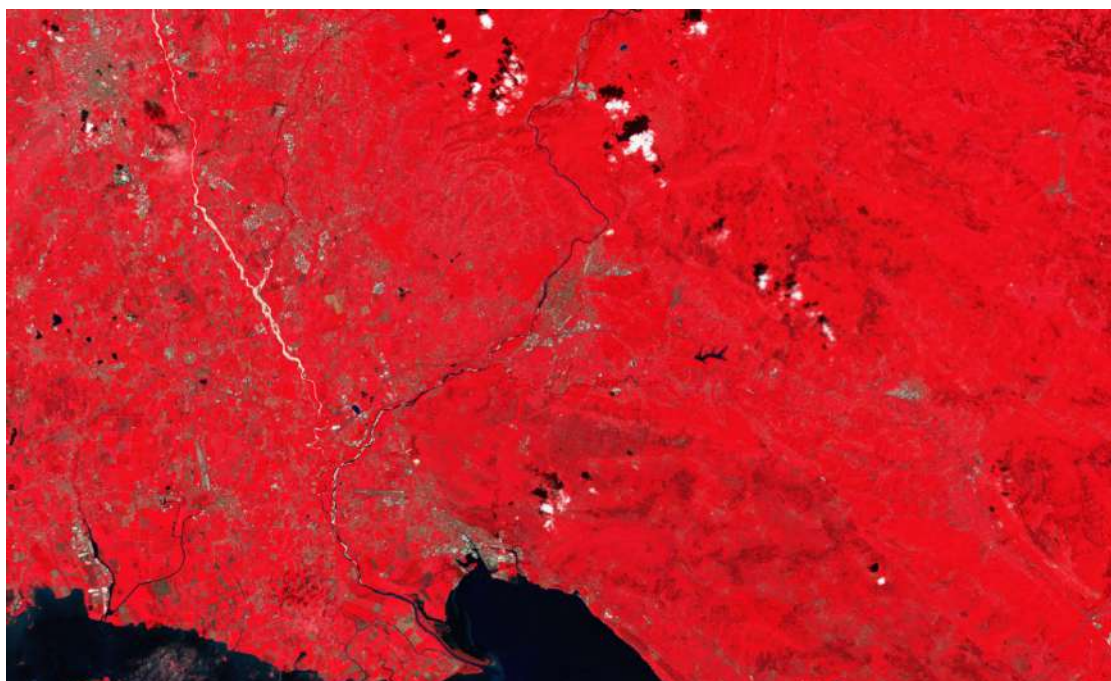


IRRIGAVIT - Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura
transfrontaliera

IRRIGAVIT - Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem
vinogradništvu

D 2.1.2 Report delle correlazioni tra parametri fisiologici del vigneto e indici multispettrali

D 2.1.2 Poročilo o korelacijah med fiziološkimi parametri vinograda in multispektralnimi indeksi



Numero progetto/ Projektna številka	ITA-SI0100043
Acronimo/ Akronim	IRRIGAVIT
Titolo Progetto/ Projektni naslov	Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera / Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu
Budget totale/ celotni znesek	€ 617.325,98
Di cui Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR)/ od tega Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR)	€ 493.860,78
Durata/ Trajanje	01/10/2023 – 31/12/2025
WP e attività/ DP in dejavnost	WP 2.1
Titolo Deliverable/ Naslov Dosežka	D 2.1.2 Report delle correlazioni tra parametri fisiologici del vigneto e indici multispettrali Poročilo o korelacijah med fiziološkimi parametri vinograda in multispektralnimi indeksi
WP leader / DP vodja	GIS
Autore/ Autor	Alen Mangafić
Giorno di consegna/ Dan izdaje	30/10/2025
Status/ Status	Versione Finale/ Končna verzija

Partner/Partnerji:

LP/**VP**- giver: Università degli studi di Udine -Di4A (UNIUD)

Partner 2- giver: Università Ca' Foscari di Venezia (UNIVE)

Partner 3- giver: **Kmetijski Inštitut Slovenije (KIS)**

Partner 4- giver: **Geodetski Inštitut Slovenije (GIS)**

Partner 5 - taker: **Consorzio Tutela Vini Friuli Colli Orientali e Ramandolo (CON)**

Partner 6 - taker: **RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica (RAA)**

UVOD	4
1 Nadgradnja modeliranja vodnega stresa z uporabo Sentinel-2.....	5
1.1 Uvod	5
1.2 Podatki in metode.....	5
1.3 Preizkus na vinogradu Šmarje	6
2 Ekvivalentna debelina vode v rastlinskem pokrovu: hiperspektralni pristop.....	10
2.1 Uvod	10
2.2 Podatki	10
2.3 Metode	11
2.4 Rezultati in sklep	12
Viri	14

UVOD

Vinogradništvo na čezmejnem območju med Italijo in Slovenijo se vse pogosteje sooča s posledicami podnebnih sprememb: ponavljajoče se suše, dolgotrajen vodni stres in ekstremni vremenski pojavi ogrožajo količino in kakovost grozdja ter trajnost celotnega kmetijskega sistema. Projekt [IRRIGAVIT – Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu](#), ki se je začel 1. oktobra 2023 in je sofinanciran v okviru programa Interreg VI-A Italija–Slovenija 2021–2027, ima cilj izboljšati učinkovitost rabe vode v vinogradih ter povečati odpornost vinarskega sektorja z uvajanjem dobrih kmetijskih praks in naprednih tehnoloških orodij. IRRIGAVIT nadgrajuje rezultate predhodnega projekta [“ACQUAMITIS - Inovativne rešitve za učinkovito rabo vode v čezmejnem vinogradništvu”](#), ki je uvedel ekosistemski pristop k nujnemu namakanju in upravljanju tal v treh pilotnih območjih (**Vipavska dolina, Kras in Spodnja Furlanija**), z uporabo zelenih tehnologij, daljinskega zaznavanja, DSS ter praks upravljanja tal za optimizacijo vodne bilance v vinogradih. IRRIGAVIT razširja razvite protokole in prakse s pomočjo strokovne podpore na nova ključna območja – **Furlanski Vzhodni griči (Colli Orientali) in Brda** – z namenom prenosa inovacij na vinogradnike in javne ključne odločevalce.

