Sentinel Foundry: un framework GUI per la generazione deterministica di Analysis-Ready Data da Sentinel-1 SAR e Sentinel-2 ottico

Enrico Magazzino[1,2]

[1] TESAF Department, University of Padova, Legnaro (PD), Italia

[2] Interdepartmental Research Center of Geomatics (CIRGEO), University of Padova, Corte Benedettina, Via Roma 34, Legnaro, PD 35020, Italy

enrico.magazzino@phd.unipd.it (corresponding author)

Abstract. I dati Copernicus Sentinel sono ampiamente utilizzati nel monitoraggio ambientale e nell'analisi geospaziale, ma la generazione di Analysis-Ready Data (ARD) da immagini grezze richiede pipeline specialistiche (calibrazione radiometrica, correzione topografica, mascheratura delle nubi e calcolo di derivati spettrali e biofisici) la cui implementazione non standardizzata può compromettere la riproducibilità dei risultati e costituire una barriera tecnica significativa per utenti privi di competenze di scripting. Il presente contributo introduce Sentinel Foundry, un framework desktop open-source con interfaccia grafica per la generazione riproducibile di ARD da Sentinel-1 SAR e Sentinel-2 ottico, con applicazioni in agricoltura di precisione, monitoraggio forestale, analisi ambientale e gestione dei rischi naturali. Il sistema supporta il download da sorgenti ufficiali multiple, incluso il Copernicus Data Space, senza richiedere competenze di scripting; il codice è su GitHub. Il modulo SAR Foundry elabora i dati Sentinel-1 GRD implementando catene SNAP configurabili: calibrazione σ^0 standard o γ^0 con terrain-flattening, filtraggio speckle (Lee Sigma, Gamma Map, IDAN e altri) e correzione topografica tramite DEM esterno (predefinito: Copernicus 30 m). È supportato anche il caricamento di grafi GPT XML personalizzati. Il modulo Optical Foundry elabora Sentinel-2 L2A integrando la mascheratura basata su Scene Classification Layer e il calcolo di otto indici spettrali (NDVI, NDWI, NDII, MSAVI2, CIRE, EVI, NDRE1, MTCI). L'elemento distintivo è la stima di variabili biofisiche (LAI, CCC, CWC, FAPAR, FCOVER) tramite i modelli neurali dello SNAP Biophysical Processor, allineati alla metodologia ESA. Entrambi i moduli supportano indici personalizzati tramite formule algebriche tra bande; gli output sono Cloud-Optimized GeoTIFF con proiezione e metadati armonizzati. Rispetto alle alternative consolidate, Sentinel Foundry automatizza l'intera catena download–processing–derivati in un'unica interfaccia, superando la frammentazione di ESA SNAP e dei plugin di QGIS, e garantisce l'esecuzione locale con riproducibilità deterministica, a differenza di altre piattaforme di cloud processing. Il confronto con esecuzioni SNAP indipendenti (QGIS e sovrapposizione in Python) ha mostrato valori dei pixel identici al 100%. Sentinel Foundry contribuisce alla democratizzazione dei flussi di Earth Observation, abilitando la generazione riproducibile e user-controlled di ARD su domini SAR e ottici, e rendendo accessibili flussi di elaborazione avanzati senza rinunciare al rigore metodologico. Sviluppi futuri prevedono l'estensione alle ulteriori missioni della costellazione Sentinel per una copertura ARD unificata e multi-missione.

Keywords: Sentinel-1 · Sentinel-2 · Analysis-Ready Data · SAR · telerilevamento · elaborazione dati satellitari · indici spettrali · variabili biofisiche · SNAP · riproducibilità · interfaccia grafica.

