



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA AMBIENTALE E PRODUZIONI VEGETALI

**Dottorato di ricerca in Viticoltura, Enologia e Marketing delle
imprese vitivinicole**

XX CICLO

BILANCI DI ENERGIA, ACQUA E CARBONIO DEL VIGNETO:

UN APPROCCIO MULTI - SCALA

Coordinatore: Prof. Giorgio Ponchia

Supervisore: Prof. Andrea Pitacco

Dottorando: Franco Meggio

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare in primo luogo il Prof. Andrea Pitacco per il supporto scientifico apportato allo sviluppo della ricerca e per la disponibilità e sincerità dimostratami. Ringrazio inoltre il Prof. Claudio Giulivo per il suo aiuto nell'impostazione del lavoro.

Un particolare ringraziamento va alla Azienda Agricola Fratelli Mercante nella persona dell'enologo Ivano Pezzuto, per aver messo a disposizione il sito di studio e per la disponibilità tecnica concessa.

Un altrettanto doveroso ringraziamento va al Progetto Vigne Alte finanziato dalla Regione Veneto e dal Progetto FISR CarboItaly che mi hanno sostenuto durante questi anni di dottorato.

Un sincero ringraziamento va a Laura che mi ha sempre appoggiato in questi anni di lavoro sopportando, spesso, gli intensi periodi di lavoro. Un sentito ringraziamento va alla mia famiglia e i miei cari che mi hanno sempre sostenuto fino in fondo.

INDICE

RIASSUNTO.....	7
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUZIONE	11
1.1 IL SISTEMA VIGNETO.....	12
1.2 PROCESSI FISIologici.....	15
1.2.1 <i>La fotosintesi</i>	15
1.2.1.1 Pigmenti fotosintetici.....	16
1.2.1.2 Il trasporto elettronico.....	18
1.2.1.3 Fissazione del carbonio.....	19
1.2.2 <i>La respirazione</i>	21
1.2.3 <i>Scambio gassoso</i>	22
1.2.3.1 Struttura e distribuzione degli stomi.....	24
1.3 BILANCIO DI ENERGIA E MATERIA – SCALA DI ECOSISTEMA.....	28
1.3.1 <i>Bilancio Energetico</i>	28
1.3.2 <i>Bilancio di materia ecosistemico</i>	32
1.3.3 <i>Ciclo del carbonio</i>	34
1.3.3.1 Misura del Bilancio ecosistemico del carbonio.....	36
1.3.3.2 Il carbonio del suolo.....	39
1.3.4 <i>Bilancio idrologico</i>	41
1.3.4.1 Stato idrico della pianta.....	43
1.3.4.2 Stima dell'evapotraspirazione nelle piante.....	44
1.4 TELERILEVAMENTO	49
1.5 PROCESSO DI SCALING.....	52
SCOPO DEL LAVORO	56
2 MATERIALI E METODI.....	58
2.1 DESCRIZIONE DELL'AREA DI RICERCA	58
2.1.1 <i>Varietà Carmenère</i>	60
2.1.1.1 Origine.....	61
2.1.1.2 Caratteristiche ampelografiche.....	61
2.1.1.3 Caratteristiche fenologiche e produttive.....	61
2.1.1.4 Selezione clonale	62
2.2 CARATTERIZZAZIONE PEDO-METEOROLOGICA	62
2.3 ANALISI DELLE CRESCITE E FENOLOGIA	65
2.3.1 <i>Misure di area fogliare</i>	68
2.3.2 <i>Peso fresco e volume grappolo</i>	71
2.3.3 <i>Misure di peso secco</i>	71
2.4 ANALISI DEGLI ASPORTI.....	72
2.5 CRESCITA DEL COTICO.....	73
2.6 BILANCIO DEL CARBONIO (CRESCITE/ASPORTI)	74
2.7 LA SCALA FOGLIARE	75
2.7.1 <i>Modelli biochimici delle reazioni fotosintetiche</i>	75
2.7.2 <i>Modello di fotosintesi di Farquhar</i>	80
2.7.3 <i>Attività sperimentali a scala fogliare</i>	86
2.7.4 <i>Protocollo di misura</i>	89
2.7.5 <i>Analisi e fitting dei dati</i>	91
2.7.5.1 Curve di luce (A/Q).....	91
2.7.5.2 Curve A/C _i	94
2.8 SCALA DI PARCELLA.....	98

2.8.1	<i>Cenni storici sui metodi aerodinamici di misura dei flussi di materia ed energia</i>	98
2.8.2	<i>Basi teoriche della tecnica dell'eddy covariance</i>	100
2.8.3	<i>Strumentazione per la misura dei flussi turbolenti</i>	105
2.8.4	<i>Anemometri ultrasonici</i>	106
2.8.5	<i>Analizzatori di gas all'infrarosso (IRGA)</i>	107
2.9	RESPIRAZIONE DEL SUOLO	109
2.10	SCALA DI VIGNETO – TELERILEVAMENTO	115
2.10.1	<i>Piattaforma satellitare MODIS</i>	115
3	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	122
3.1	ANDAMENTO METEOROLOGICO	122
3.1.1	<i>Regime termico-igrometrico: Annata 2006</i>	122
3.1.2	<i>Regime termico-igrometrico: Annata 2007</i>	123
3.1.3	<i>Confronto tra le annate 2006 e 2007</i>	124
3.2	MISURE BIOMETRICHE	130
3.2.1	<i>Analisi della struttura della chioma</i>	133
3.3	ACCUMULO E RIPARTIZIONE DELLA SOSTANZA SECCA	138
3.3.1	<i>Sviluppo fenologico</i>	138
3.3.2	<i>Crescite - scala di germoglio</i>	140
3.3.2.1	Lunghezza del germoglio	140
3.3.2.2	Numero di foglie	142
3.3.2.3	Sviluppo della superficie fogliare	144
3.3.2.4	Specific Leaf Area (SLA)	146
3.3.2.5	Carica produttiva fogliare	148
3.3.2.6	Ripartizione della sostanza secca	149
3.3.2.7	Crescita del grappolo	153
3.3.3	<i>Crescite e ripartizione – scala di vigneto</i>	154
3.3.3.1	Ripartizione del peso secco nel germoglio	154
3.3.3.2	Indice di Area fogliare (LAI)	157
3.3.3.3	Specific Leaf Area (SLA)	160
3.3.4	<i>Asportazioni – scala di vigneto</i>	161
3.3.4.1	Crescita del cotico	162
3.3.4.2	Crescita e asporti della vite	165
3.3.5	<i>Bilancio del Carbonio sul metro quadrato di vigneto</i>	168
3.4	LA SCALA FOGLIARE	172
3.4.1	<i>Risposta fotosintetica alla luce (Curve A/Q)</i>	172
3.4.2	<i>Risposta fotosintetica alla concentrazione di CO₂ (Curve A/C_i)</i>	178
3.4.2.1	Parametrizzazione del modello di Farquhar	179
3.5	LA SCALA DI PARCELLA	188
3.5.1	<i>Flussi di Energia</i>	188
3.5.1.1	Bilancio Radiativo	189
3.5.1.2	Bilancio Energetico	192
3.5.2	<i>Flussi di Materia</i>	196
3.5.3	<i>Bilancio del Carbonio</i>	200
3.5.4	<i>Bilancio Idrico</i>	203
3.5.5	<i>Respirazione del suolo</i>	206
3.5.5.1	Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura	208
3.6	TELERILEVAMENTO – SCALA DI VIGNETO	214
3.6.1	<i>Indice di Area Fogliare - LAI</i>	215
3.6.2	<i>Indici di Vegetazione Multispettrali</i>	216
3.6.3	<i>Misura della Fotosintesi – GPP; PSN</i>	217
	CONCLUSIONI	221
	BIBLIOGRAFIA	223

RIASSUNTO

La ricerca effettuata negli anni 2006 e 2007 ha riguardato lo studio degli andamenti dei processi fisiologici fondamentali in un vigneto del trevigiano di caratteristiche ideali per dimensione ed omogeneità. Il lavoro ha consentito una caratterizzazione analitica del bilancio energetico, idrico e del carbonio del vigneto.

Le misure sono state effettuate a diverse scale spaziali e temporali: dalla scala fogliare, alla scala di *canopy*, fino alla scala di intero vigneto. Le misure di scambio gassoso, effettuate a scala fogliare, hanno permesso di modellizzare il processo fotosintetico per studiarne la risposta alle diverse variabili ambientali come radiazione, temperatura, disponibilità idrica e concentrazione di CO₂. Il monitoraggio dei flussi di energia e di materia, effettuato mediante la tecnica micrometeorologica dell'*eddy covariance*, ha consentito la ripartizione del bilancio energetico, la misura dell'evapotraspirazione reale del vigneto e la quantificazione dello scambio netto di CO₂ dell'ecosistema. Per consentire la regionalizzazione di questi processi è stata valutata l'applicabilità del telerilevamento da satellite. Il vigneto è stato inoltre seguito attentamente per quanto riguarda la crescita e la ripartizione degli assimilati della vite mediante misure biometriche.

L'approccio multi - scala adottato ha permesso di confermare le misure di bilancio energetico e materia raggiungendo complessivamente un'ottima congruenza e di raccogliere un dataset unico per lo studio stagionale del bilancio del carbonio del vigneto. Il bilancio del carbonio misurato alle diverse scale ha permesso di dimostrare

che il vigneto è in grado di fissare una notevole quantità di carbonio in forma stabile ($\sim 850 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$). Contrariamente a quanto ritenuto fino ad oggi per la gran parte delle colture agrarie, alla luce dei risultati ottenuti, la vite può essere considerata un *sink* significativo di carbonio.

ABSTRACT

The research, carried out in 2006 and 2007, concerned the dynamics of the key physiological processes in a vineyard of the Venetian Region, chosen for its ideal size and homogeneity. The study allowed a detailed characterization of the energy, hydrological and carbon budget of the vineyard.

The measurements have been conducted at different spatial and temporal scales, from the leaf, to the canopy, and up to whole the vineyard. The measurements at leaf scale permitted the parameterization of the Farquhar model of photosynthesis to interpret the physiological response of the leaf to the different environmental variables, including temperature, water status and CO₂ concentration of the atmosphere. The continuous monitoring of energy and mass fluxes, performed during the two years using the eddy covariance micrometeorological technique, has been used to assess the energy balance, the actual evapotranspiration, and the Net Ecosystem Exchange (NEE) of the vineyard at the plot scale. A further up-scaling has been carried out using remote sensing techniques, in order to study the possibility of regionalization of the physiological processes measured at lower scales. Detailed biometrical measurements were collected during the 2006 and 2007 growing seasons, to compare the trend of growths and carbon allocation in the different parts of the vineyard and validate the overall budget.

The adopted multi - scale approach allowed to collect unique dataset, useful to get a clear picture of the energy balance, mass exchange, and growth processes of the

vineyard, and a good agreement between the different scales explored was achieved. The carbon budget, assessed and cross-validated at different scales, underlines the role of the vineyard as a possible sink of CO₂ ($\sim 850 \text{ g C m}^{-2} \text{ year}^{-1}$), in contrast with most of agricultural crops. A positive sink activity of the vineyard, even taking into account the harvested dry matter, can add a further environmental value to Viticulture.

1 INTRODUZIONE

Nella viticoltura mondiale attualmente prevale l'indirizzo verso la qualità, con la rinuncia alle alte produzioni, l'impiego di varietà nobili, internazionali e autoctone o tradizionali. Accanto al perseguimento della qualità non sono meno importanti gli aspetti economici che stanno alla base della necessità di ridurre i costi di produzione.

Per l'ottenimento di produzioni quantitativamente e qualitativamente ottimali è di grande importanza una gestione dell'ecosistema viticolo appropriato in relazione agli obiettivi prefissi. Le tecniche colturali sono basilari per una gestione razionale del vigneto e devono sottendere al raggiungimento dei massimi livelli di espressione delle potenzialità del vitigno e del *terroir*, attraverso uno sfruttamento efficiente delle risorse ambientali.

La richiesta da parte del mercato di prodotti sempre più pregevoli e la necessità di ottenere produzioni ottimali senza oscillazioni stagionali hanno portato a riconsiderare l'irrigazione come una tecnologia utile anche in viticoltura, solamente se ben utilizzata. In questo contesto si sono sviluppate alcune strategie di gestione idrica del vigneto, come il Deficit Idrico Controllato (RDI) e la Disidratazione Parziale della zona Radicale (PRD), in grado di migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua. Queste tecniche permettono di regolare il rapporto tra lo sviluppo vegetativo e riproduttivo della vite che è considerato la chiave per il miglioramento della qualità. Questo perché l'eccesso di vigore vegetativo può influenzare negativamente la composizione della bacca attraverso

fenomeni di competizione. È possibile utilizzare queste tipologie di irrigazione solamente avendo ben chiari i meccanismi fisiologici di risposta al deficit idrico e grazie alla diffusione di sistemi a goccia ed altre forme di microirrigazione, in grado di modulare con precisione l'apporto di acqua, sia attraverso una sua localizzazione che una distribuzione temporalmente e quantitativamente controllata.

Tutto ciò non può prescindere dall'evidenza che l'acqua sarà un bene sempre più limitato per la collettività ed il suo utilizzo sarà sempre più indirizzato verso gli usi sociali, rendendo necessario da un lato l'attivazione della ricerca verso l'individuazione di soluzioni alternative e al selezionamento di genotipi resistenti alla siccità, dall'altro l'investimento sulle tecnologie, la ristrutturazione degli impianti e l'acquisizione di nuove conoscenze per gestire al meglio tale risorsa ed aumentarne l'efficienza di utilizzo.

1.1 IL SISTEMA VIGNETO

Dal punto di vista ecofisiologico la vegetazione va considerata come una delle componenti di un sistema ecologico che comprende anche il suolo e l'atmosfera, nel quale avvengono complessi scambi di materia e di energia.

Il vigneto è un sistema complesso in cui le piante catturano, trasferiscono e perdono energia e sostanze nutritive, producendo sostanza secca. La funzionalità dei sistemi coltivati può essere, quindi, descritta in termini di input, output, e cambiamenti di contenuto all'interno dei sistemi stessi. Agli input primari, forniti dall'ambiente, e che comprendono acqua, anidride carbonica, elementi nutritivi, radiazione solare, si

sommano quelli introdotti nel sistema per scopi produttivi attraverso le pratiche di coltivazione quali la manipolazione dell'architettura (forma di allevamento, potatura, portinnesto), della fisiologia (irrigazione, concimazione) e dello stato sanitario (trattamenti). Gli output includono, oltre al prodotto finale direttamente fruibile, l'acqua traspirata, le sostanze organiche volatili emesse, i nutrienti percolati o dilavati.

La vegetazione cresce all'interfaccia tra l'atmosfera e il terreno, e i flussi in questo continuum sono regolati dalle interazioni pianta-suolo e pianta-atmosfera. In particolare, la struttura della chioma (e quindi la combinazione vitigno-portinnesto-forma di allevamento) ha un'influenza primaria sui rapporti pianta-ambiente, in quanto germogli, rami, foglie intercettano, riflettono, assorbono la radiazione e determinano le proprietà aerodinamiche di ogni particolare impianto. L'attività fisiologica influisce sulla partizione dell'energia netta a disposizione in quote destinate alla traspirazione dell'acqua e al riscaldamento dell'aria e del terreno regolando lo scambio netto di materia ed energia tra il vigneto e l'atmosfera.

I principali elementi strutturali della vegetazione, interessati dai flussi energetici (radiazione solare, radiazione infrarossa termica) e da scambi di materia (biossido di carbonio, acqua), sono le superfici fogliari. La conversione dell'energia solare in energia chimica e l'organizzazione del carbonio, che permettono la crescita delle piante superiori, avvengono infatti nei tessuti fogliari attraverso complesse reazioni biochimiche, che sostengono in ultima analisi la vita sulla Terra (ODUM, 1988).

In natura è possibile identificare forme molto diverse di organizzazione strutturale della vegetazione; nelle comunità erbacee le foglie costituiscono gran parte della sostanza epigea mentre nella vegetazione arbustiva ed arborea la componente legnosa assume una importanza crescente. Le piante arboree si distinguono inoltre in latifoglie e conifere; le prime presentano generalmente foglie decidue, a lamina ampia e sottile, particolarmente idonee agli scambi gassosi con l'atmosfera. Le conifere hanno normalmente foglie aghiformi caratterizzate da un ciclo pluriennale e da resistenze molto più elevate agli scambi gassosi rispetto alle latifoglie.

Comprendere come e quanto la specie e la tipologia della chioma condizioni gli scambi con l'atmosfera circostante è di grande importanza per la messa a punto di modelli di produttività, ma anche per la caratterizzazione della funzione di mitigazione delle diverse superfici coltivate nei confronti dei gas serra, possibili responsabili dei cambiamenti climatici. È infatti sempre più riconosciuto il ruolo delle diverse componenti della biosfera terrestre sui cambiamenti climatici, includendo gli effetti di retroazione (feedback) sul clima, sulla composizione dell'atmosfera, sul bilancio dei gas-serra, CO₂ in particolare (BROWN & ARNOLD, 1998; PIELKE ET AL., 1998; BETTS, 2001).

1.2 PROCESSI FISIOLÓGICI

I principali processi fisiologici che avvengono nelle piante sono la fotosintesi, ovvero la conversione del biossido di carbonio e dell'acqua in carboidrati attraverso la trasformazione dell'energia solare in energia chimica, e la reazione opposta quella di respirazione.

Si ritiene che virtualmente tutto l'O₂ presente nell'atmosfera sia stato generato attraverso il processo di fotosintesi (ODUM, 1988). Ovviamente tutti gli organismi che respirano (incluse le piante) utilizzano l'ossigeno atmosferico e rilasciano CO₂. Quindi fotosintesi e respirazione sono interconnesse, in quanto ciascun processo dipende dai prodotti dell'altro.

L'acqua ed i sali minerali vengono assunti dal suolo attraverso l'apparato radicale e vengono trasportati fino alle foglie attraverso il sistema xilematico. Gran parte dell'acqua assorbita viene traspirata a livello fogliare attraverso delle speciali aperture, dette stomi, mentre i sali minerali vengono utilizzati nella costruzione di complesse molecole organiche. In caso di scarsa disponibilità idrica gli stomi vengono chiusi; questo comporta automaticamente anche una riduzione dell'attività fotosintetica per mancanza di CO₂.

1.2.1 La fotosintesi

La fotosintesi è probabilmente il processo biologico che ha maggiormente condizionato la vita sulla Terra. Liberando O₂ e consumando CO₂ la fotosintesi degli organismi autotrofi ha infatti trasformato la biosfera in un ambiente ospitale per la vita.

La quantità complessiva di CO₂ fissata dalle piante in condizioni ottimali di crescita è limitata primariamente dalla quantità di CO₂ disponibile. L'aumento della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera porta quindi ad una maggiore assimilazione delle piante in ambienti dove l'anidride carbonica ne limita la crescita. Questo è solitamente il caso degli ecosistemi agricoli, dove i nutrienti e la disponibilità di acqua non sono fattori limitanti. Tuttavia anche in condizioni naturali, dove fattori diversi dalla concentrazione della CO₂ generalmente limitano la crescita delle piante, è stato trovato che la produttività vegetale spesso cresce all'aumentare della concentrazione di CO₂.

Poiché la fotosintesi è in grado di alterare la composizione dell'atmosfera, sottraendo biossido di carbonio e rilasciando ossigeno, lo studio dei processi che controllano l'assimilazione degli organismi autotrofi è di vitale importanza per comprendere il ciclo planetario del carbonio.

1.2.1.1 Pigmenti fotosintetici

La fotosintesi viene effettuata da organismi diversi, dai batteri alle piante; la forma di fotosintesi maggiormente conosciuta è quella che avviene nelle piante superiori e nelle alghe, così come nei cianobatteri e loro simili, responsabili della maggior parte della attività fotosintetica negli oceani. Tutti questi organismi convertono il biossido di carbonio in sostanze organiche, riducendo attraverso una complessa serie di reazioni, il gas in carboidrati.

Gli elettroni per questa reazione di riduzione provengono dall'acqua che, grazie al contributo energetico fornito dalla radiazione solare (*fotolisi dell'acqua*) intercettata

dai pigmenti fotosintetici (principalmente clorofilla e carotenoidi), viene convertita in ossigeno e protoni.

I pigmenti fotosintetici sono generalmente legati a delle proteine, che conferiscono alle molecole di pigmento una appropriata orientazione e posizione reciproca. L'energia luminosa viene assorbita dai singoli pigmenti, i quali la trasferiscono alle clorofilla che si trovano all'interno di speciali strutture proteiche dove l'energia luminosa viene utilizzata per trasferire un elettrone. I pigmenti e le proteine coinvolte nell'effettivo evento di trasporto primario dell'elettrone sono chiamati *centri di reazione*.

Un elevato numero di molecole di pigmento (100-5000), collettivamente denominate *complesso antenna*, raccolgono l'energia radiativa e la trasportano allo stesso centro di reazione, con lo scopo di mantenere, anche a basse intensità luminose, una elevata velocità di trasferimento degli elettroni nei centri di reazione.

In molti sistemi la grandezza dell'antenna è variabile e negli organismi che crescono in condizioni di poca luce, hanno un numero maggiore di pigmenti antenna per centro di reazione rispetto a quelli che crescono in zone con maggiore irradiazione (es. foglie di luce e foglie di ombra). Ad elevata intensità luminosa la quantità di luce assorbita dalle piante può superare la capacità di trasferimento elettronico garantita dai centri di reazione. Per ovviare a questo, le piante hanno sviluppato dei processi di conversione dell'energia luminosa in calore. Tuttavia il trasporto elettronico nelle piante è abbastanza sensibile all'eccessiva radiazione e parte della catena del trasporto deve

essere disattivata in condizioni di irradiazione troppo elevata, fenomeno noto come *fotoinibizione*.

1.2.1.2 Il trasporto elettronico

La reazione iniziale del trasporto elettronico, ossia la separazione delle cariche nel centro di reazione fotosintetico, mette in moto una lunga serie di reazioni di ossido-riduzione (*red-ox*) che fanno passare l'elettrone lungo una catena di cofattori e riempiono così i "buchi elettronici" nella clorofilla. Tutti gli organismi fotosintetici che producono ossigeno hanno due tipi di centri di reazione chiamati fotosistema II e fotosistema I (PSII; PSI). Entrambi sono complessi pigmento/proteina localizzati in membrane specializzate chiamati tilacoidi. Negli eucarioti, piante ed alghe, questi tilacoidi sono localizzati in cloroplasti e spesso si trovano in pile di membrane dette grana.

Tutta la clorofilla negli organismi ossigenici è localizzata ed associata ai PSII, PSI, oppure a proteine antenna che alimentano questi fotosistemi. Il PSII è il complesso dove la molecola di acqua viene divisa (fotolisi) con liberazione di ossigeno. Riguardo all'ossidazione della clorofilla nel centro di reazione del PSII un elettrone si libera dal vicino aminoacido (tirosina) che è parte della proteina circostante, il quale a sua volta prende un elettrone dal complesso di separazione dell'acqua. Dal centro di reazione del PSII, l'elettrone passa a molecole trasportatrici di elettroni libere (plastoquinoni) nella membrana tilacoidale, e da qui ad altri complessi proteici membranali, il complesso citocromo b_6f .

L'altro fotosistema, PSI, catalizza una separazione di cariche indotta dalla luce in maniera essenzialmente simile al PSII: la luce viene raccolta da una antenna e l'energia luminosa è trasferita al centro di reazione della clorofilla, dove ha inizio la separazione delle cariche indotta dalla luce. Tuttavia nel PSI gli elettroni sono alla fine trasferiti al NADP (nicotinammide adenosin dinucleotide fosfato), la cui forma ridotta (NADPH) può essere utilizzata nella fissazione del carbonio. La molecola di clorofilla ossidata del centro di reazione riceve infine un altro elettrone dal complesso del citocromo b_6f . Pertanto il trasporto elettronico attraverso i foto sistemi PSII e PSI comporta l'ossidazione della molecola d'acqua (produzione di O_2) e riduzione del NADP, grazie all'utilizzo per questi processi dell'energia luminosa (due quanti per ciascun elettrone trasportato attraverso l'intera catena) ed è chiamato, per questo, *fase luminosa* della fotosintesi.

1.2.1.3 Fissazione del carbonio

Il flusso di elettroni dall'acqua al NADP richiede radiazione solare ed è accoppiato alla generazione di un gradiente protonico attraverso la membrana del tilacoide. Questo gradiente di protoni viene utilizzato per la sintesi di ATP (Adenosin Trifosfato), una molecola altamente energetica. L'ATP ed il NADPH vengono infine utilizzati nella fissazione del carbonio in un processo indipendente dalla luce (*fase oscura* della fotosintesi). La fissazione della CO_2 include una serie di reazioni note come ciclo di Calvin-Benson. La reazione iniziale di fissazione della CO_2 coinvolge l'enzima ribulosio-1.5-bifosfato carbossilasi/ossigenasi (RuBisCo) che può reagire o con l'ossigeno (portando al processo chiamato fotorespirazione, che non conduce alla

fissazione di CO_2) oppure con il biossido di carbonio. La probabilità con cui la Rubisco reagisce con l'uno o con l'altro dipende dalla concentrazione relativa delle due molecole nel sito di reazione.

In tutti gli organismi la CO_2 è di gran lunga il substrato preferito dall'enzima, ma quando la sua concentrazione è di molto inferiore a quella dell'ossigeno, la fotorespirazione avviene ad un livello significativo.

Le piante C_3 , partendo dal ribulosio bi-fosfato (RuBP) e utilizzando l'enzima ribulosio bi-fosfato carbossilasi-ossigenasi (Rubisco) per la fissazione primaria della CO_2 nel cloroplasto, formano acido 3-fosfoglicerico (PGA) che è poi convertito in trioso fosfato usando ATP e NADPH. Molti dei triosi fosfati prendono poi parte ad una complessa sequenza di reazioni (ciclo di Calvin), che richiedono ulteriore ATP per generare il substrato iniziale della reazione di carbossilazione (RuBP). Una parte dei triosi è inoltre convertita in zuccheri fosfati (fruttosio-1.6-bifosfato) e altri zuccheri. Questo ciclo richiede 3 mol ATP e 2 mol NADPH per molecola di CO_2 convertita in zucchero fosfato e avviene nelle cellule del mesofillo.

È la principale sequenza biochimica delle specie che vivono in climi freddi, temperati e umidi ed è l'unica riscontrata nelle piante, con rarissime eccezioni, e nelle piante inferiori. La maggior parte delle piante da raccolto, come cereali, leguminose e colture da radice, utilizzano la via C_3 .

1.2.2 La respirazione

Gran parte delle reazioni metaboliche che riguardano la respirazione mitocondriale (o *respirazione al buio*) avvengono in piccoli organelli citoplasmatici detti mitocondri, che si trovano all'interno delle cellule eucariote sia animali che vegetali. La respirazione mitocondriale è un processo che avviene in 3 fasi e porta alla ossidazione degli zuccheri con generazione di CO_2 , ATP, calore ed acqua. In fisiologia vegetale questo tipo di respirazione è definita “*mitocondriale*” per distinguerla dalla “*fotorespirazione*” che invece è un meccanismo di protezione dei sistemi fotosintetici in condizioni di irradiazione troppo elevata.

Ci sono diverse differenze fisiologiche importanti tra la fotorespirazione e la respirazione oscura. La vera fotorespirazione è obbligatoriamente legata al ciclo di Calvin per la generazione del suo substrato (RuBP), quindi avviene solo nelle cellule fotosintetiche alla luce. La respirazione oscura invece ha luogo in tutte le cellule, sia alla luce che in ombra. Il termine respirazione luminosa può essere usato riferendosi alla totale produzione di CO_2 delle foglie tramite fotorespirazione e respirazione oscura alla luce. La fotorespirazione è, inoltre, influenzata dalla concentrazione di CO_2 e O_2 , a causa della natura competitiva dell'ossigenazione nei confronti della carbossilazione di RuBP. Incrementi nella concentrazione di CO_2 aumentano la proporzione di RuBP che viene carbossilata (e quindi anche la fotosintesi netta aumenta), ma incrementi della concentrazione di O_2 aumentano l'attività ossigenasica e quindi la quantità di carbonio perso con la fotorespirazione. Al contrario la respirazione oscura non è condizionata da concentrazioni di CO_2 o di O_2 , fino ad un eccesso di 2-3%.

La respirazione oscura è spesso suddivisa in respirazione di sviluppo e una di mantenimento: la prima fornisce l'energia per lo sviluppo e la sintesi di nuove cellule, l'altra è usata per il mantenimento della struttura cellulare esistente. Benché non possano esserci distinzioni biochimiche tra queste due componenti, si assume che la respirazione di mantenimento sia proporzionale al peso secco e sensibile alla temperatura, mentre la respirazione di sviluppo sia direttamente dipendente dalla fotosintesi e meno sensibile alla temperatura.

Le funzioni della fotorespirazione sono ancora piuttosto controverse: l'ipotesi più accreditata è che la fotorespirazione serva per disperdere l'eccesso di riducenti prodotti in condizioni di elevata irradiazione ma di basso potenziale di fissazione di CO_2 , come ad esempio in situazioni di stress idrico quando gli stomi sono chiusi, evitando così il danneggiamento degli apparati fotosintetici.

Tipicamente più del 30% degli zuccheri generati nel processo fotosintetico vengono persi per respirazione. La respirazione mitocondriale utilizza circa il 40% dell'energia totale contenuta nelle molecole di glucosio, con una resa di 32-36 moli di ATP per mole di glucosio.

1.2.3 Scambio gassoso

Le piante terrestri devono affrontare il dilemma di assorbire CO_2 dall'atmosfera e contemporaneamente limitare la perdita di acqua. Questo problema è complesso, poiché il gradiente di concentrazione per l'assorbimento della CO_2 è molto più piccolo del gradiente di concentrazione che porta alla perdita di acqua. La soluzione al problema è la

regolazione stomatica, che permette alla pianta di assorbire CO₂ durante il giorno e di risparmiare acqua di notte, quando non vi è fotosintesi e quindi richiesta di CO₂.

I processi di diffusione della CO₂ verso l'interno e la traspirazione del vapore d'H₂O verso l'esterno sono regolati dagli stomi. La variazione dell'apertura stomatica può anche essere indotta da carenza idrica o da tassi traspiratori eccessivamente elevati, durante l'arco della giornata.

La diffusione di una sostanza X (es. la CO₂) attraverso una barriera permeabile (es. foglia) può essere descritta dalla legge di Fick:

$$Flusso = \frac{[X_0] - [X_i]}{r_s} = ([X_0] - [X_i]) * g_s \quad [eq. 1]$$

dove [X₀]-[X_i] rappresenta il gradiente di concentrazione di x fuori e dentro la barriera; *r* è la resistenza della barriera alla diffusione; *g* è la conduttanza della barriera (la sua permeabilità). Applicando la legge di Fick [eq. 1] all'assimilazione del carbonio si ottiene:

$$A_n = \frac{c_a - c_i}{r_s} = (c_a - c_i) * g_s \quad [eq. 2]$$

secondo cui l'assimilazione netta di CO₂ (*A_n*) è determinata dal gradiente tra la concentrazione di CO₂ fuori (*c_a*) e dentro (*c_i*) alla foglia diviso la resistenza (*r_s*) o per la conduttanza stomatica (*g_s*) della foglia nei confronti della CO₂.

La resistenza stomatica (*r_s*) è l'ultimo fattore che controlla il flusso idrico nel *continuum* suolo-pianta-atmosfera, ed è regolata dalle cellule di guardia che circondano

la rima stomatica. Queste funzionano come valvole idrauliche e sono sensibili a molti fattori come l'intensità e la qualità della luce, la temperatura, l'umidità relativa, e le concentrazioni intercellulari di CO₂. Quando il flusso traspiratorio è elevato, il tasso di assorbimento radicale può non essere sufficiente per rimpiazzare le perdite di acqua, soprattutto quando le disponibilità idriche del suolo si riducono. Una delle risposte che la pianta può mettere in atto nel breve periodo è la regolazione della chiusura stomatica, che provoca un innalzamento di r_s .

I cambiamenti di g_s sono particolarmente sensibili al deficit idrico in molte piante, e possono potenzialmente essere un buon indicatore della necessità di irrigazione (JONES, 2004). Il tipo di regolazione stomatica della vite in risposta a stress idrici rende g_s un indicatore più preciso rispetto ai comuni parametri utilizzati (CIFRE ET AL., 2005).

Nella vite, g_s da 0.5-0.7 a 0.15 mol H₂O m⁻²s⁻¹ indicano un lieve stress idrico, valori da 0.15 a 0.05 mol H₂O m⁻²s⁻¹ un moderato stress e valori inferiori a 0,05 mol H₂O m⁻²s⁻¹ un forte stress (CIFRE ET AL., 2005).

1.2.3.1 Struttura e distribuzione degli stomi

Benché quando totalmente aperti gli stomi occupino solamente tra lo 0.5 e il 5% della superficie fogliare, quasi tutta l'acqua traspirata dalle piante, così come la CO₂ assorbita durante la fotosintesi, passa attraverso questi pori. Il ruolo centrale degli stomi consiste nella regolazione dello scambio di H₂O, O₂ e CO₂ a livello fogliare.

Lo schema di costruzione di uno stoma è assai semplice: è formato da due cellule epidermiche specializzate affiancate l'una all'altra, dette cellule di guardia, che

delimitano una cavità situata tra di loro, detta apertura o rima stomatica. Talvolta alle due cellule di guardia sono associate due altre cellule, dette cellule annesse o compagne. L'apertura stomatica è in comunicazione con un ampio spazio intercellulare ad essa sottostante, detto camera sottostomatica, che comunica a sua volta con il sistema di spazi intercellulari del mesofillo fogliare.

Sebbene siano presenti soprattutto sulle foglie, gli stomi possono anche trovarsi in altri tessuti verdi, come fusti, frutti e parti di infiorescenze. Tendono ad essere più frequenti sulla pagina inferiore delle foglie, come nel caso del genere *Vitis*, dove gli stomi sono presenti sulla pagina superiore esclusivamente lungo la nervatura principale, mentre in molte specie sono unicamente sulla pagina inferiore.

Le foglie che presentano gli stomi su entrambe le pagine fogliari sono chiamate anfistomatiche, mentre quelle con stomi solo sulla pagina inferiore sono dette ipostomatiche. La frequenza e la dimensione degli stomi varia da specie a specie ed è inoltre influenzata dalla posizione della foglia e dalle condizioni di sviluppo; in *Vitis vinifera* possono essere da 100 a 230 per mm^2 e ancora più numerosi nelle specie americane.

Per traspirazione si intende il processo attraverso il quale la pianta a livello della foglia cede H_2O all'atmosfera. Può avvenire secondo due differenti vie: traspirazione cuticolare e traspirazione stomatica. La traspirazione cuticolare consiste nella fuoriuscita di vapore acqueo attraverso la cuticola, che non è mai completamente impermeabile ai gas: avviene sia di giorno che di notte e dipende dalle condizioni dell'atmosfera, dal

grado di cutinizzazione dell'epidermide e dalla sua idratazione. Questo tipo di traspirazione può essere regolata solo parzialmente dalla pianta. A differenza di quella cuticolare, la traspirazione stomatica avviene con la fuoriuscita di vapore acqueo attraverso gli stomi. L'acqua, evaporando, passa dalle pareti cellulari agli spazi intercellulari, da dove, attraverso la cavità sottostomatica e l'apertura stomatica, fuoriesce all'esterno.

Nella vite, come nella maggior parte delle specie, la traspirazione stomatica avviene alla luce. Durante la giornata l'intensità della traspirazione varia notevolmente. Di notte la traspirazione è generalmente molto bassa, essendo limitata a quella cuticolare, al sorgere del sole essa aumenta rapidamente e, dopo aver raggiunto un massimo nelle ore centrali del giorno, decresce fino al calare del sole riportandosi nuovamente su valori molto bassi.

Tra i fattori ambientali la radiazione, la temperatura, l'umidità relativa (UR) dell'aria, la velocità del vento e la disponibilità idrica svolgono un ruolo importante nel determinare l'intensità della traspirazione. Se l'acqua non costituisce un fattore limitante, la traspirazione aumenta all'aumentare della temperatura, almeno fino a che questa non supera valori critici.

L'umidità relativa dell'aria ha un effetto diverso a seconda dello stato di idratazione della pianta; in generale si può affermare che, a parità degli altri fattori, una riduzione dell'umidità determina una diminuzione della traspirazione. In condizioni di

carezza idrica, però, un aumento dell'umidità può permettere l'apertura parziale degli stomi e quindi portare ad una ripresa della traspirazione.

L'azione del vento si esplica a livello dello strato limite (*boundary layer*), definito come lo strato d'aria immediatamente adiacente alla foglia che risente della presenza della foglia stessa; lo spessore del *boundary layer* dipende dalla velocità del vento e dalla dimensione della foglia. Il flusso d'aria in prossimità della foglia, passando da turbolento a laminare, riduce la diffusione dei gas e crea una resistenza (r_{bl}). Il vento riduce lo spessore dello strato limite e, quindi, la resistenza alla diffusione.

In generale la traspirazione aumenta con l'aumentare della velocità del vento fino ad una certa intensità, al di sopra della quale, per la parziale disidratazione delle foglie, gli stomi si chiudono e perciò la traspirazione non aumenta ulteriormente o diminuisce leggermente.

La disponibilità di acqua nel terreno ha un effetto molto rilevante sulla traspirazione: quando la pianta dispone liberamente di acqua la traspirazione raggiunge la massima intensità compatibile con le caratteristiche genetiche della pianta e con le condizioni climatiche; man mano che l'acqua facilmente disponibile per l'assorbimento radicale diminuisce, la traspirazione viene ridotta.

Altri fattori possono influenzare la velocità della traspirazione come, ad esempio, le caratteristiche morfologiche, anatomiche e funzionali della pianta, la forma di allevamento e lo sviluppo della chioma.

1.3 BILANCIO DI ENERGIA E MATERIA – SCALA DI ECOSISTEMA

La biosfera è un sistema termodinamicamente aperto rispetto all'energia, ma è un sistema chiuso per quanto riguarda la materia: se si escludono gli apporti eccezionali dei meteoriti e le rare reazioni nucleari, la quantità degli elementi chimici presenti sul nostro pianeta non varia nel tempo. Tuttavia gli elementi non sono in una situazione statica; essi cambiano continuamente posizione, fase chimica e combinazione. Il riciclo degli elementi rende i sali nutrienti continuamente disponibili ai produttori primari e rende così possibile il mantenimento della vita sulla Terra. Il ciclo degli elementi previene anche il loro accumulo in forme, quantità e collocazioni spaziali che sarebbero deleterie per gli organismi. D'altra parte sono gli organismi viventi stessi che esercitano un'influenza fondamentale sui flussi degli elementi sulla terra; la stragrande maggioranza delle reazioni chimiche che avvengono sulla crosta terrestre sono in qualche maniera affette dai biota su di essa presenti.

La materia vivente è per lo più costituita da acqua. Il resto è principalmente costituito da composti del carbonio ed è in questi composti che l'energia viene accumulata e immagazzinata. Abbiamo già visto come flussi di energia e flussi di materia (CO_2 , H_2O , O_2) sono strettamente legati nei processi di fotosintesi e respirazione

1.3.1 Bilancio Energetico

Il bilancio d'energia esprime la conservazione dell'energia per un fissato volume di controllo. Ad esempio, considerando un sistema semplificato delimitato superiormente dalla superficie del terreno, cosicché, per un'area unitaria, il bilancio d'energia si può scrivere:

$$G = R_S^\downarrow * (1 - \alpha) + R_L^\downarrow - R_L^\uparrow - H - \lambda E \quad [\text{eq. 3}]$$

dove: G è la capacità termica dello strato di terreno che si può assumere interagire con l'atmosfera; $R_S^\downarrow$ è il flusso radiativo in onda corta incidente sulla superficie; α è l'albedo del sistema, ovvero la frazione di radiazione solare riflessa verso l'esterno; $R_L^\downarrow$ è il flusso radiativo in onda lunga emesso dall'atmosfera verso la superficie; $R_L^\uparrow$ è il flusso radiativo in onda lunga emesso dalla superficie; H è il flusso turbolento di calore sensibile uscente dalla superficie; E è l'evapotraspirazione; λ è il calore latente di vaporizzazione ($\lambda = 2.25 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ a 10°C , ma debolmente dipendente dalla temperatura).

Si discutono ora i termini che compaiono nell'equazione di bilancio dell'energia [eq. 3].

1.3.1.1.1 La radiazione in onda corta

Si è visto come la radiazione solare dipenda, oltre che dalla radiazione incidente alla sommità dell'atmosfera, anche dalla composizione (principalmente il contenuto di vapor d'acqua ed altri gas radiativamente attivi) dell'atmosfera. Assumendo che per una data località e per condizioni di riferimento il flusso di radiazione solare incidente sulla superficie $R_L^\downarrow$ sia fissato, parte del flusso incidente viene riflesso dalla superficie in proporzione all'albedo della superficie stessa, cosicché la radiazione solare netta assorbita dal suolo è $R_L^\downarrow * (1 - \alpha)$.

L'albedo (α) è una caratteristica del tipo di superficie e varia approssimativamente tra 0.05-0.15 per una zona boschiva e 0.75-0.90 per una superficie

coperta da neve fresca. Anche questo parametro può considerarsi fissato per una certa località e periodo di riferimento.

1.3.1.1.2 La radiazione in onda lunga (IR termico)

L'atmosfera, in virtù del proprio stato termico, emette radiazione in onda lunga che contribuisce al riscaldamento della superficie. Il flusso $R_L^\downarrow$ dipende dallo stato termico e dalla composizione dell'atmosfera ma può assumersi entro scale temporali sufficientemente piccole, costante per una certa località e situazione di riferimento.

Il flusso radiativo emesso dalla superficie del suolo, con temperatura pari a T_s , può essere espresso attraverso la legge di Stefan-Boltzmann, assumendo un'emissività unitaria ($\varepsilon = 1$):

$$R_L^\uparrow = \sigma T_s^4 \quad [\text{eq. 4}]$$

Il flusso emesso dipende dunque, nel modello introdotto, unicamente dalla temperatura che rappresenta lo stato termico del suolo.

1.3.1.1.3 Flussi di calore

In prima approssimazione, il flusso di calore sensibile (H) dalla superficie verso l'atmosfera può essere espresso nel modo seguente:

$$H = \frac{c_p \rho}{r_a} (T_s - T_a) \quad [\text{eq. 5}]$$

dove c_p è il calore specifico dell'aria a pressione costante; ρ la sua densità; r_a una resistenza, che esprime la resistenza opposta al trasporto turbolento di calore; T_a è la

temperatura rappresentativa dello stato termico dell'atmosfera e T_s è la temperatura della superficie. La [eq. 5] esprime che il flusso turbolento di calore deve dipendere dal gradiente termico tra la superficie e lo strato più basso dell'atmosfera.

Analogamente, un'approssimazione di ordine zero per il flusso di calore legato all'evapotraspirazione può essere:

$$\lambda E = \frac{\rho \lambda}{r_a + r_c} (q^*(T_s) - q_a) \quad [\text{eq. 6}]$$

dove r_c esprime la resistenza all'evaporazione esercitata dal suolo e dalla vegetazione (parametro analogo al termine r_a), $q^*(T_s)$ è l'umidità specifica di saturazione (si assume, in sostanza, che il vapore all'interno dei pori del terreno, come negli stomi delle foglie sia in equilibrio con la fase liquida) corrispondente alla temperatura superficiale (ottenibile dalla relazione di Clausius-Clapeyron).

Quando il suolo o la vegetazione esercitano una restrizione all'evapotraspirazione per carenza di acqua nel suolo ($r_c > r_a$), il trasporto turbolento di calore diviene il meccanismo più efficiente. Se, infine, la turbolenza viene soppressa ($r_a \rightarrow \infty$), il trasporto convettivo diviene poco efficiente ed il meccanismo radiativo diventa dominante.

Se consideriamo la forma semplificata del bilancio energetico (trascurando i termini minori come G) è importante osservare che il rapporto tra il bilancio energetico ed il bilancio di materia, che possiamo assumere essere dettato dalla seguente relazione:

$$R = H + \lambda E \quad [\text{eq. 7}]$$

non è mai una rapporto costante, ma soprattutto esiste una complementarità tra il flusso di calore sensibile (H) ed il flusso di calore latente (λE). Se c'è disponibilità di H_2O allora prevale λE , ($R \cong \lambda E$), che può arrivare ad assorbire anche il 100% dell'energia del sistema con beneficio alla vegetazione che non si riscalda (è infatti curando la tecnica irrigua che si tenta di escludere H). Se, invece, la disponibilità di acqua è scarsa, tutta l'energia dovrà essere dissipata dal sistema per riscaldamento ($R \cong H$). Cioè l'oggetto si scalderà fino alla creazione del gradiente di T tale da scaricare l'energia che sta assorbendo fuori dal sistema.

1.3.2 Bilancio di materia ecosistemico

A livello planetario l'acqua e il carbonio danno origine ai due cicli biogeochimici più importanti per la vita sul pianeta. Entrambi i cicli sono caratterizzati da quantità relativamente modeste di materia in atmosfera, ma altamente vulnerabili alle perturbazioni antropiche ed in grado di indurre variazioni nella climatologia.

Le caratteristiche strutturali della vegetazione ne condizionano fortemente i processi biochimici e fisici e le interazioni con l'atmosfera e il suolo. Con riferimento al ciclo del carbonio e dell'acqua, le piante erbacee sono in grado di sostenere degli scambi molto elevati ma non hanno la possibilità di immagazzinare carbonio nei tessuti legnosi come fanno le piante arboree. Tra gli alberi, le piante decidue sono caratterizzate da una stagione vegetativa breve; le sempreverdi al contrario, a fronte di un maggiore investimento in carbonio nelle superfici fogliari, riescono a mantenere una stagione vegetativa più lunga, in particolare nei climi difficili.

Prima di procedere ad una analisi del bilancio del carbonio e dell'acqua, è importante considerare che fisiologicamente i processi di fotosintesi e traspirazione sono intimamente collegati tra loro e sono in grado di influenzarsi reciprocamente. In particolare, la visione classica ha sempre ritenuto che fosse il bilancio idrico a influenzare, come conseguenza dello stress idrico, il bilancio del carbonio, in quanto se diminuisce la traspirazione allora diminuisce anche la fotosintesi. Ma, in realtà, il processo avviene esattamente all'opposto, agli inizi degli anni '80 (FARQUHAR, 1980) è stato chiarito che il bilancio del carbonio può regolare il bilancio idrico nelle piante. In particolare, se si verificano delle condizioni di carenza idrica (stress), il processo metabolico che viene coinvolto direttamente è la fotosintesi, con conseguente minore capacità di fissazione della CO_2 . Il gradiente di concentrazione di CO_2 tra fuori e dentro la foglia arriverà, allora, ad annullarsi o, addirittura, a invertirsi con una concentrazione interna di CO_2 superiore a quella ambiente (caso in cui prevale la respirazione sulla fotosintesi) e di conseguenza si avrà una perdita di CO_2 verso l'esterno. La concentrazione interna di CO_2 è un ottimo indicatore della funzionalità del mesofillo perché, in condizioni di scarsa irradianza, stress idrico e carenza nutrizionale, viene limitato il metabolismo fotosintetico. La sensibilità stomatica alla concentrazione interna di CO_2 determina il rapporto che esiste tra il bilancio del carbonio e quello idrico. In quest'ottica, è la concentrazione interna di CO_2 che controlla l'apertura stomatica e di riflesso la traspirazione.

1.3.3 Ciclo del carbonio

Per quanto riguarda il ciclo del carbonio, è da ricordare che la quantità di questo elemento presente in atmosfera è molto contenuta rispetto al carbonio presente negli oceani, nei combustibili fossili e nella biosfera terrestre (ODUM, 1988). Attualmente l'atmosfera è infatti caratterizzata da un basso contenuto di biossido di carbonio ($\text{CO}_2 \cong 0.036\%$) ed elevato contenuto di ossigeno ($\text{O}_2 \cong 21\%$).

Al contrario, miliardi di anni fa, quando le prime forme di vita comparvero sulla terra, l'atmosfera terrestre era composta da gas vulcanici, come l'attuale atmosfera del pianeta Giove. L'atmosfera primigenia era quindi ricca di CO_2 mentre l'ossigeno era probabilmente assente o presente in bassissime concentrazioni. L'aumento della concentrazione di ossigeno e la contemporanea diminuzione della concentrazione di CO_2 sono dipese dal fatto che la produzione primaria da parte degli organismi autotrofi ha superato la respirazione e l'ossidazione della materia organica. La crescita della concentrazione di ossigeno atmosferico è stata inoltre favorita anche da processi puramente chimici e geologici, come il rilascio di O_2 dagli ossidi di ferro, la formazione di composti azotati ridotti o la scissione dell'ossigeno e dell'acqua ad opera dei raggi ultravioletti (CLOUD, 1978). Nelle condizioni attuali la bassa concentrazione atmosferica di CO_2 , e l'elevata concentrazione di O_2 sono limitanti per la fotosintesi. Il tasso fotosintetico della maggior parte delle piante può essere infatti incrementato sia aumentando la concentrazione di CO_2 che diminuendo quella di O_2 . Ciò rende le piante dei regolatori estremamente sensibili alle concentrazioni atmosferiche di questi gas.

È stato stimato che all'inizio dell'800, alla nascita della rivoluzione industriale, la concentrazione atmosferica di CO₂ fosse di circa 290 parti per milione (ppm) pari allo 0.029%. Nel 1958, quando iniziarono le prime determinazioni analitiche, la concentrazione era compresa tra 310 e 320 ppm. Sebbene la fotosintesi dei sistemi terrestri ed acquatici il sistema dei carbonati del mare tendano a stabilizzare la concentrazione atmosferica di anidride carbonica, l'aumento vorticoso del consumo di combustibili fossili sta provocando un incremento della concentrazione di circa 1.5 ppm all'anno. Forti emissioni di anidride carbonica sono inoltre derivate dall'intensificazione delle pratiche agricole (arature, concimazioni minerali, che hanno portato ad un progressivo impoverimento di carbonio nei suoli agrari. In parallelo, il disboscamento di ampie superfici della Terra ha causato il rilascio del carbonio contenuto nel legno e la rapida ossidazione della sostanza organica del suolo.

Diverse attività umane possono quindi alterare il ciclo planetario del carbonio e, a partire dall'epoca pre-industriale (fine settecento-inizi del'ottocento) hanno provocato un aumento di circa il 25% della concentrazione della CO₂ atmosferica.

I flussi di anidride carbonica tra biosfera ed atmosfera sono soggetti ad un ciclo stagionale: la CO₂ atmosferica viene infatti assorbita dalle piante attraverso la fotosintesi clorofilliana durante la stagione di crescita e parzialmente riemessa attraverso la respirazione durante tutto l'arco dell'anno. La stagionalità degli assorbimenti è la causa principale della modulazione a dente di sega dell'andamento della concentrazione atmosferica di CO₂. L'utilizzo dei combustibili fossili, come i derivati del petrolio, è responsabile di circa l'80% delle emissioni di CO₂.

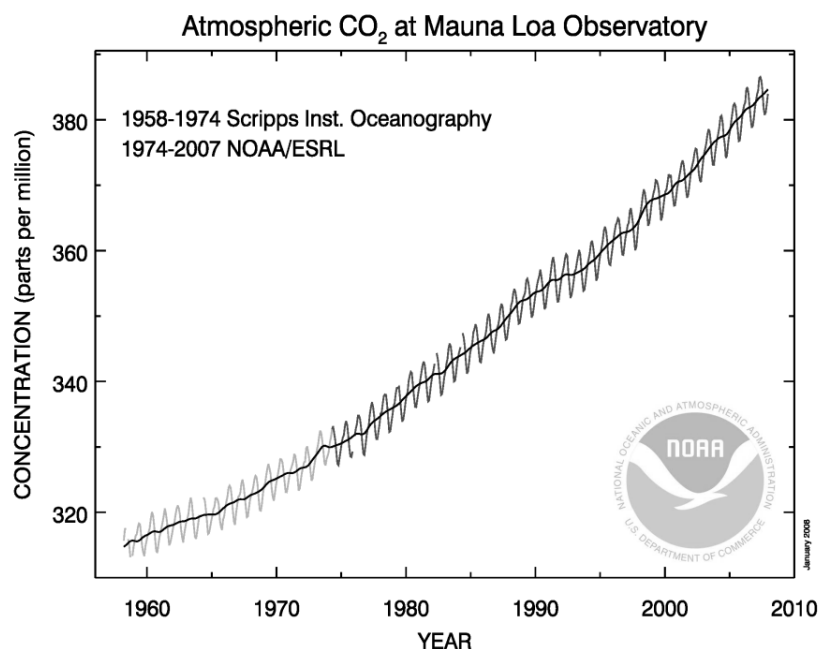


Figura 1 Andamento della concentrazione media mensile di anidride carbonica in atmosfera misurata dall'osservatorio di Mauna Loa – HAWAII (fonte: NOAA).

La stima del contributo relativo delle attività antropiche all'arricchimento atmosferico di anidride carbonica rappresenta ai giorni nostri uno dei problemi scientifici e politico-economici più dibattuti.

1.3.3.1 Misura del Bilancio ecosistemico del carbonio

La vita sulla Terra, nelle forme in cui noi la conosciamo, non potrebbe esistere senza il carbonio, dato che questo elemento costituisce la base strutturale di tutte le molecole organiche. Il carbonio si trova in atmosfera prevalentemente sottoforma di biossido (CO₂) e riveste un ruolo fondamentale nel trasferimento di energia e massa lungo le reti trofiche. Dal biossido di carbonio e dalla radiazione solare, gli organismi

autotrofi sono infatti in grado di sintetizzare i carboidrati, che sostengono in ultima analisi la vita di tutti gli organismi eterotrofi.

Il carbonio negli ecosistemi vegetali si ripartisce in diversi comparti: foglie, fusto, radici, suolo ecc.; la sua distribuzione dipende dagli equilibri che si instaurano nei flussi di questo elemento tra atmosfera, le diverse componenti della biosfera e la pedosfera.

Lo studio del bilancio del carbonio di un ecosistema richiede innanzitutto la definizione delle sue componenti. Il carbonio assimilato attraverso la fotosintesi dagli organismi autotrofi viene definito Produzione Primaria Lorda (*Gross Primary Production* - GPP) e a scala planetaria è di circa 100 Gt. Questo valore, al netto della respirazione degli organismi autotrofi è nota Produzione Primaria Netta (*Net Primary Production* – NPP). Sottraendo dalla NPP la respirazione eterotrofa si determina la Produzione Ecosistemica Netta (*Net Ecosystem Production* – NEP), ovvero l'ammontare di carbonio che entra o esce dal sistema ecologico.

Una maggiore comprensione delle relazioni che esistono tra i cambiamenti globali e la variabilità del bilancio del carbonio richiede l'acquisizione di dati sull'ordine di grandezza delle fluttuazioni stagionali e interannuali dei flussi di massa ed energia (BALDOCCHI ET AL., 1996). La stima delle componenti del bilancio del carbonio presenta notevoli difficoltà per il numero e la complessità dei processi coinvolti, e viene effettuata con metodologie diverse a seconda della scale spaziali e temporali di indagine.

A scala planetaria, i flussi di carbonio, originati dai diversi componenti, vengono quantificati mediante l'inversione di modelli atmosferici, dai dati di concentrazione troposferica di CO₂ (CIAIS ET AL., 1995; FAN ET AL., 1998) o stimando i flussi di carbonio superficiali sulla base di modelli vegetazionali parametrizzati con tecniche di *remote sensing* (RUNNING ET AL., 1999). Il primo approccio è soggetto ad errori dovuti al numero ridotto dei punti di misura della concentrazione e all'incertezza degli algoritmi di conversione. I risultati della seconda metodologia dipendono fortemente dall'accuratezza dei modelli utilizzati nella stima dei processi di respirazione eterotrofa.

A scala regionale i flussi di carbonio vengono stimati effettuando il bilancio del carbonio dello strato limite planetario (DENMEAD ET AL., 1996) o mediante misure dirette del flusso turbolento effettuate da piattaforma aerea (CRAWFORD ET AL., 1996). I metodi che interessano lo strato limite convettivo sono ancora oggetto di studio e prevedono l'utilizzo di torri alte 200-300 m, sonde atmosferiche o piccoli aerei. Gli aerei sono in grado di fornire importanti informazioni sulla distribuzione spaziale dei flussi, ma le misure sono fortemente discontinue nel tempo.

Alla scala di singolo ecosistema, la metodologia aerodinamica più utilizzata per la misura dei flussi di carbonio è nota come "correlazione turbolenta" (*eddy-covariance*). Le misure di *eddy-covariance* sono misure dirette dello scambio ecosistemico netto di carbonio mentre la maggior parte degli altri metodi calcolano i flussi in maniera indiretta da misure di altre variabili. Le misure di *eddy-covariance* vengono inoltre effettuate in maniera continua e non sono invasive.

Mentre la quantificazione del contributo delle diverse superfici forestate al bilancio del carbonio è oggetto di studi approfonditi già da diversi anni tramite le reti che collegano, utilizzando analoghe metodologie e strumentazione, informazioni ottenute da ecosistemi-modello delle principali tipologie forestali del globo terrestre (BLACK ET AL., 2000; LLOYD ET AL., 2002; SAIGUSA ET AL., 2002), sono invece estremamente limitate le conoscenze su sistemi agrari, considerati per il ruolo produttivo molto più che per quello ecologico (DAAMENA ET AL., 1999; SPANO ET AL., 2000).

In letteratura non sono infatti reperibili informazioni sui flussi di massa ed energia fra le superfici frutticole e viticole e l'atmosfera, sullo scambio annuale netto di carbonio e sulle variazioni stagionali nei sistemi arborei e viticoli. Di particolare interesse è proprio lo studio di questi sistemi, la cui durata poliennale consente l'instaurarsi, su una superficie costante, di un potenziale *sink* per il carbonio atmosferico, in grado di fissare gran parte del carbonio stesso in una produzione (*output*) finale ad alta utilità, e di immagazzinarne un'altra parte nelle porzioni legnose e nell'apparato radicale.

1.3.3.2 Il carbonio del suolo

La comprensione del ruolo dei suoli quali *sink* o *source* di carbonio su scala globale, è diventato un punto cruciale per la ricerca scientifica negli ultimi decenni, nella valutazione globale dei cambiamenti di concentrazione di anidride carbonica atmosferica e gas serra, in continuo aumento nell'ultimo secolo. E' noto che nei suoli del pianeta è accumulata la maggiore riserva di carbonio degli ecosistemi terrestri, contenendo essi il

75% del carbonio terrestre totale (ESWARAN ET AL., 1993). Qualunque forma di alterazione o di distruzione dei suoli a causa dei cambiamenti climatici o della pressione antropica (cambio di uso del suolo per scopi agricoli, urbanistici ecc.), influisce direttamente sulle riserve di carbonio globale, e ha un impatto nel bilancio globale del carbonio atmosferico. D'altra parte, un aumento della riserva di carbonio nel suolo è in grado di bilanciare, almeno in parte, le emissioni antropogeniche di CO₂ e questo è possibile attraverso una corretta gestione del territorio. L'incremento della CO₂ atmosferica e delle temperature globali possono alterare la distribuzione del carbonio globale tra l'atmosfera, la vegetazione e il suolo.

Schimel (1995) ha stimato che i suoli contengono approssimativamente 1580 Pg di carbonio, circa il doppio di quanto sia presente in atmosfera (750 Pg), e più del doppio del carbonio accumulato nella vegetazione del pianeta (610 Pg). L'ammontare di carbonio immagazzinato nei suoli è il risultato del bilancio netto fra fotosintesi e respirazione ecosistemica (autotrofa + eterotrofa). L'accumulo di carbonio è influenzato poi dal tipo di vegetazione esistente (erbacea/arborea) e dalle consociazioni forestali (specie conifere o caducifoglie, formazioni miste o pure) e/o erbacee in esso viventi: le varie specie hanno infatti diverse strategie di allocazione del carbonio nei vari comparti (fusto, radici, foglie) e nel sottosuolo (GUO & GIFFORD, 2002).

L'efflusso di CO₂ o respirazione del suolo è uno dei componenti più importanti del bilancio del carbonio degli ecosistemi. La respirazione del carbonio consiste nell'ossidazione della sostanza organica, la respirazione radicale e la respirazione microbica nella rizosfera (a scapito degli essudati radicali) (HANSON ET AL., 2001). La

CO₂ respirata dal suolo rappresenta l'ultima fase del destino del carbonio del suolo e la perdita di carbonio dagli ecosistemi terrestri si verifica soprattutto attraverso la respirazione del suolo (AMUNDSON, 2001).

Nei sistemi agrari la respirazione è influenzata anche da lavorazioni e trattamenti irrigui, ovvero da temperatura ed umidità del suolo. Queste quantità sono correlate anche al flusso evaporativo del terreno, tanto che misure coordinate di queste quantità possono dare informazioni complete sui flussi di calore, vapore e CO₂ dal solo terreno. Inoltre la conoscenza del flusso evaporativo consente la stima della sola traspirazione del vigneto, permettendo una comprensione più profonda dei meccanismi di scambio della pianta, anche per l'uso in modelli di produttività.

1.3.4 Bilancio idrologico

Il bilancio idrologico esprime il principio di conservazione della massa e stabilisce una relazione tra i flussi idrologici relativi ad un fissato volume di controllo e la variazione della quantità d'acqua contenuta in un tale volume. Il carattere del bilancio dipende fortemente dalla scala prescelta per il volume di controllo, dalla quale dipendono anche i tempi caratteristici in gioco. Un sistema delle dimensioni dell'intero globo ha tempi caratteristici di tipo stagionale od annuale, mentre per sistemi più piccoli (bacini idrografici) i tempi rilevanti sono quelli degli eventi di precipitazione (ordine delle ore).

Una delle superfici che delimitano il volume di controllo coincide usualmente con la superficie del suolo cosicché i termini di flusso sono:

- Il flusso d'acqua dall'atmosfera alla superficie (pioggia e neve);
- Il flusso d'acqua sulla superficie terrestre (deflusso superficiale);
- Il flusso d'acqua dall'atmosfera al suolo (infiltrazione);
- Il flusso d'acqua all'interno del suolo (deflusso sub-superficiale e deflusso profondo);
- Il flusso d'acqua dal suolo all'atmosfera attraverso la vegetazione (traspirazione);
- Il flusso d'acqua dalla superficie del suolo all'atmosfera (evaporazione).

I termini di accumulo sono invece:

- umidità del suolo;
- acqua di falda;
- acqua negli oceani;
- acqua superficiale (corsi d'acqua, laghi, ecc.).

Per un volume delimitato superiormente dalla superficie del suolo ed inferiormente da una superficie a flusso nullo (che si può immaginare arbitrariamente profonda), il bilancio idrologico si può scrivere:

$$\frac{dV}{dt} = P - S - F - E \quad [\text{eq. 8}]$$

dove V comprende tutti i termini di accumulo contenuti nel volume di controllo; P è la precipitazione, S il deflusso superficiale che lascia il volume di controllo, F il flusso sotto - superficiale e profondo che lascia il volume di controllo, ed E è l'evapotraspirazione. Il flusso di infiltrazione non compare esplicitamente nella equazione per la scelta del volume di controllo, ma vi compare implicitamente perché determina la ripartizione del flusso meteorico in deflusso superficiale e deflussi profondi.

È importante notare che, poiché alcuni dei processi che avvengono nel sistema idrologico implicano un cambiamento di fase dell'acqua (scioglimento dei ghiacci ed evapotraspirazione) il bilancio idrologico, che è appunto un bilancio di massa, risulta fortemente accoppiato al bilancio d'energia per lo stesso sistema.

Si nota come il termine di evapotraspirazione (E) compaia sia nell'equazione di conservazione della massa (bilancio idrologico) sia nell'equazione di conservazione dell'energia [eq. 3]. Esse sono dunque fortemente accoppiate e non è possibile risolvere l'una trascurando l'altra, almeno sulle scale temporali alle quali l'evaporazione è rilevante. Questo, ad esempio, non avviene alla scala di evento, alla quale è usuale trascurare l'evapotraspirazione ed utilizzare il bilancio idrologico per, ad esempio, ottenere il deflusso superficiale dalle precipitazioni. In molte altre applicazioni, quali la gestione di invasi, la bonifica, l'irrigazione o la modellistica climatica, caratterizzate da scale temporali più lunghe, il termine evaporativo è importante e non può essere eliminato. In tali casi le due equazioni devono essere risolte contemporaneamente.

1.3.4.1 Stato idrico della pianta

La crescita, la funzionalità, produttività e utilizzo dell'acqua sono intimamente relazionate allo stato idrico della pianta stessa (HSIAO, 1990). Da quando le piante coltivate sono diventate oggetto di seri studi scientifici, una priorità dei ricercatori è stata quella di misurare ed interpretare il loro stato idrico, in quanto l'acqua è molto probabilmente il più importante fattore limitante delle produzioni del mondo (JONES, 1990).

Il fondamentale scopo che ci si prefigge con l'irrigazione è quello di reintegrare le riserve idriche del suolo al fine di evitare fenomeni di stress alla pianta e garantire a questa le migliori condizioni per il raggiungimento degli standard quanti-qualitativi adeguati. Ottimizzare l'uso dell'acqua da somministrare ha portato allo sviluppo di tecniche per determinare *quando* la pianta ha necessità di acqua e per *quanto* tempo questa deve essere somministrata alla coltura (JONES, 1990).

Quando irrigare è fondamentalmente legato allo stato idrico della pianta. Appare quindi necessario poter monitorare il fabbisogno idrico della coltura possibilmente in tempo reale o ad intervallo frequenti più o meno ravvicinati nel tempo.

Malgrado il ruolo riconosciuto che ha lo stato idrico della vite nella determinazione di fondamentali proprietà qualitative dell'uva e la complessità delle strategie irrigue che oggi vengono proposte per questa coltura (DE SOUZA ET AL., 2003), la precisa quantificazione dei consumi idrici resta ancora un problema aperto della moderna viticoltura. In realtà, la ricchezza delle possibili forme di allevamento e l'ampia variabilità delle condizioni climatiche e pedologiche in cui la vite è coltivata, rendono difficile, se non impossibile, una caratterizzazione davvero generale del processo.

1.3.4.2 Stima dell'evapotraspirazione nelle piante

Oggi, molti metodi sono disponibili per la stima o la misura dei flussi di evapotraspirazione, ciascuno appropriato per obiettivi specifici, ma nessuno valido o superiore in senso generale.

1.3.4.2.1 Misura dello scambio gassoso fogliare

Le misure degli scambi gassosi della foglia sono stati ampiamente esplorati in questi ultimi anni, grazie alla messa a punto di strumenti in grado di fornire facilmente misure di assimilazione netta, traspirazione e conduttanza stomatica. Di conseguenza lo studio della risposta della fotosintesi di piante di vite alla carenza idrica ha attirato l'interesse degli ecofisiologi che non hanno più potuto fare a meno delle utili informazioni ottenibili, seppur con alcune accortezze, da questi sistemi portatili di misura degli scambi gassosi. Sono solitamente la fotosintesi netta e la conduttanza stomatica i parametri che vengono utilizzati per la valutazione dello stress idrico. Probabilmente l'interesse deriva dal fatto che la fotosintesi delle foglie, in maniera diretta o indiretta, è la fonte principale dello zucchero che andiamo poi a ritrovare nelle bacche mature (ESCALONA ET AL., 1997) e sappiamo che importanti decrementi di fotosintesi possono determinare riduzione negli accumuli di zuccheri.

Teoricamente non vi è niente di più semplice: un rilievo puntiforme che ci dà il valore del parametro e, se il valore rilevato è inferiore ad un determinato livello di soglia, risulta opportuno irrigare. Poni *et al.* (1994a) hanno dimostrato come esista una profonda correlazione tra l'età della foglia ed il tasso fotosintetico di questa. Su viti *Sangiovese*, attraverso la misura della fotosintesi netta durante la stagione, gli autori hanno stabilito che mediamente ogni singola foglia è capace di incrementare il suo tasso fotosintetico fino al 30-35° giorni di età (ovvero al raggiungimento delle dimensioni finali) e, successivamente, a partire dal 40-45° giorno, si ha l'inizio di un graduale ma costante declino dell'attività fotosintetica. Lo studio ha inoltre messo in evidenza come

foglie giovani, in fase di rapido accrescimento, presentino una efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) nettamente inferiore a quella di foglie già completamente distese. Tuttavia, nonostante l'utilizzo di analizzatori portatili all'infrarosso abbia determinato un importante passo in avanti nella conoscenza dei meccanismi della pianta, la complessità delle relazioni che caratterizzano il processo di traspirazione di fotosintesi e la grande variabilità spaziale esistente, non solo tra piante e varietà diverse ma anche all'interno di foglie diverse della chioma dello stesso individuo, impone uno studio della fisiologia fogliare non basato su misure puntuali ma sulla determinazione della risposta della assimilazione netta di carbonio per unità di superficie di tessuto alle diverse variabili ambientali (HUNTER & VISSER, 1988; CARMO VASCONCELOS & KOBLET, 1991).

Come precedentemente esposto, esiste una stretta correlazione tra la conduttanza stomatica e la fotosintesi netta. Questa correlazione, combinata col fatto che la chiusura stomatica è tra le prime risposte della pianta alla siccità, evidenzia come i decrementi di fotosintesi siano causati dalla chiusura stomatica sotto moderati stress idrici (MEDRANO ET AL., 2003), mentre quando lo stress diventa più severo entrano in gioco regolazioni non-stomatiche che limitano la fotosintesi (DOWNTON ET AL., 1987; FLEXAS ET AL., 2002).

Poni *et al.* (1994b) mettono in evidenza come su piante della varietà *Concord*, durante le fasi di carenza idrica identificate da valori di umidità del suolo estremamente bassi, si assisteva a limitazioni della fotosintesi e della conduttanza stomatica quando le condizioni meteorologiche (principalmente di umidità e temperatura) erano tali da generare alte domande evapotraspirative dell'ambiente, mentre quando le condizioni

sono diventate meno proibitive, anche in condizioni di mancanza d'acqua nel suolo più restrittive delle precedenti, gli effetti limitanti agli scambi gassosi fogliari erano decisamente più contenuti. Al contrario, ESCALONA ET AL., (1997) osservano, sulla varietà spagnola *Tempranillo*, che le piante di vite sono capaci di mantenere sufficienti capacità fotosintetiche anche in condizioni ambientali critiche dovute all'insieme di stress idrici ed elevate richieste evapotraspirative dell'atmosfera. Gli autori mettono in evidenza come durante la fase di maturazione, sebbene la domanda evapotraspirativa fosse addirittura minore, le piante soffrono maggiormente questi stress ambientali. Moderati stress idrici aiutano, invece, ad evitare o ridurre tali deperimenti, mostrando come la gestione dell'irrigazione nella determinazione di livelli di stress idrico controllato possa aiutare il processo foto sintetico.

E' stato, inoltre, messo in evidenza come la massima attività della rubisco, la capacità di rigenerazione della RuBP e l'utilizzazione dei triosi fosfati decrescano in piante sottoposte a stress idrico e siano sensibilmente minori rispetto a piante ben irrigate (MAROCO ET AL., 2002; MEDRANO ET AL., 2003). In viti sottoposte ad interventi irrigui e in condizioni di elevata irradianza più del 50% dell'energia totale assorbita viene dissipata termicamente. In condizioni di stress moderato o intenso, sia la fotosintesi che la fotorespirazione diminuiscono e la dissipazione termica aumenta fino ad oltre il 90% (MEDRANO ET AL., 2002). Anche in condizioni di forte stress idrico, l'incidenza della fotoinibizione è molto bassa, indicando che nella vite il meccanismo di dissipazione dell'energia è molto efficiente.

A questo riguardo, nel 2003, Schultz (2003) ha effettuato un interessante studio sull'andamento stagionale delle proprietà biochimiche del processo fotosintetico di foglie di vite di diverse età e di diversa natura in funzione della posizione nella chioma (foglie di luce / ombra) arrivando ad una completa parametrizzazione del modello di fotosintesi di Farquhar per la vite. Ciò ha consentito di ottenere, da misure di scambio gassoso mediante l'esecuzione di curve di risposta alla concentrazione di CO₂, parametri biochimici intrinseci del processo fotosintetico che hanno permesso di identificare in quale *step* del ciclo di fissazione del carbonio intervengano le limitazioni alla assimilazione fotosintetica.

1.3.4.2.2 Utilizzo di coefficienti colturali (K_c)

Il metodo di stima *two steps* proposto dalla FAO (ALLEN ET AL., 1998), ancora diffusamente percepito come semplice ed intuitivo, è soggetto a a numerose critiche, dirette soprattutto verso il concetto di “*coefficiente colturale*” (PEREIRA ET AL., 1999; SHUTTLEWORTH, 2006). Stime accurate dei coefficienti colturali del vigneto (cv. *Thomson Seedless*) sono state raccolte e verificate per più anni mediante lisimetri a pesata in California (WILLIAMS ET AL., 2003) ed esse sono risultate dipendere in maniera lineare dalla quantità di radiazione intercettata dalla *canopy*, misurata indirettamente osservando la quota di superficie di terreno ombreggiata (WILLIAMS & AYARS, 2005). Le tecniche basate sulla misura del flusso della linfa, pur promettenti e adatte ad accertare situazione di stress idrico, soffrono ancora di problemi legati al campionamento e al cosiddetto *scaling-up* delle misurazioni, effettuate su singoli tralci o, al più, su pianta singola (YUNUSA *et al.*, 2004).

1.3.4.2.3 Misure micrometeorologiche

Le tecniche micrometeorologiche, basate sulla ripartizione del bilancio energetico mediante il rapporto di Bowen (YUNUSA ET AL., 2004) o sulla misura dei flussi turbolenti (SPANO *et al.*, 2004) sono state applicate con successo, ma solo per periodi limitati a qualche giorno. Sebbene siano state riconosciute come le più affidabili e promettenti (MEYERS & BALDOCCHI, 2005), diventando (in particolare, la tecnica dell'*eddy-covariance*) gli *standard* di riferimento nelle reti internazionali di monitoraggio delle interazioni tra vegetazione ed atmosfera, esse sono spesso criticate, soprattutto perché richiedono, per essere applicate correttamente, vaste superfici di vegetazione omogenea. A questo riguardo, tuttavia, non va dimenticato che qualsiasi tecnica di misura dei flussi di evapotraspirazione è soggetta, in realtà, a questo vincolo: solo una misura effettuata in tali condizioni arriva ad avere un valore significativo e rappresentativo della coltura, perché solo in tali condizioni si stabilisce un *boundary layer* specifico e caratteristico della vegetazione osservata.

1.4 TELERILEVAMENTO

La maggior parte delle misure di fotosintesi coinvolge, in effetti, una determinazione da remoto nei sistemi di scambio gassoso, includendo quelli basati su camere, gradienti atmosferici e *eddy-covariance*. La determinazione della fotosintesi sono effettuate da remoto nel senso che le misure sono basate sugli effetti che foglie, piante o *canopy* hanno nell'ambiente gassoso (biosfera). Nel rilevamento da remoto (*remote sensing*), basato su misure radiative, le determinazioni della fotosintesi sono basate sull'interazione tra foglie, piante e *canopy* e l'ambiente radiativo. Le lunghezze

d'onda dello spettro elettromagnetico potenzialmente utile per le misure collegate alla fotosintesi variano dal visibile (400 - 700 nm) all'infrarosso termico (700 nm – 1 mm) ed alle micro-onde (1 mm – 10 cm). Se il *remote sensing* in senso generale tipicamente utilizza misure telerilevate da satellite a larga-scala, il *remote sensing* “radiometrico” può essere utilizzato efficacemente per rispondere a questioni legate a ricerche sulla fotosintesi variando come scala di applicazione dal cloroplasto al globo.

La motivazione che ha spinto il *remote sensing* all'approccio di misure di fotosintesi e produttività primaria netta (NPP) proviene in ultima analisi da quattro aree ben distinte (FIELD ET AL., 1995).

1. Le misure di fotosintesi basate su telerilevamento possono offrire un ulteriore approccio alternativo alle informazioni tradizionali o consentire tecniche meno invasive e più estensive come scala spaziale.
2. Il *remote sensing* della fotosintesi può permettere di sviluppare e testare le nostre conoscenze sull'*up-scaling* dei fenomeni fisiologici. Proprio come i meccanismi di controllo della fotosintesi possono essere differenti alla scala di foglia rispetto a quella di cloroplasto (WOODROW ET AL., 1990), questi possono anche differire tra la scala di foglia ed altri livelli di organizzazione.
3. Una immagine più nitida dei processi fotosintetici a larga-scala può suggerire nuove ipotesi che potrebbero portare a capire il funzionamento della regolazione ecologica e fisiologica dello scambio di CO₂ ed H₂O a livello di foglia e di singola pianta.

4. Le crescenti evidenze che l'attività antropica sta modificando il pianeta pongono un'alta priorità sull'utilizzo di un approccio estensivo all'ecofisiologia. La determinazione da remoto della fotosintesi a scala globale sono critiche sia per la stima quantitativa del bilancio globale del carbonio che per il monitoraggio dei cambiamenti a scala regionale.

I prodotti del telerilevamento potenzialmente utili per la stima della fotosintesi si possono suddividere in tre categorie. Una classe di prodotti è collegata alla capacità fotosintetica o il potenziale di assorbimento della CO₂. Questa possibile applicazione include anche la stima dell'indice di superficie fogliare (LAI), l'azoto totale della *canopy* e la frazione di radiazione solare che viene assorbita dalla vegetazione (*f*PAR). Una seconda classe è legata alla misura del flusso istantaneo di CO₂. I metodi che comprendono la fluorescenza, lo stato del ciclo delle xantofille o l'utilizzo della temperatura nel calcolo della conduttanza stomatica sono degli esempi di questa seconda classe. La terza classe di prodotti si occupa di fornire i parametri ambientali richiesti dalla modellistica ambientale portando alla stima della temperatura superficiale, della radiazione solare incidente e dell'umidità del suolo (FIELD ET AL., 1995).

I prodotti appartenenti a queste tre classi possono essere utilizzati come *input* per diversi tipi di modelli che operano a diverse scale spaziali e temporali. Gli indici collegati alla capacità fotosintetica della vegetazione hanno bisogno di tracciare fenomeni per i quali le dinamiche dominanti tendano ad essere stagionali. Lo scambio istantaneo di CO₂, invece, ha delle dinamiche che possono variare da stagionale a brevi ombreggiamenti causati dal passaggio di una nuvola. La risoluzione temporale richiesta

per gli *input* ambientali nei modelli fotosintetici può variare da qualche minuto per il modelli biochimici fino ad un mese o più per i modelli di produzione ecosistemica.

1.5 PROCESSO DI SCALING

Lo *scaling* si pone l'obiettivo di acquisire l'informazione ad una certa scala e utilizzarla per derivare dei processi ad una scala diversa. Questa informazione può consistere nella esplicita rappresentazione di un processo, di un dato strutturale e fenologico, di uno stato o di variabili guida (JARVIS, 1995). L'*up-scaling* consiste nel prendere delle informazioni ad una scala inferiore dal punto di vista spaziale e più ristretta dal punto di vista temporale e utilizzare quell'informazione per derivare dei processi ad una scala spaziale superiore e più lunga temporalmente. Gran parte di quello che è stato scritto in letteratura sullo *scaling* fa riferimento al processo di *up-scaling*. Un esempio pressoché universale del processo di *up-scaling* è quello di prendere in considerazione il processo della fotosintesi, ad una scala di processo biochimico nel singolo cloroplasto, e combinarlo con la descrizione della struttura della foglia e della diffusione della CO₂ e dell'H₂O, e utilizzare queste informazioni per derivare una descrizione dello scambio gassoso di CO₂ ed H₂O alla scala fogliare. La combinazione dei flussi a scala fogliare con le informazioni riguardo la struttura fisica della vegetazione, insieme con delle appropriate guida può, a sua volta, portare alla descrizione dei flussi di materia (CO₂ e H₂O) a scala di *canopy*.

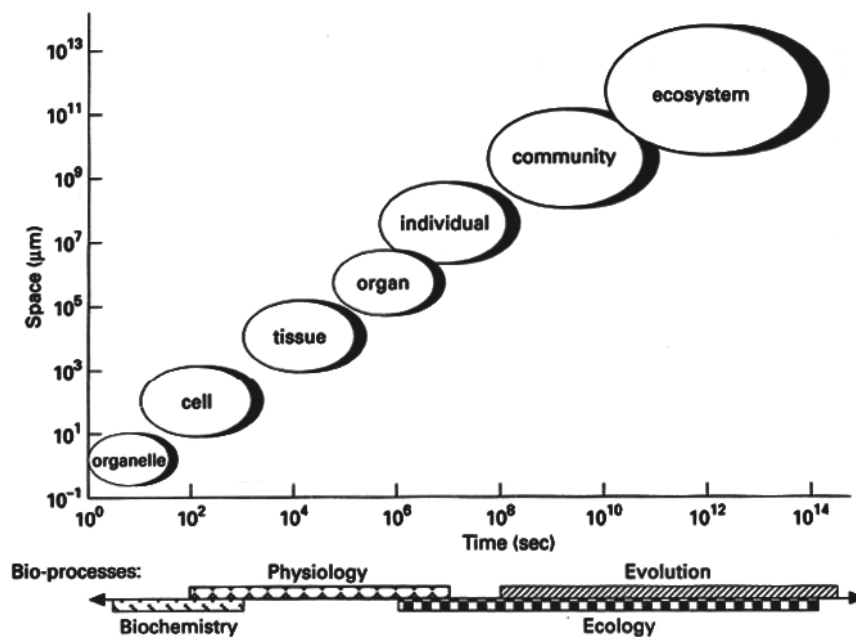


Figura 2 Processo di *Scaling*. Livelli di studio e passaggio a scale spaziali e temporali diverse (da JARVIS, 1995).

Il *down-scaling*, al contrario, consiste nello scomporre le informazioni empiriche, ottenute ad una scala, nei suoi costituenti ad una scala spaziale inferiore e più stretta dal punto di vista temporale. L'informazione, in questo caso, potrebbe essere la descrizione di un processo a larga scala, come per esempio il modello di MONTEITH (1977) della produzione primaria netta in funzione della quantità di fotoni assorbita e una empirica efficienza d'uso del singolo fotone (RUSSEL, JARVIS & MONTEITH, 1989). In questo esempio l'assorbimento di fotoni può subire un *down-scaling* verso i processi di *transfer* radiativo e di sviluppo della foglia; l'efficienza d'uso del fotone può essere *down-scaled* nei processi primari della fotosintesi e della respirazione a scala fogliari e minori.

Perché, quindi, effettuare un *up-scaling* o un *down-scaling* di variabili? Perché non si effettua semplicemente una osservazione del fenomeno alla scala di interesse? Ed infine, qual è il guadagno di utilizzare questa informazione ad una scala per derivarne altre a scale differenti?

L'importanza di uno approccio come quello utilizzato nel presente lavoro, in cui si è effettuato uno studio degli scambi gassosi della vite dalla scala fogliare a scala di *canopy* fino a quella di vigneto, sta proprio nella possibilità di utilizzare le informazioni ed i risultati ottenuti ad una scala per derivare e comprendere meglio i risultati ottenuti alla scala superiore. In particolare il monitoraggio durante la stagione vegetativa dello scambio gassoso mediante misure di assimilazione effettuate a scala fogliare e la parametrizzazione dei modelli meccanicistici di risposta dell'assimilazione alle diverse variabili ambientali (luce, concentrazione di CO₂), permettono di ottenere una conoscenza dettagliata del processo fotosintetico, basata, non su assunzioni o stime di tipo empirico, ma su parametri biochimici caratteristici ed intimi al processo stesso, con i quali è possibile confrontare la risposta del tessuto studiato con altre risposte misurate ad altre scale temporali e spaziali.

Le misure micrometeorologiche dei flussi di materia e la ripartizione del bilancio energetico nella *canopy* permettono di arrivare a descrivere con precisione la struttura della vegetazione oggetto di studio e fornire l'unica via di "misura" e di "monitoraggio" dell'evapotraspirazione e della capacità di fissazione della CO₂ del sistema.

Il passaggio ulteriore di scala, utilizzando le tecniche di telerilevamento satellitare, permette di estendere le misure effettuate alle scale precedenti (foglia e *canopy*) arrivando ad una spazializzazione del processo di crescita, assimilazione e ripartizione degli assimilati a tutto il vigneto.

L'impostazione di una strategia di analisi di questo tipo, è stato l'unico modo per arrivare alla "intima" conoscenza del comportamento del sistema vigneto che, come descritto, è caratterizzato da una serie di processi fisiologici, fisici e biologici che interagiscono tra loro a diverse scale. Solo un approccio multi-scala può consentire di utilizzare i migliori risultati possibili di ognuna delle scale a cui si effettuano le misure.

SCOPO DEL LAVORO

L'agricoltura negli ultimi anni è stata messa di fronte a diverse sfide in relazione agli ormai accertati cambiamenti del clima che hanno spinto la ricerca internazionale verso lo studio della risposta dei sistemi colturali alla mutazione delle condizioni ambientali. In particolare il cambiamento del ciclo annuale delle temperature e la mutazione del regime di precipitazioni rendono le colture agrarie particolarmente suscettibili a questi fenomeni. In questo contesto la vite si colloca in una posizione ancora più critica in relazione alla necessità di raggiungere, oltre a produzioni quantitative, anche elevati livelli qualitativi per poter competere nei mercati nazionali ed, ancora di più, in quelli internazionali. Non vanno, inoltre, dimenticati gli effetti che un cambiamento climatico potrebbe causare al complesso ed eterogeneo sistema viticolo italiano, frutto del risultato di secoli di adattamento della vite al territorio.

In quest'ottica la ricerca nazionale ed internazionale ha l'obiettivo di comprendere al meglio i complessi processi fisiologici che stanno alla base della possibile risposta della vite alla mutazione delle condizioni ambientali. Una gestione dell'ecosistema viticolo appropriato in relazione agli obiettivi prefissi ed un corretto utilizzo delle tecniche colturali, diventano, quindi, basilari per una gestione razionale del vigneto e devono sottendere al raggiungimento dei massimi livelli di espressione delle potenzialità del vitigno e del *terroir*, attraverso uno sfruttamento efficiente delle risorse ambientali.

La conoscenza di *come* e *quanto* la vite condizioni gli scambi con l'atmosfera circostante è di grande importanza per la messa a punto di modelli di produttività, ma anche per la caratterizzazione della possibile funzione di mitigazione delle diverse superfici coltivate nei confronti dei gas serra, possibili responsabili dei cambiamenti climatici.

In quest'ottica l'obiettivo generale della ricerca è l'approfondimento delle conoscenze sui processi fondamentali che coinvolgono il sistema vigneto. In particolare l'approfondimento dello studio del bilancio energetico, idrico e del carbonio mediante un approccio che ha interessato diverse scale spaziali e temporali: la scala fogliare, di *canopy* e quella di vigneto. Le misure di scambio gassoso fogliare hanno l'obiettivo di parametrizzare fisiologicamente la risposta della vite alla mutazione annuale delle condizioni ambientali. La misura dei flussi di energia e di materia, effettuata mediante le tecniche micrometeorologiche, consente di estendere lo studio a scala di *canopy* mediante l'analisi della ripartizione del bilancio energetico e la misura dello scambio netto dell'ecosistema e dell'evapotraspirazione reale del vigneto. L'ulteriore passaggio di scala è stato effettuato mediante l'utilizzo del telerilevamento satellitare che in questi anni si sta rivelando un valido strumento per spazializzare il comportamento misurato alle scale minori alla scala regionale o, addirittura, nazionale.

2 MATERIALI E METODI

2.1 DESCRIZIONE DELL'AREA DI RICERCA

La scelta del sito di studio ha dovuto tener conto delle esigenze necessarie per lo studio degli scambi gassosi a diverse scale. In particolare se per le misure a scala di foglia assume maggiore importanza la scelta di un campione rappresentativo, per poter utilizzare le tecniche di misura micrometeorologiche (scala di parcella) e tecniche di telerilevamento (scala di vigneto), la scelta del sito assume un ruolo determinante e necessario per poter adoperare tali tecniche di misura. Per questo motivo il sito di studio è stato scelto presso l'Azienda Agricola Fratelli Mercante in località Negrisia di Ponte di Piave (TV) all'interno della D.O.C. Piave (45° 44' 51'' N, 12° 26' 48'' E, 9 m s.l.m.), situato su un appezzamento ottimale per estensione (circa 25 ha) e giacitura che permette un *fetch* adeguato (≥ 200 m) per la maggior parte delle direzioni del vento.

L'impianto prescelto è stato realizzato nel 1992 ed è caratterizzato da elevata omogeneità sia per quanto riguarda le caratteristiche di impianto che la gestione del vigneto (Tabella 1). Il vigneto è costituito da quattro diverse varietà caratteristiche della viticoltura Trevigiana: Carmenère (circa 10 ha), Verduzzo trevigiano, Incrocio Manzoni Bianco 6.0.13 e Pinot grigio, innestate tutte su SO4. Tutte le varietà sono gestite con la stessa forma di allevamento: cordone libero mobilizzato, forma simile al cordone libero (cordone permanente orizzontale, posto a poco meno di due metri dal suolo e sostenuto da un filo portante, sul quale viene eseguita una potatura a speroni) perfezionata alla fine degli anni Ottanta, differisce dal Cordone Libero in quanto alla sommità dei pali è

applicato un cappellotto in plastica, attraverso il quale passa un filo di sostegno che si appoggia sui pali. Il ceppo delle viti è arcuato per dare elasticità al sistema e il cordone permanente orizzontale può quindi oscillare verso l'alto, consentendo così l'impiego della vendemmia a scuotimento verticale, per la quale è stata realizzata dall'Università di Bologna una specifica macchina scavallatrice (modello TRINOVA), alla quale si affianca anche un modello di potatrice scavallante a barre multiple particolarmente efficiente, sia negli interventi estivi sia in quelli invernali.

Tabella 1 Caratteristiche di impianto del sito di studio di Negrisia.

Caratteristiche di impianto del sito di studio		
Anno di impianto	1992	
Distanze di impianto		
	Fila	1.30 m
	Interfila	2.50 m
Densità di impianto	3072.92 piante / ha	
Forma di allevamento	Cordone libero mobilizzato	
Altezza del cordone	1.70 m	
Altezza della vegetazione	2.70 m	
Gestione del suolo		
	Fila	Diserbo localizzato
	Interfila	Inerbimento permanente

Il cordone permanente è ad una altezza di 1.70 m portante speroni di 2-3 gemme, mentre il sesto è di 1.30 m x 2.50 m (3077 piante/ha). La gestione del vigneto è completamente meccanizzata sia per quanto riguarda le potature invernali che gli interventi in verde (cimature, defogliazioni, spollonature) ed i trattamenti. La raccolta è eseguita mediante una vendemmiatrice scavallante (TRINOVA) a scuotimento verticale. La gestione del suolo prevede l'inerbimento permanente dell'interfila ed il diserbo localizzato sulla fila.

Il vigneto è dotato di impianto di irrigazione di soccorso mediante subirrigazione freatica. Durante i periodi di siccità, infatti, viene fatto salire il livello dell'acqua nel canale presente tra i due corpi del vigneto, permettendo all'acqua di arrivare, mediante i dreni sotterranei, all'interno del vigneto. Durante il resto della stagione questo sistema permette, inoltre, un buon drenaggio del suolo evitando situazioni di ristagno idrico.

Nel presente lavoro è stata considerata la varietà Carmenère in quanto maggiormente rappresentativa del *footprint* della stazione micrometeorologica di misura. Sono state tuttavia seguite le crescite e la ripartizione delle altre varietà al fine di valutare se il Carmenère si differenziasse o meno da queste in termini di comportamento vegeto-produttivo.

2.1.1 Varietà Carmenère



Figura 3 Varietà Carmenère: grappolo (sx) e foglia (dx).

2.1.1.1 Origine

Vecchio vitigno di origine francese (Bordeaux), importato in Italia probabilmente nell'800 con il *Cabernet franc*. Fino al 1991, anno in cui l'Istituto Sperimentale per la Viticoltura ha chiarito la sua identità, era chiamato dai viticoltori del Nord-Est, dove è prevalentemente coltivato, Cabernet franc "italiano".

2.1.1.2 Caratteristiche ampelografiche

Portamento: eretto.

Apice del germoglio: vellutato, verde chiaro con orli rosati.

Foglia: media, pentalobata, leggermente allungata, con seno peziolare a U e bordi leggermente sovrapposti (più del Cabernet franc); anche i seni laterali sono un po' più profondi.

Grappolo: medio (100-200 g), cilindro-conico, alato, spargolo (anche per un difetto agli stami che spesso limita l'allegagione).

Acino: medio, buccia pruinosa, consistente; polpa di sapore molto erbaceo.

2.1.1.3 Caratteristiche fenologiche e produttive

Il germogliamento è medio, come pure la maturazione. La vigoria è notevole e la produttività è abbastanza buona. La fertilità delle gemme è discreta, ma il vitigno esige potature lunghe e ricche e forme di allevamento espanse. È piuttosto sensibile alla siccità, meno al freddo. È sensibile all'oidio, mal dell'esca, cicaline e disseccamento del

rachide, mediamente a Botrite e poco a Peronospora. È molto sensibile alla carenza di potassio ed al virus dell'accartocciamento fogliare.

2.1.1.4 Selezione clonale

L'obiettivo è soprattutto quello di migliorare l'equilibrio vegetativo e la qualità delle uve. **Cloni omologati:** RAUSCEDO 9 (Selezione Ferrari); ISV - F 5; VCR 22; VCR 700; VCR 702; ERSa FVG 320.

2.2 CARATTERIZZAZIONE PEDO-METEOROLOGICA

Per poter approfondire lo studio dell'ecofisiologia dell'agro-ecosistema vigneto, è stato necessario mettere in relazione i dati di crescita e di ripartizione delle piante misurati in campo alle diverse scale con dei dati meteorologici rappresentativi dello stesso ambiente. Per questo motivo è stato opportuno installare una stazione meteorologica dotata di sensori per la misura delle principali variabili meteorologiche (Tabella 2) con risoluzione semi-oraria. La stazione è stata dotata di sistema di controllo da remoto mediante protocollo di trasferimento dati via GSM che ha permesso un monitoraggio in tempo reale delle condizioni meteorologiche di campo.

I dati meteorologici raccolti dalla stazione meteorologica all'interno del vigneto sono stati inoltre utilizzati per il calcolo della sommatoria termica per le due annate 2006 e 2007. In particolare il calcolo dei “gradi giorno” (AMERINE & WINKLER, 1944; BONHOMME, 2000) è stato eseguito partendo dai dati semiorari giornalieri di temperatura dal 1° di Aprile, considerando come soglia di zero di vegetazione i 10°C.

Tabella 2 Strumentazione e variabili ambientali misurate nella stazione meteorologica installata all'interno del vigneto.

Variabile ambientale	Sensore
Regime termico ed igrometrico dell'aria	
Temperatura (°C) media, minima e massima	Termo-Igrometro VAISALA HMP45
Umidità relativa (%)	
Deficit di Pressione di Vapore (kPa)	
Temperatura di rugiada (°C)	
Bilancio radiativo	
Rad. onda corta discendente (↓) (W m ⁻²)	Radiometro netto Kipp & Zonen CNR-1
Rad. onda corta ascendente (↑)(W m ⁻²)	
Rad. onda lunga discendente (↓)(W m ⁻²)	
Rad. onda lunga ascendente (↑)(W m ⁻²)	
Rad. totale discendente (↓)(W m ⁻²)	
Rad. totale ascendente (↑)(W m ⁻²)	
Rad Netta (W m ⁻²)	
Albedo	
Regime pluviometrico	
Precipitazione totale giornaliera (mm)	Pluviometro YOUNG 53103
Acquisizione e salvataggio dati	
Sistema di acquisizione dati	Datalogger CR-23 (Campbell- Scientific.)
Sistema di invio dati da remoto	Modem GSM

La caratterizzazione pedologica del suolo ha previsto di esplorare la variabilità secondo tre aspetti: i) spaziale, attraverso l'utilizzo di una griglia di campionamento randomizzata (STOLBOVOY ET AL., 2005); ii) secondo il profilo verticale 0-30cm, in particolare sono state effettuate tre ripetizioni per ognuna delle 6 aree di campionamento a tre diversi orizzonti 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm; iii) infine è stata considerata una ulteriore fonte di variabilità del suolo del vigneto per la sua disposizione a file. È necessario infatti considerare che la struttura a file tipica del sistema vigneto può influenzare pesantemente la variabilità spaziale del terreno sia per quanto riguarda la struttura che la quantità di sostanza organica presente. Inoltre in questo vigneto va

e la variabilità determinata dalla differente gestione del suolo: suolo nudo (fila) e inerbito (interfila), il suolo del sito di studio non presenta differenze significative. Dai dati di tessitura ottenuti è possibile identificare il tipo di suolo come “argilloso” con una ripartizione percentuale media tra sabbia, limo e argilla di 35, 16.5 e 48.5 % rispettivamente (Figura 4).

Dai dati di tessitura ottenuti per i diversi orizzonti di profondità e per le diverse gestioni del suolo (Figura 5), si può notare come con il progressivo passaggio ad orizzonti più profondi la tessitura del suolo non cambi in maniera significativa né per il suolo nudo che inerbito.

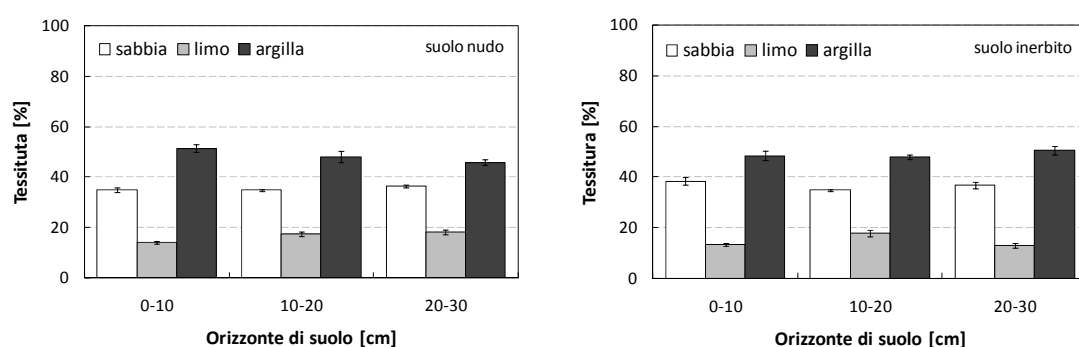


Figura 5 Ripartizione tra le componenti della tessitura del suolo di Negrisia secondo i tre orizzonti di profondità campionati: 0-10, 10-20 e 20-30 cm.

2.3 ANALISI DELLE CRESCITE E FENOLOGIA

Le fasi fenologiche sono momenti caratteristici del ciclo annuale delle piante. Sono state proposte diverse scale negli anni, permettendo la standardizzazione dei rilievi e della misura delle crescite. In particolare la fenologia della vite è stata descritta con due scale: la più nota in passato era quella di Baggiolini (Tabella 3); oggi la più

impiegata è la scala BBCH (iniziali delle quattro grandi multinazionali che l'hanno proposta). In tabella, per motivi di sintesi, sono riportate solo alcune delle fasi, in particolare quelle durante le quali sono stati effettuati i rilievi nelle due annate.

Tabella 3 Stadi fenologici in cui sono stati effettuati i campionamenti biometrici, secondo la scala BBCH e secondo la scala proposta da Baggiolini.

Stadio Fenologico	Scala fenologica	
	BBCH	Baggiolini
Stadio principale di crescita 0: Sviluppo delle gemme		
Stasi vegetativa	00	A
Inizio ingrossamento gemma	01	
“Gemma cotonosa”	05	B
Gemma schiusa (“punta verde”)	09	C-D
Stadio principale di crescita 1: Sviluppo delle foglie		
Prima foglia distesa	12	E
Tre foglie distese	13	
Cinque foglie distese	15	
Stadio principale di crescita 5: Emergenza delle infiorescenze		
Ingrossamento delle infiorescenze	55	F
Infiorescenze completamente sviluppate	57	G-H
Stadio principale di crescita 6: Fioritura		
Inizio della fioritura: il 10% delle caliptré è caduto	61	I
Il 30% delle caliptré è caduto	63	
Piena fioritura: il 50% delle caliptré è caduto	65	
L’80% delle caliptré è caduto	68	
Stadio principale di crescita 7: Sviluppo dei frutti		
Inizio ingrossamento acini	71	J
Acini nelle dimensioni di un granello di pepe (mignolatura)	73	
Acini delle dimensioni di un pisello (sviluppo del grappolo)	75	K
Gli acini cominciano a toccarsi (pre-chiusura grappolo)	77	L
Stadio principale di crescita 8: Maturazione dei frutti		
Inizio della maturazione: le bacche iniziano a manifestare il colore tipico della cultivar	81	M
I grappoli sono maturi per la raccolta	89	N
Stadio principale di crescita 9: Senescenza, inizio della dormienza		
Dopo la raccolta; fine della maturazione del legno	91	O

Oltre all'analisi fenologica, durante le stagioni vegetative delle annate 2006 e 2007 sono

state effettuati dei rilievi biometrici per studiare l'andamento della crescita e della strategia di ripartizione della sostanza secca della vite dal germogliamento alla raccolta. In particolare i campionamenti hanno avuto un intervallo settimanale nelle prime fasi di intensa crescita vegetativa (germogliamento – invaiatura) ed una volta raggiunta la massima superficie fogliare gli intervalli sono aumentati a 15 giorni (invaiatura – raccolta). Le misure sono state effettuate su un campione casuale di 15 germogli ed è stata effettuata differenziazione tra l'asse principale e gli assi secondari. In particolare sono state effettuate misure di:

- crescita vegetativa:
 - i area fogliare (cm²) asse principale e secondario
 - ii lunghezza del germoglio (cm) asse principale e secondario
- crescita del grappolo e di un sub-campione di 100 acini:
 - i peso fresco (g)
 - ii volume (ml)
 - iii peso secco (g)
- ripartizione della sostanza secca (asse principale / secondario):
 - i foglie (g) asse principale e secondario
 - ii legno (g) asse principale e secondario
 - iii grappolo (g)

2.3.1 Misure di area fogliare

Le misure di area fogliare sono state effettuate mediante metodi diretti (campionamento distruttivo) e metodi indiretti (ottici).

I metodi diretti hanno previsto il campionamento distruttivo e la misura dell'area delle foglie e delle femminelle del germoglio campione. Le misure sono state condotte per la maggior parte nel medesimo giorno del prelievo al fine di evitare il disseccamento della lamina fogliare oppure nel giorno successivo previa conservazione dei campioni in cella frigorifera a 5°C. La misura dell'area è stata effettuata mediante l'utilizzo di un software di analisi d'immagine *open-source* (Image Tool) con cui si è convertita l'informazione digitale (*pixels*) in una misura di area (cm²) mediante opportuna calibrazione del sistema.

Le misure di area fogliare per via indiretta non distruttiva sono state effettuate mediante lo strumento LAI-2000 (Licor). Una misura effettuata con Lai-2000 consiste in un minimo di dieci numeri: cinque provengono dai segnali dei cinque rilevatori del sensore ottico posizionato sotto la vegetazione, gli altri cinque dalle letture fatte con il sensore sopra-chioma. Quindi dalla differenza tra i valori misurati sopra- e sotto-chioma si ottengono cinque valori di trasmittanza. Dalle trasmittanze dei cinque angoli zenitali ottenute, il sistema LAI-2000 calcola l'ammontare delle foglie (LAI) e l'orientazione fogliare media (MTA).

Lo strumento è formato da due parti: il sensore ottico LAI-2050 e l'unità di controllo LAI-2070. Il LAI-2050 usa una lente *fish-eye* con un campo visivo emisferico

con angolo zenitale di 74° (campo visivo = 148°) per proiettare la radiazione su un rilevatore. L'uso di questa lente assicura che i calcoli di LAI si basino su un ampio campione di fogliame. Il rilevatore è formato da cinque rilevatori più piccoli posizionati in anelli concentrici. Quando la radiazione si proietta sul rilevatore, ogni anello vede una differente banda angolare con angolo zenitale centrale di 7° , 23° , 38° , 53° , 68° . Il LAI-2070 contiene un microcomputer interno usato per raccogliere i dati che provengono dal sensore e per compiere dei calcoli. Dopo l'ultima lettura, il LAI e gli altri parametri vengono calcolati ed i dati sono salvati in una file nella memoria principale.

I sistema LAI-2000 ha richiesto una calibrazione in campo per determinare quale protocollo di misura fosse più affidabile. Per questo motivo sono stati testati quattro protocolli di misura ottenuti dalla bibliografia per la misura del LAI in vigneto (JOHNSON & PIERCE, 2004; PATAKAS & NOITSAKIS, 1999; OLLAT ET AL., 1998; SOMMER & LANG, 1994). Le misure con il sistema LAI-2000 sono state effettuate in condizioni di radiazione diffusa (cielo nuvoloso) per evitare la presenza di radiazione diretta in grado di falsare i dati raccolti dal sensore ottico. Le misure sono state condotte utilizzando due strumenti LAI-2000 opportunamente sincronizzati: uno è stato mantenuto sopra-chioma in modalità di controllo remoto ed uno sotto-chioma con cui sono stati effettuati i diversi transetti previsti dai protocolli.

Le differenze tra i diversi protocolli di misura utilizzati (Tabella 4) hanno riguardato la modalità con cui è stato effettuato il transetto di misura in termini delle variabili:

- altezza del sensore da terra: terreno (GR), cordone (CORD);
- direzione del transetto rispetto al filare: parallelo (PARAL), perpendicolare (PERP), diagonale (DIAG);
- numero di dati raccolti lungo il transetto e relativo intervallo;
- angolo di azimuth del sensore ottico rispetto al filare: parallelo (PARAL), perpendicolare (PERP), diagonale (DIAG);
- copertura utilizzata per ridurre l'angolo di vista campo del sensore ottico.

Tabella 4 Confronto tra quattro diversi protocolli di determinazione del LAI con metodi indiretti in vigneto.

Diversi protocolli testati con il sistema LAI-2000						
N°		Orientamento transetto	Altezza sensore	intervallo log (cm)	Angolo copertura sensore	Orientamento sensore
A	1	DIAG	GR	60	45°	PARAL
	2	DIAG	GR	60	45°	PERP
JOHNSON & PIERCE, 2004						
B	1	PERP	GR	30	45°	PARAL
	2	PERP	CORD	30	45°	PARAL
	3	DIAG	GR	15	45°	PARAL
	4	DIAG	GR	15	45°	PERP
	5	DIAG	CORD	15	45°	PARAL
	6	DIAG	CORD	15	45°	PERP
PATAKAS & NOITSAKIS, 1999						
C	1	PARAL	GR	20	45°	PERP
	2	DIAG	GR	20	45°	DIAG
OLLAT <i>et al.</i> , 1998						
D	1	PERP	GR	30	45°	PARAL
	2	DIAG	GR	15	45°	PARAL
SOMMER & LANG, 1994						

I valori di LAI sono stati ottenuti mediante post-processing con l'ausilio del software FV2000 (Licor) che ha effettuato il *merging* tra le registrazioni eseguite sottochioma e quelle effettuate sopra-chioma più vicine temporalmente. I valori di LAI

ottenuti dai diversi protocolli di misura sono stati confrontati con il LAI ottenuto per via distruttiva nella medesima giornata su una pianta rappresentativa. L'apparato fogliare è stato raccolto in maniera differenziata tra 5 strati di foglie: < 150 cm, 150-170 cm, 170-190 cm, 190-210 cm, 210-230 cm, > 230 cm. Per ogni strato fogliare è stato determinato il LAI con metodo diretto (software di analisi d'immagine) ed è stato ottenuto il peso secco (stufa a 105°C).

2.3.2 Peso fresco e volume grappolo

Dalla fase fenologica di invaiatura fino alla maturazione si è provveduto a seguire attentamente la crescita del grappolo in termini di peso fresco e volume e lo stesso è stato fatto per un sub-campione di 100 acini, parametro normalmente utilizzato per tale studio. In particolare il peso fresco è stato misurato sia sul grappolo intero che sul campione di 100 acini mediante una bilancia di precisione. Mentre la misura del volume è stata effettuata indirettamente per immersione in un volume noto di acqua. La preparazione del campione di 100 acini è stata effettuata mantenendo il pedicello al fine di evitare perdite di succo.

2.3.3 Misure di peso secco

Tutto il materiale separatamente misurato in lunghezza (tralcio), area (foglie) e peso fresco/volume (grappoli) è stato sistemato in vaschette di alluminio numerate e precedentemente pesate che sono state introdotte in una stufa da laboratorio a temperatura di 105°C per un minimo di 48 ore fino al raggiungimento di un peso costante.

2.4 ANALISI DEGLI ASPORTI

Per arrivare alla determinazione del bilancio tra le crescite e le asportazioni della vite, oltre allo studio delle crescite, si sono seguite le diverse asportazioni effettuate durante le annate 2006 e 2007 mediante le pratiche colturali. In particolare il vigneto è gestito interamente meccanicamente sia per quanto riguarda la potatura invernale che gli interventi in verde e la raccolta.

La potatura invernale è stata eseguita nella prima metà del mese di marzo per entrambe le annate mediante una cimatrice meccanica (a due barre: una verticale ed una orizzontale) ed è stata seguita da una rifinitura manuale mediante forbici pneumatiche lasciando sul cordone permanente speroni di 2 - 3 gemme. In entrambe le annate in concomitanza con gli interventi di potatura sono state preventivamente potate con la medesima intensità 10 piante scelta casualmente nel vigneto e sono stati raccolti i residui di potatura. I residui sono stati misurati in lunghezza mantenendo la distinzione tra asse principale e secondario, è stato contato il numero di nodi per germoglio e previo disseccamento in stufa a 105°C è stato determinato il peso secco.

La gestione in verde è stata eseguita durante entrambe le annate attraverso intervento di cimatura, defogliazione e spollonatura meccanica, tali interventi sono stati campionati come effettuato per la potatura invernale al fine di conoscere l'asportazione effettuata mediante l'operazione colturale. In particolare la spollonatura è stata eseguita meccanicamente ad inizio stagione e in entrambe le annate nel medesimo giorno è stato effettuato il medesimo intervento su un numero di 10 piante campione, i residui sono stati raccolti e pesati previa essiccazione in stufa a 105°C. Gli interventi di cimatura e

defogliazione sono stati eseguiti in maniera combinata dalla stessa macchina scavallante (TRINOVA) utilizzata per i trattamenti e la raccolta munita di modulo per la cimatura. In particolare l'intervento di cimatura e defogliazione è stato eseguito 2-3 volte durante la stagione in entrambe le annate per controllare lo sviluppo della vegetazione e mantenere un portamento assurgente dei germogli che nel cordone libero mobilizzato, non essendo legati e "palizzati", tenderebbero rapidamente a ricoprire l'interfila. Anche in questo caso nel medesimo giorno sono state cimate manualmente 5 piante con la medesima intensità dell'intervento meccanico ed è stata determinata la quantità di sostanza secca asportata con l'intervento.

Il vigneto allevato a cordone libero mobilizzato è stato pensato per effettuare la raccolta mediante vendemmiatrice scavallante per scuotimento verticale, consentendo ridotte perdite per "ammostamento" ed una elevata efficienza del cantiere di lavoro. In entrambe le annate a maturazione è stata raccolta la produzione di 1 pianta intera per determinare la produzione per ettaro ed allo stesso tempo l'asporto effettuato mediante l'operazione. I grappoli raccolti sono stati disseccati in stufa ed è stata determinata la sostanza secca asportata mediante l'intervento di raccolta.

2.5 CRESCITA DEL COTICO

Per arrivare a conoscere completamente il bilancio delle crescite ed asportazioni riferiti al metro quadrato di vigneto, oltre a seguire l'andamento delle crescite ed asportazioni delle piante di vite, è stato necessario estendere l'analisi al metro quadrato di coticco erboso. L'inerbimento permanente dell'interfila, infatti, è stato sottoposto a

sfalcio meccanico durante l'intera stagione vegetativa (4-5 interventi). Durante le date di campionamento della crescita della vite è stata anche eseguita la raccolta del cotico presente sul metro quadro di suolo per conoscere l'ammontare della sostanza secca durante la stagione. Nel medesimo giorno in cui sono stati eseguiti gli interventi di sfalcio, si è effettuata una raccolta anticipata su tre campioni di un metro quadro di suolo scelto casualmente nell'interfilare mediante lancio di una cornice di metallo delle dimensioni di 50 x 50 cm. su 3 ripetizioni. Su questi campioni si è provveduto a simulare l'effetto di un intervento di sfalcio sul metro quadrato in modo da conoscere l'asportazione dovuta all'intervento colturale. Il campione raccolto è stato poi seccato in laboratorio in una stufa a 105° fino al raggiungimento del peso secco costante.

2.6 BILANCIO DEL CARBONIO (crescite/asporti)

Le misure di crescita e delle asportazioni raccolte durante le annate 2006 e 2007 hanno consentito lo studio del bilancio del carbonio della vite e del metro quadrato di vigneto. Per questo motivo è stata spiantata una pianta intera nell'estate 2007 nel momento di massimo sviluppo dell'area fogliare della vite con l'obiettivo di quantificare il rapporto tra i diversi organi della pianta sia per quanto riguarda la parte epigea (foglie, tralci, grappoli, cordone) che la parte ipogea (radici). In particolare l'apparato radicale è stato suddiviso in funzione del diametro delle radici in 4 classi:

- radici fini = diametro < 0.25 cm
- radici sottili = $0.25 < x < 0.5$ cm
- radici medie = $0.5 < x < 1$ cm

- radici grosse = > 1cm

I campioni prelevati sono stati pesati previo disseccamento in stufa a 105°C per la determinazione della ripartizione della biomassa secca tra i diversi organi. Ogni campione è stato poi analizzato in laboratorio per la determinazione del contenuto di azoto organico (metodo Kjeldahl) e di carbonio (metodo Walkley Black). Le stesse analisi sono state effettuate su un campione di cotico sfalcio per quantificare l'asportazione dell'operazione di sfalcio nel conto del bilancio del carbonio riferito al metro quadrato di vigneto.

2.7 LA SCALA FOGLIARE

2.7.1 Modelli biochimici delle reazioni fotosintetiche

Per arrivare alla caratterizzazione della risposta fotosintetica delle piante alle diverse condizioni ambientali e per capire quale sia il ruolo della vegetazione nel rimuovere il biossido di carbonio dall'atmosfera, è stato necessario formulare dei modelli a diversa scala spaziale, capaci di stimare l'assimilazione di CO₂ in funzione delle diverse specie vegetali e dei principali parametri ambientali quali la temperatura, la concentrazione di biossido di carbonio, la radiazione luminosa, la disponibilità di acqua e di nutrienti. Lo studio della risposta fisiologica di diverse specie vegetali in diverse condizioni ambientali e climatiche impone la necessità di formulare modelli che siano realmente fondati (modelli di tipo *meccanicistico*) dal punto di vista fisico, biologico ed ecofisiologico. L'utilizzo di modelli di tipo empirico, basati su relazioni non fisicamente fondate, non permette di ottenere dei dati che siano attendibili e, pertanto,

rappresentativi del comportamento della specie vegetale e, per tale motivo, vanno utilizzati con molta attenzione per lo studio della risposta fisiologica delle piante alle variabili ambientali. I modelli devono essere inoltre in grado di predire gli effetti nel breve e lungo periodo dei cambiamenti ambientali sulle specie vegetali.

Il flusso di carbonio all'interno della biosfera è controllato principalmente dalla attività globale dell'enzima Rubisco (ribulose-1.5-bisfosfato) (FALKOWSKY ET AL., 2000; COX ET AL., 2000). La gran parte dell'assimilazione della CO₂ globale avviene da parte delle piante a metabolismo C₃ nelle quali la Rubisco opera con efficienze di carbossilazione relativamente ridotte, in aggiunta all'inibizione dell'O₂ e all'inadeguatezza della CO₂ come substrato (SPREITZER & SALVUCCI, 2002). I biologi vegetali hanno cercato, per decenni, di modellizzare il processo di fotosintesi per cercare di capire meglio i meccanismi di controllo, e per prevedere l'effetto delle emissioni delle serre, del riscaldamento globale, della resa delle piante e della produttività della biosfera. Recentemente l'interesse della modellistica si è spostato sulle risposte dei diversi biomi al cambiamento globale a cui stiamo assistendo in questi anni (BALDOCCHI & WILSON, 2001) e sulle tecniche di manipolazione genetica per ottenere una pianta con caratteristiche migliori (SPREITZER & SALVUCCI, 2002).

Negli anni settanta si sono sviluppate due scuole di pensiero riguardo la modellizzazione della fotosintesi a livello biochimico. I primi modelli (VAN BAVEL, 1975; KU & EDWARDS, 1977; HALL, 1979) hanno dimostrato che l'assimilazione della CO₂ *in vivo* deve riflettere la disponibilità simultanea dei due substrati: RuBP e CO₂, l'O₂ nel suo ruolo di ossidazione, e le cinetiche dell'enzima Rubisco. Gli effetti

dell'ambiente, come l'irradiazione, l'intensità dei *sink*, la temperatura, l'umidità e la disponibilità di nutrienti, possono essere capiti e modellizzati mediante lo studio dell'effetto combinato della disponibilità di CO₂ e del substrato RuBP, e della cinetica della Rubisco. I sostenitori di questa scuola di pensiero di *un solo enzima* dimostrarono che questo approccio era robusto poiché fondato su una teoria biochimica e centrarono la loro attenzione sulla previsione dell'assimilazione della CO₂ sulla sola reazione della Rubisco, con i suoi *input* ed *output*, piuttosto che distribuire il controllo della reazione su diversi livelli.

I modelli successivi hanno enfatizzato la duplice valenza che esiste tra la capacità della Rubisco di consumare RuBP, e la capacità della “maturazione” della radiazione luminosa, del trasporto elettronico e del ciclo di Calvin di rigenerare il RuBP (FARQUHAR ET AL., 1980; SHARKEY, 1985). In contrasto con questi modelli “*a due sistemi*”, il modello a “*singolo enzima*” è stato criticato per una sua maggiore complessità e per una sostanziale incertezza nel tempo.

Farquhar e i successivi co-autori hanno basato il loro modello “a due sistemi” sull'assunzione che la reazione di carbossilazione riflettesse il minimo:

- a) della capacità dell'enzima Rubisco di consumare il RuBP (la fase di rapida crescita della curva di risposta alla CO₂);
- b) oppure della velocità di rigenerazione del RuBP (la fase di “plateau” della curva di risposta alla CO₂), in quanto determinata dalla velocità del trasporto elettronico.

Il modello originario di Farquhar ricevette un supporto sperimentale iniziale immediatamente dopo il suo sviluppo (VON CAEMMERER & FARQUHAR, 1981; SHARKEY, 1985). Da allora è stato utilizzato per una grande varietà di applicazioni, spaziando dalla manipolazione anti-senso a scala di singolo enzima (VON CAEMMERER ET AL., 1994; WHITNEY ET AL., 1999) alla modellizzazione a scala globale dei cambiamenti dei flussi di carbonio (KADUK & HEIMANN, 1997; BALDOCCHI & WILSON, 2001), fino ai cambiamenti globali della concentrazione di ozono e nella fotosintesi (WOODWARD ET AL., 1994, 1995).

Nonostante il suo successo, persistono delle limitazioni nel potere di predizione del modello “a due sistemi”. Il modello è stato considerato essere di tipo Blackman (1905) in natura, causando un brusco cambiamento che richiese l'introduzione di coefficienti empirici di correzione come il fattore di convessità per generare una “dolce” transizione che rifletta uno spostamento del controllo dalla Rubisco al *pathway* di rigenerazione del RuBP, limitato da un empirico J_{max} (COLLATZ ET AL., 1990; DE PURY & FARQUHAR, 1997; VON CAEMMERER, 2000).

Blackman (1905) propose che la fotosintesi fosse sempre limitata dalla luce “o” dalla CO₂ e che c'erano poche condizioni in cui la fotosintesi potesse rispondere simultaneamente alla CO₂ e alla luce. Fåhræus (1960) collegò questa idea alla Legge di Liebig del minimo nei processi ecologici, e dal momento che la Legge di Liebig venne facilmente confutata, Fåhræus ritenne che l'ipotesi di Blackman fosse sospetta. Quando viene considerata la crescita di una coltura o di una piantagione, è impossibile estrapolare un unico fattore limitante per l'intero processo. L'abilità nell'utilizzo della

luce dipende dalla nutrizione di azoto; l'abilità nell'utilizzo della CO_2 è funzione della disponibilità idrica (SHARKEY, 1985). Anche se viene considerata la performance fotosintetica di una singola foglia, è da aspettarsi che quando la foglia viene fortemente limitata da un singolo componente dell'intero processo di fotosintesi, e non da altri processi, la capacità della foglia venga riadattata. Conseguentemente le potenzialità della foglia nei confronti degli altri processi vengono abbattute e parallelamente vengono aumentate le risorse utilizzate per aumentare la capacità di utilizzo del processo limitante. Nella scala temporale di una settimana o anche di giorni, quindi, sarebbe difficile parlare di una foglia limitata interamente da un processo o da un altro. Tuttavia, se consideriamo la risposta istantanea della velocità di assimilazione della CO_2 per aumentare la pressione di CO_2 , è possibile considerare la velocità limitata o solo dall'enzima Rubisco o solo dalla rigenerazione del RuBP. Questa situazione è quella che dà luogo a ciò che Van den Horten (1930) chiamò "la curva ideale di Blackman".

Farquhar (1980) dimostrò che quando la fotosintesi è limitata dalla luce, dovrebbe ancora rispondere ai cambiamenti nella concentrazione di CO_2 , e in alcune ragionevoli condizioni la fotosintesi può essere limitata dalla luce all'interno del *range* di 50-500 μbar CO_2 . Di conseguenza non possiamo più parlare di limitazioni della luce e della CO_2 separatamente, ma è possibile descrivere, in termini biochimici aggiornati, le idee dei precedenti ricercatori. È necessario quindi parlare di limitazione della Rubisco e limitazione nella rigenerazione del RuBP.

2.7.2 Modello di fotosintesi di Farquhar

Nel 1983 Roberts e Whitehouse (1983) dimostrarono che la fotosintesi non è limitata da un singolo fattore, ma piuttosto dall'interazione di vari fattori, quali l'intensità luminosa, la temperatura, la concentrazione di biossido di carbonio. Analizzando le foglie di faggio (*Fagus sylvatica* L.) essi trovarono infatti che, per una data concentrazione di CO₂, l'assimilazione era direttamente proporzionale all'energia luminosa fornita, fino al raggiungimento di un valore di soglia oltre il quale l'attività fotosintetica tendeva a raggiungere un valore massimo costante. Inoltre all'aumentare del valore di CO₂ impostato per le misure, cresceva anche il valore di fotosintesi massima raggiungibile ad elevati valori di luce.

La risposta fotosintetica delle foglie al variare delle condizioni ambientali è stata analizzata e modellizzata da diversi autori (FARQUHAR, 1980; FARQUHAR ET AL., 1980); VON CAEMMERER & FARQUHAR, 1981; SHARKEY, 1985; HARLEY & SHARKEY, 1991; HARLEY ET AL., 1992). Il modello di fotosintesi di Farquhar è un modello di tipo cinetico-metabolico, simile per certi versi al modello di Michaelis-Menten, dal quale per altro prende le premesse per poi descrivere la cinetica della carbossilazione ed in modo particolare le reazioni tra carbossilazione e ossidazione svolte dalla Rubisco nel cloroplasto. Le equazioni originali del modello erano basate solamente su processi a livello cellulare (FARQUHAR, 1980), ma il modello è stato successivamente applicato ad intere foglie, piante ed interi ecosistemi (VON CAEMMERER ET AL., 1994; WHITNEY ET AL., 1999; SCHULTZ, 2003; KADUK & HEIMANN, 1997; BALDOCCHI & WILSON, 2001; WOODWARD ET AL., 1994, 1995).

Sulla base del modello è possibile descrivere l'attività fotosintetica delle piante con equazioni relativamente semplici e con un numero ridotto di parametri fisicamente ed eco fisiologicamente fondati, stimabili dall'analisi dei dati sperimentali di scambio gassoso. Il tasso di organizzazione del biossido carbonio è regolato da diversi fattori:

- i. L'attività della ribulosio-bifosfato-carbossilasi (Rubisco), l'enzima che catalizza la reazione di carbossilazione e costruisce circa il 50% delle proteine totali dei cloroplasti, rappresentando quindi l'enzima più abbondante della biosfera;
- ii. La concentrazione della CO_2 e dell'antagonista O_2 : la Rubisco funziona infatti anche come ossigenasi incorporando l'ossigeno molecolare nel ribulosio bifosfato con formazione di fosfoglicolato e fosfoglicerato. Questo fenomeno è accentuato in presenza di elevata intensità luminosa e prende il nome di *fotorespirazione*;
- iii. La concentrazione di ribulosio-1.5-bifosfato (RuBP), il substrato al quale viene legata la molecola di CO_2 , da cui derivano le due molecole di acido 3-fosfoglicerico, che costituisce il primo prodotto stabile delle fotosintesi nelle piante a "metabolismo C_3 ";
- iv. Il trasporto elettronico che fornisce l'energia chimica;
- v. La temperatura; come in tutti i processi biochimici la risposta alla temperatura ha una forma a campana asimmetrica, con un massimo ad una determinata soglia oltre la quale si ha una brusca inibizione.

In base al modello di Farquhar e successive modifiche, l'assimilazione fotosintetica netta (A_n) può essere espressa mediante la seguente equazione:

$$A_n = V_c - V_o - R_{day} = V_c \left(1 - \frac{0.5O}{\tau C_i} \right) - R_{day} \quad [\text{eq. 9}]$$

dove V_c V_o sono rispettivamente la velocità di carbossilazione e ossigenazione dell'enzima Rubisco; τ è il fattore di specificità della Rubisco (JORDAN & OGREN, 1984); O è la concentrazione di O_2 nello stroma; R_{day} rappresenta la respirazione mitocondriale dei tessuti della foglia, al netto del contributo della fotorespirazione (BROOKS & FARQUHAR, 1985) può essere stimata usando le equazioni del modello oppure tramite misure sperimentali (PARSONS, 1997).

Il fattore di specificità della Rubisco (τ) è stato introdotto da Jordan e Ogren analizzando *in vitro* piante di spinacio a varie temperature (da 18 a 32°C); il calcolo di tale fattore è stato nuovamente eseguito *in vitro* da Ghashghaie e Cornic (1994) su *Phaseolus vulgaris* L. ed è stata trovata una precisa corrispondenza tra le due serie di valori entro un largo *range* di temperature (18-32°C).

- *Fase I*: Il modello di Farquhar descrive l'assimilazione fotosintetica in condizioni stazionarie di tutti i parametri ambientali ed in particolare la risposta al variare della concentrazione interna di CO_2 (C_i) che si può suddividere in tre fasi ben distinte: per concentrazioni inferiori a 200 ppm l'assimilazione è limitata solamente dall'attività di carbossilazione /ossigenazione dell'enzima Rubisco, in quanto il Ribulosio-1.5-bifosfato (RuBP), l'altro substrato della reazione di carbossilazione, è presente in

quantità eccedente la capacità massima dell'enzima. In queste condizioni l'assimilazione aumenta linearmente all'aumentare della concentrazione interna di CO_2 .

- *Fase II*: La parte di curva con crescita più lenta, oltre il punto di transizione, rappresenta la seconda fase, nella quale è il rifornimento di RuBP a rappresentare il fattore limitante. La maggior parte delle piante C_3 evidenziano un'attività fotosintetica che ha il punto di transizione per un valore di C_i vicino a quello in cui le piante vivono naturalmente (200-250 ppm), circa 2/3 della concentrazione atmosferica (350-400 ppm).
- *Fase III*: la terza fase è la parte asintotica della curva a concentrazione interna di CO_2 saturanti, nella quale la rigenerazione del fosfato inorganico limita il processo. Queste condizioni sono difficilmente ottenibili in natura.

Effettuando misure di scambio gassoso, in condizioni di luce saturanti ed a temperatura costante è possibile, variando la concentrazione di CO_2 e misurando nel contempo la variazione dell'assimilazione fotosintetica, stimare i seguenti parametri biochimici importanti per la modellizzazione:

1. $V_{c_{max}}$ = esprime la velocità massima di carbossilazione da parte della Rubisco, data dalla pendenza iniziale della curva;
2. J_{max} = la velocità massima del trasporto elettronico in condizioni di luce saturante;

3. **TPU** = la velocità dell'utilizzo dei trioso-fosfati, che indica la disponibilità di fosfato inorganico per il ciclo di Calvin (SHARKEY, 1985).

Combinando l'equazione precedente con il concetto che è il minimo dei tre fattori (attività della Rubisco, W_c ; rigenerazione del RuBP, W_j e rigenerazione del fosfato inorganico, W_p) a limitare l'assimilazione della CO_2 , si ottiene la seguente espressione:

$$A_n = \left(1 - \frac{0.5O}{\tau C_i}\right) \min\{W_c, W_j, W_p\} - R_{day} \quad [\text{eq. 10}]$$

Se la velocità di carbossilazione è limitata solamente dall'attività della Rubisco (quantità, stato di attivazione, proprietà cinetiche), la carbossilazione segue la cinetica di Michaelis Menten descritta dalla seguente equazione:

$$W_c = \frac{V_{cmax} C_i}{C_i + K_c(1 + O/K_o)} \quad [\text{eq. 11}]$$

dove K_c e K_o sono rispettivamente le costanti di Michaelis-Menten della Rubisco per la CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) e l' O_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$), ed O è la concentrazione di O_2 nello stroma ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). Questa condizione si verifica a basse concentrazioni di C_i ($< 200 \mu\text{mol mol}^{-1}$) ed in condizioni di elevata irradianza ($> 1500 (\mu\text{mol fotoni m}^{-2}\text{s}^{-1})$). Per le piante a metabolismo C_3 (come la vite) i valori di K_c e K_o sono pressoché costanti in quanto caratteristica specifica dell'enzima Rubisco.

Se invece è il trasporto elettronico a limitare la fotosintesi attraverso la rigenerazione del RuBP, la carbossilazione è espressa dalla seguente equazione:

$$W_j = \frac{JC_i}{4(C_i + O/\tau)} \quad [\text{eq. 12}]$$

dove J è la velocità potenziale del trasporto elettronico, τ è il fattore di specificità della Rubisco (JORDAN & OGREN, 1984) ed il fattore 4 indica che per formare sufficiente ATP e NADPH per rigenerare il RuBP servono 4 elettroni (FARQUHAR & VON CAEMMERER, 1982). Questa condizione si verifica ad elevate concentrazioni di C_i (intorno ai 1000 ppm), quando l'assimilazione osservata è ancora leggermente sensibile alla concentrazione di CO_2 (KIRSCHBAUM ET AL., 1998).

La velocità potenziale del trasporto elettronico J si calcola utilizzando la relazione empirica (HARLEY ET AL., 1992):

$$J = \frac{QE * I}{\sqrt{1 + \left(\frac{QE * I}{J_{max}}\right)^2}} \quad [\text{eq. 13}]$$

dove QE (resa quantica) è l'efficienza di conversione della luce ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ / $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); J_{max} è la velocità massima del trasporto elettronico in condizioni di luce saturante; I è la radiazione incidente. Combinando le equazioni si ricava:

$$J = (W_j + R_{day})4 \frac{C_i + 2\Gamma}{C_i - 2\Gamma} \quad [\text{eq. 14}]$$

dove Γ^* ($\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) rappresenta il punto di compensazione della CO_2 . I valori di J_{max} e R_{day} possono essere ricavati da dati sperimentali.

Se, in ultima analisi, la carbossilazione è limitata dalla rigenerazione del fosfato inorganico si ottiene:

$$W_p = 3TPU + 0.5V_o = 3TPU + \frac{V_c 0.5O}{\tau C_i} \quad [\text{eq. 15}]$$

dove V_o è la velocità di ossigenazione della Rubisco (HARLEY & TENHUNEN, 1991). Questo tipo di limitazione fotosintetica avviene ad alta radiazione luminosa e ad elevata concentrazione di CO_2 (WULLSCHLEGER, 1993). Essa diventa importante nel caso in cui l'utilizzazione dei trioso-fosfati nella produzione di amido e saccarosio non riesca a fronteggiare la produzione degli stesso durante il ciclo di Calvin. Di conseguenza la disponibilità di fosfato inorganico diventa il fattore limitante nell'assimilazione del carbonio.

2.7.3 Attività sperimentali a scala fogliare

Per caratterizzare la risposta fotosintetica della vite al variare delle condizioni ambientali, sono state eseguite misure di scambio gassoso a livello fogliare. Per tutti gli esperimenti condotti nel 2006 e nel 2007 le misure sono state ottenute seguendo un protocollo standardizzato con il sistema portatile LI-COR LI-6400 (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), che impiega una tecnica di lettura della concentrazione di gas all'infrarosso non dispersiva. Lo strumento permette il controllo preciso dei parametri ambientali (concentrazione di CO_2 , temperatura, VPD) ed offre inoltre la possibilità di creare ed eseguire automaticamente protocolli di misura complessi. Il sistema è in grado in automatico di eseguire dei controlli in *real-time* della variabilità/stabilità nel tempo della serie di dati, consentendo di impostare l'esecuzione del protocollo in funzione del

raggiungimento di una soglia minima di stabilità nel tempo (errore standard, deviazione standard, coefficiente di variazione). Lo strumento è estremamente portatile per il suo utilizzo in condizioni di campo e si compone di:

- console di controllo dotata di schermo LCD e tastiera;
- registratore di dati (*datalogger*) automatico per il salvataggio dei parametri di configurazione ed i dati ottenuti dalle misure;
- due analizzatori di gas all'infrarosso (*Infra-Red Gas Analyzers*: IRGAs) per l'anidride carbonica e per l'acqua;
- la camera di misura è di tipo Parkinson con dimensione di 2 x 3 cm (6 cm²);
- una pompa di flusso che permette il controllo dell'aria in ingresso ed in uscita.

L'aria in ingresso può essere condizionata mediante l'azione due tubi contenenti uno SODA-Lime e l'altro DRIERITE per il controllo rispettivamente della concentrazione della CO₂ e della H₂O;

- due analizzatore di gas (IRGA) per la CO₂ e per l'H₂O di tipo aperto differenziale con due celle: una di riferimento (*reference*) ed una condizionata dalla risposta del campione (*sample*);
- la camera fogliare può essere condizionata completamente in termini di:
 - i **temperatura dell'aria** mediante due celle Peltier
 - ii **intensità di radiazione fotosinteticamente attiva** (PAR) mediante una sorgente luminosa (LED) fredda in modo da non sconvolgere il regime termico impostato all'interno della camera fogliare

- iii **concentrazione di CO₂** con un mixer che utilizzando bombole di CO₂ da 12 g è in grado di mantenere costante la concentrazione di CO₂ in ingresso al valore impostato
- iv **concentrazione di vapore d'acqua** dell'aria all'interno della camera fogliare. Il sistema può essere impostato su un determinato valore di VPD (kPa) o U.R. (%) ed automaticamente attraverso un sistema di pompe viene condizionata l'aria in ingresso al fine di mantenere quel valore impostato all'interno della camera.

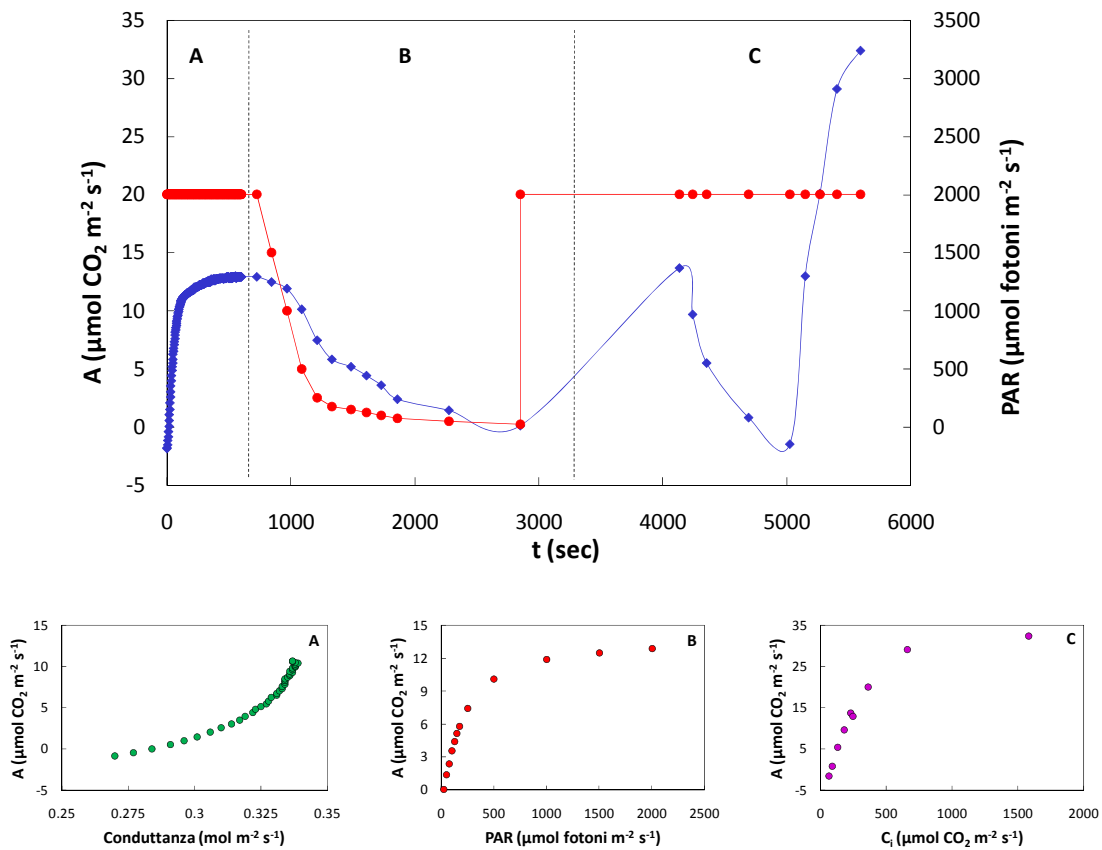


Figura 6 Protocollo utilizzato per le misure di scambio gassoso a scala fogliare. Il protocollo è stato suddiviso in quattro fasi: adattamento della foglia al buio e successiva curva Assimilazione / conduttanza (A); curva di luce A/Q (B); curva A/C_i (C).

2.7.4 Protocollo di misura

Le misure sono state effettuate entrambe le annate su una stessa foglia che è stata seguita durante tutta la stagione vegetativa, da quando ha raggiunto la forma espansa fino a fine stagione. Questa scelta ha permesso di osservare l'andamento della risposta fotosintetica di una singola foglia nei riguardi delle variabili ambientali eliminando così alcune fonti di variabilità come la posizione della foglia sul germoglio e quindi la sua natura (foglia di luce o di ombra), concentrandosi invece nel solo processo di invecchiamento della foglia che è stato messo in relazione con l'andamento meteorologico e con il comportamento di crescita e ripartizione della pianta.

Tabella 5 Parametrizzazione del sistema LI-6400 utilizzata nelle diverse fasi del protocollo di misura.

Valori impostati nel protocollo di misura a scala fogliare			
<i>Parametri mantenuti durante tutto il protocollo</i>			
VPD	kPa	1.5	
Temperatura aria	°C	25	
<i>Parametri impostati per le singole fasi</i>			
<i>Fase I (adattamento al buio)</i>			
[CO ₂]	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	350	
PAR	μmol fotoni m ⁻² s ⁻¹	0	
<i>Fase II (curva A / cond)</i>			
[CO ₂]	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	350	
PAR	μmol fotoni m ⁻² s ⁻¹	1500	
<i>Fase III (curva A / Q)</i>			
[CO ₂]	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	350	
PAR	μmol fotoni m ⁻² s ⁻¹	2000, 1500, 1200, 1000, 750, 500, 250, 150, 100, 75, 50, 20	
<i>Fase IV (curva A / C_i)</i>			
[CO ₂]	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	350, 200, 100, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000	
PAR	μmol fotoni m ⁻² s ⁻¹	2000	

Il protocollo di misura seguito per l'analisi fisiologica delle foglie di vite fa riferimento al metodo proposto da Parsons *et al.*, (1997), che prevede quattro fasi sperimentali successive della durata complessiva di circa un'ora e mezza. Durante il protocollo di misura la foglia viene sottoposta a diverse condizioni di illuminazione e di concentrazione di CO₂, condizioni che permettono di studiarne la risposta fotosintetica al variare delle condizioni ambientali. Le diverse fasi sono state illustrate in (Figura 2) ed i valori impostati per ciascuna fase sono riportati in (Tabella 5) . Di seguito sono descritte nel dettaglio e nel loro significato:

I. Adattamento della foglia al buio

In questa fase la foglia lasciata al buio per 30 minuti, chiude gli stomi e la conduttanza stomatica raggiunge valori minimi.

II. Risposta foto sintetica in funzione della conduttanza stomatica

La foglia viene sottoposta condizioni di luce saturanti, superiori a 1300 $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. In questa fase gli stomi si riaprono e si raggiungono valori massimi di conduttanza stomatica e di fotosintesi per le condizioni di temperatura e di CO₂ imposte. Esaminando i dati di assimilazione in funzione della conduttanza stomatica è possibile valutare come quest'ultima possa limitare la fotosintesi. I fattori più importanti che regolano la conduttanza stomatica sono la temperatura, l'umidità dell'aria, l'assimilazione, la radiazione ed i ritmi endogeni.

III. Curva di fotosintesi in funzione della luce (curva A/Q)

Questa misura serve a stimare l'efficienza del sistema foto sintetico al variare delle condizioni di illuminazione ed è ottenuta registrando il valore di assimilazione a diversi livelli di radiazione incidente. L'intensità luminosa all'interno della camera di misura viene fatta decrescere da 2000 a 0 $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e si registra il valore di respirazione in condizioni di buio. La concentrazione di CO_2 durante le misure viene mantenuta costante ad un valore ambiente di 350 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

IV. Curva di fotosintesi in funzione della concentrazione interna di CO_2 (curva A/C_i)

Le misure di fotosintesi in funzione della concentrazione interna di CO_2 viene effettuata mantenendo condizioni di luce saturanti (2000 $\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ed elevata conduttanza stomatica e variando la concentrazione di CO_2 all'interno della camera di misura.

2.7.5 Analisi e *fitting* dei dati

Le misure di scambio gassoso effettuate a scala fogliare con il sistema portatile Licor LI-6400 ha permesso di studiare la risposta della foglia nel tempo in funzione delle condizioni ambientali. In particolare è stato possibile “costruire” le curve di risposta alla luce (curve A/Q) ed alla concentrazione interna di CO_2 (A/C_i) per la stessa foglia durante tutta la stagione vegetativa.

2.7.5.1 Curve di luce (A/Q)

La risposta dell'assimilazione (A) all'intensità del flusso di fotoni (Q) descrive una curva o una progressione curvilinea, che consiste in diverse fasi (HALL *ET AL.*, 1993):

- i. Un tasso di respirazione al buio e un successivo aumento con l'incremento della disponibilità di radiazione fino al raggiungimento del punto di compensazione luminoso. Il cosiddetto effetto di Kok (JARVIS & SANDFORD, 1985) può essere osservato come un rapido incremento iniziale di A con l'aumentare di Q fino al punto di compensazione, che si può assumere essere il risultato della progressiva soppressione della respirazione al buio;
- ii. Oltre il punto di compensazione, si ha una risposta lineare di A all'aumentare di Q che persiste fino ad un range di 50-200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (BJÖRKMAN & DEMMING, 1987; LONG & DRAKE, 1991). La pendenza di questa crescita lineare si assume corrisponda alla massima resa quantica apparente della fotosintesi (ϕ);
- iii. Oltre questa fase di risposta lineare, si osserva una progressiva flessione della curva (convessità = θ) di risposta alla luce ($\delta A / \delta Q$) fino al raggiungimento di un "plateau" oltre il punto di saturazione luminosa della fotosintesi. Questo valore di A è chiamato assimilazione massima saturata dalla luce (A_{max}).

La curva può essere espressa mediante l'espressione proposta da Prioul e Chartier (1977), secondo cui, se la convessità della curva può variare tra 0 e 1, la

risposta dell'assimilazione al variare della disponibilità della radiazione, è espressa da una relazione quadratica:

$$A = \frac{Q * \phi + A_{max} - [(\phi * Q + A_{max})^2 - 4\phi * Q * A_{max} * \theta]^{0.5}}{2\theta} - R_{dark} \quad [\text{eq. 16}]$$

dove A può essere espressa in ogni base senza influenzare il valore di convessità (θ), che risulta indipendente dalla differenze nella radiazione assorbita. Questa equazione può essere utilizzata per confrontare valori di θ di curve di risposta alla luce di una grande quantità di specie. Ne consegue che θ determinerà la soglia fino al quale θ può influenzare A oltre la pendenza iniziale della curva di luce e la soglia alla quale A_{max} può influenzare A a flussi di fotoni al di sotto del punto di saturazione.

2.7.5.1.1 Assimilazione di CO_2 saturata dalla luce (A_{max})

La fotosintesi risponde in modo iperbolico a Q quando questa diventa di minore importanza come fattore limitante. Foglie individuali di molte piante C_3 non sono in grado di utilizzare intensità radiative superiori di $Q = 500-1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (all'incirca il 25-50% della piena radiazione solare incidente); questo non è vero per le piante C_4 , le quali, in genere, non saturano anche in condizioni di piena irradiazione. L'assimilazione saturata dalla luce (A_{max}) può essere considerata come una misura della *capacità fotosintetica* della foglia. A differenza di θ , A_{max} varia in molto marcato all'interno e tra diverse specie C_3 e C_4 , sebbene A_{max} raggiunga livelli più elevati nelle piante C_4 tra cui $33-66 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sono i tassi di assimilazione massimi raccolti (LONG, 1989). A_{max} varia in funzione delle principali variabili che influenzano la fotosintesi, considerevoli differenze possono essere trovate anche tra diverse foglie della stessa pianta.

2.7.5.1.2 Resa quantica e sua determinazione

La resa quantica (ϕ) rappresenta l'efficienza dell'utilizzo della luce da parte della fotosintesi, pari al numero di moli di CO₂ fissate per mole di fotoni assorbita da una foglia. Dal momento che la luce diventa di minor importanza come fattore limitante della fotosintesi all'aumentare di Q , la massima resa quantica può essere misurata solo a bassi livelli di Q , dove la fotosintesi è limitata pesantemente ed è proporzionale alla disponibilità radiativa. In pratica ϕ può essere misurata a livelli di Q tra i 20-150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La pendenza iniziale (ϕ) della curva di risposta della fotosintesi alla luce è definita come massima resa quantica apparente; la qualifica "apparente" è importante dal momento che la stima è fatta sulla base della radiazione incidente e non assorbita.

Nel presente lavoro l'analisi delle curve di luce è stata effettuata con il programma Photosyn Assistant (Dundee Scientific). Il *fitting* del modello di PRIOUL & CHARTIER, (1977) [eq. 16], ha permesso di ottenere i parametri biochimici (R_{dark} , ϕ , θ , A_{max}) con cui è stato possibile confrontare la risposta della assimilazione netta della foglia nei diversi stadi di sviluppo fenologico in funzione della disponibilità radiativa.

2.7.5.2 Curve A/C_i

La frazione molare della concentrazione della CO₂ è la misura più comunemente utilizzata per esprimere la concentrazione di CO₂. L'ormai diventata di uso familiare ppm (in volume) utilizzata con i gas e può essere espressa come $\mu\text{mol mol}^{-1}$, $\mu\text{L L}^{-1}$ o $\mu\text{Pa Pa}^{-1}$. Questo modo di esprimere la CO₂ è conveniente per il fatto che è indipendente dalla temperatura: la frazione molare di CO₂ che sta alla sommità di una montagna è la

stessa di quella presenta alla sua base. La frazione molare di CO_2 nella parte iniziale di un sistema di scambio gassoso (in condizioni di elevata pressione) è la stessa di quella nella parte terminale (pressione minore).

Il biossido di carbonio viene fissato (attaccato ad un accettore) all'interno dello stroma del cloroplasto e così A dovrebbe essere messo graficamente in relazione con la pressione parziale di CO_2 all'interno del cloroplasto (C_c). Quando la CO_2 viene assimilata, C_c è minore della pressione parziale ambiente (C_a) poiché la pressione parziale diminuisce quando la CO_2 diffonde dall'aria ambiente all'interno nella foglia, negli spazi d'aria intercellulari (C_i) e di seguito all'interno del cloroplasto. Per il *fitting* del modello biochimico, le variabili assimilazione netta (A) e concentrazione di CO_2 all'interno degli spazi intercellulari della foglia (C_i) sono ormai note, in quanto fornite dalle misure di scambio gassoso. I metodi per la misura della C_i sono ormai *routine* ma in passato era difficile stimare C_c , e poiché, in alcune specie, le differenze tra C_i e C_c erano minime, si è stati soliti utilizzare la concentrazione interna agli spazi intercellulari (C_i) al posto di C_c . Per questo motivo, l'analisi della risposta dell'assimilazione netta in funzione della concentrazione di CO_2 è stata chiamata *fitting* di curva A/C_i . Tuttavia il modello originale di Farquhar (FARQUHAR, 1980) è stato sviluppato sulla base del metabolismo del cloroplasto mettendo in relazione tutta la biochimica fogliare nei riguardi delle condizioni all'interno del cloroplasto e permette di fare delle comparazioni dirette tra le misure di scambio gassoso fogliare e la biochimica della Rubisco e la stechiometria del trasporto elettronico. Se quindi, A e C_i sono ormai note attraverso i moderni sistemi di misura degli scambi gassosi, C_c può essere stimata utilizzando la

conduttanza del mesofillo (g_m) (SHARKEY ET AL., 2007). Dal momento che g_m è, in effetti, quella parte del *pathway* di diffusione della CO₂ oltre al *pathway* di diffusione del vapor acqueo, spesso si assume sia dominata dalle resistenze di diffusione della fase liquida ed ha l'unità di misura di $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$:

$$C_c = C_i - A/g_m \quad [\text{eq. 17}]$$

L'analisi delle curve A/C_i e la modellizzazione del modello di fotosintesi di Farquhar *et al.* (1980), successivamente modificata da Von Caemmerer & Farquhar (1981), Sharkey (1985), Harley e Sharkey (1991) e Harley *et al.* (1992) sono state eseguite mediante il foglio di calcolo proposto da Sharkey *et al.*, (2007) per il *fitting* del modello e per la normalizzazione dei parametri ottenuti. Il foglio di calcolo è stato modificato utilizzando i valori di dipendenza dalla temperatura del modello di Farquhar specifici per la vite (Tabella 6) riportati da Shultz (2003).

La dipendenza dalla temperatura di K_c e K_o , le costanti di Michaelis-Menten rispettivamente per la reazione di carbossilazione e l'ossigenazione, può essere descritta mediante una funzione esponenziale utilizzando i parametri suppliti da Harley *et al.* (1992) e basati in parte su Jordan & Ogren (1984), in accordo su:

$$\text{Parametro } (K_c, K_o) = \exp\{c - [\Delta H_a / (RT_k)]\} \quad [\text{eq. 18}]$$

dove c è un fattore di *scaling*; ΔH_a è l'energia di attivazione; R è la costante universale dei gas ($0.00831 \text{ kJ K}^{-1}$); e T_k è la temperatura della foglia in gradi Kelvin.

La dipendenza della temperatura dei parametri del modello di Farquhar: V_{cmax} , J_{max} e TPU può essere descritta in parziale analogia con l'equazione [eq. 18] in accordo

con Harley & Tenhunen (1991), basata sull'equazione originale proposta da Johnson *et al.* (1942):

$$(V_{cmax}, J_{max}, TPU) = \frac{\exp\{c - [\Delta H_a / (RT_k)]\}}{1 + \exp[(\Delta S T_k - \Delta H_d) / (RT_k)]} \quad [\text{eq. 19}]$$

dove ΔH_d è l'energia di disattivazione e ΔS è il termine di entropia (HARLEY & TENHUNEN, 1991; HARLEY *ET AL.*, 1992).

Tabella 6 Lista dei parametri del modello di fotosintesi Farquhar e dei parametri utilizzati per calcolare la loro dipendenza dalla temperatura: fattore di *scaling* (c), le entalpie di attivazione (ΔH_a), deattivazione (ΔH_d) e l'entropia (ΔS) descrivono le risposte alla temperatura dei parametri della cinetica dell'enzima Rubisco e della conduttanza del mesofillo che sono necessari l'analisi delle curve A/C_i in un range di temperature.

Parametro	Unità di misura	Parametri di Temperatura	Unità di misura
Parametri utilizzati per il fitting			
K_C	Pa CO ₂	$c(K_C)$	35.79
		$\Delta H_a(K_C)$	80.47
K_O	hPa O ₂	$c(K_O)$	9.59
		$\Delta H_a(K_O)$	14.51
Γ^*	Pa CO ₂	e_1	1.88
		e_2	0.036
Parametri utilizzati per la normalizzazione (25°C)			
V_{cmax}	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	$c(V_{cmax})$	32.64
		$\Delta H_a(V_{cmax})$	71.23
		$\Delta H_d(V_{cmax})$	200
		$\Delta S(V_{cmax})$	0.643
J_{max}	μmol e ⁻ m ⁻² s ⁻¹	$c(J_{max})$	70.53
		$\Delta H_a(J_{max})$	161.21
		$\Delta H_d(J_{max})$	200
		$\Delta S(J_{max})$	0.672
TPU	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	$c(TPU)$	6.66
		$\Delta H_a(TPU)$	11.51
		$\Delta H_d(TPU)$	200
		$\Delta S(TPU)$	0.636
R_{day}	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	$c(R_{day})$	18.7145
		$\Delta H_a(R_{day})$	46.39
g_m	μmol m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹	$c(g_m)$	20.01
		$\Delta H_a(g_m)$	49.6
		$\Delta H_d(g_m)$	437.4
		$\Delta S(g_m)$	1.4
K_c	Costante di Michaelis Menten della Rubisco per la CO ₂		
K_o	Costante di inibizione		
Γ^*	Punto di compensazione fotorespiratorio.		
V_{cmax}	Carbossilazione massima consentita dalla disponibilità di Rubisco		
J_{max}	Rate max del trasporto elettronico (sulla base della richiesta di NADPH)		
TPU	Rigenerazione dei Trioso-fosfati		
R_{day}	Respirazione mitocondriale (Respirazione giornaliera)		
g_m	Conduttanza del mesofillo		

2.8 SCALA DI PARCELLA

Le misure di scambio gassoso a scala di parcella sono state effettuate mediante la tecnica micrometeorologica dell'*eddy covariance*. Essa consente la misura più diretta dei flussi di ogni generica quantità scalare (calore, vapor d'acqua, anidride carbonica, ecc.) per cui sia disponibile un sistema di analisi sufficientemente veloce. Infatti lo scambio tra vegetazione ed atmosfera, tranne che nello strato d'aria di pochi millimetri aderente alle foglie, è fondamentalmente turbolento e, per misurarlo direttamente, la strumentazione deve essere in grado di seguire le fluttuazioni concentrazioni ad un ritmo di almeno 10-20 Hz. Analogamente la velocità del vento (ed in particolare la componente verticale del vettore) va misurata in sincronia, mediante particolari anemometri statici basati sulla determinazione differenziale del tempo necessario a treni di impulsi di ultrasuoni per percorrere brevi distanze (10-20 cm) nello spazio.

2.8.1 Cenni storici sui metodi aerodinamici di misura dei flussi di materia ed energia

Lo studio delle tematiche legate a biogeochimica, ecologia e scienze atmosferiche richiede la quantificazione degli scambi di massa ed energia tra biosfera ed atmosfera. I metodi micrometeorologici sono gli strumenti per ottenere queste informazioni alla scala spaziale degli ecosistemi.

L'idea di utilizzare metodi micrometeorologici per quantificare gli scambi tra ecosistemi terrestri ed atmosfera risale agli inizi del XX secolo, quando Fick propose una relazione tra flussi e concentrazioni, nell'ipotesi che tale legame fosse lineare e che non vi fosse una direzione preferenziale o imposta per il flusso.

$$F = -D * \bar{V}C \quad [\text{eq. 20}]$$

Secondo questa formulazione il flusso è determinato dal gradiente di concentrazione, che è la forza motrice del fenomeno di diffusione: esaurita questa il flusso si annulla. La teoria della diffusione di Fick indusse i fluido-dinamici Prandtl, Taylor e Bowen a proporre l'applicazione per la stima dell'evapotraspirazione sulla base del flusso verso gradiente di quantità di moto, acqua e calore.

È a Sir Osborne Reynolds (1842-1912) che si deve l'ideazione dell'*eddy-covariance*, dopo aver introdotto la scomposizione di Reynolds, in base alla quale, il valore istantaneo di una variabile viene scomposto nella sua componente media e in una componente fluttuante. In tal modo un flusso, prodotto di una velocità per una densità, risultava diviso in una componente avvertiva, data dal prodotto delle componenti medie di velocità e densità, e in una componente turbolenta data dal prodotto delle componenti fluttuanti. L'applicazione sperimentale di questo metodo è avvenuta, tuttavia, molti anni dopo, in quanto richiedeva una strumentazione caratterizzata da tempi di risposta molto rapidi (frazioni di secondo) non disponibile al momento dello sviluppo teorico del modello.

Le prime misure micrometeorologiche di flusso di energia e di materia sulla base della teoria della diffusione di Fick furono condotte da Inoue (1958), Lemon (1960), Monteith e Sciecz (1960) su colture agrarie. Risalgono alla fine degli anni '60 le prime applicazioni di tale teoria agli ecosistemi naturali; molti di questi studi furono condotti su foreste (DENMEAD, 1969; BAUGARTEN 1969; JARVIS ET AL., 1976).

Le difficoltà logistiche nell'effettuazione di misure micrometeorologiche di flusso verso gradiente su foreste determinarono un rallentamento negli studi in questo settore fino agli inizi degli anni '80, quando vennero sviluppati e commercializzati anemometri ultrasonici, igrometri a risposta rapida e spettrometri all'infrarosso.

A questo periodo risalgono le prime applicazioni della tecnica dell'*eddy-covariance* effettuate su colture agrarie (ANDERSON ET AL., 1984; DESJARDINS ET AL., 1984), con brevi campagne intensive durante la stagione vegetativa. Alla fine degli anni '80, ulteriori sviluppi tecnologici, sia dal punto di vista strumentale che nel settore dell'informatica, consentirono l'allestimento di campagne di lungo periodo.

2.8.2 Basi teoriche della tecnica dell'*eddy covariance*

La conservazione della massa di uno scalare è descritta dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_s}{\partial z} = S + D \quad [\text{eq. 21}]$$

in cui ρ_s è la densità dello scalare, u , v e w sono le componenti ortogonali della velocità del vento, rispettivamente nella direzione longitudinale (x), trasversale (y) e verticale (z). S è il termine di produzione/consumo dello scalare e D il termine di diffusione molecolare. Se l'appezzamento su cui si effettuano le misure è sufficientemente ampio (nell'ordine, per un vigneto, di qualche decina di ettari) e piano, è possibile assumere la condizione di omogeneità in direzione trasversale ignorata la diffusione molecolare, trascurabile rispetto a quella turbolenta, si applica a tale equazione la scomposizione di Reynolds per cui ogni variabile viene scomposta nella sua media temporale e nella sua componente fluttuante:

$$\begin{aligned}
u_i &= \bar{u}_i + u'_i \\
\rho_i &= \bar{\rho}_i + \rho'_i
\end{aligned}
\tag{eq. 22}$$

Questa equazione viene poi mediata ed integrata su di un volume di controllo il cui limite inferiore è rappresentato dall'interfaccia aria-suolo e i cui i limiti laterali e superiore sono delle superfici ideali in aria:

$$\int_0^h S \, dz = \underbrace{\overline{w'\rho'_s}}_I \Big|_{z=h} + \underbrace{\int_0^h \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} dz}_{II} + \underbrace{\int_0^h \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial x} dz}_{III} + \underbrace{\int_0^h \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial z} dz}_{IV} \tag{eq. 23}$$

Il *termine I* rappresenta la produzione/consumo dello scalare nel volume di controllo e corrisponde allo scambio netto di carbonio, se lo scalare in questione è la CO₂, o all'evapotraspirazione del sistema se lo scalare è il vapore acqueo.

Il *termine II* rappresenta il flusso turbolento alla quota *h*.

Il *termine III* viene definito di *storage* e rappresenta la variabilità temporale della concentrazione dello scalare all'interno del volume di controllo. Nel caso della CO₂, il termine di *storage* è generalmente piccolo durante il giorno, in condizioni di turbolenza attiva, mentre può diventare significativo durante notti stabili, quando la CO₂ respirata dall'ecosistema si accumula al di sotto della quota di misura. La media giornaliera di questo termine è nulla, quindi trascurare lo *storage* non introduce nel lungo periodo errori significativi nel computo del bilancio di uno scalare.

I *termini IV e V* sono definiti termini avvettivi, rispettivamente orizzontale e verticale, e rappresentano il trasporto dello scalare legato al moto medio dell'aria lungo

queste direzioni. Il termine di avvezione orizzontale è importante in presenza di gradienti di concentrazione nel piano orizzontale, ad esempio in ecosistemi eterogenei o lungo pendii. Relativamente all'avvezione verticale, è stato osservato che la velocità media verticale, e quindi l'avvezione, sono piccole sopra le coltivazioni basse, ma non esiste alcuna prova che permetta di estendere tale osservazione alla vegetazione alta, come ad esempio le foreste. Al contrario Lee (1998) e Baldocchi *et al* (2000) hanno dimostrato che tale termine non è trascurabile e può diventare può grande del flusso turbolento durante le notti senza vento.

In condizioni di stazionarietà e omogeneità nel piano orizzontale i termini *III*, *IV* e *V* dell'equazione possono essere trascurati. Adottando queste assunzioni l'equazione di conservazione della massa può essere scritta nel modo seguente:

$$F = \overline{w'\rho_c'} \quad [\text{eq. 24}]$$

La covarianza verticale ($\overline{w'\rho_c'}$) risulta così essere uguale al flusso generato dalla vegetazione e dal suolo (*F*); tale termine è misurabile con la tecnica dell'*eddy-covariance*.

L'applicazione di questa tecnica presenta una serie di problematiche inerenti alla scelta del sito di misura (i), l'installazione e la calibrazione degli strumenti (ii), la durata e la frequenza del campionamento (iii) e l'elaborazione dei dati raccolti (iv) (BALDOCCHI ET AL., 1988; FOKEN e WICHURA, 1996):

- i. I siti dovrebbero idealmente essere pianeggianti e con una copertura uniforme.

- ii. L'altezza a cui installare gli strumenti dipende dall'altezza della vegetazione, dall'ampiezza dell'area da investigare e dal *range* di velocità del vento che caratterizza il sito.
- iii. Una frequenza di campionamento tra i 10 e i 20 Hz garantisce una buona descrizione della turbolenza atmosferica, mentre la durata del campionamento è un compromesso tra la necessità di campionare i fenomeni a bassa frequenza che contribuiscono al flusso, è l'esigenza di filtrare i fenomeni a scala giornaliera. Un intervallo di campionamento adeguato risulta variabile tra i 30 e i 60 minuti (AUBINET ET AL.,2000).
- iv. I dati ad alta frequenza di velocità verticale del vento e di concentrazione di biossido di carbonio e acqua vengono quindi elaborati per stimare i flussi tra ecosistema ed atmosfera. L'obiettivo finale è la produzione di un *database* completo su base semioraria (30') che contenga dati di meteorologia del sito, flussi di calore latente, sensibile e di CO₂ tra vegetazione ed atmosfera. I flussi di calore latente e sensibile, con i dati di radiazione netta, vengono utilizzati per stimare il bilancio energetico dell'ecosistema, mentre cumulando i flussi di CO₂ è possibile stimare la produttività primaria netta dell'ecosistema in esame.

Ricordando che il flusso turbolento coincide con il flusso totale nelle ipotesi stazionarietà ed omogeneità nel piano orizzontale, e considerato che tali ipotesi non sono mai completamente soddisfatte nella realtà di campo, è necessario applicare ai dati raccolti delle opportune correzioni al fine di riportarsi nelle condizioni ideali. Una di

queste correzioni riguardano la rimozione di variazioni nelle serie che avvengono su scale temporali più lunghe di una mezz'ora, introducendo una non stazionarietà nei dati; per ovviare a questo problema viene spesso applicato ai dati un filtro passa alto su periodi di 30' (RANNICK ET AL., 1999).

Va poi definito il sistema di riferimento in cui effettuare le analisi. Per questo sono attualmente in uso due diversi approcci: uno basato sulla rotazione del vettore vento (KAIMAL e FINNINGAN, 1994) e un altro sulla definizione di un piano ortogonale alla direzione media dei flussi nel lungo periodo (*planar-fit*) proposto da Wilczak *et al.*, (2000). Il primo approccio prevede l'applicazione al vettore vento di 2 o 3 rotazioni, attorno agli assi ortogonali, al fine di annullare le componenti medie delle velocità trasversale e verticale ed il flusso trasversale di quantità di moto ogni mezz'ora. L'approccio del *planar-fit* utilizza invece la serie di lungo periodo delle misure anemometriche per definire un sistema di coordinare che minimizzi la velocità verticale media.

Le serie di dati ottenute dopo queste prime elaborazioni possono essere utilizzate per il calcolo dei flussi turbolenti. Il primo passo in questa direzione è quello di calcolare i valori istantanei degli scarti dalla media per tutte le grandezze di interesse (temperatura, acqua, anidride carbonica). Moltiplicando la serie delle velocità verticali con quella degli scalari, e calcolando il valore medio sulla mezz'ora delle serie prodotto, si ottengono rispettivamente il flusso turbolento di calore sensibile, latente e di anidride carbonica. Nel nostro caso in cui le concentrazioni degli scalari siano state misurate utilizzando un analizzatore a percorso aperto, ai flussi calcolati va applicata la

correzione di Webb, Pearman e Leuning (WPL; WEBB ET AL., 1980). La necessità di applicare tale correzione deriva dal fatto che l'analizzatore IRGA LI-COR 7500 (*open-path*) misura la densità degli scalari e non la loro concentrazione, rendendo le misure dipendenti dalla densità dell'aria.

Le correzioni applicate al *dataset* di misura per le annate 2006 e 2007, hanno riguardato la rotazione del sistema di coordinate (necessario per rendere nulla la componente verticale e trasversale della velocità media del vento) e la correzione di Webb, Pearman e Leuning per la densità. Dalle misure istantanee della velocità verticale del vento, della temperatura *sonica* dell'aria, della densità di vapor d'acqua e di anidride carbonica, sono stati quindi calcolati i flussi di calore sensibile, evapotraspirazione e di CO₂ con una risoluzione temporale di 30 minuti.

2.8.3 Strumentazione per la misura dei flussi turbolenti

La stima del bilancio energetico e di massa di un ecosistema richiede l'installazione di una o più torri meteorologiche attrezzate con strumenti che permettano misure anemometriche, misure di concentrazione dello scalare di cui si vuole calcolare il flusso. Sono queste le grandezze che è necessario misurare in continuo per l'applicazione della tecnica dell'*eddy covariance* alla stima dei flussi. Un altro requisito fondamentale di questa tecnica di misura è l'elevata frequenza di acquisizione. Essendo un campo di moto turbolento caratterizzato da molteplici scale temporali anche molto piccole, per poterlo descrivere in maniera completa è necessario effettuare le misure ad alta frequenza (fino a 100 misure al secondo = 100 Hz).

La strumentazione tipica di un sito di *eddy covariance* include un anemometro ultrasonico tridimensionale, per misurare velocità del vento e temperatura sonica dell'aria, e un sensore a risposta altrettanto rapida per misurare le concentrazioni di CO₂ ed acqua.

2.8.4 Anemometri ultrasonici

Gli anemometri ultrasonici sono strumenti in grado di misurare la velocità del vento e la temperatura dell'aria, in base all'effetto di queste variabili sul tempo di transito di un segnale acustico che viaggia in direzioni opposte su di un percorso di lunghezza nota. Essi sono, in generale costituiti, da tre coppie di trasduttori disposti lungo direzioni tra loro non parallele, e possono così fornire le tre componenti della velocità del vento lungo tali direzioni.

Lo strumento misura il tempo di transito di un impulso sonoro tra ogni coppia di trasduttori; dai tempi di transito è possibile risalire alla velocità del suono e quindi a quella del vento. Successivamente, vista la relazione intercorrente tra la velocità del suono e la temperatura, è possibile stimare la temperatura dell'aria (*temperatura sonica*) con la stessa frequenza.

La caratteristica principale di un anemometro ultrasonico consiste nella sua capacità di fornire dati ad alta frequenza (variabile tra 1 e 100 Hz a seconda del tipo di strumento utilizzato), molto più alta rispetto alla frequenza di acquisizione dei tradizionali strumenti meccanici (anemometri a coppette) caratterizzati inoltre da fenomeni di inerzia che ne limita la risoluzione di misura. Esistono diverse tipologie di

anemometri ultrasonici caratterizzate da diverse geometrie: in alcuni modelli un paletto centrale sorregge tutti i trasduttori, mentre in altri vi sono tre barre di sostegno esterne. I modelli del primo tipo (anemometri ultrasonici *simmetrici*) includono una distorsione minore del flusso attorno ai trasduttori, ma sono più sensibili alle vibrazioni. Per ovviare a questo inconveniente sono stati sviluppati sensori con tre barre di sostegno poste asimmetricamente (anemometri ultrasonici *asimmetrici*). Tali sensori risultano particolarmente adatti per installazioni in zone in cui il vento proviene prevalentemente da una direzione, in quanto possono essere posizionati in maniera da minimizzare l'errore ed il disturbo lungo quella direzione.

2.8.5 Analizzatori di gas all'infrarosso (IRGA)

I sensori per la misura della concentrazione di acqua e di anidride carbonica in aria (*Infra-Red Gas Analyzer* - IRGA) si dividono in sensori a percorso aperto e a percorso chiuso (questo tipo di sensori è quello presente nel sistema LI-6400 per la misura di scambio gassoso a scala fogliare precedentemente discusso). Entrambi si basano sullo stesso fenomeno fisico: l'attenuazione della radiazione infrarossa per effetto dell'assorbimento dei gas a specifiche lunghezze d'onda. Nei sensori a percorso aperto il percorso tra la sorgente di radiazione ed il sensore è all'esterno cosicché l'aria passa direttamente sul percorso ottico; nei sensori a percorso chiuso, l'aria viene pompata all'interno di una cuvetta dove viene analizzata.

I sensori a percorso aperto effettuano il campionamento diretto dell'attenuazione di una sorgente di radiazione infrarossa ad opera dell'assorbimento dei gas, in un percorso vicino a quello di un anemometro ultrasonico. La concentrazione dei gas in

atmosfera verrà calcolata dalla misura di attenuazione subita da un raggio di intensità nota emesso dalla sorgente lungo un percorso di dimensioni note.

Il principio su cui si basano i sensori a percorso chiuso è lo stesso dei sensori a percorso aperto: misura dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica da parte dell'anidride carbonica e del vapore acqueo. La differenza principale è rappresentata dal fatto che sensori e sorgenti sono chiusi in “*bench-cells*” ed in genere utilizzano una cella per le misure (*sample*), mentre un'altra a concentrazione nota viene usata come riferimento (*reference*). Il problema principale dei sensori a percorso chiuso è rappresentato dalla necessità di campionare aria raccolta in prossimità dell'anemometro ultrasonico attraverso un sistema di tubi, filtri e pompe.

La stazione attiva dal luglio 2005 comprende un anemometro sonico triassiale Metek-USA-1 e un analizzatore IR *open-path* per CO₂ e H₂O LiCor LI-7500, entrambi posti ad una quota (*h*) di 4.5 m (pari a due volte l'altezza della vegetazione che si vuole caratterizzare) e acquisiti ad una frequenza di 20 Hz mediante un *personal computer industriale* MPL mod. PIP6 e un *software* dedicato. Le misure micrometeorologiche ancillari comprendono i flussi ascendenti e discendenti della radiazione ad onda corta e lunga, misurati mediante un radiometro netto Kipp & Zonen CNR-1, la temperatura, l'umidità dell'aria, la pressione barometrica e la precipitazione.

La stazione di misura di Negrisia nasce con l'obiettivo di studiare nel lungo periodo i flussi di evapotraspirazione caratteristici del vigneto in una situazione assolutamente ideale dal punto di vista tecnico e sufficientemente rappresentativa del

territorio viticolo regionale. Tale attrezzatura, destinata a persistere per più anni, può raccogliere, oltre che dati relativi alle componenti del bilancio idrico, anche le informazioni relative ai flussi di anidride carbonica e al bilancio del carbonio del vigneto. La stazione inserita nella rete nazionale di misura dei flussi di CO₂ “CarboItaly” ha, infatti, l’ulteriore obiettivo di verificare l’eventuale capacità di assorbimento di CO₂ di questa importante coltura.

2.9 RESPIRAZIONE DEL SUOLO

La respirazione del suolo è un fenomeno difficile da quantificare a causa dei numerosi errori associati ai sistemi di misura, alla elevata variabilità spaziale e temporale, alla dipendenza da numerosi fattori ambientali e dalle caratteristiche del substrato (NORMAN ET AL., 1997). Gli strumenti utilizzati in campo scientifico sono generalmente costituiti da camere di vario tipo che vengono appoggiate o infisse nel terreno e possono essere ricondotte, principalmente a tre tipi: i sistemi statici di tipo chiuso (i), i sistemi dinamici di tipo chiuso (ii) ed i sistemi di tipo aperto (iii).

- i. I *sistemi statici di tipo chiuso*, sono basati sul prelievo di campioni d’aria a determinati intervalli di tempo da camere chiuse, provviste di trappole alcaline di tipo chimico che assorbono l’anidride carbonica; questi sistemi sono attualmente poco utilizzati in quanto tendono a sottostimare il flusso di CO₂ (JENSEN ET AL., 1996; NORMAN ET AL., 1997).
- ii. Nei *sistemi dinamici di tipo chiuso*, l’aria viene fatta passare attraverso un analizzatore di gas a raggi infrarossi (IRGA); in questo caso l’aumento

della concentrazione di CO₂ nella camera ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) è proporzionale al flusso ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

- iii. Nei *sistemi di tipo aperto* (dotati anch'essi di un IRGA), la camera comunica direttamente con l'ambiente esterno; il flusso di CO₂ viene calcolato sulla base della differenza di concentrazione tra l'interno e l'esterno della stessa. Uno dei vantaggi principali dei sistemi di tipo aperto è dato dal fatto che possono essere utilizzati per eseguire misure in continuo ad intervalli di tempo prestabiliti.

I sistemi portatili con camere di tipo dinamico chiuso sono, attualmente, tra i più diffusi per le misure di respirazione del suolo, in quanto semplici, veloci da utilizzare e da trasportare, anche se è necessario prestare attenzione ad alcuni accorgimenti al fine di evitare errori grossolani in fase di misura (WELLES ET AL., 2001).

Nel corso del presente lavoro è stato utilizzato il sistema LI-6400, un sistema dinamico di tipo chiuso, utilizzato anche per le misure di scambio gassoso a scala fogliare, ma utilizzando una apposita camera di misura specifica (LI-6400-09) per le misure di respirazione del suolo. La camera LI_6400-09 consiste in una cella di acciaio avente un volume interno di 991 cm³ ed un diametro di 10 cm.

Per la pianificazione delle misure in campo la soluzione ideale al fine di mantenere costanti nel tempo i punti di misura sarebbe l'utilizzo di specifici *collari* in polietilene di diametro pari a 10 cm ed altezza di 5 cm. Tuttavia, la necessità da parte dell'azienda privata ospitante di transitare attraverso il sito di misura per l'effettuazione

delle normali pratiche colturali, ha impedito l'installazione di collari infissi nel terreno per tutta la durata della stagione. Le misure, quindi, sono state condotte posizionando la camera infissa direttamente al suolo per una profondità standardizzata di 1.5 cm. Per caratterizzare la variabilità della respirazione del suolo del vigneto, si è scelto di effettuare per ogni data di campionamento una distinzione tra *suolo nudo* (sulla fila) e *suolo inerbito* (sull'interfila). In particolare le misure su suolo inerbito, a differenza di quelle su suolo nudo, che sono state condotte direttamente appoggiando la camera al suolo (diserbato), sono state condotte su una porzione di suolo ($50 \times 50 \text{ cm} = 1 \text{ m}^2$) preventivamente sfalciata a zero per una migliore standardizzazione delle misure.

La scelta dei punti di misura è stata fatta, per ogni data di campionamento per entrambe le tipologie di suolo (nudo / inerbito), all'interno del *footprint* della torre di *eddy covariance* su 4-5 punti distribuiti casualmente in zone ritenute idonee per l'esecuzione dei rilievi, cioè prive di segni che potessero indicare delle perturbazioni del substrato pedologico. Le misure sono state eseguite secondo la metodologia suggerita nel manuale d'uso della camera suoli (LI-COR, 2005) e ripetute con intervalli di 15-20 giorni durante tutto il corso dell'anno (2006-2007), in modo tale da registrare i valori di respirazione per un ampio intervallo di temperatura del suolo. Il protocollo di campionamento ha previsto le seguenti fasi:

I. *Calibrazione e taratura del sistema in campo*

Prima di ogni protocollo di misura il sistema viene calibrato e viene fatta una taratura di zero sia per quanto riguarda la concentrazione di CO_2 che

per l'H₂O attraverso l'utilizzo rispettivamente della soda e della drierite per il condizionamento dell'aria in ingresso.

II. Determinazione della concentrazione di CO₂ al suolo

Una volta tarato il sistema ci si sposta all'interno del sito di misura e si determina la concentrazione di CO₂ (ppm) al livello del suolo.

III. Parametrizzazione de ciclo di misura

Determinata la concentrazione di CO₂ al suolo (*target*), si imposta il valore nella console che provvederà, con l'ausilio di un sistema di pompe, ad effettuare un numero di cicli (settato a 3) intorno al valore scelto. In particolare si imposta un intervallo di variazione intorno al target (*delta*: scelto sulla base di fattori ambientali quali la temperatura e l'umidità del suolo) lungo il quale lo strumento procederà alla lettura della concentrazione di CO₂ all'interno della camera con una risoluzione di 2.5 secondi.

IV. Ciclo di misura

Una volta impostato il protocollo si posiziona lo strumento a terra nel punto stabilito e si avvia il sistema. La pompa provvederà ad abbassare la concentrazione di CO₂ all'interno della camera ad un valore uguale al *target-delta*. Lentamente (in funzione di parametri ambientali) la concentrazione di CO₂ all'interno della camera inizierà ad aumentare per effetto della respirazione del suolo e, una volta arrivata alla soglia di misura dettata dal valore di *target-delta*, il sistema inizierà a registrare i dati di concentrazione di CO₂ ed H₂O fino alla soglia successiva di

target+delta. A questo punto il sistema di pompe provvederà a riportare la concentrazione interna alla camera al valore iniziale e ripeterà il ciclo per il numero di ripetizioni impostate (Figura 7).

Contemporaneamente al flusso di CO₂, in prossimità di ciascun punto di misura è stata misurata la temperatura del suolo a 10 cm di profondità con una sonda collegata al sistema LI-6400.

V. Elaborazione dei dati per il calcolo del flusso di respirazione del suolo

Il sistema, in automatico, alla fine di ogni ciclo di misura salva su file il valore del flusso medio di respirazione del suolo per ognuno dei sottocicli impostati in base alla pendenza della retta di interpolazione dei valori raccolti in ogni sottociclo (Figura 7).

L'interpolazione dei dati sperimentali di flusso e temperatura (ciascun dato è stato ottenuto come media dei valori registrati in un giorno, sulle diverse ripetizioni) è stata ottenuta applicando l'equazione:

$$R = A * e^{B*t} \quad (\text{da LLOYD \& TAYLOR, 1994 eqn. 4}) \quad [\text{eq. 25}]$$

R è la respirazione (variabile dipendente), **A** e **B** sono due parametri stimati ai minimi quadrati, **t** è la temperatura dell'aria in °C (variabile indipendente). Tra le varie equazioni trovate in letteratura sulla relazione tra respirazione e temperatura (da LLOYD & TAYLOR, 1994; FANG & MONCRIEFF, 2001; JASSENS ET AL., 2002; RODEGHIERO & CESCATTI, 2003) è stato scelto il modello esponenziale in quanto esso è tra quelli maggiormente utilizzati e di più facile applicazione.

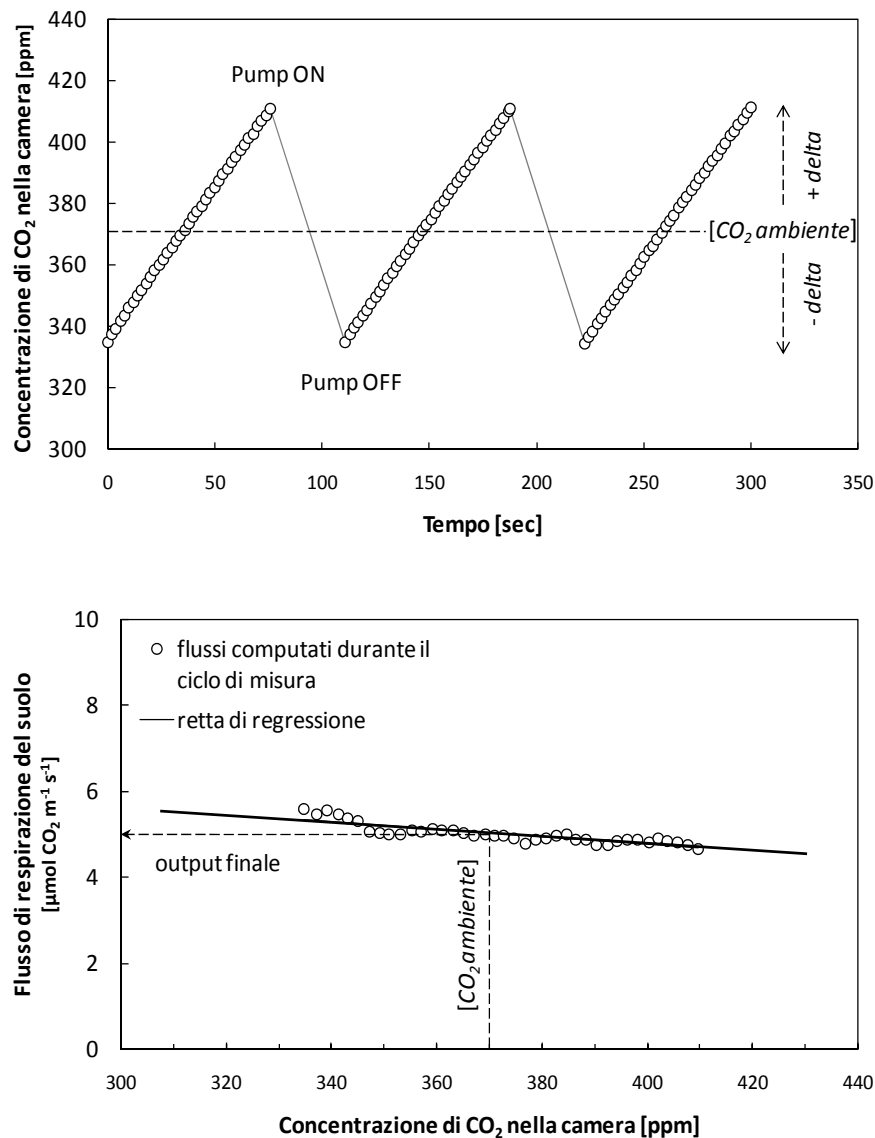


Figura 7 Ciclo di misura della respirazione del suolo con il sistema LI-6400 (in alto); elaborazione dei dati per la determinazione del flusso di CO₂ dal suolo (in basso).

Ottenuti i parametri A e B dell'equazione [eq. 25], è stato possibile calcolare il flusso di CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); successivamente utilizzando i valori di temperatura registrati in continuo dalla stazione meteorologica (ad intervalli di 30') e sommando i

flussi ottenuti, è stata stimata la respirazione del suolo mensile ed annuale per sito di Negrisia nelle due annate 2006 e 2007.

2.10 SCALA DI VIGNETO – TELERILEVAMENTO

2.10.1 Piattaforma satellitare MODIS

Lo strumento MODIS (***MOD**erate resolution **I**maging **S**pectroradiometer*) è stato progettato per un migliore monitoraggio per la ricerca sulla terra, oceani e in atmosfera. Il disegno del componente del sensore di *imaging* combina le caratteristiche del *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) e del *Landsat Thematic Mapper*, con l'aggiunta di bande spettrali nella parte centrale dello spettro elettromagnetico e nella lunghezza d'onda dell'IR lontano (far-IR), con una risoluzione spaziale di 250m, 500m ed 1 km. I dati ed i prodotti del sensore MODIS, a bordo dei satelliti ad orbita bassa **TERRA** e **AQUA**, rappresentano un ragionevole compromesso tra risoluzione spaziale e frequenza di osservazione. Creati appositamente per il programma EOS (*Earth Observing System*), che ha come principale obiettivo migliorare la conoscenza sui cambiamenti globali terrestri attraverso l'osservazione continua del pianeta, i satelliti **TERRA** e **AQUA** sono il risultato di una *joint venture* tra l'agenzia spaziale americana NASA e quella giapponese NASDA. Il primo sorvola la Terra da nord a sud passando l'Equatore, di mattina, mentre **AQUA** passa da sud a nord nel pomeriggio. Volano su un'orbita eliosincrona quasi-polare, ad un'altezza di 705 km dalla Terra. Tale orbita comporta due passaggi giornalieri per ciascun satellite, approssimativamente alla stessa ora solare ogni giorno. **AQUA** passa sull'Italia all'incirca alle 01:30 a.m. e p.m., e i suoi passaggi sono complementari a quelli del

satellite TERRA, che con strumenti simili fornisce misure alle 10:30 a.m. e p.m. Questi orari rappresentano un buon campionamento per il ciclo giornaliero della temperatura. Su entrambi i satelliti è montato il MODIS, uno spettroradiometro a 36 bande che misura la radiazione nel visibile e nell'infrarosso, derivandone prodotti relativi alla vegetazione, alla tipologia della superficie, alla fluorescenza della clorofilla sugli oceani, alle proprietà delle nubi e degli *aerosol*, agli incendi, alla neve su terra e ai ghiacci su mare. Il primo MODIS fu lanciato a bordo del satellite Terra nel Dicembre 1999, il secondo su AQUA nel maggio 2002. Da allora i loro dati globali sono disponibili e utilizzati negli studi per la comprensione delle dinamiche globali e dei processi relativi alla terra, agli oceani e agli strati più bassi dell'atmosfera.

L'utilizzo del MODIS riveste inoltre un ruolo fondamentale nello sviluppo di modelli interattivi capaci di produrre previsioni riguardo i cambiamenti globali. E' stata dedicata una cura particolare alla creazione e alla distribuzione dei prodotti, cercando di facilitarne al massimo la fruizione degli utenti finali nei settori della ricerca e delle applicazioni. A tale scopo, i ricercatori della NASA, riuniti nel MODIS Team, hanno sviluppato prodotti specifici, direttamente dai dati grezzi ricevuti dai due sensori, suddividendoli secondo le diverse applicazioni. Quindi, esistono prodotti *MODIS Atmosphere, Land, Ocean*. Alcuni di tali prodotti possono essere subito disponibili e scaricabili tramite browser come immagini, altri necessitano di ulteriori elaborazioni da parte dell'utente. I prodotti MODIS Land utili per le applicazioni agrometeorologiche e le loro caratteristiche sono elencate di seguito: *Surface Reflectance* (MOD09), *Land Surface Temperature* (MOD11), *Land Cover Type* (MOD12), *Vegetation Indices*

(MOD13), *Leaf Area Index/Fraction of Photosynthetically Active Radiation* (MOD17), *Bidirectional Reflectance Distribution Function and Albedo* (MOD43), *Net photosynthesis/Net Primary Productivity* (MODL4).

In particolare, essendo la stazione di Negrisia iscritta dal 2005 alla rete mondiale di monitoraggio dei flussi di energia, acqua e anidride carbonica **FLUXNET** e partecipando alla rete di validazione della piattaforma satellitare MODIS, è stato possibile verificare i dati di radiazione assorbita, crescita e produttività primaria netta, pre-elaborati dalla NASA. Si ha avuto modo di sperimentare la validità dei prodotti *MOD13, MOD17, MOD43, MODL4*:

a) MODIS Vegetation Indices (VI's)/MOD13/

Gli indici di vegetazione sono risultati essere, negli ultimi anni, uno strumento importante per molte scienze della terra ed una utile risorsa come pratiche di gestione e di monitoraggio. (WIELICKI ET AL., 1998; TOWNSHEND, 1994; SELLERS, 1994; TUCKER, 1983; TOWNSHEND, 1994). I prodotti MODIS VI's sono stati elaborati per consentire un preciso monitoraggio stagionale ed interannuale della vegetazione terrestre. Due indici di vegetazione sono stati proposti come prodotti MODIS: il *Normalized Difference Vegetation Index* (**NDVI**) che mantiene la continuità con l'acquisizione del AVHRR-NDVI, che ha permesso di analizzare una serie storica di variazioni stagionali ed interannuali a partire dal 1982 e l'*Enhanced Vegetation Index* (**EVI**), che estende la sensibilità all'interno dei densi biomi forestali e le aree agricole, riducendo le sorgenti di errore dovute al *canopy background* e all'*aerosol*.

L'NDVI è stato originariamente sviluppato per migliorare la ricezione della riflettanza della vegetazione sopra aree vegetate in modo rado:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad [\text{eq. 26}]$$

L'NDVI consente, mediante alcune proprietà legate al rapporto tra riflettanze, di ridurre il *noise* e l'incertezza associata alle fonti di errore legate alle caratteristiche proprie dello strumento ed esterne (es. le ombre causate dalle nuvole), ma ci sono tuttavia degli svantaggi, tra cui la non linearità ed i problemi di *scaling*, un segnale asintotico (saturato) in condizioni di elevata biomassa fogliare ed una sensibilità in condizioni di suolo esposto con vegetazione rada (HUETE *et al.*, 1997).

L'EVI è stato sviluppato per ottimizzare il segnale della vegetazione e minimizzare la sorgente di incertezza legata all'*aerosol* ed al *canopy background*. L'equazione ha la seguente forma:

$$EVI = 2.5(\rho_{nir} - \rho_{red}) / (L + \rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue}) \quad [\text{eq. 27}]$$

dove L è la correzione per la *canopy background* e per la presenza di neve; C_1 e C_2 sono i coefficienti del termine di *aerosol*, che utilizza la banda del *blue* per la correzione degli effetti dell'*aerosol* nella banda del rosso [KAUFMAN & TANRÉ, 1992]. Questa equazione non fa un rapporto tra bande per eliminare il *noise* e risulta, così, suscettibile al livello di *noise* rimasto nel prodotto MODIS di riflettanza superficiale.

b) MODIS LAI/fPAR [MOD17]

Una modellizzazione a larga scala è utilizzata per la simulazione di un range di risposte ecologiche ai cambiamenti climatici e della composizione chimica

dell'atmosfera, includendo anche i cambiamenti nella distribuzione delle comunità di piante terrestri nel globo come conseguenza dei cambiamenti climatici. Il **LAI** è il parametro chiave in molti modelli che descrivono i flussi di energia, materia (es. CO₂ ed H₂O) e quantità di moto tra la superficie terrestre ed il *boundary layer* planetario. Le variabili che descrivono la struttura della vegetazione della *canopy* e la sua capacità di assorbimento dell'energia sono richieste da numerosi progetti a scala multidisciplinare.

Il prodotto MODIS LAI/fPAR utilizza i modelli radiativi della *canopy* per ottenere i parametri di LAI e **fPAR** (*Photosynthetically Active Radiation Fraction*) dalle misure di riflettanza superficiale. Per la stima del regime radiativo della *canopy* devono essere formulate attentamente tre caratteristiche:

1. L'architettura di un singolo albero e dell'intera *canopy*;
2. Le proprietà ottiche degli elementi della vegetazione (foglie, branche, ecc.) e del suolo; la prima dipende inoltre dalle condizioni fisiologiche (stato idrico, concentrazione di pigmenti, ecc.);
3. Le condizioni atmosferiche che determinano il campo di radiazione incidente.

Per lo sviluppo di MODIS LAI/fPAR è stato utilizzato un modello di transfer radiativo (MYNENI *et al.*, 1990) per derivare le semplici firme spettrali biofisiche ed angolari della vegetazione della *canopy* e le variabili sopra citate.

c) MODIS BRDF/Albedo [MOD43]

L'albedo sulla superficie terrestre è una variabile collegata con un'importante proprietà utilizzata nella modellistica della meteorologia, climatologia e della biosfera terrestre (HENDERSON-SELLERS & PITMAN, 1997; HALL ET AL., 1995). Definito come la frazione della radiazione solare in onda corta discendente che è riflessa verso l'atmosfera dalla superficie terrestre, l'albedo è una variabile che caratterizza l'interazione radiativa tra superficie terrestre ed atmosfera. L'albedo calcolato sopra superfici vegetate è pesantemente influenzato dalle proprietà ottiche e strutturali proprie della vegetazione e può quindi servire come strumento per il loro monitoraggio. Il prodotto MODIS BRDF/Albedo fornisce sia il *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) che l'Albedo della superficie del globo per la ricerca nel cambiamento climatico e nella modellistica in ecologia (WANNER ET AL., 1997). BRDF e Albedo vengono calcolati sulla base di una serie di 16 giorni di osservazioni di riflettanza multi-angolare, atmosfericamente corretta, con una risoluzione spaziale di 1km.

d) Net Photosynthesis / Net Primary Production [MOD14]

Probabilmente la misura del cambiamento nella produttività biologica globale la singola misura più fondamentale di interesse per l'umanità. La *Daily Net Photosynthesis* (**PSN**) è la differenza tra la fotosintesi netta e la respirazione autotrofa nelle 24 ore. La *Net Primary Production* (**NPP**) è la somma annuale della PSN giornaliera. Questi prodotti hanno una utilità teorica ed una pratica. L'utilità teorica è rappresentata principalmente dalla definizione del bilancio del carbonio per le superfici terrestri nel contesto dello studio del bilancio globale del carbonio. L'utilità pratica di un prodotto

PSN/NPP è la misura della resa delle colture, la produzione forestale ed altri aspetti di importanza economica e sociale della crescita della vegetazione.

Il prodotto MODIS PSN/NPP è ottenuto utilizzando i seguenti prodotti MODIS LAI/fPAR, *land cover* e *Daily Data Assimilation Office (DAO) climatology*. Un prodotto PSN è generato ogni 8 giorni, mentre l’NPP è prodotto su base annuale. Gli algoritmi utilizzati per lo sviluppo di questi prodotti è basato su un modello, usualmente attribuito a Monteith (1977), che mette in relazione PSN e NPP con la quantità della *Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR)*. La possibilità di stimare APAR da satellite attraverso indici spettrali di vegetazione, permette la stima di PSN/NPP a scala globale (RUNNING ET AL., 2000).

3 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

3.1 ANDAMENTO METEOROLOGICO

Le annate 2006 e 2007 sono state caratterizzate entrambe da un andamento meteorologico anomalo, sia per quanto riguarda il regime termico che pluviometrico. Di seguito vengono presentati gli andamenti meteorologici verificatisi nel sito di Negrisia nelle annate 2006 e 2007.

3.1.1 Regime termico-igrometrico: Annata 2006

La stagione vegetativa (Aprile–Ottobre) dell'annata 2006 (Figura 8 - Figura 9) è stata caratterizzata da un precoce aumento della temperatura già nella terza decade di Aprile che, tuttavia, è stato interrotto nella prima decade di Maggio con un brusco calo delle temperature sia nelle minime che nelle massime. Nell'ultima decade di Maggio si è verificato un altro brusco crollo delle temperature, raggiungendo per qualche giorno delle minime giornaliere di 5°C, decisamente al di sotto della media stagionale. Il mese di Giugno ha mostrato un rapido aumento delle temperature medie giornaliere che, in poco più di 20 giorni, si sono portate sui 28°C con delle massime che, nel mese di Luglio, hanno raggiunto e spesso superato la soglia dei 35°C. I mesi di Giugno e Luglio sono stati decisamente il mesi più caldi dell'anno ai quali si è spesso associato un elevato deficit di pressione di vapore (VPD), che si è mantenuto superiore a 1 kPa dall'inizio di Giugno con elevati valori massimi (circa 2 kPa) tra Giugno e Luglio. Non si sono verificati eventi di precipitazione nei mesi di Giugno e Luglio, per questo motivo il bilancio idrico ha potuto contare su poco più di 100 mm caduti nel periodo da Aprile a

metà Luglio. Nella prima decade del mese di Agosto si è assistito ad un mutamento delle condizioni meteorologiche, con la caduta di circa 100 mm di pioggia che, da un lato hanno ristabilito sostanzialmente le riserve idriche, ma dall'altro hanno causato un brusco crollo delle temperature di circa 10°C che si è mantenuto sino a fine stagione, con delle minime giornaliere che hanno toccato anche i 10°C nelle prime due decadi del mese.

Nella stagione vegetativa Aprile-Ottobre complessivamente il bilancio idrico ha potuto contare su un totale di precipitazioni di poco più di 300 mm anche per effetto degli intensi eventi di precipitazione verificatisi ad Agosto e fine Settembre.