Nosilec projekta je **Univerza v Vidmu** – Oddelek za agroživilstvo, okolje in živali (Di4A), projekt pa združuje **šest** partnerjev:

Univerza Ca' Foscari v Benetkah

Kmetijski inštitut Slovenije (KIS)

Geodetski inštitut Slovenije (GIS)

RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica

Konzorcij za zaščito vin Furlanije – Colli Orientali in Ramandolo

In enajst pridruženih partnerjev:

- ARPA FVG - Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente del Friuli Venezia Giulia
- Regione autonoma Friuli Venezia Giulia
- Veneto Agricoltura
- Consorzio Tutela Prosecco doc, Area tecnicoambientale
- ERS-Agenzia regionale per lo Sviluppo Rurale del Friuli Venezia Giulia
- Univerza v Novi Gorici
- Konzorcij Brda
- Regionalna razvojna agencija za Podravje – Maribor
- Università degli Studi di Padova
- Kohezijska regija Vzhodna Slovenija
- Center za podporo podjetjem pri razvijanju zelenih tehnologij d.o.o.

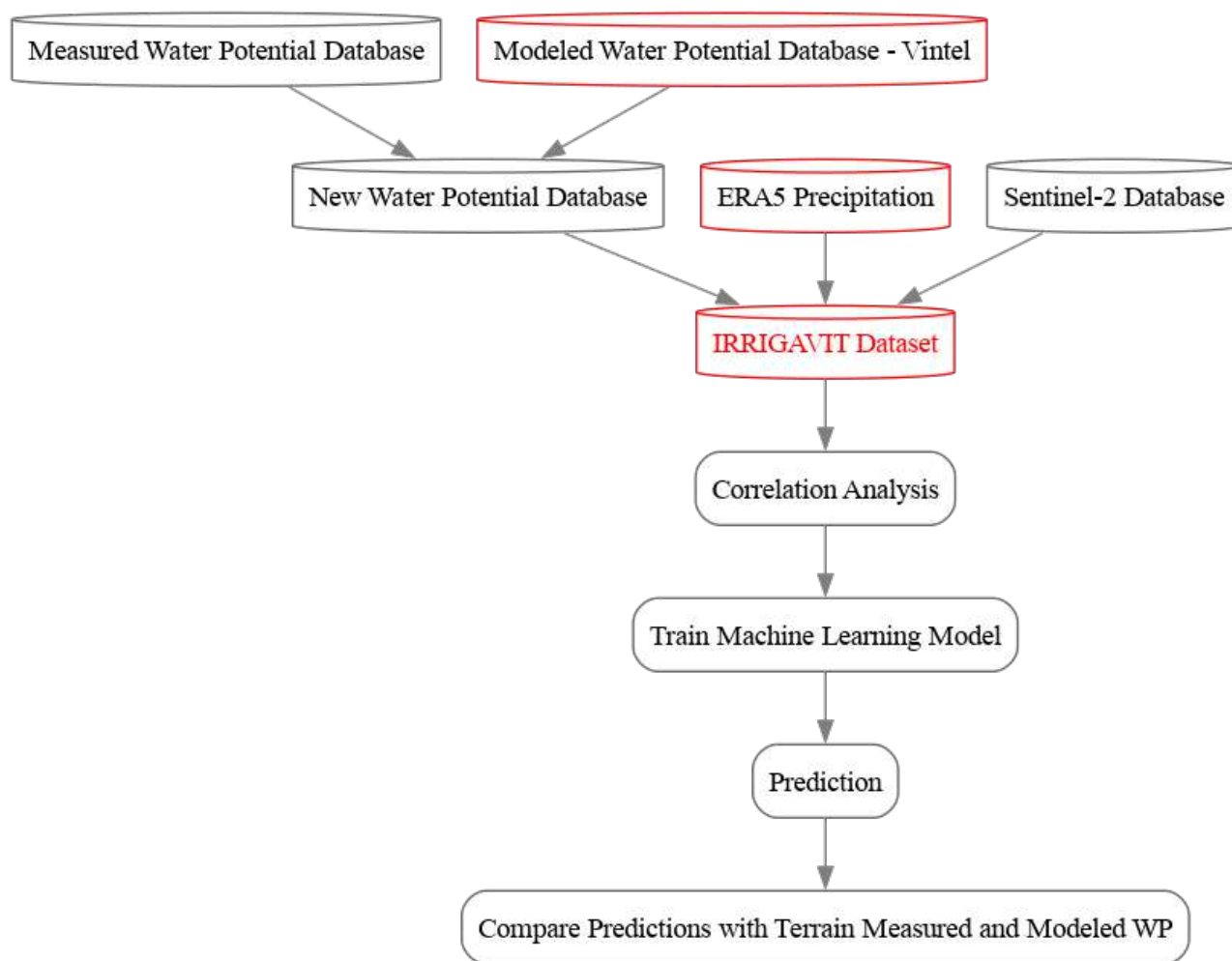
Projekt ima dva ključna cilja: validacija in prilagoditev tehničnih strategij za optimizirano upravljanje z vodo ter oblikovanje novih skupnih smernic za njihovo vključitev v vinarske pravilnike in kmetijske politike obeh držav ter promovirati nove smernice tudi na širša območja.

