

UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE
Sede di Piacenza

Scuola di Dottorato per il Sistema Agro-alimentare

ciclo XXIV

S.S.D: AGR/03

**Innovazioni di tecnica colturale nel vigneto in funzione del
cambio climatico e di una viticoltura sostenibile**

Tesi di Dottorato di: Fabio Bernizzoni
Matricola: 3710888

Anno Accademico 2010/2011



UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE
Sede di Piacenza

Scuola di Dottorato per il Sistema Agro-alimentare

ciclo XXIV

S.S.D: AGR/03

**Innovazioni di tecnica colturale nel vigneto in funzione del
cambio climatico e di una viticoltura sostenibile**

Tesi di Dottorato di: Fabio Bernizzoni
Matricola: 3710888

Coordinatore: Ch.mo Prof. Romeo ASTORRI

Tutor: Prof. Stefano Poni

Anno Accademico 2010/2011

*Alla mia famiglia
e a Silvia*

INDICE

1	Introduzione	1
1.1	Cambiamento del clima: - incremento della temperatura - precipitazioni	2
1.2	Impatti del cambiamento climatico in Italia	7
	1.1.1 Innalzamento del livello del mare	
	1.1.2 Suolo e agricoltura	
	1.1.3 Eventi estremi	
1.3	I cambiamenti climatici osservati in Emilia-Romagna	9
1.4	I fattori alla base del cambiamento climatico	12
1.5	I possibili scenari futuri	16
1.6	Carboon footprint ed Ecological footprint	20
1.7	Effetti sulla viticoltura	21
2	Ipotesi di lavoro	28
3	Papers	
	A Palliotti A., Poni S., Berrios J.G., Bernizzoni F. 2010. Vine performance and grape composition as affected by early-season source limitation induced with anti- transpirants in two red <i>Vitis vinifera</i> L. cultivars. Austr. J. Grape and Wine Res. 16: 426-433.	30
	B Bernizzoni F. , Civardi S., Van Zeller M., Gatti M., Poni S. 2010. Shoot thinning effects on seasonal whole-canopy photosynthesis and vine performance in <i>Vitis</i> <i>vinifera</i> L. cv. Barbera. Austr. J. Grape and Wine Res. 17: 351-357.	48
	C Palliotti A., Poni S., Silvestroni O., Tombesi S., Bernizzoni F. 2011. Morpho- structural and physiological performance of Sangiovese and Montepulciano cvv. (<i>Vitis vinifera</i>) under non limiting water supply conditions. Functional Plant Biology, http://dx.doi.org/10.1071/FP11093 .	65
	D Scambi gassosi (foglia singola vs chioma intera) in cinque genotipi di <i>Vitis vinifera</i> L. in presenza di stress idrico del suolo.	88
4	Conclusioni	120
5	Bibliografia	125
6	Ringraziamenti	131

1. Introduzione

Viviamo oggi con crescente consapevolezza in un contesto di crisi ambientale con tematiche legate alle variazioni climatiche. Gli accresciuti periodi di siccità, i fenomeni erosivi, il dissesto idrogeologico che ne consegue, la salinizzazione associati all'alta frequenza di incendi boschivi con distruzione delle risorse forestali, le condizioni di crisi dell'agricoltura tradizionale con il conseguente abbandono di vaste aree che divengono marginali, lo sfruttamento eccessivo delle risorse idriche, il turismo e l'agricoltura intensivi sono alcune delle cause della diminuzione di fertilità dei terreni e dell'emergenza idrica che si rilevano in tutto l'ecosistema Mediterraneo e che colpiscono sensibilmente l'Italia (Rapporto Legambiente 2006).

L'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM), nel 1980, organizzò la prima Conferenza mondiale sul clima nella quale furono sollevate le prime preoccupazioni relative alle modifiche dell'atmosfera terrestre causate dall'aumento delle emissioni di alcuni gas, primi fra tutti l'anidride carbonica, originata dalle combustioni, il metano, gli ossidi di azoto e i clorofluorocarburi, e alle possibili conseguenze sul bilancio termico globale.

Nacque in quella conferenza la proposta di creare una Commissione internazionale (l'IPCC – International panel on climate change) con il compito di monitorare il fenomeno e di mettere allo studio la formulazione di possibili scenari futuri. (Maracchi 2000).

In effetti l'IPCC fu creato nel 1988 come organo scientifico consultivo delle Nazioni Unite (Agenzia Nazioni Unite per l'Ambiente – UNEP) con la collaborazione dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), per valutare, sulla base delle migliori conoscenze scientifiche esistenti, la situazione attuale del clima, le prospettive future ed i problemi connessi in relazione sia alle eventuali conseguenze dei cambiamenti climatici, sia alle opzioni e strategie di risposta per mitigare i possibili cambiamenti del clima e per minimizzarne gli eventuali prevedibili danni (ENEA 2007).

1.1 Cambiamento del clima

Secondo l'IPCC, il fenomeno del cambiamento climatico è definito come una “variazione statisticamente significativa dello stato medio del clima o della sua variabilità, persistente per un tempo esteso (tipicamente decenni o più), causata sia dalla variabilità naturale, sia dall'attività umana (IPCC 2007). Invece, per l'*United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC*, il cambiamento climatico fa riferimento a “un cambiamento – maggiore rispetto alla variabilità naturale del clima osservata in paragonabili periodi di tempo – dello stato del clima; tale variazione è attribuita ad un'alterazione della composizione dell'atmosfera globale, direttamente o indirettamente causata dall'attività dell'uomo” (UNFCCC 2008).

È per questo motivo che il tema “cambiamento climatico” in questi ultimi dieci anni si è imposto all'attenzione dei Governi dei principali Paesi industrializzati, divenendo uno dei temi più rimarcati della politica internazionale.

Come si evince in modo palese dalle definizioni formulate dai principali organismi internazionali sul tema, lo scostamento dal regolare andamento climatico può avere due origini principali, una legata alla variabilità naturale, l'altra direttamente o indirettamente riconducibile all'attività umana. La possibilità che vi sia un diverso punto di partenza alla base dei fenomeni di mutamento climatico ha dunque portato alla nascita di due riflessioni di diversa natura: una corrente di definizione dei cambiamenti climatici, quella proposta dalle principali istituzioni internazionali, che vede l'uomo e le sue attività come motivo principale dei processi di cambiamento climatico, e una corrente di interpretazione del fenomeno che – al contrario, in perfetta antitesi con il precedente – sopporta il legame tra fenomeni naturali (e loro intrinseca variabilità di lungo periodo) e cambiamento climatico, attribuendo all'uomo un ruolo non predominante nei cambiamenti in atto.

Diventa allora determinate capire se i cambiamenti climatici sono indotti dall'uomo per capire quantomeno se ci sono delle possibilità di attuare alcune correzioni o meno, per ridurre il più possibile i possibili effetti del mutamento climatico.

Ciò che è inequivocabile deriva dalle osservazioni dirette raccolte fino ad ora, che confermano il cambiamento climatico in atto, e che le evidenze e gli impatti già oggi osservabili diventeranno ancora più chiari in un futuro prossimo.

L'ultimo rapporto realizzato dall'IPCC (IPCC 2007), migliorato sensibilmente rispetto al precedente del 2001 (IPCC 2001) ribadisce che (Barilla 2008) :

1) “il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile; ciò appare evidente dalle osservazioni dell’aumento delle temperature medie globali dell’aria, delle temperature degli oceani, dello scioglimento diffuso di neve e ghiaccio e dell’innalzamento del livello medio globale del mare”;

2) “la maggior parte dell’aumento osservato nelle temperature medie globali dalla metà del XX secolo, è molto probabilmente dovuta all’aumento osservato nelle concentrazioni di gas serra di origine antropica”.

Questo raffigura un risultato nuovo rispetto ai termini del precedente rapporto, in quanto rimarca che le attività umane sono causa dell’alterazione degli equilibri termici del sistema climatico.

Tra gli scenari presentati nel rapporto, che hanno destato particolari preoccupazioni, i principali eventi, e le loro implicazioni che si segnalano sono i seguenti (Barilla 2008):

A. incremento complessivo delle temperature su scala globale;

B. scioglimento e conseguente contrazione della superficie terrestre e marina coperta dai ghiacci;

C. innalzamento del livello dei mari (con possibile sommersione di parte delle terre emerse) Tabella 1.1;

D. variazione nell’intensità delle precipitazioni, nonché incremento della frequenza di fenomeni “estremi” (inondazioni, periodi di siccità, ecc.).

Questi cambiamenti hanno portato, e porteranno inevitabilmente a una crescente perdita di biodiversità, contribuendo a sottoporre gli ecosistemi terrestri e marini e in ultima analisi anche quelli agrari ad un forte stress.

Dal punto di vista agronomico, ma soprattutto viticolo e poi enologico, gli eventi che possono avere riflessi significativi sulla fisiologia della pianta di vite sono:

- ***Incremento della temperatura.***

Il processo di riscaldamento ha subito una forte accelerazione negli ultimi 50 anni. Infatti, l’andamento medio che registra il riscaldamento in questo ultimo cinquantennio è stato quasi il doppio rispetto a quello registrato negli ultimi 100 anni. Se ci si sofferma solo negli ultimi anni, l’aumento totale della temperatura registrato a livello globale tra la media del periodo 1850- 1899 e quella del periodo 2001-2005 è di 0,76 °C. (IPCC 2007).

Quest’ultimo rapporto dell’IPCC evidenzia, inoltre, che il generalizzato riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni non può essere solamente spiegato dall’agire delle forze

naturali, come alcuni gruppi di scienziati peraltro sostengono, ma deve prendere in considerazione anche l'agire di forze esterne, come quella antropica.

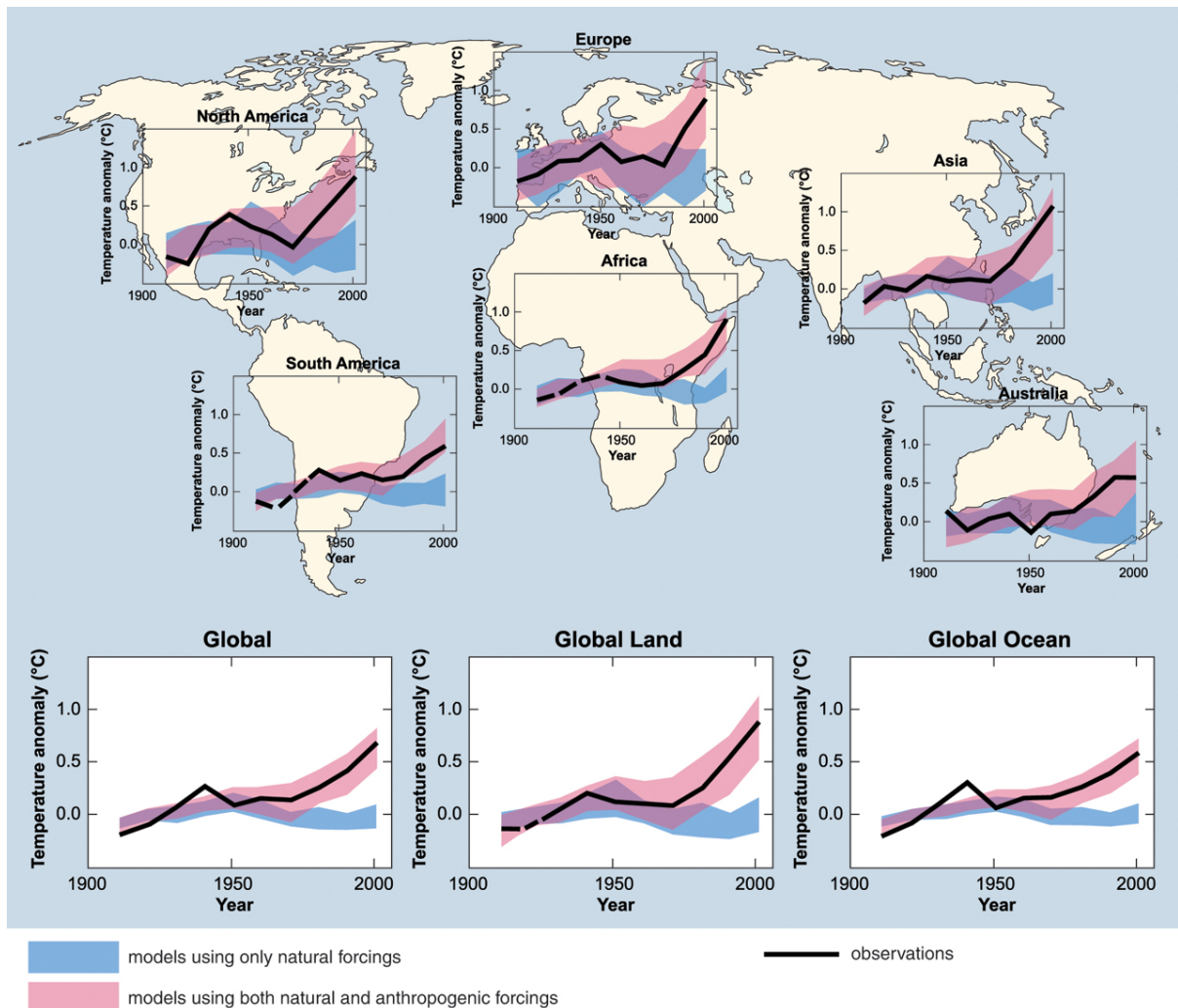


FIGURA 1.1: *Modelli di simulazione temperature (Fonte IPCC 2007).*

La figura 1.1 riporta i modelli di simulazione dei trend di crescita delle temperature influenzati dalle forze naturali (evidenziati in figura con la fascia colorata azzurra) e mostra come da soli non possono giustificare il trend di riscaldamento medio osservato (linea nera). Infatti, il riscaldamento medio osservato risulta in linea con gli andamenti simulati dai modelli che considerano sia forze naturali che forze antropiche in fascia rosa.

- ***Precipitazioni***

Sebbene le precipitazioni mostrino costantemente un'elevata variabilità sia spaziale sia temporale, nel periodo 1900-2005 è stato possibile osservare significativi incrementi in gran parte dei due emisferi, escludendo le sole fasce subtropicali, dove invece, sono state osservate

delle diminuzioni.

A partire dagli anni '70, la diminuzione e la variazione territoriale delle precipitazioni, connesse con l'aumento delle temperature, hanno causato periodi di siccità più lunghi e intensi, in modo particolare nelle zone tropicali e sub-tropicali (IPCC 2007).

Il problema che riguarda gli eventi meteorologici ed idrologici estremi, ed in particolare la differenza fra abbondanza e scarsità d'acqua fra nord e sud Europa, non è più una semplice questione di bilancio idrologico, ma ha profonde implicazioni sull'agricoltura, sull'industria, sul turismo, la salute e il settore assicurativo.

Le diversità dei regimi pluviometrici e del ciclo idrologico, come già dimostrato in diverse occasioni, hanno determinato conseguenze rilevanti negli ecosistemi e sull'aumento della frequenza e dell'intensità di fenomeni meteorologici estremi (uragani, piene, alluvioni, lunghi periodi siccitosi) (NOAA 2009).

Sulla base delle evidenze scientifiche raccolte e pubblicate nell'AR4 dall'IPCC si evidenzia che il riscaldamento globale è ormai un fenomeno inequivocabile, testimoniato dalle numerose osservazioni riguardo l'innalzamento della temperatura media globale dell'atmosfera e degli oceani, la riduzione dei ghiacciai e delle coperture nevose e l'innalzamento del livello dei mari (Fig. 2.1 e Tab. 1.1).

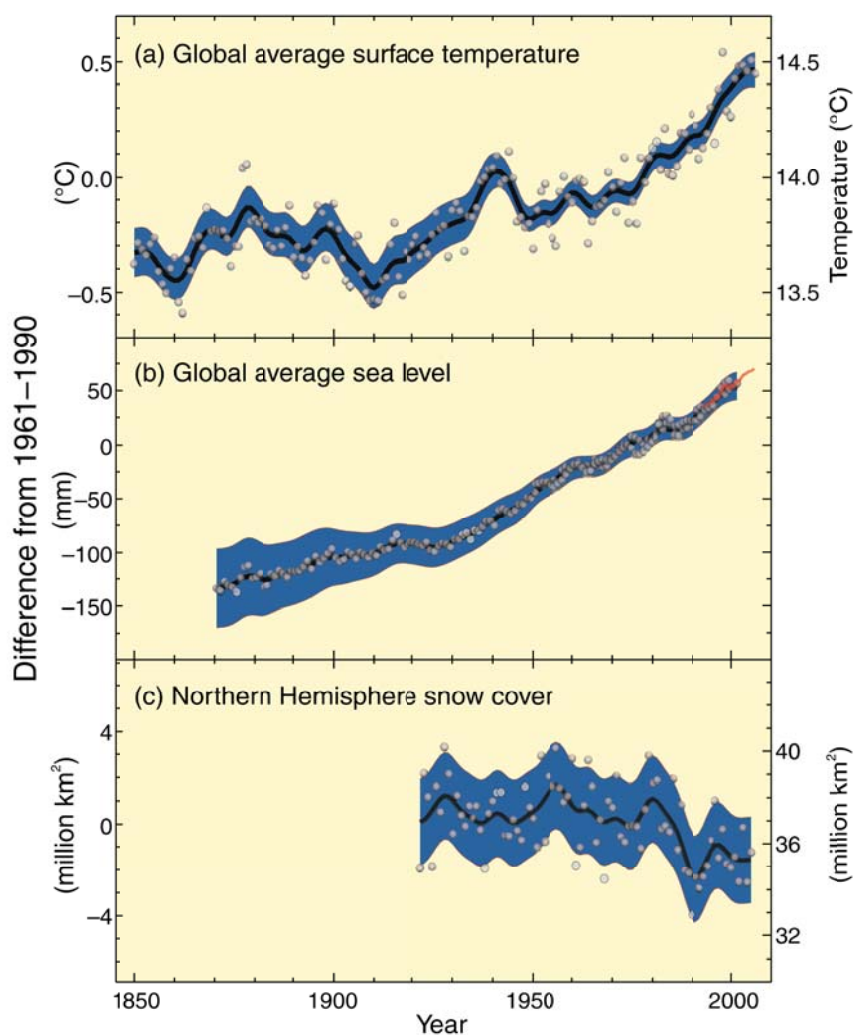


FIGURA 2.1 . Cambiamenti osservati di a) temperatura media globale alla superficie, (b) livello del mare medio globale da mareografi (blu) e da dati da satellite (rosso) e (c) copertura nevosa dell'emisfero Nord fra marzo e aprile. Tutti i cambiamenti sono relativi alle corrispondenti medie per il periodo 1961-1990. Le curve smussate rappresentano i valori medi decennali mentre i cerchi mostrano i valori annuali. Le aree ombreggiate sono gli intervalli di incertezza stimati attraverso un'analisi dettagliata delle incertezze conosciute (a e b) e in base alle serie temporali (c).

TABELLA 1.1 . Tassi di innalzamento del livello del mare osservati e stime dei contributi di diverse cause.

Cause di innalzamento del livello del mare	Tasso di innalzamento del livello del mare (mm all'anno)	
	1961–2003	1993–2003
Espansione termica	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
Ghiaccio e calotte di ghiaccio	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
Calotte di ghiaccio in Groenlandia	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Calotte di ghiaccio in Antartide	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Somma dei contributi climatici individuali all'innalzamento del livello del mare	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
Innalzamento totale del livello del mare osservato	1.8 ± 0.5 ^a	3.1 ± 0.7 ^a
Differenza (osservato meno la somma dei contributi climatici stimati)	0.7 ± 0.7	0.3 ± 1.0

Nota:

^a I dati antecedenti al 1993 provengono da mareografi e quelli successivi il 1993 da dati di altimetria satellitare.

1.2 Impatti del cambiamento climatico in Italia.

Problemi critici per l'Italia

Per l'Italia, gli impatti ambientali che hanno aspetti di maggiore criticità sono essenzialmente quelli riportati dal rapporto Enea, 2003 e, più in particolare:

- innalzamento del livello del mare
- degrado dei suoli e lo spostamento verso nord degli ecosistemi
- eventuale aumento dei fenomeni meteorologici estremi.

1.2.1. Innalzamento del livello del mare

L'innalzamento del livello del mare sarà diverso a seconda delle diverse regioni del globo. Nel Mediterraneo dovrebbe essere contenuto tra i 20 cm ed i 30 cm al 2090, con aumento della vulnerabilità in termini di perdita di zone umide ed in particolare degli ecosistemi, della biodiversità marino-costiera accelerando l'erosione delle coste.

1.2.2. Suolo e agricoltura

Nell'Italia meridionale, dove la scarsità di acqua è già causa del degrado dei suoli, i cambiamenti climatici aumenteranno notevolmente il rischio di desertificazione. L'estensione dei periodi di siccità per periodi prolungati di molti mesi, causata dalle piogge sempre più irregolari, soprattutto se questo periodo coincide con il semestre caldo (evapo-traspirazione molto alta).

L'incremento di temperatura previsto dall' IPCC influenzerà sia la vegetazione naturale che le coltivazioni, e le regioni italiane settentrionali potrebbero avere, al contrario dei territori del sud Italia, problemi di franosità e di erosione legati alla presenza di eventi meteorici sempre più estremi.

I cambiamenti climatici potrebbero avere diversi effetti sull'agricoltura, dove per le regioni Centro-Meridionali a clima già molto secco e caldo, favorirebbero con buona probabilità l'espansione verso Nord di colture specifiche come l'olivo, la vite e gli agrumi. Queste modifiche di forte impatto sul ciclo idrologico porteranno a inevitabili cambi di tecnica colturale per adattare, nel limite del possibile le colture del loco.

1.2.3. Eventi estremi

L'IPCC prevede inoltre che aumentino di frequenza, ma soprattutto di intensità, gli eventi estremi quali siccità, alluvioni ed di altri fenomeni meteorologici particolarmente violenti (trombe d'aria, burrasche, ecc) (IPCC 2007).

1.3. I cambiamenti climatici osservati in Emilia-Romagna

I mutamenti climatici sono riscontrabili anche su scala locale: ad esempio in Emilia-Romagna si notano dei chiari segni di cambiamento sia per quanto concerne le temperature, sia per le piogge. (Agricoltura e cambiamento climatico ER – Dossier Arpa 2008).

Per la valutazione dei cambiamenti dello stato del clima a scala locale sul territorio della regione Emilia-Romagna, sono stati analizzati gli andamenti annuali della temperatura dell'aria vicino al suolo e della precipitazione, rilevati su una rete di 45 stazioni per la temperatura e circa 90 stazioni per la precipitazione e sul periodo 1961-2008 (ARPA 2009).

Dall'analisi dei dati climatici rilevati in questi ultimi 40 anni si possono trarre delle conclusioni chiare e convergenti:

- si nota un aumento delle temperature (massime e minime) e, nello stesso periodo, un aumento della durata delle ondate di calore;
- a partire dal 1985 il valore annuale della temperatura massima e minima è stato quasi sempre al di sopra del valore climatico di riferimento (1961-1990);
- vi è la tendenza alla diminuzione della precipitazione totale annuale, con punte più intense nel 1983 e 1988, ma anche nel periodo più recente, come nel 2007 (fig. 3.1);

Da questi punti, anche se le lunghezze delle serie temporali non sono sufficientemente lunghe, i risultati sopra descritti mostrano, almeno per le temperature, una evidente tendenza all'aumento dei valori e la forte accelerazione di tali aumenti negli ultimi venti anni. Per le precipitazioni si manifesta una flessione nei valori totali anche se non in modo molto evidente (fig. 3.1,4.1,5.1)

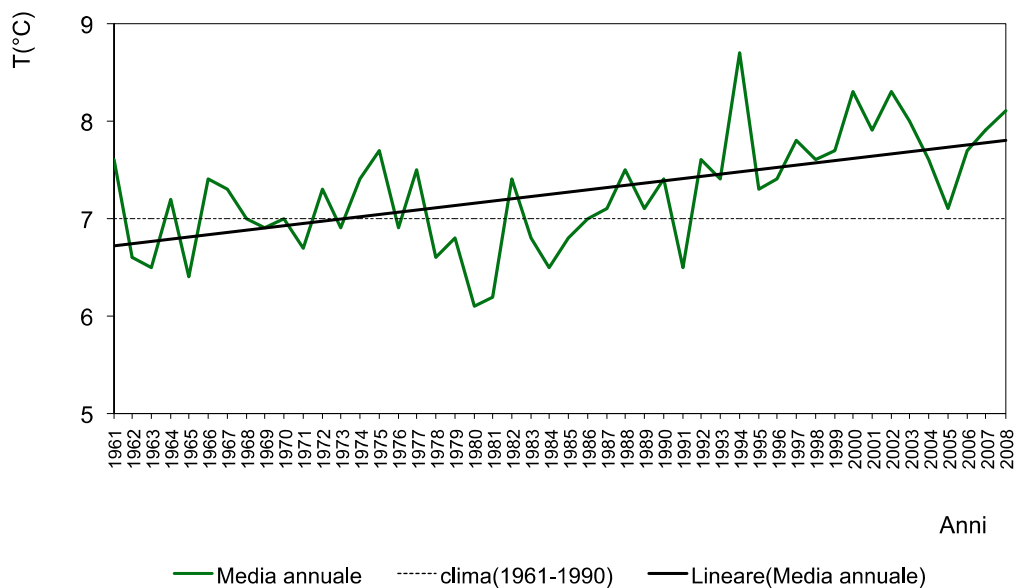


FIGURA 3.1: Andamento temporale annuale della temperatura minima mediata sull'intero territorio regionale - periodo 1961-2008

La linea tratteggiata rappresenta il valore climatico di riferimento (1961-1990) mentre la linea continua mostra la tendenza nel periodo 1961-2008

Fonte: Arpa Emilia-Romagna 2009

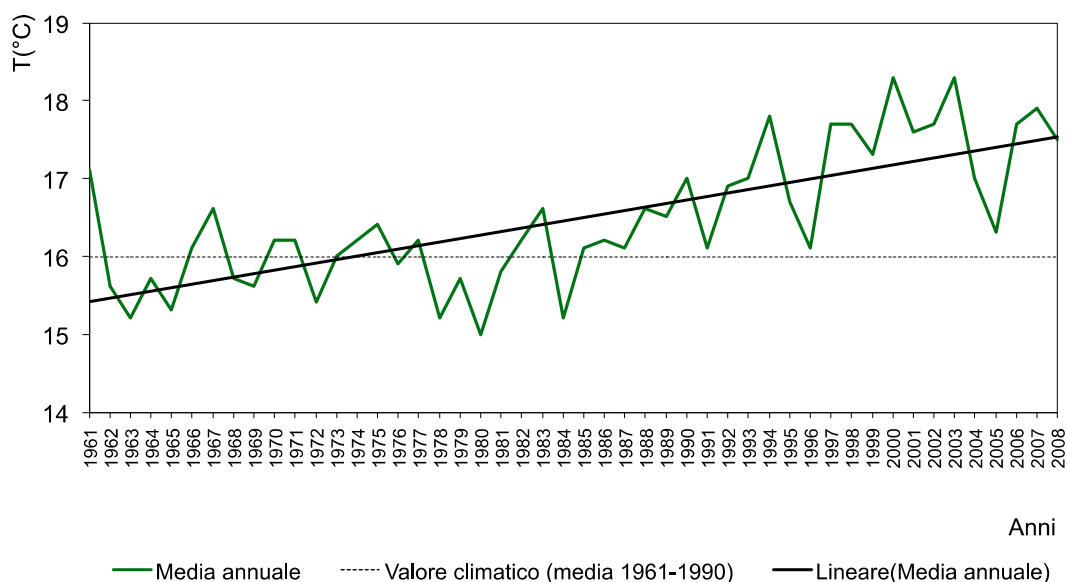


FIGURA 4.1: Andamento temporale annuale della temperatura massima mediata sull'intero territorio regionale - periodo 1961-2008

La linea tratteggiata rappresenta il valore climatico di riferimento (1961-1990) mentre la linea continua mostra la tendenza nel periodo 1961-2008

Fonte: Arpa Emilia-Romagna 2009

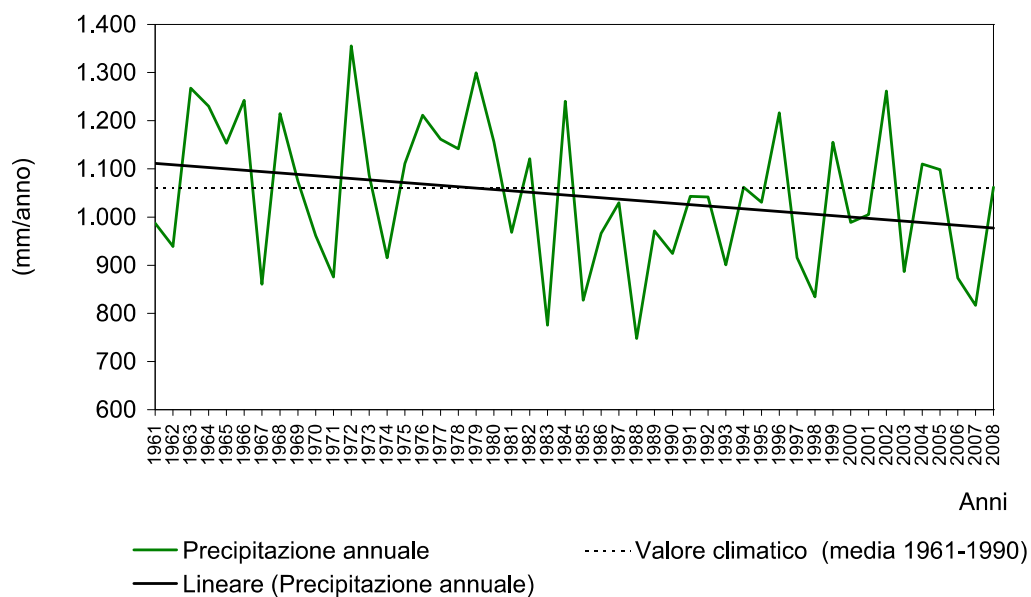


FIGURA 5.1: Andamento temporale annuale della precipitazione mediata sull'intero territorio regionale - periodo 1961-2008

La linea tratteggiata rappresenta il valore climatico di riferimento (1961-1990) mentre la linea continua mostra la tendenza nel periodo 1961-2008

Fonte: Arpa Emilia-Romagna 2009

1.4. I fattori alla base del cambiamento climatico.

Sembrano essere molte le forze che operano, direttamente o indirettamente, sulla dinamica del clima a livello mondiale. Emissione e concentrazione di gas serra e aerosol, unitamente alle condizioni (presenza e utilizzo) delle risorse verdi della terra (foreste e suolo) risultano i fattori che appaiono influire in modo diretto e più rilevante sul clima terrestre (Bindi 1996).

Esistono inoltre molti macro-fattori che influiscono indirettamente sul clima, attraverso il loro effetto sugli elementi sopra citati: l'aumento della popolazione degli ultimi decenni, l'aumento della produzione mondiale e l'incremento della domanda energetica e dei consumi alimentari.

Il clima sulla Terra è il risultato dello stato di equilibrio tra il flusso di energia in entrata, quasi esclusivamente proveniente dal Sole, e quello in uscita, costituito dalla radiazione solare riflessa e da quella emessa o irraggiata dalla Terra nel suo insieme, attraverso le cosiddette onde lunghe infrarosse (Figura 6.1). L'energia assorbita dal sistema viene trasferita e trasformata da una componente all'altra e si manifesta, ad esempio, come movimenti degli oceani e dell'atmosfera, trasformazioni chimico fisiche dei costituenti del sistema e i relativi fenomeni meteorologici. Qualunque variazione, seppur minima, in una di queste componenti determina un cambiamento nello stato di equilibrio energetico che conseguentemente si riflette in una variazione delle condizioni climatiche (Giardini 2002).

Nella figura 6.1 si può notare che circa il 30% della luce solare che raggiunge l'atmosfera è riflessa nello spazio, due terzi di questo riflesso è dovuto alle nuvole e alle particelle presenti nell'atmosfera conosciute come aerosol, un terzo viene riflesso soprattutto da neve, ghiacci e deserti.

Per mantenere l'equilibrio dell'assorbimento dell'energia, la terra deve emanare lo stesso quantitativo di energia nello spazio. Poiché la terra è più fredda del sole, le radiazioni riflesse hanno una lunghezza d'onda maggiore e si collocano nell'infrarosso. Parte di questo flusso viene assorbito dall'atmosfera, nubi e gas serra, e irradiato indietro: questa conseguenza è chiamata effetto serra.

L'effetto serra della terra riscalda la superficie del pianeta, e senza la sua attività le temperature medie sarebbero sotto lo zero, per cui in mancanza di questo fenomeno non ci sarebbe possibilità di vita sul nostro pianeta, anche se tuttavia l'alterazione di questo fenomeno provoca un surriscaldamento globale.

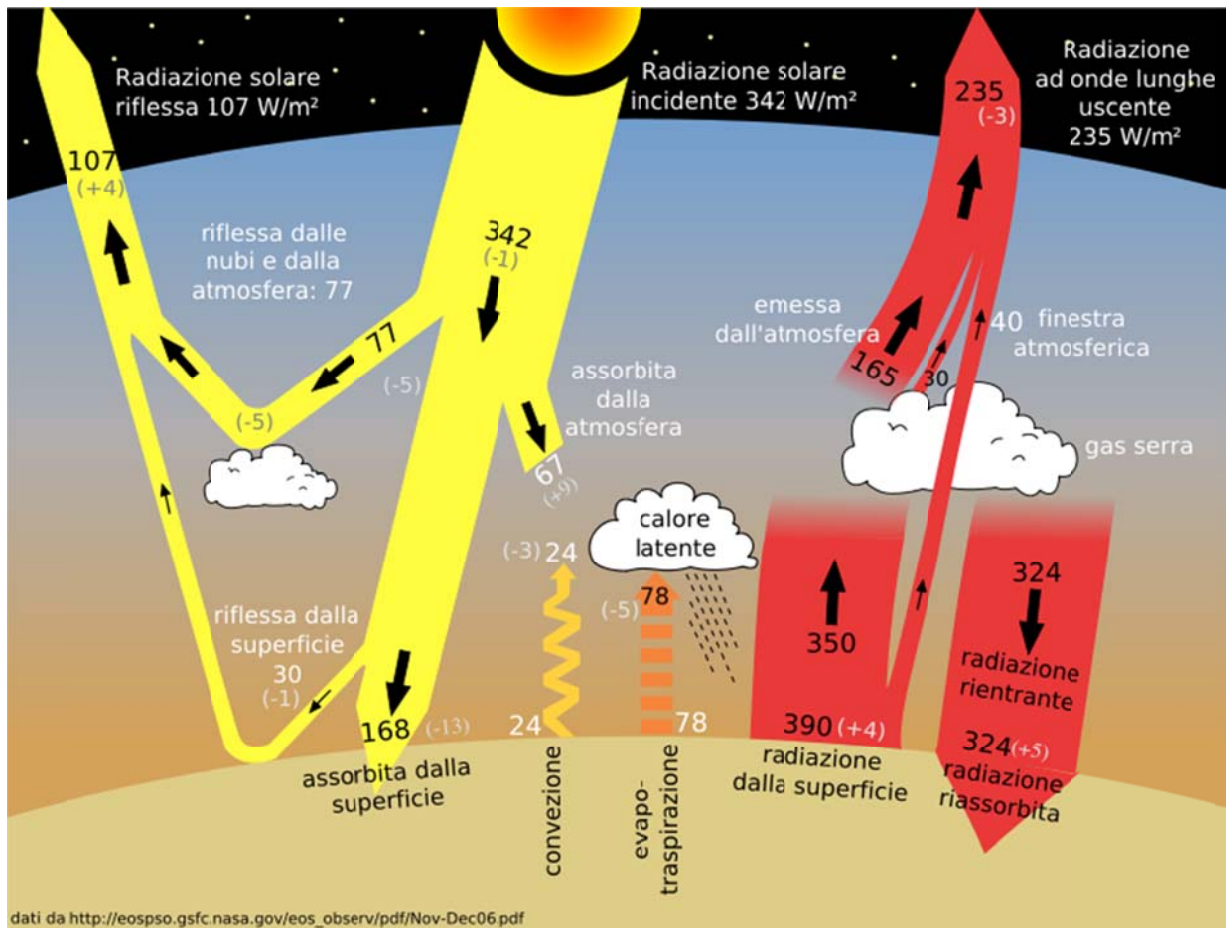


FIGURA 6.1: Radiazione solare e bilancio energetico terra.

Le attività antropiche partecipano al cambiamento climatico trasformando l'atmosfera terrestre in termini di quantità e combinazione chimica di gas serra, aerosol e nuvolosità. Tali gas, interagendo con le radiazioni derivanti dal sole e con le radiazioni infrarosse provenienti dalla terra, trasformano il bilancio termico globale, riconoscibile nel riscaldamento terrestre.

Tutti gli studi più recenti sottolineano un significativo aumento delle emissioni di gas serra, dovuto in parte a fattori naturali, e in parte a fattori antropici. Secondo l'IPCC, cambiamenti nella concentrazione atmosferica dei gas serra e degli aerosol (piccole particelle, es. nitrati, polveri, ecc.), sono i responsabili dell'alterazione energetica nel sistema climatico, implicando numerosi e gravi squilibri.

Per questo, infatti, nell'ultimo rapporto climatico del 2007 l'IPCC ha sottolineato due punti chiave:

- le emissioni globali dei gas serra sono notevolmente cresciute a causa delle attività umane dal periodo pre-industriale. Tra il 1970 e il 2004 l'incremento è stato del 70%;
- la concentrazione in atmosfera dei gas serra (CO_2 , CH_4 , e N_2O) è aumentata ed ora è al di sopra del 35% rispetto ai valori pre-industriali.

La letteratura considera principali gas serra quelli che assorbono la radiazione infrarossa contribuendo all'effetto serra e, in particolare:

- il diossido di carbonio (CO_2), il più diffuso dei GHG, incrementato dall'utilizzo di combustibili fossili, ma anche dalla continua e apparentemente inarrestabile deforestazione ;
- il metano (CH_4), emesso dalle attività agricole, zootecniche, dalla decomposizione di rifiuti organici, dalla combustione di biomassa, e da processi naturali minori;
- il protossido di azoto (N_2O);
- i gas fluorurati (HFCs, PFCs, SF₆), essenzialmente derivati da processi industriali.

L'IPCC, nel suo ultimo rapporto sul cambiamento climatico, pone le cause dell'aumento di concentrazione dei GSH nell'uomo.

L'incremento dei gas serra, iniziato già all'inizio dell'era industriale (1750 ca.), è stato addossato, in quasi tutti gli studi in materia, in misura rilevante alle attività umane e in minima parte ai mutamenti di origine naturali (relativi al sole, i vulcani, ecc.). L'aumento della concentrazione di gas serra si riverbera poi nell'aumento della temperatura terrestre (fig 7.1) (IPCC 2007).

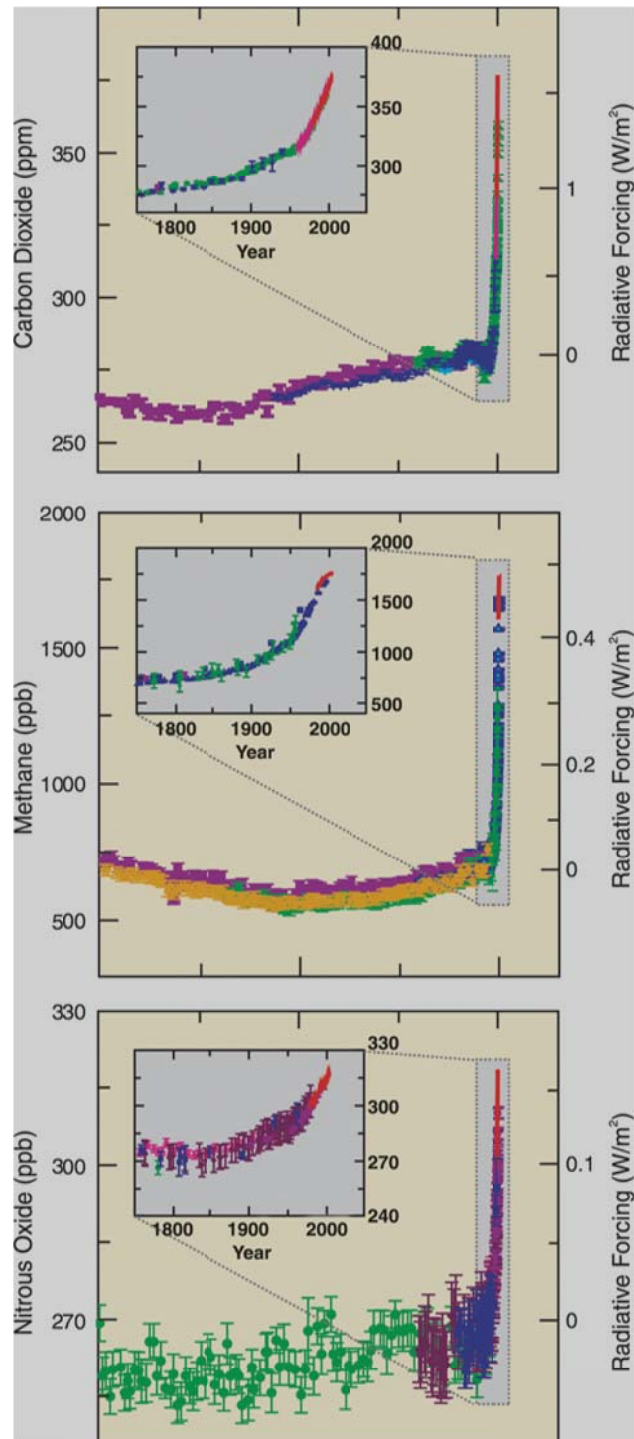


FIGURA 7.1. Variazioni dei gas serra da carote di ghiaccio e dati moderni

Concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, metano e protossido di azoto degli ultimi 10,000 anni (pannelli grandi) e dal 1750 (pannelli interni piccoli). Le misure provengono da carote di ghiaccio (i simboli con colori differenti si riferiscono a studi diversi) e campioni atmosferici (linee rosse). I corrispondenti forzanti radiativi sono mostrati sull'asse destro dei pannelli grandi.

1.5. I possibili scenari futuri.

L'ultimo rapporto dell'IPCC conferma che i futuri cambiamenti climatici non riguarderanno soltanto l'innalzamento delle temperature, ma produrranno anche una modifica dell'intero sistema climatico con serie ripercussioni sugli ecosistemi e sulle attività umane.

Gli impatti devono però essere considerati in maniera congiunta con i futuri sviluppi demografici, economici e tecnologici, soprattutto quando le stime considerano uno scenario temporale di lungo periodo. I possibili sviluppi di tali fattori che, come evidenziato, interagiscono con le trasformazioni fisiche dell'atmosfera, sono stati descritti e sintetizzati dall'IPCC in quattro famiglie di scenari:

Gli Scenari di Emissione dell'IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES)¹⁷

A1. La famiglia di scenari A1 descrive un mondo futuro caratterizzato da una crescita economica molto rapida, con la popolazione globale che raggiungerà un massimo a metà secolo per poi declinare, e con una rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficienti. I temi dominanti sono le convergenze regionali, il *capacity building* e l'aumento delle interazioni culturali e sociali, con una sostanziale diminuzione delle differenze regionali di reddito pro-capite. La famiglia di scenari A1 si sviluppa in tre gruppi che descrivono direzioni alternative dei cambiamenti tecnologici del sistema energetico. I tre gruppi si distinguono dalla loro enfasi tecnologica in: fossile intensivo (**A1FI**), fonti di energia non fossile (**A1T**) o un bilancio fra tutte le fonti (**A1B**) (dove per bilancio si intende una non eccessiva dipendenza da nessun tipo particolare di fonte energetica, presumendo che si possa applicare a tutte le risorse energetiche e alle tecnologie finali tassi di miglioramento simili).

A2. La famiglia di scenari A2 descrive un mondo molto eterogeneo. Il tema dominante è l'auto-sufficienza e la preservazione delle identità locali. La natalità fra le regioni converge molto lentamente, con un conseguente continuo aumento della popolazione. Lo sviluppo economico è essenzialmente orientato su base regionale e la crescita economica pro-capite e i cambiamenti tecnologici sono molto frammentati e più lenti rispetto alle altre trame.

B1. La famiglia di scenari B1 descrive un mondo convergente con la stessa popolazione globale che, come per la trama A1, raggiungerà un massimo a metà secolo per poi declinare, ma con un rapido cambio delle strutture economiche verso un'economia dell'informazione e dei servizi, con una riduzione dell'intensità dei materiali e l'introduzione di tecnologie pulite e che sfruttano le risorse in modo efficiente. Viene data molta importanza alle soluzioni globali per l'economia, alla sostenibilità sociale ed ambientale, includendo un miglioramento dell'equità, ma senza ulteriori iniziative climatiche.

B2. La famiglia di scenari B2 descrive un mondo in cui l'enfasi è sulle soluzioni locali per la sostenibilità economica, sociale ed ambientale. È un mondo in cui la popolazione globale cresce continuamente, ad un tasso minore della famiglia A2, con livelli intermedi di sviluppo economico e cambiamenti tecnologici meno rapidi e più diversificati rispetto alle trame B1 e A1. Mentre anche lo scenario è orientato verso la protezione ambientale e l'equità sociale, si focalizza sui livelli locali e regionali.

Per ognuno dei sei gruppi di scenari **A1B, A1FI, A1T, A2, B1 e B2** è stato scelto uno scenario illustrativo. Essi dovrebbero essere considerati tutti ugualmente plausibili.

Gli scenari SRES non includono ulteriori iniziative climatiche, il che significa che nessuno scenario include gli effetti dell'implementazione della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite per i Cambiamenti Climatici (UNFCCC) o degli obiettivi di emissione del Protocollo di Kyoto.

Schema tratto direttamente dall'AR4 IPCC 2007.

