



**Atti del XXVII Convegno Nazionale di
Agrometeorologia**

AGROMETEOROLOGIA: DALL' INFORMAZIONE ALL'APPLICAZIONE

OSIMO (AN), 11-13 Giugno 2025

A cura di Francesca Ventura, Gabriele Cola, Francesca Di Cesare

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari
Università di Bologna

PRECISION IRRIGATION IN THE TRENINO REGION: HOW SWAB TACKLES THE WATER CHALLENGES

IRRIGAZIONE DI PRECISIONE IN TRENINO: COME SWAB AFFRONTA LE SFIDE IDRICHE

Fabio Zottele^{1*}, Cecilia Mattedi¹, Francesco Centurioni¹, Stefano Corradini¹

¹Fondazione Edmund Mach, Centro di Trasferimento Tecnologico, Agrometeorologia e irrigazione, Via Edmondo Mach 1, 38098 San Michele all'Adige (TN)

*fabio.zottele@fmach.it

Abstract

This study presents SWAB (Soil-Water-Atmosphere Advanced Budget), an advanced model for precision irrigation of grapevine, apple, and olive orchards in alpine regions, developed to address the needs of the agricultural sector and policymakers. Based on the FAO-56 water balance methodology, SWAB enhances this approach by incorporating advanced parameterizations of the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC), specifically adapted to the pedoclimatic variability of the Trentino region.

The region encompasses approximately 20,000 irrigated hectares of orchards and vineyards, with a Gross Production Value (GPV) of 22.7 kEUR/ha at current prices (updated 2022, source: ISPAT), highlighting the critical role of irrigation in stabilizing productive yields and supporting the local economy. Although annual precipitation is abundant, including during the growing season for apples and grapevines, decreasing snowfall is progressively eroding spring water reserves, intensifying competition among economic sectors (agriculture, tourism, and hydropower).

In the Trentino context, irrigation water is managed by Land Improvement and Irrigation Consortia without fully considering crop-specific needs. SWAB estimates irrigation requirements and, through the IRRITRE project, supports irrigation Consortia in optimizing short-term water distribution. This integrated approach promotes sustainable water resource management, thereby strengthening the resilience of Trentino's agriculture in the face of climate change.

Parole chiave

Irrigazione di precisione, SWAB, Agricoltura di montagna, FAO56, gestione irrigua

Keywords

Precision irrigation, SWAB, Alpine agriculture, FAO56, SPAC, Water management

Introduzione

Presentiamo SWAB (Soil-Water-Atmosphere Advanced Budget), un modello avanzato e altamente operativo sviluppato per l'irrigazione di precisione di vite, melo e olivo nelle regioni alpine, concepito per rispondere concretamente alle esigenze del settore agricolo e dei decisori politici. SWAB si basa sulla metodologia del bilancio idrico descritta nel documento FAO "Irrigation and Drainage Paper No. 56" (Allen et al., 2018), che fornisce una solida struttura per la stima del fabbisogno idrico delle colture.

Tuttavia, SWAB estende e migliora tale metodologia integrando parametrizzazioni avanzate del Sistema Suolo-Pianta-Atmosfera (SPAC, Kramer and Boyer 1995) adattate specificamente al contesto alpino, caratterizzato da una notevole variabilità delle proprietà dei suoli e dei microclimi, che richiede quindi un approccio flessibile e allo stesso tempo preciso. Inoltre, il modello integra parametri specifici delle colture, adattati agli obiettivi di produzione di alta qualità dell'agricoltura trentina, assicurando così il rispetto delle rigorose regole dei disciplinari di produzione di mele e uve da vino.

SWAB è stato sviluppato per il contesto trentino, in cui circa 22162 ettari di area irrigata sono dedicati quasi equamente a frutteti e vigneti. La produzione di mele è di 510010

tonnellate con un valore della produzione lorda vendibile (PLV) a prezzi correnti di circa 322 milioni di euro. I vigneti producono invece circa 113500 tonnellate di uve bianche e rosse da vino, con una PLV di circa 180 milioni di euro. Il valore medio della PLV per ettaro, pari a 22674 euro, sottolinea l'importanza economica fondamentale dell'agricoltura irrigata nella regione (Fonte: ISPAT 2022, Istituto di statistica della provincia di Trento).

