

CASO PRÁCTICO

PhenoApp. Una aplicación basada en *Google Earth Engine* para el monitoreo de la fenología

Diego García-Díaz*, Ricardo Díaz-Delgado

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, Estación Biológica de Doñana (CSIC), Avenida Américo Vespucio 26, Sevilla, España.

Resumen: La aplicación PhenoApp ha sido desarrollada en el marco de los proyectos eLTER Plus y SUMHAL, como una herramienta dirigida a científicos y gestores de los sitios integrados en la red eLTER, con la cual puede realizarse un seguimiento de la fenología a largo plazo de diferentes cubiertas vegetales. La aplicación proporciona un mapa dinámico, que permite la selección de cualquier sitio de la red y consultar las métricas fenológicas de cada píxel o grupo de píxeles generadas con la serie de imágenes Sentinel 2 usando las librerías de Python Ndvi2Gif y PhenoPY. La aplicación integra también los productos de fenología de MODIS (MCD12Q2.006) y de Copernicus Sentinel 2 *High Resolution Vegetation Phenology Product* (HR-VPP). Además, la aplicación incorpora un formulario que permite al usuario proporcionar los datos de fenología obtenidos in situ (mediante observación directa o fenocámaras), que se usarán para realizar una validación de los distintos productos obtenidos vía satélite. A modo de ejemplo, se muestra la validación efectuada en uno de los sitios de la red eLTER ubicado en el Espacio Natural de Doñana (END), usando como datos *in situ* los proporcionados por la red de fenocámaras instaladas en la Reserva Biológica de Doñana a partir de 2016, dentro del marco de la Infraestructura Científica y Técnica Singular de Doñana (ICTS-Doñana). Un análisis de validación preliminar pone de manifiesto la necesidad de considerar las discrepancias entre los distintos productos y métodos de acuerdo con la variabilidad fenológica inherente a cada ecosistema.

Palabras clave: fenología, fenocámaras, *Google Earth Engine*, Geemap, Python.

PhenoApp. A Google Earth Engine based tool for monitoring phenology

Abstract: PhenoApp application have been developed within the framework of the eLTER Plus and SUMHAL projects, as a tool aimed at scientists and managers of the sites integrated in the eLTER network, for which long-term phenology monitoring can be assessed. The application provides a dynamic map that allows the selection of any site in the network and queries the phenological metrics of each pixel or group of pixels generated with the Sentinel-2 time series of images using the Ndvi2Gif and PhenoPY python libraries. The application also integrates phenology products from MODIS (MCD12Q2.006) and Copernicus Sentinel 2 High Resolution Vegetation Phenology Product (HR VPP). In addition, the application incorporates a web form that allows the user to provide the phenology data obtained in situ (through direct observation or phenocams), which will be used to perform a validation of the different products obtained via satellite. As an example, we carried out a preliminary validation in one of the sites of the eLTER network located in the Doñana Natural Area (END). We used in situ data provided by the network of phenocams in the Doñana Biological Reserve since 2016 installed by the Singular Scientific and Technical Infrastructure of Doñana (ICTS-Doñana). A preliminary validation analysis highlights the need to consider the discrepancies between the different products and methods according to the phenological variability inherent in each ecosystem.

Key words: phenology, phenocams, Google Earth Engine, Geemap, Python.

To cite this article: García-Díaz, D., Díaz-Delgado, R. 2023. PhenoApp. A *Google Earth Engine* based tool for monitoring phenology. *Revista de Teledetección*, 61, 73-81. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.18767>

* Corresponding author: diegogarcia@ebd.csic.es

1. Introducción

La investigación y monitoreo de ecosistemas a largo plazo es fundamental para mejorar nuestro conocimiento sobre su estructura y sus funciones, y sus posibles respuestas a futuro ante cambios ambientales, económicos y sociales. Con este objetivo surgió el Proyecto eLTER Plus (*European Long Term Ecosystem Critical Zone and Socio-Ecological systems Research Infrastructure*) cuyo objetivo es facilitar la investigación socio-ecológica de alto impacto y catalizar nuevos conocimientos sobre los efectos combinados del cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la degradación del suelo, la contaminación y el uso insostenible de recursos en ecosistemas terrestres, de agua dulce y de aguas de transición. Para ello, una de las herramientas fundamentales de observación en continuo manejado por eLTER es la teledetección, que permite obtener de forma remota información relevante sobre distintas variables definidas como esenciales para el seguimiento de los ecosistemas (Haase et al., 2018). Así, el proyecto eLTER se está consignando como una referencia para el seguimiento ecológico a largo plazo, mediante la adquisición de datos armonizados y estandarizados, que permitan hacer medidas y estudios comparables en los más de 500 sitios actualmente adscritos al proyecto (Haase et al., 2016). A modo de ejercicio de co-localización entre infraestructuras europeas, nuestra aplicación servirá como estudio piloto para la integración de datos a los *Virtual Research Environments* (VRE) del proyecto *Sustainability for Mediterranean Hotspots in Andalusia integrating Lifewatch ERIC* (SUMHAL).