1 Introduzione

Le missioni Copernicus Sentinel-1 (SAR) e Sentinel-2 (ottico) sono oggi tra le fonti di dati satellitari più utilizzate per il monitoraggio ambientale, l'agricoltura di precisione, il monitoraggio forestale e la gestione dei rischi naturali [1,2], grazie alla combinazione di copertura globale, ricorrenza temporale elevata e accesso gratuito. Il passaggio dai prodotti grezzi (Level-1 GRD per Sentinel-1, Level-2A per Sentinel-2) a dati pronti per l'analisi (Analysis-Ready Data, ARD) richiede tuttavia catene di elaborazione specialistiche: calibrazione radiometrica e correzione topografica per il SAR [3,4], mascheratura delle nubi e calcolo di indici spettrali e variabili biofisiche per l'ottico.

Per il SAR questi passaggi sono generalmente eseguiti tramite ESA SNAP, un ambiente potente ma che richiede la costruzione manuale di grafi di elaborazione (GPT graph) o competenze di scripting per l'automazione su serie temporali; per i dati ottici, oltre a SNAP, si ricorre spesso a script personalizzati in Python o R, la cui implementazione, non standardizzata, dipende dalle competenze di chi li scrive. Esistono inoltre plugin QGIS che coprono singoli passaggi della catena piuttosto che il flusso download–processing–derivati nella sua interezza. L'assenza di un'interfaccia unificata e non basata su script costituisce una barriera tecnica per utenti provenienti da discipline applicative (agronomia, scienze forestali, protezione civile) e, quando le catene di elaborazione non sono documentate o standardizzate, una minaccia alla riproducibilità dei risultati.

Il presente contributo descrive Sentinel Foundry, un framework desktop open-source con interfaccia grafica che automatizza l'intera catena (download, preprocessing, calcolo di derivati) per Sentinel-1 SAR (modulo SAR Foundry) e Sentinel-2 ottico (modulo Optical Foundry), producendo ARD in formato Cloud-Optimized GeoTIFF (COG) senza richiedere competenze di programmazione. Il codice sorgente è pubblicato su GitHub con licenza MIT [19]. Il resto dell'articolo è organizzato come segue: la Sez. 2 descrive l'architettura generale; le Sez. 3 e 4 descrivono rispettivamente SAR Foundry e Optical Foundry; la Sez. 5 confronta Sentinel Foundry con le alternative esistenti; la Sez. 6 discute lo stato della validazione; la Sez. 7 conclude con gli sviluppi futuri.

2 Architettura del sistema

Sentinel Foundry è composto da due interfacce Tkinter indipendenti (SAR Foundry e Optical Foundry), come schematizzato in Fig. 1, avviabili singolarmente o da un launcher commune che condivide un ambiente virtuale Python (venv) autoinstallante: al primo avvio ciascun modulo crea il venv e installa le proprie dipendenze da un file di requisiti a versioni fissate (pinning), così che l'ambiente ottenuto da un'installazione pulita sia riproducibile. Le dipendenze esterne non gestibili via pip (ESA SNAP con il Microwave Toolbox, necessario per i lettori Sentinel-1 e GDAL) sono rilevate e diagnosticate all'avvio da un pannello dedicato, che blocca l'esecuzione con un messaggio esplicativo se i prerequisiti non sono soddisfatti, evitando fallimenti silenziosi a metà elaborazione.

SAR Foundry non reimplementa gli algoritmi di calibrazione e correzione SAR: orchestra l'eseguibile a riga di comando gpt di ESA SNAP, costruendo ed eseguendo i grafi di elaborazione descritti in Sez. 3.2. Optical Foundry si appoggia invece alle API pubbliche di AWS EarthSearch e al processore biofisico neurale distribuito con SNAP (Sez. 4). In entrambi i casi la GUI automatizza orchestrazione, gestione dei parametri e

I/O, delegando i passaggi numericamente sensibili alle implementazioni di riferimento; una scelta progettuale che, come discusso in Sez. 6, è anche la motivazione del determinismo atteso degli output.

