

PROGETTO AGILE ARVIER

CARATTERIZZAZIONE BIOCLIMATICA DEGLI AMBIENTI VALDOSTANI

Vite · Melo · Olivo

Documento tecnico-scientifico di progetto

Institut Agricole Régional — Aosta

Giugno 2026

Indice

Premessa e obiettivi.....	3
Collaborazioni, contributi e ringraziamenti.....	4
1. Stazioni e base dati.....	5
1.1 Rete di stazioni utilizzata.....	5
1.2 Covariate ambientali	6
2. Interpolazione spaziale delle temperature	7
2.1 Covariate e modelli selezionati	7
2.2 Kriging dei residui.....	8
2.3 Accuratezza	8
3. Indici bioclimatici e variabili termiche.....	9
3.1 Indici bioclimatici considerati.....	9
3.2 Indici termici di base e indicatori di rischio.....	11
3.3 Presentazione cartografica degli indici	11
4. Relazioni tra gli indici e con l'altitudine.....	12
4.1 Relazioni tra gli indici.....	12
4.2 Relazione con l'altitudine	13
4.3 Statistiche degli indici per fasce altitudinali.....	14
4.4 Riferimento varietale: la tabella di Gladstones	15
5. Carte vocazionali della vite, del melo e dell'olivo	15
5.1 Impostazione cartografica comune.....	16
5.2 Carte vocazionali della vite.....	16
5.3 Carte vocazionali del melo	17
5.4 Carte vocazionali dell'olivo.....	18
5.5 Automazione del workflow cartografico.....	19
6. Sistema di aggiornamento delle carte nel tempo	20
6.1 Principio di funzionamento	20
6.2 Ciclo annuale ordinario	20
6.3 Gestione delle versioni e tracciabilità	21
6.4 Interventi straordinari	21
6.5 Monitoraggio della finestra cumulativa	22
7. Conclusioni e prospettive	23
7.1 Limiti e incertezza dei risultati	23
7.2 Prospettive di approfondimento.....	24
Riferimenti bibliografici.....	25

Premessa e obiettivi

Il progetto Agile Arvier. Il lavoro è condotto nell'ambito del progetto Agile Arvier, promosso dall'Institut Agricole Régional con l'obiettivo di sviluppare strumenti agroclimatici a supporto delle scelte colturali nella regione, in particolare per le produzioni di montagna più sensibili alla variabilità del clima. Il progetto integra l'analisi del dato meteorologico storico, l'interpolazione spaziale delle variabili climatiche e la loro traduzione in indicatori utili agli operatori del settore — tecnici, agronomi, viticoltori e frutticoltori — per orientare le decisioni di impianto e di gestione. La richiesta che ha dato avvio al presente documento, formulata nel quadro del progetto, riguardava in particolare la delimitazione delle aree di fondovalle e, più in generale, l'individuazione degli ambienti potenzialmente idonei alla coltivazione di vite, melo e olivo.

Il lavoro qui presentato non nasce isolato, ma si innesta su un'attività di ricerca pluriennale che l'Institut Agricole Régional dedica da tempo alla zonazione viticola e agroclimatica della regione. Già nel progetto di zonazione condotto a cavallo tra il 1999 e il 2001 erano state poste le basi metodologiche e raccolte osservazioni di campo che costituiscono tuttora un riferimento; molte delle conoscenze maturate in quella e nelle successive attività — in larga parte non pubblicate — sono confluite nell'impostazione del presente studio.

Impostazione e limiti del documento. Coerentemente con i tempi del progetto, il corpo del documento non si propone di produrre carte vocazionali colturali definitive, bensì una caratterizzazione bioclimatica degli ambienti valdostani potenzialmente vocati alle colture. Tale caratterizzazione, interpretata alla luce della letteratura — risorse termiche necessarie alla maturazione delle diverse colture e varietà, condizioni climatiche delle regioni del mondo note e apprezzate per queste produzioni — consente una prima delimitazione delle aree vocate e l'individuazione di limiti massimi e minimi per ciascuna coltura o categoria di varietà. Prima ancora di delimitare le aree per le singole colture, ci si pone l'obiettivo di ipotizzare i limiti entro cui ciascuna coltura, o categoria di varietà, può collocarsi, e di verificare che le aree individuate non presentino rischi troppo elevati di eventi avversi eccezionali: a questo scopo sono presentate anche le cartografie del numero di giorni al di sopra e al di sotto di determinate soglie di temperatura, oltre alla cartografia del fondovalle.

Il prodotto cartografico vocazionale sviluppato nella fase operativa del progetto è presentato nel capitolo 5, distinto dai capitoli precedenti per mantenerne chiara la natura di elaborazione applicativa derivata dalla caratterizzazione bioclimatica.

Le prospettive di approfondimento — una zonazione di maggior dettaglio basata anche sui dati di maturazione e la verifica di alcune incongruenze osservate tra adret ed envers — sono riprese nelle conclusioni come obiettivi del lavoro futuro.

Componente pedologica. Per il territorio regionale è disponibile una cartografia dei suoli. Nell'ambito del presente studio, tuttavia, ci si è concentrati sui soli indici termici: in un contesto alpino come quello valdostano, in cui le colture considerate sono governate in primo luogo dalla disponibilità di risorse termiche, e in cui la coltivazione si concentra comunque su suoli resi idonei dalla pratica agronomica, la componente pedologica non introduce, a questa scala, una differenziazione di vocazionalità tale da

modificare il quadro definito dagli indici termici. La caratterizzazione climatica costituisce perciò il fattore discriminante principale per gli obiettivi del lavoro.

Collaborazioni, contributi e ringraziamenti

Il lavoro è frutto della collaborazione di più unità dell'Istitut Agricole Régional, e in particolare di O. Zecca per la componente geografica e metodologica. Le elaborazioni geografiche e statistiche, l'interpolazione spaziale delle temperature e il calcolo degli indici sono state condotte internamente. I dati di maturazione della vite sono stati determinati con la collaborazione delle unità di Viticoltura-Enologia e dei Laboratori di Analisi, oltre che dell'Unità di Frutticoltura per quanto riguarda melo e olivo.

Si ringrazia il Centro Funzionale regionale per la fornitura dei dati meteorologici, distribuiti in modalità open data secondo le linee guida della Regione Autonoma Valle d'Aosta (dati distribuiti sotto licenza Creative Commons "CC BY 4.0").

Si ringrazia la Regione Autonoma Valle d'Aosta (RAVA) per i contributi alla valutazione della carta del fondovalle. Si ringraziano inoltre, per la condivisione delle curve di maturazione — che saranno impiegate nelle fasi successive del lavoro — gli stessi tecnici e i viticoltori che hanno acconsentito alla condivisione dei propri dati.

Si ringrazia infine l'Ufficio cartografico della Regione Autonoma Valle d'Aosta per il Modello Digitale del Terreno a 25 m, a partire dal quale è stata sviluppata l'intera cartografia ausiliaria e su cui si basano le interpolazioni spaziali (dati distribuiti sotto licenza Creative Commons "CC BY 4.0").

1. Stazioni e base dati

1.1 Rete di stazioni utilizzata

L'interpolazione spaziale delle temperature si fonda sui dati giornalieri della rete di stazioni del Centro Funzionale regionale, integrati dalle stazioni Pessl di proprietà dell'Institut Agricole Régional installate nei vigneti sperimentali. La copertura della rete lungo i gradienti di quota e di esposizione che caratterizzano la valle è determinante per la qualità della spazializzazione: per questo sono state incluse anche stazioni a quota elevata, pur esterne alla fascia di interesse culturale, in modo da vincolare correttamente il gradiente termico verticale ed evitarne la stima per estrapolazione. La selezione delle stazioni è stata effettuata nell'ottica di modellizzare nel modo migliore la valle centrale della Dora Baltea: la rete è ottimizzata per quel contesto, mentre le valli laterali non sono necessariamente ben rappresentate.

Stazioni dell'Institut Agricole Régional. Le stazioni Pessl installate nei vigneti sperimentali dell'Istitut sono state inizialmente impiegate per una prima valutazione del lavoro di interpolazione; successivamente sono state incluse nel dataset e quindi utilizzate, come tutte le altre, all'interno delle procedure di cross-validazione.

Natura dei dati di temperatura. Va precisato che i valori di temperatura massima e minima distribuiti dal Centro Funzionale non corrispondono ai veri estremi giornalieri, ma alle temperature registrate nell'ora più calda e nell'ora più fredda della giornata. Questa caratteristica del dato è stata tenuta presente nell'interpretazione degli indici che ne derivano.

Esclusione di una stazione urbana. La stazione di Aosta–Piazza Plouves è stata esclusa dall'elaborazione perché la sua collocazione urbana, soggetta all'effetto isola di calore, non è rappresentativa delle condizioni agricole circostanti: la sua inclusione avrebbe distorto la stima nelle aree limitrofe.

Tabella 1. Stazioni agrometeorologiche utilizzate per l'interpolazione spaziale, ordinate per quota. Il codice consente il reperimento delle schede anagrafiche dal sito del Centro Funzionale. Esposizione e pendenza derivano dal modello digitale del terreno.

Località	Codice	Quota (m s.l.m.)	Esposizione
Donnas-Clapey	4110	318	Ovest
Hône-Ponte Dora Baltea	1310	340	Nord
Hône-Ayasse	1760	367	Nord
Verrès-Capoluogo	3000	375	Nord
Nus-Les Iles	1430	534	Sud-Est
Saint-Marcel-Surpian	4100	540	Nord
Saint-Christophe-Aéroport	4090	545	Sud
Aosta-Mont-Fleury	4020	577	Sud
Hospice (IAR)	HS	593	Sud-Est
Saint-Vincent-Terme	3120	626	Ovest
Quart-Ollignan	2520	650	Sud

Località	Codice	Quota (m s.l.m.)	Esposizione
Bard-Albard	3530	662	Sud
Jovençon-Pompiod	2510	670	Nord
Arvier-Cooperativa	2500	738	Nord
Moncenis (IAR)	MC	774	Sud-Est
Villeneuve-S.R. Saint	3020	839	Sud-Est
Saint-Denis-Rafford	3010	840	Sud-Ovest
Roisan-Preyl	3560	935	Ovest
Morgex-Capoluogo	3030	938	Sud-Ovest
Pontboset-Fournier	1470	1087	Est
Aymavilles-Vieyes	1030	1139	Sud-Est
Rhêmes-Saint-Georges	1550	1179	Nord
Arvier-Chamençon	1000	1238	Sud
Champdepraz-Chevrère	1090	1260	Sud-Est
Brusson-Tchampats	3570	1288	Sud
Fénis-Clavalité	1230	1531	Ovest
La Thuile-Les Granges	4050	1637	Sud-Ovest
Nus-Saint-Barthélemy	3080	1675	Sud
Pré-Saint-Didier-Plan	1500	2177	Est
Gressan-Pila-Leissé	1250	2280	Sud-Ovest
Morgex-Lavancher	1390	2842	Sud-Ovest

1.2 Covariate ambientali

La componente deterministica dell'interpolazione si basa su un insieme di covariate ambientali che descrivono i fattori fisiografici da cui dipende la temperatura. Tali covariate sono state derivate internamente a partire dal modello digitale del terreno regionale (DTM a 25 m di risoluzione), del quale è stato acquisito il solo dato di base; le elaborazioni successive sono state condotte dall'Istitut Agricole Régional. Tra le covariate ambientali impiegate figurano almeno le seguenti; l'insieme potrà essere ampliato in futuri affinamenti del modello.

- Altitudine, principale determinante del regime termico.
- Ore di luce diretta giornaliera, calcolate per i diversi periodi dell'anno (ad esempio il periodo gennaio–dicembre e i periodi della stagione vegetativa). Le ore di luce, e gli indici da esse derivati, rappresentano bene le differenze microclimatiche imputabili agli ombreggiamenti dovuti alla topografia della valle.
- Flusso di aria fredda, ottenuto con il modulo "Cold Air Flow" di SAGA GIS, che a partire dal modello digitale del terreno simula la circolazione e l'accumulo notturno delle masse d'aria fredda lungo i versanti e nelle conche. L'utilizzo di questa covariata ha permesso di modellizzare, almeno in parte, gli effetti di inversione termica e di raffreddamento del fondovalle rispetto al versante sovrastante.

2. Interpolazione spaziale delle temperature

Le temperature giornaliere sono state spazializzate con un modello ibrido che combina una regressione lineare multivariata sulle covariate ambientali e un Ordinary Kriging applicato ai residui della regressione, secondo l'approccio noto come regression kriging. Il metodo sfrutta da un lato la relazione deterministica fra temperatura e covariate fisiografiche — prima fra tutte l'altitudine — e dall'altro l'eventuale struttura spaziale residua non spiegata dalle covariate. Per gli aspetti metodologici generali del regression kriging si fa riferimento a [Li \(2022\)](#).

Le elaborazioni sono state prodotte limitatamente alla fascia altimetrica entro i 1500 m s.l.m., che comprende largamente l'intero areale potenziale delle tre colture considerate; le stazioni situate all'interno delle valli laterali, anche al di sotto di tale quota, non sono state utilizzate, per evitare che dinamiche differenti da quelle della valle centrale riducessero l'accuratezza delle interpolazioni nelle aree di maggior interesse. I raster prodotti hanno risoluzione di 100 m (884 × 581 pixel).

2.1 Covariate e modelli selezionati

Per ciascuna variabile termica e per ciascun periodo dell'anno i modelli sono stati individuati con una procedura di selezione basata sulle accuratèzze predittive, calcolate per cross-validazione. Data la forte collinearità tra le covariate fisiografiche, modelli diversi hanno spesso mostrato accuratèzze simili; la scelta finale ha privilegiato la coerenza fisica e la stabilità stagionale. I modelli adottati sono i seguenti.

Tabella 2. Modelli di regressione adottati (tm / tmax / tmin = temperatura media / massima / minima).

Variabile	Modello di regressione	Periodo
tm (media)	altitudine + ore di luce + log(flusso aria fredda)	tutti i mesi
tmax (massima)	altitudine	febbraio – ottobre
tmax (massima)	altitudine + ore di luce + sqrt(flusso aria fredda)	novembre, dicembre, gennaio
tmin (minima)	altitudine + log(flusso aria fredda)	tutto l'anno

La struttura dei modelli riflette la fisica del fenomeno: la temperatura media e la massima dipendono anche dall'insolazione, rilevante nelle ore diurne, mentre la minima è governata soprattutto dall'accumulo notturno di aria fredda, da cui la presenza del termine di flusso di aria fredda nei modelli della minima. Nei mesi invernali, quando i fenomeni di inversione termica sono più intensi, anche la temperatura massima incorpora il termine di flusso di aria fredda.

Risalita termica di versante

L'inclusione della covariata di flusso di aria fredda (opportunamente trasformata) ha permesso di delineare, lungo i versanti, una fascia in cui le temperature risalgono leggermente rispetto al fondovalle. In questo modo il modello incorpora, almeno in parte, l'effetto — molto evidente nella pratica viticola e frutticola — per cui le pendici poste appena al di sopra del fondovalle godono di condizioni termiche più favorevoli rispetto al fondovalle stesso, dove l'aria fredda tende a ristagnare.

2.2 Kriging dei residui

Anche la fase di kriging è stata preceduta da una selezione dei parametri ottimali, condotta sulla base delle accuratezze predittive. Una volta rimossi gli effetti delle covariate, l'autocorrelazione spaziale dei residui è tuttavia risultata sostanzialmente irrilevante: la componente deterministica della regressione spiega cioè la quasi totalità della struttura spaziale della temperatura.

2.3 Accuratezza

L'accuratezza dei modelli è stata valutata per cross-validazione, procedura che le funzioni di selezione impiegano automaticamente nella scelta di covariate e parametri. I risultati indicano accuratezze elevate per gran parte dell'anno, con i valori più contenuti nei mesi invernali, quando l'inversione termica e la ridotta escursione rendono la struttura spaziale della temperatura più difficile da modellare.

3. Indici bioclimatici e variabili termiche

A partire dalle serie giornaliere delle temperature interpolate per gli undici anni del periodo di riferimento (2014–2024) sono state calcolate due famiglie di grandezze: gli indici bioclimatici e gli indici termici di base, che descrivono singoli aspetti del regime termico e servono soprattutto a definire vincoli e indicatori di rischio. Tutte le grandezze sono espresse come media pluriennale sul periodo considerato.

Una precisazione di calcolo. Salvo dove diversamente indicato, gli indici termici qui impiegati si basano sulla media giornaliera calcolata come semisomma della temperatura massima e minima, $(T_x + T_n)/2$, secondo la convenzione adottata dalla maggior parte degli indici bioclimatici di letteratura, e non sulla temperatura media giornaliera vera e propria.

3.1 Indici bioclimatici considerati

Gli indici adottati sono quelli consolidati nella climatologia viticola e, più in generale, nella caratterizzazione agroclimatica, e sono disponibili come formule nelle librerie di calcolo specializzate. Ciascun indice è qui descritto nel suo significato agronomico, accompagnato dalla formula di calcolo e dalle classi di riferimento. Nel loro insieme questi indici condensano in un unico numero l'andamento termico di un intero periodo: permettono così di confrontare il clima di una zona con quello di altre regioni viticole del mondo, traendone indicazioni sull'attitudine a determinati vitigni o tecniche colturali.

Indice di temperatura della stagione vegetativa (GST). È la media delle temperature medie giornaliere nel periodo 1 aprile – 31 ottobre (emisfero Nord), proposto da [Jones \(2006\)](#). Descrive il livello termico medio della stagione e classifica i climi viticoli in fasce, da «eccessivamente fredda» a «eccessivamente calda»; consente l'associazione diretta tra fascia climatica e gruppi di varietà idonee.

$$GST = \text{media di } (T_n + T_x)/2, \text{ dal 1 aprile al 31 ottobre}$$

Indice di Winkler (WI). Proposto da [Amerine e Winkler \(1944\)](#), è la somma termica in base 10 °C delle temperature medie dal 1 aprile al 31 ottobre, senza sommare gradi-giorno negativi. Suddivide i territori viticoli nelle cinque «regioni» da I a V, di crescente disponibilità termica.

$$WI = \sum \max[(T_n + T_x)/2 - 10 ; 0], \text{ dal 1 aprile al 31 ottobre}$$

Indice eli termico di Huglin (HI). Proposto da [Huglin \(1978\)](#), somma i gradi-giorno in base 10 °C dal 1 aprile al 30 settembre tenendo conto anche della temperatura massima e correggendo per la lunghezza del giorno tramite un coefficiente legato alla latitudine ($k = 1,04$ per latitudini comprese tra 44,1° e 46°). Valorizza così l'apporto eli termico ed è particolarmente adatto a discriminare i climi della fascia temperata.

$$HI = \sum \max[((T_m - 10) + (T_x - 10)) / 2 ; 0] \times k, \text{ dal 1 aprile al 30 settembre}$$

Gradi-giorno biologicamente efficaci (BEDD). Proposto da [Gladstones \(1992\)](#), si calcola come l'indice di Winkler con alcune differenze essenziali: i singoli gradi-giorno sommati sono limitati a un massimo di 9 al giorno (sulla base della considerazione che temperature medie superiori a 19 °C non incrementano — e possono anzi ridurre — le prestazioni biologiche della pianta), e il risultato è

corretto con due fattori, K per la latitudine e TRadj per l'escursione termica giornaliera. Tiene quindi conto del fatto che, oltre una certa soglia, il calore aggiuntivo non si traduce in maggiore maturazione.

$$BEDD = \sum \min\{ \max[(T_n + T_x)/2 - 10 ; 0] ; 9 \} \times K + TR_{adj}, \text{ dal 1 aprile al 31 ottobre}$$

Indice di freschezza delle notti (CNI). Proposto da [Tonietto \(1999\)](#) e [Tonietto e Carbonneau \(2004\)](#), è la media delle temperature minime di settembre. Descrive la freschezza notturna nella fase di maturazione, che influenza l'accumulo di antociani e aromi: i valori ottimali sono compresi tra 12 e 14 °C (fino a 15 °C secondo alcuni autori), mentre valori superiori a 18 °C sono considerati deleteri per la qualità.

$$CNI = \text{media delle temperature minime giornaliere di settembre}$$

Tabella 3. Indici bioclimatici considerati, con periodo di accumulo, classificazione di riferimento e fonte. Salvo dove indicato, la media giornaliera è $(T_x + T_n)/2$.

Indice	Descrizione e periodo	Classi di riferimento	Fonte
Somma di Winkler (WI)	Gradi-giorno sopra 10 °C, 1 apr – 31 ott	Regioni I–V	Amerine & Winkler (1944)
Indice di Huglin (HI)	Somma elioterica corretta per la lunghezza del giorno, 1 apr – 30 set	Classi HI	Huglin (1978)
BEDD	Gradi-giorno biologicamente efficaci, con limite e fattori di correzione K e TRadj, 1 apr – 31 ott	Gruppi di maturazione varietale	Gladstones (1992)
GST	Media delle temperature medie del periodo vegetativo, apr–ott	Classi climate-maturity	Jones (2006)
CNI	Media delle temperature minime di settembre	Classi CNI	Tonietto & Carbonneau (2004)

Tabella 4. Classi climatiche e limiti degli indici termici (da «Relazione Torille», IAR). GST e CNI in °C; WI, HI e BEDD in gradi-giorno.

GST (°C)	WI (gg)	HI (gg)	BEDD (gg)	Classe
< 13	< 850	< 1200	< 1000	Eccess. fredda / Regione I
13 – 15	850 – 1389	1200 – 1500	1000 – 1200	Fredda / Regione I–II
15 – 17	1389 – 1667	1500 – 1800	1200 – 1400	Intermedia / Reg. II–III
17 – 19	1667 – 1944	1800 – 2100	1400 – 1600	Temperata / Reg. III–IV
19 – 21	1944 – 2222	2100 – 2400	1600 – 1800	Calda / Regione IV–V
21 – 24	2222 – 2700	2400 – 2700	1800 – 2000	Molto calda / Regione V
> 24	> 2700	2700 – 3000	> 2000	Eccessivamente calda

Indice di freschezza delle notti (CNI), classi. Per il CNI le classi di riferimento individuano l'intervallo ottimale tra 12 e 14 °C (fino a 15 °C secondo alcuni autori), con valori superiori a 18 °C considerati deleteri per l'accumulo di antociani e aromi.

3.2 Indici termici di base e indicatori di rischio

Accanto agli indici bioclimatici descritti sopra, sono stati calcolati alcuni indici termici di base che sintetizzano il regime delle temperature in specifici periodi e fungono da indicatori di rischio per eventi avversi. Si ottengono applicando una funzione di sintesi (media, minimo, massimo, conteggio di giorni oltre una soglia) alle sequenze di valori giornalieri o orari di temperatura: a differenza degli indici di accumulo termico, non descrivono l'attitudine climatica complessiva, ma singoli aspetti utili a verificare che le aree potenzialmente vocate non siano esposte a rischi eccessivi.

- Temperatura massima del periodo vegetativo (T_{x_veg} , °C): indicatore di stress da calore; per la vite si fa spesso riferimento alla soglia di 35 °C.
- Temperatura minima del periodo vegetativo (T_{n_veg} , °C): rilevante per le gelate sugli organi verdi, con soglie di riferimento intorno a 0 e -2/-3 °C.
- Temperatura minima del periodo di riposo (T_{n_rest} , °C): rilevante per la sopravvivenza al gelo, con soglie di riferimento di -15 e -20 °C.
- Numero di giorni (n. gg) al di sopra o al di sotto di soglie di temperatura significative (-5, -7, -8, -10, -15, -20 °C), che traduce i precedenti indicatori in cartografie di frequenza degli eventi.

Classificazione. Gli indicatori di rischio vanno classificati tenendo conto delle soglie agronomiche di riferimento, lasciando i valori minimi e massimi reali nelle due classi estreme. Una volta classificati, la carta con la relativa legenda è di per sé sufficiente, senza necessità di tabelle aggiuntive di valori.

3.3 Presentazione cartografica degli indici

Ogni indice è rappresentato dalla carta della sua media pluriennale, con legenda basata sulle classi climatiche dell'indice (Tabella 4). Le carte non sono presentate sull'intera area di lavoro, ma entro maschere altitudinali differenziate per coltura, poiché l'area complessivamente interpolata è più ampia delle aree potenzialmente vocate alle singole colture.

Palette di colori. Per garantire la leggibilità delle carte anche a chi presenta deficit della visione cromatica, si adottano palette percettivamente uniformi, come *Viridis* e *Cividis*, che mantengono un ordinamento corretto delle classi anche in scala di grigi e nelle principali forme di daltonismo.

Sovrapposizione del fondovalle. Su ciascuna carta è sovrapposto in trasparenza il perimetro del fondovalle, ottenuto dal modello di flusso di aria fredda (opportunamente mascherato su una soglia determinata sulla base dell'esperienza empirica). Tale area individua le potenziali zone soggette a inversione termica, dove l'aria fredda tende a ristagnare nelle ore notturne: la sua rappresentazione segnala i settori in cui, pur in presenza di indici termici favorevoli, occorre considerare il rischio di gelate e l'eventuale necessità di soluzioni antibrina, senza per questo escludere a priori tali aree dalla coltivazione.

Limiti e incertezza dei raster

I raster prodotti presentano buone accuratezze, ma restano soggetti a errori, più elevati sulle temperature minime e massime e sui valori invernali. Soprattutto, essi rappresentano le situazioni «normali» del territorio — non a caso la stazione urbana di Aosta—Piazza Plouves è stata esclusa dall'elaborazione — mentre dove si creano condizioni microclimatiche particolari (presenza di roccia o muri, circolazione locale di masse d'aria fredda o calda) i valori reali delle temperature, e

quindi degli indici, possono discostarsi sensibilmente da quelli rappresentati. La cartografia non descrive perciò fedelmente alcune aree pur ben note, come Torrette e, almeno in parte, Arvier. Questa avvertenza definisce il corretto ambito di impiego delle carte: una caratterizzazione d'insieme degli ambienti, da affinare localmente con osservazioni dirette.

4. Relazioni tra gli indici e con l'altitudine

Le carte dei singoli indici descrivono ciascuna un aspetto del clima termico, ma è dalla loro lettura congiunta che emerge il quadro più utile alla caratterizzazione degli ambienti. Tutti gli indici termici derivano in ultima analisi dalla stessa grandezza fisica — la temperatura — e sono perciò tra loro fortemente correlati; in ambiente alpino, inoltre, sono tutti strettamente legati all'altitudine, principale fattore di controllo del regime termico. Questo capitolo esamina tali relazioni e riassume la distribuzione degli indici per fasce altitudinali.

4.1 Relazioni tra gli indici

La matrice di dispersione (pairs plot) della figura seguente mette a confronto, a coppie, i principali indici bioclimatici e l'altitudine, calcolati sui pixel dell'area di studio. Sulla diagonale è riportata la distribuzione di ciascuna grandezza; nei riquadri fuori diagonale, la nube di punti che lega due grandezze; il loro grado di associazione è sintetizzato dai coefficienti di correlazione.

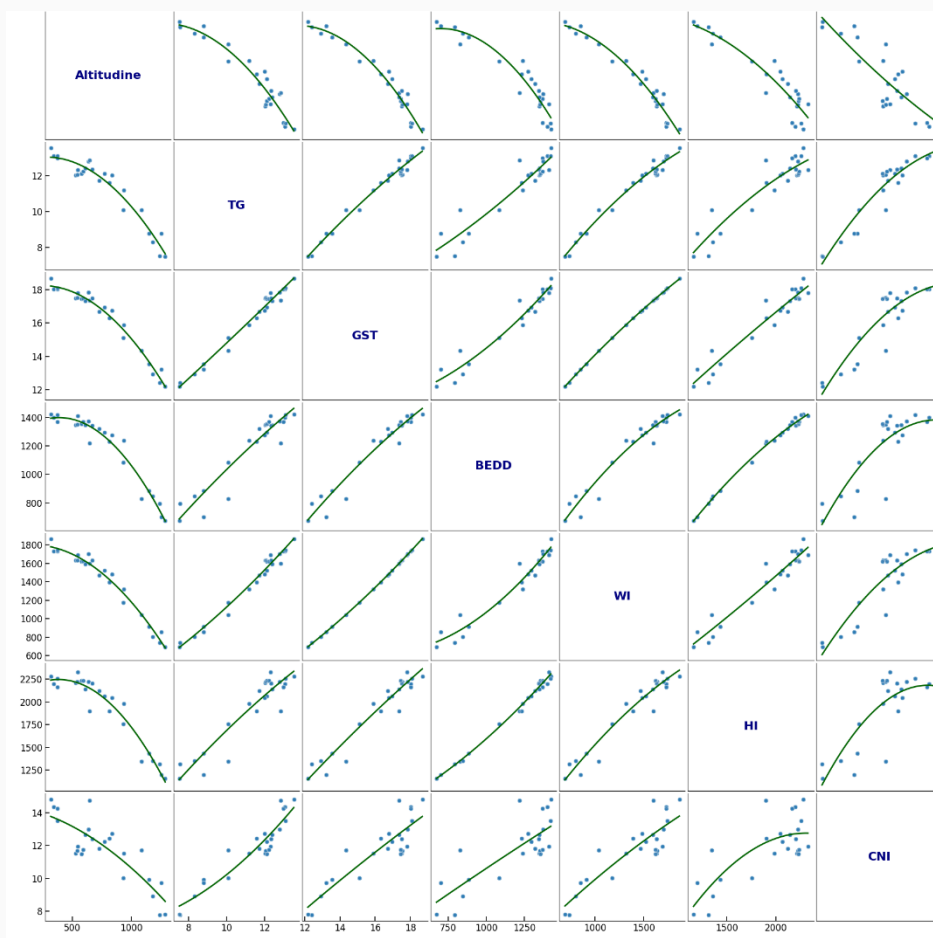


Figura 1. Matrice di dispersione tra i principali indici bioclimatici e l'altitudine, sui pixel dell'area di studio.

Dalla matrice emergono due fatti rilevanti per l'interpretazione. In primo luogo, gli indici di accumulo termico (somme di Winkler e Huglin, gradi-giorno biologicamente efficaci) e l'indice di temperatura della stagione vegetativa (GST) sono tra loro quasi linearmente correlati: forniscono cioè informazioni in larga parte ridondanti, e la scelta di quale privilegiare dipende soprattutto dalla disponibilità di soglie di riferimento in letteratura. In secondo luogo, tutti questi indici mostrano una fortissima correlazione negativa con l'altitudine: al crescere della quota le risorse termiche diminuiscono in modo regolare. L'indice di freschezza notturna (CNI) si distingue parzialmente, perché dipende dalle minime di settembre ed è quindi più sensibile ai fenomeni di inversione che alla sola quota. Plot di questo tipo sono peraltro molto simili a quelli ampiamente pubblicati in letteratura sulla caratterizzazione climatica delle regioni viticole.

4.2 Relazione con l'altitudine

Il legame tra indici e altitudine è abbastanza stretto da poter essere descritto, in prima approssimazione, da un gradiente altitudinale medio: per ciascun indice è possibile stimare di quanto esso diminuisce per ogni 100 metri di dislivello. A titolo di esempio, per il BEDD l'analisi di regressione sul raster medio pluriennale ha evidenziato una relazione lineare molto stretta con la quota

(coefficiente di correlazione di Pearson $r \approx -0,96$), con una diminuzione dell'ordine di 0,8 gradi-giorno per ogni metro di dislivello. Questo gradiente è uno strumento di lettura immediato — consente di tradurre una quota in un valore atteso dell'indice — ma è anche un'approssimazione, perché a parità di quota i valori reali variano sensibilmente con l'esposizione, la morfologia e i fenomeni locali di accumulo o risalita dell'aria.

Perché la quota non basta

La forte correlazione con l'altitudine potrebbe suggerire di delimitare le aree vocate sulla sola base di soglie di quota. Tuttavia, a parità di altitudine, le risorse termiche variano in misura non trascurabile da zona a zona: per esempio, nell'adret orientale della valle le somme termiche risultano inferiori a quelle osservate, a quote analoghe, nella conca di Aosta. Una delimitazione fondata direttamente sulle somme termiche sarebbe perciò più corretta di una basata sull'altitudine.

4.3 Statistiche degli indici per fasce altitudinali

Per quantificare la relazione tra quota e risorse termiche, e per metterne in luce i limiti, i pixel dell'area di studio sono stati classificati in modo incrociato secondo la fascia altitudinale di appartenenza e la classe di BEDD di Gladstones (la stessa impiegata nelle carte vocazionali). La tabella seguente riporta, per ciascuna fascia di quota, la distribuzione percentuale dei pixel nelle diverse classi di BEDD. Il dato mostra che, pur essendo quota e accumulo termico fortemente correlati, a parità di fascia altitudinale il BEDD si distribuisce su più classi: ciò conferma che delimitare le aree vocate direttamente sulle somme termiche è metodologicamente più corretto che farlo sulla sola altitudine. Si tratta peraltro di una prima approssimazione, da controllare e affinare con i dati reali di maturazione.

Tabella 5. Distribuzione percentuale dei pixel di ciascuna fascia altitudinale nelle classi di BEDD di Gladstones (valori per riga; in evidenza la classe modale di ciascuna fascia).

Fascia (m s.l.m.)	425–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1000	1000–1100	1100–1200	1200–1300	1300–1400	1400–1470
300–400	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7,5	92,5
400–500	–	–	–	–	–	–	–	–	0,4	38,7	60,9
500–600	–	–	–	–	–	–	–	–	6,7	84,9	8,4
600–700	–	–	–	–	–	–	–	4,5	28,8	66,6	0,1
700–800	–	–	–	–	–	–	1,9	25,9	53,5	18,8	–
800–900	–	–	–	–	–	0,9	20,0	45,9	33,1	0,1	–
900–1000	–	–	–	–	0,3	17,1	43,6	34,8	4,3	–	–
1000–1100	–	–	–	–	13,5	39,2	39,5	7,9	–	–	–
1100–1200	–	–	–	10,9	36,3	40,3	12,3	0,1	–	–	–
1200–1300	–	–	9,7	32,9	41,4	15,7	0,2	–	–	–	–
1300–1400	–	6,0	32,5	42,5	18,4	0,6	–	–	–	–	–
1400–1500	4,1	31,7	41,7	21,4	1,1	–	–	–	–	–	–

4.4 Riferimento varietale: la tabella di Gladstones

Per tradurre i valori degli indici in indicazioni di idoneità varietale si fa riferimento alla tabella di comparazione di [Gladstones \(1992\)](#), che associa a ciascuna varietà l'accumulo termico in BEDD necessario al raggiungimento della maturazione (biologically effective day degrees to ripeness). Confrontando i valori cartografati con questi intervalli è possibile, per ciascuna varietà documentata, individuare le fasce di territorio in cui le risorse termiche sono compatibili con la sua maturazione. La tabella seguente ne riporta un estratto per alcune varietà di riferimento.

Tabella 6. Estratto della tabella di comparazione di Gladstones (1992): gruppi di maturazione e fabbisogno termico minimo indicativo per alcune varietà.

Gruppo di maturazione	BEDD (gradi-giorno)	Varietà a bacca rossa (vini rossi)	Varietà a bacca bianca (vini bianchi o rosati)
Gruppo 1	1050	—	Madeleine, Madeleine-Sylvaner
Gruppo 2	1100	Blue Portuguese	Chasselas, Müller-Thurgau, Siegerrebe, Bacchus, Pinot Gris, Muscat Ottonel, Red Veltliner, Pinot Noir, Meunier
Gruppo 3	1150	Pinot Noir, Meunier, Gamay, Dolcetto, Bastardo, Tinta Carvalha, Tinta Amarella	Traminer, Sylvaner, Scheurebe, Elbling, Morio-Muskat, Kerner, Green Veltliner, Chardonnay, Aligoté, Melon, Sauvignon Blanc, Frontignac, Pedro Ximenes, Verdelho, Sultana
Gruppo 4	1200	Malbec, Durif, Zinfandel, Schiava (= Trollinger), Tempranillo, Tinta Madeira, Pinotage	Sémillon, Muscadelle, Riesling, Welschriesling, Furmint, Leanyka, Harslevelu, Sercial, Malvasia Bianca, Cabernet Franc
Gruppo 5	1250	Merlot, Cabernet Franc, Shiraz, Cinsaut, Barbera, Sangiovese, Touriga	Chenin Blanc, Folle Blanche, Crouchen, Roussanne, Marsanne, Viognier, Taminga, Cabernet Sauvignon
Gruppo 6	1300	Cabernet Sauvignon, Ruby Cabernet, Mondeuse, Tannat, Kadarka, Corvina, Nebbiolo, Ramisco, Alvarelhão, Mourisco Tinto, Valdiguié	Colombard, Palomino, Dona Branca, Rabigato, Grenache
Gruppo 7	1350	Aramon, Petit Verdot, Mataro, Carignan, Grenache, Freisa, Negrara, Grignolino, Souzão, Graciano, Monastrell	Muscat Gordo Blanco, Trebbiano, Montils
Gruppo 8	1400	Tarrango, Terret Noir	Clairette, Grenache Blanc, Doradillo, Biancone

5. Carte vocazionali della vite, del melo e dell'olivo

Le carte derivano direttamente dalla caratterizzazione bioclimatica descritta nei capitoli precedenti — di cui costituiscono l'applicazione cartografica — e ne ereditano dati, periodo di riferimento (2014–2024), risoluzione (100 m) e limiti di incertezza. L'idoneità rappresentata è di tipo esclusivamente

climatico-termico e va letta alla luce delle avvertenze già richiamate nel capitolo 3: le carte di questo capitolo traducono la disponibilità termica del territorio in classi di idoneità per coltura e varietà, incrociando i valori cartografati degli indici con le soglie di fabbisogno desunte dalla letteratura, ma non incorporano fattori pedologici, gestionali o microclimatici locali e non sostituiscono la valutazione di dettaglio del singolo appezzamento. Le soglie varietali derivano dalla letteratura internazionale e sono adattate al contesto alpino: vanno intese come riferimento comparativo, non come limiti prescrittivi assoluti.

5.1 Impostazione cartografica comune

Tutte le carte condividono un layout standardizzato, definito per garantire uniformità grafica e confrontabilità tra le elaborazioni: formato A4 orizzontale, base ortofotografica regionale (VDA Satellite), inquadramento completo del territorio regionale, barra di scala e legenda laterale. La classificazione adotta classi di idoneità rappresentate con una palette graduata dedicata alle classi di vocazionalità.

Il criterio di idoneità è specifico per coltura: per la vite si fonda sull'accumulo termico (BEDD), mentre per melo e olivo, dove il fattore limitante è il rischio di danni da freddo, si fonda sull'altitudine e sul numero di giorni sotto la temperatura limite.

5.2 Carte vocazionali della vite

Per la vite l'elaborazione si fonda sull'indice BEDD, scelto come indicatore sintetico dell'accumulo termico stagionale. La scelta di un unico indice è motivata dalla forte correlazione reciproca tra gli indici di accumulo termico (BEDD, WI, HI, GST) documentata nel capitolo 4 — che li rende in larga parte ridondanti — e dalla diffusione del BEDD nella letteratura come riferimento per il fabbisogno termico varietale (Gladstones 1992). Le classi di idoneità sono ottenute per riclassificazione del raster continuo del BEDD sui fabbisogni termici varietali desunti dalla letteratura (cfr. § 4.5). Sono state prodotte carte per undici varietà di interesse regionale: Chardonnay, Cornalin, Fumin, Gamay, Mayolet, Nebbiolo, Petite Arvine, Petit Rouge, Pinot Gris, Pinot Noir, Syrah.

All'interno di uno stesso gruppo di maturazione possono permanere differenze sensibili di comportamento tra i vitigni, che la sola soglia di BEDD non cattura. La distinzione fine di questi comportamenti potrà essere affrontata solo con l'analisi approfondita delle curve di maturazione, per verificare se sia possibile una loro modellizzazione.

Confini amministrativi. Nelle carte vocazionali della vite è stata applicata una maschera territoriale finalizzata a limitare l'estensione della rappresentazione alle aree effettivamente pertinenti all'analisi viticola regionale. Tale scelta si è resa necessaria per evitare che la modellazione si estendesse eccessivamente nelle vallate laterali o in zone progressivamente meno rappresentative rispetto al contesto di coltivazione della vite e all'area di riferimento della denominazione DOC regionale. La delimitazione consente quindi di concentrare l'analisi sulle aree realmente coerenti con la viticoltura valdostana, migliorando la leggibilità cartografica e l'aderenza territoriale dei risultati. Questa sovrapposizione è stata utilizzata esclusivamente nelle carte vocazionali della vite e non nelle mappe degli indici bioclimatici presentate nel Capitolo 3.

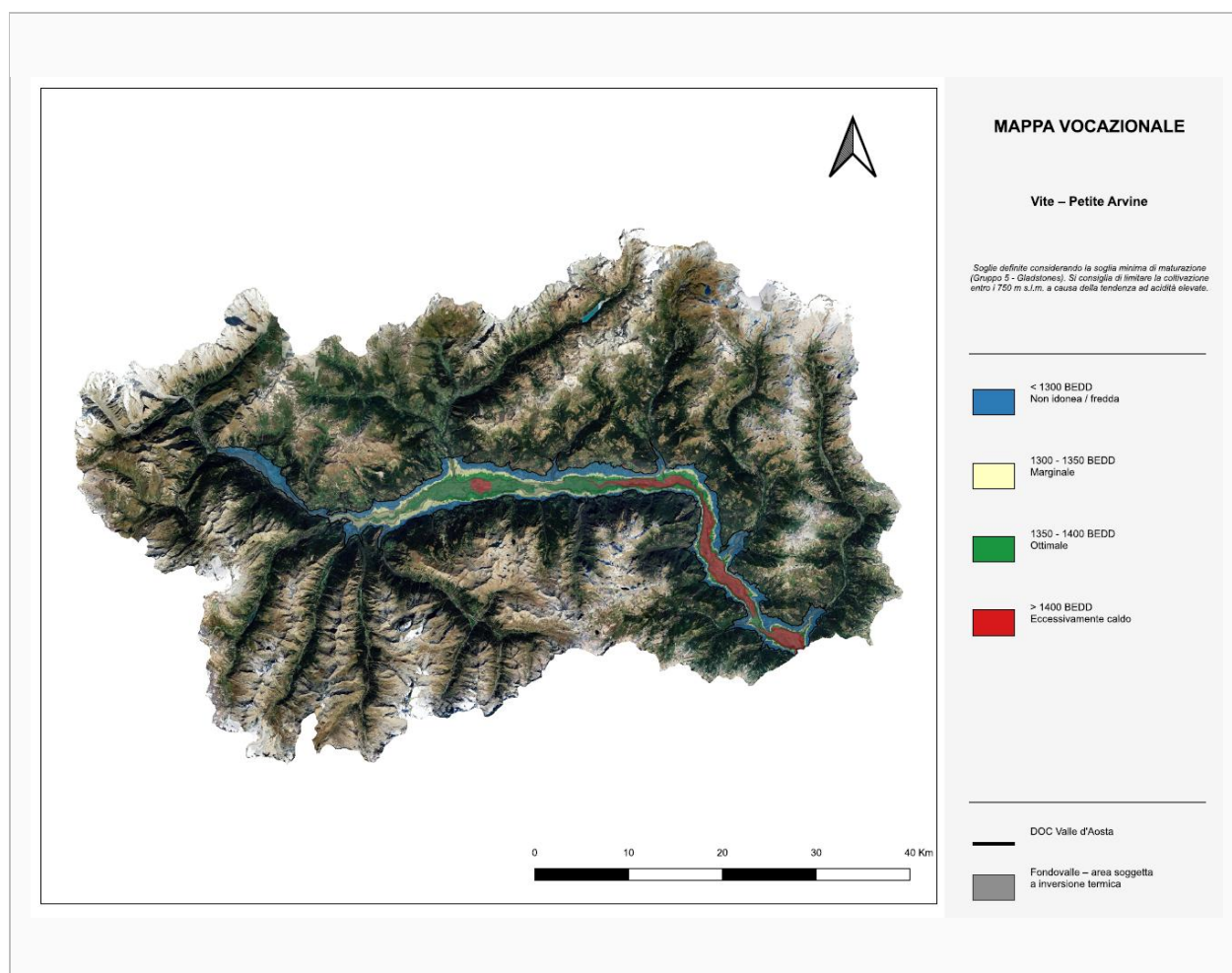


Figura 2. Esempio di carte vocazionali della vite per varietà, riclassificazione del BEDD sui fabbisogni termici di letteratura.

5.3 Carte vocazionali del melo

Per il melo è stato adottato un unico criterio di idoneità, che combina due fattori: l'altitudine e il numero di giorni con temperatura inferiore alla soglia limite per la coltura. L'altitudine agisce come vincolo di prima approssimazione sull'areale potenziale, mentre il conteggio dei giorni sotto la temperatura limite quantifica il rischio di danni da freddo, che in ambiente alpino è il principale fattore limitante per questa coltura. L'incrocio dei due fattori produce la classificazione di idoneità, riclassificata nelle cinque classi finali.

Le carte sono state prodotte per le cultivar di interesse regionale (Renetta, Golden Delicious, Gala, Jonagold, Fuji, Mairac), differenziando le soglie in funzione delle esigenze di ciascuna: il limite altitudinale indicativo si colloca intorno a 1200 m (più basso, circa 800 m, per le cultivar a calibro ridotto e maturazione tardiva), mentre la soglia di resistenza al gelo invernale è dell'ordine di -20°C .

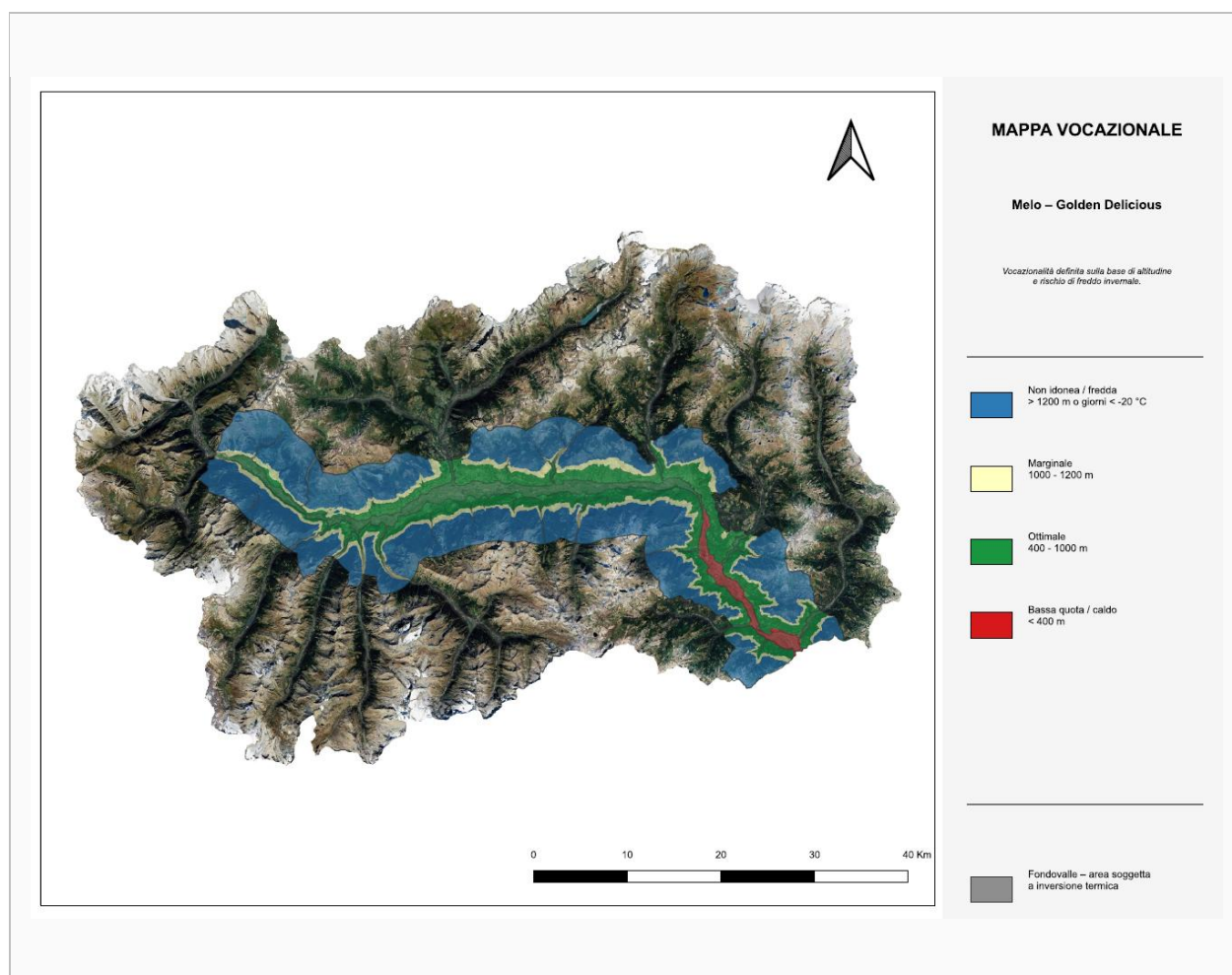


Figura 3. Carte vocazionali del melo per cultivar.

5.4 Carte vocazionali dell'olivo

Anche per l'olivo è stato impiegato il medesimo criterio unico, fondato sull'altitudine e sul numero di giorni con temperatura inferiore alla soglia limite. Per questa coltura la suddivisione non è su base varietale puntuale, ma in due categorie ecologiche — olivo sensibile al freddo e olivo tollerante al freddo — coerente con il fatto che il fattore limitante principale, in ambiente alpino, è la tolleranza alle basse temperature invernali più che la disponibilità termica stagionale. Le due categorie si distinguono per la soglia di temperatura limite adottata nel conteggio dei giorni di freddo: dell'ordine di -10°C per le tipologie più tolleranti e tra -5 e -7°C per quelle più sensibili. Il limite altitudinale indicativo si colloca intorno a 800 m.

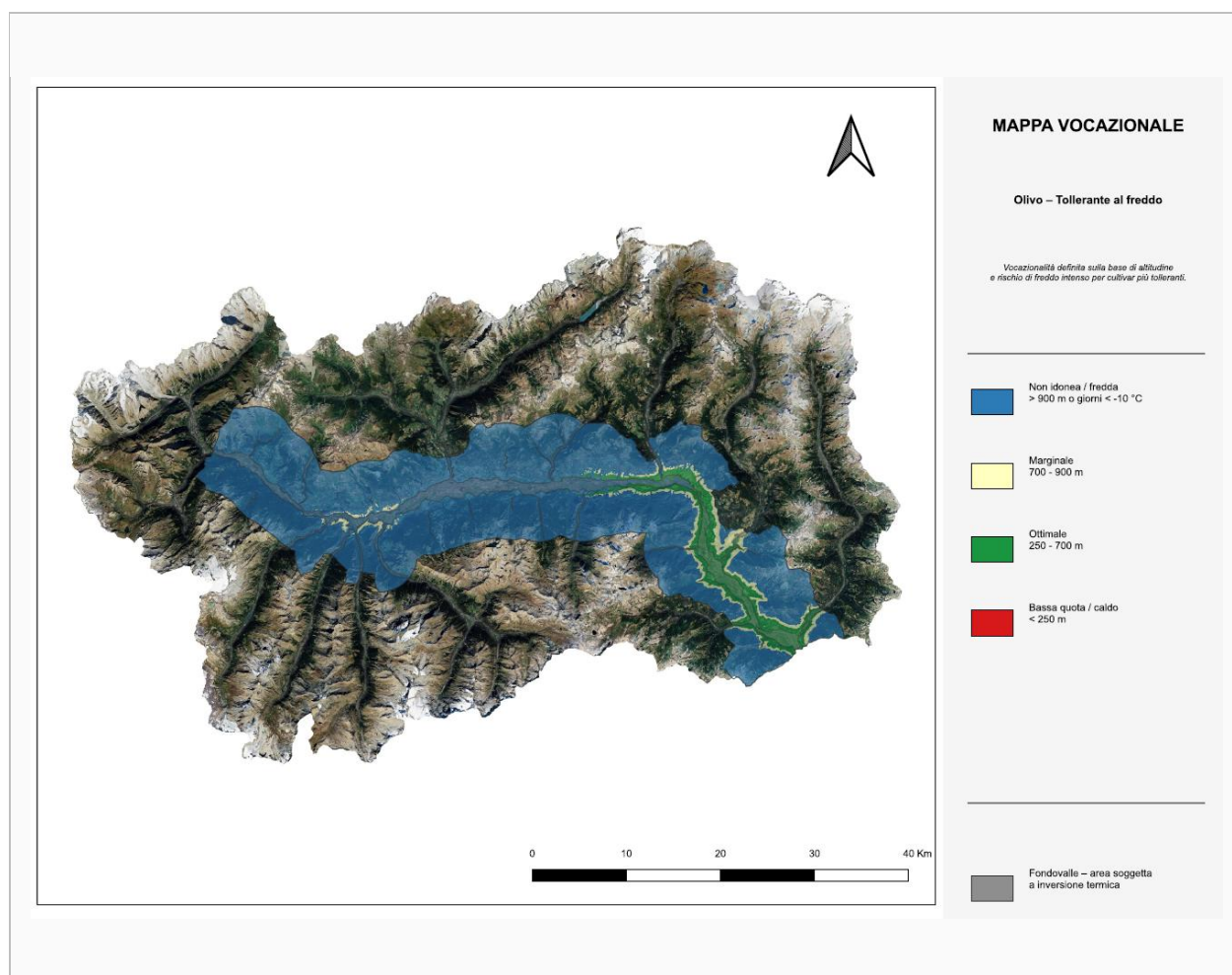


Figura 4. Carte vocazionali dell'olivo per categoria ecologica.

5.5 Automazione del workflow cartografico

Per garantire uniformità grafica, riproducibilità e gestione efficiente di un elevato numero di carte, l'intero workflow di produzione dell'atlante è stato automatizzato con script dedicati in ambiente PyQGIS, che eseguono la ricerca e il caricamento dei raster sorgente, le elaborazioni di raster calculator, la riclassificazione, l'applicazione della simbologia, la costruzione dei layout e delle legende e l'esportazione in PDF. L'automazione assicura la piena replicabilità del processo e l'aggiornabilità dell'atlante alle annate successive, secondo il sistema descritto nel capitolo 6.

6. Sistema di aggiornamento delle carte nel tempo

Le elaborazioni descritte in questo documento non sono un prodotto statico: la base climatica è destinata ad allungarsi annata dopo annata, e con essa gli indici medi e la loro rappresentazione cartografica. Questo capitolo definisce il sistema con cui le carte vengono mantenute aggiornate nel tempo, distinguendo con chiarezza ciò che va rieseguito ogni anno da ciò che costituisce invece un intervento straordinario.

6.1 Principio di funzionamento

Le carte si fondano su una base climatica pluriennale (medie 2014–2024) e, per la parte vocazionale, su soglie derivate dalla letteratura e dai dati di maturazione. L'aggiornamento è annuale, a fine stagione, ed è di tipo cumulativo: la serie storica si allunga progressivamente (2014–2025, 2014–2026...) avvicinandosi gradualmente all'ampiezza trentennale che definisce convenzionalmente una normale climatica. L'esecuzione è semi-automatica, con gli script di interpolazione e i progetti cartografici già predisposti.

L'aggiornamento ordinario non ricalibra il sistema

L'aggiornamento annuale non ricalibra il sistema: i modelli di interpolazione e i parametri ottimizzati del kriging, già tarati sulla serie originale, restano invariati. Si riapplica semplicemente la stessa procedura alla nuova annata, ottenendo le temperature giornaliere e gli indici dell'anno; per gli indici pluriennali si ricalcola la media aggiungendo un anno alla serie. Una nuova ottimizzazione dei modelli o dei parametri del kriging è invece un intervento straordinario, perché obbliga a ricalcolare l'intera serie storica (cfr. § 6.4).

6.2 Ciclo annuale ordinario

Coerentemente con il principio di prudenza, il ciclo annuale ordinario è volutamente circoscritto: riguarda i soli dati meteorologici e le medie degli indici. L'anno-indice si considera concluso a fine stagione — per la maggior parte degli indici al 31 ottobre, con alcune eccezioni legate al periodo di calcolo specifico — sicché l'aggiornamento si svolge una volta che l'annata è completa.

Aggiornamento dei dati meteo e degli indici medi. È la sola operazione che si ripete ogni anno. Si riapplica la catena di interpolazione con i parametri del kriging esistenti e si ricalcolano le medie cumulative, secondo i passaggi seguenti.

- Acquisire le serie giornaliere di temperatura media, minima e massima della nuova annata da tutte le stazioni, con controllo di qualità (lacune, anomalie).
- Estendere la serie cumulativa con l'annata validata (ad es. 2014–2024 → 2014–2025).
- Eseguire la procedura di interpolazione (regression kriging) con i modelli e i parametri già ottimizzati, ottenendo i raster giornalieri della nuova annata.
- Calcolare gli indici della nuova annata (GST, WI, HI, BEDD, CNI) e ricalcolare le medie pluriennali cumulative sull'intera serie aggiornata.
- Verificare range, continuità spaziale e assenza di artefatti dei nuovi raster medi.

I dati di maturazione raccolti nella nuova annata vanno ad arricchire il database, ma non vengono rielaborati annualmente per ridefinire le soglie: un ricalcolo annuale delle soglie locali non avrebbe

senso e produrrebbe variazioni irrilevanti. A maggior ragione, l'atlante delle carte vocazionali (capitolo 5) non viene ripubblicato ogni anno. Le carte di vocazionalità devono restare prudenti e stabili, perché sostengono decisioni d'impianto relative a impianti destinati a durare almeno trent'anni: un atlante che cambiasse di anno in anno disorienterebbe il viticoltore e il frutticoltore senza alcun guadagno informativo. L'eventuale aggiornamento delle carte vocazionali va riservato a revisioni dopo periodi sensibilmente più ampi e solo quando realmente necessario. Si può invece prevedere, se utile, l'aggiornamento annuale del solo atlante delle carte degli indici medi, che ha natura descrittiva e non prescrittiva.

Cartografia degli indici. Aggiornate le medie, si rigenerano le sole carte degli indici medi (riclassificazione e impaginazione), con archiviazione e pubblicazione. Ogni nuovo raster mantiene il sistema di riferimento e la risoluzione del progetto.

Coerenza geometrica

Ogni nuovo raster deve mantenere il sistema di riferimento EPSG:23032 (ED50 / UTM zone 32N) e la risoluzione di 100 m, per garantire la perfetta sovrapponibilità con la serie esistente.

6.3 Gestione delle versioni e tracciabilità

Ogni ciclo di aggiornamento deve essere tracciabile e reversibile.

- Conservare ogni versione (raster medi, eventuali soglie, atlante) in una cartella datata, senza sovrascrivere le precedenti, allegando i metadati: periodo coperto, data di elaborazione, operatore, stazioni incluse, versioni degli script.
- Tenere un changelog cumulativo che registri, per ciascuna versione, la data, i livelli toccati e una sintesi delle modifiche.

6.4 Interventi straordinari

Si distinguono dall'aggiornamento ordinario perché incidono sulla calibrazione del sistema e, in alcuni casi, obbligano a rielaborare l'intera serie storica.

Variazioni nella rete di stazioni. L'ingresso o l'uscita di una stazione modifica la calibrazione dei modelli: vanno incluse solo serie lunghe e di qualità, rieseguita la selezione delle covariate e l'ottimizzazione del kriging, e documentata la conseguente variazione di accuratezza.

Revisione di modelli o parametri del kriging. Qualsiasi modifica ai modelli di interpolazione o ai parametri ottimizzati obbliga a ricalcolare l'intera serie, dal 2014 all'anno corrente, e non soltanto l'ultima annata. È questa la ragione per cui l'aggiornamento ordinario mantiene rigorosamente fissi tali parametri.

Revisione di soglie e parametri agronomici. La revisione delle soglie di letteratura o dei parametri agronomici di melo e olivo non richiede il ricalcolo della base climatica: è sufficiente rieseguire la riclassificazione cartografica delle carte interessate, documentando fonte e motivazione nel changelog.

6.5 Monitoraggio della finestra cumulativa

A ogni ciclo è utile calcolare la differenza media tra la nuova versione dei raster medi e la precedente, sull'intera area o sulla fascia di interesse colturale. Se tale differenza cresce sistematicamente nella stessa direzione, è il segnale di una tendenza climatica in atto, smorzata però dalla media lunga; in tal caso si può affiancare, come prodotto di confronto, una media mobile su una finestra più breve (ad esempio dieci anni), più reattiva alla tendenza. Questo monitoraggio fornisce anche l'elemento oggettivo per decidere, in futuro, se e quando adottare una finestra di riferimento a ampiezza fissa in luogo di quella cumulativa.

7. Conclusioni e prospettive

Il lavoro presentato fornisce una caratterizzazione bioclimatica d'insieme del territorio valdostano, finalizzata a individuare e descrivere gli ambienti potenzialmente vocati alla coltivazione di vite, melo e olivo. A partire da una rete di stazioni e dalle covariate morfologiche derivate dal modello digitale del terreno, le temperature giornaliere sono state spazializzate con un modello di regressione kriging e da esse sono stati calcolati gli indici bioclimatici e gli indicatori di rischio, presentati in forma cartografica con le rispettive legende. La lettura congiunta degli indici, delle loro relazioni con l'altitudine e delle statistiche per fascia di quota e per area DOC ha permesso una prima delimitazione delle aree vocate e la formulazione di ipotesi sui limiti termici di ciascuna coltura, presentate nel capitolo 5, ancorate alla letteratura e ai riferimenti territoriali consolidati.

L'elaborazione cartografica vocazionale presentata nel capitolo 5 è il prodotto applicativo derivato dalla caratterizzazione dei capitoli precedenti, e va sempre letta in continuità con essa: le carte degli indici descrivono condizioni termiche degli ambienti, non l'idoneità puntuale di una singola particella a una singola varietà, che dipende anche da fattori — suolo, gestione, microclima locale — non rappresentabili a questa scala.

7.1 Limiti e incertezza dei risultati

Nell'interpretare e nell'utilizzare le cartografie occorre tenere presenti alcuni limiti, già richiamati nella presentazione dei raster e qui ribaditi perché ne definiscono l'uso appropriato.

- Le stime hanno buona accuratezza complessiva, ma gli errori sono più elevati sulle temperature minime e massime e nei mesi invernali, che sono anche i periodi più critici per gli indicatori di gelo.
- La cartografia rappresenta le condizioni «normali» del territorio: dove insistono condizioni microclimatiche particolari i valori reali possono discostarsi sensibilmente da quelli rappresentati, al punto che alcune aree pur ben conosciute, come Torrette e in parte Arvier, non sono descritte fedelmente dalle carte — la loro effettiva vocazione resta nota soprattutto dall'esperienza diretta.
- La delimitazione per maschere altitudinali è una semplificazione: a parità di quota le risorse termiche variano con l'esposizione e la morfologia, e una delimitazione basata direttamente sulle somme termiche sarebbe più aderente alla realtà.

In sintesi

Le carte vanno lette come uno strumento di inquadramento d'insieme, utile a orientare le scelte a scala territoriale e a individuare le aree su cui concentrare valutazioni di maggior dettaglio, non come una risposta puntuale sull'idoneità di un singolo appezzamento. Il loro valore sta nel fornire un quadro coerente e quantitativo del clima termico regionale, da integrare con la conoscenza locale.

7.2 Prospettive di approfondimento

Il lavoro pone le basi per alcuni sviluppi che ne supererebbero i limiti attuali e che si propongono come obiettivi per le fasi successive.

Zonazione di dettaglio basata sui dati di maturazione. La caratterizzazione qui proposta è di tipo climatico. Lo sviluppo più rilevante consiste nel mettere in relazione gli indici con il comportamento reale di maturazione delle diverse varietà. I dati raccolti negli anni dai settori vitivinicolo e frutticolo dell'Istituto costituiscono un primo nucleo osservativo prezioso ma, da soli, non sufficiente: per calibrare soglie affidabili occorrerà ampliare la base con ulteriori osservazioni, eventualmente in collaborazione con produttori e altre fonti del territorio. Una volta disponibile una base sufficiente, l'analisi consentirebbe di passare da limiti termici ipotizzati sulla base della letteratura a soglie calibrate sulle osservazioni locali, con un guadagno di aderenza al contesto valdostano. Questo sviluppo richiede un disegno metodologico accurato e un orizzonte temporale più ampio di quello del presente progetto.

La procedura immaginata per questa analisi muove dal patrimonio di osservazioni di maturazione disponibile — per la vite le curve di accumulo zuccherino, pH e acidità rilevate nei vigneti di riferimento; per il melo l'indice amido alla raccolta — ciascuna corredata di varietà, sito georeferenziato e data del campionamento.

Verifica delle incongruenze tra adret ed envers. L'analisi degli indici ha fatto emergere alcune apparenti incongruenze nel confronto tra adret ed envers, che meritano un approfondimento dedicato. Comprendere se tali differenze riflettano effetti reali — legati a insolazione, circolazione dell'aria e morfologia — o piuttosto limiti della spazializzazione in specifici contesti è importante sia per affinare i modelli sia per interpretare correttamente la vocazionalità dei due versanti.

Affinamento della base climatica e degli strumenti. L'aggiornamento periodico della serie con le nuove annate, l'eventuale densificazione della rete di stazioni nei contesti meno rappresentati e l'integrazione di informazioni a scala fine potrebbero ridurre l'incertezza nelle aree microclimaticamente complesse oggi meno descritte.

Nel loro insieme, questi sviluppi delineano un percorso che muove dalla caratterizzazione climatica qui consolidata verso una zonazione progressivamente più calibrata sul comportamento agronomico osservato, mantenendo come riferimento costante il rigore metodologico e la trasparenza sui limiti dei dati.

Riferimenti bibliografici

- Amerine, M.A., e Winkler, A.J. (1944). Composition and quality of musts and wines of California grapes. *Hilgardia* 15(6): 493–675.
- Gladstones, J. (1992). *Viticulture and Environment*. Winetitles, Adelaide.
- Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie de l'Agriculture de France* 64: 1117–1126.
- Jones, G.V. (2006). Climate and terroir: impacts of climate variability and change on wine. In: *Fine Wine and Terroir — The Geoscience Perspective*. Geological Association of Canada.
- Li, J. (2022). *Spatial Predictive Modeling with R*. CRC Press, Boca Raton.
- OIV (2010). Resolution OIV-VITI 333-2010: Definition of vitivinicultural «terroir». Organisation Internationale de la Vigne et du Vin, Paris.
- OIV (2012). Resolution OIV-VITI 423-2012: OIV guidelines for vitiviniculture zoning methodologies on a soil and climate level. Organisation Internationale de la Vigne et du Vin, Paris.
- Schwab, A. (2000). Reliefanalytische Verfahren zur Abschätzung nächtlicher Kaltluftbewegungen. *Freiburger Geographische Hefte*, 61.
- Tonietto, J. (1999). Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de caractérisation. Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.
- Tonietto, J., e Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology* 124(1-2): 81–97.