



Newsletter n.2

Sensori satellitari a supporto dell'ottimizzazione delle pratiche irrigue

Come usare i **sensori satellitari** per il monitoraggio dell'**umidità del suolo** e supportare le pratiche innovative che mirano al miglioramento della capacità di mantenimento dell'umidità del suolo e **l'ottimizzazione delle pratiche irrigue** nei periodi di siccità, contribuendo alla diminuzione dell'inquinamento delle falde idriche e avendo un impatto positivo sulla **biodiversità del suolo**?

In questa newsletter si illustrerà come i sensori satellitari saranno utilizzati nell'ambito del progetto IRIDE per il monitoraggio della variabilità di campo e dell'umidità del suolo, nonché per fornire dati utili alla modellazione del **Soil Organic Carbon (SOC)**, il carbonio organizzato contenuto nello strato superficiale del suolo.

I **sensori satellitari** utilizzano le tecnologie **Radar ad Apertura Sintetica (SAR)**, **multispettrale (MS)** e **iperspettrale (HS)** al fine di fornire complementarità nelle caratteristiche dell'informazione fornita (differenti profondità di penetrazione della radiazione elettromagnetica nello strato superiore del

suolo nudo o nello strato di vegetazione in caso campo coltivato, differente interazione suolo-pianta, differente risoluzione spaziale e spettrale) e robustezza al sistema di monitoraggio remoto della variabilità di campo. La tabella 1 riassume le caratteristiche dei dati satellitari usati per il progetto, evidenziando la tipologia di sensore, la risoluzione spaziale, il tempo di rivisitazione e le modalità di accesso al dato grezzo.

Tabella 1: Elenco dei sensori satellitari impiegati per il monitoraggio della variabilità di campo.

Nome missione	Tipologia di sensore	Risoluzione spaziale	Tempo di rivisitazione	Accesso al dato grezzo
Sentinel-1	SAR (banda C)	20m in prodotti interferometrici - <i>Interferometric Wide Swath (IW)</i> Mode (elaborazione interferometrica e filtro spaziale, la risoluzione spaziale degrada a 100m o meno a seconda della tipologia di filtro); 20 m in prodotti non interferometrici – <i>Ground Range Detected (GRD)</i>	12 giorni (o 6 quando due satelliti gemelli sono operativi)	Accesso pubblico non a pagamento fornito dal programma Copernicus
Sentinel-2	MS (13 bande spettrali)	10m - B2(490nm), B3(560nm), B4(665nm), B8(842nm); 20m - B5(705nm), B6(740nm), B7(783nm), B8a(865nm), B11(1610nm), B12(2190nm); 60m - B1(443nm), B9(940nm), B10(1375nm)	5 giorni	Accesso pubblico non a pagamento fornito dal programma Copernicus
Landsat 9	MS (11 bande spettrali)	30m (NIR-SWIR) - B1(443nm), B2(482nm), B3(562nm), B4(655nm), B5(865nm), B6(1610nm), B7(2200nm), B9(1375nm); 100m (termico) - B10(10900nm), B11(12000nm); 15m (pancromatico) – B8(590nm))	16 giorni	Accesso pubblico non a pagamento fornito dalla NASA
Landsat 8	MS (11 bande spettrali)	30m (NIR-SWIR) - B1(443nm), B2(482nm), B3(562nm), B4(655nm), B5(865nm), B6(1610nm), B7(2200nm), B9(1375nm); 100m (termico) - B10(10900nm), B11(12000nm); 15m (pancromatico) – B8(590nm)	16 giorni	Accesso pubblico non a pagamento fornito dalla NASA
PRISMA	HS	30m (VNIR) – 66 bande spettrali nell'intervallo 400-1010 nm; 30m (SWIR) – 174 bande spettrali nell'intervallo 920-2505 nm	29 giorni (vista nadir); 7 giorni (vista off-nadir) per specifico sito	Accesso pubblico limitato previo registrazione su sito dell'Agenzia Spaziale Italiana o acquisto dati per applicazioni
EnMap	HS	30m (VNIR) – 91 bande spettrali nell'intervallo 420-1000 nm; 30m (SWIR) – 155 bande spettrali nell'intervallo 900-2450 nm	27 giorni (con angolo di zenit <5°); 4 giorni (angolo di zenit <30°) per specifico sito	Accesso pubblico limitato previo registrazione su sito dell'Agenzia Spaziale Tedesca o acquisto dati per applicazioni