Medie di più modelli e intervalli valutati per il riscaldamento superficiale

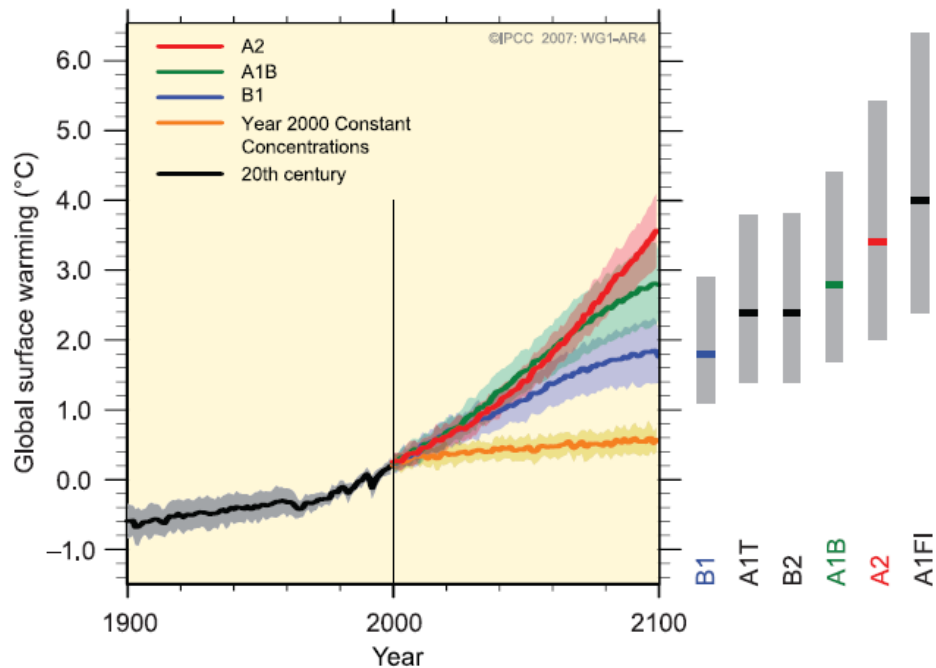


FIGURA 8.1. Le linee spesse sono le medie globali di più modelli del riscaldamento della superficie (rispetto al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1, mostrati come la continuazione delle simulazioni per il XX secolo. Le aree ombreggiate indicano l'intervallo di più o meno una deviazione standard delle medie annuali di ogni singolo modello. La linea arancione si riferisce all'esperimento in cui le concentrazioni sono mantenute costanti ai valori dell'anno 2000. Le barre grigie a destra indicano la miglior stima (linea solida all'interno di ciascuna barra) e l'intervallo di **probabilità** valutato per i sei scenari di riferimento SRES. La valutazione della miglior stima e dell'intervallo di **probabilità** nelle barre grigie include sia gli AOGCM della parte sinistra della figura, sia i risultati provenienti da una gerarchia di modelli indipendenti e da vincoli osservativi.

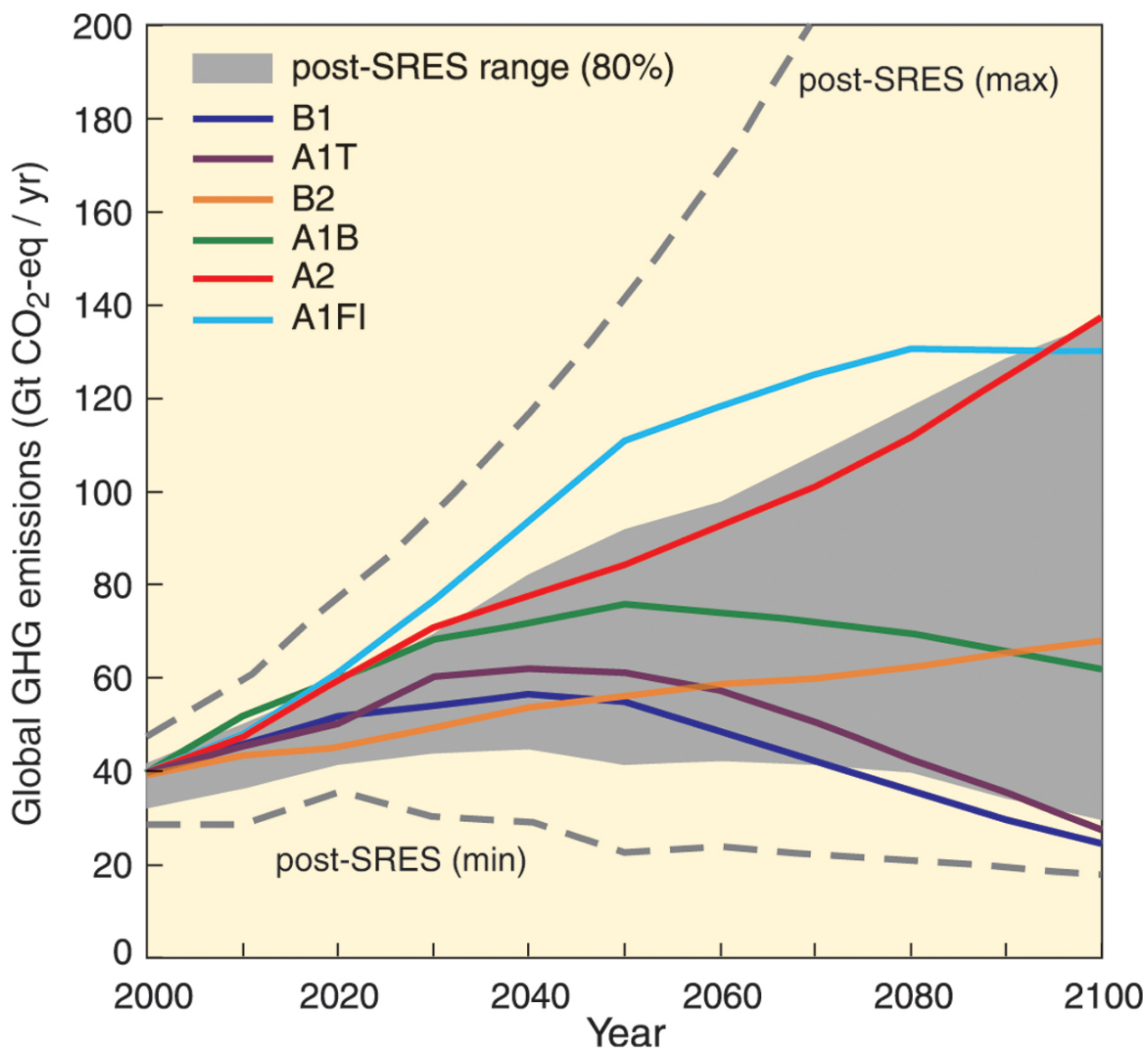


FIGURA 9.1 . *Emmissioni globali GHG. Sei scenari futuri diversi (linee colorate). Le emmissioni includono CO₂, CH₄, N₂O e i gas fluorurati.*

Gli scenari delineati dall'IPCC prospettano un aumento delle emissioni globali di GHGs, dove i combustibili fossili manterranno una posizione dominante nel portafoglio energetico globale fino al 2030 e oltre. Di conseguenza, le emissioni di CO₂ derivanti dal consumo di energia aumenteranno del 40%-110%, tra il 2000 e il 2030.

TABELLA 2.1. *Proiezioni del riscaldamento medio globale alla superficie e dell'innalzamento del livello del mare medio globale per la fine del XXI secolo.*

Caso	Variazione di Temperatura (°C al 2090-2099 rispetto al 1980-1999) ^a		Innalzamento del Livello del Mare (m al 2090-2099 rispetto al 1980-1999) Intervallo basato sui modelli escludendo futuri cambiamenti dinamici rapidi del flusso di ghiaccio
	Miglior stima	Intervallo di probabilità	
Concentrazioni costanti per l'anno 2000 ^b	0.6	0.3 – 0.9	N/A
Scenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 - 0.38
Scenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 - 0.45
Scenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 - 0.43
Scenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 - 0.48
Scenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 - 0.51
Scenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 - 0.59

Note:

^a Queste stime provengono dalla valutazione di una gerarchia di modelli che comprendono un modello climatico base, parecchi modelli del Sistema Terra di intermedia complessità e un gran numero di modelli di Circolazione Generale Oceano-Atmosfera (AOGCM).

^b La composizione costante per l'anno 2000 proviene solo da modelli AOGCM.

Tutti modelli di simulazione, in definitiva, portano a proiezioni future che già abbiamo avuto modo di saggiare in questi anni recenti o comunque in linea con la percezione corrente. Più in particolare

- un incremento delle temperature;
- uno scioglimento e contrazione della superficie terrestre e marina coperta dai ghiacci;
- un conseguente innalzamento del livello dei mari;
- una variazioni nel regime pluviometrico, non tanto per le quantità, ma più che altro per le intensità.

Gli scenari futuri abbozzati che risultano dagli studi fatti sono preoccupanti e per evitare conseguenze che potrebbero diventare irreversibili e quindi molto rischiose per l'intero ecosistema, occorre agire per prima cosa sulle emissioni di GHGs limitando se possibile il riscaldamento terrestre.

1.6 Carbon Footprint ed Ecological Footprint

Per il termine Carbon Footprint (CF), nonostante sia ormai diffuso ed utilizzato in tutto il mondo, non sembra esserci ancora una chiara e condivisa definizione, così come non esiste un'interpretazione univoca sulla modalità di calcolo (Wiedmann 2007).

Le emissioni di CO₂ sono misurate attraverso il Life Cycle Assessment (LCA) che è una metodologia standardizzata, e riconosciuta a livello internazionale, in grado di valutare i danni ambientali e le risorse utilizzate per l'intero ciclo di vita di una qualsiasi prodotto.

I motivi per la quale si misura il Carbon Footprint sono:

- contenere e gestire le attuali emissioni di CO₂ per cercarne la riduzione in futuro;
- diffondere e presentare i dati raccolti per qualsiasi tipo di prodotto.

Diventa quindi essenziale quantificare le emissioni totali di uno stato, e quindi di conseguenza individuare le priorità per ridurre le stesse. Per una azienda privata, invece, i conteggi relativi ai gas serra possono essere sfruttati ai fini commerciali e di immagine rispetto alla concorrenza.

L'Ecological Footprint (impronta ecologica) mette in confronto il consumo umano di risorse naturali con la capacità del nostro pianeta di rinnovarle. Questo indice ci fornisce l'area biologicamente produttiva (di mare e terra) che serve per riprodurre le risorse consumate dall'uomo e per assimilare i rifiuti (Wackernagel 2004).

Per semplificare la comprensione dell'impatto dei consumi di energia, l'impronta ecologica è convertita in tonnellate equivalenti di diossido di carbonio, valutando la quantità di area di foresta che sarebbe necessaria per assimilare tali tonnellate di CO₂ (Wackernagel 2005).

Già dalla metà degli anni '80 il nostro pianeta è in una condizione di cosiddetto "overshoot ecologico" e con i ritmi di consumo attuali si andrà incontro ad un certo e progressivo impoverimento del pianeta terra. Secondo gli ultimi calcoli avremmo bisogno di 1,3 volte il pianeta per sopportare i nostri consumi e assimilare i rifiuti (Wiedmann 2006).

Il più alto Ecological Footprint pro capite spetta agli Emirati Arabi uniti e gli Stati uniti, mentre l'Italia invece è al 24° posto, con un valore di Ecological Footprint di 4,76 ettari pro-capite (GFN 2007).

1.7. Effetti sulla viticoltura

In agricoltura, le principali ricadute del cambio climatico riguardano i seguenti fenomeni:

- Modificazione dei ritmi di crescita stagionali.
- Aumento delle necessità irrigue.
- Abbandono di coltivi irrigui in favore di quelli seccagni.
- Distruzione di vaste aree verdi percorse da incendi.
- Anticipo di semine, raccolte e dello sviluppo fenologico in generale.
- Effetti negativi qualitativi e quantitativi dello stress da caldo.
- Diminuzione della sostanza organica dei terreni e aumento dei nitrati in falda.
- Cicli di patogeni alterati e/o comparsa o di nuovi patogeni

In viticoltura, gli impatti causati dal cambio di clima non sono molto diversi e già oggi si possono notare pesanti ripercussioni sul prodotto finale (Agricoltura 2008).

La vite è una pianta arborea che raggiunge la sua maturità produttiva in 4 -5 anni e può rimanere tale per almeno 30 – 35 anni, ammesso che non sopraggiungano eventi estremi, o malattie che interrompano il ciclo vitale (Eynard e Dalmasso, 1990).

Spostandoci verso latitudini sempre più settentrionali, la coltivazione della vite risente fortemente della insufficienza di radiazione solare, delle basse temperature primaverili che abbinate alle elevate precipitazioni estive limitano pesantemente l'accumulo zuccherino favorendo al tempo stesso la suscettibilità ai patogeni fungini (Fregoni 2006).

Numerosi studi sugli effetti dei cambiamenti climatici, oltre a mostrare un generale surriscaldamento del pianeta, indicano modifiche nelle zone adatte alla coltivazione della vite, con possibile espansione dei margini settentrionali e orientali. (Kenny et al. , 1992). Lo scenario futuro prevede anche un aumento della variabilità delle rese, che porterà a una minore qualità del vino nelle annate eccessivamente produttive, determinando perdite economiche per i produttori (Bindi et al. , 1996).

L'importanza dell'andamento meteorologico durante la stagione vegetativa per la vite (*Vitis vinifera L.*) è ormai nota a tutti; i fattori del clima (precipitazioni, temperatura, radiazione, umidità dell'aria) influenzano i diversi elementi del ciclo vegeto - produttivo della vite e l'efficacia delle operazioni colturali, agendo in ultima analisi sulla qualità e quantità finale delle produzioni. L'effetto dei cambiamenti climatici finora osservato o previsto sulla base di scenari futuri è principalmente collegabile a una variazione nella data di comparsa di alcune fasi fenologiche, mentre molto meno sappiamo dell'impatto in termini quali-quantitativi sulla produzione (Grifoni et al. 2006). Tuttavia, gli indici climatici e bioclimatici oggi disponibili ci

possono restituire una correlazione significativa con la qualità dei vini (Orlandini et al. 2006). I cambiamenti previsti nel clima delle regioni europee viticole nei prossimi decenni potrebbero alterare significativamente sia lo spettro e la distribuzione dei vitigni attualmente in uso (fig 10.1 – GREENPEACE 2009).

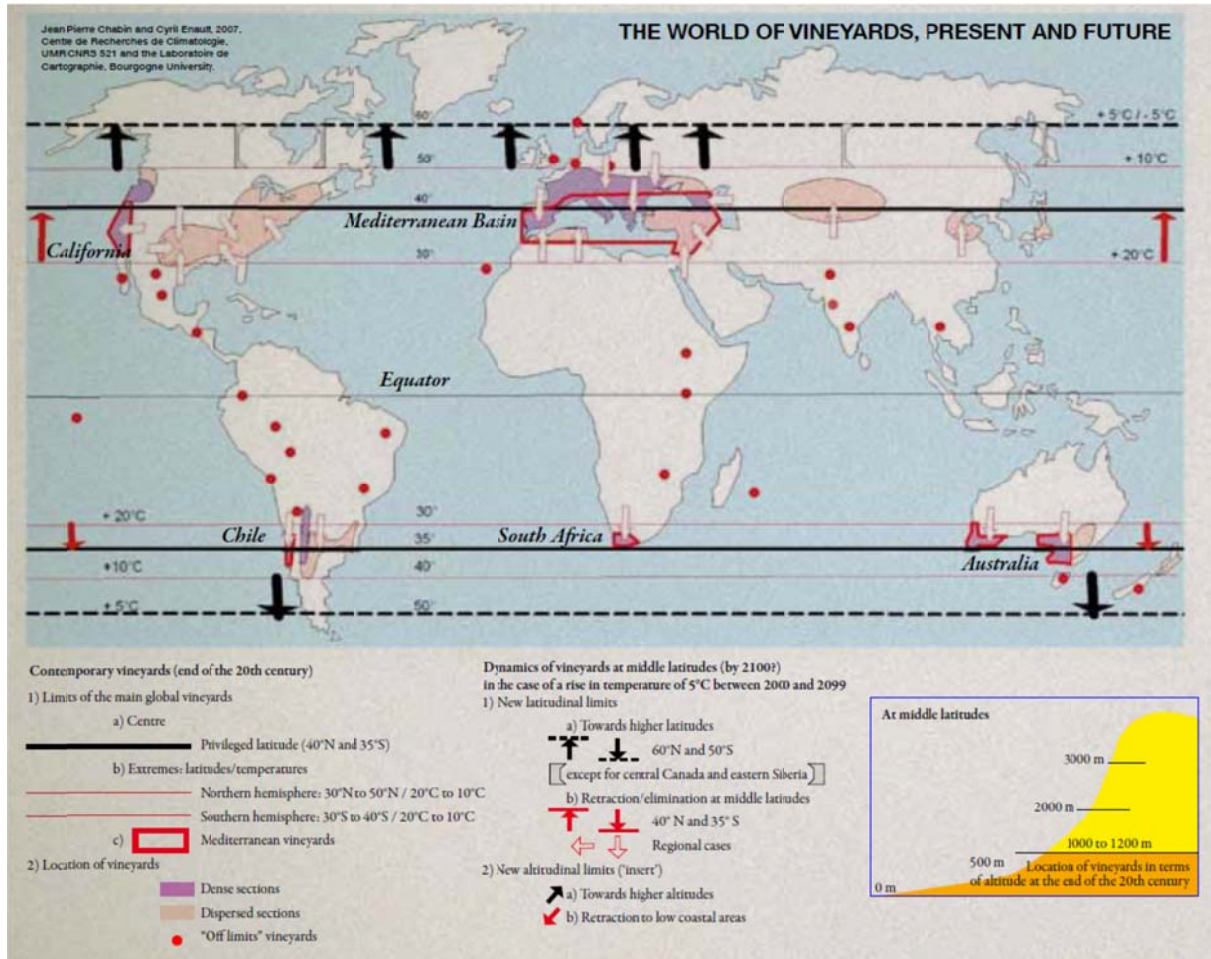


FIGURA 10.1 : *Impatto del cambiamento climatico sui vigneti di tutto il mondo (Rapporto Greenpeace 2009).*

I cambiamenti osservati negli ultimi anni confermano queste previsioni. In particolare, gli spostamenti nei modelli di precipitazione interesserà la maggior parte Regioni europee, con aumento del rischio di siccità, e dato questo scenario, le conseguenze sarebbero drammatiche soprattutto per la penisola iberica (Schultz 2000).

Sperimentazioni a carico del suolo possono essere utili per tener conto delle variazioni di umidità, ma soprattutto per il monitoraggio dei tassi di degradazione della sostanza organica. L'aumento di CO₂, da solo, può aumentare la produzione d'uva in termini quantitativi e l'uso efficiente dell'acqua, ma studi più completi prevedono riduzioni di resa all'aumentare della temperatura e variazioni di radiazioni solari. I livelli di radiazione UV-B probabilmente

continueranno ad aumentare e avranno un diretto impatto sulla composizione dell'uva ed in particolare sulla frazione aromatica attraverso l'alterazione di metaboliti secondari quali flavonoidi, aminoacidi e carotenoidi.

Anche nel settore vino le emissioni di anidride carbonica e l'uso dell'acqua saranno temi di sempre più complesso studio e dibattito per il futuro. In particolare, emergeranno le problematiche relative a “impronte del carbonio e dell'acqua”, per capire nel dettaglio quantità e qualità degli input e output del sistema vite-vino (Schultz 2000).

La fisiologia della pianta di vite in prima analisi, con un aumento di concentrazione in CO₂ nell'aria, viene stimolata alla produzione di biomassa, anche se l'aumento della respirazione dovrebbe potersi contenere in un ordine di grandezza del 15-20%. L'efficienza dell'uso dell'acqua sarà migliorata come conseguenza dell'aumento della resistenza stomatica (Schultz 2000).

Uno dei fenomeni più rimarcati, in quanto anche uno dei più evidenti anche ai profani, riguarda la variazione del ciclo fenologico della vite, che si traduce in crescita più accelerata e anticipazione temporale delle tappe di fioritura prima e di vendemmia poi (Seguin B. 2007).

Da sempre, lo stile di un vino di una determinata regione è funzione del clima, all'interno del quale la possibile variabilità riscontrabile negli anni condiziona le differenti “vendemmie”. I cambiamenti di clima hanno il potere di far mutare lo stile, la personalità, e non per ultimo l'importanza di un vino (Jones 2000).

È evidente che l'impatto del cambiamento climatico sulla distribuzione geografica dei vitigni non è in alcun modo generalizzabile, ma questo riscaldamento farà sì che, ad esempio, una determinata regione aumenti la propria vocazionalità per alcuni vitigni e la diminuisca per altri (Figura 11.1).

Redistribuzione geografica dei vitigni

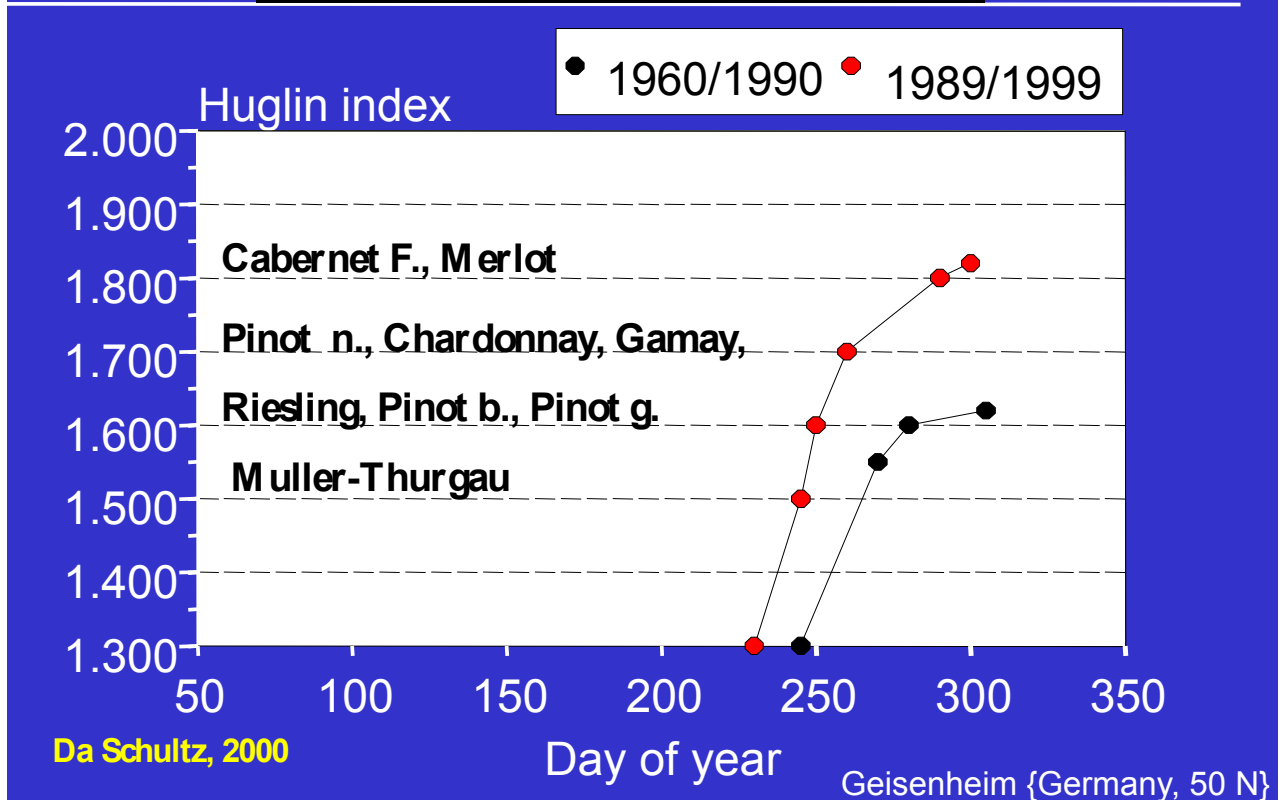


FIGURA 11.1: Redistribuzione geografica dei vitigni secondo dati climatici rilevati in Germania e tradotti nell'indice di Huglin (Schultz 2000).

Gli effetti di uno slittamento di una regione viticola verso una fascia termica più alta si possono manifestare attraverso una crescita vegetativa più rapida e la tendenza a sviluppare profili aromatici sbilanciati. Infatti, questo eccesso di calore porta a fasi fenologiche della vite anticipate e un accumulo zuccherino molto più veloce e/o intenso, tale da anticipare la comparsa degli aromi, richiedendo così delle correzioni di tipo enologico a posteriori (Jones 2005).

Per quanto riguarda la viticoltura si possono riassumere gli effetti del “global warming” in 3 importanti e inevitabili eventi:

1) le zone “meno vocate” in viticoltura per carenza di sommatorie termiche, diventeranno progressivamente ed inevitabilmente zone “più vocate”. L'esempio più lampante riguarda la valle del Reno (in Germania, nella regione del Rein Hessen), dove fino a qualche anno fa ci si poteva permettere una coltivazione di soli vitigni precoci, e oggi, possono arrivare a maturazione anche vitigni rossi a media maturazione (fig 11.1).

2) le zone viticole per tradizione considerate “vocate” si convertiranno progressivamente in territori dal clima caldo sub tropicale mostrando il problema opposto, di sommatorie termiche

in eccesso rispetto a quelli necessari (Figura 10.1). Caso emblematico riguarda la viticoltura californiana, ove la viticoltura è fortemente vincolata dalle risorse idriche, presentando fenomeni di eccessivo accumulo zuccherino (Figura 12.1) e sintesi di aromi atipica.

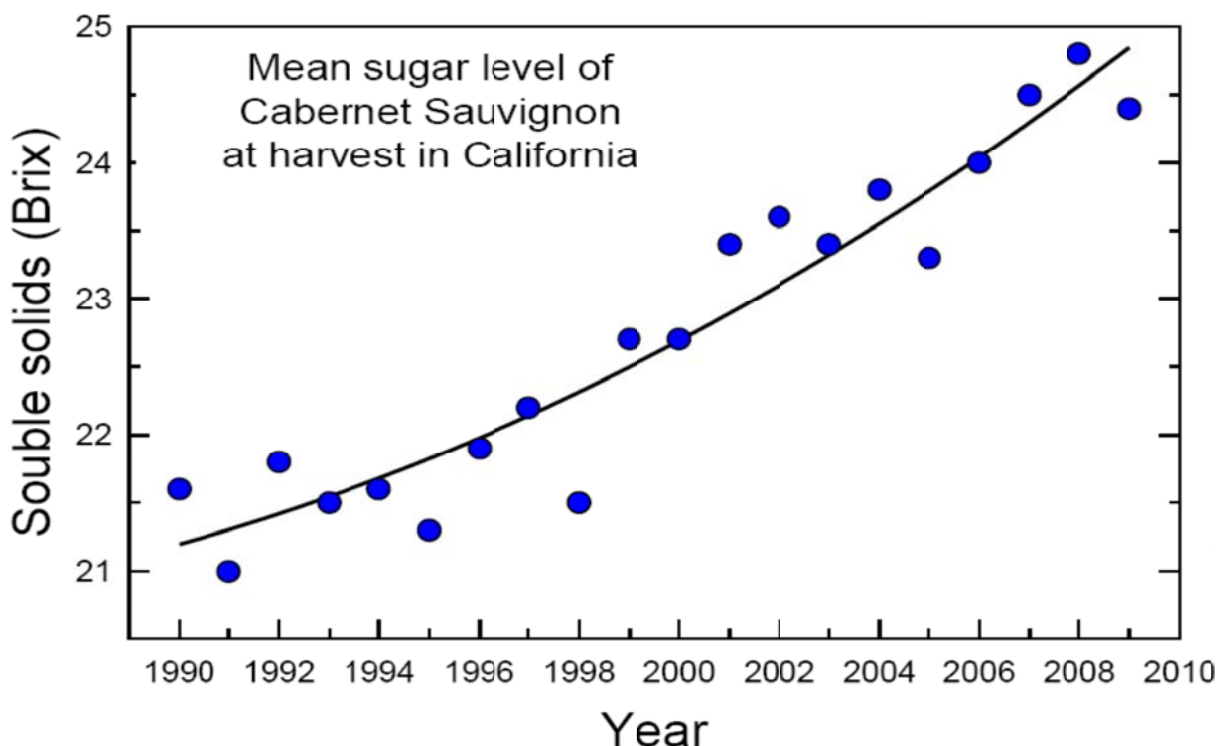


FIGURA 12.1: *Andamento del valore medio della concentrazione zuccherina (Brix) in Cabernet Sauvignon alla maturazione in California.*

3) questo cambio di clima metterà a dura prova il viticoltore non solo perché dovrà difendersi dal surriscaldamento ma anche perché si troverà di fronte ad un cambio di fertilità del suolo e dei cicli di diversi patogeni.

In questo contesto di cambio climatico, diventerà sicuramente un tema di attualità, la possibilità, attraverso tecniche colturali, di “ritardare” la maturazione evitando di raggiungere gradazioni zuccherine troppo elevate e/o livelli acidi così bassi che spesso e volentieri costringono il viticoltore ad una vendemmia “estiva”.

Anche la temperatura e l’intensità luminosa esercitano degli effetti molto importanti e distinti sulla sintesi sostanze coloranti. In generale, Infatti si è dimostrato che per avere la massima sintesi di sostanze antocianiche è necessaria una intensità di luce che non sia superiore ad 1/3 di quella che, normalmente, si registra nel corso di una giornata serena estiva. (Figura 13.1)

Inoltre, questa quantità “minima” di luce sembra variare molto da vitigno a vitigno e, ad esempio, nel caso dello Shiraz, secondo una prova svolta in Australia nell’arco di un triennio (Downey et al., 2004), grappoli completamente ombreggiati già prima della fioritura non

hanno evidenziato alla vendemmia, quando confrontati con grappoli normalmente illuminati, differenze per ciò che attiene al contenuto totale in antociani. Altrettanto prezioso è il riscontro (Mabrouq e Sinoquet, 1998) secondo il quale la colorazione delle uve cresce in funzione della quantità di luce che raggiunge i grappoli secondo l'andamento mostrato in figura 13.1 dal quale si evince come, oltre una certa soglia, pari al circa il 12 % della luce totale disponibile, si verifichi un'inversione di tendenza.

Non vi è dubbio che, indipendentemente dalle condizioni di illuminazione, la temperatura dell'aria e, di riflesso del grappolo, giochino un ruolo assai più incisivo e definito sulla sintesi del colore. Sotto questo aspetto, uno studio condotto in campo su Merlot ha dimostrato, in maniera anche indubbiamente “elegante” sotto il profilo sperimentale (Spayd et al. 2002), che grappoli sottoposti a “raffreddamento” artificiale durante il giorno senza alterazione dell'esposizione alla luce (di elevata intensità e, quindi, non limitante) hanno poi presentato, alla vendemmia, maggiore intensità colorante rispetto a grappoli di controllo. Inoltre, è altresì noto da tempo che un incremento della escursione termica giorno–notte è favorevole per la sintesi del colore, mentre temperature diurne del grappolo che, in climi temperato-caldi, assai facilmente raggiungono e superano in estate i 40 °C, sono fortemente limitanti per l'azione degli enzimi che svolgono un ruolo di protagonisti della via biosintetica degli antociani. Infine, più di recente, è stato appurato che temperature che eccedono i 35 °C possono avere effetti negativi non solo sulla sintesi ma anche causare una degradazione più rapida di pigmenti già prodotti ed accumulati nelle uve.



FIGURA 13.1: *Andamento accumulo antocianico in relazione con la quantità di luce intercettata dai grappoli.*

2. Ipotesi di lavoro

A seguito della problematica di cambio climatico, e di effetti che possono essere indotti sull'intero comparto vitivinicolo, il lavoro di tesi ha riguardato essenzialmente la possibilità di applicare in modo innovativo tecniche colturali già esistenti, o di nuova ideazione, all'ecosistema viticolo per minimizzare gli effetti da riscaldamento globale e rendere se possibile, più sostenibile il vigneto del futuro.

Come è noto, i fattori che sono a monte degli effetti sgradevoli provocati da questo cambio di clima, ricadono nella sfera del controllo della temperatura dell'aria, o comunque della chioma di vite e in quella relativa alla sfera suolo e all'approvvigionamento idrico della pianta (Schultz 2000).

Lo studio ha ipotizzato quindi due filoni d'indagine e di prove che ha visto coinvolta la pianta di vite nella sfera "suolo" e nella sfera "chioma".

Partendo dal comparto chioma, durante il periodo di dottorato sono state prese in esame due problematiche molto importanti e attuali:

- Microclima grappoli e surriscaldamento delle uve: effetti sulla quantità e qualità prodotta.
- Modulazione della maturazione

Per queste aree di studio sono state prodotte due pubblicazioni inerenti a due prove distinte e successivamente riportate nella tesi:

- A) Palliotti A., Poni S., Berrios J.G., **Bernizzoni F.** 2010. Vine performance and grape composition as affected by early-season source limitation induced with anti-transpirants in two red *Vitis vinifera* L. cultivars. Austr. J. Grape and Wine Res. 16: 426-433.
- B) **Bernizzoni F.**, Civardi S., Van Zeller M., Gatti M., Poni S. 2010. Shoot thinning effects on seasonal whole-canopy photosynthesis and vine performance in *Vitis vinifera* L. cv. Barbera. Austr. J. Grape and Wine Res. 17: 351-357.

Nel comparto suolo, non si può fare a meno di trattare il tema acqua e approvvigionamento idrico. Durante il triennio di dottorato sono state condotte prove inerenti allo stato idrico della pianta, al bilancio tra la domanda e l'offerta di acqua.

Per questa tematica è stata prodotta una pubblicazione e una seconda è in fase di revisione:

- C) Palliotti A., Poni S., Silvestroni O., Tombesi S., **Bernizzoni F.** 2011. Morpho-structural and physiological performance of Sangiovese and Montepulciano cvv. (*Vitis vinifera*) under non limiting water supply conditions. Functional Plant Biology, <http://dx.doi.org/10.1071/FP11093>.
- D) **Bernizzoni F.**, Stoll M., Libelli N., Poni S., Schultz H.R. 2012. Drought adaptive responses of different *Vitis vinifera* genotypes. Under review.
(Scambi gassosi (foglia singola vs chioma intera) in cinque genotipi di *Vitis vinifera* L. in presenza di stress idrico del suolo).

Vine Performance and Grape Composition as Affected by Early-Season Source Limitation Induced with Anti-Transpirants in Two Red *Vitis vinifera* L. Cultivars

A. PALLIOTTI¹, S. PONI², J.G. BERRIOS³ and F. BERNIZZONI²

¹ *Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università di Perugia, Borgo XX Giugno 74, 06128 Perugia, Italy*

² *Istituto di Frutti-Viticultura, Università Cattolica del Sacro Cuore, Via Emilia Parmense 84, 29100 Piacenza, Italy*

³ *Departamento de Producción Vexetal, Universidade de Santiago de Compostela, Escola Politécnica Superior, Campus Universitario, E-27002, Lugo, Spain*

Corresponding author: Professor Stefano Poni, fax +39 0523 599268, email stefano.poni@unicatt.it

Abstract

Background and Aims: Previous work has shown that an early (i.e. pre-flowering) source limitation achieved with either hand or mechanical basal shoot zone defoliation is effective in controlling yield while improving grape composition in several environments and *Vitis vinifera* genotypes. Our study was designed to determine whether similar results can be reproduced by using a film-forming anti-transpirant.

Methods and Results. The entire canopies of field grown cvs Sangiovese and Ciliegliolo vines were treated twice pre-flowering with the anti-transpirant Vapor Gard® (T) and compared with an unsprayed control (C). Leaf assimilation and transpiration in both cultivars showed similar reductions (30 to 70%) for several weeks after spraying as compared to C vines, while intrinsic WUE increased in T vines soon after first application and after veraison. In Sangiovese, T vines showed reduced yield, berry weight, bunch compactness and, on a two-year basis, lower vigor and unchanged vine capacity every year. At harvest, T vines showed higher Brix in all seasons and higher anthocyanin concentration in two years out of three. Results on a two year run in Ciliegliolo mimicked those on Sangiovese in terms of yield regulation.

Conclusions: Early season applications of the a film forming anti-transpirant caused a leaf function limitation strong enough to reduce yield and bunch compactness through smaller final berry size.

Significance of the Study: Anti-transpirant applications can be proposed as a much easier way than manual or mechanical leaf removal to induce crop regulation through early source limitation.

Keywords: *anti-transpirant, gas-exchange, water loss, yield, water use efficiency, berry composition*

Introduction

Appellation rules enforce fairly severe yield constraints in Italy that usually range from 6 to 12 t/ha depending upon site and genotype characteristics (Fregoni 2005). Generally speaking, these limitations have not been revised since their introduction and today there is a lively debate centering on the question of whether these limits should be reconsidered according to the impressive gains in knowledge over the last two decades about grapevine physiology and vineyard design (Kliewer and Dokoozlian 2005, Reynolds and Vanden Heuvel 2009, Schultz and Stoll 2010). For instance, one current opinion is that, given greater insights into canopy management, maximum yield thresholds could be slightly or considerably raised without compromising final grape composition (Howell 2001). From another perspective, such limits do not seem to be in step with a general trend seen in new plantings established at fairly high vine densities (\cong 4000-6000 vines/ha). For instance, if an average vine number per hectare of 5,000 is taken, achieving a maximum yield per hectare of 8 t would imply that yield per vine has to be kept below 1.6 kilos of crop. This negotiation becomes quite troublesome when genotypes marked by high bud fruitfulness and heavy bunches have to be managed. Under such circumstances, and due to fact that severity of winter pruning is usually a rough yield regulator due to well-known yield compensation mechanisms (Clingeffer et al. 2000), crop level often needs a finer tuning through the quite time-consuming operations of shoot and/or bunch thinning (Guidoni et al. 2002, Clingeffer 2010).

More recently, both mechanical berry thinning (Tardaguila et al. 2008) and early season, pre-bloom leaf removal (Poni et al. 2006, 2008) have proved to be effective tools in regulating yield while assuring significant grape composition improvement, which under certain circumstances has also benefited from looser bunches that are less susceptible to rot. Regardless of whether such practices are applied manually or mechanically, positive outcomes from basal leaf removal carried out around flowering have shown very high repeatability despite variability in genotype, climate and cultural practices (Intrieri et al. 2008, Diago et al. 2009). Quite likely, this is due to the very strong physiological principle which

makes source availability at pre-bloom the primary regulator of the subsequent fruit set (Coombe 1962, Caspari and Lang 1996). Technically speaking though, only small brands selling premium wine can usually afford the cost of hand leaf removal, whereas machine use triggers the typical issues of optimal fit with trellis, choice of best machine setting and likelihood of incurring either insufficient leaf removal and/or significant direct damage to inflorescences.

It is conceivable that long-lasting source limitation at any specific phenological stage can also be imposed through the use of anti-transpirants (Gale and Polijakoff-Mayber 1967), which at proper application rates reportedly have the potential to significantly reduce both transpiration and photosynthesis in several crop species (Anderson and Kreith 1978, Ceulemans et al. 1983). Our study was designed to test two red *Vitis vinifera* L. cultivars to establish (i) whether early application of a film forming anti-transpirant is effective in mimicking the source limitation induced by pre-bloom leaf removal and (ii) assess how the application of the chemical impacts on gas exchange, vine growth, yield, and grape composition.

Materials and methods

Plant material and experimental layout

The study was carried out from 2007-2009 in two commercial vineyards near Deruta (Perugia, central Italy, 42° 58' N, 12° 24' E, elevation 405 m a.s.l, loamy soil type) and San Gemini (Terni, central Italy, 42° 56' N, 12° 66' E, elevation 128 m a.s.l., sandy-loamy soil type). The first vineyard was a 9-year-old planting of *Vitis vinifera* L. cv. Sangiovese (clone VCR30 grafted to 420A rootstock) trained to a vertically shoot-positioned (VSP), spur-pruned cordon trellis with a bud-load of about 10 nodes per meter of row length. Vine spacing was 2.5 m × 1.0 m (inter- and intra-row) and the cordon was trained 90 cm above ground with three pairs of surmounting catch wires for a canopy wall extending about 1.2 m above the cordon. The San Gemini vineyard was a 35-year-old planting of *Vitis vinifera* L. cv. Cilieggiolo (standard material grafted to Kober 5BB rootstock) planted at 4 m × 1.5 m (inter- and intra-row) and trained to a “palmette” training system, with a bud-load of about 14 ± 2 nodes per meter of row length. This training system is characterized by two bilateral horizontal canes trained at 0.9 and 1.6 m above ground, respectively, and features three surmounting single catch wires for vertical shoot positioning with the canopy wall extending about 1.3 m above the lowest canes. Pest management in both vineyards was run according to local standard practice and shoots were mechanically trimmed when most started to outgrow the top wire.

Depending on year, trimming took place between day of year (DOY) 167-177 for Sangiovese and DOY 158-167 for Cilieggiolo.

Ten adjacent rows in each vineyard were selected to build a complete randomized-block design with each row as a block. Within each row, four uniform vines were tagged and randomly assigned in pairs to a spray treatment (T = treated vines) with the anti-transpirant Vapor Gard® (Intrachem Bio Italia, Grassobbio, BG, Italy) or left unsprayed (C = control vines). Vapor Gard is a water emulsifiable organic concentrate for use on plants designed to reduce transpiration by forming a clear, soft and flexible film that retards normal moisture loss. Its active ingredient is di-1-*p*-Menthene (C₂₀H₃₄), a terpenic polymer also known as Pinolene. Vapor Gard was prepared as a 3% solution in water and stirred slowly to form an emulsion before treatment. A nonionic surfactant [Biofilm (alkylarypolyethoxethanol), Acquatrol Inc., Paulsboro, N.J.] was then added to make a 0.5% concentration of surfactant. Each year the entire canopy of all T vines were sprayed at stage H (“separated flowers” according to Baggiolini 1952) with Vapor Gard solution till run off. In Sangiovese, the first treatments were applied on 14, 16 and 22 May in 2007, 2008 and 2009, respectively, and in Cilieggiolo spraying was done on 14 May in 2008 and 20 May in 2009. The treatment was repeated in both vineyards at the same concentration two-weeks later.

Single-leaf and whole-canopy gas exchange

Beginning on day 1 before spraying in 2007 and 2008 in the Sangiovese and Cilieggiolo vineyards (DOY 134 and 130, respectively), single leaf gas exchange readings of both T and C vines were taken at varying intervals till harvest in the morning hours (9:00 to 11:00) of clear days using a portable flow-through LCA-3 (ADC Bio Scientific Ltd, Herts, UK) gas exchange system. The system featured a broad leaf chamber having a 6.25 cm² window and all readings were taken at ambient relative humidity with an air flow adjusted to 350 mL/min. Twelve primary leaves per treatment in both vineyards were chosen among those inserted at node 3-5 above the distal bunch on a main shoot and sampled under saturating light (PAR higher than 1400 μmol/m²s); assimilation rate (A), transpiration rate (E) and stomatal conductance (g_s) were calculated from inlet and outlet CO₂ and H₂O relative concentrations. Intrinsic water use efficiency (WUE_i) was then derived as the A to g_s ratio.

Concurrently, on the same leaves in the Sangiovese vineyard used for the gas exchange readings, chlorophyll a fluorescence was measured with a light-weight portable continuous excitation fluorimeter (Handy-PEA, Hansatech Inst. Ltd., Norfolk, UK). Dark adaptation was achieved by covering for at least 20 minutes the sample area to be analyzed with a small,

lightweight leaf clip. Then, the small shutter plate of the clip was slid and the underneath, dark adapted, leaf tissue exposed to an actinic light flash at wavelength of 650 nm and a intensity higher than 3000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. The instrument yields the F_v/F_m ratio, which is widely accepted as an indication of the maximum efficiency of the Photosystem II (PSII), where F_m is the fluorescence maximum over the induction curve, whereas F_v (termed variable fluorescence) is calculated as the difference between F_m and F_o levels, F_o being the ground fluorescence (Strasser et al. 1995).

In a separate experiment in 2007 conducted on cv. Sangiovese grapevines grown outside in 60 L pots, whole-canopy net CO_2 exchange rate (NCER) measurements were taken using the custom-built, flow-through system adapted by Poni et al. (1997) to run multiple and automated NCER readings on grapevine canopies. The system features four air-feed centrifugal blowers, four flexible, inflated, transparent polyethylene chambers, an EGM-4 Environmental Gas Monitor for CO_2 (PP-System, Hoddesdon, UK) and a CR10 datalogger and control module (Campbell Scientific Inc., Utah, USA) for system programming and data storing and processing. Reference inlet and outlet CO_2 air streams were switched at two minute intervals to the CIRAS-SC by a solenoid valve and the differential CO_2 was recorded automatically at 10 min intervals. Total and diffuse radiation were measured by a BF2 sunshine sensor (Delta-T Devices, Ltd, Cambridge, UK) placed horizontally on top of a support stake next to the chambers. The four chambers were operated at the onset of veraison (DOY 215) when canopies had already stopped growing and measurements were taken continuously for 15 days before spraying the whole canopy of two randomly chosen vines with Vapor Gard at 3% concentration on DOY 239. Thereafter, recordings for the two proceeded for the following 15 days before dismantling the apparatus on DOY 253. The flow rate fed to the chambers was kept constant at about 15 L/s throughout the experimental period, whereas whole-canopy NCER ($\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$) was calculated from differential CO_2 and flow rates according to Long and Hallgren (1985).

Growth, yield and grape composition

Sangiovese was harvested on 12, 17 and 14 September in 2007, 2008 and 2009, respectively, and Cilieggiolo on 3 September in 2008 and 10 September in 2009. The experimental vines were individually picked and crop weight and bunch number per vine recorded. Compactness was either visually estimated on 60 bunches per treatment (three from each vine replicate) using code OIV 204 (Organization International de la Vigne et du Vin 1983), which ranks as 1 “berries in grouped formation with many visible pedicels” and as 9

“misshapen berries” and, using the same bunches, quantified as total berry weight/main rachis length ratio.

Each year at harvest skin, pulp and seed weights were taken as well as seed number per berry on a 100-berry sample per treatment replicate. After individual weighing, the sample berries were then sliced in half with a razor blade, the seeds and flesh carefully removed from each berry half using a small metal spatula without rupturing any pigmented hypodermal cells and the seeds then carefully separated by hand from the flesh. Both skins and seeds were rinsed in deionized water, blotted dry and weighed. The remaining flesh was used to make a juice sample for measurement of soluble solids (°Brix), pH and titratable acidity (TA). Soluble solids concentration was determined by a temperature-compensating refractometer (RX-5000 Atago-Co Ltd, Tokyo, Japan). TA was measured by a Titrex Universal Potentiometric Titrator (Steroglass S.r.l., Perugia, Italy,) with 0.1 N NaOH to a pH 8.2 end point and was expressed as g/L of tartaric acid equivalent. Total anthocyanin and phenolics contents were determined after Iland (1988) on another 100-berry sample per treatment replicate. The berry samples were homogenized for 1 h at high speed (24,000 rpm) with a blender (T25 Ultra-Turrax, Janke & Kunkel GmbH, IKA-Labortechnik, Staufen, Germany). One gram of the homogenate was transferred to a pre-tared centrifuge tube, enriched with 10 mL ethanol (pH 2) and shaken for 1 h with a rotator set at 10 rpm. The samples were then centrifuged for 15 min at $1500 \times g$. A portion of the extract (0.5 mL) was added to 10 mL 1M HCl, mixed and let stand for three hours; then the absorbance values were measured at 520 nm (anthocyanins) and 280 nm (phenolics) on a LKB-Ultrospec III spectrophotometer (Pharmacia, Uppsala, Sweden). Total anthocyanins and phenols were expressed as mg per berry and per g of fresh berry mass.