Entre las variables esenciales identificadas por eLTER, la fenología constituye una información esencial ya que es clave para conocer la integridad de los ecosistemas. La aplicación está diseñada para los sitios adscritos a eLTER, aunque el ejemplo mostrado en este trabajo se centra en uno de ellos: el Espacio Natural de Doñana. En dicho espacio se encuentran instaladas varias fenocámaras por parte de la Infraestructura Científico-Técnica Singular de Doñana (ICTS-RBD). En la actualidad se cuenta con 8 fenocámaras instaladas desde 2016 en adelante, que se encuentran localizadas en distintos puntos del Parque Nacional, de modo que abarquen la mayor variedad de ecosistemas

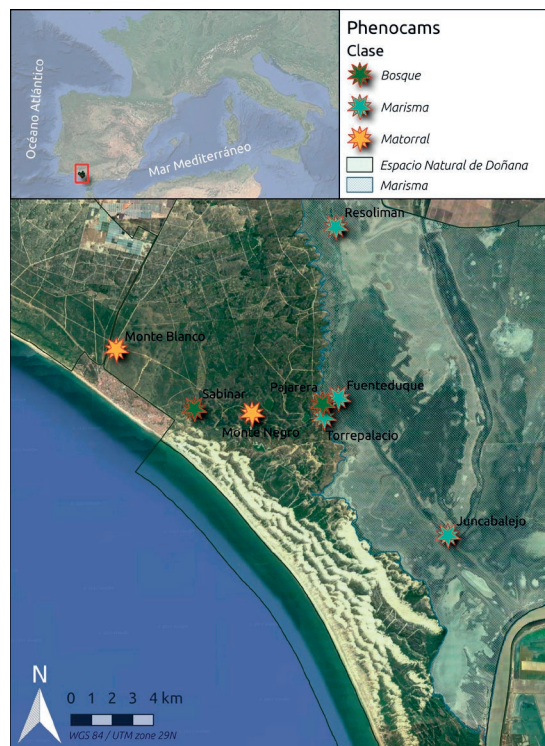


Figura 1. Localización y tipología de la vegetación de las fenocámaras de la ICTS-RBD en el Espacio Natural de Doñana. Está prevista la instalación de 10 nuevas fenocámaras en 2023.

posible. Existe también un servicio de *streaming* en directo desde el que acceder a las cámaras alojado en la web de la Estación Biológica de Doñana: <http://icts.ebd.csic.es/es/phenocams>.

Una fenocámara (*phenocam*) es una cámara digital que captura imágenes diarias en el espectro óptico de los ecosistemas y de las que se obtienen valores relacionados con el vigor vegetativo como indicador fenológico (Richardson et al., 2018). Las cámaras del END (Stardot© NetCam SC 5MP IR) recopilan imágenes en los canales Rojo, Verde, Azul (RGB) e Infrarrojo (IR) cada 30 minutos entre las 6:00 y las 18:00 UTC. Al contar con un canal en el Infrarrojo, se pueden generar índices de vegetación tradicionales como el NDVI. De forma automática, se genera otro índice que utiliza el canal verde (*Green Chromatic Coordinate* o GCC) vinculado con la actividad vegetativa de las plantas (Moorgen y Bradley, 2021). El GCC se calcula para áreas de interés (ROI) predefinidas

por el usuario dentro del campo de visión de la cámara. Idealmente las ROIs recogen la vegetación representativa de la cubierta de estudio. Esto permite tener una serie temporal coherente de la dinámica fenológica de las cubiertas en esas áreas de interés (Figura 2). Mediante la interpolación de la serie temporal del GCC (o NDVI) se estiman las fechas de transición entre las distintas fenofases de acuerdo a diferentes umbrales estadísticos. Por lo general, estos umbrales se definen como el punto de corte entre la curva interpolada del índice de vegetación con la media, la mediana o algún percentil (generalmente entre el 5 y el 50) de la amplitud total alcanzada en el ciclo fenológico. Es decir, cuando las fases ascendente y descendente de la curva alcanzan un valor determinado. La otra metodología para encontrar el punto de corte de la curva del que inferir las fenométricas, se centra en buscar los puntos de inflexión de la propia curva, lo cual se hace habitualmente usando la derivada (Tian et al., 2021).

Por otro lado, Google Earth Engine (GEE) ha supuesto una revolución en la forma de trabajar los datos *raster* y las series temporales de imágenes de teledetección (Amani et al., 2020; Gorelick et al., 2017; Moore y Hansen, 2011). La posibilidad de acceder de forma global a una

amplia variedad de imágenes de distintos satélites/sensores (*collections*) y procesarlas en la nube sin necesidad de descarga, permite implementar aplicaciones automáticas de procesamiento y análisis, listas para servir resultados a escala global.