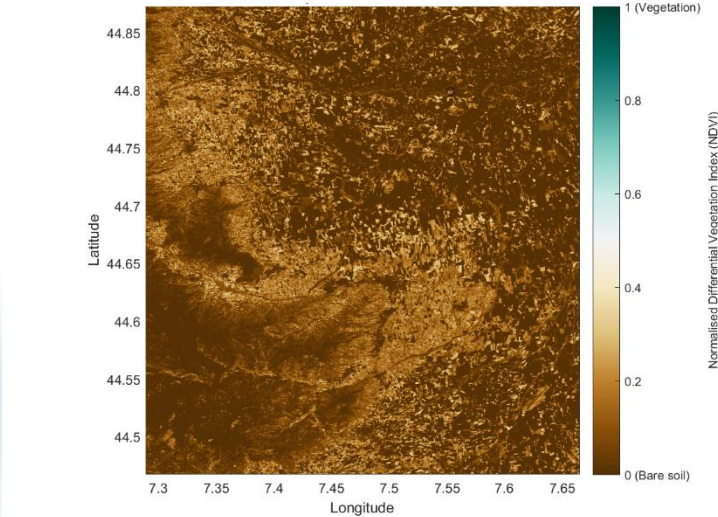
***Nota:** Le sigle NIR, VNIR e SWIR indicano, rispettivamente, le macroregioni spettrali del vicino infrarosso (Near-Infrared), visibile e vicino-infrarosso e dell'infrarosso ad onda corta. A differenza dei dati SAR e MS, caratterizzati da una acquisizione temporale regolare sui siti oggetto della sperimentazione nell'ambito del progetto IRIDE, i dati HS hanno una disponibilità temporale irregolare che dipende dalle scelte del piano di acquisizione deciso dalle Agenzie Spaziali Italiana e Tedesca.

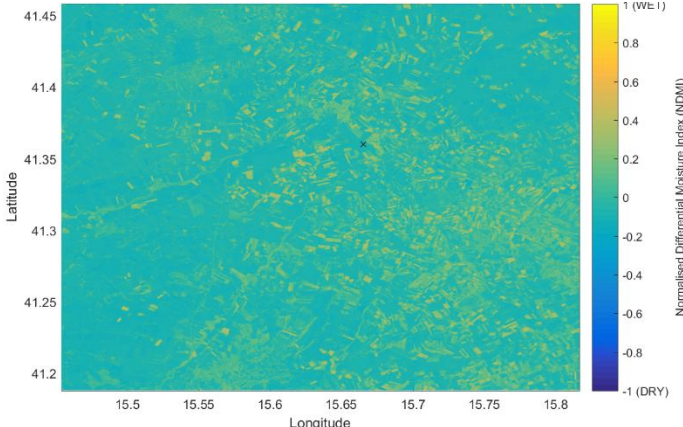
Il **sensore SAR in banda C** contribuirà con due tipologie di prodotto: il segnale a microonde retrodiffuso dalla superficie terrestre, e i prodotti della tripletta di fase e coerenza ottenuti dall'elaborazione interferometrica. La ragione per una tale scelta è avere una ridondanza di dati che permetta di meglio distinguere l'informazione dell'umidità del suolo da quella della vegetazione presente nel campo. Nel campo nudo, entrambi i prodotti SAR in banda C consentono di ricavare una informazione sull'umidità del suolo riferita a una profondità massima di cinque centimetri. Tale informazione dovrà quindi opportunamente calibrata prima di confrontarla con le misure di umidità del suolo acquisite a profondità maggiori. Il sensore SAR fornisce dati utili in qualunque condizione meteorologica e di illuminazione solare a differenza dei sensori MS e HS. Tuttavia, variazioni morfologiche rilevanti della superficie del campo (per esempio prima e dopo la raccolta o lavorazioni del terreno) potrebbero causare una perdita della coerenza interferometrica e di conseguenza della qualità dei prodotti di tripletta di fase interferometrica e coerenza temporale.