Gli output di entrambi i moduli seguono una convenzione comune: GeoTIFF a singola banda in formato Cloud-Optimized GeoTIFF (COG) [5], float32, proiezione UTM nativa del tile Sentinel, valore nodata esplicito (−9999) e compressione DEFLATE. Questa scelta rende gli output direttamente utilizzabili sia in ambienti GIS desktop (QGIS, ArcGIS) sia in flussi cloud-native basati su accesso a intervalli di byte (range request).

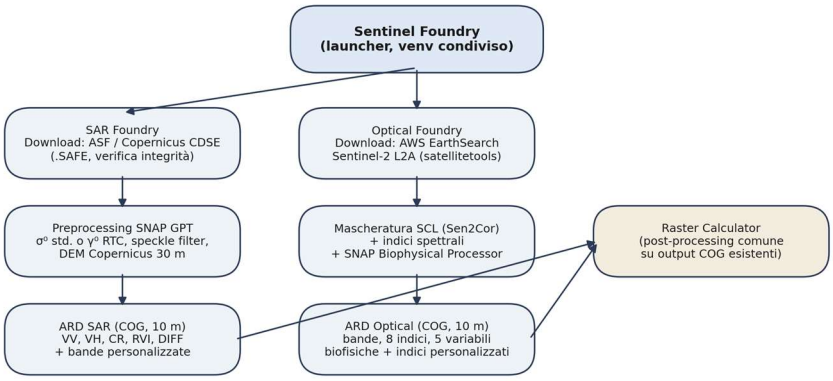

Fig. 1. Architettura di Sentinel Foundry: moduli SAR Foundry e Optical Foundry, ciascuno con acquisizione, preprocessing ed esportazione ARD in formato COG.

3 SAR Foundry: da Sentinel-1 GRD ad ARD

3.1 Acquisizione e verifica di integrità

Le scene Sentinel-1 GRD possono essere scaricate da due sorgenti alternative: Alaska Satellite Facility / NASA Earthdata (autenticazione tramite bearer token, download sequenziale; il download parallelo è disabilitato perché il server ASF può troncare la banda VV quando piú connessioni condividono lo stesso token) e Copernicus Data Space Ecosystem (CDSE), autenticato tramite token OAuth2 Keycloak con rinnovo automatico e fino a 5 download paralleli, ripristinabili tramite richieste HTTP Range in caso di interruzione. L'area di interesse (AOI) è fornita come file vettoriale (.shp, .gpkg, .geojson) o disegnata interattivamente su una mappa Leaflet integrata.

Ogni archivio scaricato è sottoposto a controlli di integrità su tre livelli: 1) verifica strutturale dello zip prima dell'estrazione, 2) verifica CRC durante l'estrazione, 3) lettura effettiva delle bande tramite rasterio dopo l'estrazione in modo che un archivio corrotto (ad es. una banda VV troncata da un download parallelo instabile) venga scartato prima di raggiungere SNAP, anziché propagarsi silenziosamente nei prodotti derivati.

3.2 Catene di preprocessing SNAP GPT

La calibrazione radiometrica dei prodotti Level-1 segue la procedura ufficiale IPF documentata da ESA [6]. Sono disponibili due catene preconfigurate che a partire da

essa applicano metodologie di riferimento pubblicate, oltre al supporto per grafi personalizzati:

Opzione A: σ^0 standard *(consigliata su terreno pianeggiante)*: Apply-Orbit-File → rimozione del rumore termico e del border noise → calibrazione σ^0 → filtro speckle configurabile → correzione geometrica Range-Doppler con DEM esterno. Basata sul flusso descritto da Filipponi [4], senza terrain-flattening; adatta a contesti agricoli pianeggianti (es. Pianura Padana).

Opzione B: γ^0 con terrain-flattening *(più rigorosa su terreno inclinato)*: calibrazione β^0 → filtro speckle → terrain-flattening ($\beta^0 \rightarrow \gamma^0$) secondo Small [3] → correzione geometrica Range-Doppler. Radiometricamente più corretta su terreno con variabilità topografica significativa.