L'agricoltura nell'arco alpino non conosce condizioni di aridità durante la stagione vegetativa e si registrano precipitazioni significative, variabili di anno in anno, ed anche di tipo estremo per tutto il periodo che va da fine marzo ad inizio ottobre (mediamente 5755 ± 1568 m³/ha registrati nel periodo 1984-2024). Tuttavia, è già stato osservato un calo rilevante delle nevicate durante la stagione invernale, che, in tendenza, può ridurre le riserve idriche disponibili in primavera, cruciali all'inizio della stagione vegetativa (Beniston et al. 2018). Queste risorse idriche (serbatoi, laghi, corsi d'acqua) vengono inoltre utilizzate per scopi multipli, tra cui la sostenibilità ecologica – ad esempio, garantendo il deflusso minimo vitale per gli organismi acquatici – nonché per il turismo e la produzione di energia idroelettrica, aumentando di conseguenza la competizione

per le risorse idriche, specialmente negli inverni e nelle primavere più secchi.

Nel contesto trentino di agricoltura di montagna, l'acqua irrigua è gestita dai Consorzi di Miglioramento Fondiario e Irrigui che mirano a garantire un accesso equo alla risorsa irrigua a tutti gli associati tenendo in considerazione in certa misura delle condizioni meteorologiche, ma in larga parte indipendentemente dal tipo di coltura o dalle caratteristiche del suolo. SWAB mira a stimare le esigenze irrigue locali stimando i fabbisogni idrici necessari per coprire le necessità irrigue nel contesto trentino e fornendo al tempo stesso raccomandazioni ai Consorzi Irrigui per una gestione di precisione nel breve periodo, come nel caso del progetto IRRITRE (Centurioni et al., 2025, Gattolin et al., 2024).

Questo studio si concentra sulla stima dei quantitativi idrici necessari per soddisfare le esigenze irrigue nel contesto alpino, aprendo la possibilità di analizzare tendenze di medio e lungo termine. I risultati mostrano come un approccio modellistico integrato possa supportare una gestione sostenibile delle risorse idriche nell'agricoltura montana, rafforzando la resilienza del settore di fronte ad una maggiore competizione per l'acqua e per la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici.

Materiali e metodi

Nell'area oggetto di studio, le condizioni dei suoli vengono monitorate mediante sensori in campo, quali tensiometri e sonde per il contenuto idrico del suolo, e caratterizzate spazialmente tramite la "Carta dei Suoli Agricoli Trentini" che include 244 tipologie pedologiche distinte, suddivise in 2020 orizzonti, per una superficie complessiva di 33.445 ha. Le variabili atmosferiche sono rilevate tramite una rete di 92 stazioni agro meteorologiche distribuite sul territorio provinciale coltivato. La fenologia delle colture viene monitorata attraverso il sistema "Smart Monitoring" (Andreis et al., 2016), una piattaforma centralizzata e armonizzata per la raccolta sistematica di dati di campo da parte dei tecnici viticoli e frutticoli. Il potenziale idrico del fusto della vite è stato costantemente rilevato tramite micro tensiometri in un sito di sperimentazione (Lakso et al., 2022, Mattedi et al 2025).

La catena modellistica utilizzata nello studio si basa sul metodo descritto nel documento "FAO Irrigation and Drainage Paper n.56" (Allen et al., 1998), in cui il suolo è schematizzato come un serbatoio con capacità idrica definita dalla profondità radicale, dipendente dal portinnesto, e dalle proprietà idrauliche del suolo stesso. L'evoluzione del contenuto idrico del suolo nella zona radicale è simulata mediante una funzione di svuotamento (depletion function), dove le componenti del bilancio idrico – ingressi e uscite – sono espresse in millimetri (mm) con risoluzione temporale giornaliera. La variazione dello stato idrico è rappresentata dalla seguente equazione:

$$D_i = D_{i-1} - (P_i - RO_i) - Irr_i - CR_i + ET_i + DP_i$$

in cui la variazione del deficit idrico del suolo tra due giorni consecutivi ($D_{i-1} - D_i$) è determinata dagli ingressi (precipitazioni effettive $P_i - RO_i$, irrigazione Irr_i , risalita

capillare CR_i) e dalle uscite (evapotraspirazione effettiva ET_i , percolazione profonda DP_i).