Projekt se bo zaključil 31. decembra 2025 s podpisom skupne zaveze partnerjev in oblikovalcev politik za sprejetje novih smernic IRRIGAVIT.

1 Nadgradnja modeliranja vodnega stresa z uporabo Sentinel-2

1.1 Uvod

V projektu ACQUAVITIS smo analizirali korelacije med vodnim potencialom trte in multispektralnimi posnetki. Poleg podatkov UAV smo v projektu uporabili še satelitske posnetke konstelacije Sentinel-2 (CDSE). V nadaljevanju projekta IRRIGAVIT, smo nadgradili obstoječe analize z vključitvijo dodatnih spremenljivk. Glavni cilj je bil nadgraditi modeliranje z upoštevanjem podatkov o padavinah ERA5 in ocenami vodnega potenciala na osnovi sistema Vintel. Na sliki 1 je prikazan diagram, ki ponazarja nadgradnje modela vodnega potenciala za oba projekta.



Slika 1: Diagram nadgrajenega modela.

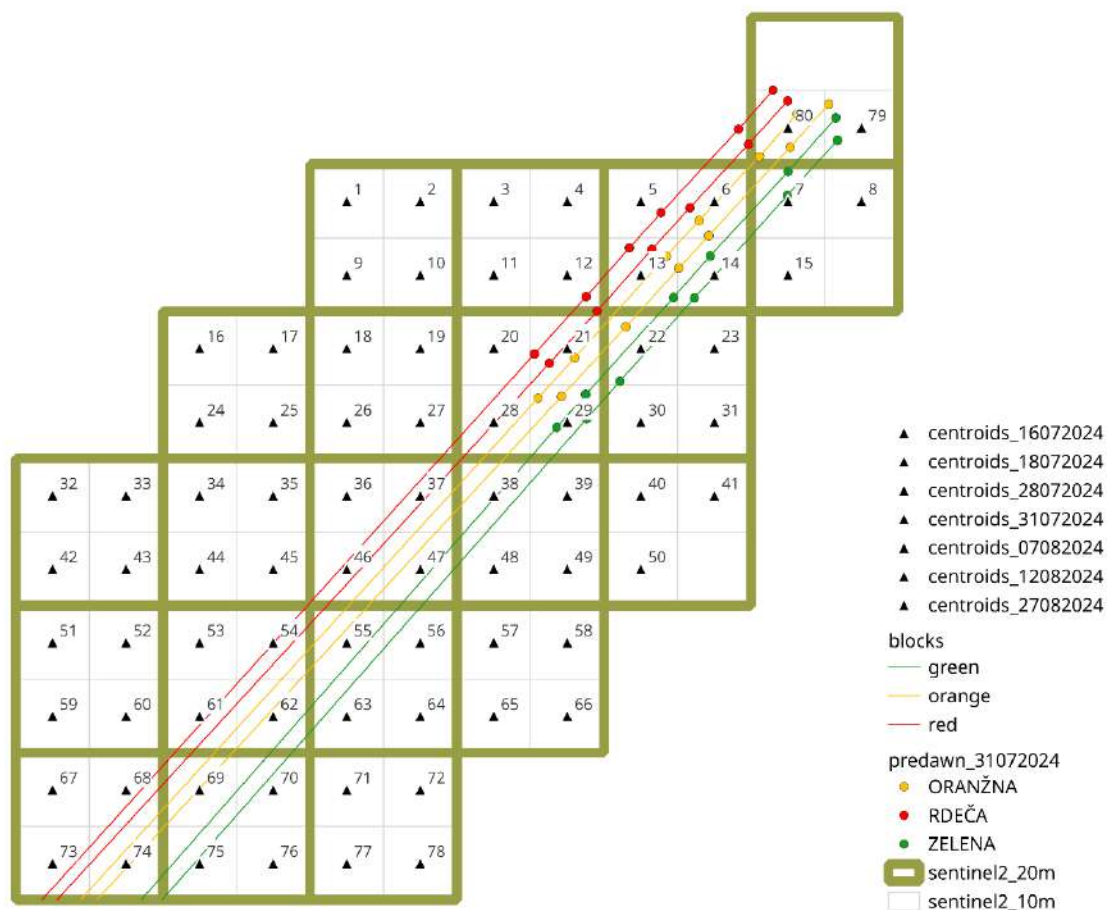
1.2 Podatki in metode

Podatki ERA5 omogočajo globalno uporabo razvite metodologije, saj gre za odprt, standardiziran in globalno dostopen vir. Uporaba ocen vodnega potenciala iz sistema Vintel omogoča razvoj pristopa, ki ni odvisen od terenskih meritev na dan preleta satelita. Kadar so na voljo brezoblačni posnetki Sentinel-2, vendar ni izvedenih meritev vodnega potenciala, prihaja do izgube informacij. Povezovanje posnetkov Sentinel-2 z validiranimi ocenami iz sistema Vintel (potrjenimi v drugih delovnih paketih projekta) omogoča

večjo prilagodljivost in stabilnost modeliranja, saj imamo na voljo modelirani vodni potencial za vsak datum Sentinel-2 preleta.