When shoot growth had stopped (usually by mid-August as per visual estimation), 40 main and lateral leaves per treatment sampled from all stem positions were taken each year and the area of each blade was determined by an area meter (Hayashi Denko C., AAM-7, Tokyo, Japan). At leaf fall, total nodes per vine were counted, with the contribution of primary and lateral canes being kept separate. Final total leaf area per vine was then estimated on the basis of node counts and leaf blade areas. Concurrently, one-year-old pruning weight was recorded in the Sangiovese vineyard on each vine and used to calculate the yield-to-pruning weight ratio. Vine balance was also assessed by calculating the total leaf area-to-yield ratio (vine basis) in both treatments. Furthermore, ten wood samples were taken from node 3 and 14 along mature canes about 3-4 weeks prior to Sangiovese budbreak, their diameters recorded with a digital caliper and then samples were processed for concentration of soluble sugars and

starch according to a colorimetric method (Morris 1948) using the anthrone reagent (Merck, Darmstadt, Germany) and absorbance readings at 620 nm wavelength on a LKB-Ultrospec III spectrophotometer (Pharmacia, Uppsala, Sweden). The soluble sugars were extracted from 500 mg of dry samples with ethanol:water (80:20). To break down the starch, the remaining pellets were rehydrated with water, boiled for 15 min, and incubated for 24 h at 27 °C with α -amylase and amylo-glucosidase in a sodium acetate buffer at pH 5.0. The resulting soluble carbohydrates were determined with the anthrone reagent as above. A calibration curve was constructed immediately prior to the measurements using 0.0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 and 1.50 mg/mL glucose solutions (1 mL).

Statistical treatment

For each location, vine performance data were subjected to a two-way analysis of variance using the SigmaStat software package (Systat Software, Inc. San Jose, CA, USA). Year was considered as a random variable and the error term for the treatment factor was the year \times treatment interaction mean square. Treatment comparison was performed each year by t-test at $P \leq 0.05$. Visual ratings of bunch compactness were subjected to square root transformation prior to analysis. Gas exchange and chlorophyll fluorescence data are shown as means \pm standard error.

Results

One week after treatment the Sangiovese leaves sprayed with Vapor Gard showed a large reduction in leaf A and E rates, which carried over the following 60 days with peak reductions of 70% as compared to control (Figures 1b and 1c). In post-veraison the effect on stomatal closure was partially relieved, although E rates were lower than control even late in the season (Figure 1c). Intrinsic WUE was higher in T leaves over the first ten days after spraying, thereafter becoming similar to C until late June when it rose again to higher values for the remainder of the season (Figure 1d). F_v/F_m ratios in both treatments never dropped below 0.71, suggesting no significant photo-inhibition, although T leaves showed occasionally higher values later in the season (Figure 1e).

The seasonal leaf gas exchange pattern tracked in 2008 for Cilieggiolo (Figure 2b and 2c) was somewhat similar, the A and E rates being severely curtailed (up to 75% less than C) until veraison (i.e. about 80 days after first spray). Interestingly, while an expected slightly decreasing A trend was displayed by control leaves at post-flowering, Vapor Gard-treated

leaves instead exhibited a significant late season recovery pattern and their A rates were very similar to C's on the last two measurement dates (Figure 2b). Intrinsic WUE again resembled the trend described for Sangiovese, as WUE_i was higher in T vines at the beginning and at the end of the season (Figure 2d).

Whole-canopy NCER was likewise drastically reduced in the Vapor Gard-treated Sangiovese canopies starting from day 1 after spraying and for the following two weeks (Figure 3). Over this period, the NCER decrease ranged from 21 to 35 % as compared to control rates.

Despite a quite uniform bunch number per vine, Vapor Gard-treated Sangiovese vines displayed a significantly lower yield (-18%) as compared to C over the three years due to smaller bunches and smaller berries (Table 1). Conversely, berry number per bunch was unaffected. Bunch compactness was reduced in 2007 and 2009 in T vines as both visual rating and fresh fruit mass/rachis length ratio. Relative skin growth as well as seed number and total seed mass showed no significant variations between the two treatments (Table 1).

Treated Sangiovese vines had higher soluble solids concentration (°Brix) at harvest each year; the three-year average sugar gain was 18% more than that measured in C vines (Table 1); TA and pH were unaffected. Total anthocyanin concentration (mg/kg) was significantly improved in sprayed vines in 2007 and 2008; the effect seen on total phenolics was milder as they were higher in T vines in 2007 only. Differences between treatments vanished when anthocyanins and phenolics were expressed on a per-berry basis.

Vine size as pruning weight was significantly reduced each year in the sprayed Sangiovese vines as compared to C vines (Table 2). A related effect was a significant decrease of cane diameter at node 3 and 14. Conversely, vine capacity as total leaf area, as well as the yield-to-pruning weight ratio, did not differ between treatments. Each year the leaf-to-fruit ratio increased by about 0.25 m²/kg in T vines as compared to unsprayed control. Analyses of the amounts of total carbohydrates stored in the canes (basal and apical zones) showed no differences between treatments (Table 2).

Bunch number per vine was also quite uniform in both seasons of the Cilieggiolo study (Table 3). Treated vines showed a moderate, albeit significant, yield per vine reduction (off 11% as compared to C over the two years) due to smaller bunches with, in 2008 only, smaller berries (Table 3). As in the Sangiovese study, berry number per bunch was unaffected, whereas bunch compactness was reduced in 2008 in T vines as of both visual rating and fresh fruit mass/rachis length ratio. Relative skin growth as well as seed number and total seed weight showed no significant variations between the two treatments. Vapor Gard applications

on Ciliegiolo vines did not significantly modify grape composition pattern at harvest except for a higher total anthocyanin concentration in T vines in 2009 (Table 3).

Discussion

The anti-transpirant Vapor Gard sprayed twice pre-bloom on Sangiovese canopies caused a reduction of leaf photosynthesis and transpiration rate ranging from about 40-to-70%, a result in agreement with prior studies using film-forming compounds on herbaceous crop species (Anderson and Kreith 1978) and azalea (Ceulemans et al., 1983). Yet, in our study, the effect was especially long lasting as compared to the fairly rapid effectiveness decay (10-14 days) reported for Mobileaf® and Wiltpruf® by Anderson and Kreith (1978), an effect probably due to intrinsically better adhesive properties of the chemical and to the repeated treatments. The whole canopy NCER assessment confirmed the effectiveness of Vapor Gard in significantly reducing gas exchange even in case of a late application.

In spite of different genotypes and locations, our data quite consistently show a significant increase of WUE_i over a few days upon the first application, followed by a mid season response during which WUE_i was similar to unsprayed and then a new rise of WUE_i late in the season. Theoretically speaking, anti-transpirant applications should reduce transpiration more than photosynthesis because, in addition to the stomatal and boundary layer resistance to diffusion, carbon dioxide encounters an additional resistance in series between the leaf's substomatal cavities and the chloroplast. If this "mesophyll" resistance (Gaastra 1959) is of similar magnitude to stomata and boundary layer resistances, increased stomatal resistance would cause a larger reduction in transpiration rate than in photosynthesis. In our study this occurred only for a few days after spraying in agreement with the findings reported for Mobileaf® applications on *Achillea millefolium*, *Agropyron cristatus* and *Melitorus officinalis* by Anderson and Kreith (1978). The reasons for such an adjustment are indeed complex, yet they might deal with some counteractive effects of anti-transpirants. According to Davenport et al. (1972), film-forming anti-transpirants suddenly curtail transpiration by raising resistance to the passage of water vapor, which would also determine an increase in leaf water potential. The consequent increased turgidity of the guard cells would then result in wider stomatal opening. i.e. an effect counteracting the higher resistance to diffusion of water vapor from the leaf. This effect was nicely corroborated in peach, where leaf resistance to water vapor diffusion and water potential were measured 18 days after application of the anti-transpirant Mobileaf, revealing higher resistance (three-fold) and less negative water potential (-5.3 bars higher) in sprayed trees vs. control (Davenport et al. 1972).

Late season increase of WUE_i for sprayed vines in both experiments likely involves different mechanisms. For example, dynamic decay of the chemical in each environment and amount of new foliage formed after the second Vapor Gard application may have played a role. Indeed, the trends observed for Cilieggiolo indicate that persistence of the anti-transpirant does not impair leaf capacity to recover to normal assimilation rates upon decay of the film. On the other hand, sprayed Sangiovese leaves performed excellently as WUE_i (Figure 1d) on DOY 211 (75 days after the first Vapor Gard application), when air VPD also scored the highest seasonal values (3.35 kPa) (Figure 1a). It thus seems that at peak transpiration demand in summer the film can sustain higher WUE_i primarily by preventing a major drop in leaf assimilation.

The early season source limitation induced by Vapor Gard proved to be effective, regardless of genotype and season, in significantly reducing yield through a decrease in berry size alone; no impact on berry number per bunch was found. This pattern is in partial divergence with previous early manual or mechanical leaf removal studies showing that the primary determinant for crop regulation was a large decrease in fruit set, hence berries per bunch (Poni et al. 2006 and 2008, Intrieri 2008). Therefore, while it is encouraging to note that the anti-transpirant at the tested concentration had no adverse effects on flowering processes, it is likely that the overall improved grape composition of sprayed grapevines implies mechanisms which are not necessarily the same as those adduced to explain higher quality performance of pre-flowering defoliated vines (Poni et al. 2006).

It is conceivable that the consistent improvement in soluble solids concentration in Sangiovese T vines was at least partially caused by the leaf area-to-fruit ratio, which significantly increased (Table 3) on a biennial basis due to yield contraction. However, faster sugar accumulation in the same treatment could also depend upon more efficient assimilate partitioning towards the bunches as seen from the vegetative growth data in Table 2. Notably, lower pruning weight and cane diameter at node 3 emphasize that vine “vigor” was restrained by Vapor Gard to the benefit of the ripening process. Yet, vine “capacity” as expressed by total leaf area per vine (Table 2) was unchanged, suggesting that this compound could be considered for applications aimed at controlling vigor while avoiding or limiting the counteracting effect of a smaller source potential.

Anthocyanin concentration improved over two seasons in Sangiovese and in 2009 for Cilieggiolo. This outcome is remarkable as both cultivars typically have but a fairly moderate aptitude to developing and accumulating color as compared to other tint varieties. Yet the relative skin growth data we recorded are very similar to those measured on C vines, whereas

Poni et al. (2009) have shown that this parameter increased in early defoliated cvs Barbera and Lambrusco regardless of berry size and that this response was primarily attributed to the abrupt, long-lasting change in bunch microclimate, which is more conducive to the formation of a thicker skin tissue. Here, it is very unlikely that bunch microclimate was changed by simply spraying a chemical as no physical manipulation of the canopy took place. Moreover, the lower final berry size we recorded each season in Sangiovese and in 2008 in Ciliegiolo vine does not seem to fit with unchanged relative skin growth, which could simply have been expected to increase as per the geometrical law stating that the surface area-to-volume ratio of the approximately spherical berries decreases with berry size according to $3/R$, where R is the radius of the sphere. This finding adds further strength to previous reports (Roby and Matthews 2004, Walker et al 2005, Holt et al. 2008) emphasizing that berry size *per se* is not an inherent quality factor as differential growth of single berry organs like skin, flesh and seeds can differ, with berry size remaining quite similar. Vapor Gard in this connection might have limited skin growth more than flesh growth as its effects on leaf photosynthesis were particularly intense throughout the cell division stage of the berry exocarp, which in seeded cultivars is reported to be usually completed within a maximum of 38-40 days after anthesis (Hardie et al. 1996).

Conclusions

Anti-transpirant Vapor-Gard sprayed twice before flowering on field grown Sangiovese grapevines was effective in inducing a significant and long-lasting source limitation, which in turn led to lighter, less compact bunches and enhanced soluble solids and anthocyanin concentration in the must. Although Ciliegiolo was somewhat less responsive, our data support the hypothesis that film-forming anti-transpirants can be used as a non-invasive, easy-to-do and economically viable alternative to hand or mechanically early leaf removal. Other positive features included reduced vigor with unchanged vine capacity and higher WUE_i , especially over the first post-spray days and in late season.

Given the effectiveness of Vapor Gard in hindering photosynthesis regardless of application date, it is also conceivable that a late season application, say, around veraison, might be envisaged as a tool to retard ripening in warm areas where, under pressure of global warming, sugar accumulation is too fast, acidity too low and flavors are untypical (Jones et al. 2005).

We thank David Verzoni for language revision and Intrachem Bio Italia, Grassobbio, BG,

Italy for partial financial support. The authors are also grateful to Società Agricola Vallantica for the use of their commercial vineyards.

Figure 1. Seasonal trends of air VPD and total PAR (a), assimilation rate (b), transpiration rate (c), intrinsic water use efficiency (d) and Fv/Fm ratio (e) recorded in 2007 on fully expanded, median Sangiovese leaves sprayed twice with antitranspirant Vapor Gard at 3% (T) or left unsprayed (C). Bold arrows indicate the time of Vapor Gard application. Data are means \pm standard error (n = 12).

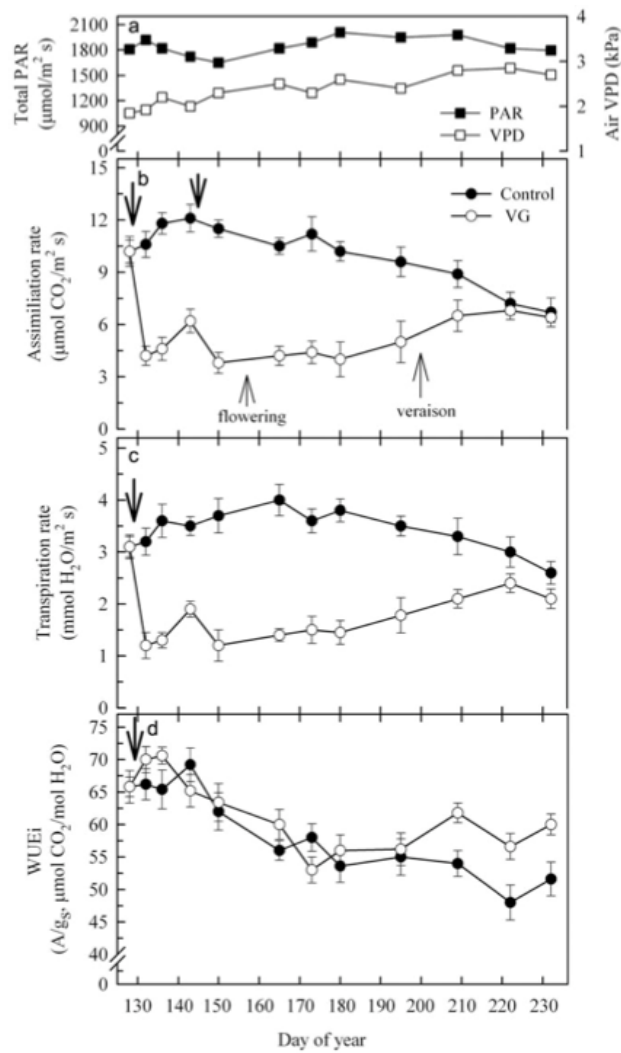


Figure 2. Seasonal trends of air VPD and total PAR (a), assimilation rate (b), transpiration rate (c) and intrinsic water use efficiency (WUE_i) (d) recorded in 2008 on fully expanded, median Ciliegliolo leaves sprayed twice with antitranspirants Vapor Gard at 3% (T) or left unsprayed (C). Bold arrows indicate the time of Vapor Gard application. Data are means ± standard error (n = 12).

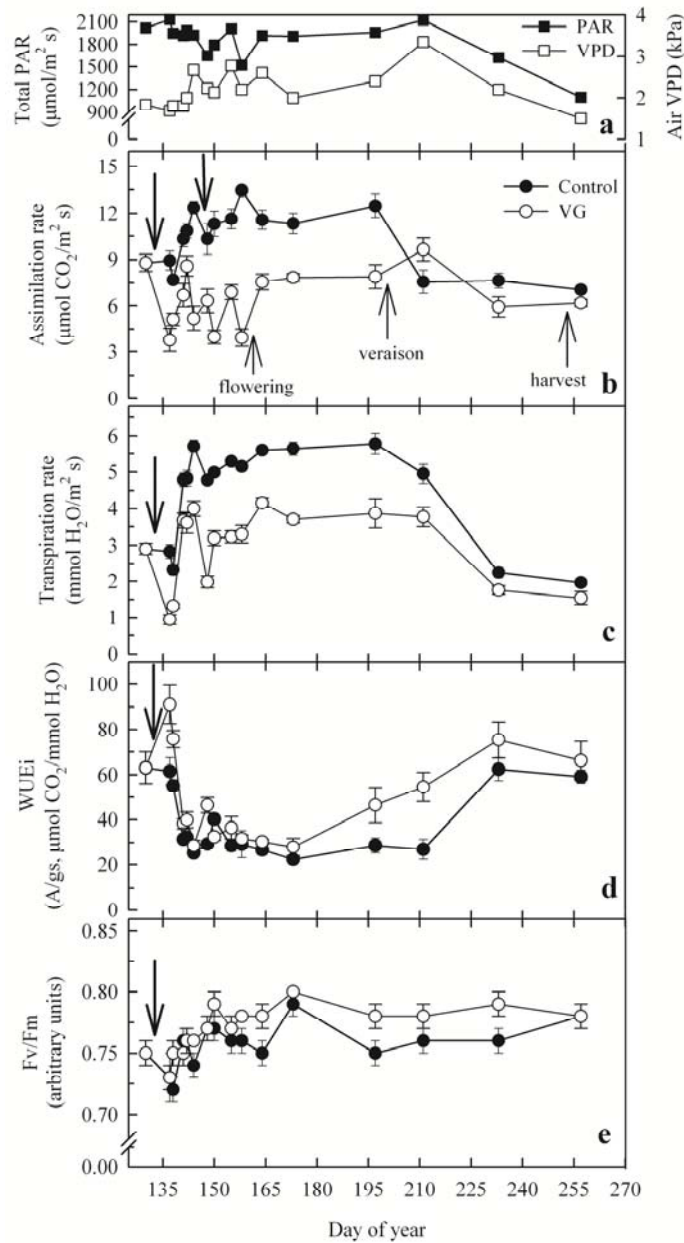


Figure 3. Daily total PAR and air VPD (a) and variation of canopy NCER (b) in Sangiovese potted vines recorded 2 weeks before and 2 weeks after the treatment with antitranspirant Vapor Gard (T) or left unsprayed (C). Arrow indicates the time of chemical application. Data are means \pm standard error (n = 2).

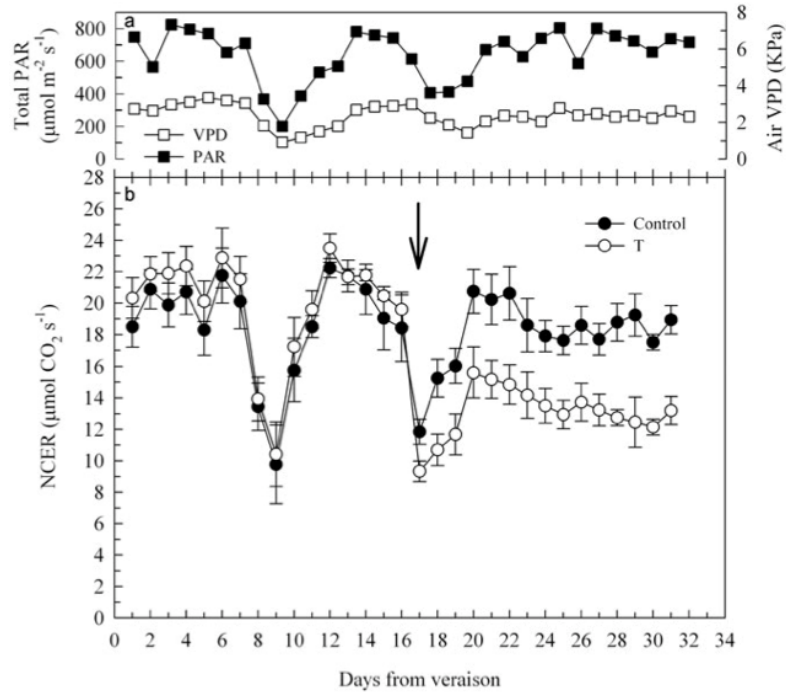


Table 1. Yield components, bunch morphology and grape composition recorded over 2007-2009 in field-grown Sangiovese vines treated with Vapor Gard (VG) or left untreated (C).

Parameter†	2007		2008		2009		Year \times treatment interaction
	C	VG	C	VG	C	VG	
Bunches/vine	12.4	13.0	12.5	12.3	14.7	14.1	ns
Yield/vine (kg)	4.1 ^b	3.6 ^a	4.8 ^b	3.5 ^a	4.5 ^b	3.7 ^a	**
Bunch weight (g)	338 ^b	280 ^a	365 ^b	281 ^a	301 ^b	263 ^a	**
Berries (number/bunch)	142	139	180	185	144	141	ns
Bunch compactness							
Yield/rachis length (g/cm)	19.3 ^b	16.6 ^a	15.1 ^a	14.0 ^a	22.9 ^b	18.3 ^a	*
OIV rating	7.0 ^b	4.4 ^a	6.8 ^a	6.9 ^a	7.1 ^b	5.8 ^a	*
Berry mass (g)	2.35 ^b	2.03 ^a	2.02 ^b	1.79 ^a	2.08 ^b	1.84 ^a	*
Relative skin mass (%)‡	15.7	14.9	13.0	13.6	10.6	12.0	ns
Seed number/berry	2.90	2.73	2.65	2.70	2.63	2.80	ns
Seed weight/berry (g)	0.117	0.125	0.126	0.124	0.099	0.102	ns
Must soluble solids (^o Brix)	22.4 ^a	23.1 ^a	21.6 ^a	23.2 ^b	21.8 ^a	23.6 ^b	*
Titrateable acidity (g/L)	6.8	6.5	6.5	6.2	6.4	6.3	ns
pH	3.29	3.31	3.17	3.26	3.28	3.38	ns
Total anthocyanins (mg/kg)	1050 ^a	1211 ^b	661 ^a	843 ^b	1650 ^a	1691 ^a	*
Total phenolics (mg/kg)	2010	2140	1870	1950	2258	2320	ns
Total anthocyanins (mg/berry)	2.46	2.45	1.34	1.49	3.43	3.13	ns
Total phenolics (mg/berry)	4.72	4.35	3.76	3.51	4.69	4.28	ns

Superscripts indicate mean separation between treatments C and VG within rows and years by *t*-test. **P* = 0.05; ***P* = 0.01. †In case of significant year \times treatment interaction, superscripts indicate mean separation within rows and years by *t*-test. ‡Relative skin mass = 100 (skin mass/total fresh berry mass). VG, Vapor Gard; OIV, Organisation International de la Vigne et du Vin; ns, not significant.

Table 2. Vegetative growth, vine balance indices and cane wood reserves recorded over 2007– 2008 in field-grown Sangiovese vines treated with VG or left untreated (C).

Parameter†	2007		2008		Year × treatment interaction
	C	VG	C	VG	
Pruning weight (kg/vine)	0.69 ^b	0.53 ^a	0.83 ^b	0.63 ^a	**
Cane diameter at node 3 (mm)	8.04 ^b	7.01 ^a	10.20 ^b	8.80 ^a	*
Cane diameter at node 14 (mm)	6.75 ^a	6.31 ^a	7.95 ^b	6.91 ^a	*
Total leaf area/vine (m ²)	4.21	4.36	4.08	4.05	ns
Yield-to-pruning weight ratio (kg/kg)	6.1	6.6	5.9	6.3	ns
Leaf-to-fruit ratio (m ² /kg)	1.02 ^a	1.22 ^b	0.85 ^a	1.16 ^b	**
Soluble solids of canes at node 3 (mg/g DW)	99.3 ^b	81.7 ^a	115.2 ^b	93.4 ^a	*
Starch of canes at node 3 (mg/g DW)	80.2 ^a	73.3 ^a	74.4 ^a	80.2 ^a	*
Soluble solids of canes at node 14 (mg/g DW)	69.1	78.3	62.5	73.3	ns
Starch of canes at node 14 (mg/g DW)	78.7	84.8	85.0	90.2	ns

Superscripts indicate mean separation between treatments C and VG within rows and years by *t*-test. **P* = 0.05; ***P* = 0.01. †In case of significant year × treatment interaction, superscripts indicate mean separation within rows and years by *t*-test. DW, dry weight. VG, Vapor Gard; ns, not significant.

Table 3. Yield components, bunch morphology and grape composition recorded over 2008– 2009 in field-grown Ciliegliolo vines treated with VG or left untreated (C).

Parameter†	2008		2009		Year × treatment interaction
	C	VG	C	VG	
Bunches/vine	21.8	22.5	19.1	17.8	ns
Yield/vine (kg)	8.2 ^b	7.4 ^a	8.0 ^b	7.1 ^a	*
Bunch weight (g)	379 ^b	329 ^a	420 ^a	413 ^a	*
Berries (number/bunch)	122	115	107	101	ns
Bunch compactness					
Yield/rachis length (g/cm)	21.7 ^b	18.1 ^a	20.3 ^b	17.2 ^a	*
OIV rating	7.5 ^b	5.9 ^a	6.3 ^a	6.1 ^a	*
Berry weight (g)	3.09 ^b	2.87 ^a	3.92 ^a	4.09 ^a	*
Relative skin mass (%‡)	8.5	8.7	12.1	10.4	ns
Seed number/berry	2.88	2.44	2.65	2.50	ns
Seed weight/berry (g)	0.104	0.098	0.095	0.103	ns
Must soluble solids (°Brix)	23.2	22.2	21.0	21.7	ns
Titrate acidity (g/L)	5.2	5.7	6.6	6.1	ns
pH	3.59	3.42	3.29	3.37	ns
Total anthocyanins (mg/kg)	914 ^a	902 ^a	712 ^a	783 ^b	*
Total phenolics (mg/kg)	1385	1437	1412	1492	ns
Total anthocyanins (mg/berry)	2.82	2.59	2.79	3.13	ns
Total phenolics (mg/berry)	4.27	4.13	5.53	5.96	ns

Superscripts indicate mean separation between treatments C and VG within rows and years by *t*-test. **P* = 0.05; ***P* = 0.01. †In case of significant year × treatment interaction, superscripts indicate mean separation within rows and years by *t*-test. ‡Relative skin mass = 100 (skin mass/total fresh berry mass). VG, Vapor Gard; OIV, Organisation International de la Vigne et du Vin; ns, not significant.

References

- Anderson, J.E. and Kreith, F. (1978) Effects of film-forming and silicone anti-transpirants of four herbaceous plant species. *Plant and Soil* **49**, 161-173.
- Baggiolini, M. (1952) Les stades repérés dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue Romande d'Agriculture, de Viticulture et d'Arboriculture* **8**, 4-6.
- Caspari, H.W. and Lang, A. (1996) Carbohydrate supply limits fruit-set in commercial Sauvignon blanc grapevines. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Cool*

- Climate Enology and Viticulture. T. Henick-Kling et al. (Eds.), New York State Agriculture Experiment Station, Geneva, USA, pp. II 9-13.
- Ceulemans, R., Gabriele, R. and Impens, I. (1983) Anti-transpirants effects of transpiration, net CO₂ exchange rate and water use efficiency of azalea. *Scientia Horticulturae* **19**, 125-131.
- Clingeffer, P.R. (2010) Plant management research: status and what it can offer to address challenges and limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**, 25-32.
- Clingeffer, P.R., Kristic, M.P. and Sommer, K.J. (2000) Production efficiency and relationships among crop load, fruit composition and wine quality. In: Proceedings 50th Anniversary of the American Society of Enology and Viticulture, Annual Meeting, Seattle, WA, pp. 318-322.
- Coombe, B.G. (1962) The effect of removing leaves, flowers and shoot tips on fruit-set in *Vitis vinifera* L. *Journal of Horticultural Sciences* **37**, 1-15.
- Davenport, D.C., Fisher, M.A. and Hagan, R.M. (1972). Some counteractive effects of anti-transpirants. *Plant Physiology* **49**, 722-724.
- Diago, M.P., Martinez de Toda, F, Poni, S. and Tardaguila J. (2009) Early leaf removal for optimizing yield components, grape and wine composition in Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Proceedings of “16th International GiESCO Symposium” July 12-15, Davis (California), pp. 113-118.
- Fregoni, M. (2005) *Viticultura di qualità*. Phytoline Editore, Verona, Italy.
- Gaastra P. (1959). Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance. *Meded. Landbouwhogeschool Wageningen* **59**, 1-68.
- Gale, J. and Polijakoff-Mayber, A. (1967) Plastic films on plants as anti-transpirants. *Science* **156**, 650-652.
- Guidoni, S., Allara, P. and Schubert, A (2002) Effect of bunch thinning on berry skin anthocyanin composition of *Vitis vinifera* cv. Nebbiolo. *American Journal of Enology and Viticulture* **53**, 224-226.
- Hardie, W.J., O'Brien, T.P. and Jaudzems V.G. (1996) Morphology, anatomy and development of the pericarp after anthesis in grape, *Vitis vinifera* L. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **2**, 97-142.
- Holt, H.E., Francis, I.L., Field, J., Herderich, M.J. and Iland, P.G. (2008) Relationships between berry size, berry phenolic composition and wine quality scores for Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) from different pruning treatments and different vintages.

- Australian Journal of Grape and Wine Research **14**, 191-202.
- Howell, G.C. (2001) Sustainable grape productivity and the growth-yield relationship: A review. *American Journal of Enology and Viticulture* **52**, 165-174.
- Iland, P.G. (1988) Leaf removal effects of fruit composition. Proceedings of the 2nd Cool Climate Viticulture and Oenology Symposium. R.E. Smart et al. (Eds.), Auckland, New Zealand, pp. 137-138.
- Intrieri, C. Filippetti, I., Allegro, G. Centinari, M. and Poni, S. (2008) Early defoliation (hand vs mechanical) for improved crop control and grape composition in Sangiovese (*Vitis vinifera* L.). *Australian Journal of Grape and Wine Research* **14**, 25-32.
- Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., and Storchmann K. (2005). Climate change and global wine quality. *Climate Change* **73**, 319-343.
- Kliewer, W.M. and Dokoozlian, N.K. (2005) Leaf area/crop weight ratios of grapevines: influence on fruit composition and wine quality. *American Journal of Enology and Viticulture* **56**, 170-181.
- Long, S.P. and Hallgreen, J.E. (1985) Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory. In: Coombs J., Hall D.D., Long. S.P. Scurlock J.M.O. (Eds.) *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Pergamon Press, Oxford, pp. 62-93.
- Morris, D.L. (1948) Quantitative determination of carbohydrates with Dreywood's anthrone reagent. *Science* **107**, 254-255.
- Organisation International de la Vigne et du Vin (1983) Codes des caractères descriptifs des variétés et espèces de *Vitis*. Dedon, Paris.
- Poni, S., Magnanimi, E. and Rebucci, B. (1997). Measurements of whole-vine gas exchange using an automated chamber system. *HortScience* **32**, 64-67.
- Poni, S., Bernizzoni, F. and Civardi, S. (2008) The effect of early leaf removal on whole-canopy gas-exchange and vine performance of *Vitis vinifera* L. 'Sangiovese'. *Vitis* **47**, 1-6.
- Poni, S., Casalini, L., Bernizzoni, F., Civardi, S. and Intrieri, C. (2006) Effects of early defoliation on shoot photosynthesis, yield components, and grape composition. *American Journal of Enology and Viticulture* **57**, 397- 407.
- Reynolds, A.G. and Vanden Heuvel, J.E. (2009) Influence of Grapevine Training Systems on Vine Growth and Fruit Composition: A Review. *American Journal of Enology and Viticulture* **60**, 251-268.
- Roby, G. and Matthews, M.A. (2004) Relative proportions of seed, skin and flesh, in ripe berries from Cabernet Sauvignon grapevines grown in a vineyard either well irrigated or under water deficit. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **10**, 74-82.

- Schultz, H.R. and Stoll, M. (2010) Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**, 4-24.
- Strasser, R.J., Srivastava, A. and Govindjee (1995) Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. *Photochemistry and Photobiology* **61**, 32-42.
- Tardaguila, J., Petrie, P.R., Poni, S., Diago, M.P. and Martinez de Toda, F. (2008) Effects of mechanical thinning on yield and fruit composition of Tempranillo and Grenache grapes trained to a vertical shoot-positioned canopy. *American Journal of Enology and Viticulture* **59**: 412-417.
- Walker, R.R., Blackmore, D.H., Clingeleffer, P.R., Kerridge, G.H., Rühl, R.H. and Nicholas, P.R. (2005) Shiraz berry size in relation to seed number and implications for juice and wine composition. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **11**, 2-8.

B

Shoot Thinning Effects on Seasonal Whole-Canopy Photosynthesis and Vine Performance in *Vitis vinifera* L. cv. Barbera.

BERNIZZONI, F., CIVARDI, S., VAN ZELLER, M., GATTI, M and PONI, S.

*Istituto di Frutti-Viticoltura, Università Cattolica del Sacro Cuore, Via Emilia Parmense 84,
29100 Piacenza, Italy*

*Corresponding author: Professor Stefano Poni, fax +39 0523 599268, email
stefano.poni@unicatt.it*

Abstract

Background and Aims: While shoot thinning is one of the most widely applied practices in the vineyard as a tool to regulate canopy density and/or crop level, its physiological bases are still fairly obscure and have been poorly investigated. Our aim was to assess seasonal modification of whole-canopy net CO₂ exchange rate (NCER) in thinned and non-thinned grapevines, as well as establishing correlations with grape composition.

Methods and Results: Potted, mature cv. Barbera vines were thinned (ST) to 10-15 shoots m⁻¹ over the two trial years and compared to a non-thinned control (C). The data logged each season included whole-vine NCER monitored pre- and post-veraison for periods of variable lengths, vine growth, yield components and grape composition. While final leaf area per vine did not differ between treatments, ST showed reduced yield and improved berry color and must sugar accumulation. In 2009, NCER vine⁻¹ recovery in ST was 85% of C at veraison, whereas in 2010 full recovery was already reached around bloom.

Conclusions: A load of 15 shoots m⁻¹ maximized canopy efficiency by inducing the fastest recovery of whole-vine photosynthesis and markedly improved sugar, color and phenolics. Retaining 10 shoots m⁻¹ delayed NCER recovery while improving overall grape composition as compared to C.

Significance of the Study: Direct assessment of the complex seasonal canopy NCER dynamics triggered by shoot thinning indicates that the source-sink balance evolves in ST towards a higher supply of assimilates per unit of crop than that available in non-thinned canopies during the veraison-to-harvest period.

Keywords: *gas-exchange, yield, shoot growth, berry composition*

Introduction

Several studies conducted worldwide, and especially those dealing with mechanical pruning, have shown that node number per vine is only rough regulator of final crop level (Possingham 1994, Clingeleffer et al. 2000, Poni et al. 2004, Clingeleffer 2010). Several cases have been reported where attempts to balance final yield with increased pruning severity have essentially failed due to unpredictable compensating responses from the vines, including enhanced bursting of secondary shoots, which can be fruitful in certain varieties (Morris et al. 2004), as well as more fruitful shoots stemming from latent buds on the cordon and from basal buds that were not counted during balanced pruning procedures (Pool et al. 1978). Fine tuning that targets final yield is thus usually left to manual shoot and/or bunch thinning, both operations being quite time-consuming. Shoot thinning is usually done when their average length is between 15 and 25 cm and its complexity is closely related to initial shoot density, vine vigor and pruning regime. While shoot thinning is fairly straightforward in long-cane pruned vines like Guyot, being essentially limited to the removal of double shoots arising from the nodes of the yearly renewed cane, performing it on a spur-pruned cordon is more troublesome as critical choices regarding vine-retained shoot load and shoot position along the spur/cordon are needed and their subsequent execution can easily increase the operational time up to about 50-60 hours/ha (Intrieri and Poni 1995).

After the pioneering work by Smart (1988), which essentially focused on determining optimal shoot densities in pursuit of desired grape composition and wine sensory properties and emphasized, along with others (Murisier and Ziegler 1991, Reynolds et al. 1994), that improved canopy microclimate and function can be achieved within shoot densities of 15 to 25 shoots m^{-1} of row, not very many specific studies have been released on shoot-thinning effects in grapevine (Morris et al. 2004, Reynolds et al. 2005, Myers et al. 2008). Moreover, the effects reported in these studies have shown some contradictory features, the most notable being the Ravaz index. Calculated as the ratio of yield-to-pruning weight (kg kg^{-1}) according to Bravdo et al. (1985) as an indicator of crop load, this index was essentially unchanged in the biennial shoot-thinning study by Reynolds et al. (2005), whereas Morris et al (2004) and Myers et al. (2008) reported a consistent decrease due to yield potential being reduced more than proportionally compared to vegetative growth in the crown-suckered vines.

Another lacuna in our understanding seems to be that canopy physiology assessment of thinned vs. unthinned vines has so far primarily relied upon the estimation of leaf layer number and the percent of exposed and shaded leaves and bunches through point quadrat analyses (Smart and Robinson 1982) or by measurement of bunch assessment of

photosynthetic photon flux density (PPFD) using a light meter (Reynolds et al. 2005). Indeed, while increasing the light reaching the basal buds of shoot-thinned vines is one of the expected effects, the physiological implications of shoot thinning truly appear to go beyond that for complexity and importance. For instance, expected growth compensation from the retained shoots and bunches would cause a seasonal and dynamic variation in leaf area production, canopy age and source-sink balance, which asks for a whole-canopy approach and should not be bound to an end-of-season overall picture. Our study was thus designed (i) to establish how whole canopy net CO₂ exchange rates (NCER) is seasonally modified in shoot-thinned, spur-pruned cv. Barbera grapevines as compared to non-thinned and (ii) to investigate if and how seasonal NCER modifications are linked to final vine balance and grape composition.

Materials and methods

Plant material and experimental layout

The study was carried out in 2009 and 2010 at Piacenza (44° 55' N, 9° 44' E), Italy, using four-year-old fruiting cv. Barbera (*Vitis vinifera*) grapevines (clone R4 grafted to SO4) grown outdoors in 90-L pots. The pots were filled with a mixture of sand, loam and clay (65%, 20%, and 15% by volume, respectively) and kept well watered throughout the trial season. The vines were hedgerow-trained and pruned to a 100 cm long unilateral cane raised 90 cm from the ground at the end of second season growth (2007) with three pairs of surmounting catch wires for a canopy wall extending 1.3 m above the main wire. Thus, the first trial year (2009) corresponded to the season of spur selection on the trained long canes. On average, seven two-count node spurs per vine were left at winter pruning.

Twelve uniform vines arranged along two single, NE-SW oriented (35°) rows were randomly assigned to either non-thinned control (C) or the shoot-thinned treatment (ST) in a completely randomised design; the two end vines of each row were used as borders. As in year 1 of the trial, the maximum number of shoots per vine was still limited due to young cordon age, the shoot-thinning threshold was set at 10 shoots vine⁻¹ in 2009, whereas 15 shoots vine⁻¹ were maintained in ST the following season. These thresholds were reached by pulling any secondary shoots on count nodes and some shoots from non-count nodes when necessary. Shoots were vertically-positioned during elongation and tipped at the same height on 29 May [day of year (DOY) 149] in 2009 when they outgrew the top wire. Due to weaker shoot growth, no shoot trimming was needed in 2010.

Whole-canopy gas exchange and bunch temperature.

Whole-canopy net CO₂ exchange rate (NCER) measurements were taken using the custom-built, flow-through system adapted by Poni et al. (1997) to run multiple and automated NCER readings on grapevine canopies. Under the current configuration, the system features nine flexible, inflated, transparent polyethylene chambers air-fed by centrifugal blowers, an EGM-4 Environmental Gas Monitor for CO₂ (PP-System, Hoddesdon, UK) and a CR10 data logger and control module (Campbell Scientific Inc., Utah, USA) for system programming and data storing and processing. Reference inlet and outlet CO₂ air streams were switched at two minute intervals to the CIRAS-SC by a solenoid valve and the differential CO₂ was recorded automatically at 10-min intervals.

A BF2 sunshine sensor (Delta-T Devices, Ltd, Cambridge, UK), which uses an array of cosine-corrected photodiodes and a shading pattern to produce two analogue outputs corresponding to the diffuse and total light components, both converted into PAR quanta (PAR = Photosynthetically Active Radiation, ≈400 – 700 nm), was placed horizontally on top of a support stake next to the chambers enclosing the-canopies. The BF2 sensor was wired to the CR10 data logger and recorded the data at 10-min intervals concurrently with chamber inlet air temperature, which was logged with a copper-constantan thermocouple placed within the duct of the inlet air-flow stream.

In 2009, the chambers were continuously operated from day 2 of pre-thinning up to 15 days post-thinning, which was performed on 3 May (DOY 123). The chambers were then temporarily dismantled and reassembled on the vines at pre-verasion (8 July, DOY 189) for a second measurement run, which lasted until 28 July (DOY 209). In 2010, the system was assembled from day 2 of pre-thinning to 33 days after thinning, which was performed on 7 May (DOY 127). The second measurement run began on 15 July (DOY 196) and carried on until 3 August (DOY 215). Four chambers were set up on the C and ST treatments whereas the remaining chamber was left empty to provide assessment for gas exchange alteration due to the physical presence of the plastic enclosure itself.

The flow rate fed to the chambers was progressively adapted to the increasing leaf area and in both seasons was set at 9 L s⁻¹ during the first measurement period and then raised to 15 L s⁻¹ for the subsequent seasonal data set. Since the polyethylene chambers had a volume of 1.25 ± 0.12 m³, a complete volume air change occurred at intervals varying from about 120 to 80 s. Whole-canopy NCER (μmol CO₂ s⁻¹) was calculated from differential CO₂ and flow rates after Long and Hallgren (1985).

To investigate treatment effect on bunch exposure in 2010, thermal imaging of individual

bunches was taken at pre-veraison (12 July) and pre-harvest (2 September) using a FLIR i60 infrared camera (FLIR Systems, Inc., 27700 Wilsonville, Oregon), which operates in the 7-13 μm waveband, has a thermal resolution of 0.1 $^{\circ}\text{C}$ and produces pictures with spatial resolution of 180 x 180 pixels. Pre-veraison images of six bunches per vine randomly chosen in equal number on both row sides (NE and SW orientations) were taken from 9:00 to 10:00 and from 14:00 to 15:00; the same sampling procedure was repeated pre-harvest in the afternoon only. All measurements were taken at a focus distance of about 0.5 m using a wet white paper sheet as a background and making sure that the entire bunch silhouette was captured. Unless bunches were already fully exposed at the time of measurements, their full or partial leaf cover was moved manually and then the image taken almost instantaneously. Each bunch image was then manually processed to isolate the largest inset areas, which were then processed with the FLIR QuikReport software for calculation of mean, maximum and minimum bunch temperatures.

Vegetative growth, yield and grape composition

Total shoot number per vine and shoot fruitfulness were recorded each season on each vine prior to thinning. Total leaf areas removed by thinning in both seasons and with trimming in 2009 were quantified by measuring the surface of each lamina with a leaf area meter (LI-3000A, LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA). The onset of veraison was visually assessed by first berry colour appearance, which took place on 14 July (DOY 195) in 2009 and on 24 July (DOY 205) in 2010. Harvest dates were 20 August in 2009 (DOY 232) and 3 September in 2010 (DOY 246). At harvest, each test vine was individually picked and bunch number per vine recorded. Two 100-berry samples per vine were taken concurrently to ensure that the various positions within bunch (top, mid, bottom) and exposures (internal or external berries) were represented. While the first set of berry samples was weighed and stored at -20 $^{\circ}\text{C}$ for subsequent color and phenolic analysis, the second set was immediately processed. The concentration of total soluble solids (Brix) was determined by a temperature-compensating Atago refractometer (RX-5000 Atago-Co Ltd, Tokyo, Japan). Titratable acidity (TA) was measured by a Crison Compact Titrator (Crison, Barcelona, Spain) with NaOH 0.1N to the end point of pH 8.2 and expressed as g L^{-1} of tartaric acid equivalent.

Total anthocyanins and phenolics were determined after Iland (1988). The frozen 100-berry sample was left to thaw and then homogenised at high speed (20000 rpm) with an Ultra-Turrax (Rose Scientific Ltd, Alberta, Canada) homogeniser for 1 min. Two grams of the homogenate were transferred to a pre-tared centrifuge tube, enriched with 10 mL aqueous

ethanol (50%, pH 5.0), capped and mixed periodically for an hour before centrifugation at 3500 rpm for 5 min. A portion of the extract (0.5 mL) was added to 10 mL 1M HCL, mixed and let stand for three hours; then the absorbance values were registered at 520 nm and 280 nm as taken on a Kontron spectrophotometer (Tri-M Systems and Engineering Inc., Toronto, Canada). Total anthocyanins and phenolics were expressed as mg per g of fresh weight.

Soon after harvest, the vines were entirely defoliated and the fresh weight of main and lateral leaf fractions recorded separately. Total leaf area was then estimated from well established relationships for the same cultivar between fresh weight (x, in g) and leaf area (y, in cm²), yielding $y = 44.128 x$; $r^2 = 0.97$ for main shoots and $y=43.34x$; $r^2=0.94$ for laterals.

Statistical treatment

Within-season treatment comparison was performed by t-test and variation around means determined by the standard error (SE).

Results

The first seasonal whole-canopy NCER run in 2009 was characterised by a fairly pronounced weather variability as air VPD varied from 0.67 kPa recorded on the very cloudy DOY 135 up to 2.59 kPa of DOY 131 (Figure 1A). The ratio of diffuse-to-direct light ranged from 24.8 % (DOY 123) to 87.7 % (DOY 135). The net CO₂ exchange rate (NCER) vine⁻¹ was significantly lower in ST on any date between DOY 123 and 137, although on a relative basis it increased from 51 % of C recorded the day after thinning to 67.4% registered on DOY 137 (Figure 1B). The baseline of NCER vine⁻¹ measured in the empty chamber averaged over the entire recording period (DOY 121-137) was 0.0045 μmol s⁻¹, thus indicating very negligible physical interference of the chamber itself.

The second measurement period in 2009 had mostly clear days and hot spells on DOY 197 and 198 with air VPD peaking at about 3 kPa (Figure 1C). NCER vine⁻¹ in ST was 84.2% of C at veraison and reached 90% over the last day of measurements before final dismantling (Figure 1D). NCER per unit leaf area (μmol m⁻²s⁻¹) calculated for the last week of measurements (DOY 202-209) was 7.2 μmol m⁻² s⁻¹ in C canopies as compared to 6.5 μmol m⁻² s⁻¹ in ST (P = 0.02). Empty-chamber mean NCER over the entire measurement period was 0.24 μmol s⁻¹, i.e. a 1.1% deviation from the averaged whole-vine NCER rates of the two treatments.