I **sensori MS e HS** contribuiranno al calcolo di diversi **indici**, definiti più avanti in questo paragrafo, fornendo le immagini dell'indice di riflessione solare in differenti bande spettrali dei prodotti di livello 2, corretti per gli artefatti atmosferici. A differenza dei sensori SAR e MS elencate in tabella 1, caratterizzati da un piano di acquisizione regolare, con un tempo di rivisitazione della stessa area geografica costante, i sensori HS PRISMA e EnMap attualmente non forniscono dati con un piano di acquisizione regolare.

Nella tabella seguente sono descritti gli "**indici spettrali**" selezionati, intendono con tale termine sia gli indici spettrali ottenuti dalle bande spettrali dei sensori MS e HS, sia la temperatura superficiale del terreno (Land Surface Temperature o LST), sia i prodotti SAR utilizzati per la stima dell'umidità del suolo.

Tab. 2 – Principali indici spettrali elaborati a partire dai dati satellitari acquisiti.

NORMALIZED DIFFERENTIAL VEGETATION INDEX (NDVI)	L'indice NDVI è calcolato usando la seguente relazione $NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$ che usando dati Landsat 8 e 9 è ottenuto dalle bande B_5 (NIR) e B_4 (red). In modo analogo possono essere individuate le bande B_8 (NIR) e B_4 (red) di S2, osservando i valori delle corrispondenti lunghezze d'onda. L'indice NDVI assume valori normalizzati all'intervallo $[-1, 1]$, con i valori massimi prossimi a uno corrispondono a pixel con un'alta densità di foglie verdi, i valori prossimi al minimo a superfici d'acqua e i valori positivi ma prossimi allo zero a suolo nudo. 
NORMALIZED DIFFERENTIAL WATER INDEX (NDWI)	L'indice NDWI è calcolato usando la seguente relazione $NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$ che usando dati Landsat 8 e 9 è ottenuto dalle bande B_5 (NIR) e B_3 (green). L'indice è normalizzato all'intervallo $[-1, 1]$, dove il valore massimo rappresenta superfici d'acqua e il valore minimo un pixel con un'alta densità di vegetazione.

NORMALIZED DIFFERENTIAL MOISTURE INDEX (NDMI)	L'indice NDMI è calcolato usando la seguente relazione $NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ che usando dati Landsat 8 e 9 è ottenuto dalle bande B_5 (NIR) e B_6 (SWIR). L'indice è normalizzato all'intervallo $[-1, 1]$ con il valore massimo corrispondente al caso di piante dal fusto alto assenza di stress idrico e il valore minimo al caso di bassa vegetazione e suolo nudo. 
NORMALIZED SOIL MOISTURE INDEX (NSMI)	L'indice NSMI è definito in termini delle bande spettrali alle lunghezze 1800 e 2119 nm $NSMI = \frac{B_{1800} - B_{2119}}{B_{1800} + B_{2119}}$ Il suo calcolo richiederebbe l'uso di dati iperspettrali non essendo le bande di S2 e Landsat centrate alle due lunghezze d'onda usate nella definizione del NSMI, oltre ad avere una peggiore risoluzione spaziale. Tuttavia, l'NSMI può essere calcolato in modo approssimato usando le bande B_6 e B_7 di Landsat 8 e 9 o le bande B_{11} e B_{12} di S2. I valori dell'indice NSMI sono normalizzati nell'intervallo $[-1, 1]$ con i valori prossimi a uno indicanti suoli umidi e quelli prossimi a -1 suoli secchi. L'indice NSMI è una quantità adimensionale proporzionale alla soil moisture misurata in laboratorio con metodi gravimetrici $NSMI = a + b \cdot SM_{grav}$ Con i coefficienti a e b determinati usando tecniche di regressione lineare.
LAND SURFACE TEMPERATURE (LST)	La LST è calcola usando la banda 10 dei dati Landsat 8 e 9 di livello 2 usando la seguente relazione $LST = \frac{T_B}{1 + \lambda \cdot \frac{T_B}{\rho} \cdot \ln \varepsilon} - 273.15$ dove la temperatura in brillantezza T_B in Kelvin è fornita dalla banda 10 delle immagini Landsat 8 e 9, λ è la lunghezza d'onda in μm della radianza emessa, la costante ρ è ottenuta dalla costanti di Planck h, Boltzmann σ e di velocità della luce nel vuoto c. L'emissività del terreno è ottenuta dalla mappa dell'indice NDVI usata come strumento di classificazione d'uso del territorio, assumendo l'emissività della vegetazione $\varepsilon_v = 0.99$ e l'emissività del suolo nudo $\varepsilon_s = 0.96$. Il valore dell'emissività del suolo nudo dipende alla composizione del suolo nel particolare sito di studio, dalla omogeneità di tale composizione nel pixel di 100m della banda termica di Landsat 8 e 9 ed è poi ottenuto dalla relazione $\varepsilon = \varepsilon_v - (\varepsilon_v - \varepsilon_s) \cdot \left(\frac{NDVI - NDVI_v}{NDVI_s - NDVI_v} \right)^k$ dove $NDVI_v$ è il valore massimo dell'indice di vegetazione per porzione di terreno coperte da vegetazione, $NDVI_s$ è il valore minimo dell'indice di vegetazione in corrispondenza di suolo nudo e $k = 2$, come riportato nella letteratura scientifica. Il rapporto dei valori di NDVI fornisce quindi una stima della frazione del pixel ricoperta da vegetazione. La mappa della LST può essere utilizzata per definire un indice di soil moisture $SMI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$ che va calibrato con misure in campo di umidità del suolo.