El objetivo del presente trabajo es mostrar el proceso empleado para la creación de una herramienta automática de extracción de métricas fenológicas para cualquier sitio de la red eLTER, obtenidas mediante diferentes métodos y diferentes sensores, y que se centra principalmente en la interacción con el usuario facilitando la consulta, subida y bajada de datos fenológicos, así como la comparación con los datos adquiridos sobre el terreno (*in situ*).

2. Material y métodos

Nuestra aplicación utiliza la serie temporal de imágenes del sensor *MultiSpectral Instrument* de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B de la Agencia Espacial Europea (ESA), lo cual nos permite contar con una resolución temporal de 5 días, para la determinación de las métricas fenológicas de los sitios de estudio. Estos sitios de estudio son los *sites* adscritos la red eLTER que cuentan con datos fenológicos y que tienen interés en cotejarlos con

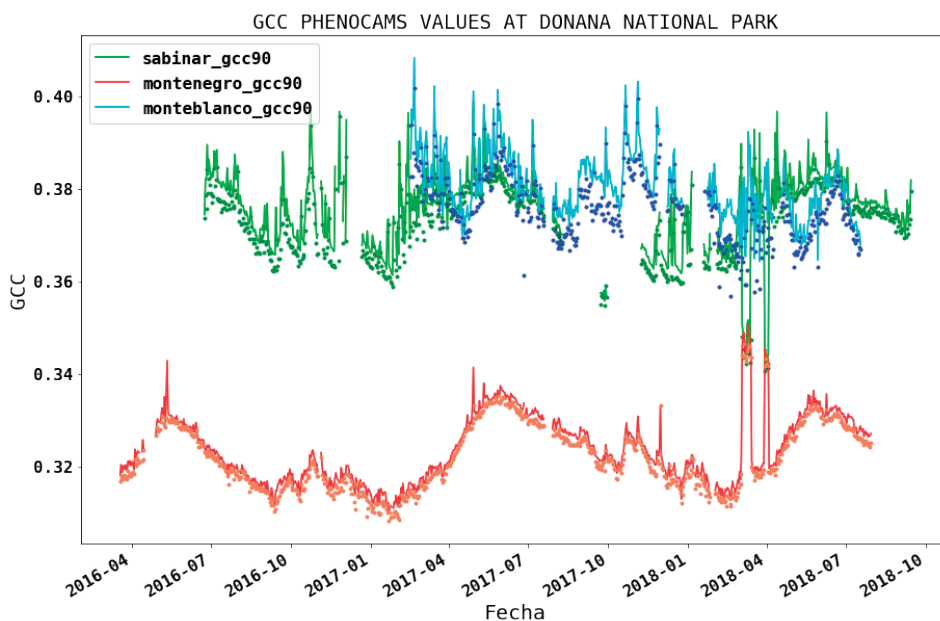


Figura 2. Ejemplo de series temporales del gcc obtenidos de los datos de phenocams.

los valores obtenidos mediante imágenes de satélite. Para ello, la aplicación utiliza la tecnología de Google Earth Engine y las librerías de Python Geemap (Wu, 2020), Phenopy (Lopatín, 2021) y Ndvi2Gif (García, 2021). Aparte de los datos generados por nosotros con PhenoPy y Ndvi2Gif, la aplicación también sirve los valores de las mismas métricas fenológicas que proporcionan los productos MCD12Q2.006 de MODIS y HR-VPP de Copernicus.

Uno de los objetivos principales de la aplicación es la validación de las métricas fenológicas (en el apartado de resultados se ofrece una muestra de la validación en una zona de Sabinar del Espacio Natural de Doñana) derivadas de las imágenes satélite, con aquellas obtenidas mediante fenocámaras o valores tomados *in situ* por personal técnico de campo de los *sites* participantes. Con objeto de recoger la información proporcionada para la validación, la aplicación ofrece un formulario web que permite al usuario subir los valores a una base de datos gestionada desde PhenoApp. Se trata de un formulario integrado dentro de la aplicación, que permite rellenar los valores de las métricas fenológicas *Start of the Season* (SOS), *Maximun of the Season* (MOS) y *End of the Season* (EOS), así como información espacial sobre las coordenadas de las observaciones e información sobre la persona que las realiza. Estos datos van vinculados al *site* mediante la *Id*, lo cual se hace utilizando la API (*Application Programming Interfaces*) creada en el marco del DEIMS-SDR (*Dynamic Ecological Information Management System - Site and dataset registry*. Wohner et al., 2022).