In 2009, thinning reduced shoot number vine⁻¹ by 40% and thinning-removed leaf area

was 12.2% of final total LA per vine (Table 1). Neither final LA vine⁻¹ nor the components due to main and lateral fractions differed between treatments. When given on a per-shoot basis, total, main and lateral LA were 75%, 57% and 116% higher, respectively, than values found in C vines (Table 1). Despite the nearly 60% decrease in bunch number per vine in ST vines, crop per vine was reduced by only 25% due to significant compensation towards bigger bunches with larger berries (Table 2). Must soluble solids (°Brix) and total anthocyanin concentration were significantly higher in ST, whereas total acidity markedly decreased; conversely, must pH and total phenolics were unaffected. Shoot thinning led to a higher end-of-season leaf-to-fruit ratio (0.55 m² kg⁻¹) as compared to non-thinned vines (0.39 m² kg⁻¹).

In 2010, the beginning of the first measurement run (DOY 125-133) was marked by unseasonally cloudy and cool weather with air VPD constantly below 1 kPa (Figure 2A). NCER vine⁻¹ in the ST treatment dropped to 60% of C the day after treatment and was significantly lower than non-thinned for the following week (Figure 2B). Thereafter ST showed a fast NCER recovery and full compensation was reached around bloom. For the remainder of the measuring period, NCER was slightly higher in ST than in C vines. Empty-chamber NCER averaged over DOY 126-160 was -0.18 μmol s⁻¹ (2.4% of grand mean of the two treatments over the whole period).

The late-season measurement set featured mostly clear and hot days (air VPD constantly above 2.5 kPa except for DOY 210-212, Figure 2C) and no significant difference of NCER vine⁻¹ between treatments was shown on most days, although non-thinned vines manifested a trend towards higher rates over the last five days of monitoring (Figure 2D). As no further canopy growth was seen in either treatment after veraison, NCER per unit of leaf area was calculated over DOY 200-215 and yielded almost identical values (≈ 4.6 μmol m⁻² s⁻¹) in the two treatments. Baseline from empty-chamber NCER was -0.34 μmol s⁻¹ (3.5% of grand mean of the two treatments). At no date or time during the day did bunch temperatures differ between treatments whereas SW-facing bunches were always warmer than those having an NE exposure regardless of treatment (Table 3).

In 2010, thinning halved shoot number vine⁻¹ (from 30 in C to 15) and thinning-removed leaf area was 11.2% of final total LA area per vine (Table 4). As in the previous season, final total LA and its main and lateral components did not differ between treatments on a per vine basis. When given on a per shoot basis, total, main and lateral LA were about two-fold higher than values found in C vines (Table 4), although lateral emission was much weaker than in the previous season. Likewise, bud fertility, bunch weight and yield per vine dropped markedly in both treatments as compared to 2009, whereas shoot thinning reduced crop per vine by about

44 % and increased slightly, albeit significantly, bunch weight as compared to C (Table 5). Must soluble solids ($^{\circ}$ Brix), total anthocyanins and phenolics and leaf-to-fruit ratio were notably enhanced in ST, whereas total acidity decreased significantly.

Discussion

The 40% and 50% reduction in shoot number we carried out via early thinning in 2009 and 2010 did not affect vine capacity, given as total leaf area compared to non-thinned vines. In agreement with previous studies carried out in the field on Cardinal (Dokoozlian 1990), Chardonnay (Dokoozlian 2010) and Sangiovese (Myers et al. 2008), full vegetative growth compensation was achieved in both years in ST by a marked increase in the vigor of individual shoots manifested as higher LA as well as greater leaf area on lateral shoots.

The 2009 season displayed features of an “on” year with high yield and shoot fruitfulness and large-sized bunches (Table 2). Quite likely, the source limitation occurring in both treatments as shown by the low final leaf-to-fruit ratios adversely affected bud initiation as well as vigor and yield expression in 2010 (Tables 4 and 5). In accordance with earlier work on Pinot noir and Cabernet franc (Reynolds et al. 2005), early shoot thinning resulted in higher soluble solids and color intensity in berries at harvest. Although this response was in general agreement with the higher end-of-season leaf-to-fruit ratios reached in ST (Kliwer and Dokoozlian 2005), different patterns of available assimilates per unit of crop can be outlined for the two seasons based on NCER vine⁻¹ trends.

In 2009, canopy NCER recovery was quite slow over the monitored two weeks after thinning, a fact very likely due to the temporary loss of light interception (i.e. sparse canopies with more canopy gaps) bound to the low shoot density level (10 m⁻¹) (Smart 1988). Shoots in both treatments were trimmed at the same height when they out-grew the top wire and a similar number of primary leaves was therefore retained. The significant growth compensation by the primary leaves recorded in ST (+ 57% as compared to C, Table 1) relates to larger blades and is the main adaptive response that ST vines showed to refill the canopy and gain photosynthesis. Moreover, if the source-sink balance of the two treatments is expressed in terms of the available carbon per unit of crop by taking the ratio of mean NCER calculated over the whole post-veraison monitoring period and final yield per vine, ST would be 3.43 nmol CO₂ s⁻¹g⁻¹ vs. 2.97 nmol CO₂ s⁻¹g⁻¹ of C (P = 0.01). It can thus be inferred that the shoot thinned vines benefited from veraison onward from a higher amount of assimilates for ripening per crop unit available. It should be pointed out that while crop per vine was reduced in ST by 25%, lower fractional reduction in NCER was observed, being -15% at

veraison (DOY 195) and progressively recovering up to -10% by DOY 209 as compared to rates measured in non-thinned. Potential bias towards such reasoning is that sink (bunch) demand varies throughout the season according to the well known double sigmoid pattern and direct estimates of sink size strength at specific time points is not available. However, previous work carried out on the same variety (Scienza et al. 1981) reporting a berry growth curve leading to a final berry size of $\cong 2.5$ g (similar to that of our study), indicated that about 60% of berry growth occurred after veraison. If so, it can be assumed that most of ST yield compensation took place in post-veraison and that, at the critical time of veraison when sugaring typically starts at the fastest rate, the balance of available carbohydrates per unit of crop was even more favorable in the ST vines. Indeed, when expressed on a per-unit leaf area basis, NCER records of the last week showed lower efficiency in the ST vines, although this might simply be due to the more vigorous shoots carrying in post-veraison a higher fraction of young, immature laterals with lower assimilation rates (Poni and Giachino 2000) as well as higher respiratory costs (Schultz 1991) than fully expanded, mature leaf tissues.

The dynamics of seasonal NCER vine⁻¹ and the impact on final grape composition due to treatments were somewhat different in 2010, a result primarily attributable to the fact that thinning brought an initial, objectively high canopy density (30 shoots m⁻¹ of row) to a level recognized to be close to optimum (15 shoots m⁻¹ of row). A major consequence of this choice was that NCER vine⁻¹ in ST showed full recovery as compared to C already by bloom, i.e. 17 days after thinning was applied. Interestingly, this recovery was completed in a few days after the very cool and cloudy weather characterizing the first 10 days of gas exchange records. It is feasible that reducing canopy density from 30 to 15 shoots m⁻¹ did not dramatically affect whole-canopy light interception since, given the mutual shading among shoots at pre-thinning, removal primarily resulted in exposing previously shaded foliage to light rather than significantly increasing the fraction of canopy gaps, which in turn determines a higher loss of incoming light. Therefore, the initial drop in post-thinning NCER could be more easily offset either by enhanced vigor of individual shoots in ST or a possible, yet non-quantifiable, amount of photosynthetic compensation by retained foliage upon removal of significant leaf area (Candolfi-Vasconcelos and Koblet 1991). In our study, similarities between treatment NCER vine⁻¹ from flowering onward, the lack of difference in bunch temperatures assessed at pre-veraison and harvest, as well as an almost identical final leaf area per vine, support previous findings from Reynolds et al. (2005) showing that in Pinot Noir and Cabernet Franc vines shoot thinning performed at stage 15 (flower bunch visible with six to seven expanded leaves) after Eichhorn and Lorenz (1977) had no significant impact on bunch and leaf

exposure to sunlight determined 3 to 4 weeks before harvest by point quadrat analyses.

The quite remarkable grape composition improvement achieved in 2010 by the thinned vines finds its more logical link to the availability of assimilates for ripening, which, when calculated on a per vine basis as mean post-veraison NCER per unit of crop, yields $3.65 \text{ nmol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ g}^{-1}$ in C as compared to $6.51 \text{ nmol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ g}^{-1}$ in ST. This finding is particularly significant in cultivars like Barbera that might show tendency towards poor pigmentation and overly high acidity at harvest (Calò et al. 2006).

Conclusions

Shoot thinning carried out in Barbera grapevines on a two year run to retain a shoot load varying from 10 to 15 shoots m^{-1} of row indicated that the latter threshold allows full recovery as of whole canopy net CO_2 exchange rate (NCER) by flowering, whereas the level of 10 shoots m^{-1} causes a delayed recovery approaching 85% of NCER recorded on the non thinned canopies around veraison. However, despite variability in shoot vigor, crop level, compensation by different yield components and leaf-to-fruit ratios between the two seasons, our study clarifies that shoot thinning applied on cv. Barbera at the tested severities when shoots are about 15-20 cm in length leads to a fairly strong physiological impact in terms of supply-demand function at the canopy level as shoot thinned vines showed higher amounts of assimilates per unit of crop in the veraison-to-harvest period.

Acknowledgements

We thank David Verzoni for language revision.

Figure 1. Seasonal trends of air VPD, direct and diffuse photosynthetically active radiation (PAR) and of whole canopy net CO₂ exchange rate for early season (a,b) and late season (c,d) measurement runs carried out in 2009 on Barbera grapevines. Bold arrow indicates time of shoot thinning. Vertical bars indicate 2*standard error (n = 4).

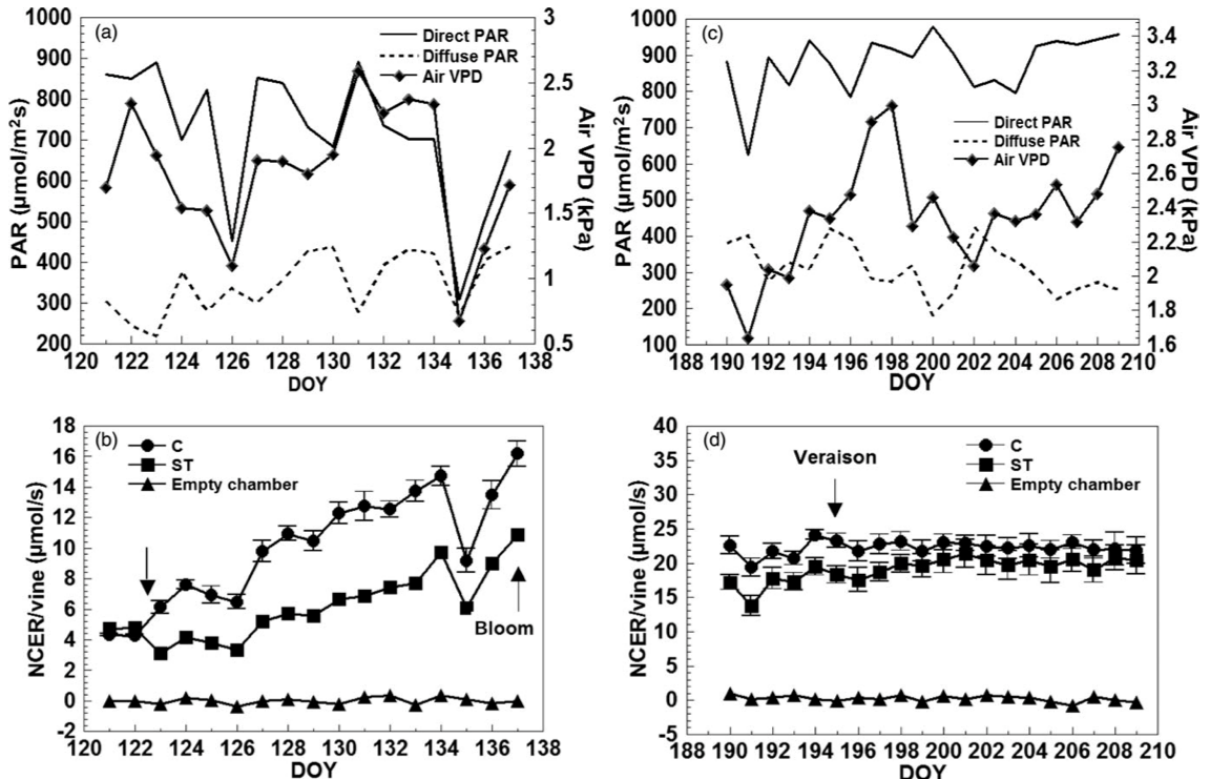


Figure 2. Seasonal trends of air VPD, direct and diffuse photosynthetically active radiation (PAR) and of whole canopy net CO₂ exchange rate for early season (a,b) and late season (c,d) measurement runs carried out in 2010 on Barbera grapevines. Bold arrow indicates time of shoot thinning. Vertical bars indicate 2*standard error (n = 4).

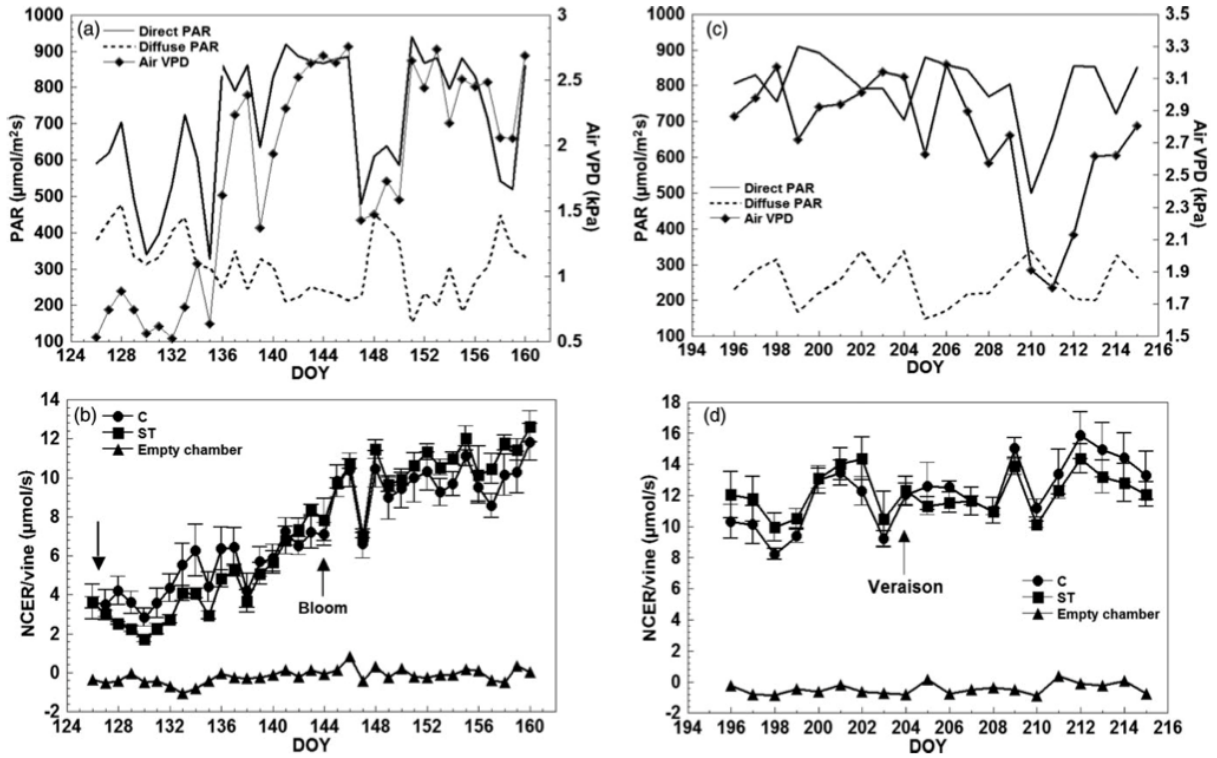


Table 1. Influence of shoot thinning on vegetative growth recorded in 2009 on Barbera grapevines as compared with a non-thinned control.

Variable	Control	Shoot-thinned†	Sig.‡
Shoot number/vine	17.5	10.5	**
Total LA/vine (m ²)	2.93	3.09	ns
Main LA/vine (m ²)	2.01	1.90	ns
Lateral LA/vine (m ²)	0.92	1.19	ns
Total LA/shoot (cm ²)	1674	2942	**
Main LA/shoot (cm ²)	1141	1791	**
Lateral LA/shoot (cm ²)	533	1151	*
Removed LA/ vine with thinning (cm ²)	–	3780	–
Removed LA/vine with trimming (m ²)	2172	1503	ns

*, **Significant at $P \leq 0.05, 0.01$, respectively. †Shoot thinning performed 3 May (DOY 123). ‡Means separated within rows by t-test. LA, leaf area; ns, not significant.

Table 2. Influence of shoot thinning on yield components, grape composition and leaf-to-fruit ratio recorded in 2009 on Barbera grapevines as compared with a non-thinned control.

Variable	Control	Shoot-thinned†	Sig.‡
Bunches/shoot	1.82	1.81	ns
Yield/vine (kg)	7.48	5.56	*
Bunches/vine	32	19.5	**
Bunch weight (g)	236	285	**
Berry weight (g)	2.36	2.76	**
Soluble solids (°Brix)	18.5	21.2	**
pH	3.08	3.11	ns
Titrateable acidity (g/L)	12.4	10.1	**
Anthocyanins (mg/g)	0.625	0.817	*
Phenolics (mg/g)	1.598	1.641	ns
Leaf-to-fruit ratio (m ² /kg)	0.39	0.55	*

*, **Significant at $P \leq 0.05, 0.01$, respectively. †Shoot thinning performed 3 May (DOY 123). ‡Means separated within rows by t-test. ns, not significant.

Table 3. Bunch temperatures (mean, maximum, minimum) recorded 12 July (DOY 193, morning and afternoon) and 2 September (DOY 245, afternoon) in North-East (NE) and South-West (SW) row sides for control (C) and shoot thinned (ST) Barbera grapevines.

Source of variation	12 July – morning (DOY 193) T (°C)			12 July afternoon (DOY 193) T (°C)			2 September (DOY 245) T (°C)		
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Treatment									
Control	32.3	33.6	30.7	36.2	37.7	34.5	29.0	30.7	25.3
ST	32.2	33.8	30.5	36.2	37.5	34.3	29.1	30.8	24.9
Row side									
NE facing	31.7	32.8	30.3	35.6	36.8	34.1	27.8	28.8	24.1
SW facing	32.8	34.5	30.9	36.7	38.3	34.6	30.4	32.6	26.0
Significance†	**	**	**	**	**	**	**	**	**

*,**Significant at $P \leq 0.05, 0.01$ respectively. †Means separated within columns by t-test. Main treatment pair comparisons (Control vs. ST) and treatment × row side interaction were never significant. ns, not significant.

Table 4. Influence of shoot thinning on vegetative growth recorded in 2010 on Barbera grapevines as compared with a non-thinned control.

Variable	Control	Shoot-thinned†	Sig.‡
Shoot number/vine	30.5	15	**
Total LA/vine (m ²)	2.63	2.62	ns
Main LA/vine (m ²)	2.33	2.28	ns
Lateral LA/vine (m ²)	0.30	0.34	ns
Total LA/shoot (cm ²)	862	1746	**
Main LA/shoot (cm ²)	764	1520	**
Lateral LA/shoot (cm ²)	98.3	227	*
Removed LA/ vine with thinning (cm ²)	–	2945	–

*, **Significant at $P \leq 0.05, 0.01$, respectively. †Shoot thinning performed 7 May (DOY 127). ‡Means separated within rows by t-test. ns, not significant.

Table 5. Influence of shoot thinning on yield components, grape composition and leaf-to-fruit ratio recorded in 2010 on Barbera grapevines as compared with a non-thinned control.

Variable	Control	Shoot-thinned†	Sig.‡
Bunches/shoot	0.99	1.05	ns
Yield/vine (kg)	3.30	1.86	**
Bunches/vine	30.7	15.7	**
Bunch weight (g)	101	118	*
Berry weight (g)	2.75	2.81	ns
Soluble solids (°Brix)	22.0	26.8	**
pH	3.05	3.10	ns
Total acidity (g/L)	11.2	9.90	**
Anthocyanins (mg/g)	0.541	0.906	**
Phenolics (mg/g)	1.46	2.11	**
Leaf area-to-fruit (m ² /kg)	0.80	1.41	**

*, **Significant at $P \leq 0.05, 0.01$, respectively. †Shoot thinning performed 7 May (DOY 127). ‡Means separated within rows by t-test. ns, not significant.

References

- Bravdo, B., Hepner Y., Loinger C., Cohen S. and Tabacman H. (1985) Effect of crop level and crop load on growth, yield, must and wine composition, and quality of Cabernet Sauvignon. *American Journal of Enology and Viticulture* **36**, 125-131.
- Calò, A., Scienza, A. and Costacurta A. (2006) *Vitigni d'Italia*, Edagricole, pp.917.
- Candolfi-Vasconcelos, M. and Koblet W. (1991) Influence of partial defoliation on gas-exchange parameters and chlorophyll content of field grown grapevines – Mechanisms and limitations of the compensation capacity. *Vitis* **30**, 129-141.
- Clingeleffer, P.R. (2010) Plant management research: status and what it can offer to address challenges and limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **16**, 25-32.
- Clingeleffer, P.R., Kristic, M.P. and Sommer, K.J. (2000) Production efficiency and relationships among crop load, fruit composition and wine quality. In: *Proceedings 50th Anniversary of the American Society of Enology and Viticulture, Annual Meeting, Seattle, WA*, pp. 318-322.
- Dokoozlian, N.K. (1990) Light quantity and quality within *Vitis vinifera* L. grapevine canopies and their relative influence on berry growth and composition. Ph.D. thesis, University of California, Davis.
- Dokoozlian N.K. 2010. Integrated canopy management: a twenty year evolution in California. *Proceedings of "Recent advances in grapevine canopy managements"*, Symposium dedicated to Emeritus Professor M. Kliewer, July 16, Davis (California), pp. 43-52.
- Eichhorn, K.W. and D.H. Lorentz (1977) Phanologische Entwicklungsstadien der Rebe. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*. Braunschweig **29**, 119-120.
- Iland, P.G. (1988) Leaf removal effects of fruit composition. *Proceedings of the 2nd Cool Climate Viticulture and Oenology Symposium*. R.E. Smart et al. (Eds.), Auckland, New Zealand, pp. 137-138.
- Intrieri, C. and S. Poni. (1995) Integrated evolution of trellis training systems and machines to improve grape and vintage quality of mechanized Italian vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture* **46**, 116-127.
- Kliewer, W.M. and Dokoozlian, N.K. (2005) Leaf area/crop weight ratios of grapevines: influence on fruit composition and wine quality. *American Journal of Enology and Viticulture* **56**, 170-181.
- Long, S.P. and Hallgreen, J.E. (1985) Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory. In: Coombs J., Hall D.D., Long. S.P. Scurlock J.M.O. (Eds.) *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Pergamon Press, Oxford, pp. 62-93.

- Morris, J.R., Main, G.L. and Oswald O.L. (2004) Flower bunch and shoot thinning for crop control in French-American hybrid grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* **55**, 423-426.
- Murisier, F. and Ziegler, R. (1991) Effets de la charge en bourgeons et de la densité de plantation sur le potentiel de production, sur la qualité du raisin et sur le développement végétatif. Essais sur Chasselas. *Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture* **23**, 277-282.
- Myers, J.K., Wolpert, J.A. and Howell, G.S. (2008) Effect of shoot number on the leaf area and crop weight relationship of young Sangiovese grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture* **59**, 422-424.
- Poni, S., Magnanini, E. and Rebutti, B. (1997) Measurements of whole-vine gas exchange using an automated chamber system. *HortScience* **32**, 64-67.
- Poni, S. and Giachino E. (2000) Growth, photosynthesis and cropping of potted grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet Sauvignon) in relation to shoot trimming. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **3**, 216-226.
- Poni, S., Bernizzoni, F., Presutto, P. and Rebutti, B. (2004) Performance of Croatina under short-cane mechanical hedging: A successful case of adaptation. *American Journal of Enology and Viticulture* **55**, 379-388.
- Pool, R.M, Pratt C. and Hubbard, H.D. (1978) Structure of base buds in relation to yield in grapes. *American Journal of Enology and Viticulture* **29**, 36-40.
- Possingham, J.V. (1994) New concepts in pruning grapevines. *Horticultural Reviews* **16**, 235-254.
- Reynolds, A.G., Edwards, C.G., Wardle, D.A., Webster, D.R. and Dever, M. (1994). Shoot density affects Riesling grapevines: I. Vine performance. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **119**, 874-880.
- Reynolds, A.G., Molek, T. and De Savigny C. (2005) Timing of shoot thinning in *Vitis vinifera*: impacts on yield and fruit composition variables. *American Journal of Enology and Viticulture* **56**, 343-356.
- Scienza, A., Miravalle, R., Boselli, M. and Dorotea, G. (1981) Effetti della boro-carenza sullo sviluppo e sulla composizione chimica delle bacche di Barbera. *Vignevini* **11**, 37-42.
- Schultz, H.R. (1991) Seasonal and nocturnal changes in leaf age dependent dark respiration of grapevine (*Vitis vinifera* L.) sun and shade leaves: modelling the temperature effect. *Viticultural and Enological Sciences* **46**, 129-140.
- Smart, R.E. (1988) Shoot spacing and canopy light microclimate. *American Journal of*

Enology and Viticulture **39**, 325-333.

Smart R.E. and Robinson M. (1992) Sunlight into wine. A Handbook for Winegrape Canopy Management. Winetitles, Adelaide.

Morpho-structural and physiological performance of Sangiovese and Montepulciano cvs. (*Vitis vinifera*) under non-limiting water supply conditions

Alberto Palliotti^{A,D}, Stefano Poni^B, Oriana Silvestroni^C, Sergio Tombesi^A and Fabio Bernizzoni^B

^ADipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università di Perugia,

Borgo XX Giugno 74, 06128 Perugia, Italy

^BIstituto di Frutti-Viticultura, Università Cattolica del Sacro Cuore,

Via Emilia Parmense 84, 29100 Piacenza, Italy

^CDipartimento di Scienze Ambientali e delle Produzioni Vegetali, Università Politecnica delle

Marche, Via delle Brece Bianche, 60131 Ancona, Italy

^DCorresponding author. Email: palliot@unipg.it

Abridged title: Non-limiting conditions and genotype performance

Abstract. Morpho-structural and physiological traits of Sangiovese and Montepulciano varieties (*Vitis vinifera* L., two red grapes widely cultivated in Italy), grown outside under non-limiting water supply conditions were evaluated in 2007 and 2008 and results were correlated with yield components and grape composition. The two-year analysis showed intraspecific differences in canopy characteristics, leaf and shoot properties, photosynthetic ability, water use efficiency, vine yield and grape composition. In comparison to Sangiovese, Montepulciano was able to assure a higher whole-canopy seasonal net CO₂ exchange rate during the season (+38% in mid morning and +49% in mid afternoon). It also had a higher water use efficiency, especially early in the morning and in late afternoon, and a higher vine yield (+16%). Furthermore, total soluble solids (+1.7 °Brix), anthocyanins (+0.44 mg/cm² berry skin) and phenolic compounds (+0.88 mg/cm² berry skin) were higher in the grapes. To ensure this performance Montepulciano vines have to support higher costs of growth and maintenance processes which is made possible because of the increased respiration activity of the canopy during the night. It is confirmed that vine yield and grape composition is strictly dependent on the seasonal photosynthetic capacity of the canopy. Montepulciano should therefore be put in a position to fully realize this great photosynthetic potential, by avoiding or reducing environmental stress. Sangiovese is structurally and morpho-physiologically able to

better withstand any stress during the summer. Sangiovese xylem tissue had larger mean vessel density and smaller mean vessel diameter and hydraulic conductance than Montepulciano, holding the hypothesis of less susceptibility to conduit damage.

Additional keywords: photosynthesis, respiration, chlorophyll, xylematic vessel, grape yield, grape quality.

Introduction

Climatic change has an enormous impact on growing of wine grapes with a multitude of effects, first of which is the geographical redistribution of genotypes (Schultz 2000; Jones 2005; Chaves *et al.* 2010). A case in point is the Rhine Valley (Germany) where heat summations recorded over the last two decades have easily reached thresholds which allow adequate ripening of medium-to-late red cultivars, e.g. Merlot, Shiraz and Cabernet Sauvignon (Schultz 2000). Secondly, if a given “terroir” (i.e. optimal scion/rootstock, soil and climate combination) is to be maintained, it may be necessary that cultivation practices be modified in order to manage situations where it may be desirable to delay rather than promote ripening.

The increased frequency of heat waves has led to increased heat being accumulated in a given period of time, thus explaining, at least in part, why the mean sugar level at harvest of Cabernet Sauvignon grown in the Napa Valley shifted from 21-22 °Brix in the period 1909-1992 to 24-25 °Brix in 2006-2008 (Dokoozlian 2009). Several other phenomena are also manifested in relationship to climatic change: the greenhouse effect causes alterations in the water cycle, leading, in turn, to major changes in the amount and distribution of rainfall, relative humidity and diurnal cloud cover, as well as thermal and radiation patterns. Indeed, a quite perceivable consequence of such changes is that some supplemental irrigation may now be needed in traditionally non-irrigated areas, e.g. many well-known grapevine growing regions in northern and central Italy. While introducing irrigation in renowned viticultural areas always poses the issue of the negative impact that such a practice might have on the “expectation” that, in those environments, vines should have a natural capacity to reach a balance, there is also the idea that additional water would invariably push yield and berry size. Nevertheless, it also has to be recognized that in these areas quite often irrigation water is available under very limited quantities or not at all. Conversely, there are several areas around the world where irrigation is essential for growing wine grapes, e.g. South Australia, California, etc., which, however, due to limitations in water availability as well as moderately

saline irrigation water, are facing the issue of selecting new clones and/or rootstocks which can support lower volumes of irrigation water or even no irrigation (Clingeffer 2009). Overall, the matter of assessing the performance of well-known or newly selected genotypes under non-limiting water supply conditions is essential for planning an efficient vineyard able to best exploit the natural resources such as incoming radiation and rainfall (Medrano *et al.* 2003; Schultz 2003; de Souza *et al.* 2005; Palliotti *et al.* 2008 and 2009). It is known that in *Vitis vinifera*, the genetic background of the cultivar plays a crucial role in the photosynthetic potential expressed by the vine canopy (Zufferey *et al.* 2000; Bota *et al.* 2001; Palliotti *et al.* 2009). Preliminary studies comparing the performance of cvs. Montepulciano and Sangiovese under open field conditions with adequate soil water availability have shown higher seasonal photosynthetic rates in Montepulciano along with a significant enhancement of the quantum yield (Silvestroni *et al.* 2004).

In the present study, a more comprehensive evaluation of the morpho-structural and physiological traits of these two genotypes was carried out on vines grown outside under non-limiting water supply conditions. These features were then correlated with yield components and grape composition. Today, Sangiovese and Montepulciano are the two red grape cultivars most commonly grown in Italy. They are cultivated on more than 100,000 ha, which corresponds to about 15% of the total area of Italian vineyards and they are used to produce some of the best premium wines in Italy. This is the first part of a more extensive research project aimed at identifying grapevine cultivars that are able to optimize their water use and assessing their behaviour under optimal environmental conditions as well as under mild and severe drought conditions.

Materials and methods

Experimental conditions and layout

This study was conducted for two years (2007-2008) on five-year-old potted (60 L) vines of cv. Sangiovese (clone VCR30) and cv. Montepulciano (clone R7) grafted onto 1103 Paulsen rootstock and grown in an outdoor area close to the Faculty of Agriculture of the University of Perugia (Region of Umbria, central Italy, 42°58' N, 12°24' E, elevation 405 m a.s.l.). All the pots were filled with loam soil with a field capacity of 30.2% [(vol water/vol soil) × 100] and a wilting point of 16.7%. Each year at the end of February, each vine was pruned to retain 4 spurs with 2 buds each. All shoots were oriented up-right using suitable stakes. Ten vines per cultivar were used and maintained at about 90% of maximum water availability; the water

supply per pot was determined monitoring the soil water content with a Diviner 2000[®] capacitance probe (Sentek Environ. Tech., Australia) using access tubes located in the pots. In each pot, the water was supplied at 2-day intervals in July and August, and at three-day intervals in May, June and September.

Canopy growth and leaf and cane characteristics

In 2007 and 2008, after the grape harvest, the total length of all main and lateral shoots borne on each vine was measured, as well as the total number of nodes per vine and the diameter of the main canes between nodes 3 and 4. Internodes length was then derived from these measurements. The blade surface area of all main and lateral leaves stripped from 8 randomly chosen shoots per cultivar was measured using a surface area meter (Hayashi Demco C., mod. AAM-7, Tokyo, Japan). The total leaf area per vine was then estimated based of node count and leaf size.

On the same 20 leaves used for the gas-exchange and the chlorophyll fluorescence measurements (see next section) one week before veraison, leaf reflectance, transmittance and absorbance were measured, between 13:00 and 14:00 h, using a tripod and a LI-190S Quantum Sensor (Li-Cor, Lincoln, NE, U.S.A.) (Schultz 1996). Then all these leaves were stripped and used to determine the chlorophyll a and b and carotenoid content, with 15 leaf disks (1.76 cm² each) per genotype, according to Lichtenthaler and Wellburn 1983. Relative leaf water content, measured on 15 additional leaf discs per cultivar (1.76 cm²), was calculated as: $RWC = 100 \times (FW-DW)/(TW-DW)$, where FW = fresh weight, DW = dry weight obtained after three days of drying at 80 °C, TW = turgid weight obtained after 24 hours in distilled water at 4 °C in the dark. The remaining leaves were put in a forced-air oven at 80°C and dried to constant weight to determine specific leaf weight (SLW, mg dry wt/cm² leaf area); they were then used for total nitrogen determination by the Kjeldahl method.

At the end of February 2008 and 2009, one-year-old pruning weight was recorded in all Sangiovese and Montepulciano vines and used to calculate the yield-to-pruning weight ratio. Vine balance was also assessed by calculating the total leaf area-to-yield ratio (vine basis) in both cultivars.

In January 2009, three canes per vine were sampled from five vines per cultivar. Canes were cut above the first node. In all selected canes, the first internodes above the cut were then sampled and placed in ice and refrigerated until sectioned. Samples were embedded in an agar solution (0.2 %) and sectioned with a frozen microtome (2700 Frigocut, Reichert-Jung, Nossloch, Germany) at ~20 µm of thickness. Four sections were obtained per sample.

Sections were stained with Iodine green to increase the contrast. Photographs of the cross-sections were taken with a Leica ICCA camera (Leica Microsystems Wetzlar GmbH, Wetzlar, Germany) mounted on a Leica DMLB light microscope (Leica Microsystems Wetzlar GmbH, Wetzlar, Germany). Images were then acquired with Leica IM1000 software (Leica Microsystems Digital Imaging, Cambridge, UK). Three photographs were taken from each cross-section slide; one at 50 X to measure the thickness of the phloem and the outermost ring of the xylem tissue and the other two, taken at 100 X, to calculate vessel density and the dimensions of two randomly selected fields of view (1.36 mm²) of the xylem tissue. Measurements of vessel diameters were made using Sigmascan Pro 5.0 software (Systat Software Inc., San Jose, CA, USA). Mean diameter distributions of vessels were then reported in frequency classes of 10 µm as the number of vessels per class per mm² of the cross sectional area of the xylem tissue.

The theoretical hydraulic conductance (k_h) per visual field (kg m MPa⁻¹ s⁻¹) was calculated according to the modified Hagen-Poiseuille law described by Tyree and Ewers (1991):

$$k_h = (\pi \rho / 128 \eta) \sum_{i=1}^n (d_i^4)$$

where d is the radius of the vessel (in meters), obtained from the mean of the largest and smallest radii, ρ is the fluid density (assumed to be 1000 kg × m³ or equal to that of water at 20 °C) and η is the viscosity (assumed to be 1×10⁻⁹ MPa · s, or equal to that of water at 20 °C). Xylem vessels were divided into frequency classes to describe their distribution. Values per visual field are reported as conductance per mm². Two indexes, representing vessel diameter that are greatly linked to vulnerability to cavitation (Tyree and Zimmermann 2002) were calculated. A hydraulically weighted mean diameter was calculated as $D_s = \Sigma D^5 / \Sigma D^4$ (Sperry *et al.* 1994), whereas the D_{95} was calculated as the mean diameter of vessels supporting 95% of hydraulic conductance.

Whole-canopy and single leaf gas-exchange and chlorophyll fluorescence parameters

In the 2008 season, the gas exchange of four vines (two per cultivar) was continuously monitored on a 24-hour basis from about one week before veraison (July 23) until just before harvest (September 4) using the fully automated tree-enclosure system adapted to grapevine canopies by Poni *et al.* (1997). The system provides automated logs at 10-min intervals of CO₂ vapour pressure concentration at chamber inlets and outlets, thereby allowing calculation

of the net CO₂ exchange rate (NCER) of the canopy. Reference inlet and outlet CO₂ air streams are switched at 2-minute intervals to an EGM4 Infra-Red Gas Analyzer (PP-System, Hoddesdon, UK) by a solenoid valve. The system also features air-feed centrifugal blowers for a maximum flow rate of about 260 L s⁻¹, and inflated 0.025-mm-thick, transparent polyethylene chambers enclosing the entire canopy. A CR10 data logger and control module (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) were used for system programming and automated data storage.

In 2007 and 2008, just one week before veraison, gas exchange readings of single leaves from both Sangiovese and Montepulciano vines were taken in the morning (between 1000 and 1100 hours) using a portable, open system, LCA-3 infrared gas analyzer (ADC Bio Scientific Ltd, Herts, UK). The system had a broad leaf chamber with a 6.25 cm² window and all readings were taken at ambient relative humidity with an air flow adjusted to 350 mL min⁻¹. For each cultivar, 20 average-sized leaves, taken between nodes 14 and 16 of primary shoots, were sampled under saturating light (PAR > 1400 μmol m⁻² s⁻¹). The assimilation rate (A), transpiration rate (E) and stomatal conductance (g_s) were calculated from inlet and outlet CO₂ and H₂O concentrations. Intrinsic water use efficiency (WUE_i) was then calculated as A/g_s.

On the same leaves sampled for gas exchange analysis, chlorophyll a fluorescence was measured around midday (between 1300 and 1400 hours) with a light-weight portable continuous excitation fluorimeter (Handy-PEA, Hansatech Inst. Ltd., Norfolk, UK). Dark adaptation was achieved by covering the sample area to be analyzed with a small, lightweight leaf clip for at least 20 minutes. The small shutter plate of the clip was then opened and the dark-adapted leaf tissue was exposed to an actinic light flash (wavelength of 650 nm, intensity > 3000 μmol m⁻² s⁻¹). The instrument provides the F_v/F_m ratio which is a widely accepted indicator of the maximum efficiency of photosystem II (PSII), where F_m is the fluorescence maximum over the induction curve. F_v (termed variable fluorescence) was calculated as the difference between F_m and F_o, where F_o is the ground fluorescence (Strasser *et al.* 1995). The area above the fluorescence curve between F_o and F_m (Area), which indicates the pool size of plastoquinone on the reducing size of PSII, was also automatically calculated. The integrated energy needed to close all reaction centers was also calculated as S_m = Area / (F_m - F_o), which takes into account multiple turnover in the closure of the reaction centers (Strasser *et al.* 2000).

Vine yield and grape composition

Each year harvest dates were decided according to the development of soluble solids in the berry, and the grape harvest was carried out when the sugar accumulation appeared to level off. Harvest dates were 11 and 10 September in 2007 and 2008, respectively, for Sangiovese and 19 and 29 September in 2007 and 2008, respectively, for Montepulciano. In both cultivars, grapes from all experimental vines were individually picked and crop weight was recorded as well as the number of clusters per vine. Cluster compactness was visually estimated on thirty clusters per treatment in both cultivars using OIV code 204 (Organization International de la Vigne et du Vin, 1983) which ranks as 1 “berries in grouped formation with many visible pedicels” and as 9 “misshapen berries”. Using the same clusters, the yield/main rachis length ratio (g/cm) was also objectively quantified. Each year, at harvest, the skin, pulp and seed weights were also measured as well as the number of seeds per berry on a sample of 200 berries per cultivar. After individual weighting, the berries were sliced in half with a razor blade and the seeds and flesh were carefully removed from each berry half using a small metal spatula without rupturing any pigmented hypodermal cells and the seeds were then carefully separated from the flesh. Both skins and seeds were rinsed in deionized water, blotted dry and weighed. The remaining flesh was used to make a juice sample which was used to measure soluble solids, pH and titratable acidity. Total soluble solids were determined with a temperature-compensating refractometer (RX-5000 Atago-Co Ltd, Tokyo, Japan) and results are expressed in °Brix. Titratable acidity was measured with a Titrex Universal Potentiometric Titrator (Steroglass S.r.l., Perugia, Italy), titrating with 0.1 N NaOH to an end point of pH 8.2 and results are expressed as g L⁻¹ of tartaric acid equivalent. Must pH was measured using a PHM82 standard pHmeter (Radiometer, Copenhagen, Denmark). Anthocyanin and phenol contents (expressed as mg/cm² skin) were also determined on berry skin according to Ough and Amerine (1980) and Slinkard and Singleton (1977). From each cultivar, twenty 10-mm diameter disks of the grape skin were cut from the sun-exposed part of the cluster and separated from the pulp. Each skin disk (0.785 cm²) was macerated in 25 mL of methanol containing 0.1% HCl (v/v) at pH 1 and incubated at room temperature (about 25 °C) for 24 h in the dark with occasional shaking. The total anthocyanin content of the juice was determined by measuring the absorbance at 520 nm at pH 1 using an extinction coefficient (molar absorbance value) of 28,000 and molecular weight of 529 (typical of malvidin-3-glucoside) (Somers 1966; Ough and Amerine 1980). Total soluble phenols were assayed as follow: to each 0.2 mL sample, 1.8 mL of distilled water (diluted to contain 0 to 250 mg/L gallic acid equivalent) was added and then 10 mL of 10% aqueous Folin-Ciocalteu

reagent (Sigma) and 8 mL of 7.5% (w/v) aqueous Na₂CO₃. The mixture was held at 24 °C and after 2 h the absorbance was read at 750 nm and compared to a gallic acid standard curve. Anthocyanin and phenolic contents were calculated as mg/cm² skin berry.

Statistical analysis

Except for the gas exchange data of the whole canopy, all remaining data were subjected to a two-way analysis of variance (year vs. genotype) using SigmaStat software (SPSS Science, USA). As the year × genotype interaction was never significant, data were pooled over the two seasons and between genotype differences were assessed using the Student t-test ($P \leq 0.05$).

Results

Vegetative growth and canopy characteristics

The number of shoots per vine for both cultivars was about 7, Sangiovese had significantly longer main shoots (+24%) with longer, yet thinner internodes as compared to Montepulciano (Table 1). As for lateral shoot development, Sangiovese had fewer yet more vigorous laterals. Yet, end of season vine vigor expressed as either total leaf area (about 4 m²) or pruning weight (ranging from 376 to 390 g) did not differ significantly between cultivars. Likewise, there was no significant difference in leaf area of primary and lateral shoots between the genotypes (Table 1).

Leaf and cane characteristics

Leaf thickness in Montepulciano was 21% greater than in Sangiovese due to the thickness of both the epidermis (upper and lower) and the palisade tissue (Table 2). Light absorbance and transmittance were, respectively, higher and lower in Montepulciano. The leaves of Sangiovese had lower chlorophyll a, b and carotenoid concentrations than Montepulciano (-38%, -25% and -49%, respectively). Total leaf nitrogen did not differ significantly when compared on leaf area basis, whereas Sangiovese had a significantly higher nitrogen content when data were expressed on a dry weight basis (Table 2).

The xylem tissue of Sangiovese canes had significantly more vessels in the 20-30, 30-40, 50-60 and 60-70 µm diameter classes in comparison to Montepulciano (Fig. 1a). On the other hand, Montepulciano had significantly more vessels in the three largest diameter classes (i.e. 130-140, 140-150 and 150-160 µm) for which Sangiovese had few or no vessels. In Sangiovese only the 60-70 µm diameter class showed higher theoretical hydraulic

conductance (k_h) than Montepulciano (Fig. 1b). In Montepulciano, the 100-110 μm size class and the three largest diameter size classes had a significantly higher k_h than Sangiovese. Montepulciano also had a larger mean vessel diameter and k_h (+13% and +32%, respectively), whereas it had smaller vessel density (-19%) (Table 3). The two vulnerability indexes, D_s and D_{95} , were higher in Montepulciano (+19% and +9%, respectively). Conversely, the number of vessels supporting 90% of the hydraulic conductance was significantly higher in Sangiovese (+27%).

Leaf physiology and whole-canopy gas-exchange

While there were no variations in the relative leaf water content, the higher specific leaf weight (+32%) in Montepulciano corresponded with higher A_{max} rates per unit of leaf area (+33%) and per unit of leaf nitrogen content (+32%) (Table 4). Such differences canceled out when A_{max} data were expressed on the basis of dry weight and chlorophyll.

Leaf fluorescence parameters (F_o , F_m and F_v/F_m) did not differ significantly between cultivars, whereas, a 30% increase in the Area parameter recorded in Montepulciano suggests a significant increase in the pool of plastoquinone at the reducing site of PSII (Table 4). Moreover, in this cultivar, the higher S_m parameter (+21%) also indicates a larger amount of energy needed to reduce all the reaction centers of PSII.

The whole-canopy seasonal net CO_2 exchange rate per unit leaf area ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) was consistently higher in Montepulciano for both morning and afternoon time periods (Fig 2b and 2d, respectively) regardless of marked variability in total incoming radiation and air temperature (Fig. 2a and 2c). Mean seasonal NCER recorded in Montepulciano canopies at mid morning was $6.68 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vs. $4.84 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for Sangiovese, whereas in the mid afternoon it was $4.22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vs. $2.83 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for Montepulciano and Sangiovese, respectively. The low NCER values measured in Sangiovese vines during the afternoon in some days of August might relate to a fairly high air VPD (> than 3.7 kPa) primarily driven from high air temperatures on August 21 to 23 and low relative humidity (< 34%) on August 7 and 8. As previously shown for field-grown Sangiovese vines (Palliotti *et al.* 2009), a high evaporative demand induces more vertical leaves thus reducing the amount of intercepted light as well as an higher sensitivity of Sangiovese basal leaves to photoinhibition.