RAPPORTO POLARIZZAZIONI VH E VV (PRODOTTO SAR)	Il rapporto pixel-pixel delle immagini S1 nei canali di polarizzazione VH e VV $D = \frac{\sigma_0^t(VH)}{\sigma_0^t(VV)}$ dove $\sigma_0^t(VH)$ e $\sigma_0^t(VV)$ sono, rispettivamente i coefficiente radar di backscattering nelle polarizzazioni VH e VV, fornisce un indice correlato alla presenza di biomassa “fresca” in campo. I valori di $\sigma_0^t(VH)$ e $\sigma_0^t(VV)$ sono ottenute dai prodotti GDR di S1. La serie temporale di tale indice è da usare in sinergia con la serie temporale dell'indice NDVI ottenuto dai dati MS (per esempio S2).
RAPPORTO DELLE POLARIZZAZIONI VV A ISTANTI SUCCESSIVI (PRODOTTO SAR)	Il rapporto pixel-pixel delle immagini S1 nel canale di polarizzazione VV acquisite agli istanti successivi t e $t+\Delta t$, dove Δt è il tempo di rivisitazione del satellite S1, consente di stimare in modo ricorsivo il contenuto di umidità del suolo SM secondo la seguente relazione ricorsiva $SM_{t+\Delta t} = \frac{\sigma_0^{t+\Delta t}}{\sigma_0^t} \cdot SM_t$ dove σ_0^t è il coefficiente radar di backscattering in polarizzazione VV. Tale relazione ricorsiva consente di stimare la SM ai tempi corrispondenti alle acquisizioni S1, usando i dati SAR e il valore della SM al tempo iniziale della serie temporale, corrispondente alla prima acquisizione S1 della serie temporale. Tale valore di SM può essere fornito da misure in loco e da stime della SM a bassa risoluzione spaziale fornite da sensori satellitari.
COERENZA INTERFEROMETRICA (PRODOTTO SAR)	L'immagine di coerenza interferometrica è ottenuta elaborando interferometricamente una coppia di immagini SAR in formato SLC-IW della scena agricola di interesse, acquisite a tempi differenti lungo la stessa orbita. La coerenza interferometrica è stimata usando seguente relazione $= \frac{ \sum_i \sum_j S_{t+\Delta t}(i,j) \cdot S_t(i,j)^* }{\sum_i \sum_j S_{t+\Delta t}(i,j) ^2 \cdot \sum_i \sum_j S_t(i,j) ^2}$ dove $S_t(i,j)$ e $S_{t+\Delta t}(i,j)$ sono le due immagini SAR interferometriche acquisite agli istanti t e $t + \Delta t$, costituite da matrici di numeri complessi, $\cdot$ indica il valore di modulo di un numero complesso e $*$ l'operazione di complesso coniugato di un numero complesso. La coerenza interferometrica, è un numero reale compreso tra 0 e 1 ed calcolata in banda C fornisce un indice correlato alla struttura della pianta coltivata e alla umidità del suolo sottostante.

DATI SATELLITARI.