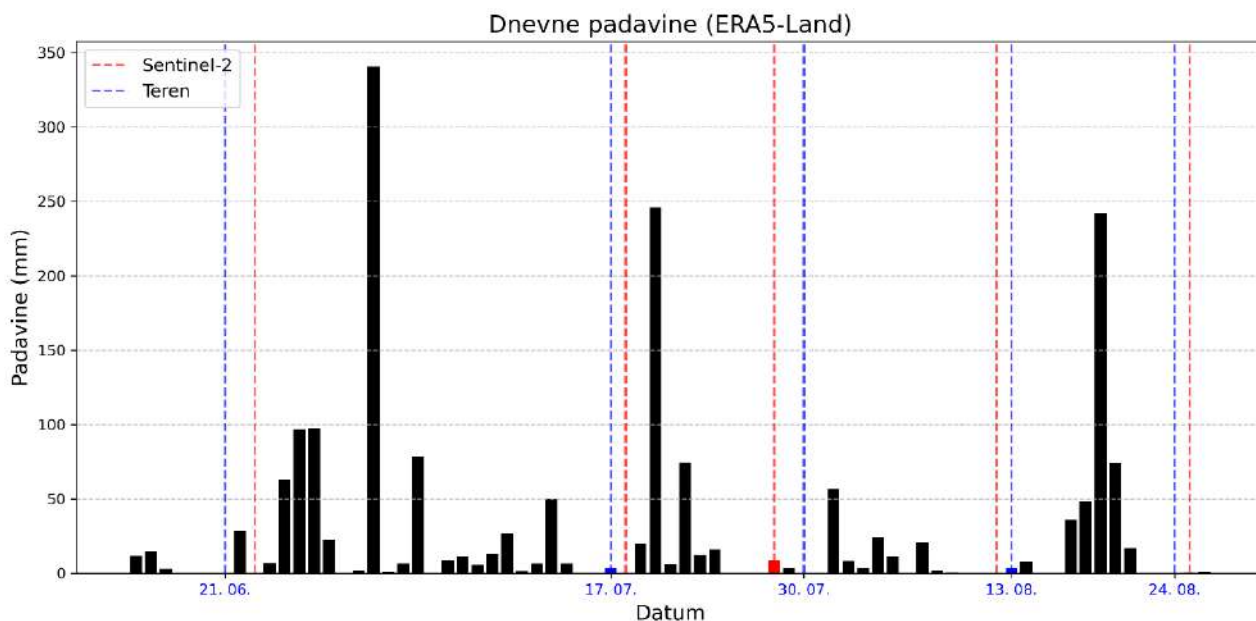
1.3 Preizkus na vinogradu Šmarje

Preizkus je bil izveden na vinogradu Šmarje, kjer meritve vodnega potenciala rastlin niso bile časovno usklajene z vsemi posnetki. Kljub temu smo z agregacijo blokov na Sentinel-2 celice dosegli konsistentno prostorsko porazdelitev podatkov (slika 2).



Slika 2: Načrt študijskih blokov na Sentinel-2 gridu.

Za modeliranje smo uporabili Sentinel-2 posnetke z datumi 16. 7., 18. 7., 28. 7., 31. 7., 7. 8., 12. 8. in 27. 8. 2024, v kombinaciji z ocenami vodnega potenciala iz sistema Vintel. Na tej osnovi smo modelirali vrednosti vodnega potenciala (MPa). Pred modeliranjem smo preverili, ali so datumi posnetkov zajeli stanje neposredno po dežju (slika 3).



Slika 3: Prikaz količine padavin in datumov preleta Sentinel-2.

Na sliki 4 lahko vidimo, kako smo obteževali meritve vodnega potenciala na posamezne Sentinel-2 celice (odstotek prekrivanja gleda na zeleni, oranžni in rdeči blok) ter določili oceno vodnega potenciala, ki je šla v modeliranje.