Pre-veraison (25 and 26 July) diurnal NCER trends showed higher values in Montepulciano, especially in the morning hours and more similar rates during the remaining part of the day (Fig. 3c and 3d). There were late-morning peaks in the canopy transpiration

rate on both days in Montepulciano which also showed a drop in water loss starting about 400 pm when air vapor pressure deficit reached about 4 kPa (Fig. 3a and 3b). This behavior has been previously described in Montepulciano vines under drought conditions (Palliotti *et al.* 2009) and likely relates to the very high stomatal sensitivity of this genotype tuning a partial stomatal closure leading to a significant reduction of transpiration water loss while net photosynthesis is much less affected. Conversely, once incoming PAR went above 1000 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, the canopy transpiration rate leveled off in Sangiovese and remained constant until about 500 pm, despite the rising in air VPD. As an outcome of the relative variations of NCER and transpiration rate during the day, WUE was significantly higher in Montepulciano in the early morning and late afternoon (Fig. 3g and 3h).

Gas-exchange readings taken post-veraison (28 and 29 August) essentially confirmed pre-veraison NCER trends (Fig. 4c and 4d). Contrary to pre-veraison measurements, there was no change in the trend of the daily canopy transpiration rate in either grapevine variety (Fig. 4e and 4f). During the 28th and 29th of August, the air VPD was never higher than 3.4 kPa (Fig. 4a and 4b) and the water status of the leaves was probably sufficient to avoid a significant drop in the canopy transpiration rate during the afternoon also in a vulnerable variety, like Montepulciano. Also the post-veraison trends of WUE were quite similar to those found in the pre-veraison stage (Fig. 4g and 4h).

For data sets recorded from 1100 to 1200 pm, the seasonal whole-canopy dark respiration was 74% higher in Montepulciano in comparison to Sangiovese, averaging $-0.87 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vs. $-0.49 \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Fig. 5a). Such a difference increased for pre-dawn readings (from 300 to 400 am), yielding about 94% more dark respiration in Montepulciano vines compared to those of Sangiovese, precisely $-1.21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vs. $-0.63 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Fig. 5b). The increase of respiration rate found in both cultivars during the pre-dawn measurements as compared to 1100-1200 pm data cannot be attributed to air temperature differences or air CO₂ concentration fluctuations. The average air temperature recorded from 23 July to 4 September in the time frame 1100-1200 pm was 24.4 °C as compared to 22.9 °C recorded from 300-400 am. Such a variation is much smaller than those observed in the field, yet it should be considered that the vines were kept in an outdoor area in the center of Perugia town. Likewise, midnight and pre-dawn air CO₂ concentration varied from 374 ppm to 370 ppm, respectively, ruling out that any nocturnal surge in CO₂ concentration might have caused inhibition of respiratory CO₂ efflux, as previously shown in *Vitis* cane wood (Smart 2004). An alternative hypothesis is that during energy starvation, such as prolonged darkness, chloroplasts strongly depend on the supply of ATP, and therefore from respiration activity, as

well as the metabolism of starch-storing tissues (Flügge *et al.* 2010). Therefore, the supply of ATP can be provided also by other compounds in addition to sugars such as organic acids pools (e.g. malate, which is extremely high in grapevine) and lipid respiration.

Yield, grape composition and vine balance

Yield per vine was slightly, albeit significantly, higher in Montepulciano (+16%), mostly due to heavier clusters as there were no variations in the number of clusters and berry weight (Table 5). While must pH and titratable acidity were unaffected, soluble solids in the must and anthocyanin and phenol concentrations in the berry skin were significantly higher in Montepulciano; such differences were also maintained when calculated on a total crop basis (Table 5). Vine balance indices such as yield-to-pruning weight and leaf area-to-yield ratios were unaffected by cultivar (Table 5).

Discussion

A primary outcome of the genotype comparison is that when Sangiovese and Montepulciano were grown in the same environment under non-limiting water supply conditions and managed uniformly as total shoot and cluster number, Montepulciano performed outstandingly well. Despite its slightly higher yield, it also had significantly higher soluble solids, anthocyanin and phenolic concentrations, as well as an overall improved canopy efficiency.

Quite interestingly, none of the above-mentioned features can be explained using traditional vine balance indices such as yield-to-pruning weight or leaf area-to-fruit ratios (Kliewer and Dokoozlian 2005), which did not vary significantly between genotypes. Lack of variation is mostly attributed to the very similar final leaf area development (about 4 m² per vine). Even though this was possibly dictated in part by root growth restriction due to the pot conditions, the primary shoots of Montepulciano grew less, and therefore exerted milder competition towards ripening. At the same time it benefited from a higher number of laterals which gave higher leaf area at harvest (1.58 m² vs. 1.23 m²). The fact that Montepulciano had a higher number of lateral shoots despite the lower vigor of the main shoots suggests that apical dominance was suppressed in this cultivar, allowing more secondary shoots to be formed also on the basal part of the main stem.

The greater ability of Montepulciano to fix CO₂ is substantiated by both single and whole canopy gas exchange readings as well as, albeit indirectly, enhanced specific leaf weight. More specifically, prolonged seasonal whole-canopy monitoring of NCER yielded a solid

picture of higher assimilation in spite of diurnal radiation and air VPD demand as well as stage of growth. Besides, a whole canopy approach overcomes the within-sampling variation typically biasing determinations made on single leaf populations due to inherent variability in age and exposure, therefore helping to isolate the main treatment (i.e. genotypes) effects. Moreover, diurnal NCER showed that, regardless of phenological stage, Montepulciano had a higher capacity to fix CO₂ and hence a higher WUE in the morning under non-limiting VPD (≈ 2 kPa) as well as capacity, in the late afternoon when air VPD usually peaked, to restrain transpiration more than proportionally to NCER, hence benefiting again from the higher WUE. Interestingly, it is again confirmed that Montepulciano has a higher stomatal sensitivity than Sangiovese (Palliotti *et al.* 2009) which, under a non-limiting water supply, turns out to be a desirable feature during the hot part of the day, as luxury water loss is prevented while maintaining high photosynthetic rates. Due to the same high stomatal sensitivity, Palliotti *et al.* (2009) reported that in comparison to Sangiovese Montepulciano vines subjected to severe water stress in the field showed almost complete stomatal closure irrespective of leaf position along the stem and, in turn, a decreased intrinsic WUE (A/g_s).

The higher net leaf photosynthesis rates (per unit leaf area and nitrogen bases) in Montepulciano clearly match with leaf anatomy features of higher total leaf and palisade parenchyma thickness. A significant correlation between morpho-anatomical leaf features and leaf assimilation was also found in a study comparing sun *vs.* shade- developed Trebbiano Toscano and Cabernet Franc leaves (Palliotti *et al.* 2000). Likewise, higher leaf absorbance in Montepulciano is in agreement with both increased leaf thickness and total chlorophyll content, as previously shown by Schultz (1996). Overall, significantly lower leaf transmittance would imply that less light is available for the inner canopy layers, therefore potentially reducing the fraction of photosynthesis assured by diffuse light. Yet, this was not the case in the present study as seasonal whole canopy NCER expressed on a per leaf area unit was consistently higher in Montepulciano, indicating that this effect was fully offset by higher assimilation from the external leaf layer.

Results from the xylem anatomy pointed out interesting differences between the grapevine varieties. Hydraulic properties of the xylem exert a significant influence on water transport and therefore on the fixing of CO₂ (Zimmermann 1983). Sangiovese had a smaller mean xylem vessel diameter than Montepulciano (about -11%) and therefore this caused a difference in the theoretical hydraulic conductance which is quite close to the empirically measured hydraulic conductance in vines (Tyree and Zimmermann 2002). Smaller hydraulic conductance means lesser capacity to transport water to photosynthetic organs which, in turn,

could down-regulate photosynthesis to save water (Palliotti *et al.* 2009). Furthermore, xylem vessel diameter could influence the vulnerability of the conduit system (Hargrave *et al.* 1994; Tombesi *et al.* 2010). Sangiovese had a smaller D_s and D_{95} than Montepulciano; therefore it could be less vulnerable to conduit damage than Montepulciano because of the smaller diameter of most of the conductive vessels and the larger number of vessels supporting the greater part of hydraulic conductance. These findings may explain why, contrary to Sangiovese, Montepulciano vines showed a drastic drop in the canopy transpiration rate during the hottest hours of 25 and 26 July when the air VPD was higher than 3.8-4 kPa.

Finally, this study showed that under non-limiting water supply conditions the greater photoassimilation capacity of Montepulciano in comparison to Sangiovese is also due to a larger pool size of plastoquinones at the reducing site of PSII. At the same time, the Montepulciano vines must support higher costs of growth and maintenance processes, also shown by a higher respiration rate during the night, and higher vine yield and better grape composition.

Conclusion

The two-year analysis of the morpho-physiological and productive performance of the two red grape cultivars most commonly grown in Italy showed intraspecific differences in canopy characteristics, leaf and shoot properties, photosynthetic ability, water use efficiency, vine yield and grape composition at harvest time. Vine yield and grape composition is strictly dependent on the photosynthetic capacity of the canopy. In comparison to Sangiovese, under non-limiting environmental conditions, Montepulciano was able to assure higher photosynthetic ability during the season and thus higher vine yield and soluble solids, anthocyanins and phenolic compounds in the grapes. The Montepulciano vines must support higher costs of growth and maintenance processes also due to increased respiration activity during the night. Montepulciano should therefore be put in a position to fully realize this great photosynthetic potential thus avoiding or reducing environmental stress. Sangiovese is structurally and morpho-physiologically able to better withstand any stress during the summer.

Figure 1. Xylem vessel diameter distribution per mm² of cross-sectional area of xylem tissue of Sangiovese and Montepulciano canes (a). Mean values of five trees per cultivar (n=5) ± SE. Theoretical hydraulic conductance per each diameter class (kg m MPa⁻¹ s⁻¹) of Sangiovese and Montepulciano canes (b). Mean values of five vine per cultivar (n = 5) ± SE. Values of the two cultivars related to the same diameter class marked with asterisk are different for $p \geq 0.95$ (t-test).

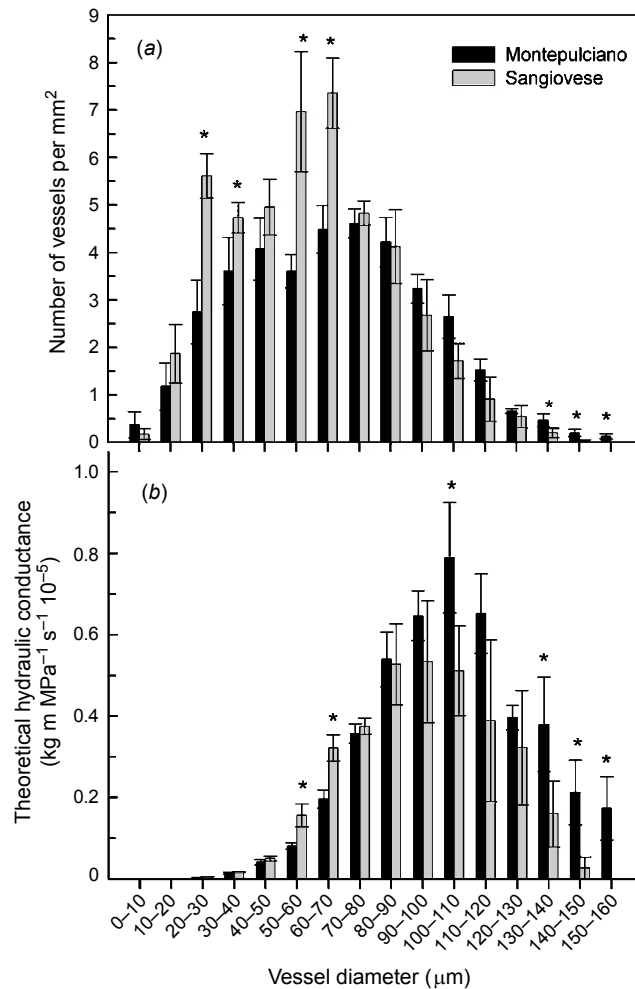


Figure 2. Seasonal trends of air temperature (T), total photosynthetic active radiation (PAR) and canopy net CO₂ exchange rate (NCER) in Sangiovese and Montepulciano potted vines measured in the mid morning (from 1000 to 1100 am) (a and b, respectively) and in the afternoon (from 400 to 500 pm) (c and d, respectively) in 2008.

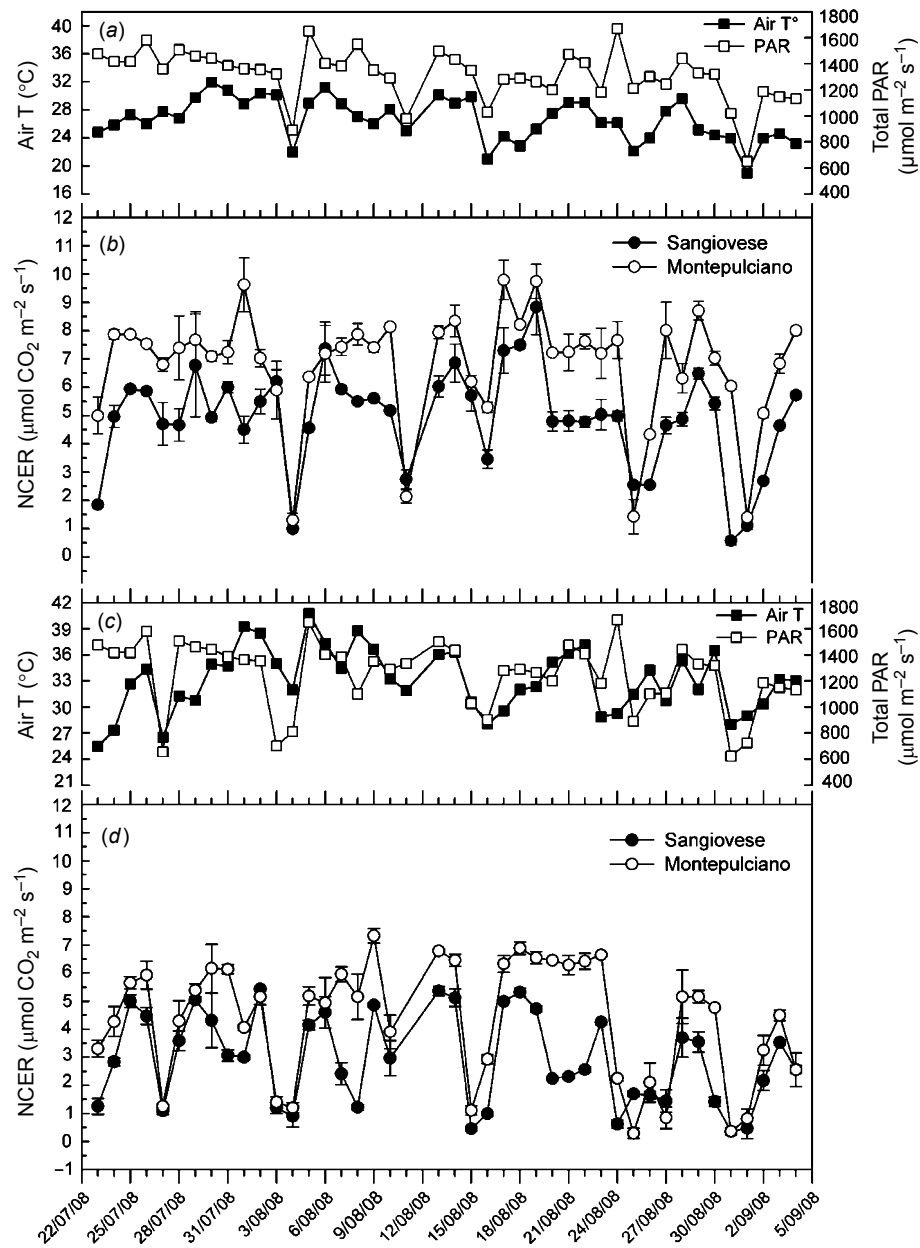


Figure 3. Daily trends of total photosynthetic active radiation (PAR), air vapour pressure deficit (VPD), canopy net CO₂ exchange rate (NCER), canopy transpiration rate and canopy water use efficiency (WUE) in Sangiovese and Montepulciano potted vines measured one week before veraison on July 25 (a, c, e and g, respectively) and July 26 (b, d, f and h, respectively) in 2008.

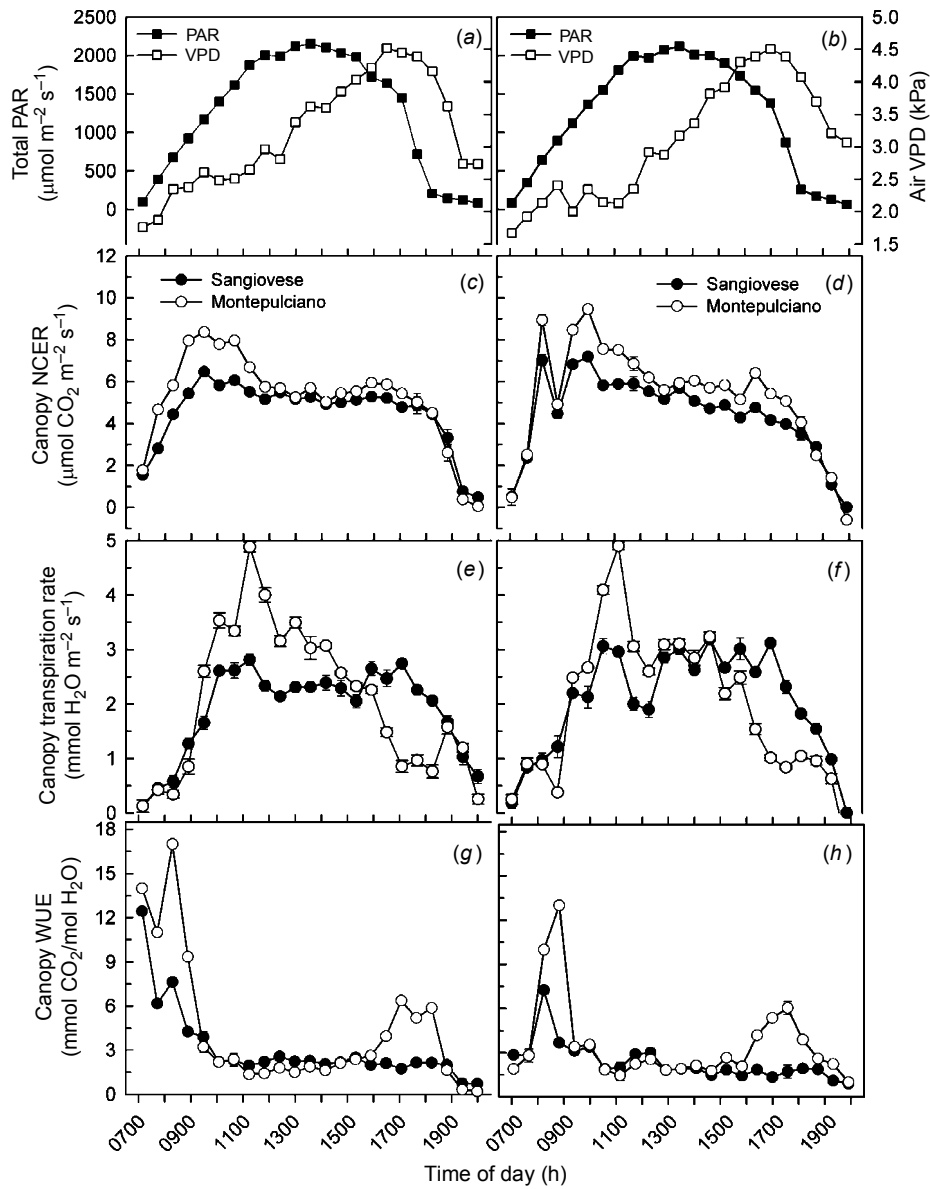


Figure 4. Daily trends of total photosynthetic active radiation (PAR), air vapour pressure deficit (VPD), canopy net CO₂ exchange rate (NCER), canopy transpiration rate and canopy water use efficiency (WUE) in Sangiovese and Montepulciano potted vines measured three weeks after veraison on August 28 (a, c, e, and g, respectively) and on August 29 (b, d, f and h, respectively) in 2008.

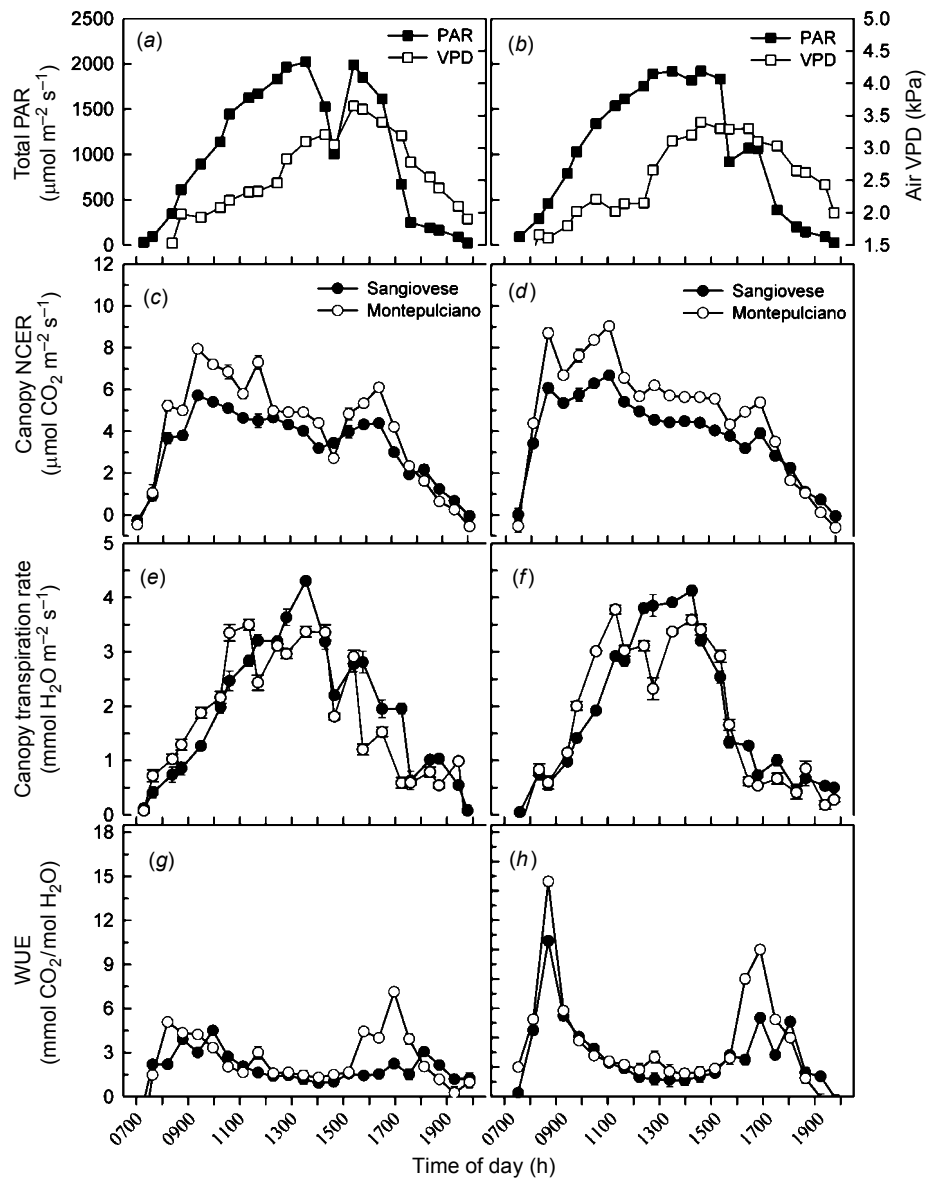


Figure 5. Seasonal trends of canopy net CO₂ exchange rate (NCER) in Sangiovese and Montepulciano potted vines measured during the night, from 1100 to 1200 pm (a) and from 300 to 400 am (b) in 2008.

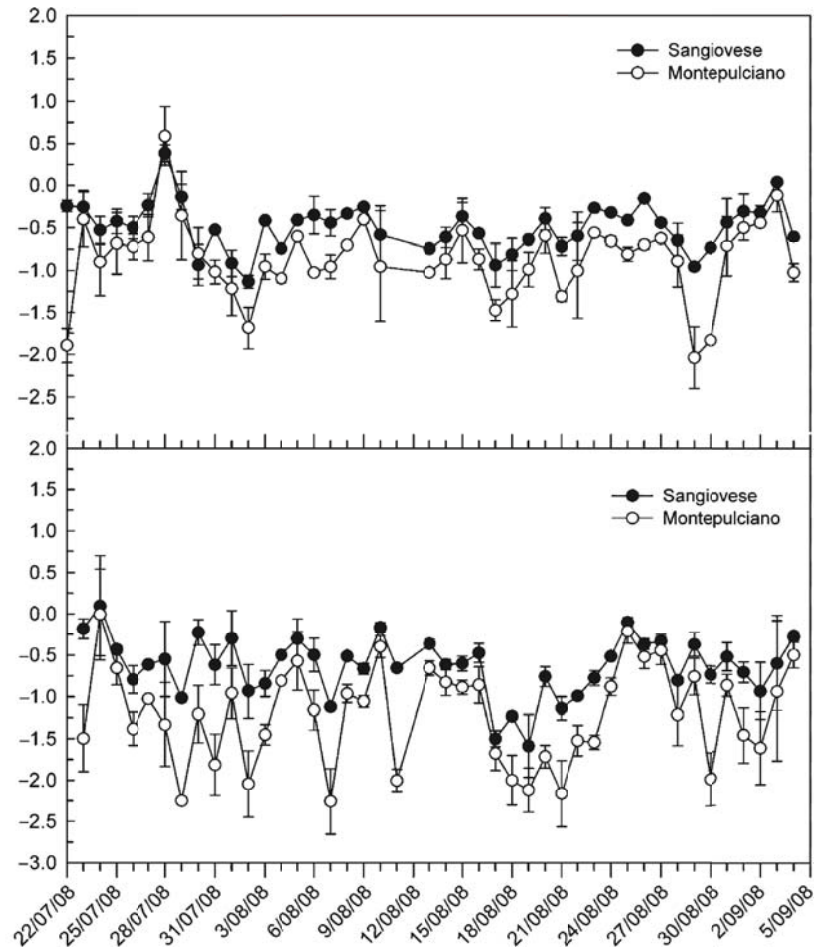


Table 1. Vegetative growth and canopy characteristics in Sangiovese and Montepulciano grapevines . Data are means of 2007 and 2008 seasons. For each parameter, significant differences are indicated: *, $P \leq 0.05$; ns, not significant ($P > 0.05$).

Parameter	Sangiovese	Montepulciano	t-test
Shoots per vine	7.3	7.1	ns
Primary shoot length (cm)	215.1	173.2	*
Nodes per primary shoot	27.4	28.2	ns
Internode length (cm)	7.9	6.0	*
Internode diameter (3–4° nodes) (mm)	8.7	9.9	*
Lateral shoots (number vine ⁻¹)	42.3	62.1	*
Lateral shoot length (cm)	35.6	25.9	*
Leaf area from primary shoots (m ² vine ⁻¹)	2.80	2.49	ns
Leaf area from lateral shoots (m ² vine ⁻¹)	1.23	1.58	ns
Pruning weight (g vine ⁻¹)	376	390	ns

Table 2. Leaf anatomy, optical properties and biochemical characteristics in Sangiovese and Montepulciano leaves from primary shoots. Data are means of 2007 and 2008 seasons. For each parameter, significant differences are indicated: *, $P \leq 0.05$; ns, not significant ($P > 0.05$).

Parameter	Sangiovese	Montepulciano	<i>t</i> -test
Total leaf thickness (μm)	141.5	171.0	*
Upper epidermis (μm)	13.6	20.7	*
Palisade parenchyma (μm)	58.2	72.8	*
Spongy parenchyma (μm)	60.3	62.2	ns
Lower epidermis (μm)	9.4	15.3	*
Absorptance (%)	82.2	89.1	*
Reflectance (%)	7.3	6.2	ns
Transmittance (%)	10.5	4.7	*
Chlorophyll <i>a</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	26.6	36.7	*
Chlorophyll <i>b</i> ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	8.7	10.9	*
Carotenoids ($\mu\text{g cm}^{-2}$)	6.5	9.7	*
Chlorophyll <i>a/b</i> ratio	3.04	3.37	*
Total nitrogen (mg cm^{-2})	0.114	0.116	ns
Total nitrogen (mg g^{-1} DW)	18.28	14.06	*

Table 3. Xylem anatomical characteristics of 1-year-old canes in Sangiovese and Montepulciano grapevines. For each parameter, significant differences are indicated:

*, $P \leq 0.05$; ns, not significant ($P > 0.05$).

Parameter	Sangiovese	Montepulciano	<i>t</i> -test
Mean vessel diameter (mm)	61.7	69.6	*
Vessel density (number mm^{-2})	46.6	37.7	*
Theoretical hydraulic conductance (k_h , $\text{kg m MPa}^{-1} \text{s}^{-1} 10^{-5}$)	3.4	4.5	*
D_s (mm) ^A	90.1	107.0	*
D_{95} (mm) ^B	82.2	93.9	*
Number of vessels supporting 90% of k_h	22.4	17.7	*

^A D_s = a hydraulically weighted mean vessel diameter (Sperry *et al.* 1994).

^B D_{95} = mean diameter of vessels supporting 95% of hydraulic conductance.

Table 4. Leaf physiology in Sangiovese and Montepulciano grapevines. Data are means of 2007 and 2008 seasons. For each parameter, significant differences are indicated: *, $P \leq 0.05$; ns, not significant ($P > 0.05$).

Parameter	Sangiovese	Monte-pulciano	<i>t</i> -test
Specific leaf weight (mg DW cm ⁻²)	6.25	8.25	*
Relative water content (%)	89.4	87.3	ns
A_{\max} per unit leaf area ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	6.02	8.04	*
A_{\max} per unit leaf nitrogen ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol N}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	73.6	97.5	*
A_{\max} per unit leaf dry mass ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	0.096	0.097	ns
A_{\max} per unit leaf chlorophyll ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	10.39	10.57	ns
F_o (arbitrary unit)	549	543	ns
F_m (arbitrary unit)	2503	2661	ns
F_v/F_m (arbitrary unit)	0.78	0.79	ns
Area (arbitrary unit)	39 900	52 000	*
S_n (area/ $F_m - F_o$) (arbitrary unit)	20.3	24.6	*

Table 5. Yield components, grape composition and vine balance indexes. For each parameter, significant differences are indicated: *, $P \leq 0.05$; ns, not significant ($P > 0.05$).

Parameter	Sangiovese	Montepulciano	<i>t</i> -test
Yield (kg vine ⁻¹)	2.041	2.363	*
Clusters (number vine ⁻¹)	10.1	10.4	ns
Cluster weight (g)	204.1	229.3	*
Berry weight (g)	2.01	2.06	ns
Total soluble solids (°Brix)	21.6	23.3	*
Titrateable acidity (g L ⁻¹ tartaric acid)	6.52	6.17	ns
Must pH	3.40	3.36	ns
Anthocyanins (mg cm ⁻² berry skin)	0.384	0.821	*
Total phenols (mg cm ⁻² berry skin)	0.981	1.862	*
Sugar accumulated in the grapes (g vine ⁻¹)	441	551	—
Anthocyanin accumulated in the grapes (g vine ⁻¹)	1.174	2.474	—
Phenols accumulated in the grapes (g vine ⁻¹)	2.998	5.610	—
Yield-to-pruning weight ratio (kg kg ⁻¹)	5.5	6.0	ns
Leaf area-to-yield ratio (m ² kg ⁻¹)	1.95	1.74	ns

References

- Bota J, Flexas J, Medrano H (2001) Genetic variability of photosynthesis and water use in Balearic grapevine cultivars. *Annals of Applied Biology* **138**, 353-361.
- Chaves MM, Zarrouk O, Francisco R, Costa JM, Santos T, Regalado AP, Rodrigues ML, Lopes CM (2010) Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany* **105**, 661-676.
- Clingeffer PR (2009) Integrated vine management to minimise the impacts of seasonal variability on yield, fruit composition and wine quality. Proceedings: 16th International GiESCO Symposium, July 12-15, Davis, California, pp. 259-264.
- de Souza CR, Maroco JP, Dos Santos TP, Rodrigues ML, Lopes C, Pereira JP, Chaves MM (2005) Control of stomatal conductance and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystem and Environment* **106**, 261-264.
- Dokoozlian N (2009) Integrated canopy management: a twenty year evolution in California. Proceedings: Recent Advances in Grapevine Canopy Management, July 16, Davis, California, pp. 43-52.
- Flügge U, Häusler RE, Ludewig F, Gierth M (2010) The role of transporters in supplying energy to plant plastids. *Journal of Experimental Botany* **62**, 2381-2392.
- Hargrave KR, Kolb KJ, Ewers FW, Davis SD (1994) Conduit diameter and drought-induced embolism in *Salvia mellifera* Greene (Labiatae). *New Phytologist* **126**, 695-705.
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K (2005) Climate change and global wine quality. *Climatic Change* **73**, 319-343.
- Kliwer WM, Dokoozlian NK (2005) Leaf area/crop weight ratios of grapevines: influence of fruit composition and wine quality. *American Journal Enology Viticulture* **56**, 170-181.
- Lichtenthaler HK, Wellburn AR (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactional* **11**, 591-592.
- Medrano H, Escalona JM, Cifre J, Bota J, Flexas J (2003) A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology* **30**, 607-619.
- Ough CS, Amerine MA (1980) Grape pigments. In "Methods for analysis of musts and wines". John Wiley & Sons, New York, pp. 206-212.
- Palliotti A, Cartechini A., Ferranti F (2000) Morpho-anatomical and physiological characteristics of primary and lateral shoot leaves of Cabernet Franc and Trebbiano

- Toscana grapevines under two irradiance regimes. *American Journal Enology Viticulture* **51**, 122-130.
- Palliotti A, Silvestroni O, Petoumenou D, Vignaroli S, Berrios JG (2008) Evaluation of low-energy demand adaptive mechanisms in Sangiovese grapevine during drought. *Journal International Science Vigne Vin* **42**, 41-47.
- Palliotti A, Silvestroni O, Petoumenou D (2009) Photosynthetic and photoinhibition behaviour of two field-grown grapevine cultivars under multiple summer stresses. *American Journal Enology Viticulture* **60**, 189-198.
- Poni S, Magnanini E, Rebutti B (1997) An automated chamber system for measurements of whole-vine gas exchange. *HortScience* **32**, 64-67.
- Schultz HR (1996) Leaf absorptance of visible radiation in *Vitis vinifera* L.: estimates of age and shade effects with a simple field method. *Scientia Horticulturae* **66**, 93-102.
- Schultz HR (2000) Climate change in viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV effects. *Australian Journal of Grape and Wine Research* **6**, 2-12.
- Schultz HR (2003) Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant Cell Environment* **8**, 1393-1405.
- Silvestroni O, Neri D, Palliotti A, Manni E, Sabatini P (2004) Seasonal dry matter production in field-grown of Sangiovese and Montepulciano grapevine varieties. *Acta Horticulturae* **640**, 183-190.
- Slinkard K, Singleton VL (1977) Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. *American Journal Enology Viticulture* **28**, 49-55.
- Smart DR (2004) Exposure to elevated carbon dioxide concentration in the dark lowers the respiration quotient of *Vitis* cane wood. *Tree Physiology* **24**, 115-120.
- Somers TC (1966) Grape phenolics: The anthocyanins of *Vitis vinifera*, variety Shiraz. *Journal Science Food Agriculture* **17**, 215-219.
- Sperry JS, Nichols KL, Sullivan JEM, Eastlack SE (1994) Xylem embolism in ring-porous, diffuse-porous and coniferous trees of northern Utah and interior Alaska. *Ecology* **75**, 1736-1752.
- Strasser RJ, Srivastava A, Govindjee (1995) Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria. *Photochemistry Photobiology* **61**, 32-42.
- Strasser RJ, Srivastava A, Tsimilli-Michael M (2000) The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In "Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation and Adaptation". (Eds M Yunus), pp. 445-483 (Taylor & Francis, London).

- Tyree MT, Ewers FW (1991) The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytologist* **119**, 345-360.
- Tyree MT, Zimmermann MH (2002) Xylem structure and the ascent of sap. 2nd edn, pp. 283 (Berlin: Springer-Verlag).
- Tombesi S, Johnson RS, Day KR, DeJong TM (2010) Relationships between xylem vessel characteristics, calculated axial hydraulic conductance and size-controlling capacity of peach rootstocks. *Annals Botany* **105**, 327-331.
- Zimmermann MH (1983) Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer, Berlin.
- Zufferey V, Murisier F, Schultz HR (2000) A model analysis of the photosynthetic responses of *Vitis vinifera* L. cvs. Riesling and Chasselas leaves in the field. I. Interaction of age, light and temperature. *Vitis* **39**, 19-26.

D

Scambi gassosi (foglia singola vs chioma intera) in cinque genotipi di *Vitis vinifera* L. in presenza di stress idrico del suolo.

1.Introduzione

La crescente necessità di adottare l'irrigazione su colture, come la vite, tradizionalmente condotte senza apporti idrici naturali è dovuta, da un lato, a cambiamenti climatici e ad una riduzione delle precipitazioni, dall'altro alla necessità di indirizzare le produzioni verso l'ottenimento di prodotti di qualità. La conoscenza delle risposte fisiologiche della coltura e la messa a punto d'idonei sistemi di monitoraggio dello stato idrico sono i principali presupposti per una corretta gestione dell'irrigazione.

Secondo la letteratura (Jones 1980) le specie e cultivars all'interno di *Vitis* possono essere distinte in:

a) pessimiste (“drought avoiding”, “isohydric”) tendenti a modificare crescita e fisiologia per conservare le risorse e per controllare i loro fabbisogni futuri (es. Grenache che, anche sotto stress, non fa calare in modo significativo il potenziale idrico fogliare);

b) ottimiste (“drought tolerant”, “anisohydric”) usano tutte le risorse disponibili “pensando” che presto ne arriveranno di nuove (es. Shiraz che, sotto, stress, fa calare il potenziale idrico fogliare poiché ha un minore controllo stomatico)

Queste diversità di comportamento possono essere interpretate, in termini ecologici, come degli adattamenti ad una competizione asimmetrica (“gara” o “contest”) nel caso delle isoidriche o ad una competizione simmetrica (“zuffa” o “scramble”) per le anisoidriche (Vazzana, 1998). Nel primo caso ci sono vincitori e vinti: un singolo ottiene tutte le risorse di cui ha bisogno, mentre l'altro si accontenta di ciò che rimane; nella competizione per zuffa, invece, le limitate risorse sono ugualmente suddivise tra i competitori, ma tutti vengono almeno in parte limitati nel loro potenziale di crescita (Crawley, 1991).

In tempi più recenti, tuttavia (Chaves et al, 2010, Schultz 2003) hanno sollevato dubbi sul fatto che questa classificazione di “isoidrico” vs anisoidrico possa essere così netta e, infatti, vi è evidenza scientifica (Loviolo et al, 2010) per ritenere che la medesima varietà possa fregiarsi dell'uno o dell'altro comportamento a seconda delle condizioni sperimentali che caratterizzano le prove. Un caso eclatante è quello dei vitigni “Shiraz” e “Grenache che, secondo indagini in campo condotte da Schultz (2003) e Soar et al. (2006) mostrano un comportamento, nell'ordine, anisoidrico e isoidrico che, tuttavia, non viene confermato da

Chouzouri e Schultz (2005) quando lo stress è applicato su viti cresciute in vaso.

A rendere il quadro ancora più complesso vi sono i dati riportati da Poni et (2007) che, per il vitigno Sangiovese confermano un'appartenenza di tipo anisoidrico che, tuttavia, nella prova specifica si associa ad adattamenti morfo-fisiologici (es. rapido arresto della crescita dei germogli, tendenza delle foglie ad assumere un marcato orientamento verticale in presenza di stress, un marcato e costante decremento della WUE) che sono decisamente più tipici di un assetto di tipo isoidrico.

Pertanto, sulla base delle predette considerazioni, una classificazione “rigida” all'interno delle due categorie appare inappropriata. In particolare, sembra assai più ragionevole ritenere che la risposta stomatica di un dato vitigno al progressivo instaurarsi di una condizione di stress idrico dipenda da una serie di fattori tra i quali spiccano portinnesto, condizioni climatiche (VPD e temperatura) nonché l'intensità e la durata dello stress idrico. Non da ultimo, vi è il sospetto che il quadro di adattamento allo stress possa risultare diverso anche in funzione della metodologia adottata ed, in particolare, della “scala” di misura (foglia singola vs. chioma intera). A tale proposito, Poni et al. (2009) hanno preliminarmente evidenziato, su viti di Lambrusco a foglia frastagliata cresciute in vaso secondo il criterio delle radici divise (split-roots) e sottoposte a stress interrompendo l'irrigazione in uno dei due vasi che un evidente incremento, nelle viti stressate, dell'efficienza di uso dell'acqua di tipo “estrinseco” (rapporto fotosintesi/traspirazione) determinato sulla base dei rilievi puntiformi, non è corrisposto con un miglioramento dell'efficienza dell'uso dell'acqua quantificata a livello di chioma intera con un sistema ad inclusione. Nella fattispecie, la WUE/chioma è risultata superiore nelle viti non soggette a carenza idrica.

Il presente studio ha avuto come obiettivo principale quello di verificare la risposta di adattamento allo stress idrico di cinque diversi genotipi di vite (Airen, Syrah, Grenache, Riesling, Silvaner) quantificandone le caratteristiche di scambio gassoso sia a livello di singola foglia sia di intera chioma.

2. Materiale e metodo

2.1. Materiale vegetale ed impostazione della prova.

Lo studio in oggetto è stato condotto nel 2010 nel campus dell'università di Geisenheim - Germania, (49.9 N, 7.96 E) su viti di sei anni piante allevate in vasi delle cultivar Riesling renano , Silvaner, Grenache, Syrah e Airen, tutte appartenenti a *Vitis vinifera* L.. La capienza dei vasi era di 250 L di ed il substrato utilizzato di medio impasto. Il sistema di allevamento usato è a controspalliera con potatura a Guyot unilaterale di circa 10 gemme per vite. L'altezza dal suolo del tralcio annualmente rinnovato era di 90 cm. Per la crescita della chioma si sono posizionati tre fili di sostegno che sostengono lo sviluppo in lunghezza fino a 1,2 m sopra il filo principale.

Le viti, tutte disposte lungo un unico filare orientato in direzione NE-SO sono state selezionate casualmente ed assegnate ai trattamenti di controllo irrigato (W) o di stressato (D) secondo un disegno sperimentale completamente randomizzato (CRD). Le viti di testa del filare sono state considerate come bordi da escludere nella scelta delle piante (figura 1)

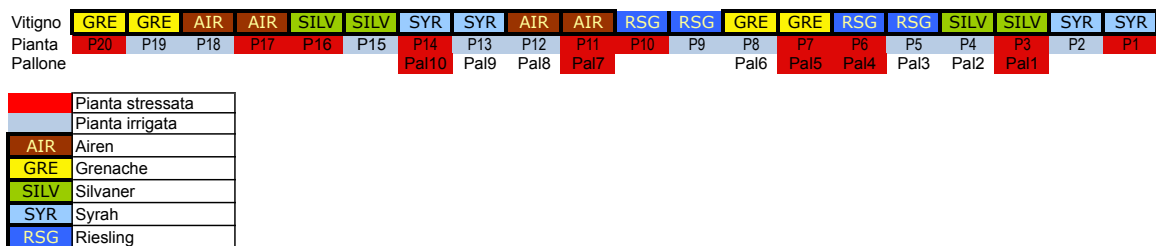


FIGURA 1: Mappa del campo sperimentale.

Durante la stagione vegetativa i germogli sono stati palizzati in posizione verticale e cimati in data 3 agosto 2010 quando gli apici vegetativi avevano oltrepassato il terzo filo di sostegno. Nell'arco dell'intera stagione vegetativa sono stati impostati due cicli di stress idrico ben distinti: uno prima della invaiatura della durata di 9 giorni e uno subito dopo della durata di 23 giorni, ed entrambi i cicli hanno previsto un rewatering finale.

Durante la stagione vegetativa sono stati rilevati anche i parametri riguardanti stress idrico mediante l'utilizzo della camera a pressione di Scholander. Alla vendemmia, per ciascuna vite in prova sono stati determinati peso totale dell'uva e numero dei grappoli. Sul mosto derivante da un campione di 100 acini /vite, sono inoltre stati determinati il grado rifrattometrico (°Brix), l'acidità totale, il pH, i polifenoli e gli antociani totali.

Un'ulteriore campione di bacche è stato prelevato per ciascuna tesi al fine di analizzare le uve con tecniche di degustazione guidata da un panel di assaggiatori esperti.

2.2. Scambi gassosi su chioma

Su entrambi le tesi, prima e dopo lo stress, per periodi estesi anche oltre le tre settimane, è stato valutato lo scambio gassoso (fotosintesi e traspirazione) seguendo il metodo proposto da Poni et al (1997). Nella configurazione utilizzata, il sistema si componeva di dieci camere di polietilene trasparente e flessibile (5 vitigni x due tesi) montate attorno ai ceppi e mantenute gonfie da un sistema di 5 ventilatori centrifughi durante tutto il periodo di prova. Questo assetto ha consentito di misurare i flussi di gas in entrata ed in uscita dalle camere sull'arco delle 24 in maniera ininterrotta e senza interventi manuale esterni. Inoltre, in parallelo, le misure sono state eseguite anche su una camera vuota, (testimone), utile a garantire la taratura dell'intero complesso strumentale di rilievo e per valutare un'eventuale influenza dovuta alla copertura del film plastico.

In parallelo, su altre dieci piante con il medesimo trattamento di stress e irrigazione, è stato altresì valutato lo scambio gassoso anche su singola foglia tramite lo strumento portatile ADC Li-cor.

Oltre a questi parametri sono stati rilevati, durante il corso dell'anno, i dati di crescita vegetativa e di superficie fogliare per chioma.

La fotosintesi netta totale della chioma (NCER "net carbon exchange rate) è stata misurata utilizzando il sistema per piante intere messo a punto da Corelli Grappadelli e Magnanini (1993) e poi successivamente adattato alla vite da Poni et al (1997) , Poni et al (1999), al fine di avere misure multiple in modo automatico e continuo su più unità sperimentali.

Per il monitoraggio della CO₂ si è usato un analizzatore di gas ambientale EGM-4 (PP-System, Hoddesdon, UK) abbinato ad un registratore di dati e controllo del sistema CR10 (Campbell scientific inc.,Logan,UT,USA) per l'archiviazione delle informazioni. I dati riferiti all'ingresso ed uscita di CO₂ per ogni camera, sono stati rilevati ogni due minuti circa dall'EGM-4 .I valori di umidità, e quindi di relativo tasso traspiratorio derivano da un sensore di umidità relativa anch'esso connesso al datalogger di registrazione dati. Il valore del NCER della chioma ($\mu\text{mol CO}_2/\text{s}$) è stato calcolato dal differenziale di CO₂ e dal tasso di flusso come da Long e Hallgreen (1985).