I dati satellitari acquisiti dai sensori SAR (S1 nei formati GRD e SLC) e MS (S2, Landsat 8 e Landsat 9) sono acquisiti usando un'API del Sentinel Hub. I dati grezzi sono elaborati fornendo le **tipologie di prodotto** descritte nella tabella seguente.

Tab. 3 – Tipologie di prodotti ottenuti dalla elaborazione dei dati satellitari.

PRODOTTO DI LIVELLO 1	Prodotto di livello 1 costituito da ciascuno degli indici, LST, rapporto delle polarizzazioni SAR VH/VV, geolocalizzato e fornito di timestamp. Il prodotto è fornito al DSS in formato testo usando il seguente formato vettoriale per ciascuno dei pixel dell'immagine satellitare grezza per il quale una stima della quantità fisica stimata dai dati satellitari è disponibile. <i>Struttura del prodotto vettoriale di livello 1 ottenuto dall'elaborazione dei dati satellitari (MS, HS e SAR) da integrare nel DSS. L'esempio è riferito all'indice NSMI.</i> <i>Sensore satellitare</i> <i>Data acquisizione immagine satellitare</i> <i>Tempo acquisizione immagine satellitare</i> <i>Longitudine Pixel 1, Latitudine Pixel 1, NSMI @ pixel 1</i> <i>...</i> <i>Longitudine Pixel N, Latitudine Pixel N, NSMI @ pixel N</i>
PRODOTTO DI LIVELLO 1	Prodotto di livello 1 costituito dal rapporto della polarizzazione SAR VV agli istanti t e $t + \Delta t$ e dalla coerenza interferometrica descritti al paragrafo 3.2.5, geolocalizzati e forniti di timestamp. Il prodotto è fornito al DSS

	in formato testo usando il seguente formato vettoriale per ciascuno dei pixel dell'immagine satellitare grezza per il quale una stima della quantità fisica stimata dai dati satellitari è disponibile. <i>Struttura del prodotto vettoriale di livello 1 relativo al rapporto della polarizzazione SAR VV agli istanti t e $t + \Delta t$ da integrare nel DSS. La struttura del prodotto di livello 1 della coerenza SAR interferometrica è analogo.</i> <i>Sensore satellitare</i> <i>Data acquisizione immagine prima immagine SAR</i> <i>Tempo acquisizione immagine prima immagine SAR</i> <i>Data acquisizione immagine seconda immagine SAR</i> <i>Tempo acquisizione immagine seconda immagine SAR</i> <i>Longitudine Pixel 1, Latitudine Pixel 1, $VV(t+\Delta t)/VV(t)$ @ pixel 1</i> <i>...</i> <i>Longitudine Pixel N, Latitudine Pixel N, $VV(t+\Delta t)/VV(t)$ @ pixel N</i>
PRODOTTO DI LIVELLO 2	Prodotto di livello 2 costituito dalle stime di SM ottenute dai differenti indici, LST e prodotto dell'elaborazione di SAR. Tale stime sono ottenute usando tecniche di regressione lineare e alcune misure di SM acquisite in campo. Nel caso del rapporto $VV(t + \Delta t)/VV(t)$ della polarizzazione SAR VV e della coerenza interferometrica, il valore della SM all'istante dell'acquisizione della prima immagine SAR della serie temporale è ottenuto da misure in campo o da dati satellitari o di modelli numerici meteorologici di bassa risoluzione spaziale. La struttura del prodotto di livello 2 fornito per l'integrazione nel DSS è riportato in tabella. Per una determinata immagine satellitare (stesso sensore, data e tempo di acquisizione), sono fornite le coordinate geografiche di ciascuno pixel dove la SM è stata stimata, il valore della quantità fisica dalla quale sono state stimate e il valore di SM. Lo stesso file contiene tutti i valori di SM sull'area di interesse con le stime di SM ordinate in base al tempo di acquisizione dell'immagine satellitare dalla sono state ottenute. <i>Struttura del prodotto vettoriale di livello 2 da integrare nel DSS.</i> <i>Sensore Data Tempo Longitudine Latitudine Quantità_fisica $SM_{stimata}$</i>

MODELLAZIONE DEL CARBONIO ORGANICO NEL SUOLO.