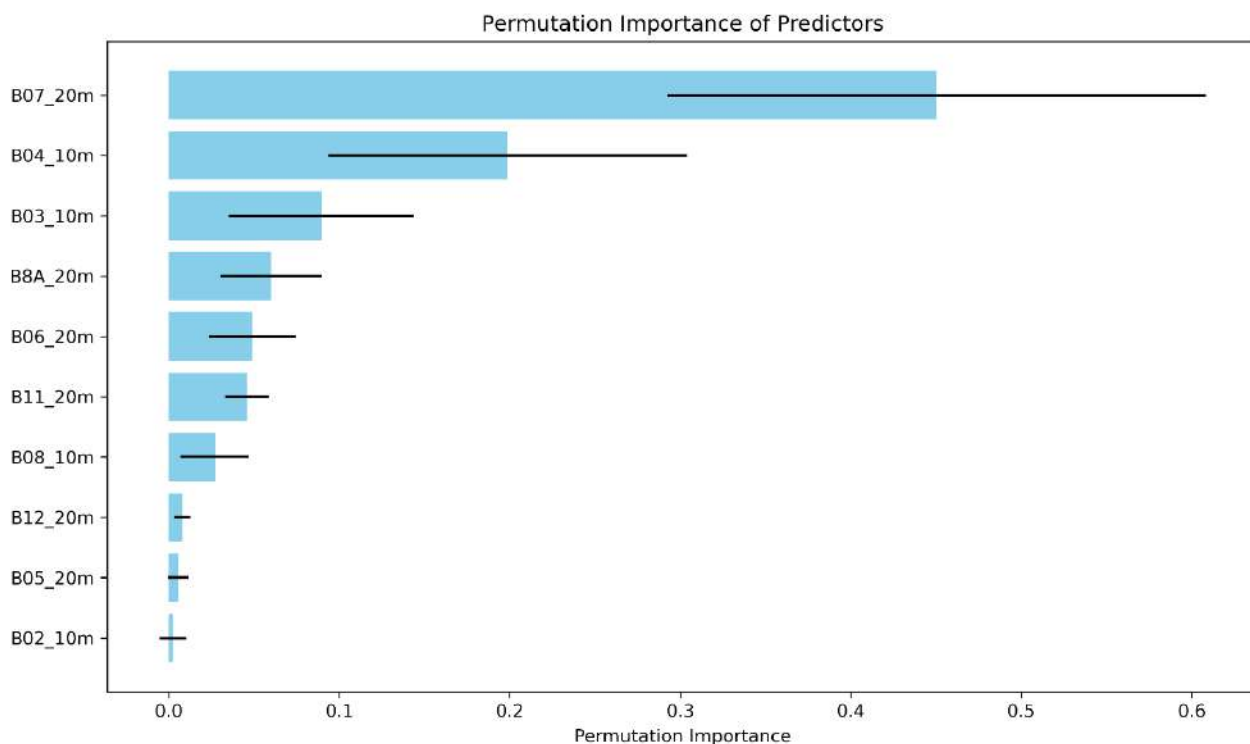
date	green_percentage	orange_percentage	red_percentage	green_vintel	orange_vintel	red_vintel	scholander
2024-07-16	15	40	45	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
2024-07-18	15	40	45	-0.18	-0.38	-0.38	-0.35
2024-07-28	13	15	40	-0.22	-0.28	-0.58	-0.3
2024-07-31	15	40	45	-0.29	-0.34	-0.62	-0.46
2024-08-07	15	40	45	-0.19	-0.31	-0.38	-0.32
2024-08-12	15	40	45	-0.24	-0.47	-0.57	-0.48
2024-08-27	15	40	45	-0.24	-0.33	-0.3	-0.3

Slika 4: Pripis vodnega potenciala blokov Sentinel-2 gridom.

Preizkusili smo pet regresijskih modelov strojnega učenja in ocenili njihovo stabilnost z R2 ter natančnost z RMSE (slika 5) ter pomembnost posameznih mutispektralnih kanalov pri modeliranju (slika 6).

Model	Most Important Features R2	Most Important Features RMSE	Extended Features R2	Extended Features RMSE	All Features R2	All Features RMSE
BaggingRegressor	0.64	0.063	0.69	0.057	0.66	0.061
RandomForestRegressor	0.63	0.063	0.66	0.06	0.64	0.063
AdaBoostRegressor	0.62	0.064	0.64	0.062	0.61	0.064
ExtraTreesRegressor	0.61	0.065	0.64	0.062	0.68	0.059
KNeighborsRegressor	0.53	0.071	0.57	0.068	0.63	0.063

Slika 5: Rezultati regresijskih modelov.



Model	Most Important Features R2	Most Important Features RMSE	Extended Features R2	Extended Features RMSE	All Features R2	All Features RMSE
BaggingRegressor	0.64	0.063	0.69	0.057	0.66	0.061
RandomForestRegressor	0.63	0.063	0.66	0.06	0.64	0.063
AdaBoostRegressor	0.62	0.064	0.64	0.062	0.61	0.064
ExtraTreesRegressor	0.61	0.065	0.64	0.062	0.68	0.059
KNeighborsRegressor	0.53	0.071	0.57	0.068	0.63	0.063

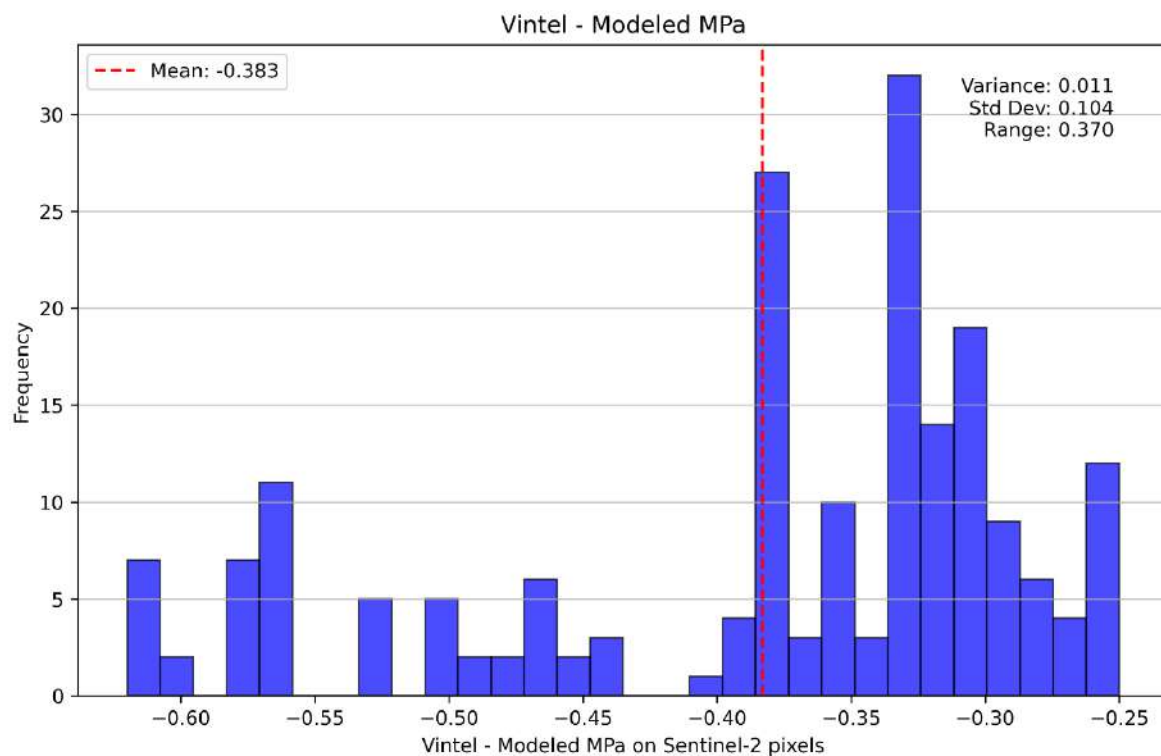
Slika 6: Vpliv posameznih multispektralnih kanalov na napoved vodnega potenciala.