Opzione C: grafo GPT XML personalizzato: la pipeline modifica a runtime il grafo fornito dall'utente per iniettare percorso di lettura, subset sull'AOI e percorso di scrittura, a condizione che il grafo rispetti alcuni vincoli strutturali (un solo nodo Read, un solo nodo Write, output a due bande nell'ordine VH poi VV in intensità lineare). Questo meccanismo permette a utenti esperti di sostituire la catena di elaborazione mantenendo l'automazione di I/O e ritaglio sull'AOI, preservando la riproducibilità deterministica indipendentemente dalla catena scelta.

Il filtro speckle predefinito è Lee Sigma 7×7; sono inoltre tramite una finestra di configurazione dedicata, uno qualsiasi dei 9 filtri speckle di SNAP (Gamma Map , Refined Lee, IDAN, Boxcar, Median, Frost, nessun filtro). Il DEM per la correzione topografica è selezionabile tra Copernicus 30 m GLO-30 (predefinito), Copernicus 90 m, SRTM a 1 o 3 arco-secondi e ASTER GDEM; i DEM sono scaricati e memorizzati automaticamente da SNAP al primo utilizzo.

Per limitare il calcolo alla sola area di interesse, prima della scrittura la pipeline inserisce nel grafo un nodo Subset subito dopo la correzione geometrica Range-Doppler, con regione definita in coordinate di mappa dall'AOI (o dai cluster di campi, per AOI frammentate); questa sequenza, che prima geocodifica e poi ritaglia, evita lo slittamento di posizione che si avrebbe ritagliando il prodotto in geometria radar prima della correzione. Poiché il motore GPF di SNAP elabora solo i tile richiesti a valle, le porzioni di scena esterne all'AOI non vengono calcolate, mentre i tile calcolati usano la geocodifica originale. Il risparmio atteso deriva dunque dal calcolo evitato, non da una modifica del risultato; vi contribuiscono cache dei tile e heap JVM dimensionati sulla RAM disponibile. La misura quantitativa è descritta in Sez. 6. **3.3 Output e derivati**

Per ciascuna scena e direzione d'orbita (ascendente/discendente) SAR Foundry produce cinque GeoTIFF COG a singola banda, riassunti in Tabella 1, tutti in float32, con spaziatura di 10 m, nodata −9999 e compressione DEFLATE. Copie in scala logaritmica (dB) sono generabili opzionalmente per la sola visualizzazione. Sono inoltre supportate fino a tre espressioni numpy definite dall'utente ("Custom Bands") sulle variabili VV, VH, CR, RVI, DIFF, per derivati non previsti tra le bande preimpostate. Le AOI che comprendono piú frame Sentinel-1 adiacenti vengono elaborate per singolo frame e ricomposte tramite interpolazione bilineare sulla cucitura.

Convenzione di denominazione. Il nome di ogni file COG codifica l'intera configurazione di elaborazione: *S1_{data}_SNAP_{etichetta AOI}_{filtro speckle}_{DEM}_{catena}_{satellite}_{orbita}_{banda}.tif*

Tabella 1. Bande COG prodotte da SAR Foundry per ciascuna scena/orbita.

Banda	Definizione	Note
VV	Backscatter calibrato, polarizzazione VV, intensità lineare	σ^0 o γ^0 secondo la catena scelta
VH	Backscatter calibrato, polarizzazione VH, intensità lineare	σ^0 o γ^0 secondo la catena scelta
CR	VH / VV	Cross-ratio
RVI	4·VH / (VV+VH)	Radar Vegetation Index
DIFF	VH − VV	Differenza in unità lineari

4 Optical Foundry — da Sentinel-2 L2A ad ARD

4.1 Acquisizione e mascheratura

Optical Foundry scarica Sentinel-2 L2A dal bucket pubblico AWS EarthSearch (sentinel-2-l2a-cogs), tramite la libreria satellitetools [7], senza richiedere credenziali Copernicus o ESA. Poiché una singola interrogazione STAC può restituire un solo tile MGRS per data anche quando l'AOI ne interseca due, la pipeline esegue query e processing per singolo tile e ricompone il risultato con un mosaico rasterio, evitando le lacune di dato che altrimenti risulterebbero sulla porzione di AOI non coperta dal tile selezionato. La mascheratura delle nubi si basa sulla Scene Classification Layer (SCL) prodotta dal processore Sen2Cor di ESA [8], mantenuta anche come banda di controllo qualità a sé stante.