2.1. Cálculo de métricas con Google Earth Engine y librerías de Python

PhenoApp utiliza Google Earth Engine mediante la librería de Python Geemap, que actúa como una API para trabajar usando los servidores y algoritmos de GEE, y añade además, la potencia del ecosistema de Python para el procesado de datos, junto con la aplicación de mapas Leafmap (Wu, 2021) que permite montar servicios de mapas dinámicos dentro del entorno de Python, fundamentalmente en entornos de desarrollo basados en el proyecto Jupyter (Kluyver, et al., 2017), tales como *Jupyter Notebooks*, *Jupyter Labs* o *Google Colabs*. Por tanto, PhenoApp puede ejecutarse en cualquiera de esos entornos, lo que ha favorecido su integración con otro de los servicios de software ofrecidos por eLTER: Los Laboratorios Virtuales o *Datalabs*, desarrollados por el *UK Centre for Ecology & Hydrology* (UKCEH), miembro adscrito a eLTER, que ofrece este servicio de *hosting* de un entorno Jupyter para los *sites* miembros.

Los mapas dinámicos creados con Geemap permiten la interacción con el usuario mediante la gestión de la comunicación entre el *backend* y el *frontend*, permitiendo la creación de *webapps* como la nuestra a través de la creación y edición de *widgets*, a los cuales se puede dotar de una interfaz gráfica y unas funcionalidades específicas para la ejecución del código requerido por el desarrollador. Esto último, unido a los *Datalabs*, permite el acceso centralizado y online para toda la comunidad eLTER a nuestro servicio con los parámetros fenológicos calculados para sus *sites*.

Phenology Upload Data Form

Welcome to PhenoApp. From this form you can send your phenological data in 2 ways:

- Uploading [this template](#) using the Upload data button
- Filling the boxes for:
 1. Start of Season (SOS)
 2. Max of Season (MOS)
 3. End of Season (EOS)

We appreciate your data and we kindly ask you that:

- Data starts in 2017 (Sentinel 2 is our target dataset)
- Phenometrics tabular data coming from phenocams or Webcams are welcome, but we are not working yet with the images. We will expect to do so in the future
- Land Cover types should be according with Corine Land Cover classes [CLC](#)

Collector Name:

Collector Email:

Insert Latitude Coordinate (decimal degrees):

Insert Longitude Coordinate (decimal degrees):

Land Cover Type (Copernicus):

eLTER Site:

Upload file:

Name:

Email:

Latitude:

Longitude:

Land Cove...:

eLTER Site:

Upload file:

SOS: MOS: EOS:

SOS:

Comments:

Figura 3. Formulario de la aplicación para la subida de datos.

Aunque PhenoApp puede ejecutarse dentro de cualquier entorno Jupyter, de momento solo se ofrece como servicio abierto a los miembros de eLTER a través de los *Datalabs* del UKCEH.

Para la estima de las métricas fenológicas se utilizan las librerías de Python *Ndvi2Gif* y *PhenoPY*, con las que se realiza el procesamiento de la serie temporal de imágenes de los satélites Sentinel 2 disponible en Google Earth Engine (nivel L2A, reflectividad en superficie). Disponible desde marzo de 2017. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR.

La librería *Ndvi2Gif* fue desarrollada por uno de los autores del presente trabajo para el cálculo de estadísticos estacionales basados en el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), permitiendo generar imágenes compendio con distintos estadísticos a nivel de píxel para las estaciones del año (los estadísticos ofrecidos de momento son mínimo, máximo, medio, mediana y percentiles 90 y 95). Esta librería se ha modificado localmente para ampliar la periodicidad sobre la que generar los estadísticos, añadiendo estadísticos

mensuales y quincenales. También se han añadido otros índices de vegetación. Hasta el momento se han añadido los índices *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*), *EVI2* (*Enhanced Vegetation Index Two-Bands*) y está previsto añadir el *PPI* (*Plant Phenology Index*), con el objetivo previsto de hacer una validación más completa de los productos fenológicos, una vez que se disponga de más datos de verdad terreno de otros *sites* según vaya avanzando el desarrollo del proyecto eLTER.

Por el momento se ha trabajado con imágenes compendio de NDVI promedio de un periodo de 15 días (cubriendo 3 escenas Sentinel-2) descartando píxeles *NoData* y usando el valor máximo del índice para esas 3 imágenes. De esta forma, se tratan de evitar valores anómalos que puedan afectar a la serie temporal. A cada una de estas imágenes promedio se le asigna la fecha media del periodo de 15 días que abarca, ya que este es uno de los parámetros que requiere *PhenoPY* para procesar las series temporales. La librería *PhenoPY* permite ajustar curvas fenológicas y estimar las fenofases para un solo ciclo vegetativo por año.