Un sensore di luce solare BF2 (Delta-T Devices,Ltd,Cambridge,UK) montato su di un supporto e collocato nella capannina strumentale ha registrato la componente luminosa totale e diffusa, convertita in radiazione fotosinteticamente attiva (PAR). La temperatura dell'aria in ingresso (valore comune) e in uscita da ciascuna camera sono state rilevate tramite

termocoppie rame-constantana.

Il flusso di aria alimentato alle camere è stato progressivamente adattato durante la stagione vegetativa passando da 5 L/s nel primo periodo stress (pre – invaiatura) a quasi 10 L/s nel secondo ciclo di stress (post invaiatura). Le camere avevano un volume medio di $0,8 \pm 0,1 \text{ m}^3$ e sono state montate e smontate due volte nel corso della stagione, al fine di consentire i rilievi di crescita vegetativa delle piante in prova.

Per verificare l'affidabilità delle misure condotte su chioma intera, ma soprattutto per avere un termine di paragone su singola foglia, in diverse giornate della stagione vegetativa, sono state eseguite alcune misure di scambio gassoso utilizzando un IRGA portatile tipo Ciras-2. Le letture sono state concentrate tutte nella fascia oraria compresa tra le 11 e le 13, su foglie adulte e ben esposte alla luce, per ottenere condizioni di illuminazione saturante. Tali valori si possono considerare come massima espressione della potenzialità fotosintetica su foglia. Sono state campionate in media almeno 8 foglie per vite ad ogni rilievo giornaliero.

2.3. Crescita vegetativa, produzione e qualità delle uve.

La superficie delle chiome di vite è stata calcolata tramite correlazione di misure di crescita vegetativa di germogli selezionati e relative lamine fogliari, misure finali di peso fresco delle foglie e loro superficie tramite l'uso di un fogliarimetro (LI-3100, LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA). Subito dopo la vendemmia, le viti sono state completamente defogliate e sono stati rilevati, separatamente, il peso fresco delle foglie principali e delle femminelle. La superficie fogliare è stata stimata attraverso la relazione, elaborata per la stessa cultivar, tra il peso fresco (x , espresso in g) e l'area fogliare (y , espressa in cm^2), con equazioni diverse per ogni varietà.

L'inizio dell'invaiatura è stato osservato in data 7 agosto 2010 (DOY 219) per le varietà più precoci, ovvero per il Riesling, e il Silvaner. La raccolta è avvenuta in data 14 ottobre 2010 (DOY 286). Durante la vendemmia ogni vite è stata considerata individualmente registrando il peso total di uva ed il numero di grappoli per ceppo. Per ciascuna pinta, è stato prelevato un campione di circa 250 gr., poi sottoposto ad analisi chimiche qualitative.

La concentrazione di solidi solubili espressa come grado Brix è stata determinata con un rifrattometro a compensazione di temperatura Atago (RX-5000 Atago-Ltd.,Tokyo,Japan). L'acidità titolabile è stata misurata mediante un titolatore compatto Crison (Crison, Barcelona, Spagna) con NaOH 0,1 N fino al punto di viraggio corrispondente ad un pH di 8,2 ed espressa in g/L di equivalenti di acido tartarico.

Le antocianine totali e i polifenoli sono stati determinati secondo il metodo Iland (1988). I campioni sono stati messi a scongelare a temperatura ambiente e omogeneizzati ad alta velocità (20000 rpm) per un minuto con un omogeneizzatore Ultra-Turrax (Rose Scientific Ltd., Alberta, Canada).

Due grammi di omogeneizzato sono stati inseriti in una provetta tarata, diluiti con 10 mL di soluzione acqua-etanolo (50% v/v, pH 5.0) e miscelati periodicamente per un'ora prima della centrifugazione a 959 g per 5 minuti. Una porzione dell'estratto (0,5 ml) è stata aggiunta a 10 mL 1 M di acido cloridrico, agitato e lasciato a riposare per un tempo di 3 ore. Per mezzo di uno spettrofotometro Kontron (Tri-M System and Engineering Inc, Toronto, Canada) sono stati misurati i valori di assorbanza a 520 nm e 280 nm. I valori delle antocianine e dei polifenoli sono stati espressi in milligrammi per grammo di peso fresco.

3. Risultati e discussione

3.1. Contenuto e potenziale idrico del suolo.

Il decorso temporale relativo alla variazione del contenuto idrico dei vasi monitorato con il Sentek Diviner 2000 da 2 giorni pre-stress fino a 18 giorni post stress, è riportato in figura 2A. Il valore esprime la media dei mm di H₂O/per 10 cm di strato di suolo e, nel caso specifico, poiché la sonda utilizzata era profonda 80 cm, deve ritenersi rappresentativo dell'intero vaso. Pur in presenza di modeste variazioni nella dotazione idrica iniziale pre-stress, dopo l'inizio dell'interruzione degli apporti irrigui (gg 231) la riserva idrica nel vaso è andata a decrescere in maniera costante e graduale per tutti i vitigni facendo registrare un valore minimo a fine prova nei contenitori di Grenache pari a circa 7 mm/10cm.

I valori di potenziale idrico di rugiada, rilevati in pre-stress (gg 231) e a fine stress (gg 248) confermano quanto riportato per il contenuto in umidità limitatamente al rilievo iniziale che, per tutti i vitigni, si è attestato intorno ad un valore medio di -0.20 MPa ritenuto fisiologico e non limitante anche per condizioni di normale apporto irriguo (During 1984, Jarvis 1976). Viceversa, il dato finale ha messo in evidenza fortissime differenze tra i vitigni, nell'ambito dei quali il livello di stress raggiunto da Grenache equivale ad un grado moderato (-0,49 MPa) mentre quello rilevato da su Sirah (-1,41 MPa) è decisamente molto forte. Su livelli intermedi si sono collocati i vitigni rimanenti anche se Airen ha mostrato uno stress decisamente più accentuato di Silvaner. Per quanto riguarda il confronto tra Sirah e Grenache i dati confermano quindi, in accordo con Schultz (2003), un comportamento differente dei vitigni in termini di dinamica di adattamento idraulico ad una progressiva e prolungata

disidratazione del suolo. In particolare, non sussistendo differenze considerevoli tra genotipi nè in termini di contenuto idrico del vaso nè di sviluppo fogliare, si rafforza l'ipotesi avanzata da Schultz (2003) secondo la quale le differenze di potenziale idrico di rugiada osservate possono spiegarsi in funzione di una diversa resistenza idraulica al flusso. Il medesimo autore aveva infatti dimostrato che la resistenza idraulica radicale in Grenache può essere anche di due-tre volte inferiore a quella rilevata su Sirah, mentre la conducibilità idraulica rilevata a livello del picciolo fogliare si è rivelata, sempre a favore di Grenache, di 4-6 volte superiore. Inoltre, anche se nel nostro studio non abbiamo eseguito misure di potenziale idrico fogliare di "mid-day", nell'ipotesi che i medesimi siano correlati al potenziale idrico di rugiada, sembrerebbe confermarsi una risposta di tipo "quasi-isoidrico" per Grenache e di tipo "anisoidrico" per Sirah.

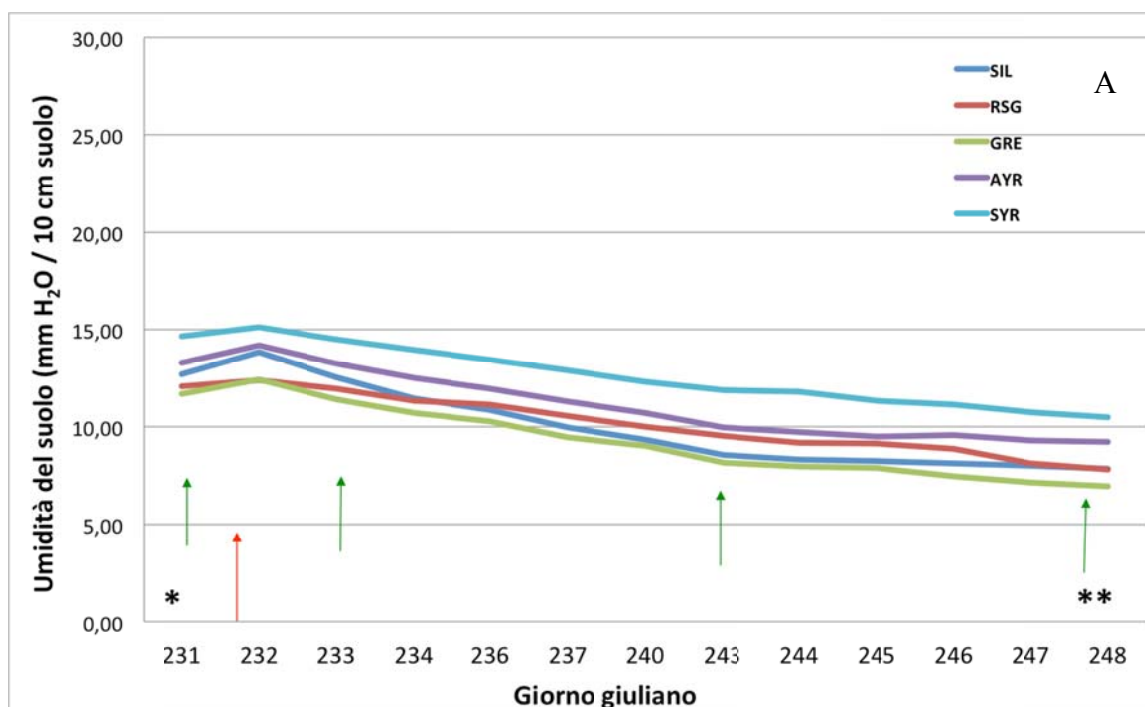


FIGURA 2A: Contenuto idrico del suolo per i diversi vitigni alle date di rilievo (freccie verdi), e all'inizio dell'imposizione stress (freccia rossa). Sono riportati anche i momenti di rilievo camera a pressione pre-stress (*) e post stress (**).

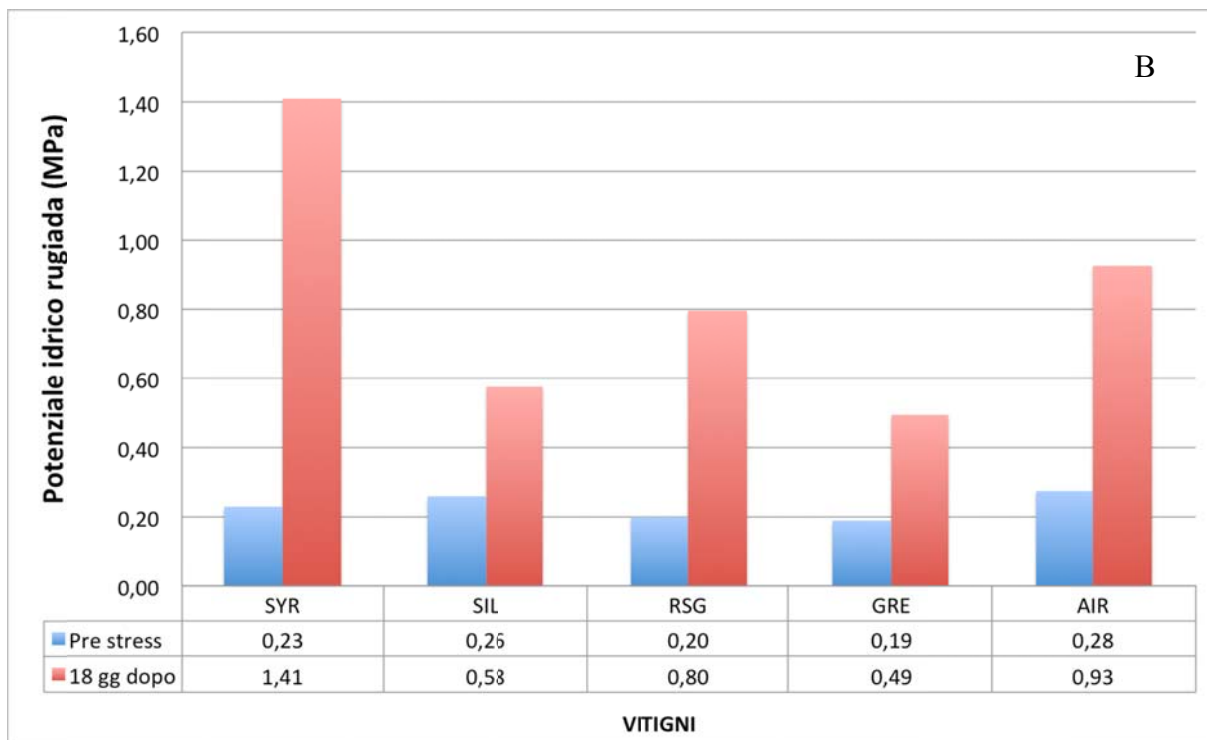


FIGURA 2B: Potenziali idrici dei diversi vitigni in prova.

3.2. Scambi gassosi su singola foglia.

L'evoluzione dei valori di assimilazione (A), traspirazione (E) e conduttanza stomatica (g_s) rilevati su foglie singole esposte a luce saturante in pre-stress e, successivamente, 2, 12 e 18 giorni dopo l'imposizione dello stress è riportata alle figure 3A, B e C. I valori delle viti di controllo alle medesime date sono risultati molto simili a quelli della tesi di pre-stress e quindi non sono stati riportati.

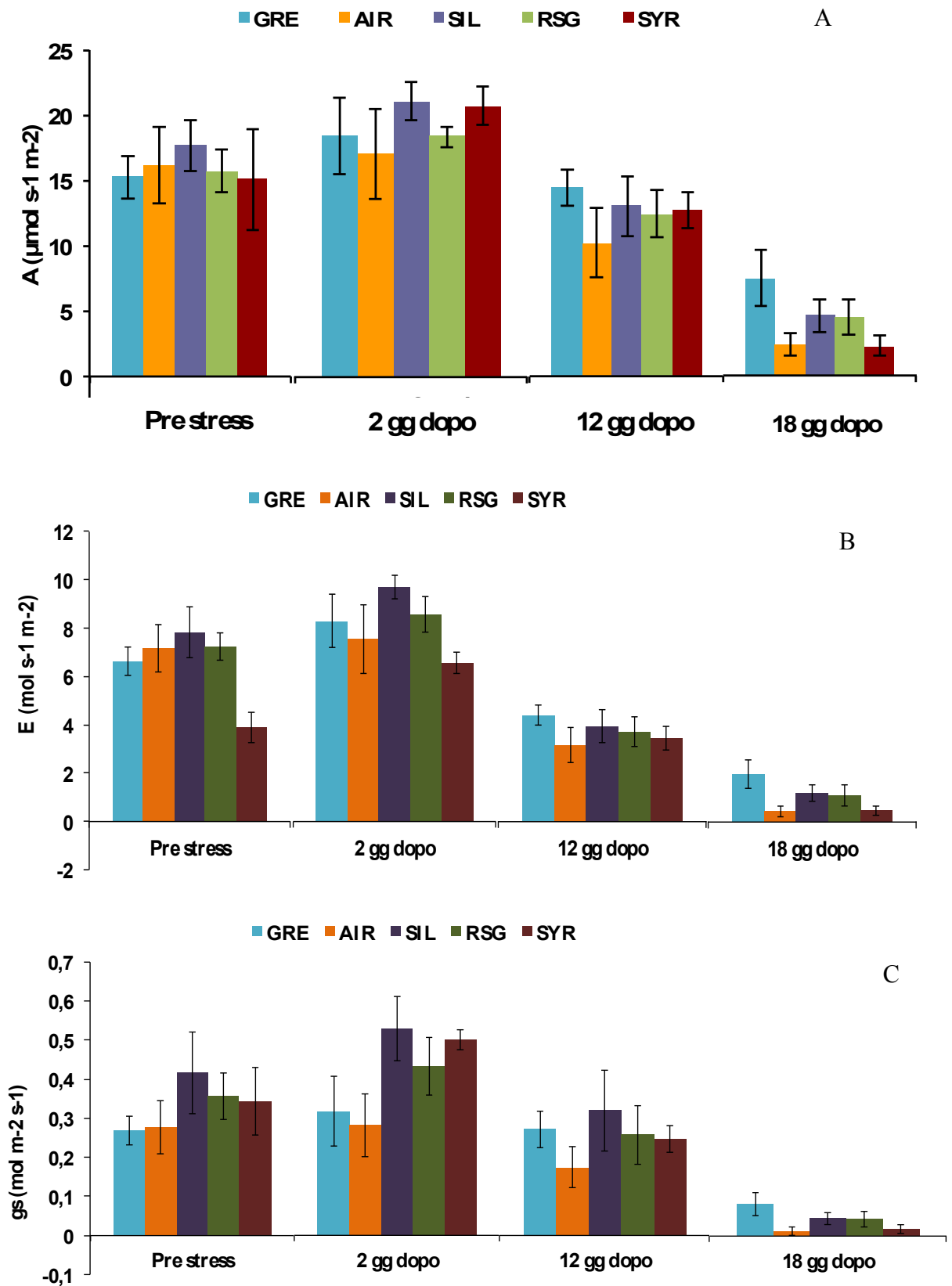


FIGURA 3_ A, B, C: Andamenti di Fotosintesi netta (A), traspirazione (B) e conduttanza stomatica (C) nei diversi vitigni.

In generale tutti i vitigni considerati hanno manifestato, per i tre parametri fisiologici, un comportamento relativamente omogeneo per i rilievi effettuati a 2 e 12 giorni di distanza dall'imposizione dello stress. Non è peraltro sorprendente notare che a 48 ore di distanza dall'interruzione dell'apporto, i valori assoluti di A, E ed g_s siano risultati, in media, leggermente superiori a quelli del rilievo pre-stress. Questo andamento è giustificato, da un lato, da una disponibilità idrica nei contenitori ancora probabilmente non limitante e, dall'altro, al valore di VPD particolarmente elevato (3,6 KPa). Viceversa, a 18 giorni di distanza dalla sospensione dell'irrigazione, con un VPD giornaliero pari a 3.1 KPa, la limitazione stomatica è stata evidente per tutti i genotipi ma, in particolare, per Airen e Sirah (figura 2). Infatti, per questi due vitigni il valore medio di g_s si è attestato nettamente al di sotto della soglia di 50 mmol m⁻² s⁻¹ che, secondo la letteratura, è spesso indicata come irreversibile in termini di potenzialità di ripristino di una normale funzionalità stomatica anche nel caso di re-idratazione (Chavez 2004).

I valori di efficienza di uso dell'acqua di tipo estrinseco (A/E) ed intrinseco (A/ g_s) hanno mostrato, in generale, una tendenza ad aumentare con l'incedere dello stress, raggiungendo valori massimi nel corso dell'ultima data di rilievo (Figura 4A,B). Questo dato è peraltro in linea con precedenti contributi che, in condizioni di vaso (Poni et al., 2009, During et al., 1996, Dry and Loveys 1999, Poni et al., 2003) e di pieno campo (Schultz 2000, de Souza et al., 2005) hanno confermato, per rilievi condotti su foglie esposte alle massima luminosità prima della misura, un generale incremento di WUE_e e WUE_i in viti sottoposte a stress idrico rispetto a viti regolarmente irrigate.

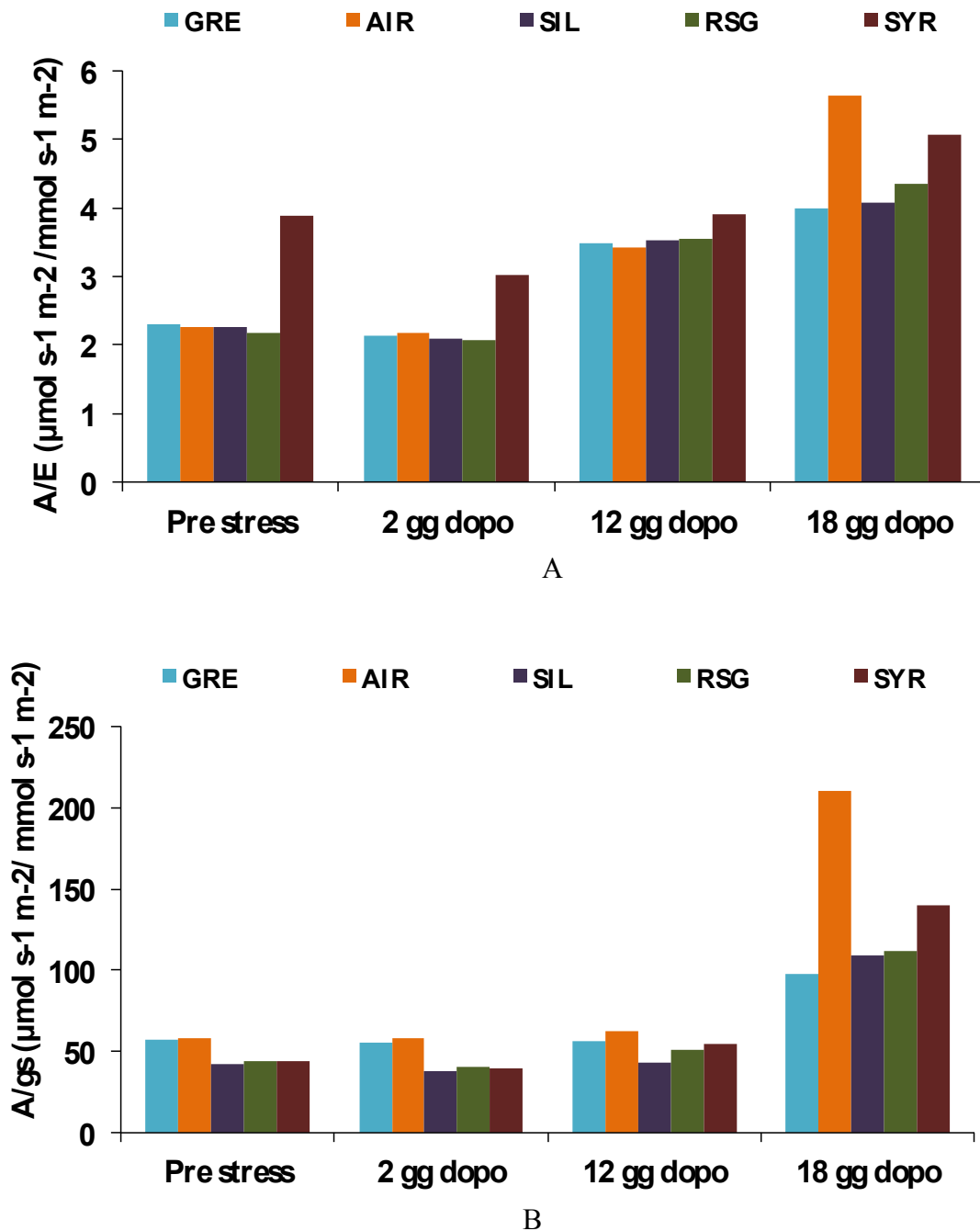
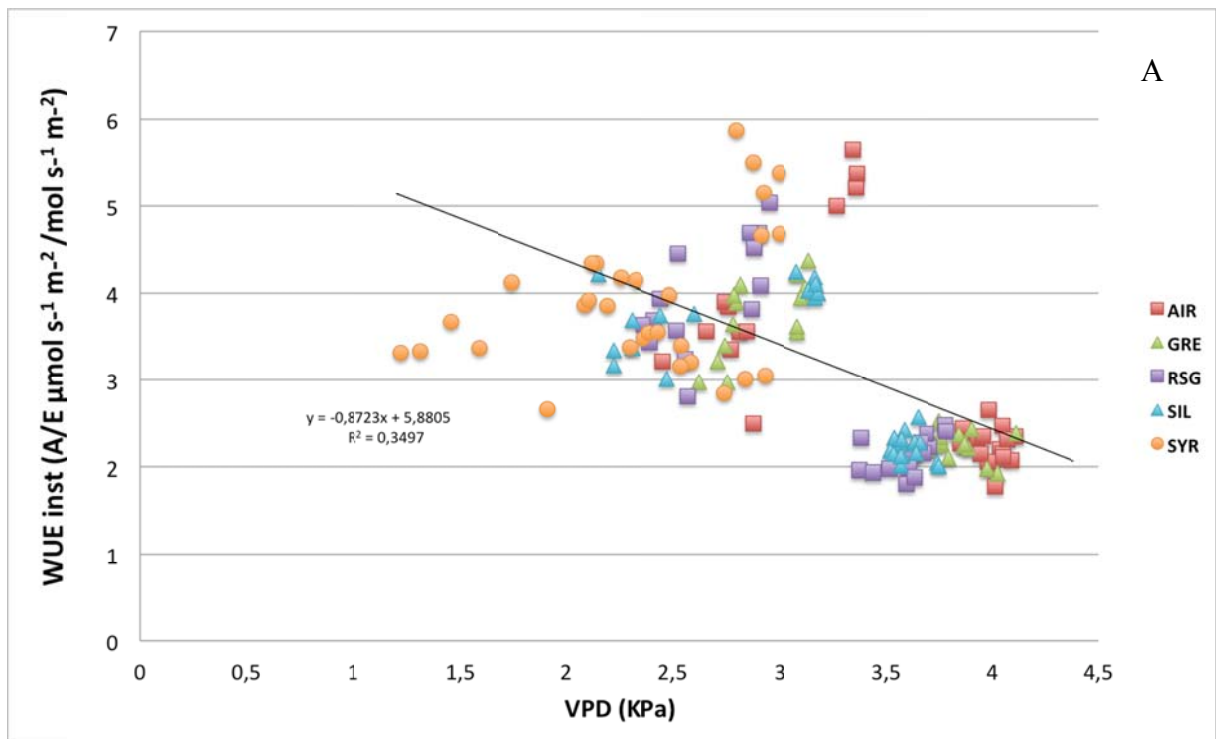


FIGURA 4_A, B: Andamento efficienza dell'uso dell'acqua estrinseco A e intrinseco B.

Questo quadro, tuttavia, si presenta più variegato e ricco di spunti di discussione se i dati medi di A/E e di A/g_s, cumulati sulle varie date di rilievo, vengono posti in correlazione con il valore di VPD (KPa) (figura 5A,B). Per quanto riguarda A/E (figura 5A), pur in assenza di una correlazione significativa ($R^2 = 0.35$, ns) è facilmente percepibile l'isolamento di due "nuvole" di punti, separate dalla soglia di 3,5 kPa. Per valori maggiori di 3,5 kPa tutti i vitigni, ad eccezione di Sirah per il quale il valore massimo di VPD giornaliero si arresta intorno ai 3 kPa, presentano una WUEe inferiore a quella registrata a VPD inferiori. In linea

generale, questo andamento, sia pure con maggiore variabilità, conferma la relazione negativa che intercorre tra A/E e VPD (delta tra VPD aria e foglia) messa in evidenza da Schultz e Stoll (2010). Com'è noto, infatti, il parametro A/E assorbe e tiene conto dell'effetto della domanda traspiratoria da parte dell'atmosfera ($E = g * VPD_{\text{aria-foglia}}$) che, invece, non è considerato nel calcolo di WUEi. In merito, ricordiamo che WUEe è risultata simile o addirittura inferiore in tesi stressate rispetto a controlli irrigati quando il livello di stress è risultato particolarmente severo e quindi tale che la chiusura stomatica ha determinato un forte incremento di $VPD_{\text{aria-foglia}}$ dovuto, a sua volta, ad un sensibile innalzamento della temperatura fogliare. Puntualmente, infatti, anche in questa prova, la relazione che si ricava correlando la WUEi con il VPD (dati cumulati sulle varie date e distinti per vitigno) identifica una funzione con un picco intorno al valore di 3 kPa (figura 5B) e, per valori superiori, un nuovo abbassamento di WUEi.



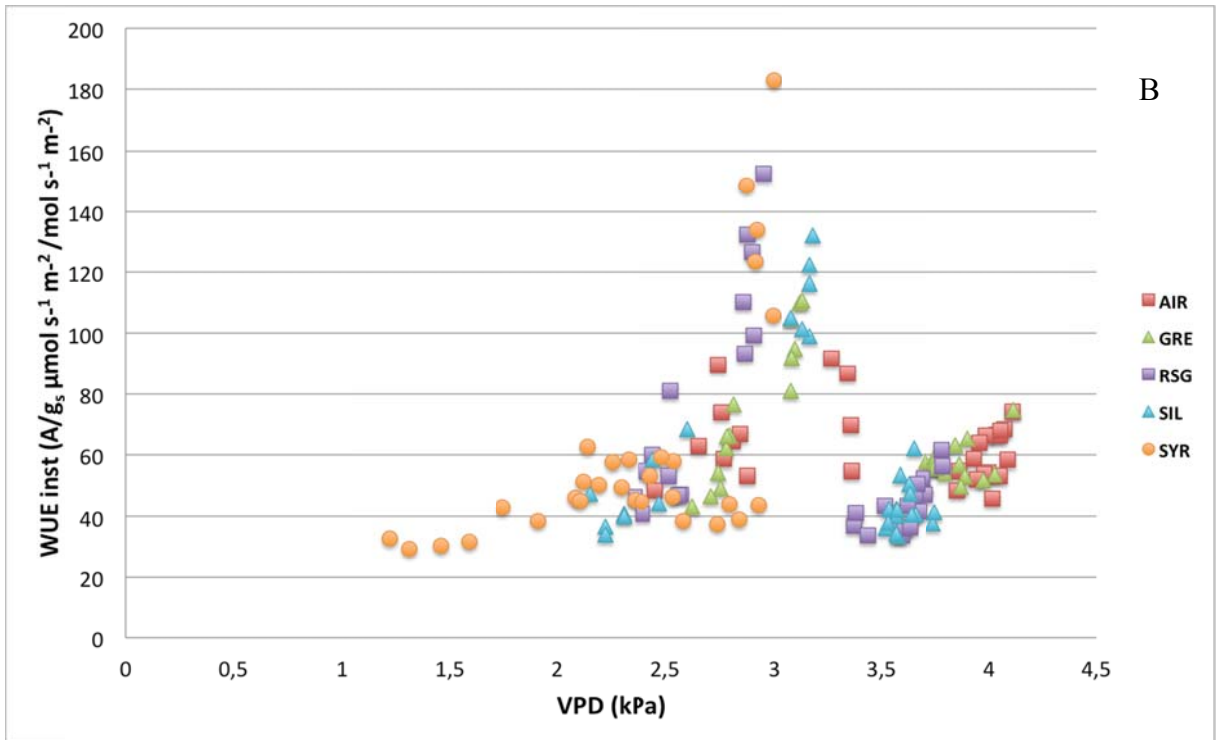
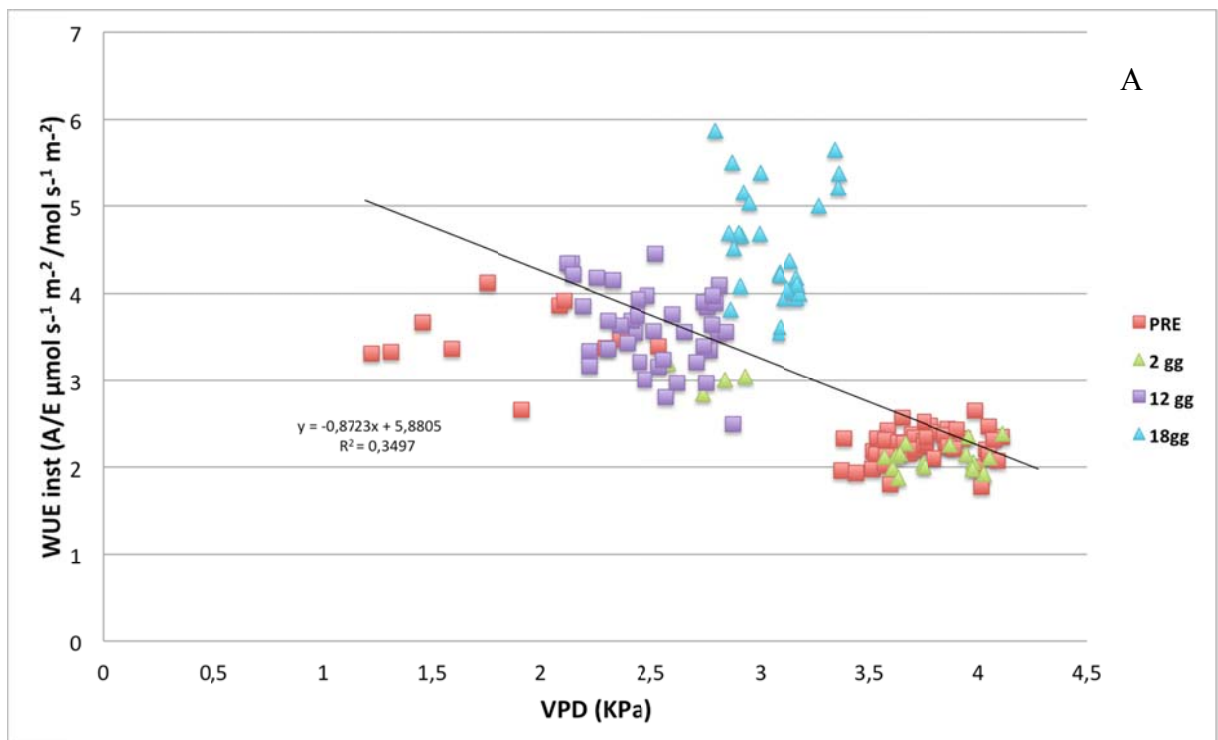


FIGURA 5_A, B: Correlazione di A/E su VPD (A) e di A/gs su VPD cumulato per data.

Un'analisi più efficace di questi meccanismi di risposta delle due tipologie di WUE al crescere del VPD può essere fornita analizzando in pratica gli stessi dati ma accorpandoli per vitigno e tenendo invece separate le date di rilievo (Figura 6A, B).



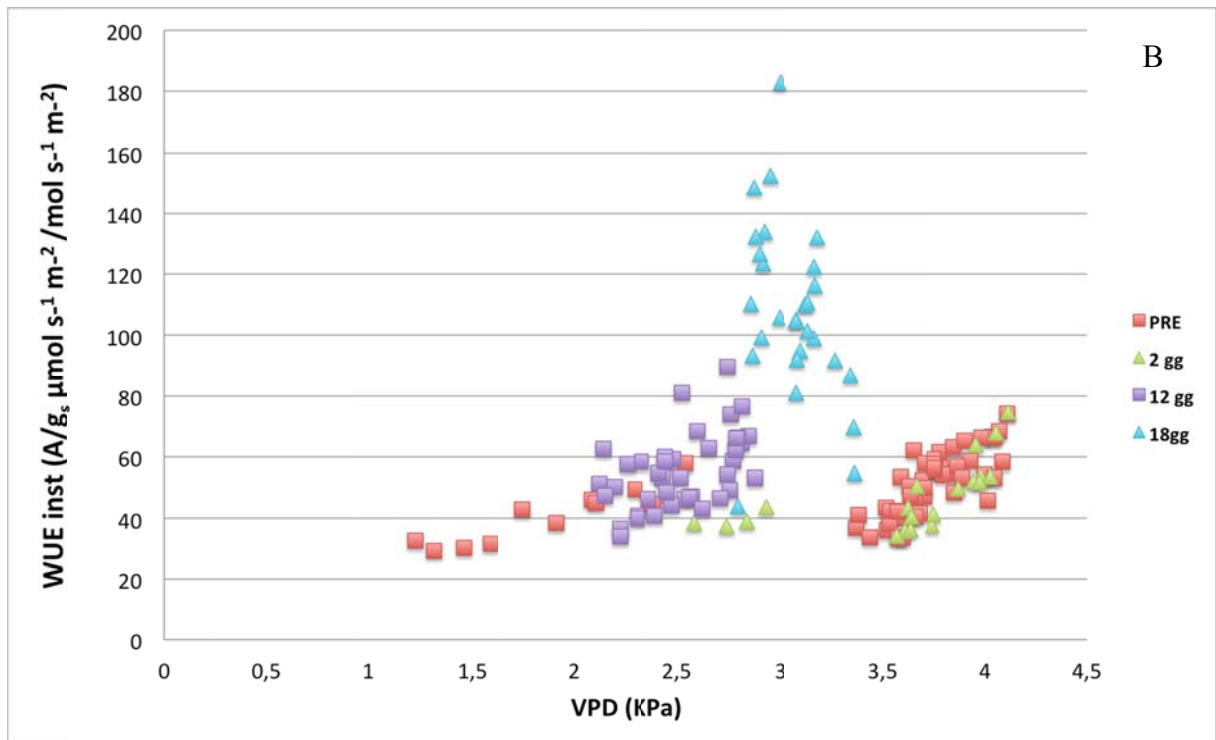


FIGURA 6_A B: Correlazione di A/E su VPD (A) e di A/g_s su VPD cumulato per vitigno.

Di estremo interesse è, nel merito, la relazione che descrive e che rivela come i valori di VPD che si collocano intorno alla soglia dei 3 KPa siano, non a caso, in pratica tutti i valori registrati nel corso del 18 giorno dopo la stress. Si deduce, pertanto, anche alla luce della stretta relazione polinomiale ($R^2 = 0.87$) tra conduttanza stomatica ed assimilazione (figura 7) che, nell'ambiente considerato e indipendentemente dal vitigno, sussiste un "consumo idrico di lusso" (WUE_i) compresa tra 40 e 60 per valori di g_s superiori a 300-350 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mentre la medesima WUE_i torna nuovamente ad abbassarsi per valori di g_s simili o anche inferiori a 100 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Si conclude, pertanto, che il regime di "lavoro" ottimale per gli stomi in questo ambiente è compreso tra 100 e 300 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

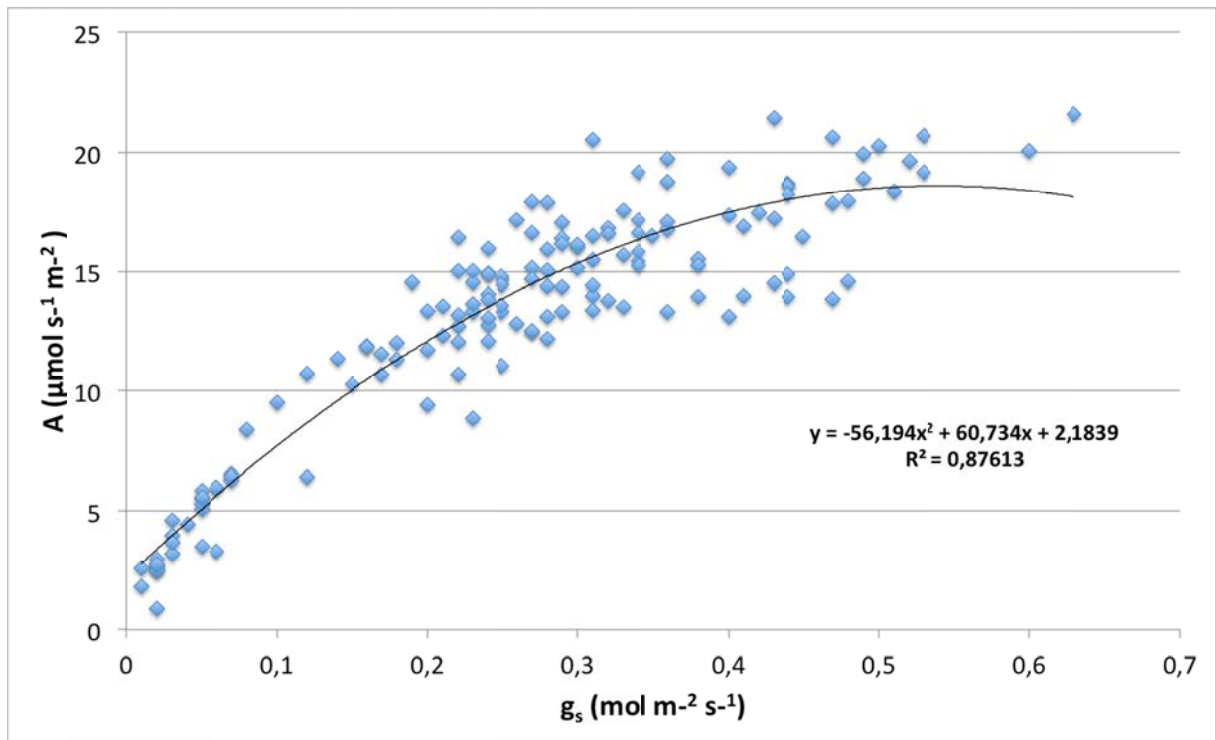
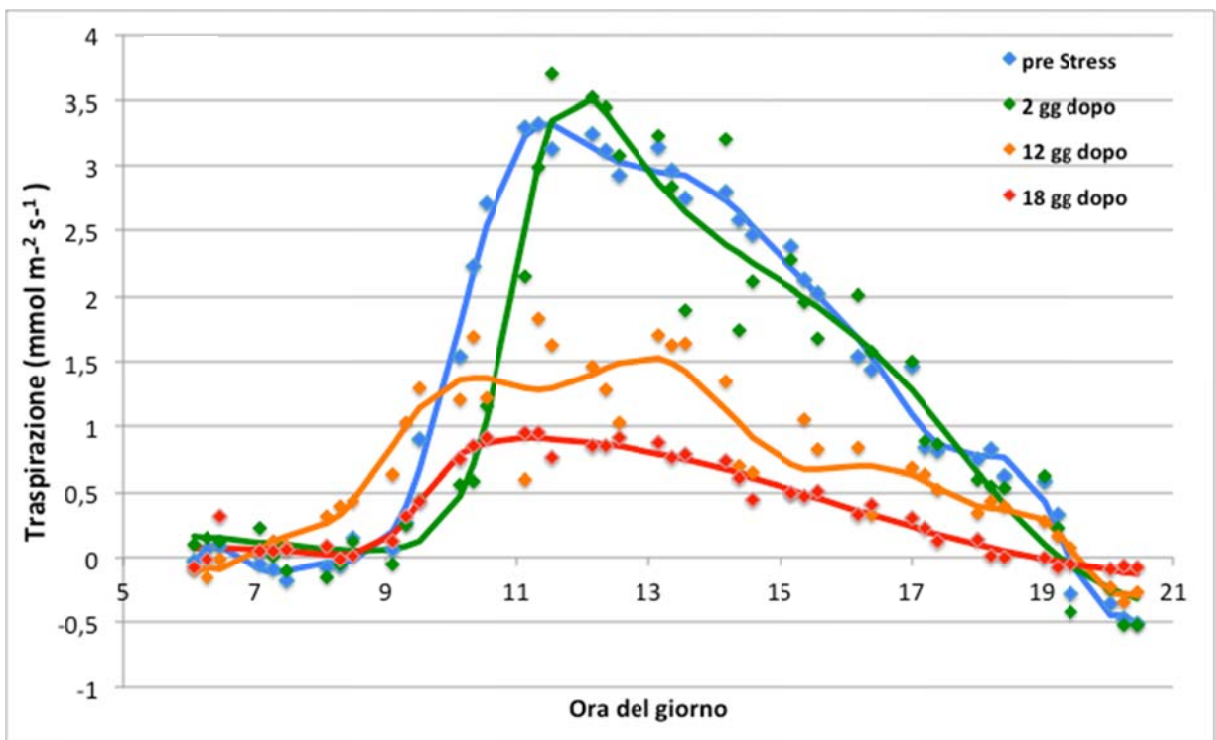
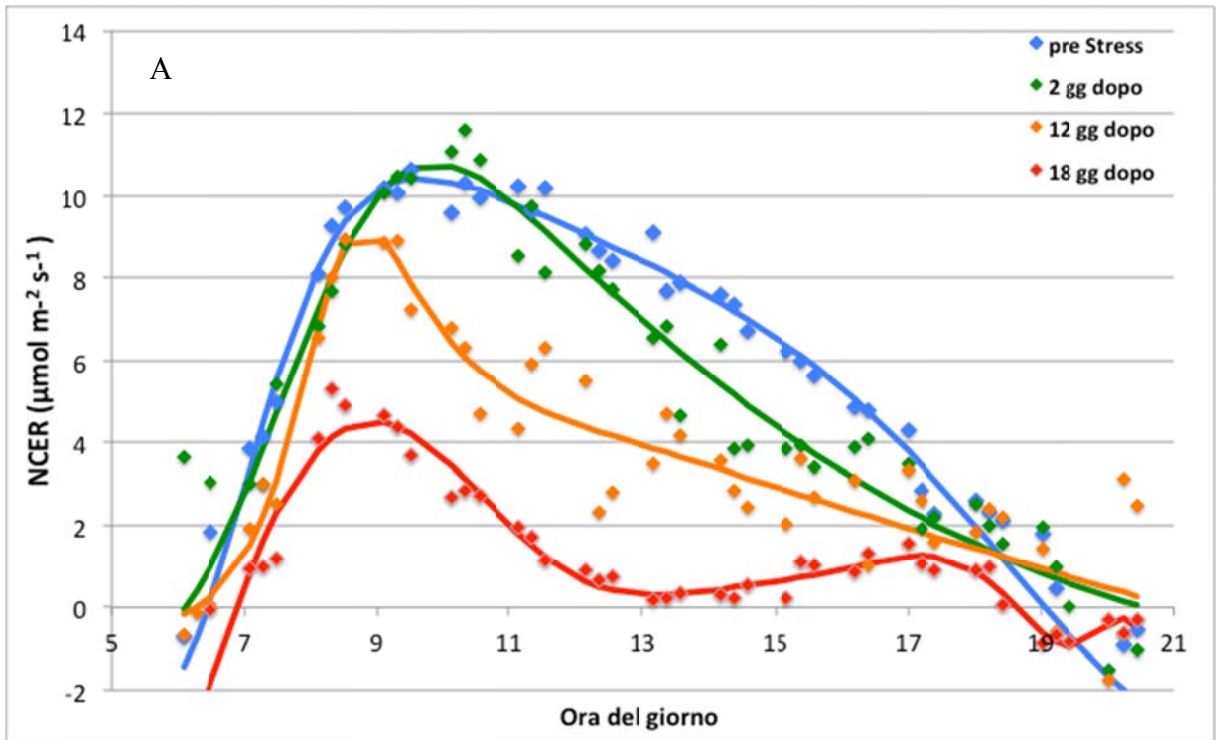


FIGURA 7: Rapporto tra conduttanza stomatica e assimilazione cumulato per tutte le tesi.

3.4 Scambi gassosi su chioma intera

Per ciascun vitigno, alle figure 8, 9, 10, 11, 12, sono riportati per i parametri di NCER (scambio netto di CO₂, quadro A), traspirazione totale (T, quadro B) e efficienza di uso dell'acqua (NCER/T, quadro C) gli andamenti diurni registrati in quattro giornate corrispondenti a pre-stress e a 2, 12 e 18 giorni dopo l'imposizione dello stress. Per NCER e T il trend va dall'alba al tramonto e riporta i valori registrati in automatico del sistema di scambio gassoso ogni 25 min. Per la WUE (quadri c) la "finestra" giornaliera è stata ridotta dalle 11.30 alle 16.30 poichè ad orari più anticipati o tardivi rispetto a questo il calcolo è viziato da valori di T e/o NCER molto bassi che possono originari outliers.



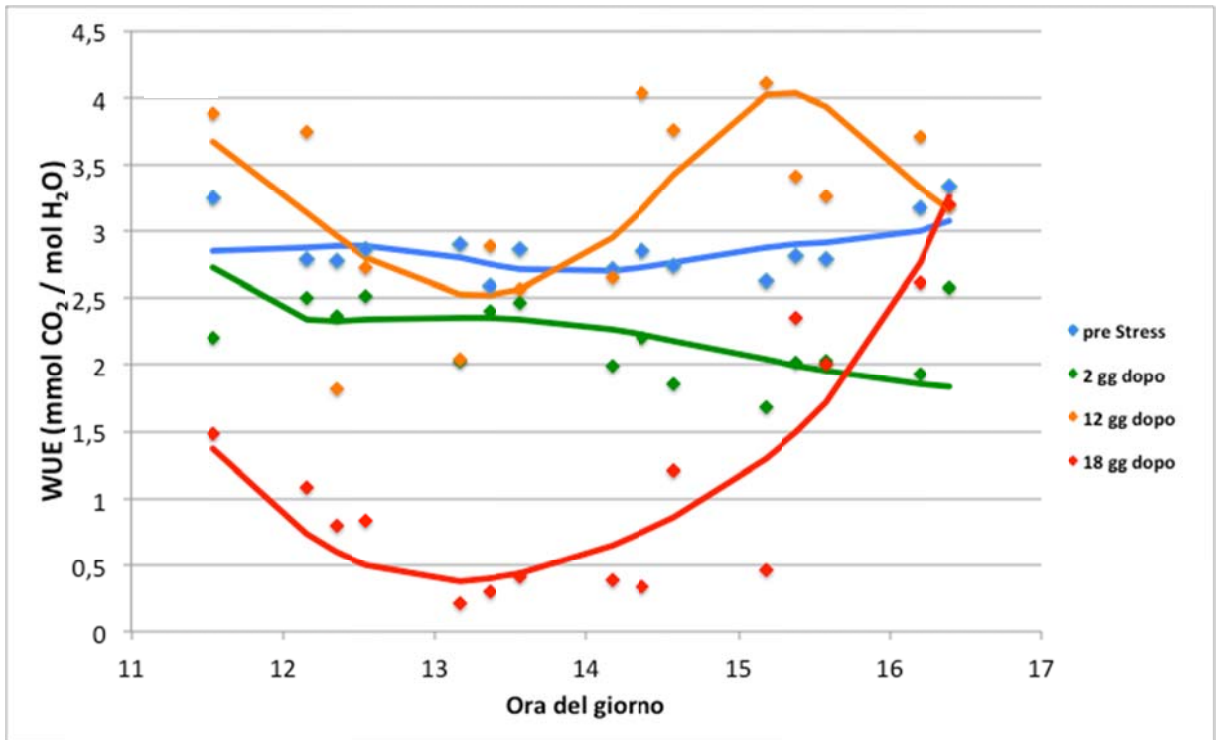
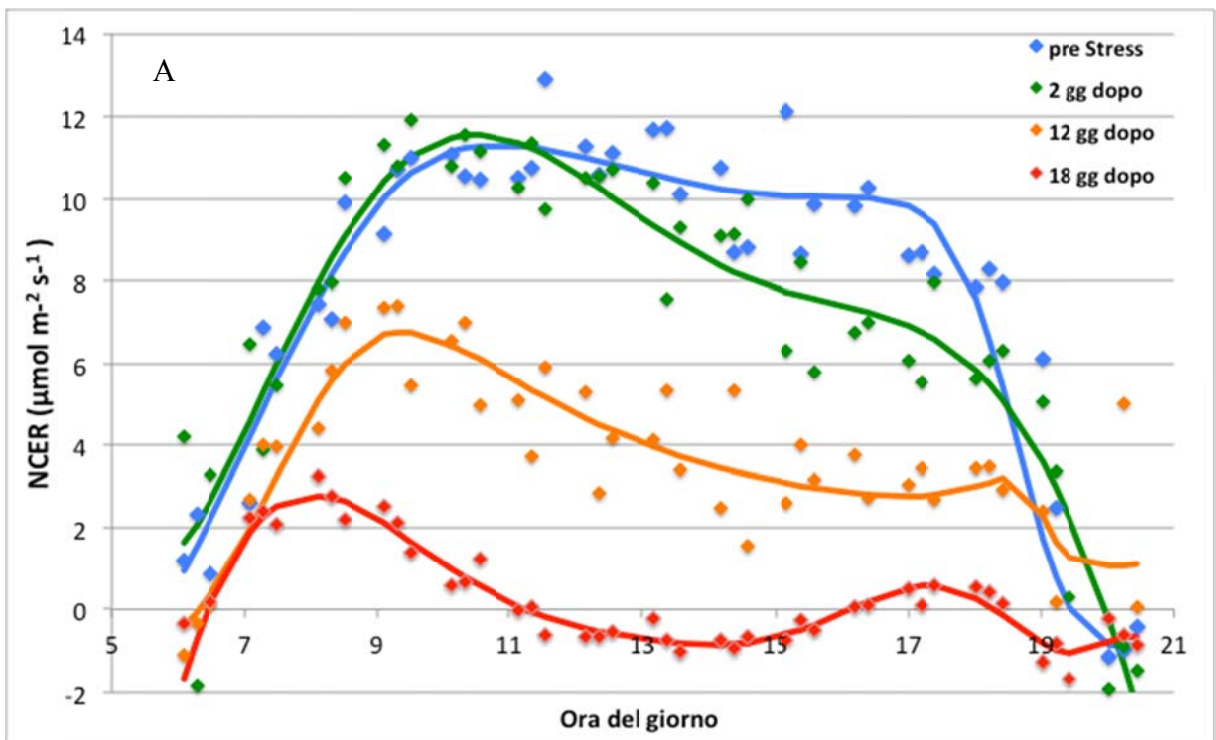


FIGURA 8_A, B, C: Scambio netto di CO₂ (quadro A), Traspirazione totale (quadro B) ed efficienza di uso dell'acqua (quadro C) per il vitigno Airen.



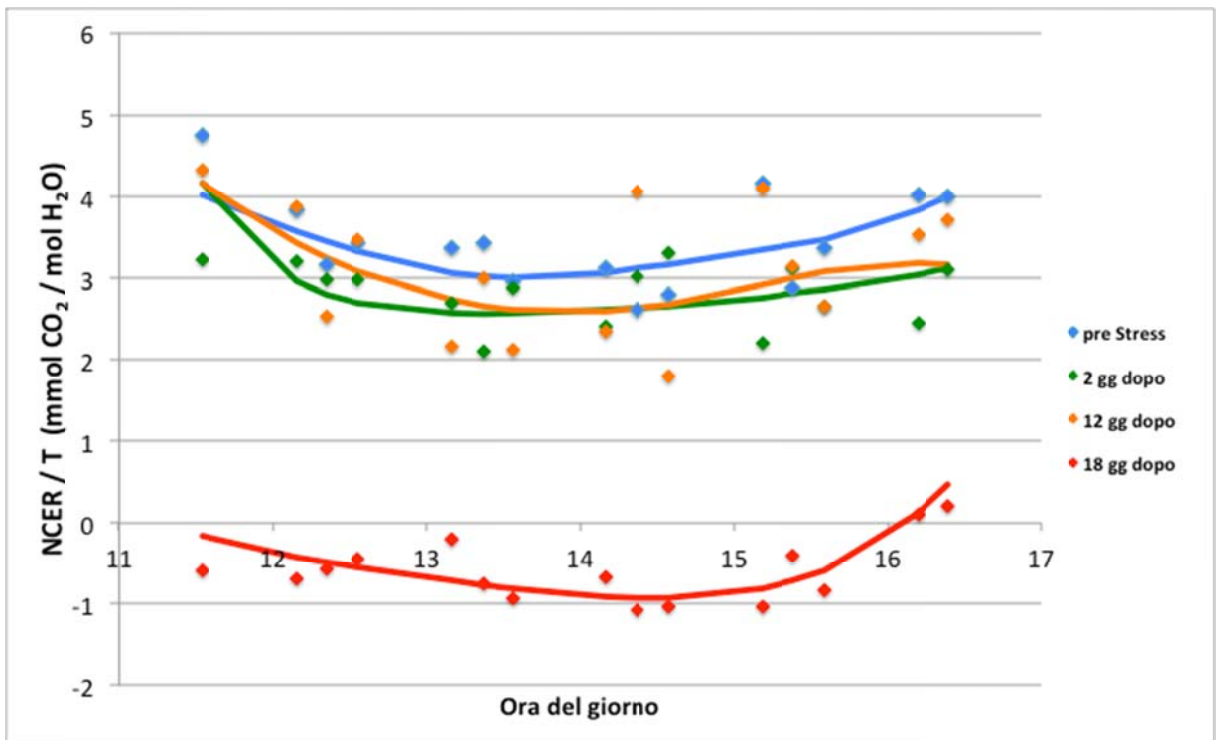
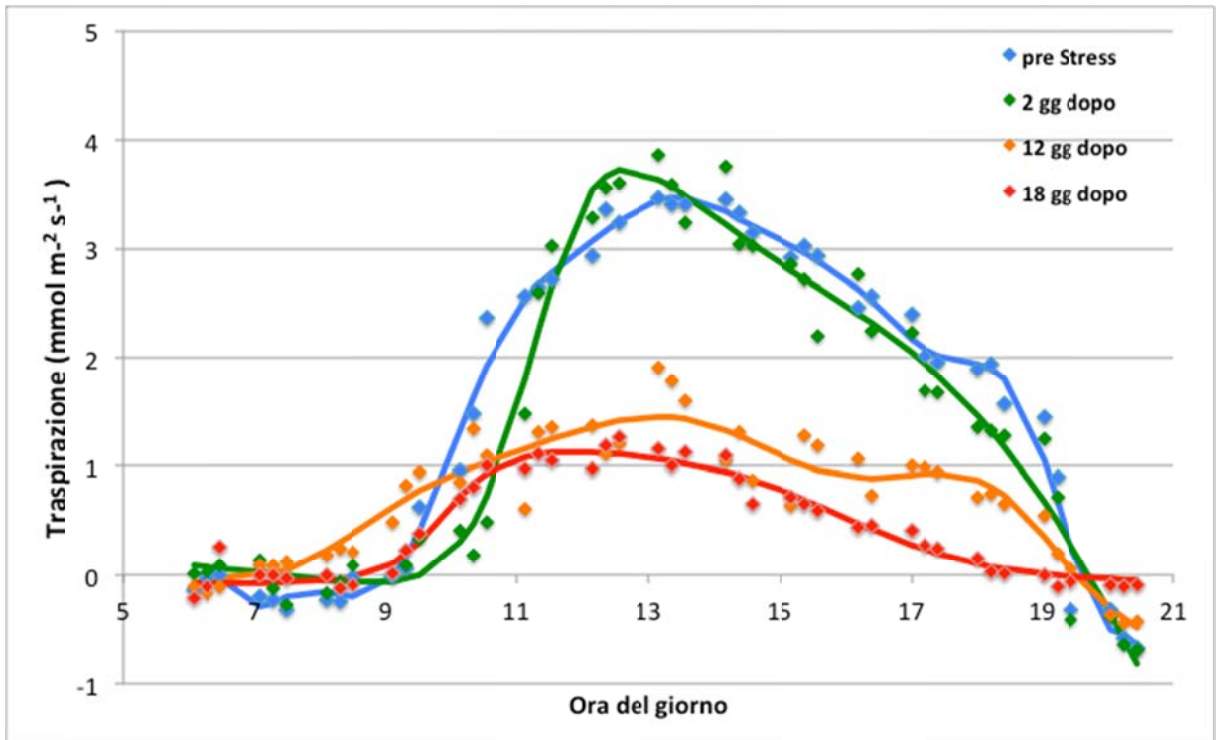
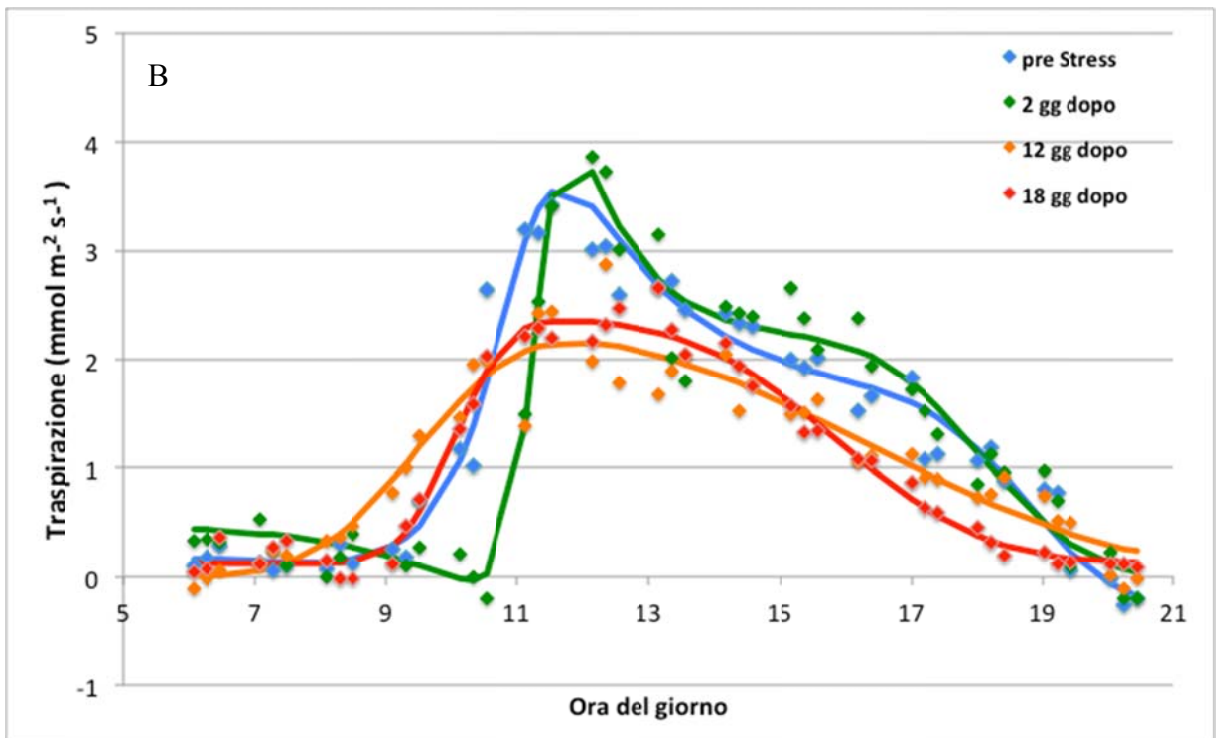
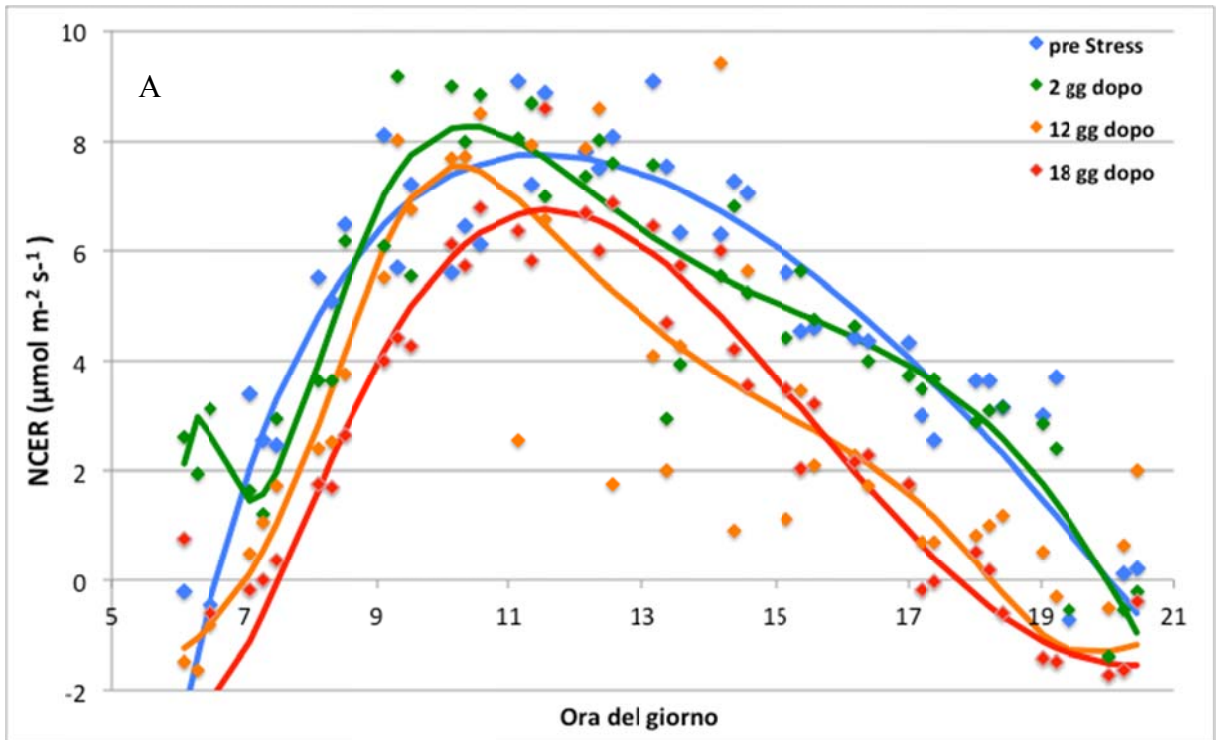


FIGURA 9_A, B, C: Scambio netto di CO_2 (quadro A), Traspirazione totale (quadro B) ed efficienza di uso dell'acqua (quadro C) per il vitigno Syrah.



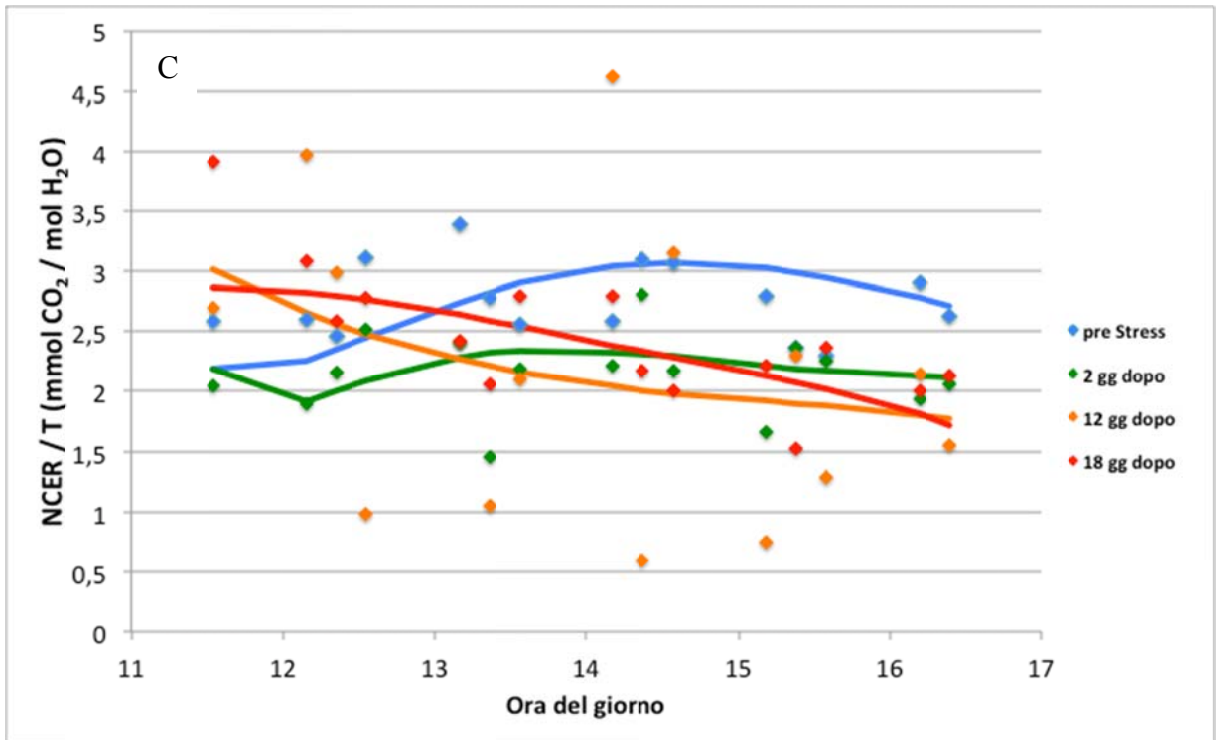
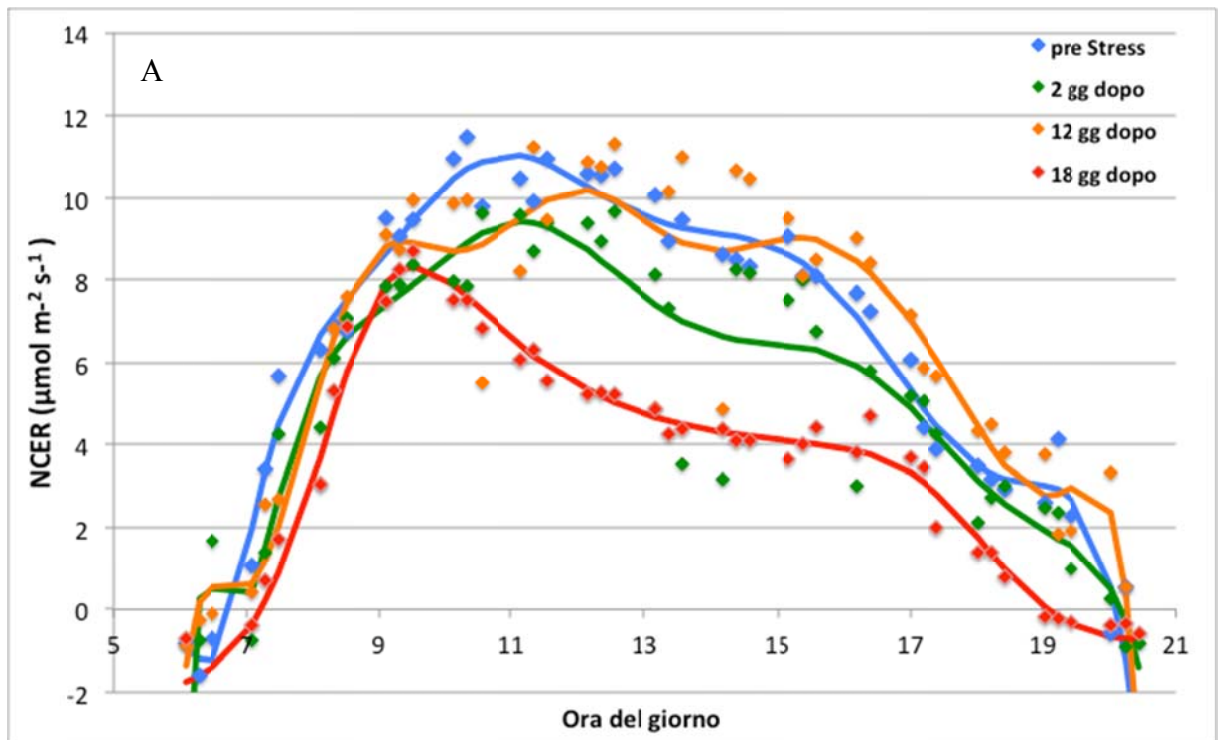


FIGURA 10_A, B, C: Scambio netto di CO₂ (quadro A), Traspirazione totale (quadro B) ed efficienza di uso dell'acqua (quadro C) per il vitigno Grenache.



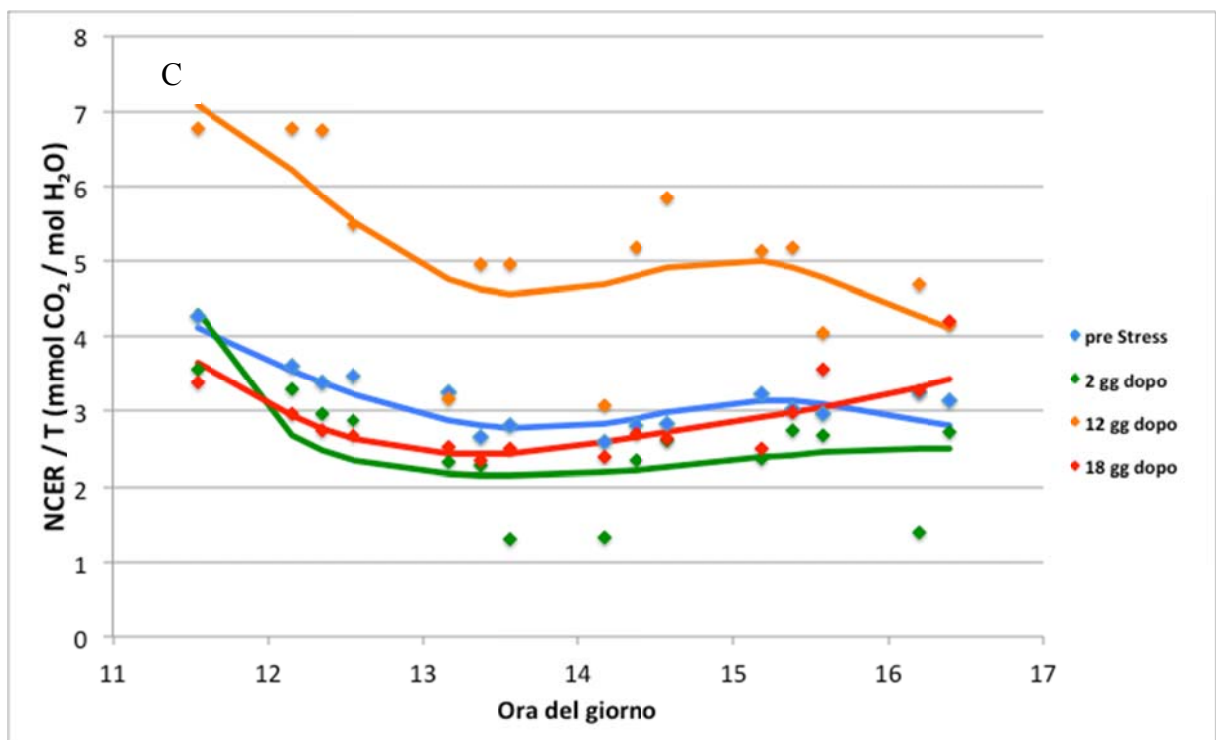
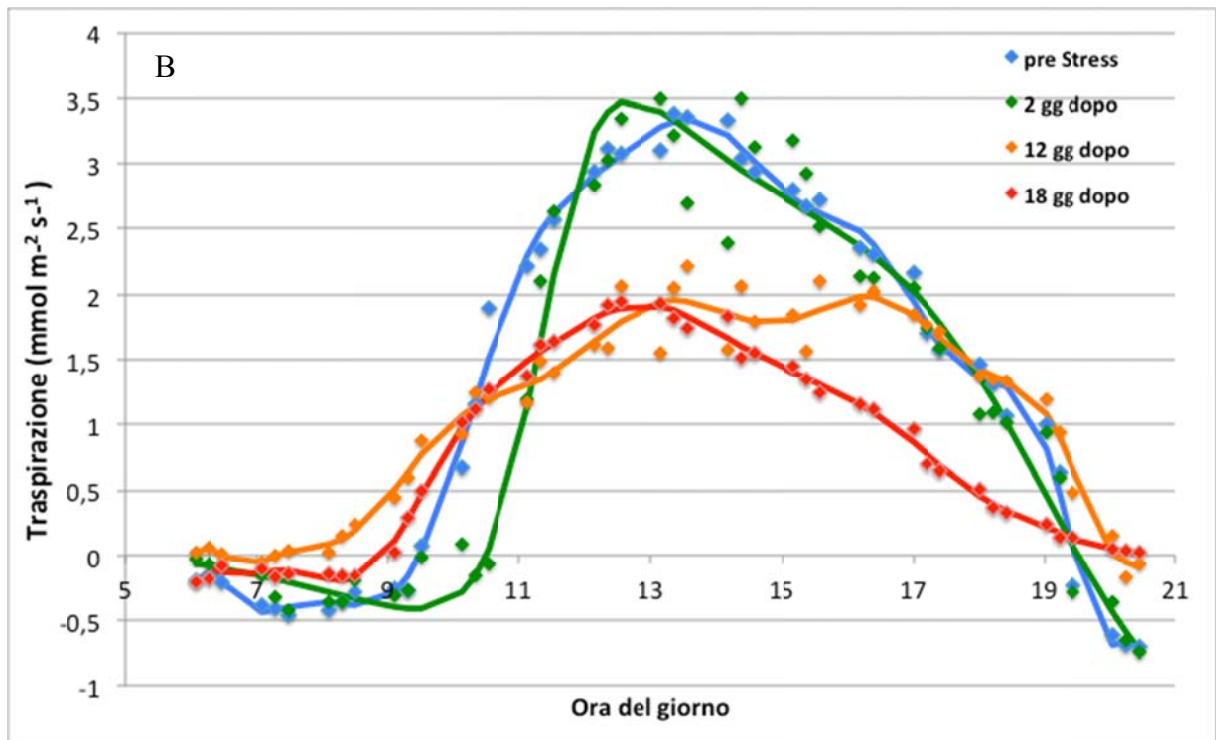
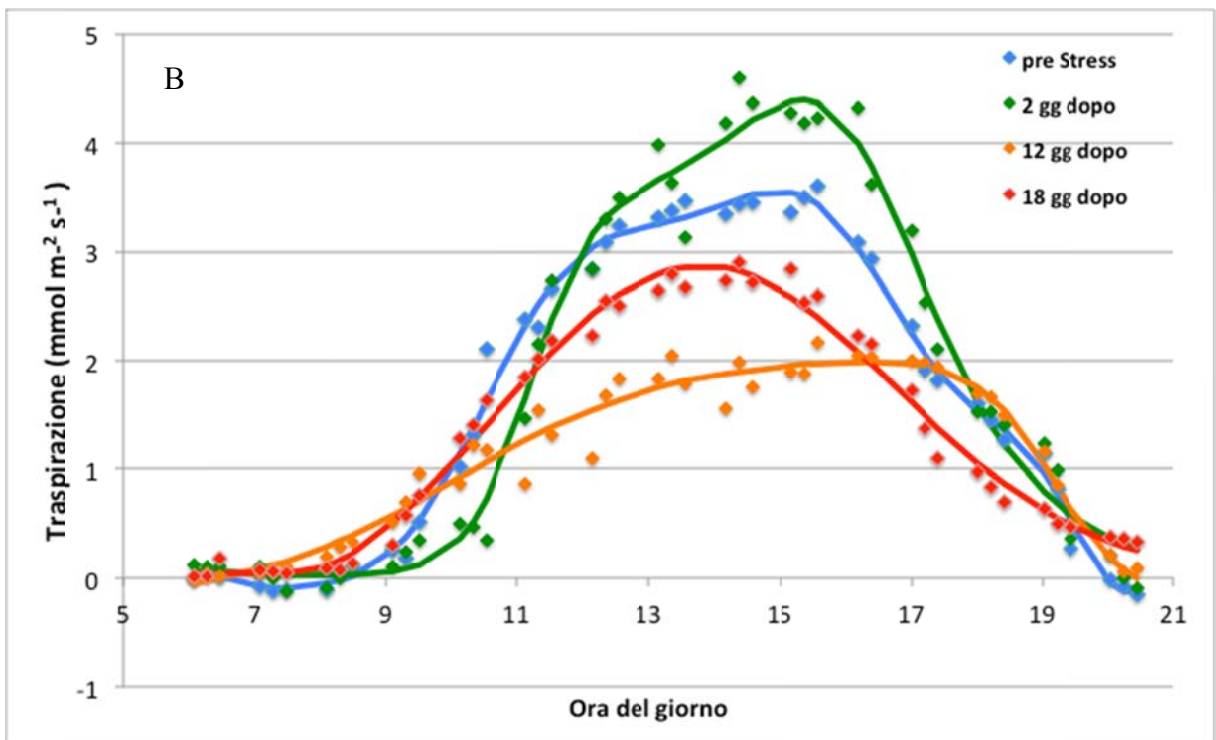
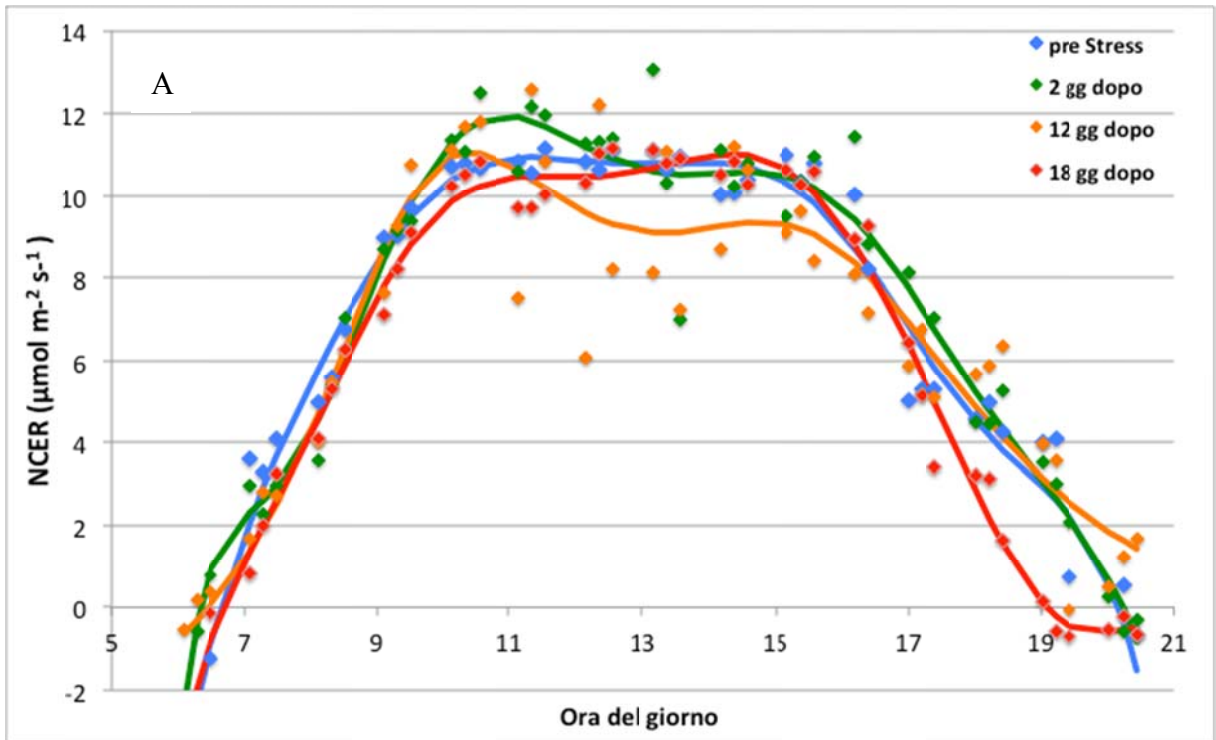


FIGURA 11_A, B, C: Scambio netto di CO_2 (quadro A), Traspirazione totale (quadro B) ed efficienza di uso dell'acqua (quadro C) per il vitigno Silvaner.



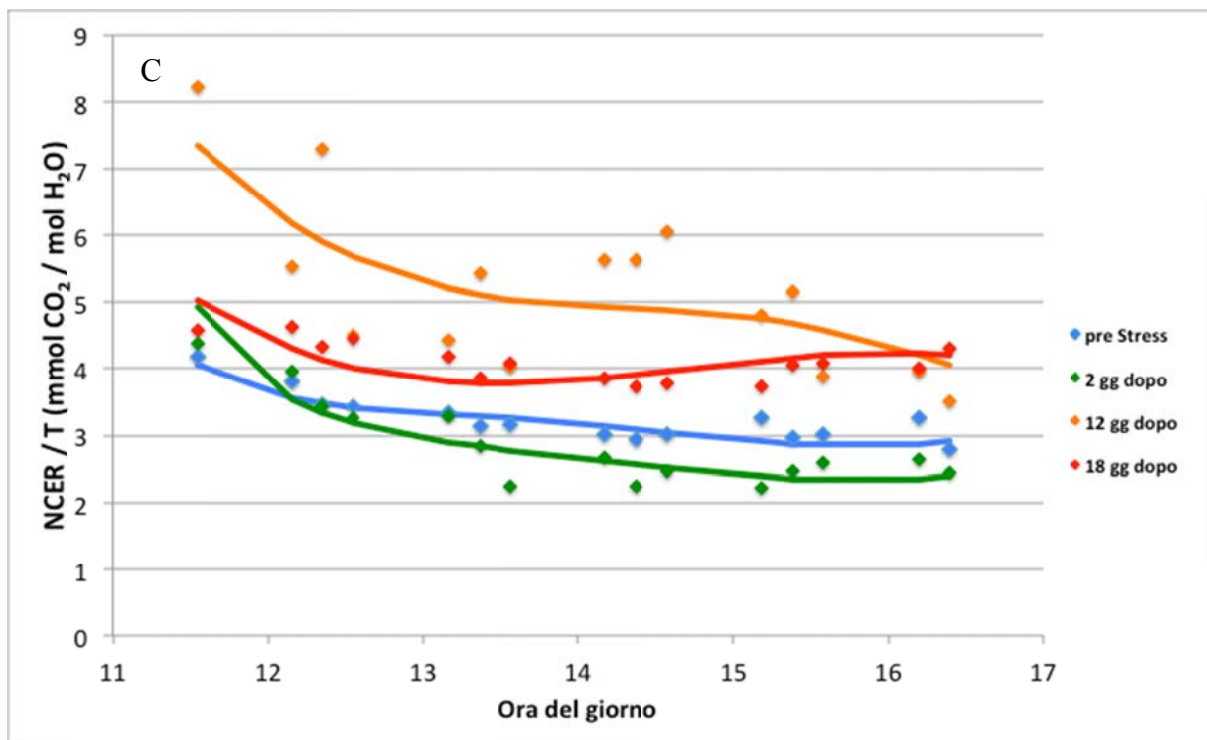
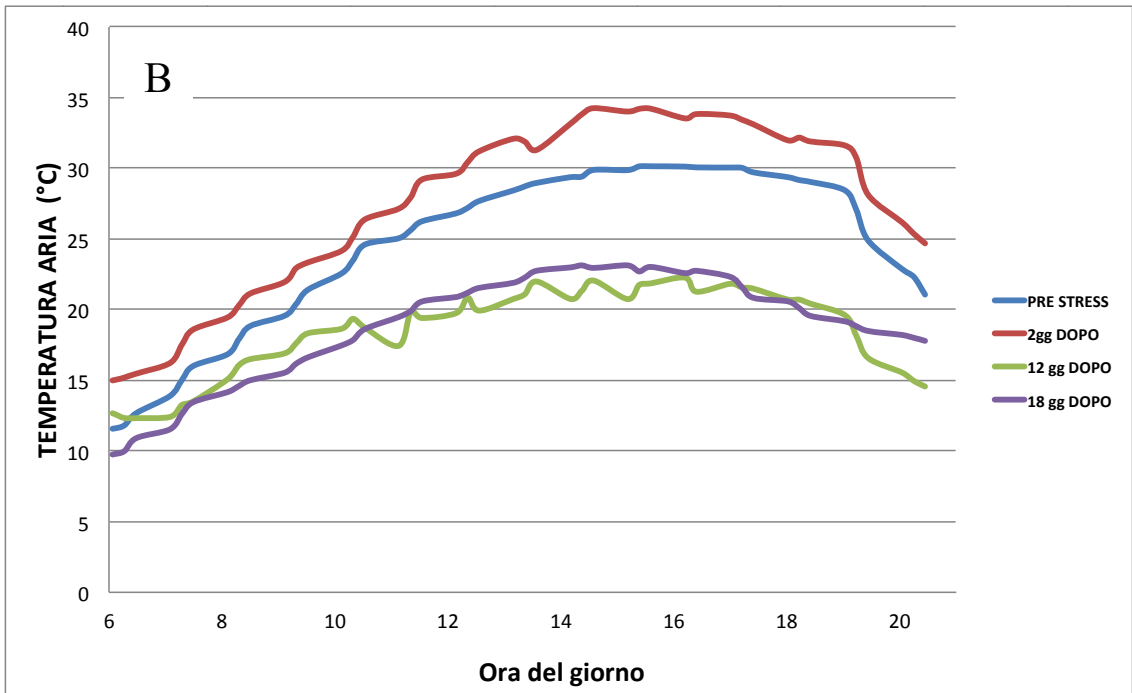
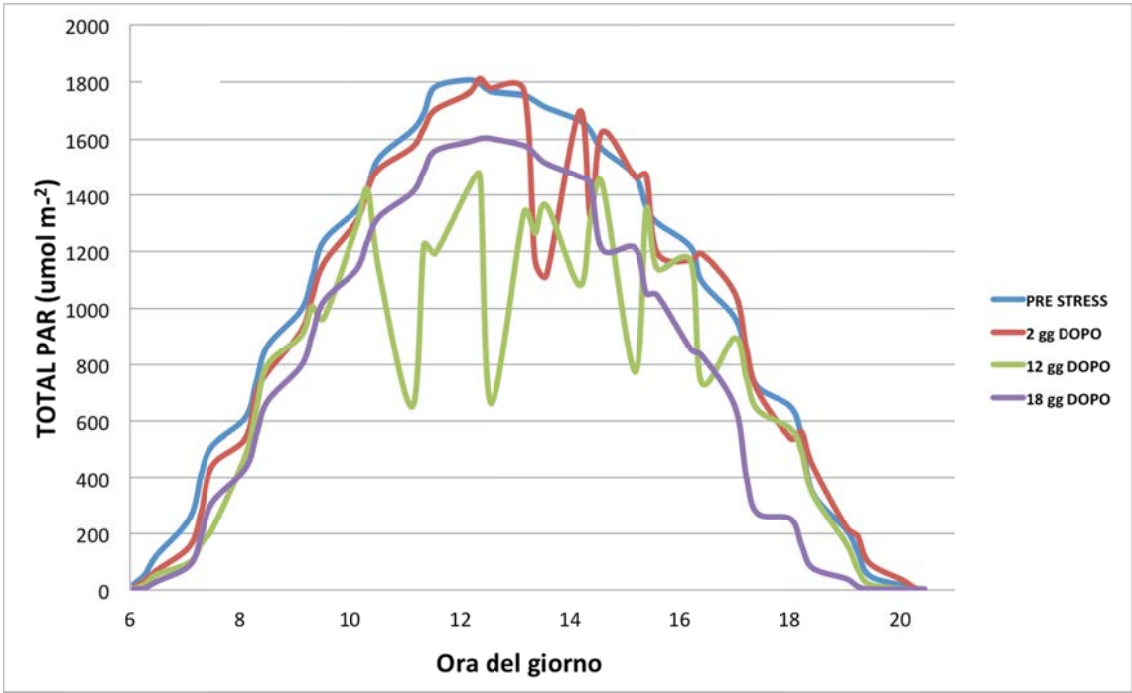


FIGURA 12_A, B, C: Scambio netto di CO₂ (quadro A), Traspirazione totale (quadro B) ed efficienza di uso dell'acqua (quadro C) per il vitigno Riesling.

Al fine di facilitare l'interpretazione dei dati, in figura 13 A, B, C sono anche riportati i trend giornalieri di intensità luminosa (PAR), temperatura dell'aria e VDP per le medesime giornate di rilievo.



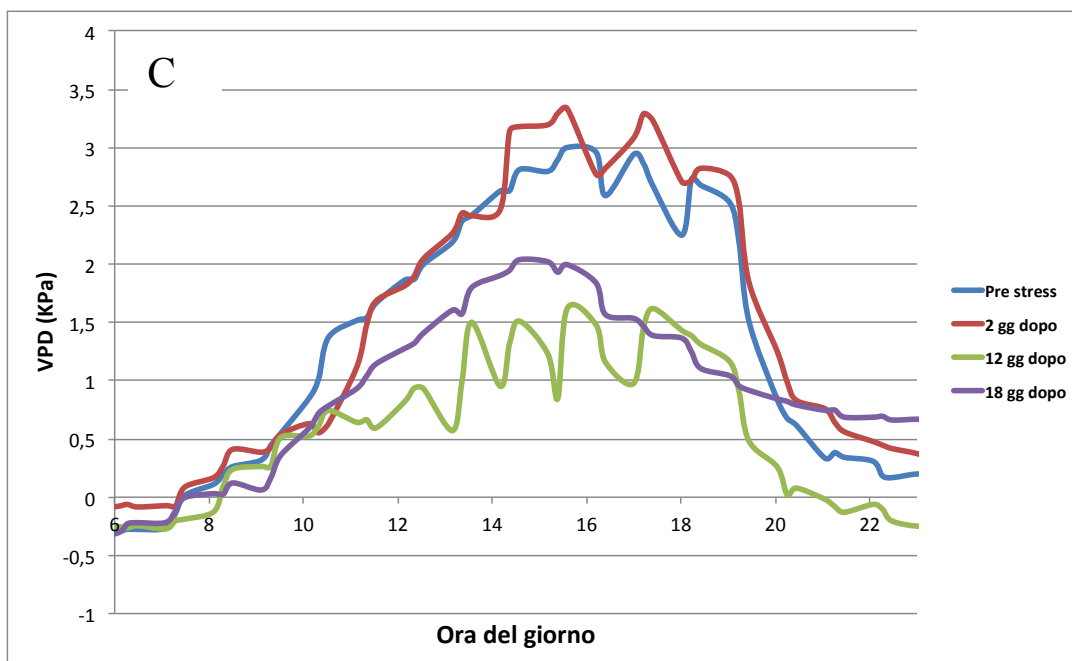


FIGURA 13_A, B, C: Intensità di luce giornaliera (A), temperatura (B), e VPD (C) per le giornate di rilievo.

Per quanto attiene il comportamento dei vari vitigni, è certamente possibile riconoscere marcati comportamenti differenziali.