4.2 Indici spettrali

Oltre alle bande native (B2–B12 alla risoluzione nativa disponibile), il modulo calcola otto indici spettrali preimpostati a partire dalla riflettanza al top-of-canopy, elencati in Tabella 2 con la relativa fonte in letteratura. È inoltre possibile definire fino a tre indici personalizzati come espressioni numpy sulle bande B2–B12.

Tabella 2. Indici spettrali calcolati da Optical Foundry.

Indice	Formula (bande Sentinel-2)	Fonte
NDVI	(B8−B4)/(B8+B4)	Rouse et al. [9]
NDWI	(B3−B8)/(B3+B8)	McFeeters [10]
NDII	(B8−B11)/(B8+B11)	Hardisky et al. [11]
iMSAVI2	((2B8+1)−√((2B8+1)²−8(B8−B4)))/2	Qi et al. [12]
CIRE	B8/B5 − 1	Clevers & Gitelson [13]
EVI	2.5(B8−B4)/(B8+6B4−7.5B2+1)	Liu & Huete [14]
NDRE1	(B8A−B5)/(B8A+B5)	Barnes et al. [15]
MTCI	(B6−B5)/(B5−B4)	Dash & Curran [16]

4.3 Variabili biofisiche

Un elemento distintivo di Optical Foundry è la stima di cinque variabili biofisiche: Leaf Area Index (LAI), Canopy Chlorophyll Content (CCC), Canopy Water Content (CWC), Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) e Fraction of Vegetation Cover (FCOVER) tramite le reti neurali dello SNAP Biophysical Processor, documentate nell'Algorithm Theoretical Basis Document di Weiss, Baret e Jay [17] e discendenti della metodologia dei prodotti globali CYCLOPES [18]. Le reti sono addestrate su simulazioni del modello di trasferimento

radiativo PROSPECT+SAIL e costituiscono la metodologia di riferimento adottata da ESA per la stima di variabili biofisiche da Sentinel-2; Optical Foundry le rende accessibili senza che l'utente debba operare direttamente SNAP.

4.4 Output e personalizzazione

Gli output seguono la stessa convenzione COG di SAR Foundry (float32, UTM nativa, nodata −9999, DEFLATE, 10 m). L'elaborazione dei giorni nel periodo richiesto è parallelizzata (1–8 worker configurabili) con ripetizione automatica sui giorni falliti in caso di errori di rete transitori verso AWS/EarthSearch; una politica di skip/overwrite consente di riprendere elaborazioni interrotte o di estendere un intervallo di date già elaborato senza ricalcolare i file esistenti. Una scheda "Raster Calculator", comune a entrambi i moduli, applica ulteriori espressioni numpy direttamente sugli output COG già prodotti, senza dover ripetere l'intera pipeline.

Convenzione di denominazione. Lo schema è *S2_{data}_000_{etichetta AOI}_{satellite}_{prodotto}.tif*, oppure *..._mosaic_{prodotto}.tif* quando l'AOI è ricomposta da più tile MGRS. Su disco i file sono inoltre organizzati per prodotto e AOI (index=<prodotto>/aoi=<etichetta>/), così da caricare in QGIS un'intera serie temporale di un indice con un solo pattern.