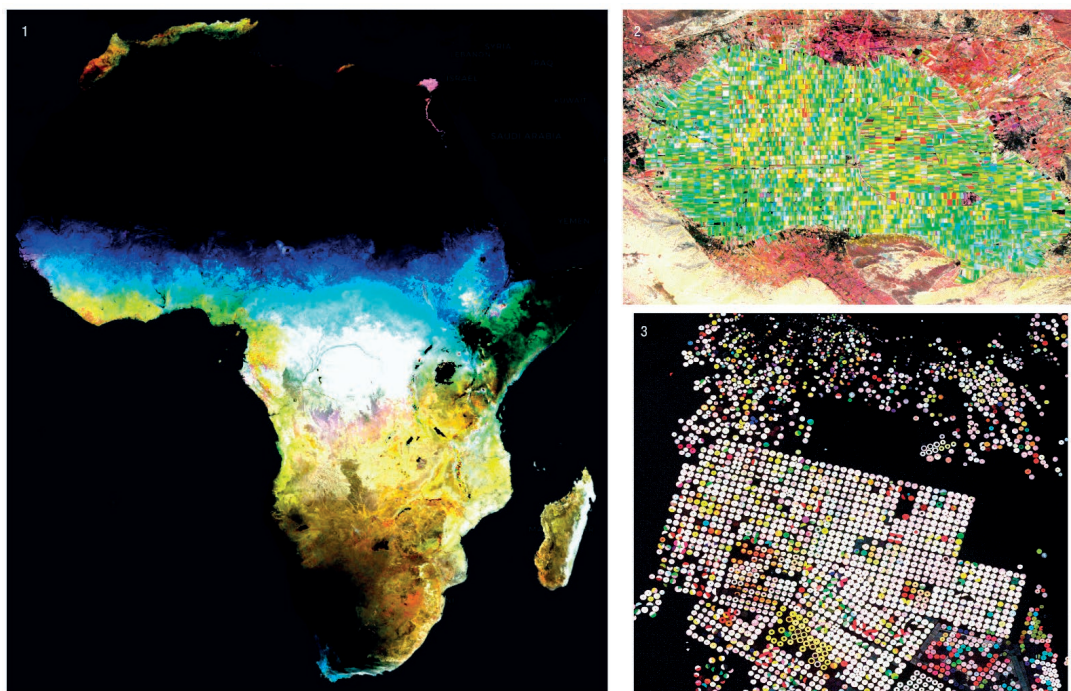


Figura 4. Ejemplos de productos generados con *Ndvi2Gif*. 1. Media de todos los píxeles del continente africano para el periodo 2001-2021. 2. Cultivos en Borgo Ottomila, Italia. 3. Cultivos circulares en medio del desierto, Arabia Saudí. Nótese que los tonos negros se corresponden con valores bajos todo el año de NDVI, los blancos con valores altos todo el año, y las distintas gamas de colores muestran en que periodo del ciclo fenológico alcanzaron su valor más alto.

PhenoPY permite obtener hasta 10 métricas, de las que se seleccionaron las siguientes:

- *Day Of the Year* y valor de *Start of the Season* (SOS-DOY y SOS-Value)
- *Day Of the Year* y valor de *Maximun of the Season* (MOS-DOY y MOS-Value)
- *Day Of the Year* y valor de *End of the Season* (EOS-DOY y EOS-Value)

Adicionalmente, también se genera un *raster* con la intervariación anual de cada píxel, usando valores normalizados del error medio cuadrático (RMSE).

2.2. Extracción de métricas de otros productos

El producto de MODIS MCD12Q2 V6 (Friedl et al., 2019) proporciona métricas fenológicas a escala global a 500 metros de resolución espacial desde 2001. Identifica hasta 12 parámetros fenológicos de hasta 2 ciclos de crecimiento por año y está basado en el índice de vegetación EVI2. El producto de Sentinel 2 *High Resolution Vegetation Phenology and Productivity* HR VPP (Tian et al., 2021), forma parte del *Copernicus Land Monitoring Service* (CLMS). Ofrece 13 métricas fenológicas que describen etapas específicas del ciclo de crecimiento de la vegetación (fenofases). Estos parámetros se calculan mediante modelo de ajuste a la serie temporal del índice PPI, calculado con las imágenes de los satélites Sentinel 2A y 2B a una resolución de 10 m. Los datos están disponibles desde 2017 y permiten distinguir hasta 2 ciclos de crecimiento al año. Este producto puede descargarse a través de la plataforma habilitada por Wekeo (<https://www.wekeo.eu/>) y ofrece una API para Python que permite automatizar la descarga e integrarla en el flujo de trabajo de nuestra aplicación.

