para las tres zonas seleccionadas en este trabajo. En la región semiárida de Almería se obtuvo una tendencia decreciente sostenida de la WUE con una pendiente de  $p = (-0.019 \pm 0.002) \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Una de las posibles causas en esta tendencia en la zona mediterránea es la aridificación progresiva, caracterizada por una reducción gradual de la relación entre GPP y ET. Este patrón es coherente con la diferencia de respuestas de ecosistemas a sequías interanuales, donde bajo condiciones semiáridas la WUE tiende a disminuir cuando la productividad neta responde con mayor sensibilidad a la escasez hídrica que la ET residual (Yang *et al.*, 2016). En la región amazónica, la WUE presentó un

incremento muy bajo, con una pendiente de  $p = (0.5 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , y una marcada disminución alrededor de 2009–2010. Esta disminución coincide con un episodio intenso de El Niño que estuvo asociado a una reducción significativa de la precipitación durante la estación seca en Amazonia y a condiciones de sequía extrema más severas que eventos anteriores (Lewis *et al.*, 2011). Dichas condiciones promovieron un estrés hídrico sustancial, induciendo una disminución de la asimilación de carbono, pero no de evapotranspiración, lo que resultó en el descenso observado de la WUE. La sequía de 2010 redujo el verdor de la vegetación y retrasó la recuperación de la productividad fotosintética incluso después de normalizadas las precipitaciones (Xu *et al.*, 2011). La posterior recuperación de WUE se asocia con el retorno de condiciones más húmedas. Por su parte, la región de la Meseta de Loess en China mostró un incremento sostenido de la WUE durante todo el período analizado con una pendiente de  $p = (0.026 \pm 0.004) \text{ g kg}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Este incremento se atribuye principalmente a la implementación del programa 'Grain for Green' (Deng *et al.*, 2019), que ha propiciado el cambio del uso del suelo en la zona mediante la aplicación de técnicas de agricultura regenerativa. La restauración de la vegetación ha generado un desacoplamiento entre la ganancia de carbono y la pérdida de agua: mientras que la GPP ha aumentado debido al aumento de vegetación, la ET se ha incrementado a una tasa menor, mitigada por la reducción de la evaporación del suelo gracias al cierre de la cubierta vegetal.

Las estimaciones de WUE reportadas en este estudio están sujetas a incertidumbres de los productos de GPP y ET. La precisión del modelo PML\_V2 depende de la calidad de los datos de entrada. Limitaciones como la

saturación del LAI en biomás de alta densidad foliar, pueden introducir sesgos en la cuantificación de la GPP. Por último, aunque el algoritmo de PML\_V2 avanza en la integración de la conductancia estomática, la distinción entre la evaporación del suelo y la transpiración de la vegetación sigue siendo un reto en ecosistemas áridos.



**Figura 3.** Evolución de la WUE en Almería, en el Amazonas y en la Meseta de Loess (de arriba abajo).

El análisis temporal evidencia que la WUE actúa como un indicador sensible a las distintas presiones que sufren los ecosistemas, mostrando tendencias divergentes según el factor dominante: un decrecimiento sostenido en zonas semiáridas como Almería debido a la aridificación; fluctuaciones abruptas en el Amazonas asociadas a eventos de sequía extrema; y un incremento constante en la meseta de Loess, en China, derivado de la intervención humana modificando usos del suelo. Estos resultados destacan la capacidad de la WUE estimada a partir de teledetección para identificar efectos climáticos y antrópicos en los ciclos de carbono y agua, proporcionando información esencial para la gestión sostenible de los ecosistemas.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Ayuda PID2020-118036RB-I00 financiada por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por "FEDER Una manera de hacer Europa".

#### 5. REFERENCIAS

Campos-Taberner, M., Gilabert, M. A., Sánchez-Ruiz, S., Martínez, B., Jiménez-Guisado, A., García-Haro, F. J., & Guanter, L. (2024). Global carbon fluxes using

multioutput Gaussian processes regression and MODIS products. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 11310-11321.

<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3413184>

Deng, L., Kim, D. G., Li, M., Huang, C., Liu, Q., Cheng, M., ... & Peng, C. (2019). Land-use changes driven by 'Grain for Green' program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China. *Global and Planetary Change*, 177, 101-115. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.017>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van Der Heijden, G. M., & Nepstad, D. (2011). The 2010 amazon drought. *Science*, 331(6017), 554-554. <https://doi.org/10.1126/science.1200807>

Lu, X., & Zhuang, Q. (2010). Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1924-1939. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.04.001>

Tang, X., Li, H., Desai, A. R., Nagy, Z., Luo, J., Kolb, T. E., Olliso, A., Xu, X., Yao, L., Kutsch, W., Pilegaard, K., Köstner, B., & Ammann, C. (2014). How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Scientific Reports*, 4(1), 7483. <https://doi.org/10.1038/srep07483>

Wang, X., Fu, Z., Ciais, P., Peñuelas, J., Xiao, J., Li, X., Luo, X., Chen, C., Xia, H., Zhou, T., Stoy, P. C., Green, J. K., & Zhang, F. (2026). Multi-satellite derived data reveals spatiotemporal dynamics of carbon-water coupling and its drivers in tropical ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 334, 115242. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.115242>

Xu, L., Samanta, A., Costa, M. H., Ganguly, S., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2011). Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophysical Research Letters*, 38(7). <https://doi.org/10.1029/2011GL046824>

Xue, B. L., Guo, Q., Otto, A., Xiao, J., Tao, S., & Li, L. (2015). Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. *Ecosphere*, 6(10), 1-18. <https://doi.org/10.1890/ES14-00416.1>

Yang, Y., Guan, H., Batelaan, O., McVicar, T. R., Long, D., Piao, S., Liang, W., Liu, B., Jin, Z., & Simmons, C. T. (2016). Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, 6(1), 23284. <https://doi.org/10.1038/srep23284>

Zhang, Y., Kong, D., Gan, R., Chiew, F. H., McVicar, T. R., Zhang, Q., & Yang, Y. (2019). Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017. *Remote sensing of environment*, 222, 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031>