5 Confronto con le alternative esistenti

ESA SNAP è l'ambiente di elaborazione più rigoroso per dati Sentinel, ma richiede la costruzione manuale di grafi GPT o competenze di scripting, un requisito non banale per utenti di discipline applicative. I plugin QGIS coprono tipicamente un solo passaggio della catena, lasciando all'utente il compito di comporne più per ottenere un ARD completo. Le piattaforme cloud (Google Earth Engine, Sentinel Hub, openEO) offrono analisi su larga scala, ma l'elaborazione avviene lato server: versioni di algoritmi e dataset ausiliari sono gestite dal fornitore, e la riproducibilità locale di una specifica esecuzione è più difficile da garantire.

Sentinel Foundry si posiziona diversamente su entrambi gli assi: automatizza l'intera catena download → preprocessing → derivati in un'unica interfaccia grafica (a differenza della frammentazione di SNAP/QGIS), pur delegando i passaggi numericamente sensibili alle stesse implementazioni di riferimento (gpt di SNAP, reti neurali del Biophysical Processor), ed esegue interamente in locale con dipendenze a versione fissata (a differenza delle piattaforme cloud), rendendo una data configurazione di elaborazione ripetibile in modo deterministico nel tempo. In SNAP l'utente deve conoscere sequenza e parametri degli operatori; i grafi GPT in batch sono più rapidi ma vanno appresi, mentre Sentinel Foundry li integra con download, ritaglio e cancellazione dei file intermedi.

6 Valutazione preliminare: affidabilità, tempo e usabilità

Poiché Sentinel Foundry orchestra le stesse implementazioni di riferimento (gpt di SNAP, Biophysical Processor) senza reimplementarle (Sez. 2), l'output atteso coincide con quello di un'esecuzione manuale degli stessi grafi. Due test, su SAR Foundry e su Optical Foundry, hanno confrontato gli output con esecuzioni SNAP indipendenti (stessi parametri, CRS e acquisizioni): i valori dei pixel, verificati manualmente e visivamente in QGIS e poi per sovrapposizione dei raster in Python, sono risultati identici al 100%. Si prevede la ripetizione su più scene.

La Tabella 3 confronta, su una scena (Sentinel-1A, 27/08/2024, tile 35TLJ, σ^0, Lee Sigma) e con una ripetizione, gli operatori SNAP avviati da GUI sulla scena intera con Sentinel Foundry. Il vantaggio di calcolo non è dovuto al solo subset (differiscono anche grafo, cache e heap); il contributo principale è rendere accessibile l'intera catena, dal download al prodotto finale, anche a utenti senza competenze di scripting o di telerilevamento. Il tempo complessivo manuale (circa 12 min) somma download (44 s), operatori SNAP (541 s) ed export (154 s) e omette estrazione, ritaglio, derivate, pulizia e tempi morti (stima per difetto), rispetto a 9,2 e 6,3 min di Sentinel Foundry per l'intera catena. L'usabilità con utenti diversi dall'autore non è ancora stata misurata ed è prevista.

Tabella 3. Confronto preliminare su una scena Sentinel-1 (una ripetizione).

Aspetto	SNAP (manuale, GUI)	Sentinel Foundry
Calcolo SNAP	circa 541 s (somma degli operatori)	428 s (AOI estesa); 266 s (9 cluster di campi)
Tempo complessivo, dal download ai file finali	almeno circa 12 min (stima per difetto)	9,2 min; 6,3 min
Operatori da avviare	6, uno alla volta; ritaglio, derivate e pulizia a parte	nessuno: un solo avvio, tutto automatico
Export GeoTIFF	circa 100 s (VV) e 54 s (VH), bande separate	incluso: file a due bande e COG per banda
Output SAR su disco	circa 6,0 GB (VV+VH, scena intera)	1,8 GB (AOI estesa); 16 MB (campi)