2.3. Integración en Flujo de trabajo

La figura 5 muestra el flujo de trabajo actual de PhenoApp. Las series de los productos MCD12Q2 y HR-VPP se descargan y recortan para el área del sitio solicitado por el usuario, ya sea desde GEE o desde la API de Copernicus. En GEE se trabaja con la serie temporal de Sentinel 2 L2A, se recortan todas las imágenes a la geometría del sitio, y con la librería *Ndvi2Gif* se selecciona el valor medio de NDVI de cada imagen. PhenoPY toma como entrada un stack de *rasters* con el NDVI y un fichero de texto plano con la fecha de cada uno de ellos. PhenoPY realiza un suavizado de las curvas mediante *cubic spline* y calcula las transiciones, usando para ello dos métodos distintos, uno basado en umbrales (*phenopy_umbral*) y otro basado en los puntos de inflexión de la curva (*phenopy_curvas*).

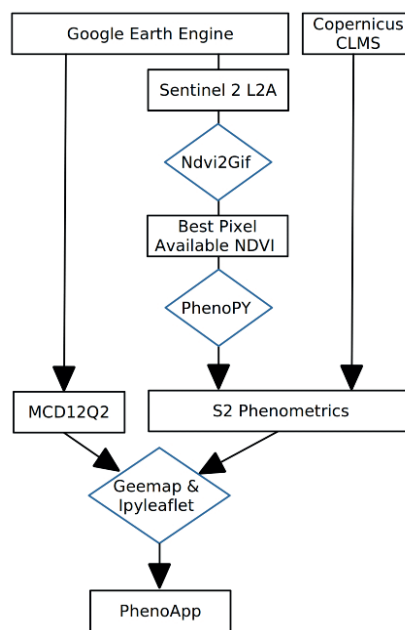


Figura 5. Esquema del flujo de trabajo.

Tabla 1. Características de los *datasets* utilizados. (*) Dada la deriva de MODIS, el producto MCD12Q2 podría ser sustituido a futuro por la aplicación de PhenoPy sobre Sentinel 3.

Dataset	Satélite	Índice	Resolución (m)	Ciclos	Inicio	Fuente
HR-VPP	Sentinel 2	PPI	10	2	2017	ESA-Copernicus
MCD12Q2	MODIS(*)	EVI	500	2	2001	NASA-USGS
PhenoPy	Sentinel 2	NDVI	10	1	2015	Propia

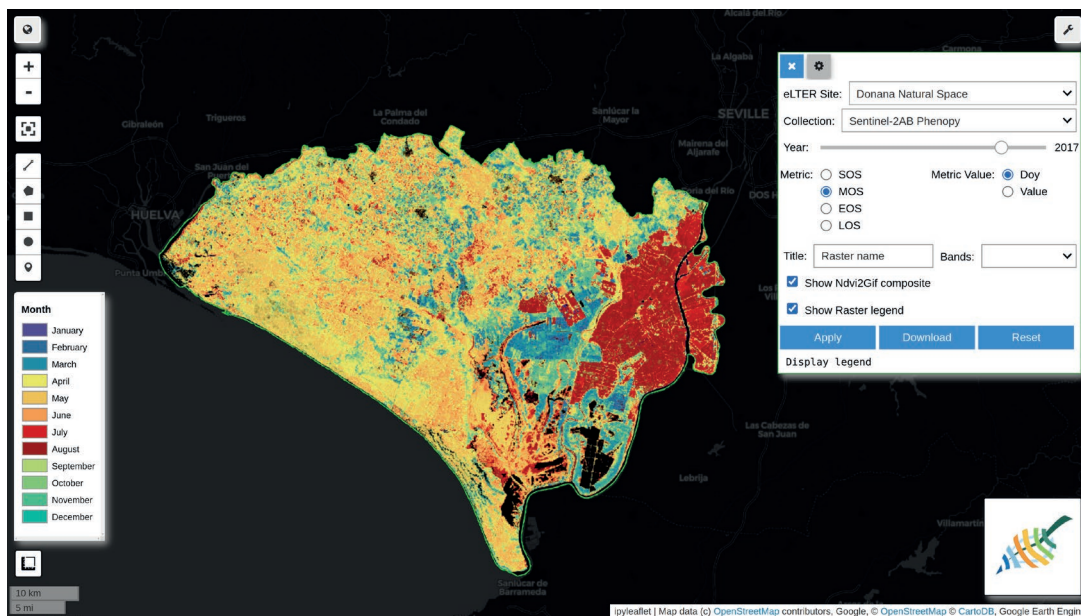


Figura 6. Interfaz principal de la aplicación.

La salida es un *raster* con las métricas fenológicas que, junto con la serie de MODIS y Sentinel 2 HR-VPP, se ofrece a través de Geemap como un mapa interactivo de Ipyleaflet, el cual permite la consulta de los valores fenológicos por *dataset*, fecha y *site*.

3. Resultados

El resultado principal presentado en este trabajo es la propia aplicación PhenoApp, cuya interfaz de mapa se muestra a continuación en la figura 6. En ella se puede ver como se ha desarrollado un *widget* dentro de un mapa de Ipyleaflet, al que se ha añadido la posibilidad de filtrar por *site* de eLTER, por *Collection (Dataset)*, por año y por métrica fenológica en *Day of the Year* o en *Value*. Al ejecutarla, la aplicación buscará el *dataset* seleccionado en Google Earth Engine (los generados por nosotros están subidos también) y lo cargará en el mapa, lo que nos permitirá usar las herramientas propias de Ipyleaflet como la comparación de dos *datasets* a pantalla partida, la consulta de datos mediante el cruce con geometrías vectoriales, elaboración de transectos, etc...

Con objeto de mostrar una evaluación preliminar de los productos ofrecidos por PhenoApp, se extrajeron las métricas fenológicas obtenidas

con PhenoApp en las localizaciones del Espacio Natural de Doñana y se cruzaron con las obtenidas de las fenocams.

La figura 7 muestra el ejemplo de la comparativa en la zona del sabinar de la Reserva Biológica de Doñana. Esta primera comparación pone de manifiesto las discrepancias entre los distintos métodos. Mientras que el producto HR-VPP extiende el ciclo fenológico a lo largo de casi todo el año, el resto de métodos lo detectan solo al final del año. El producto MCD12Q2 incluso asigna un *End Of the Season* al comienzo del año (representado en la figura por la línea discontinua). Este ejemplo

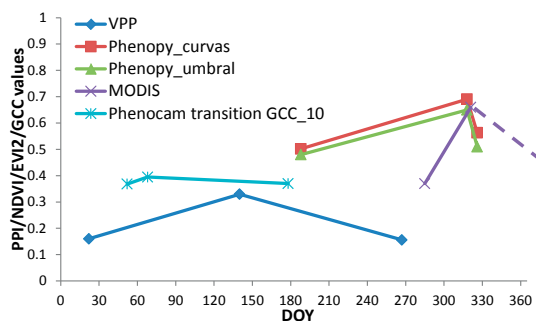


Figura 7. Valores de día del año (DOY) para las métricas SOS, MOS y EOS con respecto a los valores de los índices usados por los diferentes métodos.

evidencia la necesidad de evaluar los diferentes métodos de acuerdo a la escala de trabajo (*in situ* vs satélite) y las características inherentes a los ecosistemas monitorizados. En el caso que nos ocupa, el sabinar, como cubierta perenne muestra a lo largo de un año dos picos de crecimiento, uno en primavera y otro en otoño, lo que puede condicionar el acierto de estas metodologías.

4. Discusión

El presente trabajo pone de manifiesto la utilidad de una tecnología como Google Earth Engine, que permite acceder y procesar una cantidad ingente de imágenes de satélite, proporcionando además algoritmos de procesamiento aplicados en la nube a cualquier lugar del planeta. La librería Geemap añade funcionalidades de Python para el análisis de datos y la creación de un visor interactivo mediante la librería ipyleaflet. La aplicación PhenoApp realiza simultánea y automáticamente la descarga, recorte, reproyección y análisis de las imágenes y series temporales de las colecciones disponibles en GEE, proporcionando como salida las métricas fenológicas del sitio seleccionado por el usuario. El primer ensayo de aplicación de PhenoApp ha permitido obtener las métricas de los distintos productos de fenología en el sitio de seguimiento fenológico ubicado en el sabinar de la Reserva Biológica de Doñana. La comparación de estas métricas entre sí, a modo de validación preliminar, ha confirmado las discrepancias existentes, debido sobre todo a las distintas escalas espaciales (fenocámara *in situ*, Sentinel-2 10 m y MCD12Q2 500 m) y a los diferentes métodos empleados para su cálculo, ya que provienen de distintos *datasets*. Además, la variabilidad fenológica inherente a los diferentes ecosistemas puede condicionar la correcta estimación de estas métricas. *A priori*, las métricas proporcionadas por Copernicus HR-VPP son capaces de capturar dos ciclos de crecimiento por año y utilizan el índice PPI testado en diferentes cubiertas (Tian et al., 2021). La validación se ampliará a otros ecosistemas monitorizados (marisma, matorral, alcornocal, etc.) de los diferentes sitios de la red eLTER según el proyecto vaya avanzando y los *sites* interesados proporcionen la información fenológica que quieren validar. Otro aspecto importante a tener en cuenta es que, como ya se ha señalado, los *datasets* utilizados además de contar con las posibles discrepancias ligadas

a las distintas resoluciones espaciales, cuentan también con la problemática de estar comparando distintos índices de vegetación (GCC, NDVI, EVI y PPI). Se trata de un punto importante a tener en cuenta. No obstante, y dado que la comparativa no se basa en los valores de los índices en sí mismos, si no en las fenométricas obtenidas a partir del suavizado de la serie temporal que se genera con ellos, se supone que ese error será poco influyente a la hora de determinar las métricas buscadas. De todos modos, este es el motivo por el cual se han incorporado nuevos índices a la librería Ndv2Gif, con el objetivo de poder hacer comparaciones más precisas entre los distintos productos de teledetección y los datos de campo de los *sites* de eLTER.