Per quanto riguarda, ad esempio, Airen e Sirah, è assai evidente una limitazione progressiva e molto consistente del tasso di fotosintesi della chioma che, a partire dalle ore 12 circa, è già percepibile al 2 giorno di stress (Figure 8, 9 A). Di indubbio interesse notare come la forte limitazione fotosintetica che si registra a 12 e 18 giorni dallo stress si manifesti non solo in valore assoluto ma anche come anticipo temporale del picco temporale mattutino. Per quanto riguarda invece la traspirazione della chiome di questi due vitigni, in generale si osserva che l'andamento giornaliero è interpolato da una curva di tipo gaussiano che segue soprattutto i trend giornalieri di PAR e VPD (Figura 13). In questi due vitigni, peraltro, è rimarchevole sottolineare che, in occasione dello stress massimo (18 gg), la limitazione fotosintetica è ormai tale da azzerare il valore di fotosintesi netta della chioma durante le ore centrali della giornata ed anzi, in Sirah, da conseguire, dalle 12:00 alle 16:00 un bilancio di CO₂ negativo. Certamente da rilevare è che mentre al giorno 18 i tassi di NCER sono in pratica azzerati nel corso delle ore centrali della giornata, il tasso di traspirazione è ancora discreto e oscillante intorno al non disprezzabile valore di 1 mmol m⁻²s⁻¹. Questo fenomeno, da un lato, può essere dovuto all'azione di forti fattori limitanti la fotosintesi di natura non stomatica (es. foto-ossidazione del fotosistema 2) e, dall'altro, può dipendere da fenomeni di semplice "disidratazione" fogliare. La logica conseguenza della modifica

temporale di NCER e T è che, sia per Airen (figure 8C) sia per Sirah (figura 9C), la WUE, abbastanza simile per i rilievi precedenti, subisce un crollo arrivando ad essere addirittura negativa per Sirah nella parte centrale della giornata.

Una seconda “coppia” di vitigni per i quali si possono cogliere similitudini comportamentali è costituita da Grenache (figura 10) e Silvaner (figura 11). In Grenache soprattutto, la “resistenza” al mantenimento di tassi di NCER/chioma molto elevati anche a diversi giorni di distanza dall’imposizione dello stress è marcatissima (figura 10A) e su un linea simile si colloca anche Sylvaner il quale addirittura a 12 giorni dallo stress, probabilmente anche grazie ad una giornata caratterizzata da un VPD giornaliero più variabile e comunque più ridotto in valore assoluto, fa registrare un tasso di NCER/chioma addirittura simile a quello del periodo pre-stress (figura 11A). Per quanto riguarda la WUE/chioma, fatta eccezione per il dato, piuttosto “isolato”, di Silvaner a 12 giorni post-stress, non sembrano emergere differenze sostanziali tra gli andamenti diurni di pre e post stress.

Infine, il Riesling, si isola nettamente da tutti gli altri vitigni mostrando un adattamento al clima assolutamente peculiare (figura 12). Il primo, similmente a quanto visto per Grenache e Silvaner, ma in maniera ancora più marcata, ha mostrato, in termini di NCER/chioma, una quasi totale “indifferenza” a fronte dell’imposizione del mantenimento delle condizioni di stress (figura 12A). Al medesimo tempo, tuttavia, il controllo stomatico esercitato sulla traspirazione è risultato più efficiente come dimostrato dagli “shifts” dei picchi massimi di T giornaliera passando dal giorno 12 al giorno 18 e, soprattutto, dai valori di WUE/chioma che, in maniera consistente, in queste ultime due giornate, risultano decisamente superiori a quelli rilevati in assenza di stress o presenza di stress moderato (figura 12C).

Le misure di fotosintesi netta e di traspirazione condotte su foglie singole portano a concludere, sia pure con dinamiche e risposte quantitative variabili in funzione del vitigno, che l’insorgenza di uno stress idrico determini un aumento dell’efficienza di uso dell’acqua di tipi intrinseco ed estrinseco. Tuttavia, sulla base delle misure effettuate ininterrottamente, sull’arco delle 24 ore, con il sistema ad “inglobamento” di chioma, questo tipo di conclusione è avvalorata solo per il vitigno Riesling renano. Per tutti i rimanenti vitigni non si è registrato, a livello di chioma intera, un aumento complessivo, in condizioni di stress idrico, della WUE che anzi, in Airen e Sirah, è drasticamente diminuita. Questa “discrepanza” riflette quanto riportato da Poni et al. (2009) sul vitigno Lambrusco a foglia frastagliata (sin. Ancellotta) e pone l’accento sul fatto che la risposta di adattamento allo stress osservata dipenda in larga misura dalla “scala” e dalla modalità di campionamento. Infatti, misure condotte su singole foglie, solitamente di media età, pienamente funzionali e poste in piena luce prima

dell'esecuzione del rilievo costituiscono, nel complesso, una condizione abbastanza particolare e, per certi aspetti, "innaturale" rispetto alle condizioni, ad esempio di esposizione luminosa, che caratterizzano la "popolazione" delle foglie che compongono la chioma. Nel caso specifico, una misura condotta direttamente sulla parte epigea senza la minima alterazione dell'inclinazione e dell'orientamento delle foglie sembra offrire un'affidabilità decisamente maggiore. Peraltro, Schultz e Stoll nella loro recente review (2010) hanno riportato, per Riesling e Sirah che misure condotte su foglie lasciate in posizione "naturale" al momento della misura e quindi non "forzate" ad essere orientate perpendicolarmente rispetto alla direzione della radiazione incidente, hanno restituito, per quanto riguarda la WUE di tipo "estrinseco" valori più elevati nel controllo rispetto alla tesi stressata; un risultato, dunque, che riflette in maniera coerente quanto trovato nella mostra indagine per Sirah, Airen e, sia pure in misura più ridotta, anche per Silvaner e Grenache.

3.4. Assaggio uve

La scheda utilizzata per valutare i campioni è stata preparata nell'Istituto di Frutti-Viticoltura dell'Università Cattolica del Sacro Cuore (Piacenza) tramite tavola rotonda da cui sono stati estratti i descrittori con frequenze maggiori e riportati nella scheda di assaggio (Tabella 1).

nome cognome	Data										cod.	
Scheda UVA DA VINO rossa e bianca												
ACINO	t	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Elasticità												
colore(rosa-rosso-viola-blu)												
colore(verde-giallo-marrone)												
rimozione pedicello												
quantità polpa												
POLPA	t	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
adesione polpa-buccia												
succosità												
adesione polpa-vinacciolo												
dolcezza												
acidità												
erbaceo												
fruttato												
BUCCIA	t	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
masticabilità												
acidità												
astringenza												
amaro												
fruttato												
erbaceo												
metallico												
persistenza												
VINACCIOLI	t	T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
colore (verde-giallo-marrone)												
durezza alla masticazione												
astringenza (tannini)												
amaro												
acidità												
erbaceo												
legnoso												
persistenza												
maturazione (1=non matura)5=vicino a maturazione 8=matturo 9= surmatura												
Scala di valutazione dei descrittori: da 1 assenza di percezione a 9 massima percezione												

TABELLA 1: Scheda di valutazione utilizzata per l'assaggio uve.

Le uve delle diverse varietà in tesi (Sylvaner, Grenache, Riesling, Syrah e Airen) sono state valutate tramite analisi sensoriale da 8 giudici esperti (figura 12).

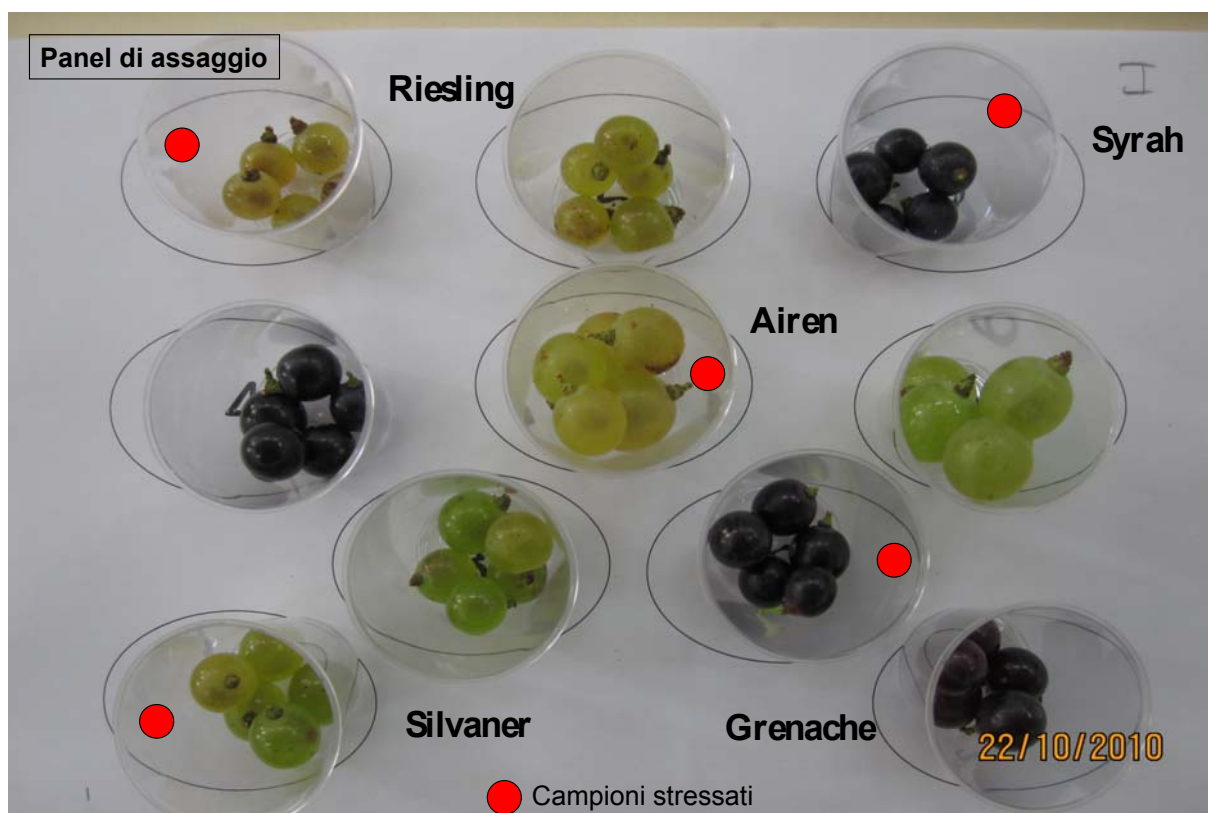


FIGURA 14: Campioni posti in degustazione per ciascun membro del panel di assaggiatori.

Prima di procedere all'assaggio dei campioni è stata fatta una taratura di gruppo per uniformare gli assaggiatori alla scala di valutazione utilizzata.

I dati ricavati dall'assaggio sono stati elaborati statisticamente ed individuate le differenze statisticamente significative (Mann-Whitney $p < 0.05$).

La varietà Silvaner (figura 14) ha evidenziato una differenza statisticamente significativa sul colore dell'acino e aderenza polpa buccia, in cui la tesi stressata presenta una colorazione molto più alta rispetto alla tesi non stressata e per il descrittore aderenza era molto più facile la separazione tra polpa e buccia nel campione stressato. Gli altri descrittori hanno mostrato una maggiore percezione del fruttato, maggiore succosità e maggiore dolcezza nella tesi stressata mentre l'acidità è praticamente uguale nelle due tesi. I vinaccioli sembrano più maturi nella tesi stressata, infatti, i giudici hanno dato valutazioni più elevate nei descrittori legnoso e intensità di colore.

I profili risultanti dall'assaggio della varietà Grenache sono invece molto simile nelle due tesi; solo il descrittore aderenza polpa-buccia presenta una differenza statisticamente significativa,

in cui la tesi stressata ha minore aderenza.

Il confronto tra Riesling stressato e non-stressato ha evidenziato una differenza molto marcata sul colore della buccia, molto più intenso nella tesi stressata. La rimozione del pedicello estrae molta più polpa nella tesi non stressata dove anche l'adesione tra polpa e vinacciolo è molto più alta. I vinaccioli risultano più maturi nella tesi stressata evidenziato dalla maggiore intensità di colore marrone, maggiore astringenza e maggiore amaro nella tesi stressata.

La varietà Syrah come il Grenache non mostra differenze statisticamente significative tra le due tesi e la percezione della maturazione sembra molto simile.

L'Airen nella tesi stressata è risultato molto più maturo rispetto alla tesi non stressata. La tesi stressata è risultata con un acino più intenso nel colore, più elastico, una polpa più dolce e poco acida mantenendo però una succosità alta. La buccia nella tesi stressata è stata valutata meno acida, meno dura nella masticazione e meno erbacea. Anche il vinacciolo è risultato più maturo evidenziando un colore marrone più marcato, più intenso, meno amaro, meno astringente e meno acido.

Dai dati sensoriali si evidenzia come la varietà Airen, Silvaner e Riesling maturino meglio se la pianta è in stress idrico mentre nelle varietà Grenache e Syrah non si mostrano differenze tra le due tesi.

Silvaner

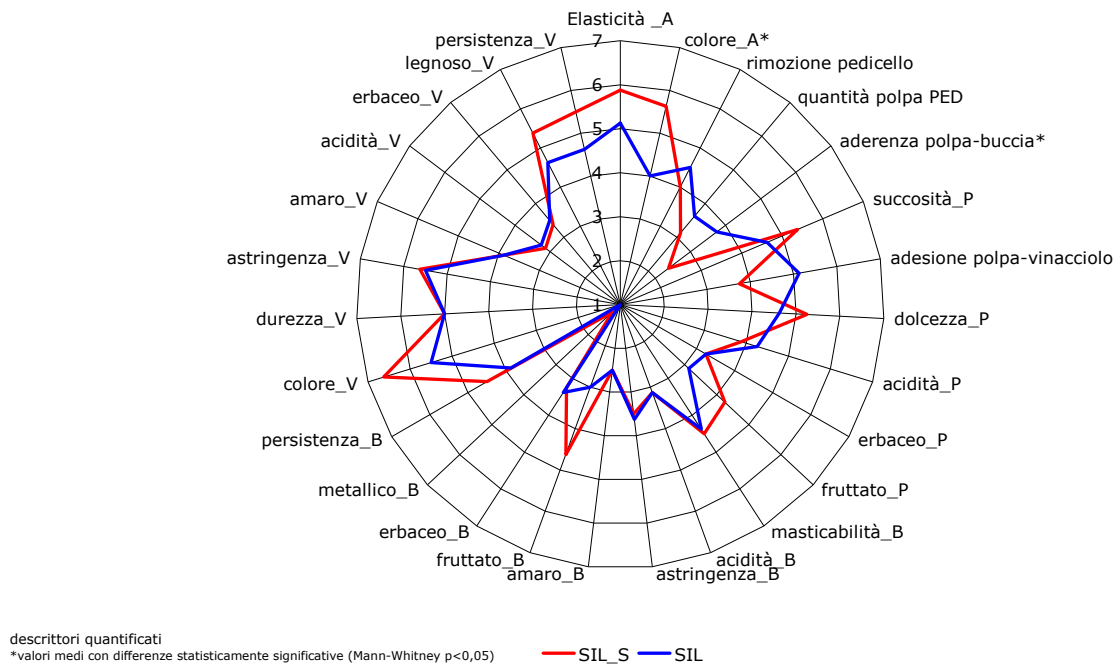


FIGURA 15 - Valori medi di ogni descrittore.

Sil= Silvaner non stressato

Sil_S= Silvaner stressato

Grenache

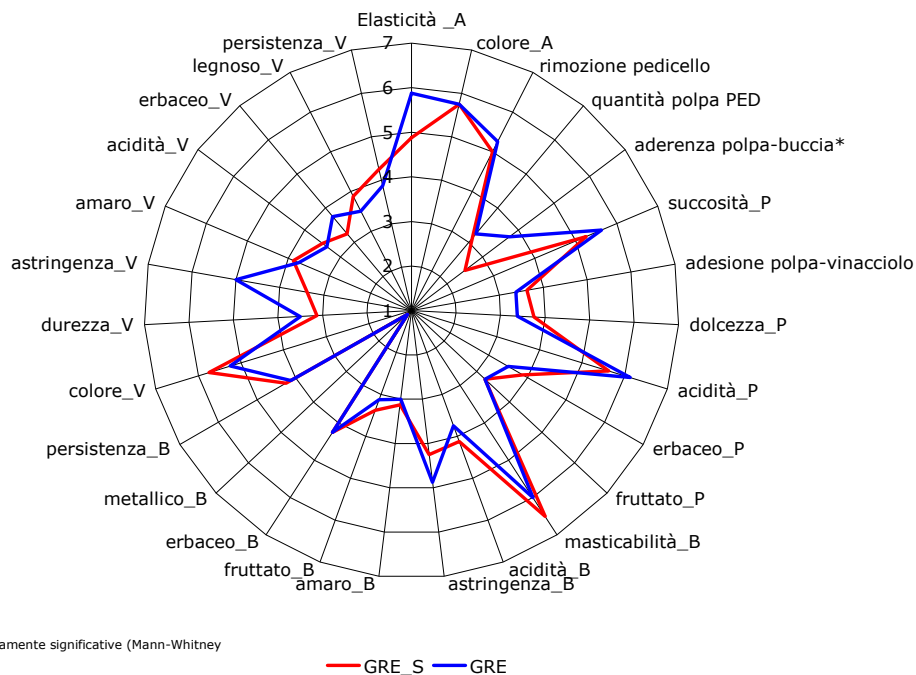


FIGURA 16 - Valori medi di ogni descrittore.

Gre= Grenache non stressato

Gre_S= Grenache stressato

Riesling

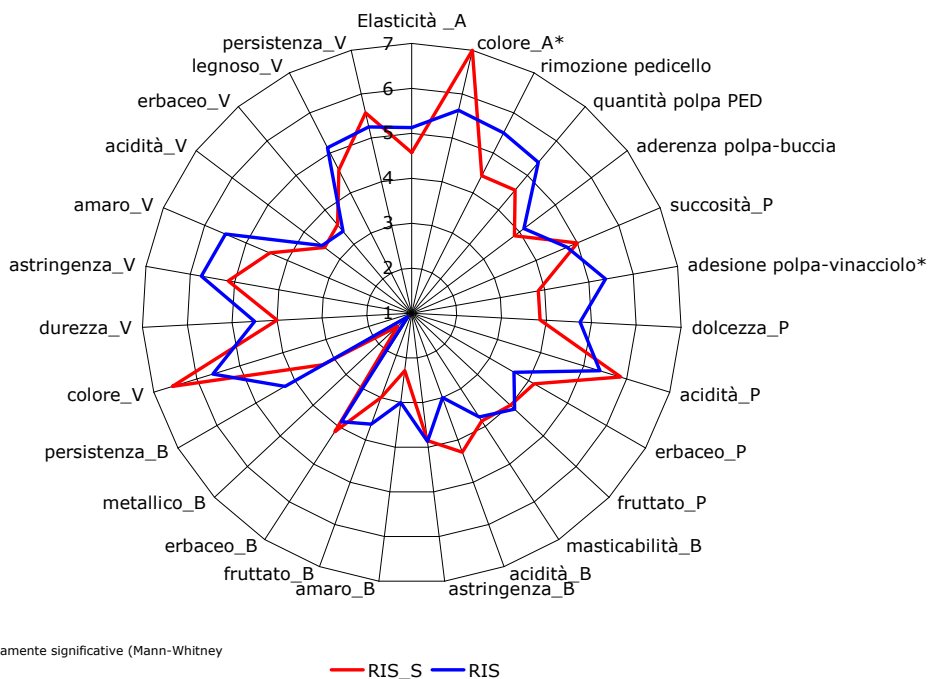


FIGURA 17- Valori medi di ogni descrittore.

Ris= Riesling non stressato

Ris_S= Riesling stressato

Syrah

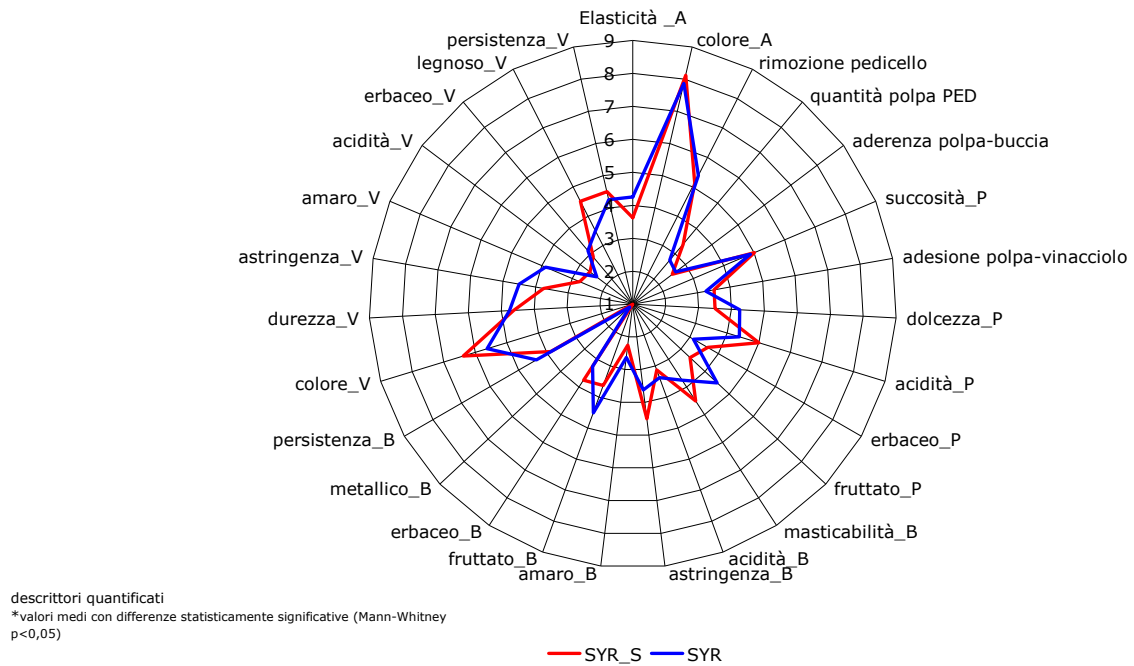


FIGURA 18- Valori medi di ogni descrittore.

Syr= Syrah

Syr_S= Syrah stressato

Airen

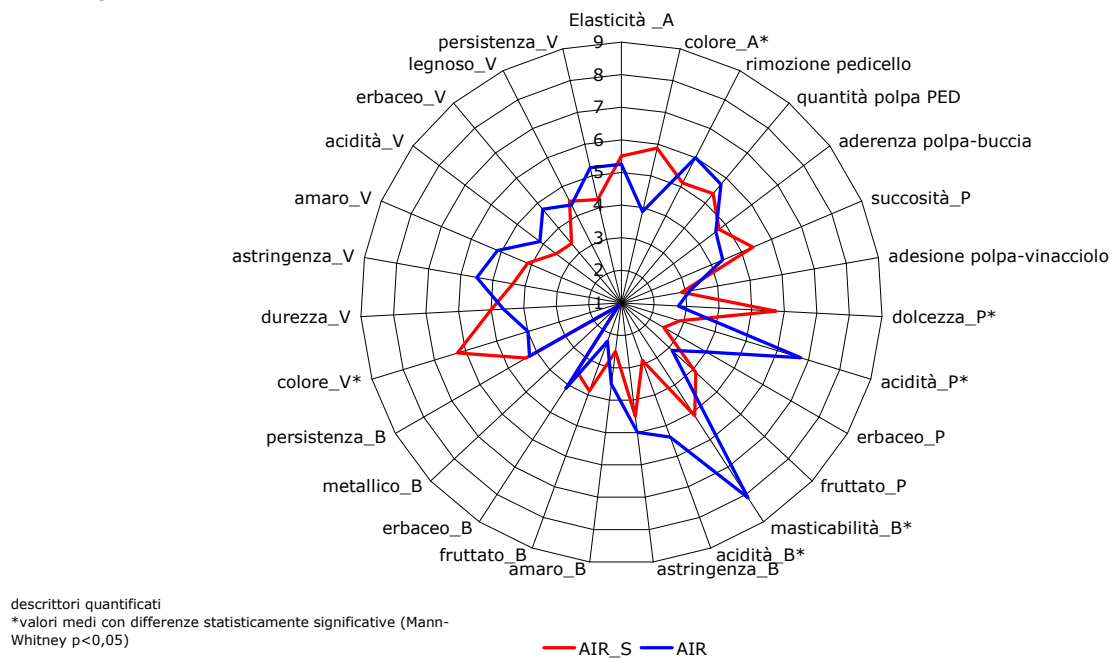


FIGURA 19- Valori medi di ogni descrittore.

Air= Syrah

Air_S= Syrah stressato

4. Conclusioni.

Le indagini svolte nel corso del triennio del dottorato hanno permesso, in un'ottica di adattamento della tecnica colturale del vigneto in funzione delle mutevoli esigenze imposte dal cambio climatico e di una gestione dell'impianto sempre più sostenibile, anche e soprattutto sotto il profilo economico, di precisare conoscenze di fisiologia applicata e di individuare soluzioni agronomiche di tipo fortemente innovativo.

Per quanto concerne la **sfera “chioma”** i lavori condotti hanno riguardato, nell'ordine, la possibilità di applicare, al posto di una classica defogliazione precoce manuale o meccanica, un prodotto antitraspirante (Palliotti et al., 2010) e, più recentemente, aspetti di fisiologia della chioma conseguente all'applicazione dell'assai diffusa pratica della scacchiatura dei germogli (Bernizzoni et al. 2011).

Per quanto riguarda il primo dei due lavori appare particolarmente significativo e interessante, sotto il profilo operativo, l'acquisizione di conoscenze tali da ritenere che la limitazione precoce di “source” conseguente all'applicazione, in pre-fioritura, di un prodotto ad azione anti-traspirante (Vapor Gard nel caso specifico), sia sufficientemente “efficace” per riprodurre i positivi effetti agronomici conseguenti alla medesima operazione condotta manualmente o a macchina. Nel caso specifico, i vitigni Sangiovese e Montepulciano hanno presentato, a seguito del trattamento, una significativa riduzione di resa, di compattezza del grappolo (carattere, ricordiamo, indirettamente connesso ad una maggiore tolleranza ai marciumi del grappolo, Botrytis in primis) e di miglioramento complessivo della qualità tecnologica e polifenolica. Nel contempo, la possibilità di utilizzare, per indurre i predetti effetti, un prodotto anti-traspirante, peraltro naturale, regolarmente registrato ed ammesso anche in regime di viticoltura biologica, offre una serie di innegabili vantaggi che possono essere così riassunti:

- maggiore accettazione “psicologica” da parte del viticoltore che non avverte alcun problema tecnico particolare poichè il prodotto viene irrorato come qualsiasi altro trattamento fitosanitario alla chioma. Tale “status” è ben diverso da quello conseguente ad un indirizzo di intervento meccanico che, a prescindere dalla disponibilità o meno di una macchina defogliatrice, presenta sempre e comunque una problematica di “invasività” (danni diretti alle infiorescenze in questo caso) e, nella fattispecie, di “scetticismo” poichè la defogliazione dovrebbe avvenire in un momento che è universalmente considerato troppo anticipato rispetto ai tempi di applicazione di una defogliazione “classica”, solitamente condotta nel periodo compreso tra allegagione ed invaiatura;

- i dati ottenuti dimostrano in maniera evidente che, anche a notevole distanza temporale dal trattamento (30-50 giorni), l'efficienza di uso dell'acqua di tipo intrinseco (A/g_s ; rapporto tra fotosintesi netta e conduttanza stomatica) aumenta per le chiome trattate con anti-traspiranti. Il riscontro è di estremo interesse in un'ottica di razionalizzazione dell'utilizzo delle risorse idriche ed, eventualmente, di quelle relative ad interventi di soccorso irriguo;

- la possibilità di “sostituire” l'azione manuale o meccanica con un trattamento totalmente non invasivo consente di mantenere tutti i vantaggi di tipo fisiologica ed agronomico senza provocare alcuna alterazione del microclima intorno ai grappoli. Infatti, la riduzione di “source” è ottenuta attraverso una chiusura “modulata” (per intensità e durata) degli stomi senza alcuna asportazione diretta di superficie fogliare. Questa caratteristica è di estremo interesse essenzialmente per due ragioni: a) in ambienti viticoli ormai avviati, anche a causa del cambio climatico, ad una fase di subtropicalizzazione in cui i picchi termici estivi sono sempre più frequenti ed intensi, è assai consigliabile mantenere i grappoli in un regime prevalente di luce “diffusa” eventualmente “rotto” da lampi di luce che penetrano attraverso la chioma dall'alto. Questa condizione è molto più facilmente raggiungibile con un intervento assolutamente non invasivo rispetto ad una defogliazione “reale” che, sia pur precoce, pone sempre e comunque il problema di avere, dopo l'intervento, condizioni di vigoria e di disponibilità idrica tali da “ricostruire” una sufficiente copertura fogliare intorno ai grappoli; b) anche in aree vitate considerate come “fresche”, in casi tutt'altro che rari una particolare destinazione merceologica può comunque fare preferire un intervento di “source limitation” non invasivo. Un esempio calzante, nello specifico, è costituito dalla produzione di Riesling nella Valle del Reno (Reingau, Germania) che, in presenza di un eccesso di esposizione termico-luminosa, tende a privilegiare la sintesi di aromi eccessivamente fruttati es. il 1,1,6-trimetil-1,2-diidrossinaftalene che esprime odore di “kerosene”) a scapito di sentori floreali. Al tempo stesso, la limitazione di “source” che il prodotto antitranspirante assicura, è comunque in grado di indurre un maggiore carattere spargolo del grappolo che, in climi umidi, si rivela spesso fattore decisivo per meglio tollerare gli attacchi di marciumi del grappoli evitando quindi uno scadimento qualitativo delle uve e/o vendemmia forzatamente “anticipate” in funzione dell'esigenza di salvaguardare la produzione.

Per quanto concerne, invece, l'esperienza condotta sul diradamento precoce dei germogli, i risultati appaiono probanti, da un lato, poichè chiariscono, in maniera originale, i meccanismi che questo intervento di potatura verde innesca a livello di scambi gassosi di chioma intera e, dall'altro, poichè consentono di prospettare, per un'operazione considerata da sempre "classica" e, tutto sommato, ritenuta poco "importante" sotto il profilo della reazione di compensazione che può innescare, un orizzonte piuttosto insolito e decisamente "innovativo".

Più in dettaglio:

- il set di dati relativo all'esperienza biennale, su Barbera, di diradamento dei germogli (in media 40-50% di germogli rimossi ad uno stadio di circa 20-25 di lunghezza rispetto ad un controllo non diradato) indicano che l'effetto di "sfoltimento" della chioma (la ragione probabilmente principale per cui questo intervento si effettua in vigneto unitamente all'esigenza, in qualche caso, di ridurre la produzione pendente) è effimero e destinato ad annullarsi presto nel tempo. Infatti, in entrambe le annate, le viti scacchiate hanno dimostrato, pur in presenza di condizioni colturali (vaso) potenzialmente in grado di limitare la crescita, di potere reagire con meccanismi di compensazione vegetativa (es. incremento della vigoria dei singoli germogli) tali da recuperare, *in toto*, la quota di superficie fogliare temporaneamente rimossa;
- il lavoro ha chiarito, in termini di dinamica stagionale della fotosintesi di chiome di vite sottoposte o meno a scacchiatura che, se il livello di densità dei germogli imposto col diradamento si attesta intorno alle 15 unità per metro, la vite è in grado di mettere in atto un rapidissimo processo di recupero della funzionalità fotosintetica che, già alla fioritura, si riporta sui valori misurati sui controlli non scacchiati;
- se il fenomeno commentato nel punto precedente si associa, come accaduto nel nostro lavoro e come peraltro riscontrabile nella maggiore parte delle condizioni che accompagnano la scacchiatura in vigneto, ad una concomitante riduzione della produzione pendente (quasi fatalmente la scacchiatura, rimuovendo anche una quota di germogli fertili si trasforma in una sorta di diradamento produttivo "preventivo"), questa operazione in verde si trasforma in un mezzo formidabile di "accelerazione" della maturazione. Infatti, come dimostrato nelle nostre prove, la quantità di assimilati disponibili per la maturazione, nel periodo cruciale compreso tra invaiatura e maturazione, aumenta in maniera assai significativa;
- una delle sfide che il cambio climatico sta imponendo alla viticoltura moderna è quello di riuscire a mettere a punto, nel breve periodo, tecniche colturali efficaci nel

“rallentare” *ad hoc* cinetiche di maturazione troppo tumultuose, nel corso delle quali l’accumulo zuccherino è spesso troppo anticipato rispetto al completamento della sintesi di sostanze coloranti e polifenoliche. In questa ottica, è evidente che anche l’impiego, piuttosto generalizzato e per certi aspetti “disincantato”, della scacchiatura dei germogli dovrebbe esser attentamente rivisto e utilizzato certamente con più raziocinio e moderazione o, in casi particolari, addirittura abbandonato.

Per quanto riguarda la **sfera suolo**, l’attenzione del lavoro svolto in questa tesi si è concentrata in particolare sui meccanismi di utilizzo, in funzione del genotipo, della risorsa idrica (Pallotti et al, 2011) nonché di approfondimento dei meccanismi di adattamento fisiologico di diversi vitigni ad una condizione di carenza idrica nel suolo (Bernizzoni et al. in preparazione).

Il primo contributo, dedicato ad una dettagliata caratterizzazione morfo-anatomica, fisiologica ed agronomica dei vitigni Montepulciano e Sangiovese in presenza di rifornimento idrico mai limitante, ha messo in evidenza forti differenze di potenzialità tra i due genotipi che, anche in questo caso, si prestano ad alcune considerazioni di sintesi e a forte orientamento applicativo. Più in particolare:

- ✓ Su base biennale e in presenza di assolute condizioni di uniformità per ciò che concerne il numero di germogli (circa 7) e di grappoli (circa 10) per vite, il vitigno Montepulciano ha mostrato, in assenza di limitazioni idriche, un’efficienza fisiologica, una potenzialità vegeto-produttiva e qualitativa nettamente superiori a quella del Sangiovese. Questo comportamento consiglia certamente l’utilizzo del Montepulciano in aree in cui l’insorgenza di stress idrici è meno probabile o, comunque, in settori dell’azienda in cui per ragioni di tipo orografico e geologico (pendenza, tessitura suolo ecc.) si presume si possa avere, nel corso della stagione, un adeguato rifornimento idrico;
- ✓ In presenza di condizioni idriche non limitanti, il Montepulciano, oltre a vantare tassi di fotosintesi netta su chioma intera nettamente superiori a quelli del Sangiovese (+38% al mattino, + 49% nelle ore pomeridiane), presenta anche un comportamento molto interessante in termini di efficienza di uso dell’acqua nel corso del pomeriggio, quando i valori di VPD, e quindi di domanda traspiratoria da parte dell’atmosfera, raggiungono il picco giornaliero (circa 4,5 kPa nella prova condotta). In tali condizioni, infatti, Montepulciano presenta una maggiore “sensibilità” stomatica

che consente di contenere la perdita traspiratoria senza in pratica alcuna penalizzazione del tasso di fotosintesi;

- ✓ La dettagliata caratterizzazione morfo-anatomica degli elementi di conduzione xilematica ha altresì acclarato che Sangiovese presenta un diametro minore di trachee e tracheidi nonché, nel complesso, una conducibilità idraulica più bassa. Nel complesso, ciò può fare ritenere che, in presenza di stress idrico, il comportamento dei due vitigni potrebbe fortemente modificarsi e, nello specifico, il Sangiovese parrebbe meno esposto a danni da eventuale cavitazione.

Per quanto riguarda il secondo contributo relativo alla sfera “suolo” e finalizzato ad una caratterizzazione fisiologica dei meccanismi di adattamento di vari genotipi appartenenti a *Vitis vinifera* ad uno stress idrico, emergono altresì almeno tre importanti punti conclusivi:

- esiste, all'interno della specie *Vitis vinifera*, una marcata varietà tra genotipo per ciò che riguarda i meccanismi di risposta allo stress idrico. Nel caso specifico di questa indagine, la risposta concorde trovata, in termini di efficienza di uso dell'acqua, sia su base di singola foglia che di chioma intera, identifica il Riesling renano come vitigno meglio adattato all'ambiente;
- i dati dimostrano che affidare il “giudizio” di adattabilità allo stress idrico a misure esclusivamente puntiformi, spesso condotte su foglie artificialmente esposte alla massima intensità luminosa, può condurre a giudizi frettolosi e, spesso, non corretti. In tal senso, appare sempre consigliabile condurre rilievi anche su foglie mantenute nella loro posizione naturale.
- I nostri dati dimostrano, inoltre, come nell'ambito della gamma dei cinque vitigni presi in esame non sia possibile un'assegnazione “univoca” all'interno delle categorie isoidrica o anisoidrica ma che adattamenti fisiologici ritenuti peculiari dell'una o dell'altra classificazione possano ritrovarsi, contemporaneamente, nel medesimo genotipo.

5. BIBLIOGRAFIA

Agricoltura rivista E.R.– Dossier (2008) – “Agricoltura e cambiamento climatico” a cura di Arpa ER.

ARPA (2009) – “Cambiamenti climatici” – Relazione sullo stato dell’ambiente della regione Emilia-Romagna.

Barilla (2008) -“Cambiamento climatico, agricoltura e alimentazione”. www.barillacfn.com

Bindi, M., Fibbi, L., Gozzini, B., Orlandini, S. and Miglietta, F. (1996) Modelling the impact of future climate scenarios on yield and yield variability of grapevine. *Climate Research* 7, 213–224

Chaves M.M, Oso´rio J, Pereira JS (2004) Water use efficiency and photosynthesis. In: Bacon MA (ed) *Water Use Efficiency in Plant Biology*. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, pp 42–66

Chaves M.M. , Zarrouk O., Francisco R. , Costa J.M., Santos T., Regalado A.P., Rodrigues M.L. and Lopes C.M. . Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data - *Annals of Botany* 105: 661–676, 2010

Chouzouri A, Schultz HR. Hydraulic anatomy, cavitation susceptibility and gas-exchange of several grapevine cultivars of different geographical origin. *Acta Horticulturae* 2005;689:325-331.

Corelli Grappadelli L., Magnanini E. 1993. A whole-tree system for gas-exchange studies. *HortScience* 28:41-45.

Claudia R. de Souza, João P. Maroco, Tiago P. dos Santos, M. Lucília Rodrigues, Carlos M. Lopes, João S. Pereira and M. Manuela Chaves . Partial rootzone drying: regulation of stomatal aperture and carbon assimilation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel). *Functional Plant Biology* 30(6) 653 - 662

- Downey M. O., Harvey J. S., Robinson S. P. – 2004 – The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulation in Shiraz grapes. *Aus. J. Grape and Wine Research*, 10, 55-73.
- Dry, P.R. and Loveys, B.R. 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are reduced when part of the root system is dried. *Vitis* 38:151-156.
- During H. (1984) Evidence for osmotic adjustment to drought in grape- vine (*Vitis vinifera* L.). *Vitis* 23: 1–10
- ENEA, (2007) “Dossier per lo studio dei cambiamenti climatici e dei loro effetti”.
- ENEA, (2003) “La risposta al cambiamento climatico in Italia”. <http://clima.casaccia.enea.it>
- Eynard I., Dalmasso G.(1990) *Viticultura moderna. Manuale pratico*. Hoepli Milano. 1-778.
- Fregoni M. (2006) – “Viticultura di qualità “ Tecniche nuove.
- GFN, “Ecological Footprint Glossary”. Global Footprint Network, Oakland, CA, USA, 2007.
- Giardini L. (2002) – *Agronomia generale ambientale e aziendale*– Patron
- GREENPEACE (2009) *Changements climatiques et impacts sur la viticulture en France – « Impacts of climate change on wine in France »*. www.greenpeace.org
- Grifoni D., Mancini M., Maracchi G., Orlandini S., Zipoli G., 2006. Analysis of italian wine quality using freely available meteorological information. *Am. J. Enol. Vitic.*, 57(3): 339-346.
- Iland, P.G. Leaf removal effects of fruit composition, In: *Proceedings of the 2nd Cool Climate Viticulture and Oenology Symposium*, Smart, R.E., Robinson, J.B., Auckland, New Zealand, 1988, 137-138.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC 2001) - “Third Assessment Report: Climate Change 2001”.

Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC 2007) -“Fourth Assessment Report: Climate Change 2007”.

Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopy in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. B.* 273:593-610.

Jones, G.V.; Davis, R.E. (2000) Climate Influences on Grapevine Phenology, Grape Composition, and Wine Production and Quality for Bordeaux; France; *Am. J. Viti. Enol.* 51: 249–261.

Jones, G.V.; Duchene, E.; Tomasi, D.; Yuste, J.; Braslavksa, O.; Schultz, H.; Martinez, C.; Boso, S.; Langellier, F.; Perruchot, C.; Guimberteau, G. (2005) Changes in European Winegrape Phenology and Relationships with Climate; GESCO 2005.

Kenny GJ., Harrison P.A., 1992. “The effects of climate variability and change on grape suitability in Europe.” *Journal of Wine research* 3.

Legambiente (2006) Gli effetti dei cambiamenti climatici in Italia – Rapporto Legambiente – www.legambiente.it

Long SP, Hallgren JE (1985) Measurement of CO₂ assimilation by plants in the field and the laboratory. In J Coombs, DO Hall, SP Long, JMO Scurlock, eds, *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*, Ed 2. Pergamon Press, Oxford, pp 62-94.

Lovisolò, C.; Perrone, I.; Carra, A.; Ferrandino, A.; Flexas, J.; Medrano, H. & Schubert, A. (2010). Drought-induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* spp.) organs and in their hydraulic and non-hydraulic interactions at the wholeplant level: a physiological and molecular update. *Functional Plant Biology*, Vol. 37, No. 2, pp. 98-116, 2010), ISSN, 445-4408.

Mabrouk, H.; Sinoquet, H.; 1998: Indices of light microclimate and canopy structure of grapevines by 3D digitising and image analysis, and their relationship to grape quality. *Aust. J. Grape Wine Res.* 4, 2-13

Marracchi G. (2000) – Effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura – L'informatore agrario. 30-2000.

NOAA (2009) “Climate of 2008 Annual Report”.

Orlandini S., Grifoni D., Mancini M., Maracchi G., Zipoli G., 2006. Effetto della variabilità meteorologica sulla qualità dei vini. VQ, 1: 9-17.

Poni S., Magnanini E., Rebucci B., 1997. Measurements of whole-vine gas-exchange using an automated chamber system . HortScience 32, 64-67.

Poni S., Intrieri C. e Magnanini E., 1999. Set-up, calibration and testing of a custom-built system for measuring whole-canopy transpiration in grapevine. In Proceedings of the First ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines. Acta Horticulturae 493, 149-159.

Poni, S., Magnanini, E., Bernizzoni, F., 2003. Degree of correlation between total light interception and whole-canopy net CO₂ exchange rate in two grapevine growth systems. Aust. J. Grape Wine Res. 9 (1), 2–11.

Poni S., Bernizzoni F., Civardi S. Response of ‘Sangiovese’ grapevines to partial rootzone drying: gas-exchange, growth and grape composition. Scientia Horticulturae 2007;114:96-103.

Poni S., Bernizzoni F., Civardi S., Gatti M., Porro D., Camin F. (2009). Performance and water-use efficiency (single-leaf vs. whole-canopy) of well watered and half stressed split-root Lambrusco grapevines. Agric., Ecos. and Envir. 129: 97-106.

Schultz Hans R. (2000) - Climate change and viticulture: A European perspective on climatology, carbon dioxide and UV-B effects. Australian Journal of Grape and Wine Research 6, 2–12, 2000.

Schultz, H.R. (2003) Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. Plant Cell and Environment 26,1393–1405.

Schultz, H.R. and Stoll, M. (2010) Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 16, 4–24.

Sguin B. (2007) - Le réchauffement climatique et ses conséquences pour la viticulture - Réchauffement climatique, quels impacts probables sur les vignobles ? - 28-30 mars 2007 - Mission Changement climatique et effet de serre - INRA, Site Agroparc, Domaine Saint-Paul, 84914 Avignon cedex 9, France

Soar C.J., Speirs J., Maffei S.M., Penrose A.B., MC Carthy M.G. and Loveys B.R.. Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue- *Australian Journal of Grape and Wine Research* 12, 2–12, 2006.

Souza Claudia R. de, Maroco João P., Tiago P. dos Santos, M. Lucília Rodrigues, Carlos Lopes, João S. Pereira, M. Manuela Chaves. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Volume 106, Issues 2-3, 2 April 2005, Pages 261-274 Photosynthesis and Abiotic Stresses.

Spayd S.E., Tarara J.M., Mee D.L., Ferguson J.C. – 2002 – Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis Vinifera* cv Merlot berries. *Am. J. Enol. Vitic.*, 53, 2, 171-182.

UNFCCC, “Investments and Financial Flows to address climate change: an update”, novembre 2008.

Vazzana C. 1998. *Ecologia vegetale agraria*. Pàtron editore, Bologna, 390 pp.

Jones H.G. (1980) Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment. In *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress* (eds N.C.Turner & P.J.Kramer), pp. 353–365. Wiley, New York, USA.

Wackernagel M., Rees W. .Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, New Society Publishers, ISBN 086571312X. Traduzione italiana: L'impronta ecologica. Come ridurre l'impatto dell'uomo sulla terra. Milano, Edizioni Ambiente, 2004, ISBN 8889014156.

Wackernagel, M., Monfreda, C., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D. and Murray, M, "National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method", 2005

Wiedmann, T., Minx, J., Barrett, J. and Wackernagel, M., "Allocating ecological footprints to final consumption categories with input-output analysis". Ecological Economics 56(1): 28-48, 2006

Wiedmann T. e Minx T., "A definition of Carbon Footprint", ISA UK Research Report, 2007

6. Ringraziamenti

Per questo capitolo della tesi forse non sarebbero sufficienti altre 130 pagine. Le persone da ringraziare sono veramente tante, come tante sono le persone che mi hanno accompagnato in questi tre anni di lavoro, di fatiche, e di spensierati momenti.

Il ringraziamento più sentito va alla mia famiglia e alla mia ragazza Silvia che mi hanno permesso, anche con qualche sacrificio, di proseguire negli studi e nella ricerca, arrivando a questo risultato.

Una doverosa riconoscenza a tutto l'istituto di Frutti-viticultura, nella persona dello Straordinario Direttore Stefano Poni, dove senza di lui tutto ciò non sarebbe accaduto, alla sempre presente e disponibile Silvia C., a Matteo, a Maria Giulia, Alessandra, Natalia, Maria Clara, all'aiuto esterno di Tito, il prof. Vercesi e il prof. Zamboni per l'importante contributo dimostratomi.

Un sentito presente anche per i miei compagni di avventura in terra spagnola e tedesca ed in particolare all'inseparabile amico Nicola, a Susanna, Johanna, Cristian, a Maria Paz, ed ai docenti H. R. Schultz, M. Stoll, J. Tardaguila.