7 Conclusioni e sviluppi futuri

Sentinel Foundry contribuisce alla democratizzazione dei flussi di Earth Observation offrendo, in un'unica interfaccia grafica desktop, la generazione riproducibile e user-controlled di Analysis-Ready Data su domini SAR e ottici, senza richiedere competenze di scripting e senza rinunciare al rigore metodologico delle implementazioni di riferimento (SNAP, Sen2Cor, SNAP Biophysical Processor) su cui si basa. Gli sviluppi futuri comprendono: 1) la validazione quantitativa e il test di usabilità descritti in Sez. 6; 2) l'estensione ad altre missioni Sentinel; 3) la risoluzione della cucitura tra frame Sentinel-1 adiacenti tramite S1-SliceAssembly, attualmente disabilitata per un'incompatibilità nota nella cache a tessere (tile cache) di SNAP 12.

Acknowledgments. Questo software è stato sviluppato durante un dottorato di ricerca presso il Dipartimento TESAF, Università di Padova, con il finanziamento dell'Unione Europea — NextGenerationEU, nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4 "Istruzione e Ricerca", ai sensi del Decreto Ministeriale n. 630/2024.

Disclosure of Interests. L'autore dichiara di non avere interessi in conflitto rilevanti per il contenuto di questo articolo.

References

1. Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., et al.: GMES Sentinel-1 mission. Remote Sensing of Environment 120, 9–24 (2012). doi:10.1016/j.rse.2011.05.028
2. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., et al.: Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment 120, 25–36 (2012). doi:10.1016/j.rse.2011.11.026
3. Small, D.: Flattening gamma: radiometric terrain correction for SAR imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49(8), 3081–3093 (2011). doi:10.1109/TGRS.2011.2120616
4. Filipponi, F.: Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. Proceedings 18(1), 11 (2019). doi:10.3390/ECRS-3-06201
5. Cloud Optimized GeoTIFF (COG). OGC Standard 21-026. https://docs.ogc.org/is/21-026/21-026.html (2023)
6. Miranda, N., Meadows, P.J.: Radiometric calibration of S-1 level-1 products generated by the S-1 IPF. ESA Technical Note ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002, Issue 1, Rev. 0 (2015)
7. Nevalainen, O.: ollinevalainen/satellitetools: v1.0.0 [software]. Zenodo (2022). doi:10.5281/zenodo.5993292
8. Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., Gascon, F.: Sen2Cor for Sentinel-2. In: Proc. SPIE 10427, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, 1042704 (2017). doi:10.1117/12.2278218
9. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W.: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA SP-351, 309 (1974)
10. McFeeters, S.K.: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing 17(7), 1425–1432 (1996). doi:10.1080/01431169608948714
11. Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M.: The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 49, 77–83 (1983)
12. Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S.: A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment 48(2), 119–126 (1994). doi:10.1016/0034-4257(94)90134-1
13. Clevers, J.G.P.W., Gitelson, A.A.: Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 23, 344–351 (2013). doi:10.1016/j.jag.2012.10.008
14. Liu, H.Q., Huete, A.: A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33(2), 457–465 (1995). doi:10.1109/TGRS.1995.8746027
15. Barnes, E.M., Clarke, T.R., Richards, S.E., et al.: Coincident detection of crop water stress, nitrogen status, and canopy density using ground based multispectral data. In: Proc. 5th Int. Conf. on Precision Agriculture, Bloomington, MN (2000)
16. Dash, J., Curran, P.J.: The MERIS terrestrial chlorophyll index. International Journal of Remote Sensing 25(23), 5403–5413 (2004). doi:10.1080/0143116042000274015
17. Weiss, M., Baret, F., Jay, S.: S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER, Version 2.1. Algorithm Theoretical Basis Document, INRAE / ESA, issued 24.08.2020
18. Baret, F., Hagolle, O., Geiger, B., et al.: LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1. Remote Sensing of Environment 110(3), 275–286 (2007). doi:10.1016/j.rse.2007.02.018
19. Magazzino, E.: Sentinel Foundry (v1.0.4) [software]. https://github.com/EnMaga/sentinel-foundry (2026)