Zaradi majhne variance podatkov se je pokazalo, da regresijski pristop ni optimalen. V nadaljevanju smo preizkusili klasifikacijske modele, da bi preverili učinkovitost razvrščanja.

Podatkovni set smo razdelili v dve skupini:

- razred 1: $< -0,35$ MPa
- razred 2: $> -0,35$ MPa

Razredi so bili določeni na osnovi histogramov porazdelitve vrednosti v odnosu na srednjo vrednost (slika 7).



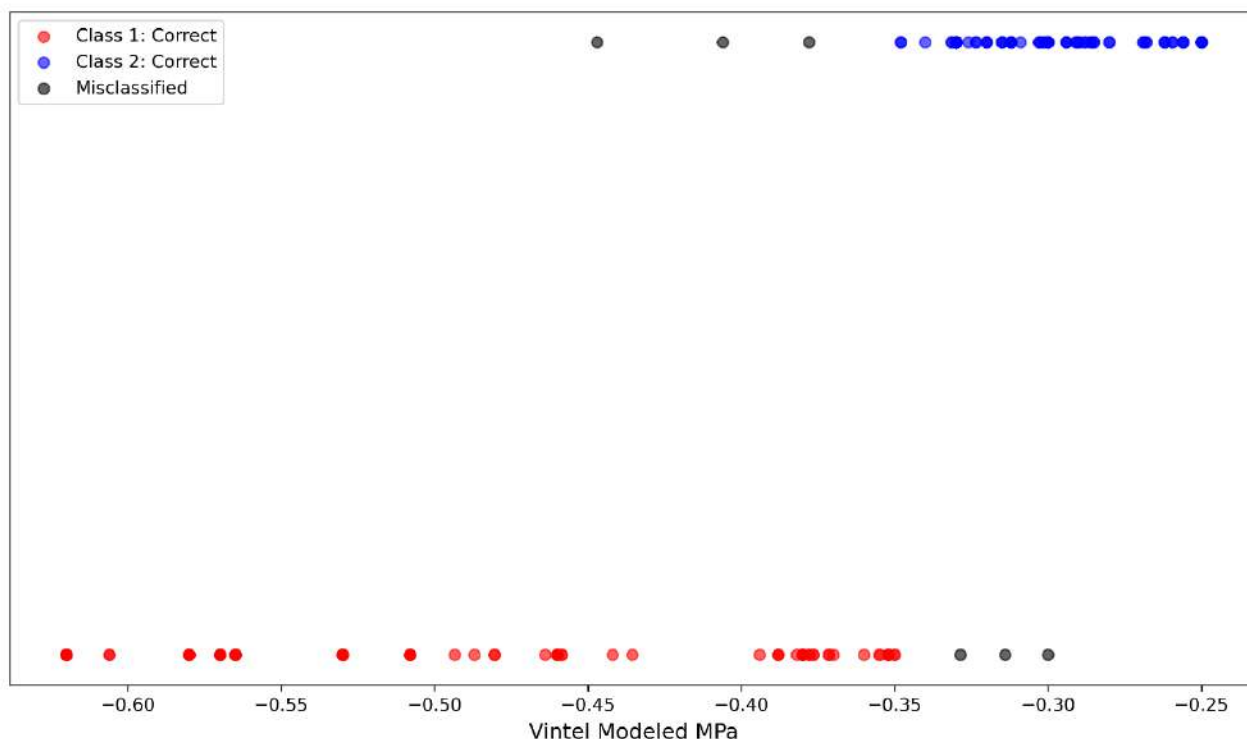
Slika 7: Porazdelitev vodnega potenciala podatkovnega seta.

Za klasifikacijo smo uporabili 10 modelov strojnega učenja (slika 8).

Model	Accuracy
AdaBoostClassifier	0.88
BaggingClassifier	0.88
ExtraTreesClassifier	0.85
LGBMClassifier	0.85
RandomForestClassifier	0.85
DecisionTreeClassifier	0.82
KNeighborsClassifier	0.8
RidgeClassifier	0.8
RidgeClassifierCV	0.8
LabelPropagation	0.78

Slika 8: Rezultati klasifikacijskih modelov.

Na sliki 9 lahko vidimo rezultate model Random Forest, s katerim smo je pravilno klasificiranih 190 od 196 primerov. Napačno klasificirani piksli so prikazani sivo, pravilno pa v dveh kontrastnih barvah.



Slika 9: Prikaz uspešnosti kalsifikacije: primer Random Forest.

Kombinacija podatkov Vintel + Sentinel-2 se je izkazala kot učinkovita. Prihodnje izboljšave bi lahko vključevale neposredno vključitev podatkov o padavinah v modele, ne le za čiščenje podatkovnih nizov, temveč tudi za izboljšanje napovedne moči.