Il modello Rothamsted (RothC) consente di modellare e predire la quantità carbonio organico, o Soil Organic Carbon (SOC), immagazzinata in un dato spessore di suolo per unità di superficie, ed è espresso in $Mg \cdot ha^{-1}$. Tale quantità varia nel tempo e dipende dalla modalità di uso del suolo e da modifiche nella sua gestione. Il modello distingue cinque differenti comparti del carbonio sequestrato nel suolo:

- Materiale vegetale resistente (RPM)
- Materiale vegetale decomponibile (DPM)
- Biomassa microbica (BIO)
- Materia organica umidificata (HUM)
- Materia organica inerte (IOM)

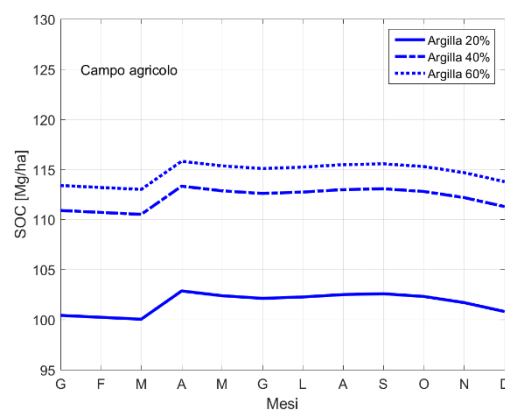
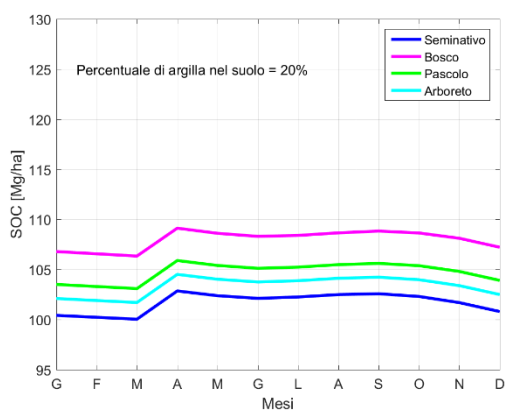
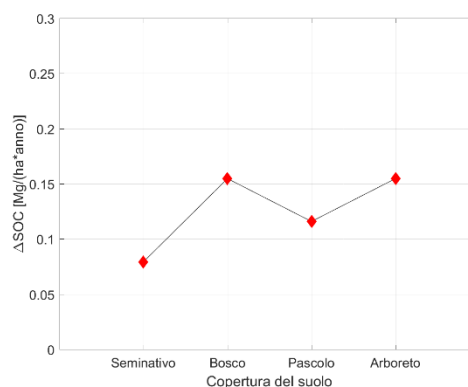
Ciascuno di tali comparti ha i propri coefficienti di decomposizione, cioè la frazione della quantità presente a un determinato istante. Solo il comparto IOM non varia nel tempo in quanto la materia organica non subisce ulteriori trasformazioni. I coefficienti di decomposizione di ciascuna comparto dipendono dalle proprietà pedologiche, la temperatura del suolo, la sua umidità e la copertura vegetale. Le mappe del SOC possono essere aggiornate al variare del tempo usando dati satellitari in

modo da catturare la variazione del contenuto di carbonio nel suolo, evidenziando l'effetto delle diverse pratiche agricole.

PREDIZIONE DEL CARBONIO ORGANICO IMMAGAZZINATA NEL SUOLO.

A DESTRA È RIPORTATA LA VARIAZIONE ANNUALE DEL SOC RISPETTO AL SUOLO NUDO, PER QUATTRO DIFFERENTI TIPOLOGIE DI USO DEL SUOLO: SEMINATIVO, BOSCO, PASCOLO E ARBORETO.

IN BASSO, L'ANDAMENTO ANNUALE DEL CARBONIO ORGANICO PER LE CINQUE TIPOLOGIE DI USO DEL SUOLO, NEL CASO DI SUOLI CON UNA FRAZIONE DI ARGILLA PARI AL 20% (DESTRA) E, NEL CASO DI SEMINATIVO, PER DIFFERENTI PERCENTUALI DI ARGILLA NEL SUOLO.



A cura di Antonella Carmela Longo - DIAN

Per maggiori informazioni, contattare: info@darepuglia.it



Visita il sito di Progetto:
www.progettoiride.it

PARTNER:



In collaborazione con:

