

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI AGRARIA

**DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA AMBIENTALE E
PRODUZIONE VEGETALI**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**MODELLIZZAZIONE DELLA DINAMICA DI
MATURAZIONE DELL'UVA MEDIANTE
TECNICHE DI *REMOTE SENSING***

Relatore:

Prof. ANDREA PITACCO

Correlatore:

Dott. GIANNI FILA

Laureando:

Luca Rigato

Matricola n. 622605-TG

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011

INDICE GENERALE

1	<i>Introduzione</i>	7
1.1	Lo sviluppo e la maturazione dell'uva	7
1.1.1	Profilo zuccherino	12
1.1.2	Profilo acidico	13
1.1.3	Ecofisiologia della maturazione	14
1.2	I modelli di simulazione	17
1.3	Remote sensing	23
1.4	Gli indici di vegetazione	25
1.5	Impostazione dell'analisi	28
2	<i>Materiali e metodi</i>	29
2.1	Zona di studio	29
2.1.1	Morfologia, climatologia, e attitudine culturale	29
2.1.2	Dataset di maturazione	30
2.1.3	Siti di rilevazione dati	31
2.1.4	Dati meteo	33
2.1.5	Dati MODIS	34
2.2	Formattazione dei dati	34
2.3	Analisi esplorativa del database	35
2.4	Descrizione dei modelli di simulazione	35
2.4.1	Il modello DOY	35
2.4.2	Il modello GDD	36
2.4.3	Il modello EVI	37
2.4.4	Ottimizzazione accumulo EVI	37
2.4.5	Il Modello EVI × temperatura	38
2.5	Valutazione statistica dei modelli	39
3	<i>Risultati</i>	40
3.1	Analisi esplorativa	40
3.1.1	Relazione tra tenore zuccherino e data	40
3.1.2	Relazione tra tenore zuccherino e GDD	41

3.1.3	Relazione fra tenore in zuccheri ed EVI	42
3.2	Modellazione della maturazione	43
3.2.1	Modello DOY	44
3.2.2	Modello GDD	46
3.2.3	Modello EVI	47
4	<i>Discussione</i>	51
5	<i>Appendice</i>	53
6	<i>Bibliografia</i>	56
7	<i>Ringraziamenti</i>	65

RIASSUNTO

L'obiettivo del presente lavoro è quello di confrontare tre modelli di previsione della maturazione dell'uva per poter offrire un'opportunità pratica per stimare preventivamente la data di vendemmia. Il primo modello si basa sulla semplice media interannuale della data di maturazione, espressa come giorno dell'anno (DOY, *Day Of the Year*). Il secondo stima la data di maturazione in base al modello GDD (*Growing Degree Day*), calcolando cioè le temperature considerate utili a partire dal primo giorno dell'anno fino al giorno del raggiungimento di una determinata fase di maturazione. Il terzo ed ultimo modello stima la data di maturazione con l'ausilio dell'indice di vegetazione EVI (*Enhanced Vegetation Index*), ottenuto tramite il telerilevamento satellitare.

La ricerca ha utilizzato un dataset di dati di maturazione che copre un arco temporale di vent'anni insistendo su gran parte della provincia di Treviso e in un paese della provincia di Padova (Campodarsego). Le aziende coinvolte sono 52, e sono state considerate quattro cultivar: Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Merlot e Glera.

I risultati mostrano che, per tutte le cultivar, il modello che utilizza l'indice di vegetazione ha una maggiore accuratezza rispetto agli altri due modelli, consentendo di stimare con una precisione compresa tra il 67% e l'86 % la maturazione dell'uva entro un intervallo di $\pm 1^\circ\text{Brix}$.

ABSTRACT

The aim of the present work is to compare three prediction models for ripening of grapevine to offer a practice utility to estimate the ripening level. The first model is based on the interannual mean ripening date, indicated as Day Of the Year (DOY). The second one estimates ripening with the GDD model (*Growing Degree Day*), computing the thermal units from the first day of the year to the achievement of a determined ripening phase. The last model estimates ripening by the vegetation index EVI (Enhanced Vegetation Index) derived from remote sensing.

The research has utilized a ripening dataset that covers a time period over twenty years largely in the Treviso province, and in a village in the Padua province (Campodarsego). There are 52 farm involved and it has considered four cultivars: Cabernet Sauvignon, Chardonnay, Merlot and Glera.

Results show that EVI model ensures the higher accuracy, respect to the other models. It reaches a degree of accuracy in the range of 67% to 86% to estimate grape ripening in the interval of $\pm 1^\circ\text{Brix}$.

1 Introduzione

1.1 Lo sviluppo e la maturazione dell'uva

La maturazione è un processo fisiologico che porta alla completa formazione dei frutti e dei semi. Da un punto di vista biologico è indispensabile per favorire la diffusione delle sementi per garantire il mantenimento e la propagazione della specie. Nei frutti destinati ad essere veicolati da animali la maturazione conferisce agli stessi un abbassamento dell'acidità, un aumento della sofficità, del tenore zuccherino ed in generale una migliore appetibilità.

La vite porta delle infiorescenze a pannocchia o racemo composto. L'asse principale, il rachide, porta racimoli di vario ordine l'ultimo dei quali è chiamato pedicello il quale porta dapprima il fiore, e poi il frutto. Il frutto è una bacca formata da tre strati: epicarpo, mesocarpo ed endocarpo (Figura 1). L'esocarpo (volgarmente detta buccia) è posto nella parte più esterna e svolge funzioni protettive e di contenimento degli

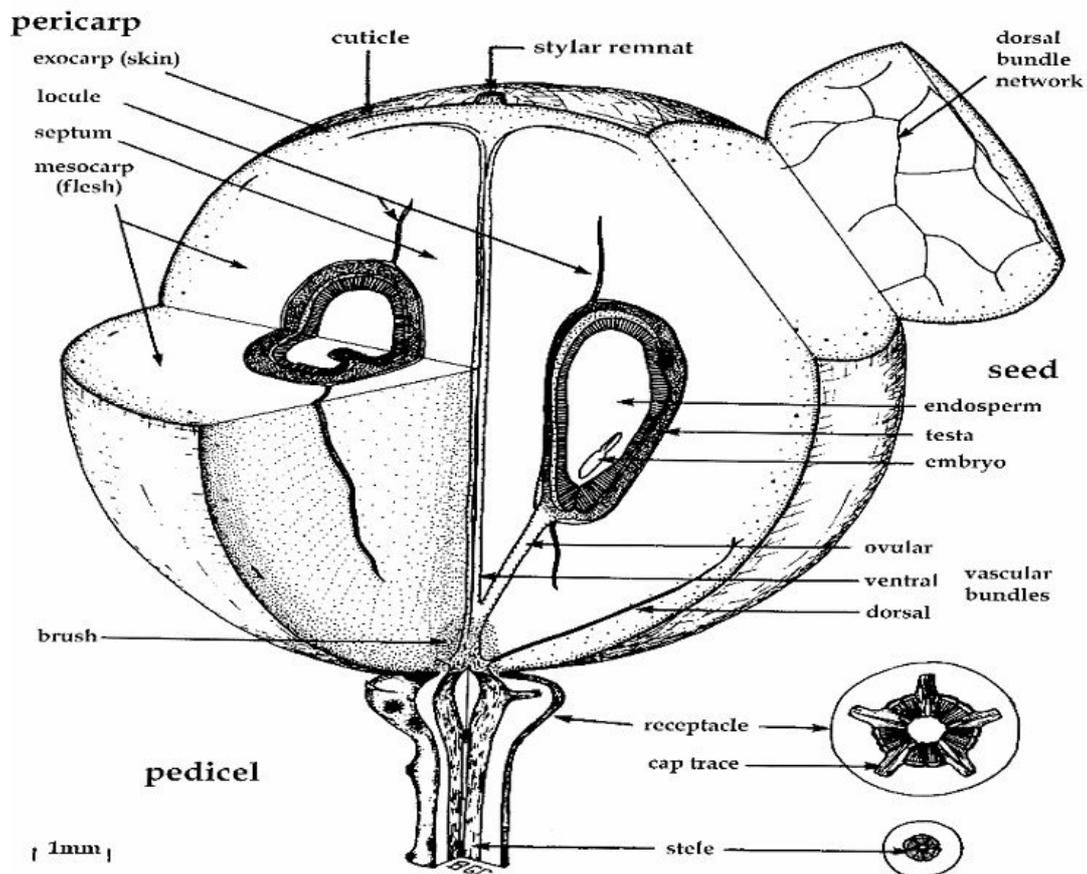


Figura 1: Rappresentazione schematica dei componenti della bacche dell'uva (tratta da Coombe, 1987)

altri strati sottostanti. Appena al di sotto si trova il mesocarpo (o polpa), la parte carnosa e succosa della bacca mentre nella parte più interna si colloca l'endocarpo composto da un tessuto membranoso contenente i semi. L'insieme delle bacche e delle ramificazioni forma il raspo o graso. La conoscenza della composizione dei vari strati è importante anche da un punto di vista tecnico della trasformazione in vino. Infatti le varie componenti che rivestono un'importanza primaria nel processo di vinificazione (zuccheri, acidità, pH, polifenoli, antociani, tannini) non sono uniformemente distribuite nei vari tessuti, e l'entità della loro estrazione deve essere programmata (entro certi limiti) impostando tecniche estrattive (pressioni, tempi di contatto) calibrate in relazione a ciò che il vinificatore desidera ottenere.

Le bacche presentano una curva di accrescimento a doppia sigmoide (Coombe e Hale, 1973; Coombe e Bishop, 1980; Coombe, 1992). Come è possibile osservare nel grafico (Figura 2) si possono individuare tre stadi nella curva di accrescimento: due periodi di forte crescita (anche se con caratteristiche diverse) intervallati da una fase centrale di stasi. Il primo stadio, a partire dalla fioritura, consiste in un periodo di intensa divisione cellulare: le cellule del neo frutticino subiscono numerose divisioni mitotiche tanto da formare un gran numero di cellule dalle dimensioni contenute. Questa fase, detta di accrescimento per moltiplicazione cellulare, si protrae per circa 30-40 giorni dopo la fioritura a seconda della cultivar e delle condizioni pedoclimatiche. In seguito la bacca rallenta le sue attività di moltiplicazione e distensione cellulare entrando in uno stadio di stasi apparente che permane fino all'invasatura che dura circa due settimane, dove la crescita è assai modesta. Raggiunta l'invasatura, dopo circa otto settimane dalla fioritura, inizia il terzo ed ultimo stadio, che si protrae fino alla raccolta, caratterizzato da un forte accrescimento delle bacche, che può arrivare al doppio del volume iniziale. L'accrescimento avviene prevalentemente per la distensione cellulare delle cellule che si sono formate nella prima fase di accrescimento.

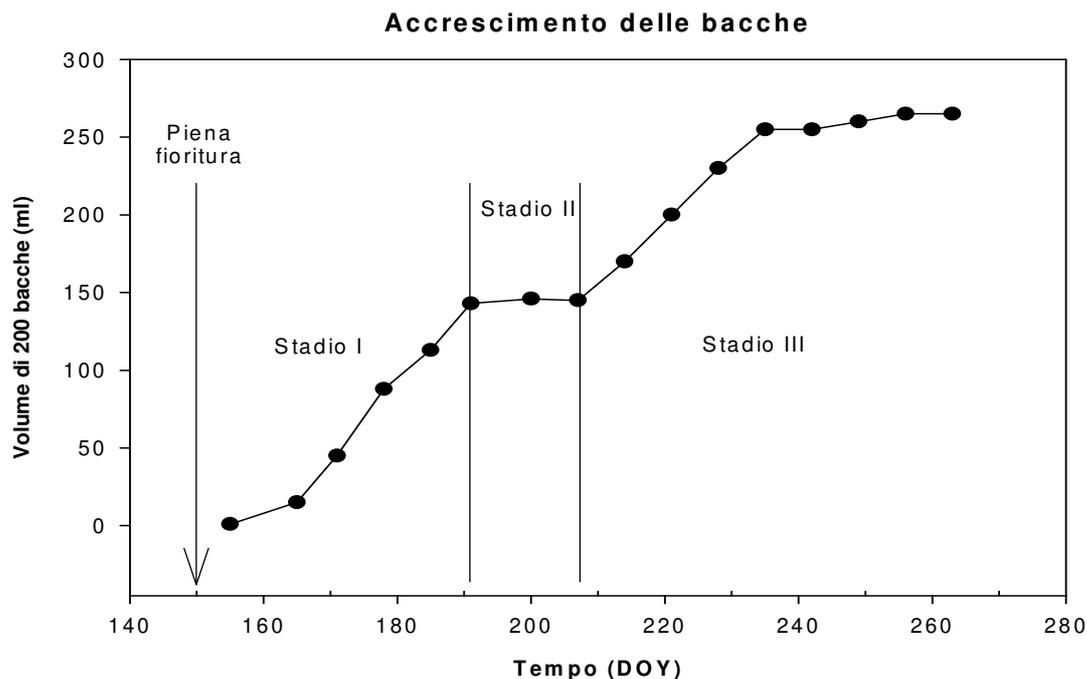


Figura 2: Andamento del volume di 200 bacche in relazione ai giorni dell'anno (i dati si riferiscono ad un Cabernet Sauvignon coltivato ad Istrana, 1993).

L'accrescimento dell'acino viene espresso sia come aumento del peso che come aumento del volume della bacca. Non ci sono molti lavori in bibliografia che si siano interessati del volume e delle variazioni volumetriche delle bacche. Questo aspetto, in realtà, è un elemento che merita considerazione in quanto la tempistica e l'entità della perdita di volume delle bacche ha forti implicazioni non solo sulla quantità di uva raccolta ma anche sulla composizione dei frutti. Uno studio condotto in Australia, ha riscontrato che il massimo volume raggiunto dalle bacche è correlato con il volume delle stesse misurato alla fine della fase della divisione cellulare (Rogiers et al., 2004). Gli autori hanno valutato gli effetti dell'irrigazione, dell'azoto e del portinnesto sulla perdita di volume delle bacche. Tra i vari risultati ottenuti hanno potuto constatare che la causa che ha portato ad ottenere bacche di dimensioni contenute alla raccolta è stata la ridotta espansione delle stesse nella fase di pre-invaiatura. Il frutto, per il suo ruolo fisiologico, è un "sink", un organo di richiamo e di accumulo delle sostanze di riserva.

La maturazione nell'uva inizia generalmente circa 60 giorni dopo l'antesi, con la fase fenologica nota come invaiatura (Castellarin et al., 2011). Da questo momento la bacca dell'uva è soggetta ad una serie di coordinati cambiamenti chimici e metabolici di

notevole portata. Viene modificato il profilo acidico, quello zuccherino, quello dei polifenoli, il pH ed il turgore cellulare. Il fenomeno della maturazione è un aspetto molto affascinante della fisiologia, ma ancora molto c'è da capire sulle molteplici trasformazioni che interessano il frutto. In seguito verranno analizzati le principali modifiche che incorrono con la maturazione

Il cambiamento di colore dell'esocarpo della bacca segna inequivocabilmente l'inizio della fase fenologica dell'invasatura. A livello pratico è sicuramente il segnale più facilmente individuabile per determinare il momento dell'inizio della maturazione. Le sostanze responsabili della colorazione nell'uva, e nei frutti in generale, sono dei polifenoli. In particolare sono gli antociani quelli che conferiscono la colorazione rossa più o meno scura, e che conferiscono il colore rosso al vino. Queste sostanze chimicamente complesse sono frutto di un metabolismo secondario che si innesca in prossimità dell'invasatura ed hanno una funzione di tipo protettivo.

Per la maggior parte delle varietà il cambiamento cromatico riguarda solo l'esocarpo della bacca, ma ci sono altresì delle varietà che cambiano anche il colore del mesocarpo (dette anche varietà tintoree). In passato si pensava che in queste cultivar la colorazione rossa della polpa fosse dovuta ad un trasferimento di colore da parte dell'esocarpo una volta raggiunta la maturità (Winkler, 1973, citato da Castellarin et al., 2011). Ricerche specifiche hanno trovato fattori di trascrizione del gene responsabile di indurre la sintesi degli antociani (*VvmybA1*) in tutti gli organi che accumulano questi polifenoli. Pertanto nelle bacche a polpa rossa la produzione del colore avviene sia nella buccia che nella polpa e quindi entrambi i siti sono fonti di produzione degli antociani; di conseguenza la specificità di azione di questo gene potrebbe essere ridotta (Jeong et al., 2006).

Un altro dei segnali che ci permette di capire che l'uva sta maturando è l'aumento della sofficià, cioè del rammollimento della polpa al tatto (circostanza nota come *softening*). Questo fenomeno è stato molto studiato, anche recentemente, per altri frutti a polpa carnosa (Brummel et al., 2001; Trainotti et al., 2003; Fonseca et al., 2005; Cooper et al., 2007; Miedes et al., 2010;). È noto che a decorrere dal momento dell'invasatura si assiste ad una perdita del turgore cellulare nel mesocarpo delle bacche (Wada et al.,

2008). Lavori recenti hanno dimostrato che è proprio la diminuzione del turgore cellulare la causa principale del softening dei tessuti dell'uva (Thomas et al., 2008). Dai risultati emersi da quest'ultimo studio si evince che la perdita di turgore è un'importante fattore del rammollimento dei frutti e che esso decresce in congiunzione con il verificarsi di molti degli altri cambiamenti metabolici e di espressione genica che sono noti incorrere all'inizio della maturazione. Questo fenomeno è anche confermato da Matthews et al. (2009) i quali hanno verificato che ritardando il decremento della perdita di turgore si ritardava congiuntamente anche l'inizio della maturazione. In entrambi i lavori, in particolare per quanto riguarda gli zuccheri, è stato riscontrato che l'accumulo zuccherino è sempre preceduto (di circa 7 – 10 giorni) da un brusco calo del turgore cellulare. Queste evidenze smentirebbero le convinzioni tradizionali che ipotizzano un inizio congiunto dell'accumulo degli zuccheri, degli antociani e dell'inizio del softening che incorrono in un unico momento all'inizio della maturazione e rivelano differenze spaziotemporali sull'inizio dei vari eventi (Castellarin et al., 2011).

Le variazioni biochimiche nell'acino non avvengono allo stesso modo durante la crescita delle bacche. Per tutta la fase verde, quindi fino all'invasatura, l'acqua ed i soluti vengono trasportati all'interno dell'acino fondamentalmente dallo xilema (Greenspan et al., 1994; Findlay et al., 1987). Questo tessuto conduttore è adibito al trasporto della linfa grezza, quindi di acqua, sali inorganici e qualche metabolita organico derivato dalle radici. Nella fase di post-invasatura è il floema ad alimentare le bacche (Coombe e McCarthy, 2000), trasportando un succo più elaborato, ricco di saccarosio, amminoacidi, potassio ed altri ioni minerali. In questa linfa il saccarosio è presente in concentrazione maggiore rispetto agli altri due zuccheri semplici, quali il glucosio ed il fruttosio (questo perché i carboidrati vengono traslocati nella lunga distanza principalmente sotto forma di saccarosio), anche se vi è una variazione stagionale e diurna della concentrazione dei vari composti (Gholami et al., 2004). McCarthy e Coombe (1999) hanno riscontrato che al raggiungimento del massimo peso della bacca il trasporto floematico rallenta bruscamente per fermarsi definitivamente 2-3 settimane più tardi. Le teorie dominanti fino a pochi anni fa attribuivano la causa della perdita di funzionalità xilematica, che incorre dall'inizio dell'invasatura, allo stiramento ed alla rottura della parete delle tracheidi specialmente nella "zona pennello", dove il tessuto vascolare entra nella bacca (Coombe e McCarthy,

2000). Studi successivi hanno dimostrato che l'assenza di flusso nei vasi xilematici delle bacche durante la fase della maturazione sarebbe dovuta ad una inappropriata “*driving force*” (gradiente idrostatico) dei fluidi nell'apoplasto degli acini, quindi non ad una riduzione della funzionalità dei tessuti stessi (Bondada et al., 2005).

Coombe (1987) ha analizzato dove si accumulano i principali soluti all'interno della bacca (glucosio, fruttosio, saccarosio, fenoli, tartrato, malato, potassio ed altri anioni inorganici). Sezionando trasversalmente un acino ha individuato ben 19 zone che assumono caratteristiche diverse, traendone i seguenti risultati:

- l'acido malico è maggiormente presente nella parte di polpa compresa tra i semi e l'esocarpo mentre l'acido tartarico è più abbondante in prossimità dell'esocarpo;
- glucosio e fruttosio sono maggiormente presenti tra i semi ed il tessuto vascolare centrale, mentre il saccarosio è più abbondante nei vasi (questo è plausibile dato che è la forma attraverso la quale gli zuccheri vengono trasportati);
- gli anioni inorganici ed il potassio sono principalmente presenti nella zona dei vasi e in quella dell'esocarpo;
- i fenoli sono dominanti nell'esocarpo.

1.1.1 Profilo zuccherino

La componente zuccherina è, tra tutte (acidità, pH, polifenoli), quella che indubbiamente riscuote l'interesse maggiore dei produttori, sia che l'uva venga destinata alla produzione di vino sia che venga utilizzata per il consumo da tavola, poiché è il principale fattore che incide sulla raccolta. La quantità di zuccheri, per quanto riguarda l'uva da trasformazione, influisce sul tenore alcolico del vino (entro certi limiti, legati alla sopravvivenza dei lieviti in ambiente ad elevata presenza di etanolo).

La curva di accumulo degli zuccheri segue un andamento di tipo sigmoidale (vedi Figura 3). L'incremento del tenore zuccherino fino alla fase dell'invasatura è modesto; in

seguito aumenta fino a raggiungere un plateau di massimo quando anche la bacca raggiunge le sue dimensioni massime. Quando nello stadio tardivo del processo di maturazione l'accumulo degli zuccheri subisce un calo, nella fase nota come “*engustment*”, iniziano ad accumularsi i composti aromatici volatili e non (Coombe e McCarthy, 1997).

1.1.2 Profilo acido

Fino alla fine della fase verde le bacche presentano alti livelli di acidità e solo a partire dalla fase di invaiatura il contenuto di acidi organici decresce in concomitanza all'aumento degli zuccheri. Il decremento dell'acidità si adatta ad un profilo sinusoidale (speculare rispetto a quello degli zuccheri) che parte da una situazione di massima concentrazione in fase di pre-invaiatura, al quale segue un tratto di brusco calo che rallenta fino a raggiungere una concentrazione minima in corrispondenza del massimo accumulo zuccherino (vedi grafico in Figura 3). Il contenuto di acidi nelle bacche mature, idealmente, dovrebbe, essere compreso tra 0.65 e 0.85 g/100 ml (Conde et al., 2007).

Gli acidi organici maggiormente presenti sono l'acido tartarico e l'acido malico che da soli contano tra il 69 ed il 92% degli acidi organici totali negli acini e nelle foglie (Kliewer, 1966). La quota restante è costituita da altri acidi, come il citrico, il succinico, il lattico e l'acetico. Il malato ed il tartrato vengono sintetizzati sia dalle foglie verdi che dai frutti immaturi tanto che la fotosintesi nelle bacche è responsabile della produzione di circa la metà degli acidi cumulati (Conde et al., 2007). Il ruolo che il malato riveste nella fisiologia della pianta è di estrema importanza non solo da un punto di vista biologico (in quanto entra nei *pathways* della glicolisi, della respirazione e della fotosintesi), ma anche da un punto di vista della vinificazione (acidità del vino, fermentazione malo-lattica). Questo è ben documentato da una review di Sweetman et al. (2009) che offre una buona panoramica sulla regolazione del metabolismo dell'acido malico nelle bacche dell'uva. L'acido malico è il soluto organico più abbondante nella polpa degli acini immaturi ma subisce un declino (più rapido tra i 10 e i 17 °Brix) nel corso della maturazione che è comparabile con il grado di incremento di glucosio e fruttosio (Coombe, 1987).

Andamento degli zuccheri e dell'acidità in base ai giorni dell'anno (DOY)

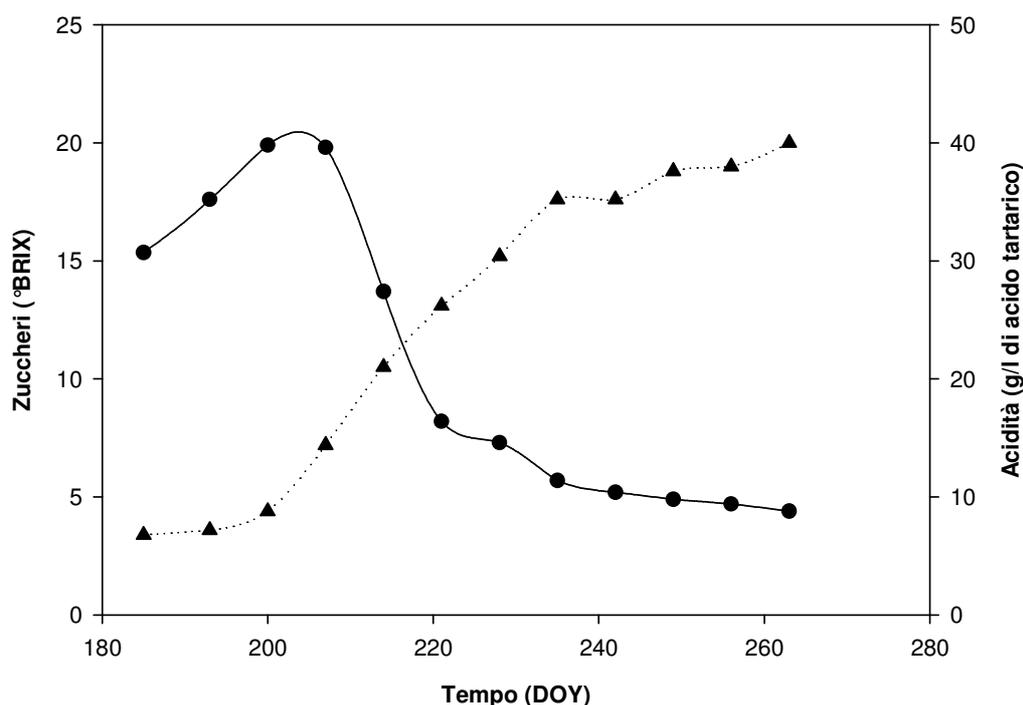


Figura 3: Profilo zuccherino ed acidico nel corso della maturazione delle bacche (i dati della figura si riferiscono ad un Cabernet Sauvignon del 1993). La freccia nera indica l'inizio dell'invasatura.

La concentrazione del tartrato decresce con l'ombreggiamento dei grappoli insieme a quella dei solidi solubili, mentre il pH, la concentrazione dell'acido malico e del potassio aumentano.

1.1.3 Ecofisiologia della maturazione

Il processo di crescita e maturazione dei frutti è regolato da un punto di vista fisiologico e dall'attività fotosintetica delle piante. La trasformazione del frutto in un organo sink avviene solo dopo l'invasatura, poiché fino a questo momento nelle bacche si riscontra un elevato tasso di respirazione cellulare. L'importo carbonico aumenta solo a partire da questo momento, dove viene accumulato nel pericarpo principalmente sottoforma di zuccheri e il costo energetico dell'attività respiratoria è molto più basso rispetto a quello della fase di pre-invasatura.

La crescita dei frutti è strettamente legata alla capacità della pianta di sintetizzare nuovi tessuti attraverso lo sfruttamento dell'energia luminosa del sole e alla capacità di intercettarla e di trasformarla in energia chimica da parte delle foglie, attraverso il processo della fotosintesi. Perciò la superficie fogliare ha un ruolo determinante sul processo fotosintetico, ma le dinamiche con cui esso si manifesta sono influenzate dalle caratteristiche ambientali, quali la radiazione luminosa, la temperatura e la disponibilità idrica. Si è osservato che la rimozione delle foglie causa un prolungamento della seconda fase della curva di crescita, la fase di stallo apparente (Petrie et al., 2000). Il medesimo studio ha messo in relazione la composizione e la maturazione dei frutti di Pinot grigio con la superficie fogliare. I risultati che hanno ottenuto sono interessanti. Se si considerano tutte le dinamiche ottenute dalle varie prove si trova che, la quantità ed il tasso di accumulazione degli zuccheri, riflettono l'attività fotosintetica delle foglie e sono quindi indipendenti dalla crescita dell'acino in se stessa. Inoltre è stato anche possibile determinare che l'assorbimento dell'acqua e l'accumulo degli zuccheri sono indipendenti.

La temperatura è un indice che non solo incide sulle dinamiche e sui limiti della fotosintesi, ma è anche uno dei principali fattori che influiscono sul processo di evapotraspirazione. Quindi incide sull'accumulo delle sostanze di riserva dell'acino perché il flusso della linfa all'interno dei vasi conduttori (grezza ed elaborata) è dipendente dalla traspirazione. Se l'aumento dell'intensità del processo di traspirazione è supportato da una corretta disponibilità idrica le dinamiche di maturazione verranno accelerate.

Uno studio di Cohen et al. (2008), condotto in condizioni di campo, ha dimostrato che la temperatura non è influente solo di per sé ma che altrettanto importanti sono le sue fluttuazioni giornaliere. Smorzando la fluttuazione delle temperature diurne delle bacche (considerando solo la variabile temperatura e non anche altre, come l'esposizione luminosa o la radiazione incidente), non solo si anticipa l'inizio della maturazione ma anche il suo tasso di incremento. Questi risultati si traducono con un maggiore tenore zuccherino, un più alto peso delle bacche ed una più alta concentrazione di antociani alla raccolta.

L'aumento delle temperature provocato dai cambiamenti climatici influirà su molti dei processi biologici e fisiologici degli organismi viventi. Un esempio concreto, inerente a dei vigneti oggetto anche di questa tesi (per le località di Istrana e Venegazzù) ha mostrato, in un lavoro preliminare precedente, dei trend di anticipazione dell'invasatura e della raccolta anche molto marcati, compresi tra 0.4 e 0.9 giorni all'anno di anticipo nel corso dell'ultimo ventennio (Rigato, 2009). Anche se il coefficiente di correlazione della linea di tendenza tra i giorni dell'anno e il verificarsi della fase fenologica è medio, medio – basso ($R^2 = 0.2 - 0.4$) si segnala una non trascurabile anticipazione della maturazione nel medio – lungo periodo.

Sempre in considerazione delle modificazioni climatiche dovute al “*global warming*” Greer e Weston (2010) hanno provato a sottoporre delle bacche in diversi momenti fisiologici a regimi termici elevati per tempi relativamente lunghi: 40°C di giorno e 25°C di notte per quattro giorni. La risposta varietale non è stata univoca, ma in generale, le bacche che hanno subito questo trattamento termico all'allegagione hanno mostrato una crescita sostanzialmente regolare, mentre quelle che sono state interessate da tale trattamento nella fase di invasatura e post-invasatura hanno arrestato il loro sviluppo al momento del trattamento. Per quanto riguarda l'accumulo degli zuccheri questi hanno mostrato un arresto temporaneo di circa una settimana ed in seguito hanno ripreso la crescita raggiungendo anche livelli elevati (25 – 27 °Brix) per poi decrescere. L'inibizione dell'accumulo degli zuccheri dovuta alla somministrazione del calore, sempre secondo i due autori, può essere attribuita alla restrizione del carico floematico all'interno della bacca, al ridotto trasporto degli zuccheri o alla riduzione del rifornimento da parte degli organi “*source*” (organi di produzione, rifornimento).

Oltre all'ombreggiamento anche la temperatura esercita una notevole influenza sull'acidità, in particolare sull'acido malico. Notoriamente nelle regioni più fredde vengono prodotti frutti con una più elevata concentrazione di malico, mentre le regioni con regimi termici superiori producono uve con basso tenore di acidità. Questa correlazione negativa tra i livelli di acido malico e la temperatura è dovuta all'effetto che la temperatura stessa esercita sulla sintesi ed il catabolismo dell'acido malico (Conde et al., 2007). L'intervallo termico più favorevole all'accumulo del malato è tra i 20 ed i 25°C (Lakso e Kliewer, 1975).

L'esposizione luminosa ha effetti benefici importanti per la composizione dei grappoli (Smart, 1985) ma il concomitante incremento della temperatura delle bacche potrebbe essere deleterio per le stesse. Degli studi hanno mostrato che incrementando l'esposizione luminosa senza incrementare significativamente la temperatura degli acini si ottengono produzioni più abbondanti di antociani (Kliwer, 1970; Kliwer, 1977). Un'analisi congiunta sull'intensità luminosa, la nutrizione minerale e lo stato idrico (Keller et al., 1998a; Keller e Hrazdina 1998b) ha riscontrato che sia l'abbondante disponibilità di azoto che la scarsa intensità luminosa stimolano la crescita dei germogli e l'espansione dell'area fogliare ritardando la senescenza delle foglie e modificando il rapporto tra buccia e bacca.

La disponibilità idrica è un altro elemento fondamentale in grado di influire sulla maturazione dei grappoli. Castellarin et al. (2007) hanno provato a indurre condizioni di stress idrico a delle piante di vite, in due momenti, prima e dopo l'invasatura. Lo stress in fase di pre-invasatura ha causato un'accelerazione del processo di accumulo degli zuccheri e della sintesi di antociani, ed entrambi gli stress hanno portato ad un incremento dell'accumulo di antociani dopo l'invasatura. I risultati di questo studio hanno dimostrato che la manipolazione dello stress idrico non solo incide sui cambiamenti di composizione delle bacche ma anche sulle tempistiche del processo di maturazione. Uno studio portoghese (Santos et al., 2003) ha inoltre evidenziato che lo stress idrico porta ad una migliore qualità dei grappoli e del vino poiché porta ad un minore sviluppo della chioma consentendo una maggiore possibilità di intercettazione della luce nella zona dei grappoli. Freeman et Kliwer (1983) hanno riscontrato che l'irrigazione, il livello di potassio e il livello produttivo non incidono sul tasso di incremento del peso della bacca mentre il tenore dei solidi solubili diminuisce con l'incremento dell'irrigazione (per una sorta di diluizione).

1.2 I modelli di simulazione

Per lo studio di sistemi complessi talvolta si rende utile, se non necessario, ricorrere a delle loro rappresentazioni fisiche o matematiche che ne riproducano le relazioni con le variabili che li governano.

Un **sistema** viene definito da Banks e Carson, (1984) come un gruppo di elementi che sono uniti insieme in una qualche interazione o interdipendenza, la cui descrizione matematica dipende dallo scopo che si prefigge lo studio. L'analisi di un sistema può consistere nello studio ad un tempo determinato, oppure nello studio del suo comportamento nel tempo, in risposta a perturbazioni che tendano ad alterarne lo stato di equilibrio a cui tende. Tuttavia, svolgere un'analisi di sistema utilizzando il sistema reale, non è certo né pratico, né conveniente; è quindi necessario sviluppare un modello del sistema reale che ne inglobi i principali attributi (Donatelli, 1995).

I modelli sono strumenti in grado di generare delle simulazioni della realtà. Secondo Comincioli (2004) un **modello matematico** è un oggetto, un concetto che viene utilizzato per rappresentare in termini matematici un sistema nel mondo reale, mentre la **simulazione** è l'imitazione di un processo o di un sistema reale nel tempo (Banks e Carson, 1984). La simulazione genera così una “storia artificiale” del sistema e permette la valutazione di questa storia per operare inferenze concernenti le caratteristiche operative del sistema reale (Donatelli, 1995).

Le relazioni matematiche che governano un modello di simulazione possono fondarsi sulle leggi fisiche che lo descrivono, e in questo caso si parla di “modelli di processo” o “meccanicistici”, oppure possono basarsi su metodologie statistiche di varia natura, per le quali si parla di “modelli statistici” o empirici. Tuttavia anche nei modelli meccanicistici, vi è sempre un certo grado di empirismo, che tiene conto della complessità esterna alla scala scelta dall'analisi.

Perciò, i modelli di simulazione, divengono degli strumenti molto interessanti in quanto possono spiegare e prevedere, entro i limiti della definizione del sistema, un fenomeno anche molto complesso, governato da una serie numerosa di variabili diverse delle quali non è sempre possibile riuscire a scindere e quantificare il singolo contributo dal risultato finale. Si prestano ad essere dei validi strumenti sia per la ricerca (in particolare per lo studio sinottico di fenomeni ad ampia scala spaziale) sia come supporto per le decisioni manageriali aziendali. I fenomeni biologici, come ad esempio la fotosintesi, la fisiologia delle piante, la maturazione, i processi ontogenetici possono così essere “modellizzati” per essere studiati e descritti nella loro globalità.

Già dalla fine degli anni '60 i ricercatori hanno mostrato un interesse crescente all'uso dei modelli sia per scopi scientifici che applicativi. Molti lavori si basano sulla costruzione di modelli fenoclimatici, che descrivono cioè il decorso fenologico delle piante su base climatica prendendo principalmente la temperatura come variabile principale. L'esistenza di una precisa dipendenza dello sviluppo delle piante dalla temperatura è un dato acquisito da tempo. Già Réaumur, l'inventore dell'omonima scala termometrica, tra il XVII ed il XVIII secolo, individuò gruppi di piante che avevano esigenze di accumulazioni termiche simili per determinate fenofasi, definendo così una primitiva correlazione tra la temperatura e la crescita delle piante stesse (Robertson, 1973). Questo concetto ha gettato le basi per la definizione degli indici fenologici basati sull'accumulo termico, che sono stati sviluppati nel corso dei secoli fino ai giorni nostri.

In letteratura sono disponibili numerosi lavori sulle tematiche in questione. Si trovano modelli fenoclimatici sia di colture erbacee (Lawn e Byth 1973; Miglietta 1991; McMaster G. S. et al., 1992; Soltani et al., 1999; Angelini et al., 2000; Liu et al., 2007 e molte altre), che di colture arboree (Weinberger 1950; Richardson et al., 1974; Richardson, 1975; Cannel and Smith, 1983-1986; Fishman et al., 1987a – 1987b; Erez et al., 1988; Chuine, 2000; Simal et al., 2005; Hänninen e Kramer, 2007) basati generalmente sul soddisfacimento dei fabbisogni in caldo e in freddo per il raggiungimento delle varie fenofasi, dove per *fabbisogno* si intende la quantità di unità biotermiche necessaria al completamento di una determinata fase fenologica (Motisi et al., 1998).

Altri studi, analoghi a quelli già citati in precedenza per altre colture, hanno cercato di quantificare le esigenze termiche delle fenofasi della vite, in particolare per il germogliamento, la fioritura e l'invasatura. Nel merito, García de Cortázar-Atauri et al. (2005) hanno sviluppato il modello BRIN per la stima della data di germogliamento che tiene conto sia del fabbisogno in freddo per il superamento della dormienza, che del fabbisogno in caldo necessario per giungere al germogliamento nella fase di post-dormienza. Per la costruzione del modello sono stati impiegati due modelli utilizzati in arboricoltura, il modello Bidabe (1965), per il calcolo del fabbisogno in freddo (detto *Cold Action*) ed il modello di Richardson (1974) per la computazione delle unità di calore espresse come GDH (*Growing Degree Hours*). Nel 2009, García de Cortázar-Atauri et

al., hanno testato nuovamente il modello BRIN su un altro dataset confrontandolo con altri modelli, e dai risultati che hanno ottenuto è emerso che, almeno per la vite, il computo del fabbisogno in freddo per la fuoriuscita dalla dormienza sotto le condizioni climatiche attuali, non è un fattore cruciale per il miglioramento delle performance dei modelli. Cafarra e Eccel (2010) hanno cercato di ottenere un robusto modello fenologico in grado di fornire accurate predizioni delle date di manifestazione di alcune fasi fenologiche dello Chardonnay su scala regionale. Per fare questo hanno calibrato dei “sub-modelli” per il germogliamento, la fioritura e l’invasatura. Le elaborazioni hanno fornito dei buoni risultati ed un buon livello di accuratezza per la predizione di eventi fenologici in dataset esterni, in particolare per le fasi della fioritura e dell’invasatura, anche in annate mediamente più calde. Parker et al. (2011) hanno invece testato tre modelli fenologici ottimizzando i parametri per il modello che ha fornito i migliori risultati (*Spring Warming*) con la migliore parsimonia di parametri input.

Sono anche stati fatti dei tentativi di descrivere quantitativamente le complesse dinamiche di accumulazione degli zuccheri. Sadras e McCarthy, 2007 hanno testato un modello allometrico per l’accumulo degli zuccheri, particolarmente adatto alla modellazione di fenomeni complessi dove sono presenti dei tassi di crescita differenziali degli elementi presi in esame. Gli autori hanno definito dei coefficienti allometrici calcolati sulla pendenza della regressione tra gli zuccheri concentrati nell’acino e la massa dello stesso in una scala logaritmica, trovando che il modello si adatta bene per la definizione delle dinamiche di accumulo degli zuccheri. In un lavoro successivo Sadras et al. (2008) hanno cercato di modellare le dinamiche dei solidi solubili secondo un modello sigmoidale e quelle dell’acqua secondo un modello di relazione “dose-risposta” (*concentration-response type curve*) in 12 varietà di vite, riscontrando che le caratteristiche inerenti all’assimilazione carbonica non presentano un diretto collegamento con il momento della massima concentrazione dei solidi solubili.

Tramite altri approcci di modellazione fisiologica sono stati condotti degli studi per capire e descrivere i flussi di acqua e di carbonio che interessano le bacche durante la maturazione. Ad esempio, Dai et al. (2009) hanno cercato di simulare le dinamiche di concentrazione degli zuccheri (esosi) nelle bacche durante il corso della maturazione mediante un modello meccanicistico. Nel modello vengono considerati il cumulo

dell'import zuccherino, il metabolismo degli zuccheri ed il bilancio dell'acqua. Altri tentativi di modellazione fisiologica sono documentati in una recente review di Dai et al. (2010).

Cola et al. (2009), riconoscendo alla temperatura del grappolo un ruolo di *driving force* per numerosi processi fisiologici e biochimici nel corso della maturazione, hanno sviluppato un modello in grado di simulare la temperatura superficiale dell'acino (*BerryTone model*) tenendo conto dei differenti effetti di esposizione luminosa e di ombreggiamento.

Anche in campo ambientale sono stati utilizzati dei modelli sulla vite, sia per ricostruire gli andamenti termici di epoche passate a partire dalle date di vendemmia registrate nel corso dei secoli (Chuine et al., 2004; Meier et al., 2007; Mariani et al., 2009; García de Cortázar-Atauri et al., 2010) sia per studiare i possibili effetti che i cambiamenti climatici avranno sulla viticoltura (Webb et al., 2007; Moutinho-Pereira et al., 2009; Santos et al., 2010).

Tuttavia, in bibliografia si trovano pochi lavori (e solo degli ultimi anni) che definiscano dei modelli che si propongano come dei pratici strumenti applicativi per la previsione della maturazione dell'uva in funzione della raccolta, sia per il *management* aziendale, che per la pianificazione e gestione territoriale. In merito a quest'ultimo aspetto si desidera mettere in luce due lavori ritenuti significativi. Il primo è uno studio condotto da Dupin et al. (2010), che ha definito il seguente modello in grado di descrivere e di prevedere l'accumulazione degli zuccheri durante la fase di maturazione:

$$T_s = T_{sver} + \frac{T_s \max - T_{sver}}{1 + e^{\frac{t_{1/2} - J_{apv}}{\tau}}} \quad \text{Equazione 1}$$

dove:

J_{apv} = numero di giorni dopo l'inizio invaiatura

T_s = tenore in zucchero delle bacche;

T_{sver} = tenore in zucchero all'invaiatura;

$T_s \text{ max}$ = tenore in zucchero massimo;

$t_{1/2}$ = data dove T_s è uguale a $T_s \text{ max}/2$ (punto di inflessione della curva);

$1/\tau$ = pendenza della curva in $T_{\text{max}}/2$.

Questo approccio permette di poter fare previsioni sullo stato della maturazione in corso e di confrontare i dati di maturazione storici con quelli attuali. È interessante notare che questo modello non utilizza per la stima dell'accumulo degli zuccheri i dati meteo e permette di definire anche delle finestre di livelli zuccherini per contesti locali.

Nel secondo studio, ancora più recente, condotto da Sadras e Petrie (2011), viene definito un semplice modello che si adatta ad essere utilizzato dai viticoltori e dall'industria di trasformazione. In base ad una serie dati di maturazione (solidi solubili totali) di tre annate per sei zone differenti hanno definito una funzione di accumulo dei solidi solubili (di fatto zuccheri) in relazione al tempo termico (gradi giorno) come segue:

$$TSS = a + b \cdot TT \quad \text{se } \rightarrow TT \leq TT_x \quad \text{Equazione 2}$$

$$TSS = a + b \cdot TT_x \quad \text{se } \rightarrow TT > TT_x \quad \text{Equazione 3}$$

Dove:

- TSS = solidi solubili totali;
- a = intercetta;
- b = tasso di incremento dei TSS nella fase di accumulo lineare;
- TT = tempo termico;
- TT_x = soglia di tempo termico quando i TSS raggiungono la massima concentrazione (TSS_{max}).

I gradi giorno sono stati cumulati secondo la forma classica (con una soglia base di 10°C) a partire dal 1° dicembre (dell'emisfero australe). Il modello ha fornito dei buoni risultati per i quali si rimanda alla pubblicazione specifica. Tuttavia gli stessi autori

dichiarano che la corrispondenza tra le basi fisiologiche messe in evidenza dagli studi di Matthews et al. (2009) ed i loro risultati è dipesa principalmente dalla struttura del dataset.

1.3 Remote sensing

Il crescente interesse nei confronti delle tecnologie dell'agricoltura di precisione (*precision farming*) per la gestione delle colture interessa anche il campo della viticoltura. L'obiettivo della *precision viticulture* è quello di ottimizzare le risorse e di gestire la variabilità che si riscontra all'interno di un vigneto. Uno degli strumenti più potenti a disposizione di questa nuova frontiera dell'agricoltura è sicuramente il *remote sensing*, in grado di fornire informazioni in tempi molto rapidi, e per superfici molto estese. L'utilizzazione delle tecnologie di telerilevamento potrebbe dare interessanti risultati nelle applicazioni modellistiche.

Il telerilevamento o *remote sensing* è il processo di acquisizione di informazioni di un oggetto, di una superficie o di un fenomeno senza che lo strumento di misurazione sia in contatto fisico con esso (Lillesand et al., 2004; Campbell, 2002). Nell'utilizzo moderno tale terminologia si riferisce all'uso di sensori tecnologici aerei e spaziali in grado di recuperare informazioni di un fenomeno grazie alla propagazione di onde elettromagnetiche. Queste nuove tecnologie sono strumenti di grande utilità che possono consentire di recuperare una grande mole di informazioni in tempi molto contenuti e per superfici molto estese fino a coprire l'intera superficie terrestre.

Questa tecnologia ha subito un'evoluzione molto rapida e significativa dagli albori della sua comparsa ai giorni nostri. Dalla prima esperienza spaziale dell'uomo, che risale alla fine degli anni cinquanta, la tecnologia satellitare ci permette, oggi, di fare cose, dapprima impensabili, in moltissimi campi, dalla geolocalizzazione e dalla telefonia mobile alle applicazioni in agricoltura, allo studio della barriera corallina, alla comprensione dei fenomeni della desertificazione e della crescita urbana.

Meno di vent'anni dopo il lancio del primo satellite, nel 1972, la NASA lanciò nello spazio il primo dei satelliti Landsat utilizzati per lo studio dell'ambiente, delle risorse ambientali e dei cambiamenti naturali ed artificiali che interessano la superficie

terrestre. Landsat è una costellazione di satelliti che sono stati e sono tuttora sfruttati (ad oggi solo due sono ancora attivi, gli altri hanno esaurito la loro missione) con finalità non militari che fanno parte dell'omonimo programma aerospaziale, gestito principalmente dalla NASA e dal servizio geologico degli Stati Uniti d'America. Questi satelliti hanno fatto fotografie digitali specializzate della superficie terrestre per quasi quarant'anni per valutare le dinamiche dei cambiamenti causati sia dai processi naturali che da quelli umani (NASA). Il remote sensing è così maturato nel corso degli anni grazie ad una serie di programmi spaziali, in particolare americani, che sono stati ideati per lo sviluppo e la ricerca meteorologica. I satelliti TIROS, Nimbus, ERTS sono delle sperimentazioni che sono state fondamentali per la ricerca scientifica e la nascita delle odierne tecnologie satellitari e non di telerilevamento.

Verso la fine degli anni '90 la NASA avviò un programma per l'osservazione della Terra dallo spazio chiamato EOS (*Earth Observing System*) che si sarebbe sviluppato con il lancio di una serie di satelliti per l'osservazione del pianeta a lungo termine, nelle sue varie componenti, quali le terre emerse, la superficie del suolo, la biosfera, l'atmosfera e gli oceani (fonte NASA). In due satelliti lanciati in orbita rispettivamente nel 1999 (*EOS Terra*) e nel 2002 (*EOS Aqua*), per i quali collaborano molteplici agenzie internazionali, tra i vari strumenti di bordo è stato inserito anche il MODIS. Il **MODIS** (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) è uno spettroradiometro che raccoglie dati sulla distribuzione spettrale di potenza (ovvero la potenza per unità di superficie e per unità di lunghezza d'onda di un'illuminazione) in ben 36 bande spettrali con una risoluzione spaziale che varia da 250 m a 1000 m, consentendo di determinare alcuni indici di vegetazione. I due satelliti orbitano attorno al pianeta Terra effettuando due passaggi al giorno in prossimità di una stessa zona. A causa di una certa oscillazione delle traiettorie orbitali che si verifica ad ogni rivoluzione del globo, ripassano precisamente su di uno stesso punto, una volta ogni 16 giorni. Il satellite Terra passa sull'Italia verso le ore 10:30 del mattino e della sera, mentre il satellite Aqua, passa verso le 01:30 del mattino e del pomeriggio; insieme hanno la capacità di osservare e mappare l'intera superficie terrestre in un giorno, fornendo importanti informazioni per lo studio dell'atmosfera, degli oceani, della superficie terrestre e del bilancio dell'energia radiante del pianeta. L'obiettivo del MODIS è quello di misurare nuovi insiemi di dati

che sono importanti per vari studi della Terra, vista però come sistema globale con particolare attenzione alle interazioni tra l'atmosfera, la terra e gli oceani (Barnes et al., 1998).

I dati grezzi misurati dal MODIS sono resi disponibili giornalmente, ma alcuni prodotti già elaborati (come gli indici di vegetazione che in seguito verranno descritti) vengono calcolati ad una risoluzione temporale di 8 o 16 giorni a seconda della risoluzione spaziale del dato. Nel caso in esame i dati avevano una risoluzione temporale di 16 giorni, dove vengono forniti i dati recuperati nelle migliori condizioni di ciascun periodo. Questo perché fenomeni di disturbo, come la copertura nuvolosa, interferiscono significativamente con le rilevazioni dello strumento.

1.4 Gli indici di vegetazione

La definizione e la misurazione degli indici di vegetazione tramite il remote sensing è stata possibile grazie alle proprietà della clorofilla presente nei tessuti verdi delle piante. La caratteristica del pigmento della clorofilla di assorbire selettivamente onde elettromagnetiche ha permesso di capire come la riflettanza e l'emittanza variano al variare della specie vegetale, dello stato idrico e nutrizionale, dello spessore e della forma della foglia, nonché dall'età (Hatfield et al., 2008). La riflettanza è un indice, utilizzato in ottica, che misura la quantità di radiazione luminosa riflessa da una superficie rispetto alla radiazione incidente, quindi la quota energetica luminosa che non viene assorbita (è quindi un valore adimensionale), mentre l'emittanza misura la densità di energia elettromagnetica, ovvero la potenza, che viene emessa per unità di superficie e si esprime in W/m^2 .

Un **indice di vegetazione** è un'equazione matematica in grado di esprimere delle relazioni quantitative tra i dati telerilevati e parametri della vegetazione (Confalonieri). Il prodotto di questa equazione viene anch'esso definito indice di vegetazione.

L'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) è il primo ed il più comune indice di vegetazione che è stato usato nel telerilevamento satellitare per il monitoraggio ambientale della vegetazione. La sua prima definizione viene attribuita a Rouse et al. (1973) poi ripresa da Tucker (1979) per il monitoraggio della vegetazione in seguito ad

un approfondimento di un concetto discusso da Kriegler et al. (1969). Il suo campo di applicazione è molto vasto e non viene impiegato solo nelle piattaforme spaziali ma anche in strumenti portatili. È un indicatore basato sulla riflettanza di un corpo (vegetazione) di alcune bande delle onde dello spettro elettromagnetico, in particolare quelle del rosso e del vicino infrarosso. Il canale del rosso è localizzato nella zona di massimo assorbimento della clorofilla, mentre quello dell'infrarosso si trova nel plateau di alta riflettanza, dovuto alle componenti della parete cellulare (Altobelli et al., 2007) L'NDVI viene calcolato mediante la seguente espressione:

$$NDVI = \frac{(NIR - red)}{(NIR + red)} \quad \text{Equazione 4}$$

- dove *NIR* rappresenta il vicino infrarosso (*Near InfraRed*), mentre *red* rappresenta la banda del rosso visibile. Al numeratore ci sono le quote di radiazione riflessa, al denominatore le quote di radiazione incidente, che colpiscono la superficie di interesse.

Grazie all'NDVI si possono identificare velocemente le aree vegetate e le loro condizioni, e rimane anche a distanza di anni l'indice più noto ed utilizzato nel telerilevamento multispettrale dello stato di salute e di stress delle piante, dato che tiene anche conto dello stress idrico, della siccità e in generale del bilancio idrico.

Così, una vegetazione sana e vigorosa assorbe una quota maggiore della luce mentre riflette maggiormente la banda elettromagnetica del vicino infrarosso registrando così alti valori di NDVI. Viceversa, una vegetazione sparsa, degradata o poco funzionante riflette maggiormente la luce visibile che il vicino infrarosso riportando contrariamente bassi valori di NDVI. Tuttavia le misurazioni da satellite sono affette da alcune limitazioni poiché risentono delle condizioni atmosferiche (Holben, 1986), della saturazione dei suoi valori (Lillesaeter, 1982) ed è sensibile all'effetto *background* (effetto sfondo) del suolo (Huete, 1987).

Così per migliorare la qualità dell'NDVI è stato elaborato un altro indice di vegetazione, l'EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Questo viene calcolato in modo simile al precedente ma viene corretto da alcune distorsioni della luce riflessa causate dalle

particelle presenti nell'aria e dalla copertura del suolo al di sotto della vegetazione (la correzione dell'algoritmo viene fatta grazie all'utilizzazione della banda del blu). Inoltre consente di evitare la saturazione nelle aree interessate da un'abbondante presenza di clorofilla, quali le foreste tropicali (Mauro e Carli, 2006). In ogni caso va ricordato che nessuno degli indici è in grado di eliminare completamente tutti i disturbi che possono interferire con le rilevazioni satellitari, come le interferenze date dalle nuvole, dagli aerosol, e dai riflessi vari provocati dal sole. L'equazione per il calcolo dell'EVI è la seguente:

$$EVI = \frac{G \cdot (NIR - red)}{NIR + C1 \cdot red - C2 \cdot blue + L} \quad \text{Equazione 5}$$

Dove:

- NIR, red, blue sono delle bande spettrali rispettivamente dell'infrarosso, del rosso e del blu;
- C1 e C2 sono coefficienti utilizzati per la correzione degli aerosol in funzione della riflettanza nel blu;
- L è un coefficiente per la correzione del suolo;
- G è il “*gain factor*”.

I coefficienti utilizzati nell'algoritmo sono: L=1, C1=6, C2=7.5, G=2.5.

Anche se l'EVI ha la capacità di migliorare la qualità del dato accade spesso che la copertura nuvolosa, gli aerosol di particelle ed il riverbero del sole saturare alcuni pixel e distorcono le immagini rendendo gli stessi pixel indecifrabili.

Secondo Hatfield et al. (2008) il telerilevamento è un'apprezzabile applicazione anche in ambito agronomico, dove può fornire preziose informazioni tanto ai ricercatori, quanto agli operatori tecnici per le decisioni manageriali. Bisogna comunque utilizzare con criterio queste applicazioni valutando attentamente i mezzi, le disponibilità e gli obiettivi da raggiungere. Quando si fa riferimento a dati recuperati tramite remote sensing bisogna sempre tenere in considerazione la risoluzione spaziale e quella

temporale dei dati. Differenze delle varie risoluzioni possono diventare fattori limitanti per l'uso dei dati di telerilevamento in varie applicazioni e possono limitare la possibilità di confrontare dati provenienti da strumenti di misurazione diversi. In conclusione non c'è un metodo generale raccomandato per l'analisi e l'utilizzo dei dati in quanto ogni ambito di risoluzione genera informazioni a differenti livelli (Vincikova et al., 2010).

1.5 Impostazione dell'analisi

Vista la carenza di studi e di approcci scientifici nella definizione di modelli di previsione della maturazione dell'uva per la gestione di situazioni di utilità pratica, dovuta alla comprensione parziale del processo della maturazione, si è deciso di orientare il presente lavoro al sondaggio di questa tipologia di modelli. Per lo studio è stato utilizzato un ampio dataset di dati inerenti la maturazione delle bacche.

Come lavoro di partenza è stato deciso di fare riferimento alla sola componente degli zuccheri, tuttora il parametro di riferimento principale per la determinazione dell'epoca di raccolta.

Sono stati studiati tre modelli di previsione della maturazione dell'uva. Uno basato semplicemente sulla data da calendario, uno imperniato sul computo delle GDD ed infine uno misto, basato nella fase iniziale sull'accumulo termico (GDD) e in seguito sull'accumulo dell'indice di vegetazione EVI misurato mediante il MODIS tramite remote sensing.

Nella prima fase del lavoro sono state condotte delle analisi esplorative del dataset dei dati di maturazione. Ciò ha consentito di definire la metodologia ritenuta più idonea per procedere al collaudo dei vari modelli. Inizialmente sono state fatte delle semplici osservazioni generali sui dati grezzi osservando graficamente le dinamiche di maturazione delle bacche, riguardo all'accumulo degli zuccheri e alla degradazione dell'acidità per le cultivar oggetto di esame. In seguito sono state fatte delle indagini esplorative per la scelta dell'approccio da utilizzare con il modello EVI. Una volta deciso il criterio di procedura i modelli sono stati calibrati e validati (per ogni cultivar) per alcune classi di tenori zuccherini di riferimento sulla base di una metodologia statistica nota come "*cross validation*". Infine i risultati sono stati descritti ed analizzati.

2 Materiali e metodi

2.1 Zona di studio

2.1.1 Morfologia, climatologia, e attitudine culturale

Da un punto di vista morfologico il Veneto è protetto a nord – nord ovest dalle Alpi e ad est confina con il mare. Si definiscono così due aree climatiche: la zona montana e la fascia collinare e di pianura. Il clima nella zona montuosa è di tipo alpino, caratterizzato da inverni freddi e lunghi (dove le temperature medie sono normalmente inferiori agli 0°C) ed estati fresche; nel resto della regione è di tipo sub-continentale, mitigato dalla presenza del mare. Il clima della regione si presenta nel complesso temperato.

Secondo un report dell’Agenzia Regionale per la Prevenzione e la Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV, 2007), che ha analizzato delle serie storiche di temperatura e piovosità di oltre cinque decenni (1950-2004) la temperatura media massima annuale della regione si aggira intorno ai 17°C, quella media minima si attesta sui 7°C e la piovosità media annua è di circa 1100 mm.

La vite è storicamente e tradizionalmente una coltura agraria tipica del Veneto. Nel 2010 la superficie totale regionale destinata alla produzione di uva da vino era pari a 76.579 ha (ISTATA) su una SAU totale di 806.320 ha (Coronella, 2011). Da sola copre il 9.5% della SAU regionale con una produzione di uva che nel 2010 è stata pari a 111.478 t (ISTATA). Nel 2000, anno del 5° Censimento dell’Agricoltura, la superficie vitata in Veneto era pari a 73.636 ha su una SAU totale di 852.744 ha, con un’incidenza sulla stessa del’8.6% (ISTATb). L’aumento percentuale contenuto è dovuto sia ad una riduzione della SAU totale che al sensibile aumento della superficie vitata, che di fatto aumenta sensibilmente. Considerando la superficie colturale rispetto alla SAU, al primo posto si trovano i seminativi (70.4%) in prevalenza rappresentati dai cereali, a seguire i prati e i pascoli (16.0%), le colture legnose agrarie (con il 13.4%) ed infine gli orti familiari (0.2%).

2.1.2 Dataset di maturazione

I dati sono stati raccolti dal Centro per l'Educazione, la Cooperazione e l'Assistenza Tecnica (C.E.C.A.T.) di Castelfranco Veneto, ed in particolare dal Dott. Paolo Belvini e dai suoi collaboratori. Il C.E.C.A.T. è un organismo accreditato dalla Regione Veneto per l'erogazione della formazione continua prevalentemente nel settore primario agricolo ed agroindustriale Veneto che svolge anche attività di assistenza tecnica e di sperimentazione. I dati raccolti derivano dall'attività ormai pluriennale di assistenza tecnica sul campo e coprono complessivamente un periodo di un ventennio, dal 1992 al 2010 (19 anni), coinvolgendo le quattro varietà poc'anzi menzionate (Appendice 1).

Sono stati effettuati i seguenti rilevamenti sulle dinamiche della maturazione dei frutti:

- tenore zuccherino (misurato con un rifrattometro ed espresso in gradi Brix);
- acidità totale (misurata per titolazione ed espressa in g/l di acido tartarico);
- pH (rilevato con un piaccametro);
- volume delle bacche (misurato mediante l'ausilio di un cilindro graduato con acqua ed espresso come volume in ml di 200 bacche).

Per quanto riguarda l'analisi chimica i campionamenti sono stati fatti circa con una cadenza settimanale nel corso della stagione vegetativa fino alla data della vendemmia, per un totale approssimativamente, di 8-10 campioni per varietà per anno.

I campionamenti sono iniziati prima dell'invasatura (mediamente una dozzina di giorni prima), quando il grado zuccherino era inferiore a 5°Brix, in modo da costruire tutta la curva di maturazione. Infatti, come si mostrerà in seguito, all'inizio dell'invasatura l'accumulo degli zuccheri si trova ad uno stadio più avanzato (vedi Tabella 2-1). Per la misurazione del grado zuccherino è stato utilizzato un rifrattometro ottico portatile comunemente utilizzato in viticoltura.

I campioni dei frutti utilizzati di volta in volta per fare le misurazioni sono stati raccolti prelevando da 30 a 60 porzioni di grappoli per appezzamento che sono stati

asportati da tutte le parti dei raspi (dalle parti apicali e mediali raccolte sia dal rachide principale che dalle ali dei grappoli alati) e scelte casualmente ad ogni campionatura camminando all'interno del vigneto (con l'accortezza di distribuire abbastanza uniformemente i punti di prelievo). I campioni appena raccolti sono poi stati messi in sacchetti di plastica, quindi etichettati e conservati in una borsa frigo fino all'arrivo a destinazione alla fine del giro.

2.1.3 Siti di rilevazione dati

I dati relativi alle dinamiche della maturazione della prova in oggetto, sono stati raccolti in 52 aziende agricole distribuite su quasi tutta la provincia di Treviso e in una località della provincia di Padova (Campodarsego) nel corso degli anni dal 1992 al 2010. Nella zona di Valdobbiadene vi è una concentrazione di aziende che coltivano il vitigno "Glera" e "Glera lungo" per la produzione del vino Prosecco DOC e DOCG.

Si è scelto di lavorare su quattro varietà, due a bacca bianca (Chardonnay e Glera) e due a bacca rossa (Cabernet Sauvignon e Merlot), cioè quelle maggiormente presenti nella zona nonché quelle di cui si disponeva del maggior numero di dati.

I trattamenti, che consistono nelle combinazioni di cultivar/sito, sono stati in tutto 86 (questo numero è ben superiore a quello delle aziende stesse perché un'azienda può coltivare più varietà in luoghi diversi).

Per due aziende in provincia di Treviso (a Pezzan d'Istrana, con dati disponibili dal 1986 ad oggi, e a Venegazzù, con dati sono disponibili a partire dal 1992) sono fruibili anche osservazioni sulle fasi fenologiche (classificate secondo Baggiolini, 1952).



Figura 4: Carta del Veneto con i confini provinciali. I puntini neri indicano i siti di prelievo per i campionamenti.



Figura 5: Ingrandimento dell'area di studio della Figura 4 con i confini provinciali del Veneto. La provincia con più punti è Treviso, l'altra è quella di Padova.

2.1.4 Dati meteo

Come dati meteo sono stati utilizzati i dati del dataset grid E-OBS messo a disposizione dall'ECA&D (*European Climate Assessment & Dataset*), derivanti da una rete di rilevamento europea che comprende oltre 5000 stazioni meteorologiche sparse in 62 Paesi dell'Europa. Il grid ha una risoluzione spaziale di 0.25° e i dati che sono stati utilizzati nel presente lavoro sono stati estratti dai sei nodi che ricoprono l'intera area oggetto di studio.

Per poter calcolare le GDD è stato effettuato un *downscaling* dei dati OBS per ogni singolo sito, generando delle distinte serie storiche di temperatura minima e massima. Il *downscaling* è stato ottenuto attraverso interpolazione dei tre nodi OBS più vicini tramite il metodo dell'*Inverse Distance Weighted*. È un metodo utilizzato per l'interpolazione spaziale di dati che consente di attribuire un valore ad un dato punto di coordinate note, mediante una somma ponderata del valore di "n" punti, dei quali si conosce sia la posizione che il valore.

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

Equazione 6

Dove:

- n = numero dei punti sparsi;
- f_i = sono i valori della funzione dei punti sparsi;
- w_i = è il peso assegnato ad ogni funzione dei punti scelti.

$$w_i = \frac{h_i^{-2}}{\sum_{j=1}^n h_j^{-2}}$$

Equazione 7

Dove:

- h_i = è la distanza tra il punto sparso ed il punto da valutare calcolata come:

$$h_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad \text{Equazione 8}$$

Dove:

- x e y sono le coordinate del punto oggetto di valutazione;
- x_i e y_i sono le coordinate dei punti scelti per l'interpolazione spaziale.

2.1.5 Dati MODIS

Nelle elaborazioni che sono state fatte è stato utilizzato esclusivamente l'EVI, perché da prove preliminari aveva fornito risultati migliori.

I dati MODIS disponibili sono stati richiesti sito per sito in relazione alle coordinate geografiche dei vigneti, dal portale http://daac.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/GLBVIZ_1_Glb/modis_subset_order_global_col5.pl (agosto 2011). Per ogni singolo vigneto il satellite ha fornito l'indice di vegetazione per una griglia quadrata dal lato di 1 km attorno al punto (considerando il quadrato centrale 1250 m per lato), formata da 81 pixel (9x9) di 250x250 m. Il baricentro del pixel centrale corrisponde alle coordinate geografiche del vigneto e per le elaborazioni dell'indice di vegetazione è stato utilizzato il valore EVI medio dell'area di 1 km² intorno al punto.

2.2 Formattazione dei dati

I dati sono stati forniti in un formato non immediatamente gestibile in modo automatizzato, e prima di operare qualsiasi tipo di analisi, è stato necessario procedere alla sistemazione ed alla "ristrutturazione" della banca dati.

Per poter effettuare le correlazioni tra le curve di maturazione e i dati MODIS dell'EVI, non necessariamente coincidenti da un punto di vista temporale, entrambi i dati sono stati interpolati linearmente in modo tale da poter disporre di una risoluzione giornaliera.

2.3 *Analisi esplorativa del database*

L'analisi esplorativa preliminare ha avuto lo scopo di valutare il grado di correlazione tra tenore zuccherino e alcune variabili guida (data, GDD e indici di vegetazione). In base alle indicazioni ottenute si è proceduto alla formulazione di modelli di accumulo dello zucchero in funzione di queste variabili.

L'analisi è stata condotta valutando graficamente le correlazioni e variabilità interannuale tra le variabili guida e i gradi Brix per i siti aventi maggior numero di annate disponibili.

Per quanto riguarda il modello basato sul MODIS, l'analisi esplorativa ha avuto inoltre lo scopo di stabilire quale indicatore usare, NDVI o EVI. Si è optato di utilizzare i valori del MODIS Terra per il semplice motivo di non perdere due annate di dati (infatti il satellite Aqua ha iniziato a registrare dati con due anni di ritardo).

2.4 *Descrizione dei modelli di simulazione*

Dopo questa prima indagine, che è stata necessaria per capire come impostare l'analisi, si sono definiti tre modelli di previsione degli zuccheri, basati sulle tre variabili guida analizzate:

- ❖ Modello DOY
- ❖ Modello GDD
- ❖ Modello EVI
- ❖ Modello EVI × temperatura (massima e media)

2.4.1 Il modello DOY

Il modello usa come variabile guida la data, espressa come giorno dell'anno (DOY= *Day Of the Year*).

Sono stati scelti dei livelli di concentrazione zuccherina di riferimento, variabili per ogni cultivar, ma riconducibili ai seguenti livelli di maturazione: iniziale, intorno ai 10°, intermedio, intorno ai 15° e ottimale, almeno 18°. Non è stato possibile fissare livelli unici per tutte le cultivar, in quanto presentano diverse risposte varietali e diversi criteri tecnici di utilizzazione.

Per ogni livello di maturazione e per ogni sito è stato calcolata la data media (espressa come giorno dell'anno) in cui si è osservato quel grado zuccherino specifico.

Questo modello, in cui la maturazione non tiene conto delle variabili ambientali, è stato considerato come ipotesi nulla, su cui testare l'efficacia degli altri due.

2.4.2 Il modello GDD

Seguendo la procedura precedente è stato definito il modello GDD (*Growing Degree Day*). Per il calcolo delle GDD cumulate si è deciso di utilizzare la forma classica del modello mediante la seguente equazione:

$$GDD = \sum_i^n \left(\frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} - T_b \right) \quad \text{Equazione 9}$$

dove T_{\min} e T_{\max} rappresentano rispettivamente le temperature minima e massima giornaliera, mentre T_b rappresenta la temperatura base, ovvero la soglia termica al di sotto della quale non si verifica la crescita e quindi le temperature non vengono considerate utili ai fini del conteggio della sommatoria termica. Per la vite la temperatura base è pari a 10°C come documentato in altri lavori (Winkler e Williams, 1939 citato da Pellegrino et al., 2005; Calò et al., 1997). La sommatoria dei gradi giorno è iniziata a partire dal primo giorno dell'anno. Il modello si basa su due assunzioni:

- accumulo lineare della temperatura;
- accumulo termico nullo quando la temperatura è inferiore alla temperatura base.

Ciò premesso, in modo analogo al precedente, sono state calcolate le medie interannuali, per ogni sito e per ogni livello di maturazione, delle GDD in corrispondenza del raggiungimento delle concentrazioni di zuccheri prefissate.

2.4.3 Il modello EVI

Gli indici di vegetazione dipendono in maniera complessa da molte variabili, tra cui la temperatura, il bilancio idrico del sistema colturale, e altre variabili ambientali. In pratica, forniscono un valore integrato dello stato di “benessere” della coltura perciò rispetto al modello GDD ci si aspetta una maggiore capacità di tener conto della complessità e specificità pedoclimatica del sito, soprattutto per quel che riguarda le variazioni del bilancio idrico. Infatti l’EVI tiene conto della capacità fotosintetica delle piante e mantiene la sensibilità anche in presenza di vegetazioni con un indice LAI elevato, dimostrando una buona correlazione con la produzione primaria lorda (Rahman et al., 2005).

Dato che si lavora su livelli di maturazione, che sono il risultato di un accumulo di zuccheri, viene considerato l’effetto dell’EVI cumulato. Analogamente ai modelli precedenti, per ogni combinazione sito/varietà e per ogni livello di Brix di riferimento, si calcolano i valori medi interannuali di EVI corrispondenti.

A questo proposito si pone il problema di quando cominciare a calcolare l’accumulo dell’indice, il che equivale a chiedersi da quando l’indice influenza la maturazione. È stato quindi necessario condurre un’analisi preliminare del modello, finalizzata a determinare il momento di inizio ottimale.

2.4.4 Ottimizzazione accumulo EVI

Inizialmente l’EVI è stato cumulato a partire dalla data di inizio invaiatura. Questo perché altri lavori (Coombe, 1992; Keller e Hrazdina, 1998; Chervin et al., 2004), ma anche la stessa consuetudine di campo, indicano nell’invaiatura il momento di inizio della maturazione. Dall’analisi delle curve generate si è notato che questo mostrava risultati incoraggianti, ma allo stesso tempo anche dei margini di miglioramento. In particolare, per i siti in cui erano disponibili le date di invaiatura, è stato possibile notare che quando

questa viene osservata l'accumulo di zuccheri si presenta avviato, con livelli di Brix anche fino a 8-9°. In pratica, considerando l'invaiaitura come momento di partenza, si perde parte dell'informazione utile contenuta nell'indicatore di vegetazione. Nella (Tabella 2-1) si possono notare i tenori zuccherini medi.

Tabella 2-1: Nella tabella sono riportati i giorni di anticipo medio dell'inizio delle rilevazioni rispetto all'inizio dell'invaiaitura (secondo il Baggiolini, 1952), il grado medio registrato alla prima misurazione ed all'inizio invaiaitura suddivisi per cultivar e località.

SITO	VITIGNO	MEDIA GIORNI DI ANTICIPO RILIEVI RISPETTO ALL'INVAIATURA	GRADO BRIX MEDIO ALLA PRIMA MISURAZIONE	BRIX MEDIO ALLINIZIO INVAIATURA
Istrana	Cabernet S.	10.8	4.1	5.8
Istrana	Chardonnay	10.3	4.2	5.6
Istrana	Merlot	9.7	4.1	5.3
Istrana	Prosecco	11.6	4.6	6.1
Venegazzù	Cabernet S.	16.1	3.8	5.3
Venegazzù	Chardonnay	12.8	3.5	4.6
Venegazzù	Merlot	13.2	4.1	5.4
Venegazzù	Prosecco	15.8	4.3	5.9

Si è pensato quindi di non considerare più l'invaiaitura come *starting point* per il cumulo dell'EVI, ma bensì le GDD corrispondenti all'EVI ottimale, calibrate su più anni. Così il modello EVI è stato testato variando inizialmente tra 0 e 1000 GDD con step di 100, e perfezionando successivamente l'analisi con step prima di 50 e poi di 10 GDD.

2.4.5 Il Modello EVI × temperatura

Sempre nell'analisi preliminare sono state testate altre due varianti del modello EVI. Sulla base di altri lavori (Sims et al., 2008; Nagler et al., 2005) si è provato a cumulare l'EVI moltiplicato per la temperatura massima. I risultati ottenuti basati sulla curva di regressione non hanno mostrato miglioramenti così significativi e questi approcci sono stati così accantonati.

2.5 Valutazione statistica dei modelli

I modelli sono stati valutati sotto un profilo applicativo, simulando una procedura di monitoraggio dell'andamento dell'accumulo di zuccheri a partire da dati facilmente disponibili (date di calendario, temperatura, dati MODIS) in tempo reale, per orientare la scelta del momento di vendemmia.

L'accuratezza delle stime è stata valutata attraverso una procedura di “*cross validation*”. Questo metodo consiste nel suddividere il dataset in due sottoinsiemi complementari, detti “*training set*” e “*testing set*”. Sul training set viene calibrato il modello, le cui previsioni vengono testate sull'insieme complementare.

Nel caso in esame, per ogni cultivar dagli n anni di dati disponibili sono stati estratti dei training set di $n-1$ dati escludendo a turno ciascuna annata, che è stata usata come testing set, per valutare le stime. Si è quindi ottenuta una distribuzione di scarti (stima-misura) per ogni combinazione cultivar/sito. Per il confronto tra i modelli si è quindi assunto che un modello è tanto più accurato quanto più ristretta è la distribuzione degli scarti intorno allo zero, rispetto a quella ottenuta dal modello nullo. In particolare è stata proposta la percentuale di scarti compresa nell'intervallo di ± 1 grado Brix come misura dell'accuratezza del modello, anche in vista di un uso applicativo della procedura.

3 Risultati

3.1 Analisi esplorativa

3.1.1 Relazione tra tenore zuccherino e data

Considerando tutti i dati a disposizione possiamo notare che la curva dell'andamento dell'accumulo degli zuccheri nel corso degli anni, in relazione ai giorni dell'anno è meglio approssimata da una curva logistica rispetto alla retta. Si nota una maggiore dispersione dei dati nella fase iniziale rispetto a quella terminale (Figura 6).

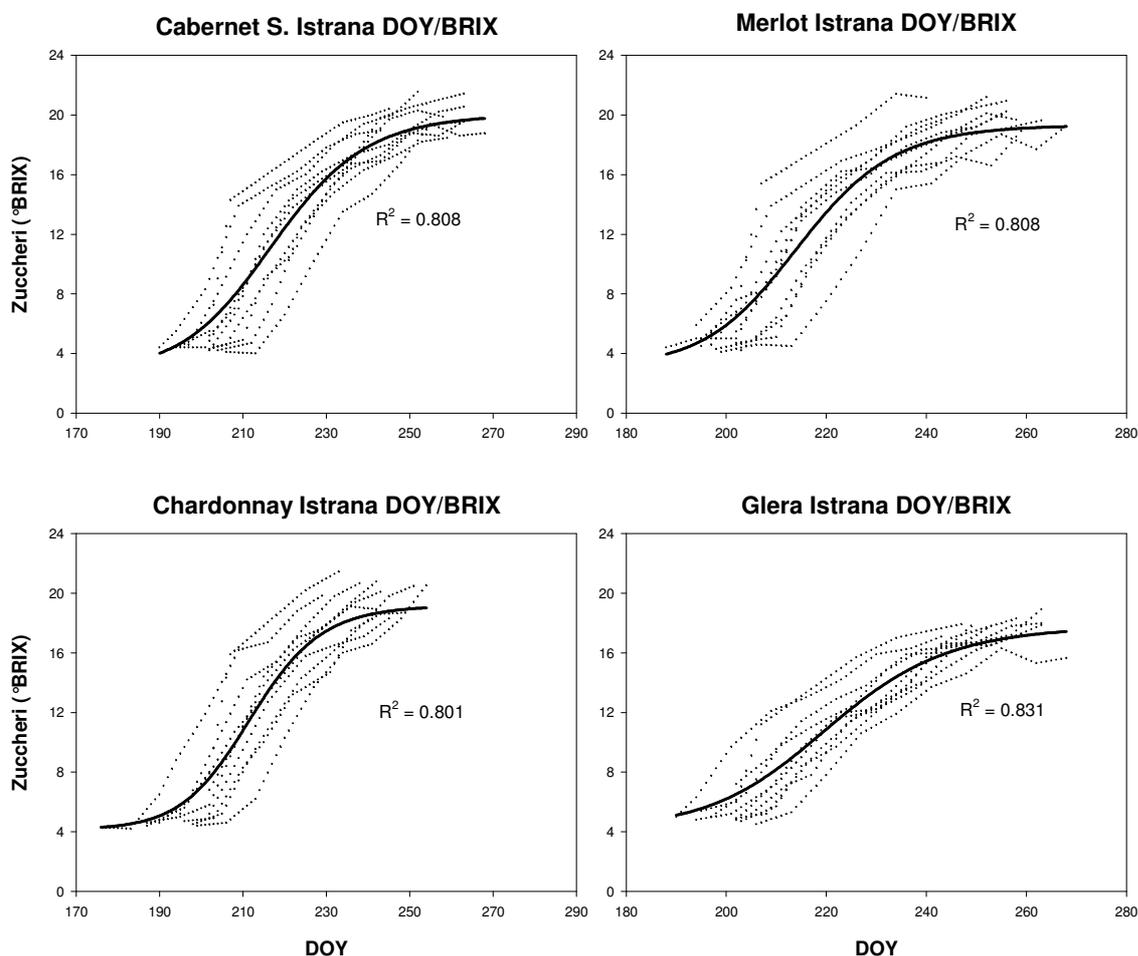


Figura 6: I grafici mostrano l'andamento dell'accumulo degli zuccheri in base ai DOY nell'azienda di Istrana dal 2000 al 2009. Per ogni grafico vengono anche riportate le curve di regressione logistica a quattro parametri con il coefficiente di determinazione.

Come si può notare, le rilevazioni cominciano mediamente tra i 180-200 DOY e si protraggono per circa 80-100 giorni, terminando verso i 260-280 DOY. L'inizio dei campionamenti è stato deciso, di anno in anno, in base alle date di fioritura ed alla pausa di accrescimento delle bacche che precede l'invasatura, in base al decorso delle fasi fenologiche nelle aziende di Istrana e di Venegazzù.

3.1.2 Relazione tra tenore zuccherino e GDD

Il tenore zuccherino delle bacche ha mostrato un certo grado di dipendenza anche dalle GDD, com'è possibile notare dai grafici (Figura 7). In questo caso, il grado di "goodness of fit" della curva logistica è stato superiore rispetto a quello delle curve precedenti. Questo lo si può notare osservando il coefficiente di determinazione, che si mostra elevato in tutte le circostanze (maggiore o al massimo uguale a 0.9).

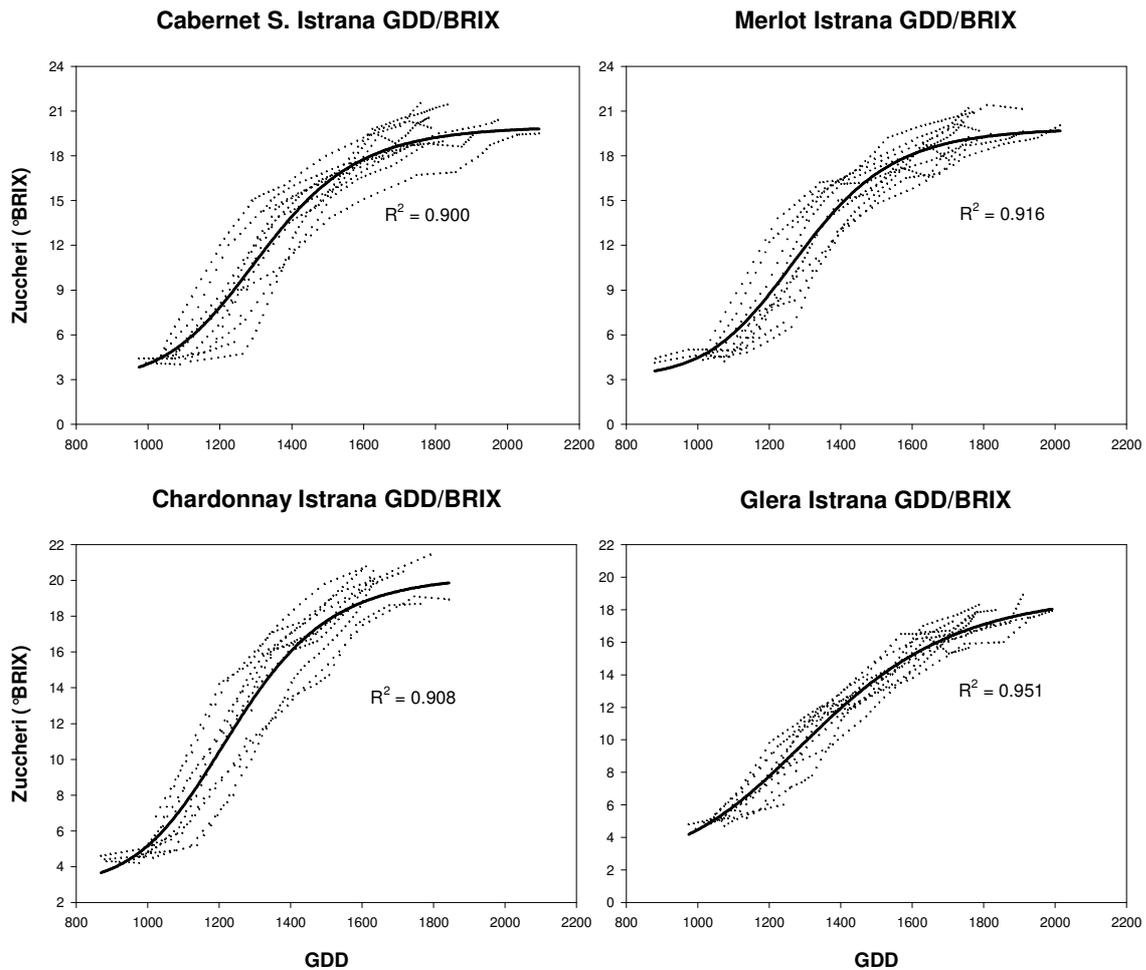


Figura 7: I grafici mostrano l'andamento dell'accumulo degli zuccheri in base alle GDD nell'azienda di Istrana dal 2000 al 2009. Per ogni grafico vengono anche riportate le curve di regressione logistiche a quattro parametri con il coefficiente di determinazione, che in tutti i casi è sempre molto elevato.

3.1.3 Relazione fra tenore in zuccheri ed EVI

I grafici (Figura 8) mostrano la cumulazione dell'indice di vegetazione a partire dalla data di invaiatura media, calcolata in base alle GDD corrispondenti derivate da osservazioni fenologiche poliennali nell'azienda di Istrana. Come si può notare, la relazione che lega le due variabili, modellata anche qui con una curva logistica, è buona, con dei coefficienti di determinazione superiori a 0.86.

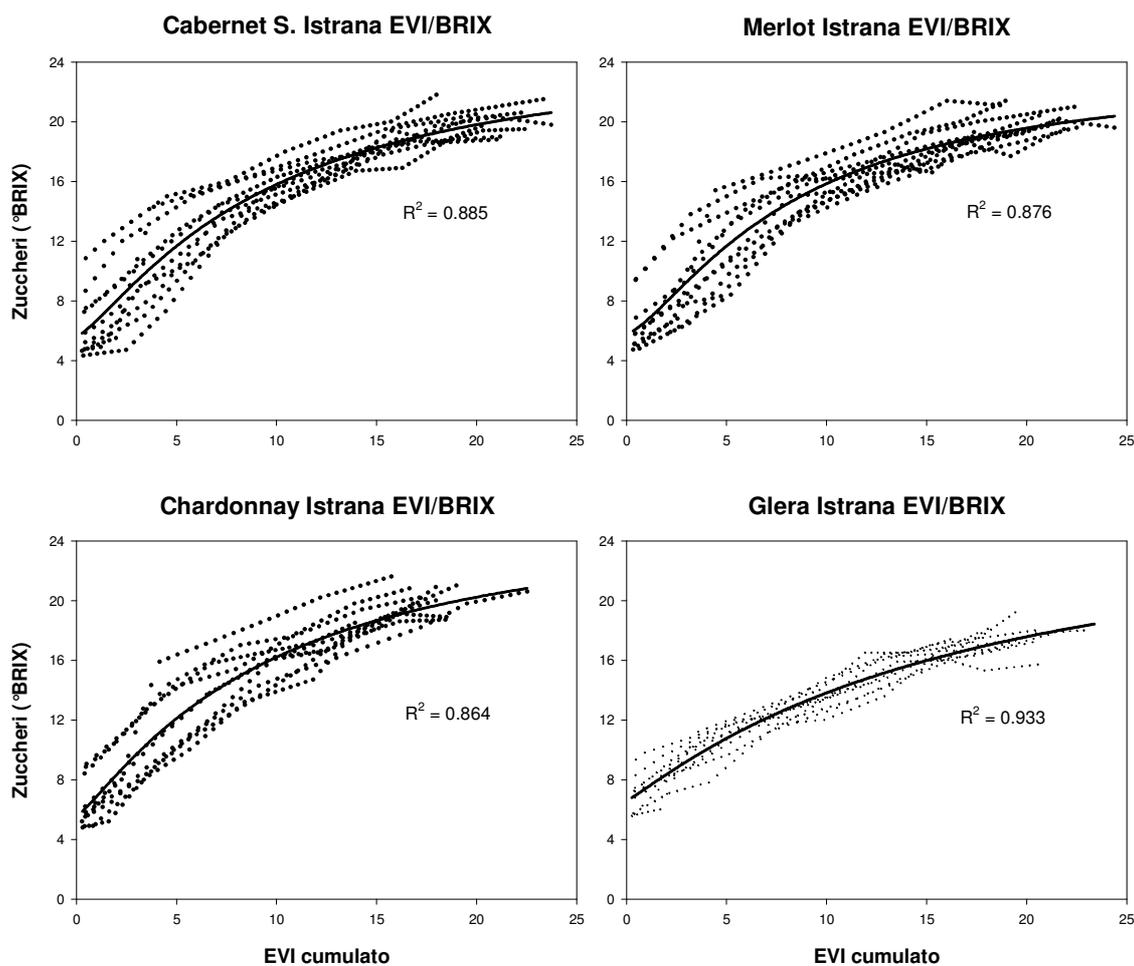


Figura 8: Andamento dell'accumulo degli zuccheri in funzione dell'accumulo dell'EVI a partire dal momento di inizio invaiatura. I dati si riferiscono ad un'azienda di Istrana per gli anni dal 2000 al 2009. Per ogni cultivar vengono riportate le curve di regressione logistica a quattro parametri con i relativi coefficienti di determinazione.

La cumulazione dell'EVI moltiplicato per la temperatura (media o massima giornaliera) non ha mostrato miglioramenti marcati rispetto alla cumulazione del solo EVI, pertanto i risultati non sono stati riportati.

3.2 Modellazione della maturazione

Le distribuzioni di scarti delle stime ottenute applicando la cross validation ai quattro modelli sono state suddivise in classi di ampiezza pari a 1°Brix, per le quali sono state calcolate le frequenze relative.

3.2.1 Modello DOY

La Figura 9 riporta i risultati delle elaborazioni per tenori di zuccheri corrispondenti a tre livelli di maturazione: precoce (10°B), intermedio (15°B) e tardivo (18°B per uve a bacca bianca, 20°B per uve a bacca rossa). Le percentuali di dati che ricadono nell'intervallo considerato ottimale ($\pm 1^\circ\text{Brix}$) vengono riportate per ogni cultivar nella Tabella 3-1

In linea generale le distribuzioni degli scarti fornite dal modello nullo non sono uniformi e presentano andamenti altalenanti. Una buona distribuzione di frequenza si può associare ad una curva normale a base stretta, cioè con una limitata dispersione dei dati rispetto al valore centrale. Per le uve a bacca rossa sono state ottenute le migliori distribuzioni di frequenza per tenori di zucchero elevati (20°Brix), mentre per gli altri livelli zuccherini si dimostrano scadenti. I risultati peggiori sono stati ottenuti per lo Chardonnay dove non è possibile riconoscere per nessun livello di zucchero un buon andamento delle curve. Anzi, si possono notare per tutti i gradi Brix considerati picchi di frequenza lontani dal valore centrale. Per il Glera la miglior curva è quella fornita della stima per il grado intermedio (15°Brix) anche se presenta una base larga ed un picco centrale contenuto, indice di una maggiore dispersione dei dati.

L'accuratezza delle stime a tenori Brix tardivi (18°Brix per le cultivar a bacca bianca, 20°Brix per quelle a bacca rossa) varia da un minimo del 32% nel Glera ad un massimo del 68% nel Merlot.

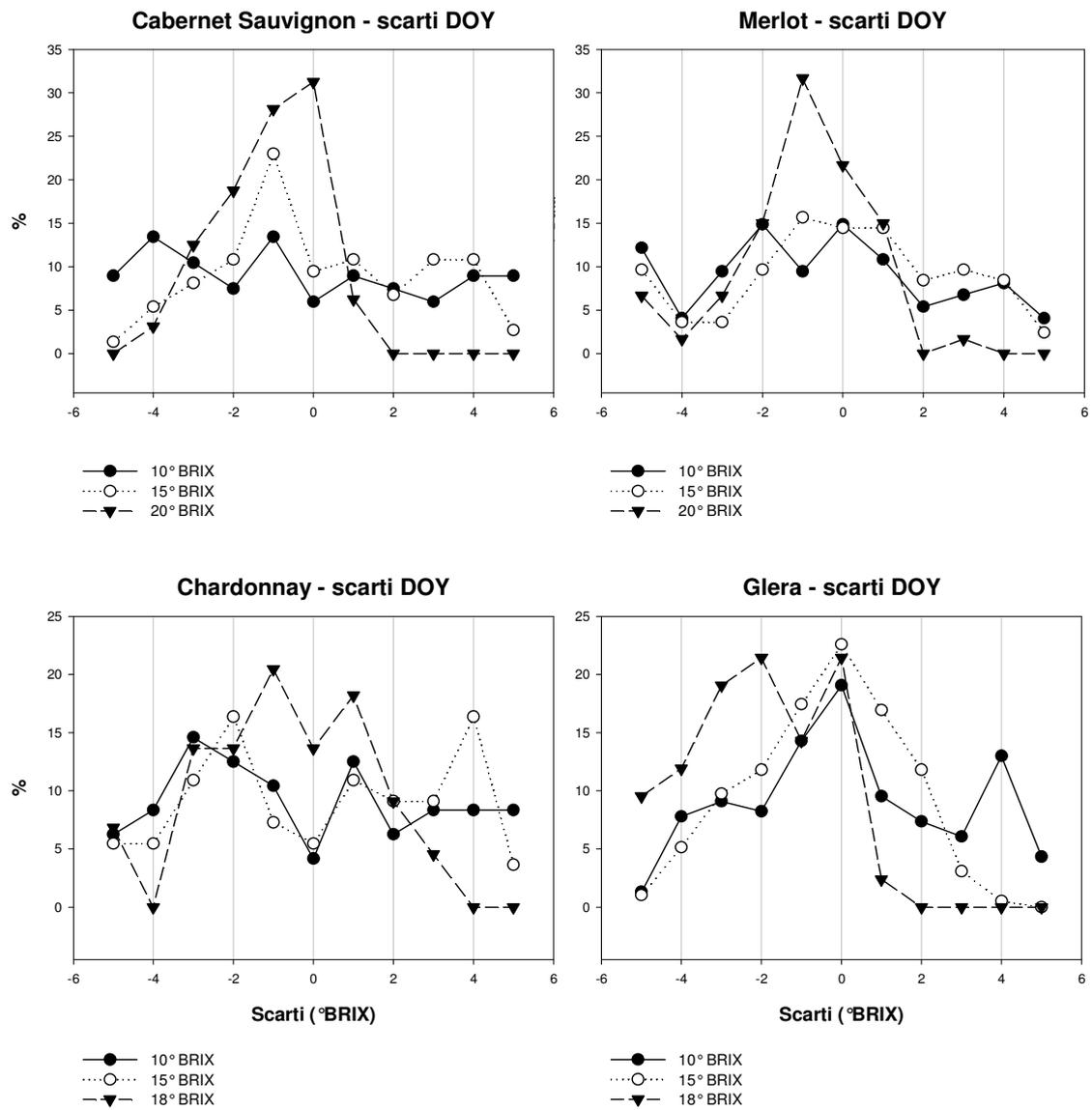


Figura 9: Frequenze relative degli scarti delle stime ottenute con il modello DOY per gli anni dal 2000 al 2010.

Tabella 3-1: Stime della maturazione per il modello DOY sul dataset di maturazione dal 2000 al 2010. I valori presenti in tabella indicano la sommatoria delle percentuali di dati stimati dal modello che ricadono nelle classi di frequenza critiche, comprese tra $\pm 1^\circ$ Brix per un dato tenore di zuccheri (riportato nella seconda riga).

CULTIVAR	CHARDONNAY			GLERA			MERLOT			CABERNET S.		
	10	15	18	10	15	18	10	15	20	10	15	20
% TRA $\pm 1^\circ$	27.08	23.64	52.27	42.86	56.92	38.10	35.14	44.58	68.33	28.36	43.24	65.63

3.2.2 Modello GDD

Analogamente al modello precedente il modello GDD si dimostra più accurato per la stima del grado zuccherino in epoca più tardiva, ad eccezione del Glera.

Nei grafici in Figura 10 è possibile osservare le frequenze relative degli scarti delle stime ottenute con il modello GDD, mentre la Tabella 3-2 riporta le percentuali di stime che ricadono nell'intervallo di accuratezza.

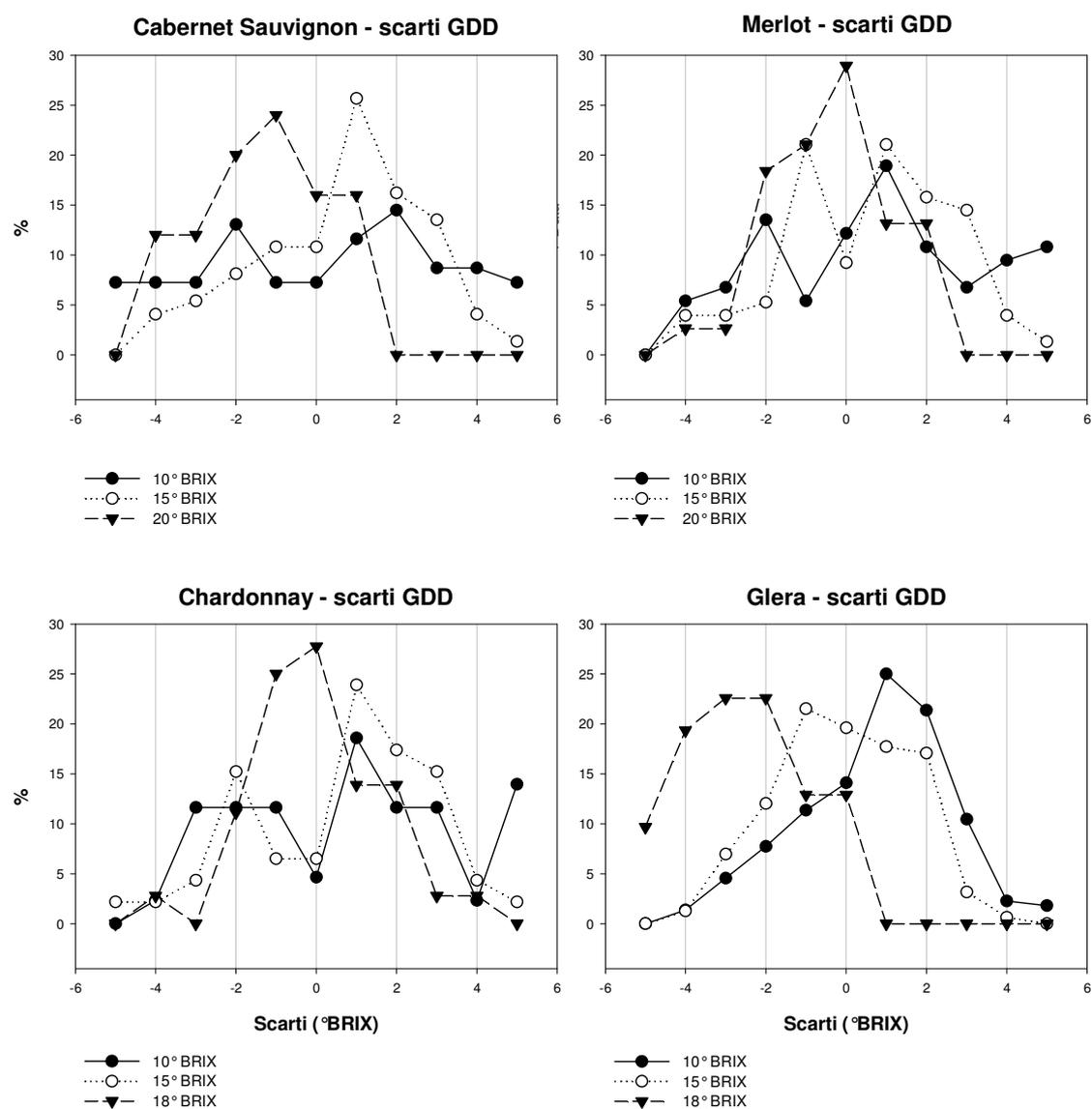


Figura 10: Frequenze relative degli scarti inerenti alle stime ottenute con il modello GDD per gli anni dal 2000 al 2010.

Anche in questo caso le distribuzioni di frequenza che si possono osservare non sono riconducibili a delle buone distribuzioni degli scarti. Rispetto al modello DOY le stime non sono migliorate molto, tanto che nel caso del Cabernet si assiste addirittura ad un peggioramento delle stesse.

Per il Merlot l'andamento delle distribuzioni a tenori Brix elevati sostanzialmente non cambia, mentre nel Glera le stime del modello mostrano degli andamenti anomali e scadenti da un punto di vista previsionale.

L'accuratezza del modello per tenori di zucchero tardivi varia da un minimo del 25% nel Glera ad un massimo del 66% nello Chardonnay.

Tabella 3-2: Stime della maturazione per il modello GDD sul dataset di maturazione dal 2000 al 2010. I valori presenti in tabella indicano la sommatoria delle percentuali di dati stimati dal modello che ricadono nelle classi di frequenza critiche, comprese tra $\pm 1^\circ$ Brix per un dato tenore di zuccheri (riportato nella seconda riga).

CULTIVAR	CHARDONNAY			GLERA			MERLOT			CABERNET S.		
BRIX	10	15	18	10	15	18	10	15	20	10	15	20
%TRA $\pm 1^\circ$	34.88	36.96	66.67	50.45	58.86	25.81	36.49	51.32	63.16	26.09	47.30	56.00

3.2.3 Modello EVI

Per tutte le cultivar e per tutti i tenori di zucchero di riferimento è stata eseguita una procedura di ottimizzazione dello starting point espresso intermini di GDD per il cumulo dell'EVI.

I grafici in Figura 11 mostrano i risultati delle stime ottenute con il modello EVI. Per prima cosa è possibile notare che le curve di distribuzione di frequenza si adattano meglio ad una curva normale e presentano dei picchi di frequenze attorno al valore centrale superiori rispetto a quelle degli altri modelli.

L'accuratezza del modello per i tenori di zucchero più tardivi in questo caso varia da 67% del Glera all'86% dello Chardonnay.

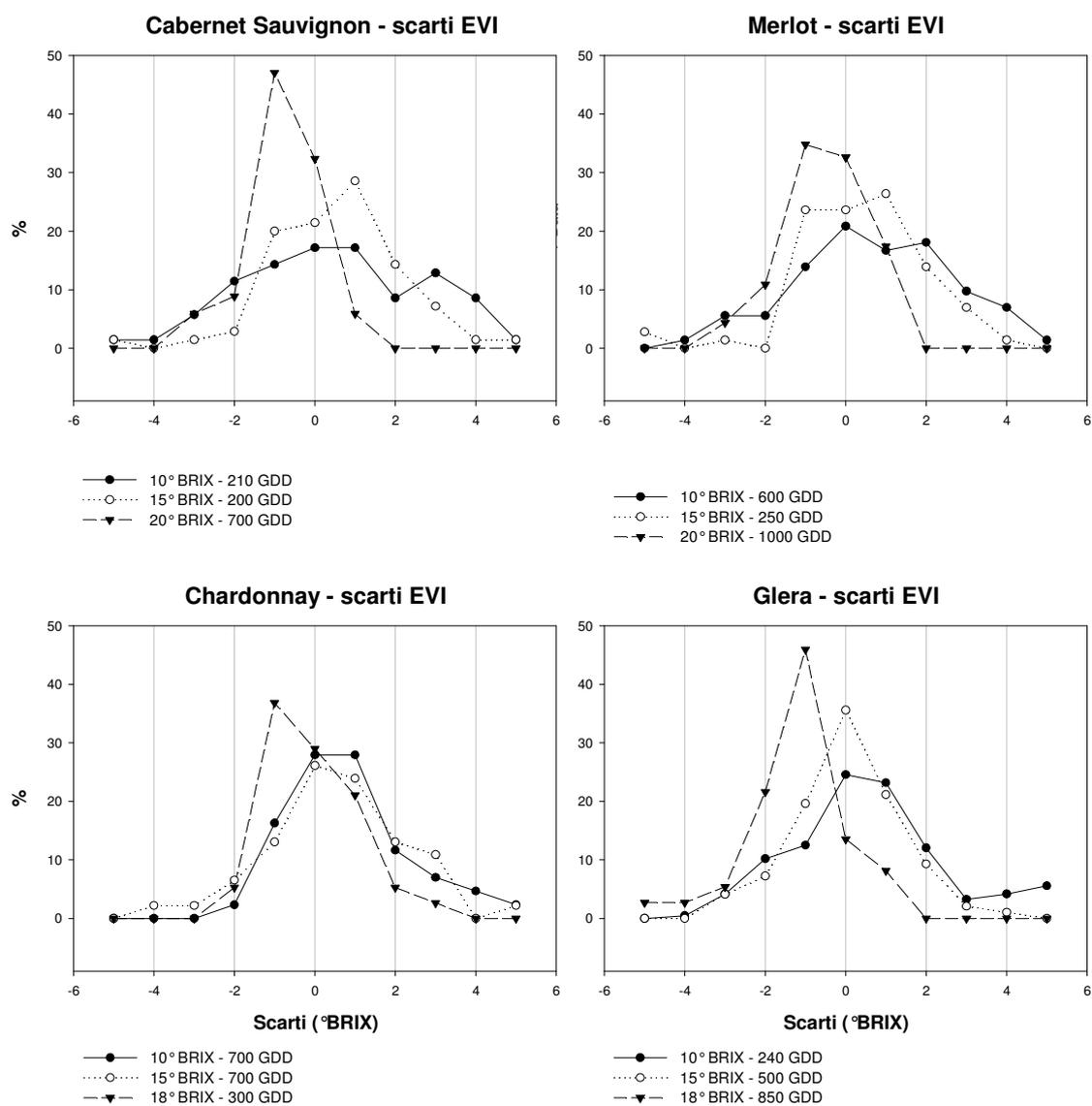


Figura 11: Frequenze relative degli scarti inerenti alle stime ottenute con il modello EVI per gli anni dal 2000 al 2010. Per ogni livello Brix vengono riportati i migliori risultati delle stime.

Tabella 3-3: Stime della maturazione per il modello EVI sul dataset di maturazione dal 2000 al 2010. I valori presenti in tabella indicano la sommatoria delle percentuali di dati stimati dal modello che ricadono nelle classi di frequenza critiche, comprese tra $\pm 1^\circ$ Brix per un dato tenore di zuccheri (riportato nella seconda riga).

CULTIVAR	CHARDONNAY			GLERA			MERLOT			CABERNET S.			
	BRUX	10	15	18	10	15	18	10	15	20	10	15	20
EVI		72.09	63.04	86.84	60.19	75.13	67.57		73.61	84.78	48.57	70.00	85.29

La Figura 12 mette in confronto le performance dei modelli per i tenori convenzionali tardivi

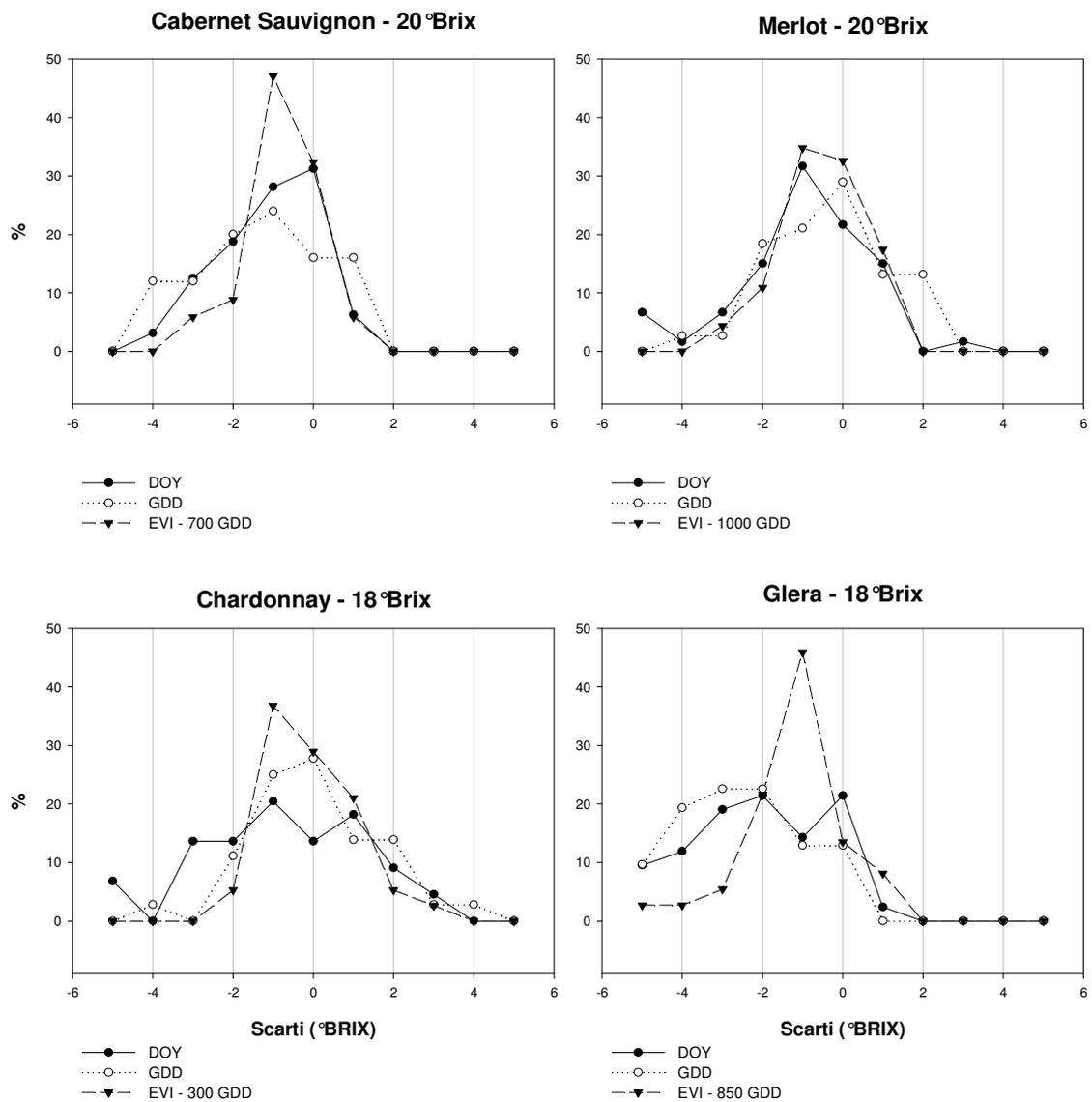


Figura 12: Confronto della distribuzione delle frequenze relative degli scarti inerenti alle stime ottenute con i tre modelli per i tenori di zucchero più tardivi (anni dal 2000 al 2010). Per il modello EVI vengono riportati i migliori risultati del processo di ottimizzazione.

In tutti i casi il modello EVI si dimostra essere più accurato nelle stime e le curve presentano i picchi più alti in prossimità del valore centrale e le migliori curve di distribuzione di frequenza.

La Tabella 3-4 riporta le frequenze relative che ricadono nell'intervallo di accuratezza per i tenori di zucchero convenzionali ottenute dai tre modelli.

Tabella 3-4: Riporta le percentuali di dati stimate dai rispettivi modelli che ricadono nell'intervallo di frequenza di $\pm 1^\circ$ Brix.

CULTIVAR	CHARDONNAY			GLERA			MERLOT			CABERNET S.		
	10	15	18	10	15	18	10	15	20	10	15	20
DOY	27.08	23.64	52.27	42.86	56.92	38.1	35.14	44.58	68.33	28.36	43.24	65.63
GDD	34.88	36.96	66.67	50.45	58.86	25.81	36.49	51.32	63.16	26.09	47.3	56
EVI	72.09	63.04	86.84	60.19	75.13	67.57	51.39	73.61	84.78	48.57	70.00	85.29

4 Discussione

Dai risultati ottenuti è possibile affermare che, salvo poche eccezioni, l'accuratezza dei modelli GDD ed EVI è superiore a quella offerta dal modello nullo. Il modello EVI è risultato poi superiore al modello GDD, rispetto al quale presenta un maggior contenuto informativo. Le misurazioni dell'EVI sono infatti influenzate dalla capacità fotosintetica delle piante (intermini di assorbimento e riflettanza di alcune bande dello spettro elettromagnetico), e in qualche misura considerano anche altre importanti variabili che gli altri modelli trascurano, come ad esempio il bilancio idrico (Nagler et al., 2005).

Le migliori accuratezze delle stime sono state ottenute, in linea generale, per i più alti tenori zuccherini. Questo potrebbe dipendere dal fatto che ad un certo momento, tutte le curve di accumulo degli zuccheri a tenori Brix elevati (dell'ordine di 18-20° per le uve a bacca bianca e di 21-23° per quelle a bacca rossa) raggiungono un plateau, per cui a questo livello cessa l'effetto della variabile guida, appiattendolo la variabilità interannuale. In ogni caso, il modello EVI mantiene sempre una maggiore accuratezza .

Dai risultati ottenuti si è però osservato che la stima offerta dal modello non è indifferente alla scelta dello starting point per l'accumulo dell'EVI. In particolare si può notare, che in linea generale, le migliori performance si ottengono a partire da uno starting point elevato, prossimo alle 800 GDD ma antecedente al momento dell'invaiaitura, che a seconda delle cultivar si registra al raggiungimento di 1000-1200 GDD (Rigato, 2009). Questo fatto mette in risalto almeno due importanti aspetti. Il primo dimostra che il momento dell'invaiaitura non si rivela come il punto di partenza migliore per la cumulazione dell'EVI, sebbene sia universalmente riconosciuto come il momento di inizio della maturazione. Questi risultati trovano riscontro in studi recenti che dimostrano che le dinamiche tipiche della maturazione (sintesi e accumulo degli zuccheri, dei polifenoli ecc.) iniziano circa una decina di giorni prima dell'invaiaitura (Thomas et al., 2008; Matthews et al., 2009). Considerando il periodo climatico (fine luglio, primi di agosto nell'emisfero boreale) è plausibile ipotizzare un accumulo di 15-20 GDD al giorno, che se cumulate per i giorni antecedenti all'invaiaitura possono permettere di

conteggiare circa 150-200 GDD (all'incirca le GDD che mancano per raggiungere l'invaiaitura).

Il secondo aspetto mette in evidenza che tutto ciò che accade prima di questo momento sembra essere ininfluenza, o comunque poco rilevante, sulla fisiologia di maturazione delle bacche in termini di accumulo degli zuccheri. Questo potrebbe far pensare che la maturazione dei frutti goda, in qualche modo, di una certa indipendenza dalla fase di accrescimento e di sviluppo della pianta (fino alla fase riproduttiva). Numerosi studi hanno valutato l'importanza degli effetti di una corretta disponibilità idrica nonché le conseguenze dello stress idrico sull'accrescimento delle bacche (Hardie e Considine, 1976; Kliewer et al., 1983), l'importanza di una adeguata condizione nutrizionale delle piante (Keller et al., 1998a - Keller et Hrazdina 1998b), e gli effetti delle temperature e dell'esposizione luminosa sulla crescita e lo sviluppo dei grappoli (Dokoozlian and Kliewer, 1996). L'approccio modellistico non ha smentito certamente le acquisizioni fisiologiche ma si è solo concentrato sulle dinamiche di accumulazione degli zuccheri utilizzando pochi elementi che rappresentano una serie molto numerosa di variabili genetiche ed ambientali.

L'utilizzo dell'EVI medio del kilometro quadrato attorno al punto, ha dato risposte migliori rispetto al dato EVI puntuale, perché probabilmente ampliando la zona di interesse si riescono a cogliere in modo più preciso le influenze delle variazioni del bilancio idrico che la misurazione di un singolo pixel non riesce a interpretare così bene in un tempo limitato.

In conclusione, l'approccio per monitorare mediante stima il grado Brix in tempo reale applicato a questo dataset, ha dimostrato che il remote sensing ha un maggiore contenuto informativo e quindi ha consentito di avere delle stime con buone accuratezze. Però, nel modo in cui è stato impostato, l'approccio richiede comunque dati campionari di maturazione per calibrare il modello per ogni singolo sito, perciò il modello stesso calibrato su un sito, non è applicabile in altre situazioni. I prossimi sviluppi dovranno cercare il modo di estendere la capacità predittiva del modello in maniera più generale per raggiungere l'obiettivo di avere un solo modello che funzioni per un'ampia scala territoriale senza la necessità di ricorrere a campionamenti in situ.

5 Appendice

Appendice 1: Tabella riassuntiva dei vigneti oggetto delle rilevazioni. Per i vigneti privi di coordinate geografiche (per i quali è stato possibile reperire solamente la località) si è fatto riferimento alla località.

LOCALITÀ	VITIGNO	ANNATE	N° ANNI	LATITUDINE (decimali)	LONGITUDINE (decimale)	QUOTA (m)
Arcade	Cabernet S.	1994-2010	17	45.76762061	12.22995753	99
Arcade	Cabernet S.	1996-1999	4	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Cabernet S.	2007-2010	4	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Cabernet S.	1997-2010	14	45.79155642	12.20383306	108
Campodarsego	Cabernet S.	2008-2010	3	45.48267000	11.87525000	14
Istrana	Cabernet S.	1992-2010	19	45.69128125	12.09327556	90
Maser	Cabernet S.	2002-2005	4	45.80927778	11.97959722	140
Nervesa	Cabernet S.	1992-1995	4	45.82769722	12.19940278	112
Nervesa	Cabernet S.	1996	1	45.82117072	12.18464900	232
Salvatronda di Castelfranco	Cabernet S.	1992-2001	10	45.67313889	11.93473611	35
San Polo di Piave	Cabernet S.	2006-2010	5	45.77866944	12.39276389	19
Venegazzù	Cabernet S.	1992-2010	19	45.78617350	12.09238458	168
Villorba	Cabernet S.	1992-1998	7	45.74953056	12.23759167	40
Villorba	Cabernet S.	1992-2007	16	45.71566814	12.24254714	71
Villorba	Cabernet S.	2006-2010	5	45.75016667	12.22613056	41
Volpago del Montello	Cabernet S.	1997-1998	2	45.78524186	12.11278911	171
Arcade	Chardonnay	1996-1998	3	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Chardonnay	2001-2010	10	45.79084531	12.20353861	108
Campodarsego	Chardonnay	2007-2010	4	45.54249000	11.92322000	17
Istrana	Chardonnay	1992-2010	19	45.69128125	12.09327556	90
Maser	Chardonnay	1995-2005	11	45.81023667	11.97546706	190
Povegliano	Chardonnay	2007-2010	3	45.76093611	12.19268056	61
S. Floriano di Castelfranco	Chardonnay	1995-2008	14	45.69545164	11.95564461	98
Salvatronda di Castelfranco	Chardonnay	1992-1995	4	45.67313889	11.93473611	35
San Polo di Piave	Chardonnay	2008-2010	3	45.77845278	12.39369722	19
Venegazzù	Chardonnay	1992-1998	7	45.78725278	12.09178333	139
Villorba	Chardonnay	1992-1998	7	45.74953056	12.23759167	40
Villorba	Chardonnay	1994; 1999-2007	10	45.71566814	12.24254714	71
Villorba	Chardonnay	2008-2010	3	45.75277500	12.22744444	45
Volpago del Montello	Chardonnay	1994-1996	3	45.78524186	12.11278911	171
Arcade	Merlot	1994-2010	17	45.76611447	12.23807789	96
Arcade	Merlot	1992-1995	4	45.77828056	12.24049444	54
Arcade	Merlot	1997-1999	3	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Merlot	2007-2009	3	45.79059444	12.22368611	59
Campodarsego	Merlot	2007-2010	4	45.49580000	11.91279000	12
Campodarsego	Merlot	2007-2010	4	45.53386000	11.90081000	18

segue

continua

Istrana	Merlot	1992-2010	19	45.69128125	12.09327556	90
Maser	Merlot	1995-2005	11	45.80998939	11.97901247	183
Montebelluna	Merlot	1992-1999	8	45.78359722	12.03165556	153
Romano d'Ezzelino	Merlot	1998-2000	3	45.78390833	11.75460000	139
S. Martino di S. Biagio di Callalta	Merlot	2005-2008	4	45.68636389	12.35014444	13
Salvatronda di Castelfranco	Merlot	1992-2001; 2004-2010	17	45.67407564	11.96953286	81
San Polo di Piave	Merlot	2005-2010	6	45.77320278	12.39850000	19
Venegazzù	Merlot	1992-2010	19	45.78608503	12.09242603	168
Villorba	Merlot	2006-2010	5	45.75085556	12.22754444	43
Volpago del Montello	Merlot	1992-1993; 1995-2010	18	45.78584167	12.11281944	132
Arcade	Prosecco	1996-1998	3	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Prosecco	2007-2010	4	45.79059444	12.22368611	59
Arcade	Prosecco	1992-1993	2	45.78638889	12.20521667	58
Asolo	Prosecco	1992-1993	2	45.79414722	11.90755833	144
Carpenan	Prosecco	2002-2010	9	45.86689639	12.03783303	208
Cartizze alto	Prosecco	2002-2010	9	45.89994028	12.03279247	308
Cartizze basso	Prosecco	2002-2010	9	45.89348464	12.03652792	239
Castelcucco	Prosecco	2000-2010	11	45.84828781	11.95253769	258
Castelcucco	Prosecco	1992-2010	19	45.82029131	11.91479194	204
Colfosco	Prosecco	2001-2004	4	45.84549444	12.21809167	153
Colfosco	Prosecco	2000-2002	3	45.84549444	12.21809167	153
Farra	Prosecco	2002-2010	9	45.89320325	12.05727508	261
Farra	Prosecco	2002-2010	9	45.90188711	12.09864178	256
Fol Funer	Prosecco	2002-2010	9	45.90095906	12.03929822	273
Guia	Prosecco	2002-2010	9	45.91498583	12.05549578	386
Istrana	Prosecco	1992-2010	19	45.69128125	12.09327556	90
Levada di Onigo	Prosecco	2002-2010	9	45.84888136	11.99516400	213
Maser	Prosecco	1995-2005	11	45.81373825	11.97333819	240
Montebelluna	Prosecco	1992-1998	7	45.78359722	12.03165556	153
Nervesa	Prosecco	1992-1995	4	45.82769722	12.19940278	113
Nervesa	Prosecco	1996-2010	15	45.83139444	12.21334722	77
Nespoler	Prosecco	2002-2010	9	45.88907472	11.98675703	247
Refrontolo	Prosecco	1998-2000	3	45.91834444	12.21361667	179
Ron	Prosecco	2002-2010	9	45.90385592	11.98821733	331
S. Giacomo	Prosecco	2002-2010	9	45.87864269	12.01727503	250
S. Pietro di Barbozza	Prosecco	2002-2010	9	45.90053678	12.01980081	364
S. Pietro di Barbozza	Prosecco	2002-2010	9	45.90599844	12.01683683	425
S. Pietro di Feletto	Prosecco	2000-2010	11	45.93250722	12.24007536	315
S. Stefano di Valdobbiadene	Prosecco	2002-2010	9	45.90661122	12.04187019	406
S. Stefano di Valdobbiadene	Prosecco	1999-2010	3	45.89484167	12.03922500	195
S. Vito	Prosecco	2002-2010	9	45.89376781	11.97686125	258
Salvatronda di Castelfranco	Prosecco	2007-2010	4	45.67313889	11.93473611	35

segue

continua

San Polo di Piave	Prosecco	2006-2010	5	45.77320278	12.39850000	21
Soligo	Prosecco	2000-2010	11	45.92329056	12.19130992	233
SS. Angeli	Prosecco	1992-2003	12	45.83104722	12.12168611	177
SS. Angeli	Prosecco	1995-1999	5	45.84061111	12.14080556	147
Venegazzù	Prosecco	1992-2010	19	45.78634258	12.09237969	169
Vidor Rivette	Prosecco	2002-2010	9	45.88152583	12.04757706	235
Villorba	Prosecco	2006-2010	5	45.75025556	12.22507778	41
Volpago del Montello	Prosecco	1994-1999	6	45.78584167	12.11281944	132

6 Bibliografia

- Altobelli, A.; Napolitano, R.; Bressan, E.; Mignozzi, K.; Hubina, T.; Feoli, E. (2007) *Prodotti MODIS per lo studio della vegetazione: teoria, applicazione pratica e problemi di scala. VIII Meeting degli utenti Grass* (http://gislab.dirap.unipa.it/grass_meeting/articoli/modis_vegetazione.pdf)
- Angelini L., Bellocchi G., Martorana F., Mazzoncini M., (2000) *Phenology of six soybean [Glycine max (L.) Merr.] cultivars from sowing to full maturity in central Italy. Agr. Med. Vol. 130, 155-168*
- ARPAV (2007) http://www.arpa.veneto.it/home/docs/Evoluzione_del_clima_in_Veneto_cinquante_nnio_13-09-2007.pdf (agosto 2011)
- Baggiolini M., (1952). *Stades reperes de la vigne. Rev. Romande Agric. Vitic. Arboric., 1: 4-6.*
- Banks J. and Carson J.S. (1984) *Discrete-eventy system simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 514 pp*
- Barnes, W. L., Pagano, T. S., & Salomonson, V. V. (1998). *Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4), 1088– 1100*
- Bidabe B. (1965) *L'action des températures sur l'évolution des bourgeons de l'entrée en dormance à la floraison. 96° Congrès Pomologique, pp 51-56*
- Bondada BR, Matthews MA, Shackel KA (2005) *Functional xylem in the post-veraison grape berry. J Exp Bot 56:2949–2957*
- Brummell DA, Harpster MH (2001) *Cell wall metabolism in fruit softening and quality and its manipulation in transgenic plants. Plant Mol Biol 47:311–339*
- Caffarra, A. and Eccel, E. (2010) *Increasing the robustness of phenological models for Vitis vinifera cv. Chardonnay. International Journal of Biometeorology 54, 255–267*
- Calò A., Costacurta A., Tomasi D., Biscaro S. (1997) *La fenologia della vite in Italia in rapporto alle condizioni ambientali. In Calò A. (ed): Il determinismo climatico sulla fenologia della vite e la maturazione dell'uva in Italia. Arti grafiche. Conegliano (TV), 14-15 luglio 93, p. 3-71*
- Campbell, J., B. (2002). *Introduction to Remote Sensing – third edition. Taylor and Francis, London. p. 621*
- Cannell, M. G. R. and R. I. Smith (1983). *"Thermal Time, Chill Days and Prediction of Budburst in Picea sitchensis." Journal of Applied Ecology 20(3): 951-963.*

- Cannell, M. G. R. and R. I. Smith (1986). "Climatic Warming, Spring Budburst and Forest Damage on Trees." *Journal of Applied Ecology* 23(1): 177-191.
- Castellarin SD, Matthews MA, Di Gaspero G, Gambetta GA (2007) Water deficits accelerate ripening and induce changes in gene expression regulating flavonoid biosynthesis in grape berries. *Planta*, 227(1):101-112.
- Castellarin S.D, Gambetta G.A, Wada H, Shackel K.A, Matthews M.A. (2011) Fruit ripening in *Vitis vinifera*: spatiotemporal relationships among turgor, sugar accumulation, and anthocyanin biosynthesis, *J. Exp. Bot.*, doi:10.1093/jxb/err150.
- Chervin C, El-Kereamy A, Roustan J-P, Latché A, Lamon J, Bouzayen M (2004) Ethylene seems required for the berry development and ripening in grape, a non-climateric fruit. *Plant Sci* 167: 1301–1305
- Chuine, I. (2000). A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology* 207:337–347.
- Chuine I, Yiou P, Viovy N, Seguin B, Daux V, Ladurie EL. (2004). Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature* 432: 289–290.
- Cohen, S. D.; Tarara, J. M.; Kennedy, J. A.(2008). Assessing the impact of temperature on grape phenolic metabolism. *Anal. Chim. Acta*, 621 (1), 57–67.
- Cola G., Failla O, Mariani L. (2009) BerryTone – A simulation model for the daily course of grape berry temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol 149, 1215-1228. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.01.007
- Comincioli V. (2004) *Modelli Matematici elementi introduttivi*. In formato e-book, Università degli Studi di Pavia, 320 pp., <http://www.multimediacampus.it>
- Conde C, Silva P, Fontes N, Dias A, Tavares R, Sousa M, Agasse A, Delrot S, Geros H (2007) Biochemical changes throughout grape berry development and fruit and wine quality. *Food*, 1:1-22.
- Confalonieri R. *Il telerilevamento: aspetti teorici e applicazioni agronomiche*. Appunti di lezione.
http://www.robortconfalonieri.it/lezioni/sistemi%20colturali/15_02_indici%20di%20vegetazione.pdf (agosto 2011)
- Coronella M. T. (2011). *Le aziende e le superfici*. 6° Censimento generale dell'agricoltura. Primi risultati provvisori del Veneto. <http://statistica.regione.veneto.it/AltriFiles/CensAgr2011-Coronella.pdf> (settembre 2011)
- Coombe, B. G. and C. R. Hale. (1973). The hormone content of ripening grape berries and the effects of growth substances treatments. *Plant Physiol.* 51: 629-634.

- Coombe BG, Bishop GR (1980) Development of the grape berry. II. Changes in the diameter and deformability during véraison. *Aust J Agric Res* 31: 499-509
- Coombe BG (1987) Distribution of solutes within the developing grape berry in relation to its morphology. *Am J Enol Vitic* 38: 120–127
- Coombe BG. (1992). Research on development and ripening of the grapeberry. *Am. J. Enol. Vitic.* 43:101–10
- Coombe, B.G. and McCarthy, M.G. (1997) Identification and naming of aroma development in ripening grape berries. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 3, 18–20.
- Coombe BG, McCarthy MG. (2000). Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 6: 131–135
- Cooper, T., Gargiullo, A. and Retamales, J. (2007). Kiwifruit softening: comprehensive research approach in chile and relevant results. *Acta Hort. (ISHS)* 753:289-296 http://www.actahort.org/books/753/753_36.htm
- Dai ZW, Vivin P, Robert T, Milin S, Li SH, Génard M (2009) Model-based analysis of sugar accumulation in response to source–sink ratio and water supply in grape (*Vitis vinifera*) berries. *Functional Plant Biology* 36,527–540. <http://dx.doi.org/10.1071/FP08284>
- Dai, Z., Vivin, P., Barrieu, F., Ollat, N. and Delrot, S. (2010), Physiological and modelling approaches to understand water and carbon fluxes during grape berry growth and quality development: a review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 16:70–85. doi:10.1111/j.1755-0238.2009.00071.x
- Dokoozlian N.K. and Kliewer W.M, (1996) Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121 5, pp. 869–874.
- Donatelli M. (1995) Sistemi nella gestione integrate delle colture, Note dalle lezioni di G.Campbell e C. Stockle. http://www.sipeaa.it/mdon/references/books/sistemi/books_sistemi.htm
- Dupin S., Tisseyre B., Roger J.M., Gobrecht A. (2010) Utilisation de données historiques pour caractériser le Millésime en cours Dans VIII International Terroir Congress - VIII International Terroir Congress, Soave : Italie (2010) - <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00584955/fr/>
- Erez A., Fishman S., Gat Z. and Couvillon G. A. (1988). Evaluation of winter climate for breaking bud rest using the dynamic model *Acta Hort. (ISHS)* 232:76-89 http://www.actahort.org/books/232/232_10.htm

- Findlay N, Oliver KJ, Nii N, Coombe BG. (1987). Solute accumulation by grape pericarp cells. IV. Perfusion of pericarp apoplast via the pedicel and evidence for xylem malfunction in ripening berries. *Journal of Experimental Botany* 38, 668–679.
- Fishman S, Erez A., Couvillon G. A. (1987a) The temperature dependence of dormancy development breaking in plants: Two-step model involving a cooperative transition. *J. Theor. Biol.* 124:473-483
- Fishman S, Erez A., Couvillon G. A. (1987b) The temperature dependence of dormancy development breaking in plants: Simulation of processes studied under controlled temperatures. *J. Theor. Biol.* 126:309-322
- Fonseca S, Monteiro L, Barreiro MG, Pais MS. (2005). Expression of genes encoding cell wall modifying enzymes is induced by cold storage and reflects changes in pear fruit texture. *Journal of Experimental Botany* 56, 2029–2036.
- Freeman BM, Kliewer WM (1983) Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines: II. Grape and wine quality. *Am J Enol Vitic* 34:197–207.
- García de Cortázar-Atauri I., Bisson N., Seguin B., Gaudillere J. P., Bachulat B. (2005) Simulation of budbreak date for vine. The BRIN model. Some applications in climate change study. In: *Proceedings of XIV International GESCO Viticulture Congress, Geeisenheim, Germany, 23-27 August, 2005*, pp 485-490
- García de Cortázar-Atauri I, Brisson N, Gaudillere JP (2009) Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Int J Biometeorol* 4:317–326
- Garcia de Cortázar-Atauri, I., Daux, V., Garnier, E., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Boursiquot, J., Parker, A., van Leeuwen, C., and Chuine, I. (2010): Climate reconstructions from grape harvest dates: Methodology and uncertainties, *Holocene*, 20, 599
- Gholami, M., Coombe, B.G., and Robinson, S.R. (2004) Grapevine phloem sap analysis: I-sucrose, amino acids, potassium concentrations, seasonal and diurnal patterns. *Acta Hort (ISHS)* 640: 143–153.
- Greer, D.H. and Weston, C. (2010) Heat stress affects flowering, berry growth, sugar accumulation and photosynthesis of *Vitis vinifera* cv. Semillon grapevines grown in a controlled environment. *Functional Plant Biology* 37, 206–214.
- Greenspan MD, Shackel KA, Matthews MA. (1994). Developmental-changes in the diurnal water-budget of the grape berry exposed to water deficits. *Plant, Cell and Environment* 17, 811–820.
- Hänninen, H. and K. Kramer (2007). "A framework for modelling the annual cycle of trees in boreal and temperate regions." *Silva Fennica* 41(1): 167-205

- Hardie, W.J., Considine, J.A., (1976). *Response of grapes to water stress in particular stages of development. American Journal of Enology and Viticulture* 27 (2), 55±61.
- Hatfield JL, Gitelson AA, Schepers JS, Walthall CL (2008) *Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agron J* 100:S-117-S-131
- Hendrickson L., Ball M.C., Wood J.T., Chow W.S. & Furbank R.T. (2004) *Low temperature effects on photosynthesis and growth of grapevine. Plant, Cell & Environment* 27, 795–809.
- Holben, B.N. (1986) – *Characteristics of maximum-value composite images for temporal AVHRR data. International Journal of Remote Sensing. Vol.7, pp 1383-1622.*
- Huete, A.R. (1987) - “Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectra”. In: Elachi C. (Ed.) - “Introduction to the physics and techniques of remote sensing”, Wiley-Interscience 1987, New York, pp. 107-141.
- ISTATa
<http://agri.istat.it/jsp/dwExcel.jsp?q=plC260000010000012000&an=2010&ig=1&ct=604&id=6A115A121A13A173A>
- ISTATb http://www.census.istat.it/index_agricoltura.htm (settembre 2011)
- Keller, M.; Arnink, K. L.; Hrazdina, G. (1998a) *Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. I. Effect on grapevine growth, fruit development and ripening. Am. J. Enol. Vitic., 49 (3), 333-340.*
- Keller M., Hrazdina G., (1998b) *Interaction of nitrogen availability during bloom and light intensity during veraison. II. Effect on anthocyanin and phenolic development during grape ripening, Am. J. Enol. Vitic. 49 341–349.*
- Kliewer, W. M. (1966) *Sugars and organic acids of Vitis vinifera. Plant Physiol., 41, 923-31.*
- Kliewer, W.M. (1970) *Effect of day temperature and light intensity on coloration of Vitis vinifera L. grapes. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 95(6):693- 697.*
- Kliewer, W.M. (1977) *Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. Am. J. Enol. Vitic. 28:96-103*
- Kliewer, W.M., Freeman, B.M., and Hosson, C. (1983). *Effect of irrigation, crop level and potassium fertilization on Carignane vines. I. Degree of water stress and effect on growth and yield. American Journal of Plant Physiology* 34, 186-196.
- Kriegler, F. J., Malila, W. A., Nalepka, R. F., & Richardson, W. (1969). *Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Sixth International Symposium on Remotes Sensing of Environment, Ann Arbor, MI (pp. 97–131).*

- Jeong, S. T.; Goto-Yamamoto, N.; Hashizume, K.; Kobayashi, S.; Esaka, M. (2006) *Expression of VvmybA1 gene and anthocyanin accumulation in various grape organs. Am. J. Enol. Vitic., 57, 507–510.*
- Lakso AN, Kliewer WM (1975) *The influence of temperature on malic acid metabolism in grape berries. Plant Physiology 56, 370-372*
- Lawn R. J., Byth D. E. (1973) *Response of soya beans to planting date in south-eastern Queensland. I. Influence of photoperiod and temperature on phasic developmental patterns. Australian Journal of Agricultural Research 24, 67–80. doi:10.1071/AR9730067*
- Lillester, O. (1982) – *Spectral reflectance of partly transmitting leaves: laboratory measurements and mathematical modeling. Remote Sensing of Environment. Vol. 12, pp. 247-254.*
- Lillesand, T., M., Kiefer, R., W., Chipman, J., W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley and Sons. New York*
- Liu, J., Williams, J.R., Zehnder, A.J.B., Yang, H., (2007). *GEPIC — Modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. Agric. Sys. 94 (2), 478–493.*
- Mariani L, Parisi S, Failla O, Cola G, Zoia G, Bonardi L (2009) *Tirano (1624–1930): a long time series of harvest dates for grapevine. Italian Journal of Agrometeorology 14:7–16*
- Matthews MA, Thomas TR, Shackel KA. (2009). *Fruit ripening in Vitis vinifera L.: possible relation of veraison to turgor and berry softening. Australian Journal of Grape and Wine Research 15, 278–283.*
- Mauro G., Carli F. (2006) - *Nuove tecnologie per il monitoraggio della vegetazione. Indici di vegetazione a confronto per un sensore satellitare a bassa risoluzione spaziale. In Giornate della geografia, 24-26 maggio 2006 Udine, Sessione Poster.*
- McCarthy, M.G., and Coombe, B.G. (1999) *Is weight loss in ripening grape berries cv. Shiraz caused by impeded phloem transport? Australian Journal of Grape and Wine Research 5,17-21*
- McMaster G. S., Wilhelm W. W., J. Morgan A. (1992). *Simulating winter wheat shoot apex phenology. Journal of Agricultural Science, Cambridge, 119, 1-12.*
- Meier N, Rutishauser T, Pfister C, Wanner H, Luterbacher J (2007) *Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. Geophys Res Lett 34:L20705. doi:10.1029/2007GL031381*
- Miedes E, Herbers K, Sonnewald U, Lorences EP (2010) *Overexpression of a cell wall enzyme reduces xyloglucan depolymerization and softening of transgenic tomato fruits. J Agric Food Chem 58:5708–5713*

- Miglietta F. (1991) *Simulation of wheat ontogenesis. I. Appearance of main stem leaves in the field. Climate Research Vol. 1: 145-150*
- Motisi A., Marra F.P., Perini L., Caruso T., (1998). *I modelli fenoclimatici come strumento di supporto alla scelta varietale del pesco. L'Informatore Agrario, LIV(32):59-63.*
- Moutinho-Pereira J, Gonçalves B, Bacelar E, Cunha JB, Coutinho J, Correia CM (2009) *Effects of elevated CO₂ on grapevine (Vitis vinifera L.): physiological and yield attributes. Vitis 48:159–165*
- Nagler PL, Scott RL, Westenburg C, Cleverly JR, Glenn EP, Huete AR (2005) *Evapotranspiration on western US rivers estimated using the enhanced vegetation indices from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. Remote Sens Environ 97(3):337–351. doi:10.1016/j.rse.2005.05.011*
- NASA: <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/> (agosto 2011)
- Parker A.K, De Cortázar-Atauri I.G., Van Leeuwen C. and Chuine I. (2011) *General phenological model to characterise the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L. Blackwell Publishing Asia. Australian Journal of Grape and Wine Research. Vol 17, pp 206-216 DOI 10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x http://dx.doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00140.x*
- Pellegrino A., Lebon E., Simonneau T., Wery J. (2005) *Towards a simple indicator of water stress in grapevine (Vitis vinifera L.) based on the differential sensitivities of vegetative growth components Australian Journal of Grape and Wine Research 11, 306–315, 2005*
- Petrie, P.R, Trought, M.C.T. and Howell, G.S. (2000). *Fruit composition and ripening of Pinot Noir (Vitis vinifera L.) in relation to leaf area. Australian Journal of Grape and Wine Research 6, 46–51.*
- Rahman, A. F., D. A. Sims, V. D. Cordova, and B. Z. El-Masri (2005), *Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes, Geophys. Res. Lett., 32, L19404, doi:10.1029/2005GL024127.*
- Richardson EA, Seeley SD, Walker DR (1974) *A model for estimating the completion of rest for Redhaven and Elberta peach trees. HortScience 9(4):331-332*
- Richardson EA, Seeley SD, Walker RD, Anderson J, Ashcroft G (1975) *Phenoclimatology of spring peach bud development. HortScience 10:236-237*
- Rigato L. (2009) *Validazione di modelli fenoclimatici su vite in due località del Veneto. Relatore: Pitacco A. Correlatori: Fila G., Belvini P. Dipartimento di Agronomia Ambientale e Produzioni Vegetali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro.*

- Rogiers, S.Y., Hatfield, J.M. and Keller, M. (2004) Irrigation, nitrogen, and rootstock effects on volume loss of berries from potted Shiraz vines. *Vitis* 43, 1–6.
- Robertson G. W. (1973) Development of simplified agroclimatic procedures for assessing temperature effects on crop development. In Slatyer RO (ed) *Plant response to climatic factors UNESCO, Paris (Proceedings of the Uppsala Symposium 1970, pp. 327-341*
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ETRS. Third ETRS Symposium, NASA SP353, Washington DC (pp. 309– 317).*
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. (1973). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393*
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering (1973) 'Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS', *Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317*
- Sadras V, McCarthy MG (2007) *Quantifying the dynamics of sugar concentration in berries of Vitis vinifera cv. Shiraz: a novel approach based on allometric analysis. Australian Journal of Grape and Wine Research* 13, 66--71. doi: 10.1111/j.1755-0238.2007.tb00236.x
- Sadras, V.O., Collins, M. and Soar, C.J. (2008) *Modelling varietydependent dynamics of soluble solids and water in berries of Vitis vinifera. Australian Journal of Grape and Wine Research* 14, 250–259.
- Sadras, V.O. and Petrie, P.R. (2011), *Quantifying the onset, rate and duration of sugar accumulation in berries from commercial vineyards in contrasting climates of Australia. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17: 190–198. doi:10.1111/j.1755-0238.2011.00135.x*
- Santos Tiago P. dos , Lopes Carlos M. , Rodrigues M. Lucília , Souza Claudia R. de , Maroco João P. , Pereira João S. , Silva Jorge R. , Chaves M. Manuela (2003) *Partial rootzone drying: effects on growth and fruit quality of field-grown grapevines (Vitis vinifera). Functional Plant Biology* 30 , 663–671.
- Santos JA, Malheiro AC, Karremann MK, Pinto JG (2010) *Statistical modelling of grapevine yield in the Port wine region under present and future climate conditions. Int J Biometeorol* 55:119–131
- Simal, S., Femenia, A., Cárcel, J. A., & Rossello´, C.(2005) *Mathematical modelling of the drying curves of kiwi fruits: influence of the ripening stage. Journal of the Science of Food and Agriculture.*
- Sims, D. A., Rahman, A. F., Cordova, V. D., El-Masri, B. Z., Baldocchi, D. D., Bolstad, P. V., Flanagan, L. B., Goldstein, A. H., Hollinger, D. Y., Misson, L., Monson, R. K., Oechel, W. C., Schmid, H. P., Wofsy, S. C., and Xu, L. (2008) *A new model of*

- gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS, *Remote Sens. Environ.*, 112, 1633–1646, doi:10.1016/j.rse.2007.08.004.
- Smart, R.E. (1985) *Principles of grapevine canopy management microclimate manipulation with implications for yield and quality: A review.* *Am. J. Enol. Vitic.* 36: 230-239.
- Soltani A., Ghassemi-Golezani K., Khoosheh F. R. and Moghaddam M. (1999) A simple model for chickpea growth and yield *Field crops research* June 25, v. 62 (2/3) p. 213-224
- Sweetman, C.; Deluc, L. G.; Cramer, G. R.; Ford, C. M.; Soole, K. L. (2009) Regulation of malate metabolism in grape berry and other developing fruits. *Phytochemistry*, 70, 1329-1344.
- Thomas TR, Shackel KA, Matthews MA (2008): Mesocarp cell turgor in *Vitis vinifera* L. berries throughout development and its relation to firmness, growth, and the onset of ripening. *Planta* , 228:1067-1076.
- Trainotti L, Zanin D, Casadoro G. (2003). A cell wall-oriented genomic approach reveals a new and unexpected complexity of the softening in peaches. *Journal of Experimental Botany* 54, 1821–1832.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127– 150.
- Vinciková H, Hais M, Brom J, Procházka J, Pecharová E (2010): Use of remote sensing methods in studying agricultural landscapes – a review. *J Landsc Stud* 3: 53–63.
- Wada H, Shackel KA, Matthews MA (2008): Fruit ripening in *Vitis vinifera*: apoplastic solute accumulation accounts for pre-veraison turgor loss in berries. *Planta* 2008, 227(6):1351-1361.
- Webb, L.B., Whetton, P.H. and Barlow, E.W.R. (2007) Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 13, 165–175.
- Weinberger J. H. (1950) Chilling requirements of peach varieties. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 56:122-128
- Winkler A. J., and Williams W. O. (1939) The heat required to bring Tokay grapes to maturity. *Proceedings of the American Society of Horticultural Science* 37, pp. 650–652.
- Winkler AJ. (1973). *Viticulture research at University of California, Davis, 1921–1927: oral history transcript.* Berkeley, CA: University of California, p. 8.

7 Ringraziamenti

Si desidera ringraziare il C.E.C.A.T. e segnatamente il Dott. Paolo Belvini ed i suoi collaboratori per la cura la costanza e la lungimiranza con cui hanno raccolto i dati, nonché la disponibilità a dividerli.

Si desidera anche ringraziare l' ORNL DAAC (Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center) per aver fornito gratuitamente i dati MODIS.

Infine si ringrazia l'E-OBS dataset per i dati meteo: “We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>) and the data providers in the ECA&D project (<http://eca.knmi.nl>). Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. 2008: A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201”.