2 Ekvivalentna debelina vode v rastlinskem pokrovu: hiperspektralni pristop

2.1 Uvod

Ekvivalentna debelina vode (EWT) predstavlja količino vode, ki jo vsebuje rastlina oziroma njen pokrov, izraženo kot plast vode, če bi bila enakomerno porazdeljena po površini listov (Woche et al. 2018). Gre za optično merljiv pokazatelj vsebnosti vode v rastlinskem tkivu, izražen v enotah debeline (npr. g/cm² ali mm). EWT opisuje vodni status rastline. EWT ne kaže energijskega stanja vode, zato ni neposreden pokazatelj vodnega potenciala, ampak je lahko posreden kazalnik količine vode (proxy), ki se lahko uporablja za spremljanje vpliva suše in vodnega stresa.

2.2 Podatki

Za določanje EWT lahko uporabljamo hiperspektralne satelitske posnetke kot so npr. Posnetki EnMAP (DLR; Chabrillat et al 2024), PRISMA (ASI; Galeazzi et al. 2008) in Tanager-1 (Planet Labs 2025), ki omogočajo neposredno izpeljavo vsebnosti vode v rastlinskem pokrovu na podlagi spektralnih značilnosti v območju absorpcije vode med približno 930–1060 nm. Omenjeni satelitski hiperspektralni posnetki imajo izjemno

visoko spektralno ločljivost in srednjo prostorsko (30 m). Namenjeni so modeliranju na ravni celotnega vinograda in njihov največji potencial je regionalno modeliranje.

Preizkus smo izvedli posnetku PRISMA (12. April 2024) ki je bil uporabljen za izračun prostorske porazdelitve EWT na preizkusnem območju (slika 10). Hiperspektralni posnetki tega tipa niso še dostopni za vse lokacije in željene čase, tako da smo analizo izvedli na posnetku najbližjega območja za namene prvega preizkusa tega tipa tehnologije v kontekstu tega projekta. Na tem območju so prisotni tudi nekateri vinogradi iz preteklih projektnih aktivnosti.



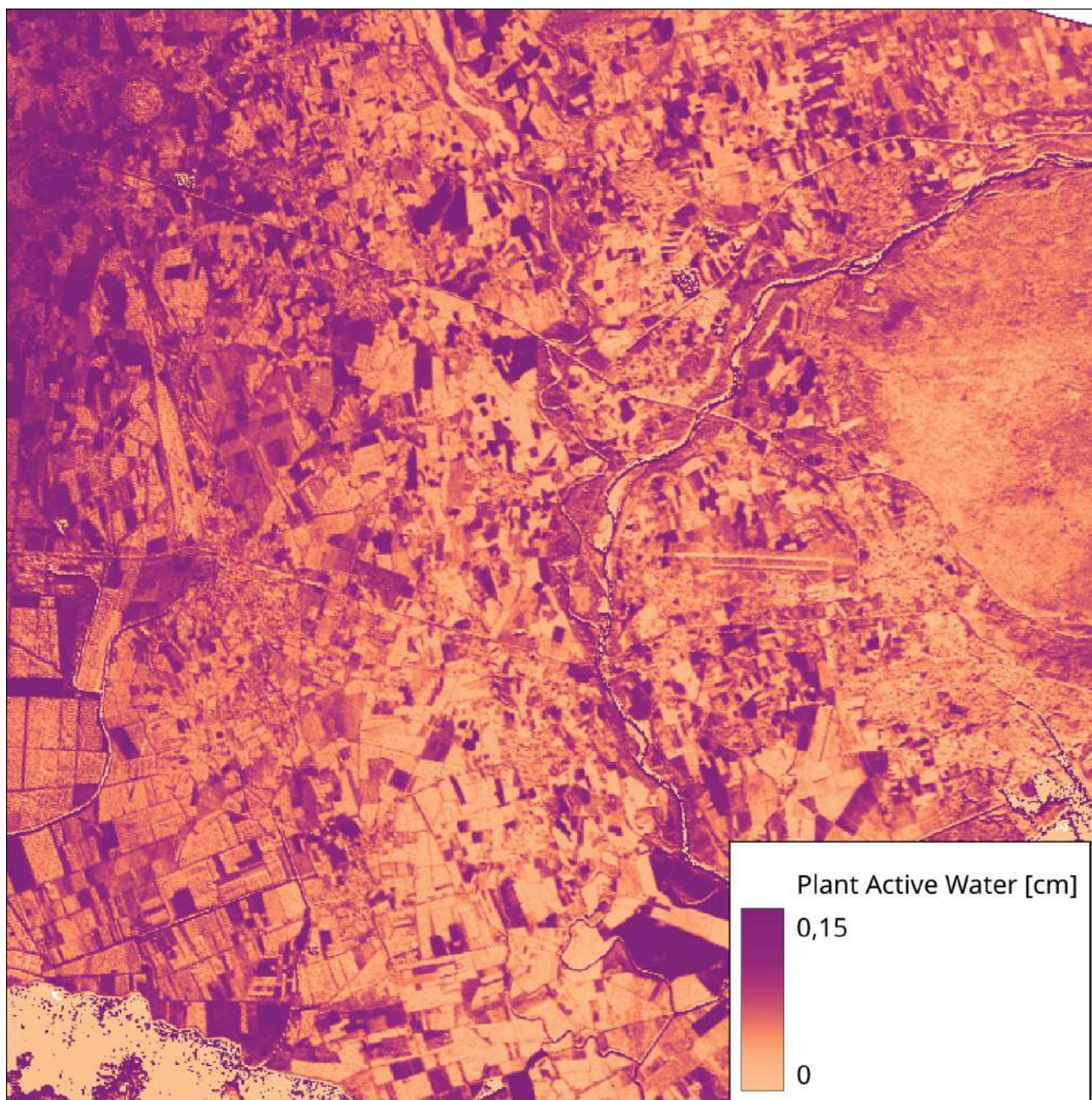
Slika 10: Vhodni posnetek (levo: RGB, desno: SWIR lažni kompozit)