Le precipitazioni effettive vengono stimate sottraendo il ruscellamento superficiale dalla precipitazione totale giornaliera; il ruscellamento è calcolato tramite il metodo del Curve Number (USDA-NRCS, 2004), adattato alle caratteristiche locali dei suoli e degli usi del suolo.

L'irrigazione, a seconda del contesto applicativo, può essere definita come un input misurato (Centurioni et al., 2025) ed il bilancio di massa può essere utilizzato per calcolare i fabbisogni irrigui giornalieri oppure, come nel caso qui presentato, è stata calcolata come il volume d'acqua necessario a ripristinare la capacità di campo quando viene superata una soglia predefinita di stress idrico ($D_i = RAW$, Readily Available Water, variabile a seconda del tipo di coltura e dalla meteorologia). La stima di Irr_i è interpretabile come un fabbisogno idrico per una superficie coltivata unitaria e omogenea indipendentemente dall'infrastruttura di distribuzione dell'acqua, è espresso in millimetri di "pioggia equivalente" e non è assimilabile ad un consiglio irriguo.

Per questo studio la risalita capillare è stata considerata nulla, sebbene questa componente dipenda tipicamente dal tipo di suolo e dalla presenza di falda idrica.

L'evapotraspirazione effettiva delle colture (ET_i) è ottenuta partendo dalla stima dell'evapotraspirazione di riferimento calcolata con il metodo di Penman Monteith e applicando il metodo a doppio coefficiente colturale e quindi stimando la traspirazione della coltura e l'evaporazione dal suolo, ed applicando un coefficiente di stress se l'umidità del suolo non è sufficiente a soddisfare la domanda idrica della pianta.

La percolazione profonda DP_i è calcolata per differenza, nel caso in cui il fronte di saturazione proceda oltre la zona esplorata dalla massa principale delle radici: ciò si verifica in caso di piogge abbondanti e prolungate e quando viene irrigato eccessivamente.

Per questo studio, le misure dei tensiometri nel suolo e nella pianta sono state utilizzate per calibrare alcuni moduli della catena modellistica, in particolare per quanto riguarda la ritenzione idrica dei suoli e la fisiologia della pianta.

Lo studio prende in esame due suoli rappresentativi: ALD1, un suolo franco-sabbioso con profilo Ap-Bw-BC-C, presenza frequente di scheletro grossolano e una profondità radicale massima di 90 cm; e PRA1, un suolo franco-limoso con profilo Ap-Bwg-BCg-Cg, privo di scheletro e con profondità radicale inferiore, pari a 70 cm. I due suoli mostrano comportamenti idraulici nettamente distinti. Il contenuto idrico disponibile (Available Water Content, AWC) per ALD1 è di 38 mm per il melo e di 58 mm per la vite, mentre PRA1 offre una disponibilità idrica significativamente maggiore, pari a 105 mm per il melo e 191 mm per la vite. Queste differenze sono principalmente attribuibili alla presenza di scheletro nel suolo ALD1, che ne riduce la capacità di trattenere l'acqua. In termini di conducibilità idraulica satura, ALD1 presenta una capacità di infiltrazione molto più elevata (20 mm/h) rispetto a PRA1 (4 mm/h). Di conseguenza, ALD1 risulta altamente drenante con scarsa ritenzione idrica, mentre PRA1 presenta un'elevata ritenzione idrica ma una minore capacità di infiltrazione. I valori di AWC sono stati calcolati

ricalibrando le funzioni di pedotrasfer proposte da Saxton & Rawls (2008), utilizzando le misure effettuate con la piastra di Richards su campioni di suolo disturbati (pasta satura). Il modello SWAB è stato applicato ad entrambi i tipi di suolo utilizzando dati meteorologici storici per un periodo di 40 anni (1984–2024).

Risultati e discussione

Le stime di SWAB sono state analizzate per valutare le risposte dei suoli in termini di disponibilità idrica e fabbisogno irriguo per le colture di melo e vite.