Por último, es importante señalar que este flujo de trabajo aplicado a la red de eLTER es fácilmente extrapolable a cualquier otra red de espacios naturales o a cualquier otra zona con interés fenológico. Además, en nuestro caso se ha optado por Sentinel 2 para desarrollar el producto con las métricas fenológicas, pero cualquier *dataset* de imágenes satélite con las bandas necesarias para calcular índices de vegetación, es susceptible de ser usado en el proceso. De modo que sería muy sencillo usar Landsat y tener datos desde los años 80 del pasado siglo. O usar sensores con menor resolución espacial como MODIS o Sentinel 3 y trabajar a escala de países o incluso a nivel global. También señalar que, al igual que sería fácil cambiar los *datasets* de entrada, también lo sería el cambiar la temática de la aplicación. De hecho, PhenoApp se complementará con dos aplicaciones en las que se está trabajando, para mostrar la inundación y la temperatura de superficie en los *sites* de eLTER.

Agradecimientos

Este trabajo se financia gracias al proyecto eLTER Plus (INFRAIA, Horizonte 2020, Agreement No 871128) y a través de las actuaciones FEDER [SUMHAL, LIFEWATCH-2019-09-CSIC-13, POPE 2014-2020] por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Subtarea LWE2103022: Integration into VRE. Agradecemos el apoyo técnico y la provisión de datos a la ICTS-RBD y a la red Phenocam mantenida por la Universidad de New Hampshire por el procesado de las fenocámaras de la ICTS-Doñana.

Referencias

- Amani, M., Ghorbanian, A., Ali Ahmadi, S., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., Parsian, S., Wu, Q. and Brisco, B. 2020. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Friedl, M., Gray, J., Sulla-Menashe, D., 2019. MCD12Q2 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2022-02-09.
- García, D. 2020. Ndv2Gif, Python Package Index – PyPI. Recuperado en mayo de 2020 de <https://pypi.org/project/ndvi2gif/>.
- 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>
- Haase, P., Frenzel, M., Klotz, S., Musche, M., Stoll, S. 2016. The long-term ecological research (LTER) network: Relevance, current status, future perspective and examples from marine, freshwater and terrestrial long-term observation. *Ecological Indicators*, 65 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.040>
- Haase, P., Tonkin, J.D., Stoll, S., Burkhard, B., Frenzel, M., Geijzendorffer, I.R., Häuser, C., Klotz, S., Kühn, I., McDowell, W.H., Mirtl, M., Müller, F., Musche, M., Penner, J., Zacharias, S., Schmeller, D.S. 2018. The next generation of site-based long-term ecological monitoring: Linking essential biodiversity variables and ecosystem integrity. *Science of The Total Environment* 613-614, 1376-1384. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.111>
- Kluyver, T., Ragan-Kelley, B., Pérez, F., Granger, B., Bussonnier, M., Frederic, J., Kelley, K., Hamrick, J., Grout, J., Corlay, S., Ivanov, P., Avila, D., Abdalla, S., Willing, C., Jupyter development team. 2016. Jupyter Notebooks – a publishing format for reproducible computational workflows. Loizides, Fernando and Schmidt, Birgit (eds.) In *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*. IOS Press. pp. 87-90. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-649-1-87>
- Lopatín, J., Paredes, J. 2021. PhenoPY. Recuperado en diciembre de 2019 de <https://github.com/JavierLopatín/PhenoPY>
- Moore, R.T., Hansen, M.C. 2011. Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis 2011:IN43C-02. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011.
- Morgen W.V. Burke, Bradley C. Rundquist., 2021. Scaling Phenocam GCC, NDVI, and EVI2 with Harmonized Landsat-Sentinel using Gaussian Processes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 300, 108316, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108316>
- Richardson, A., Hufkens, K., Milliman, T. et al., 2018. Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data* 5, 180028.
- Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheifinger, H., Tagesson, T., Smets, B., Van Hoolst, R., Bonte, K., Ivits, E., Tong, X., Ardö, J., Eklundh, L. 2021. Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456>.
- Wohner, C., Peterseil, J., Klug, H. 2022. Designing and implementing a data model for describing environmental monitoring and research sites. In *Ecological Informatics*, 70, p. 101708). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101708>
- Wu, Q. 2020. Geemap: A Python package for interactive mapping with Google Earth Engine. *The Journal of Open Source Software*, 5(51), 2305. <https://doi.org/10.21105/joss.02305>
- Wu, Q. 2021. Interactive mapping and geospatial analysis with Leafmap and Jupyter. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on APIs and Libraries for Geospatial Data Science (SpatialAPI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 1, 1–2. <https://doi.org/10.1145/3486189.3490015>