2.3 Metode

Pred obdelavo je bila izvedena atmosferska korekcija z algoritmom ATCOR, ki pretvori navidezno reflektanco v površinsko reflektanco in s tem omogoča fizikalno pravilno interpretacijo interakcije svetlobe z rastlinskim pokrovom. Za neposredno ekstrakcijo EWT iz hiperspektralnih posnetkov je bil uporabljen modul Plant Water Retrieval (PWR), ki temelji na absorpcijskem zakonu (Beer–Lambert) in omogoča oceno optično aktivne vodne plasti iz reflektance pri 970 nm. Algoritem PWR kvantitativno določa EWT v enotah $[g\ cm^{-2}]$ oziroma $[cm]$ na podlagi razlike med merjeno reflektanco in predvideno suho referenčno reflektanco (Woche et al., 2018). Izračunane vrednosti predstavljajo optično aktivno oziroma fiziološko razpoložljivo vodo v rastlinskem tkivu, ki neposredno sodeluje v procesih transpiracije in fotosinteze ter odraža trenutno hidracijsko stanje rastline. Izračuni so bili izvedeni neposredno na PRISMA posnetku, kar omogoča pridobivanje prostorsko porazdeljenih vrednosti EWT brez potrebe po terenskih meritvah, saj rezultat predstavlja vsebnost aktivne rastlinske vode, pridobljene neposredno iz spektralnega odziva vegetacije.

2.4 Rezultati in sklep

Rezultat predstavlja prostorsko karto ekvivalentne debeline vode v rastlinskem pokrovu [g cm^{-2}], ki prikazuje razlike v vodni vsebnosti glede na rabo tal in fenološko fazo rastlin (slika 11).



Slika 11: Prostorska porazdelitev optično aktivne vode v zgornjem delu rastlinskega pokrova (EWT).

Sklepamo, da se EWT lahko uporablja za nadgradnjo analiz vodnega stresa. Z združitvijo izračunanih vrednosti EWT z meteorološkimi podatki (npr. padavine, temperatura, relativna vlažnost, evapotranspiracija ali vsebnost vode v tle) je mogoče oblikovati kombinirane indekse vodnega stresa, ki omogočajo zgodnje prepoznavanje sušnih razmer ter kvantifikacijo odziva rastlin na pomanjkanje vode. Tak pristop odpira možnost razvoja aplikativnih kazalnikov rastlinskega stresa, ki temeljijo izključno na daljinsko

zaznanih podatkih in jih je mogoče uporabljati tudi za validacijo fizioloških modelov brez potrebe po neposrednih terenskih meritvah.

Viri

CDSE. Sentinel-2 – Documentation. n.d. Retrieved 28 October 2025.

<https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>.

Chabrilat, Sabine, Saskia Foerster, Karl Segl, Alison Beamish, Maximilian Brell, Saeid Asadzadeh, Robert Milewski, Kathrin J. Ward, Arlena Brosinsky, Katrin Koch, Daniel Scheffler, Stephane Guillaso, Alexander Kokhanovsky, Sigrid Roessner, Luis Guanter, Hermann Kaufmann, Nicole Pinnel, Emiliano Carmona, Tobias Storch, Tobias Hank, Katja Berger, Mathias Wocher, Patrick Hostert, Sebastian van der Linden, Akpona Okujeni, Andreas Janz, Benjamin Jakimow, Astrid Bracher, Mariana A. Soppa, Leonardo M. A. Alvarado, Henning Buddenbaum, Birgit Heim, Uta Heiden, Jose Moreno, Cindy Ong, Niklas Bohn, Robert O. Green, Martin Bachmann, Raymond Kokaly, Martin Schodlok, Thomas H. Painter, Ferran Gascon, Fabrizia Buongiorno, Matti Mottus, Vittorio Ernesto Brando, Hannes Feilhauer, Matthias Betz, Simon Baur, Rupert Feckl, Anke Schickling, Vera Krieger, Michael Bock, Laura La Porta, and Sebastian Fischer. 2024. 'The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission: Initial Scientific Results Two Years after Launch'. *Remote Sensing of Environment* 315:114379. doi:[10.1016/j.rse.2024.114379](https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114379).

Galeazzi, Claudio, Andrea Sacchetti, Andrea Cisbani, and Gianni Babini. 2008. 'The PRISMA Program'. P. IV-105-IV-108 in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 4.

Planet Labs. 2025. Tanager - Planet Documentation. <https://docs.planet.com/data/imagery/tanager/>.

Plant Water Retrieval (PWR) — LMU Vegetation Apps 0.1 documentation. n.d. Retrieved 28 October 2025. <https://enmap-box-lmu-vegetation-apps.readthedocs.io/en/latest/apps/PWR.html>.

Wocher, Matthias, Katja Berger, Martin Danner, Wolfram Mauser, and Tobias Hank. 2018. 'Physically-Based Retrieval of Canopy Equivalent Water Thickness Using Hyperspectral Data'. *Remote Sensing* 10(12):1924. doi:[10.3390/rs10121924](https://doi.org/10.3390/rs10121924).