Anche se preliminare, un primo risultato chiave dello studio riguarda i suoli ben drenati, come ALD1, in cui gli eventi piovosi estivi, quando presenti, risultano generalmente sufficienti a ripristinare la riserva idrica del suolo. Al contrario, nei suoli scarsamente drenanti come PRA1, la medesima quantità di pioggia risulta spesso insufficiente a riportare il sistema a condizioni idriche ottimali. Questo aspetto è particolarmente critico per entrambe le colture su PRA1, dove le simulazioni evidenziano un'elevata variabilità dell'umidità del suolo nella fase iniziale della stagione vegetativa (Fig.1). In presenza di inverni siccitosi, ciò può tradursi in una disponibilità idrica insufficiente all'avvio del ciclo colturale, una problematica destinata a divenire sempre più rilevante, considerando le evidenze relative al progressivo declino delle riserve idriche primaverili da fusione nivale nelle regioni alpine (Beniston et al., 2018).

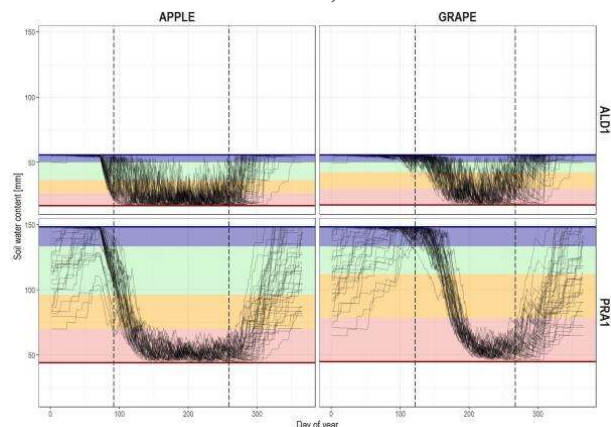


Fig.1 - Stime del contenuto idrico totale della zona di suolo esplorata dalle radici di melo e vite su terreni a differente attitudine al drenaggio dell'acqua, per 40 anni (1984-2024). Non viene ipotizzato alcun apporto irriguo, ma solo l'input atmosferico (P-RO).

Fig.1 - Estimates of total soil water content within the root-explored zone of apple and grapevine crops on soils with different drainage capacities over a 40-year period (1984–2024). No irrigation inputs are assumed; only atmospheric input (precipitation minus runoff, P-RO) is considered.

Per quanto riguarda la stima del fabbisogno stagionale complessivo, espresso in termini di “pioggia equivalente”, le differenze tra i due suoli risultano relativamente contenute. A fronte di una domanda evapotraspirativa dell'atmosfera pari a $7900 \pm 290 \text{ m}^3/\text{ha}$, SWAB stima una richiesta media

per i meli sul terreno ALD1 di $5959 \pm 530 \text{ m}^3/\text{ha}$, mentre il terreno PRA1 richiederebbe $6622 \pm 518 \text{ m}^3/\text{ha}$, il 10% in più. Nel caso della vite, il suolo più permeabile ALD1 richiede $1886 \pm 278 \text{ m}^3/\text{ha}$, rispetto ai $2251 \pm 261 \text{ m}^3/\text{ha}$ di PRA1, che rappresentano un incremento del 16%. Tuttavia, dall'analisi dei dati, tenuto conto del contesto, emerge che le strategie irrigue dovrebbero differire sensibilmente in funzione del tipo di suolo.

Nei suoli altamente drenanti (ALD1) è necessario adottare irrigazioni più frequenti ma con volumi ridotti; viceversa, il suolo PRA1 si presta meglio a turni irrigui meno frequenti ma con volumi maggiori.

Occorre tenere in conto che i volumi ottenuti (fabbisogno idrico teorico con disponibilità illimitata della risorsa e senza vincoli nella distribuzione, espressi come pioggia equivalente) non sono indicativi delle effettive quantità d'acqua distribuibili dagli impianti di irrigazione gestiti dai Consorzi Irrigui e di Miglioramento Fondiario. Per un calcolo più realistico dei volumi è necessario tenere in conto: dell'infrastruttura agronomica (sesti di impianto e distanza dell'interfila); dell'infrastruttura di distribuzione dell'acqua (numero di emettitori per ogni metro lineare di ala gocciolante e volume erogato dal singolo emettitore); e delle politiche operative dei consorzi che devono garantire l'equa distribuzione della risorsa idrica a tutti i soci.

Le differenze di comportamento tra i vari tipi di suoli hanno implicazioni operative rilevanti per i gestori, in quanto una programmazione ad alta frequenza/bassi volumi o bassa frequenza/alti volumi può porre sfide significative dal punto di vista infrastrutturale e gestionale. Inoltre, l'approccio pragmatico di restituire per irrigazione l'evapotraspirazione colturale (senza tenere in conto della capacità di ritenzione idrica del suolo) porterebbe a dei consumi d'acqua per irrigazione pari a $8359 \pm 281 \text{ m}^3/\text{ha}$ per il melo e di $3703 \pm 144 \text{ m}^3/\text{ha}$ per la vite e perdita d'acqua per deflusso profondo.

Conclusioni

Sono state presentate delle preliminari stime climatiche di fabbisogno idrico di vite e melo su due tipologie di suoli alpini utilizzando i dati meteorologici degli ultimi 40 anni. SWAB dimostra di essere uno strumento versatile non solo per fornire consulenze irrigue tempestive (Centurioni et al., 2025), ma anche per considerazioni climatiche, in questo caso "retrospettive" utili per comprendere l'evoluzione nel tempo dei fabbisogni idrici.

Disponendo di affidabili proiezioni climatiche per la regione alpina, SWAB si dimostra uno strumento adatto alla pianificazione a lungo termine dell'approvvigionamento idrico a scopo irriguo.

L'intenzione è quella di estendere lo studio a tutti i tipi di terreno mappati nella “Carta dei suoli agricoli trentini” nei microclimi che vanno dal clima più “mediterraneo” dell'areale del Lago di Garda, fino alle zone di montagna dove, a causa del cambiamento climatico in atto, le superfici coltivate si stanno espandendo.

Un ulteriore fronte di indagine riguarda le prime fasi della ripresa vegetativa del melo nei suoli scarsamente drenanti dove può rendersi necessaria l'irrigazione nella fase iniziale della stagione vegetativa (Fig.1) in quanto gli scenari

climatici prevedono una riduzione nella disponibilità idrica primaverile a causa della riduzione delle precipitazioni nevose (Beniston, 2018). Per la vite, invece l'irrigazione controllata in suoli a bassa capacità di drenaggio può essere utilizzata strategicamente per modulare lo stress idrico della pianta dopo l'invasatura, favorendo condizioni di stress moderato con effetti positivi sulla qualità dell'uva, del mosto e, in ultima analisi, del vino (Van Leeuwen et al., 2009).

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il collega Danilo Caset per il generoso supporto fornito durante le attività di monitoraggio in campo e per il continuo scambio di competenze tecniche, che ha contribuito in modo significativo allo sviluppo del presente Lavoro.

Bibliografia

- Allen, R.G., et al., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome.
- Andreis D., Corradini S., Zottele F., Toller G., Zaffoni M., Margoni M., and Candioli E.: Smart Monitoring - ICT per il rilievo delle avversità, Associazione Italiana di Agrometeorologia 2016, "Nuove avversità e nuovi servizi per gli Agroecosistemi". Bologna, Italy, 14-16 June 2016.
- Beniston, M., et al., 2018. The European mountain cryosphere. *The Cryosphere*, 12(2): 759–794.
- Centurioni, F., et al., 2025. IRRITRE for sustainable irrigation in Trentino agriculture. EGU General Assembly 2025.
- Gattolin, A., et al. (2024). IRRITRE: Infrastruttura e strumenti per l'irrigazione in Trentino. In: XXVI Convegno Nazionale di Agrometeorologia: approcci innovativi a supporto delle produzioni agrarie in un contesto climatico in evoluzione, L'Aquila, June 5-7, 2024. Bologna: Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari - Università di Bologna: 133-135. ISBN: 9788854971509
- Kramer, Paul J., and John S. Boyer. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, 1995.
- Lakso, A. N., et al., 2022. Monitoring Stem Water Potential in Fruit Crops. *Horticulturae*, 8(12): 1207.
- Mattedi, C., Zottele, F., Centurioni, F., and Corradini, S.: Effects of deficit irrigation practices on the Soil-Plant-Atmosphere system: a case study on *Vitis vinifera* L. (Teroldego cv.) from Trentino Alto Adige, Italy, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-10812, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-10812>, 2025.
- Saxton, K. E., Rawls, W. J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70(5): 1569–1578.