3.1.2 Regime termico-igrometrico: Annata 2007

L'annata 2007 (Figura 8 - Figura 9) è stata caratterizzata da un inizio anno anomalo che ha mostrato delle temperature decisamente più elevate rispetto alla media stagionale. L'anticipo di oltre 20 giorni verificatosi nel manifestarsi delle temperature medie giornaliere rispetto al 2006, che si sono mantenute più elevate di 5-10 °C dal mese di gennaio, è perdurato fino al mese di Luglio, quando si è ritornati sui livelli medi stagionali. Le temperature medie giornaliere hanno raggiunto i 20 °C già nell'ultima decade di Aprile e nell'ultima decade di Maggio si è assistiti ad un ulteriore aumento delle temperature, con le massime che hanno raggiunto i 35 °C per qualche giorno. A questo aumento anomalo delle temperature si è associato anche un elevato deficit di pressione di vapore (VPD), che si è mantenuto superiore a 1 kPa già ad Aprile con elevati valori massimi (circa 1.5 kPa) nell'ultima decade del mese di Maggio. Ancora

una volta, come nel 2006, il mese di Giugno è iniziato con un brusco crollo delle temperature di 10°C nella prima decade a cui è seguito un successivo periodo caratterizzato da una elevata instabilità fino a fine Luglio. Il mese di Luglio è stato decisamente il mese più caldo con le temperature che hanno toccato punte massime superiori ai 35°C nella seconda decade. I mesi di Giugno e Luglio sono stati decisamente il mesi più caldi dell'anno a quali si è spesso associato un elevato deficit di pressione di vapore (VPD), che si è mantenuto superiore a 1 kPa dall'inizio di Giugno con elevati valori massimi (circa 1.5 kPa). Non si sono verificati significativi eventi di precipitazione dalla seconda decade di Giugno a fine Luglio, sebbene il bilancio idrico abbia potuto contare su 200 mm caduti nel periodo da Aprile a fine Luglio. Ancora una volta, come nel 2006, a fine Luglio si è assistito ad un brusco crollo delle temperature (circa 10°C) per effetto di intense piogge verificatesi nell'ultima decade.

3.1.3 Confronto tra le annate 2006 e 2007

Il confronto fra le annate 2006-2007 può essere effettuato osservando l'andamento cumulato delle temperature giornaliere (Somme Termiche) e delle precipitazioni totale giornaliere (Figura 10). Il calcolo delle sommatorie termiche (ST) è stato effettuato partendo dai dati semiorari ottenuti dalla stazione meteorologica presente nel vigneto. La somma delle temperature medie semiorarie maggiori di uno zero di vegetazione di 10°C, ha permesso di calcolare la somma dei gradi giorno. In Figura 10 è possibile osservare come l'annata 2007 abbia mostrato, rispetto al 2006, un *offset* di circa 30 giorni nella sommatoria termica che si è mantenuto tale fino a fine anno quando

le due curve cumulate si sono raggiunte. È possibile spiegare questo comportamento anomalo per effetto di due distinti eventi verificatisi nel 2007 rispetto al 2006:

- Anticipo di circa 30 giorni delle temperature (circa 10°C) già a Gennaio. Di conseguenza mentre la curva della sommatoria termica del 2006 inizia a crescere significativamente per effetto dell'aumento delle temperature in corrispondenza del 24-25 Marzo, nel 2007 si assiste a questo fenomeno già il 17-18 Febbraio. Questo anticipo è possibile osservarlo durante tutta la stagione 2007.
- Un Autunno-Inverno anomalo nel 2006, con temperature che si sono mantenute sopra la media stagionale sino a fine Novembre, permettendo così un riallineamento delle curve delle sommatorie termiche cumulate che altrimenti avrebbero mantenuto l'offset per effetto dell'anticipo mostrato nella prima metà dell'anno.

Nella stagione vegetativa Aprile-Ottobre complessivamente il bilancio idrico ha potuto contare su un totale di precipitazioni di 500 mm. Osservando l'andamento delle precipitazioni cumulate durante tutta l'annata 2007 è possibile osservare come questa si sia mantenuta sensibilmente sopra l'annata 2006, manifestando un allontanamento progressivo delle precipitazioni cumulate nel 2007 rispetto al 2006 che, a fine anno, hanno raggiunto rispettivamente un totale di 650 mm e 520 mm.

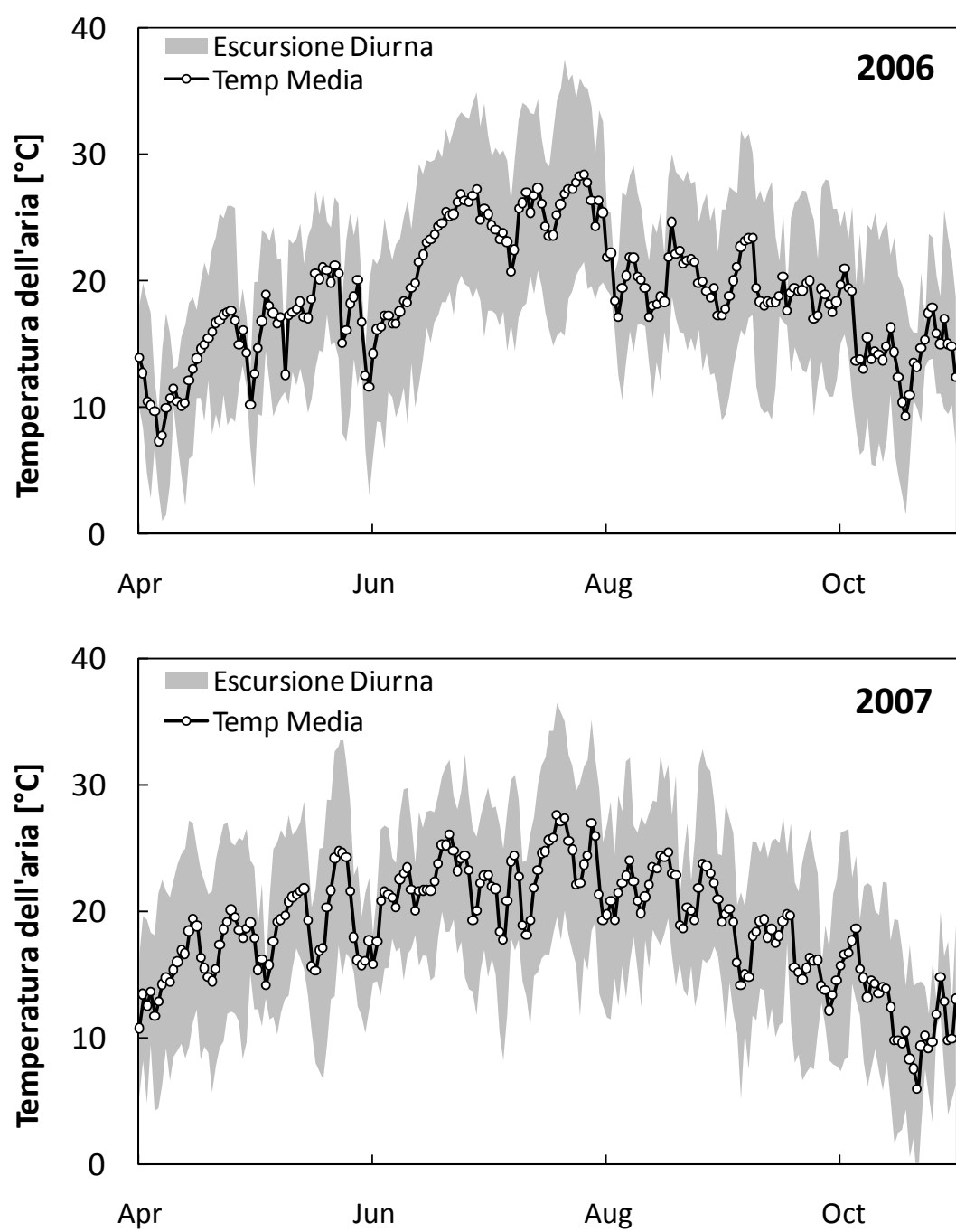


Figura 8 Andamento delle Temperature nella stagione 2006 (alto) e 2007 (basso).

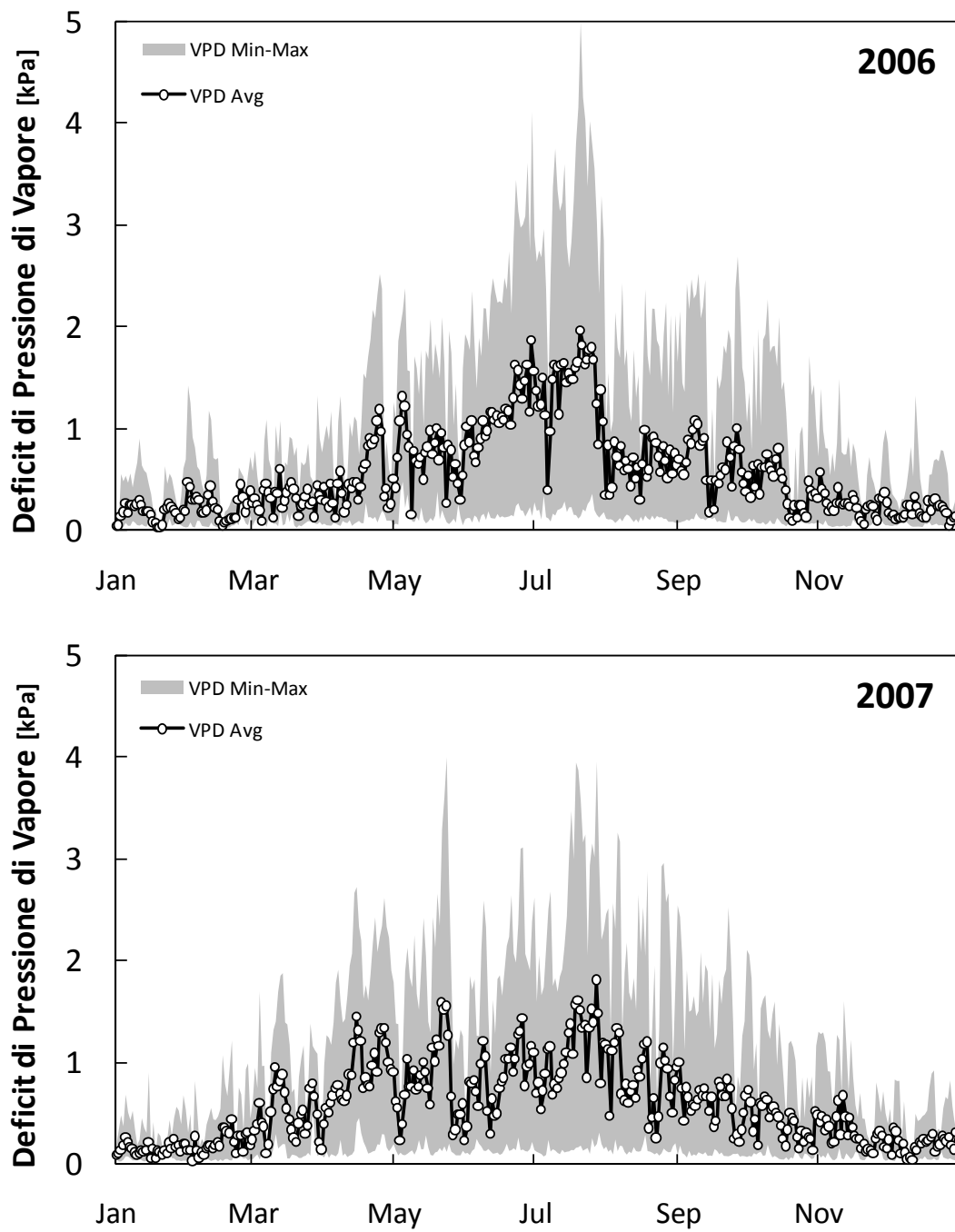


Figura 9 Andamento stagionale del Deficit Di Pressione di vapore per il 2006 (in alto) e 2007 (in basso).

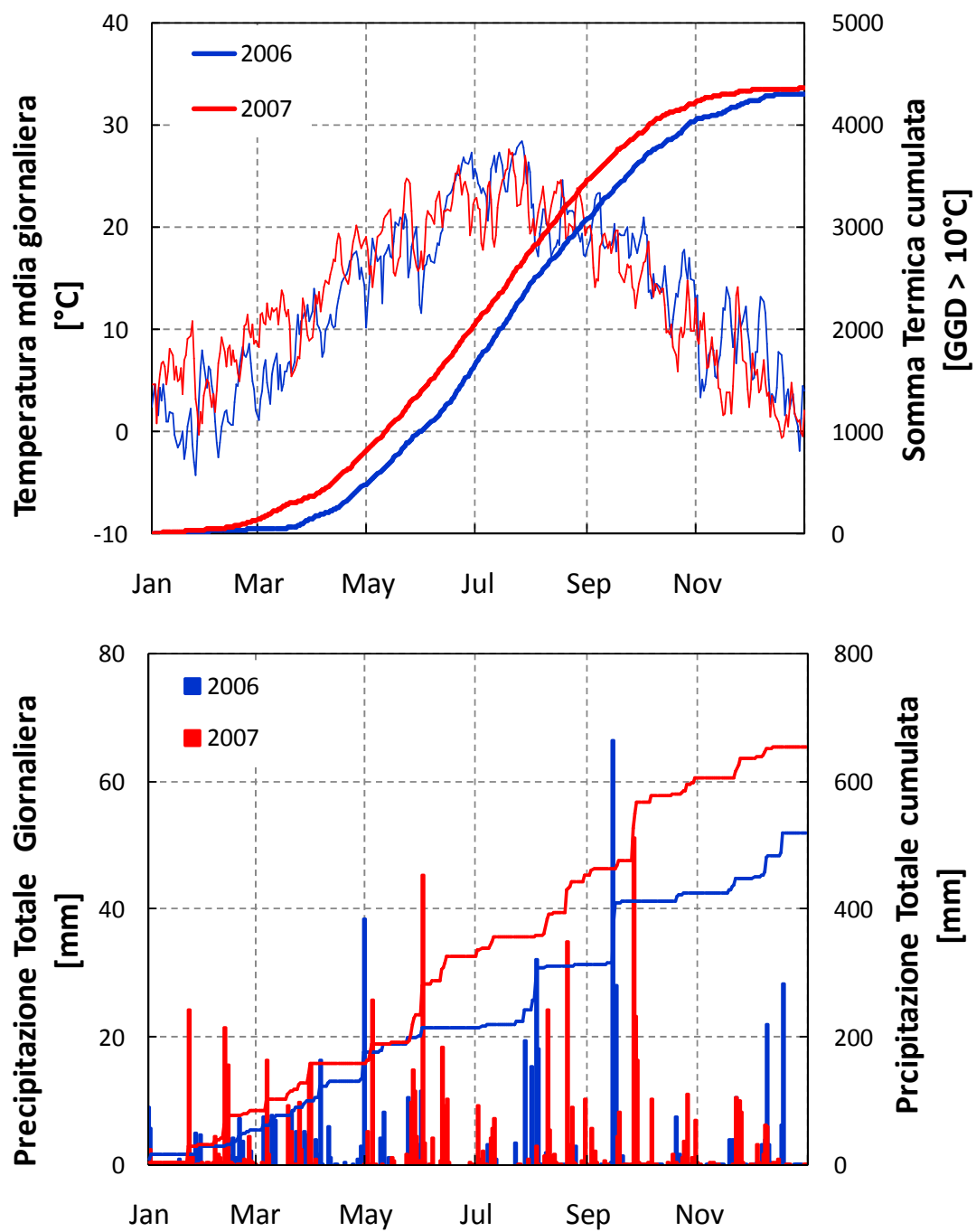


Figura 10 Confronto tra le annate 2006 (blu) e 2007 (rosso). Regime termico e sommatorie termiche cumulate (in alto); regime pluviometrico e precipitazioni cumulate (in basso).

Le misure di potenziale idrico fogliare, effettuate con la camera a pressione nella stagione 2007 (Figura 11), hanno permesso di monitorare lo stato del vigneto. In particolare dai risultati ottenuti di potenziale idrico fogliare in *pre-dawn* ($\psi_{\text{pre-dawn}}$) è possibile notare come, anche se da metà giugno a fine luglio non vi siano stati eventi significativi di precipitazione, la vite ha mantenuto valori di $\psi_{\text{pre-dawn}}$ inferiori a -6 kPa. I valori più elevati di ψ_{midday} (-8.5 kPa) sono stati ottenuti a fine luglio ed hanno costretto l'azienda ad effettuare un intervento irriguo che, come si può notare dalle successive misure di ψ , hanno ristabilito lo stato idrico della vite, complice anche la ripresa delle precipitazioni nella prima decade di agosto.

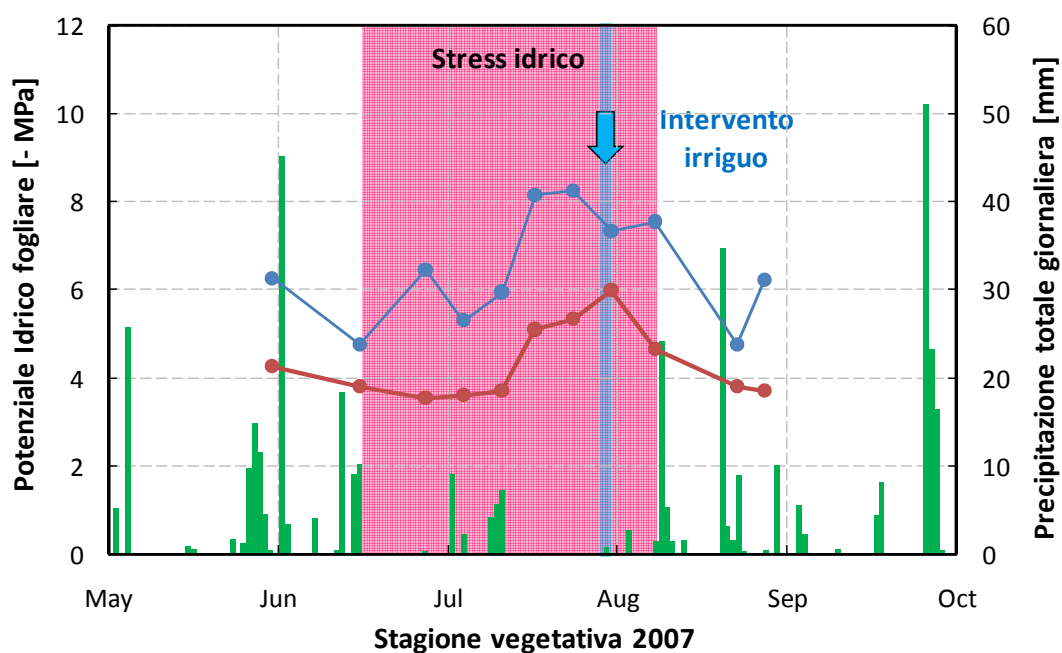


Figura 11 Andamento del potenziale idrico fogliare: ψ_{midday} (in blu) e $\psi_{\text{pre-dawn}}$ (in rosso) nella stagione 2007 in relazione al regime di precipitazioni (in verde).

3.2 MISURE BIOMETRICHE

L'analisi delle crescite e della ripartizione degli assimilati tra i vari organi è importante per determinare la strategia adottata dalla pianta come conseguenza dell'adattamento alle condizioni ambientali. Uno studio preliminare di questa analisi ha permesso, attraverso lo spianto di una pianta intera (Figura 12), di determinare quale fosse la quantità di sostanza secca totale e come questa venisse ripartita tra i suoi diversi organi. Lo spianto è stato effettuato nella fase fenologica di invaiatura, una volta raggiunta la massima superficie fogliare. In particolare si è cercato di valutare la differenza tra la parte epigea e quella ipogea, equilibrio che viene raggiunto in risposta: alla densità di impianto (i); alle pratiche di gestione del suolo e della chioma (ii) (interventi colturali, fertilizzazione e irrigazione); ed alle variabili ambientali (iii). Lo spianto ha permesso di effettuare una ripartizione della sostanza secca tra i seguenti organi:

- Parte epigea:
 - o Legno vecchio (cordone)
 - o Tralci
 - o Foglie (principali e secondarie)
 - o Grappoli
- Parte ipogea (classi di diametro radicale):
 - o Rad. grosse ($\varnothing > 1$ cm)
 - o Rad. medie ($1 > \varnothing > 0.5$ cm)
 - o Rad sottili ($0.5 > \varnothing > 0.25$ cm)
 - o Rad. fini ($\varnothing < 0.25$ cm)

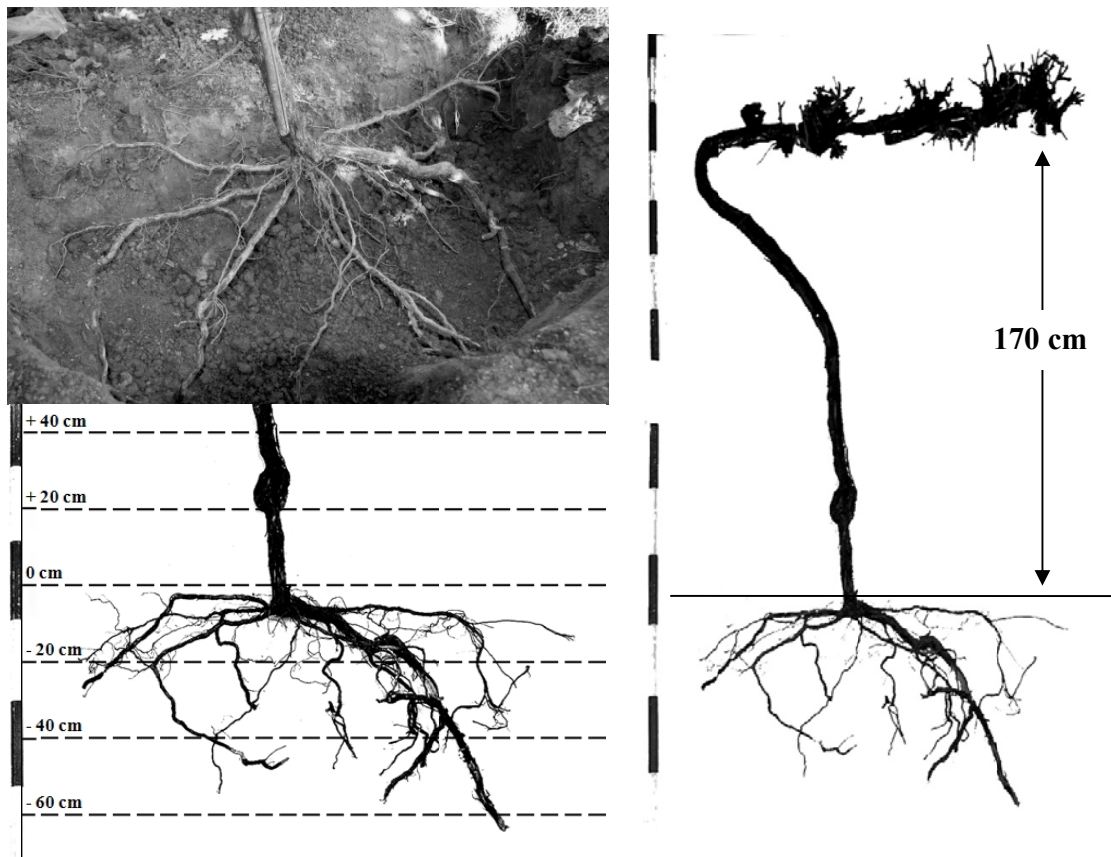


Figura 12 Spianto effettuato per lo studio della ripartizione della sostanza secca tra i vari organi (alto -sx). Apparato radicale (SO4) superficiale e pianta intera utilizzata per la misura della ripartizione della sostanza secca.

La maggior parte delle radici, come conseguenza di una densità di impianto di 3077 piante ha^{-1} , appare racchiusa nei primi 60 cm di profondità di terreno (sono le radici che offrono il maggior contributo all'assorbimento) (Figura 12). Spingendosi oltre solamente con la sola radice fittonante, la cui lunghezza massima è in relazione alla profondità con cui è stato effettuato lo scasso all'impianto. Una caratteristica dell'apparato radicale che, seppur essendo di natura genetica (SO4), risente in modo

sensibile della densità di impianto è l'angolo geotropico. L'angolo geotropico è l'angolo che si forma tra la superficie del terreno e l'orientamento prevalente delle radici.

L'essiccazione dei diversi comparti della pianta ha permesso il calcolo della ripartizione della sostanza secca tra i diversi organi (Figura 13). La pianta ha raggiunto una biomassa totale di 9.7 kg, ripartita per un 93% nella parte epigea e per solo un 7% nella parte ipogea; appare quindi evidente il netto sbilanciamento dell'equilibrio tra i due comparti. La biomassa totale della parte epigea (9 kg) è così ripartita (Figura 13): 70% in legno portato dal cordone permanente; 9% in legno giovane portato dai germogli dell'anno; 8% in foglie suddivise in principali (5%) e secondarie (3%); 6% in grappoli. La ripartizione della parte ipogea è stata analizzata suddividendo la biomassa complessiva dell'apparato radicale in classi di diametro (Figura 13). Il 58% della biomassa radicale è costituito da radici grosse ($\varnothing > 1\text{cm}$); il 24% in radici medie ($1 < \varnothing < 0.5\text{ cm}$); 11% in radici sottili ($0.5 < \varnothing < 0.25\text{ cm}$) e il 7% in radici fini ($\varnothing < 0.25\text{ cm}$).

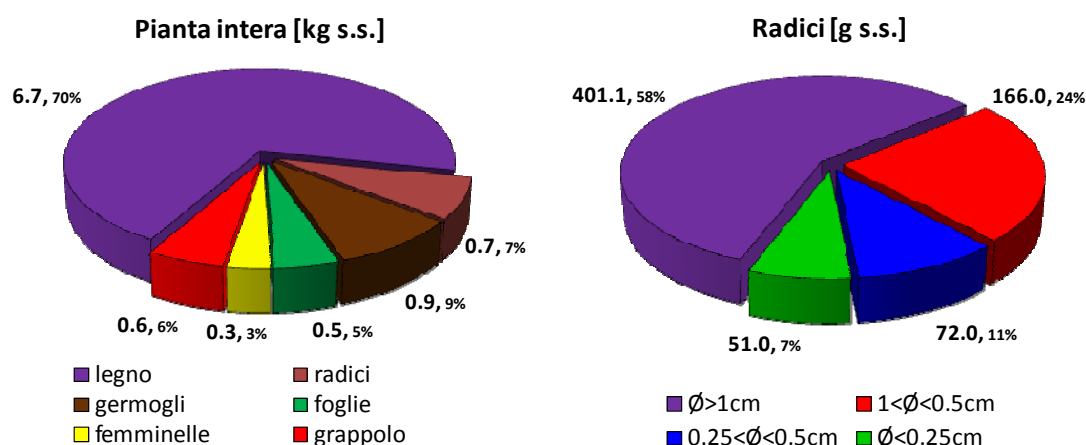


Figura 13 Ripartizione dei diversi organi della pianta (sx) e suddivisione della parte ipogea in classi di diametro radicale (dx).

3.2.1 Analisi della struttura della chioma

In occasione dello spianto è stato effettuato uno studio della struttura della chioma utilizzando tecniche dirette ed indirette. In particolare è stato messo a confronto un metodo indiretto di misura dell'area fogliare con un campionamento diretto distruttivo della chioma della vite. La raccolta dall'apparato fogliare per via distruttiva è stata effettuata dopo aver condotto lo studio con il sistema LAI_2000, permettendo una suddivisione della chioma della pianta in sei strati fogliari (Figura 14) i primi due al di sotto del cordone permanente a 170 cm da terra (130-150 cm, 150-170 cm) e gli altri al disopra, 170-190 cm, 190-210 cm, 210-230 cm e 230-250 cm; ricordando che nel cordone libero mobilizzato i tralci non vengono palizzati con l'ausilio di fili metallici ma crescono liberi e vengono controllati solo dagli interventi in verde.

L'area dei sei strati fogliari è stata misurata con l'ausilio di un software di analisi di immagine, permettendo di ottenere un valore di LAI per ognuno degli strati fogliari. In particolare, la pianta complessivamente ha raggiunto (nella fase di massima superficie fogliare) un LAI di 2.3 così ripartito tra i 6 strati fogliari (Figura 14): la superficie fogliare cresciuta al di sopra del cordone permanente ha rappresentato il 72% del LAI totale, concentrato soprattutto negli strati fogliari 170-190 cm e 210-230 cm che hanno raggiunto rispettivamente un LAI di 0.7 e 0.6. La vegetazione cresciuta al di sotto del cordone ha raggiunto un 28% del LAI totale, concentrato in particolare nello strato immediatamente sotto al cordone permanente: 150-170cm con un LAI di 0.6. Oltre alla misura dell'area fogliare si è determinato il peso secco di ogni strato fogliare (Figura 14)

che ha rispecchiato il *pattern* di area fogliare, con gli strati fogliari ad altezza del cordone che hanno mantenuto la maggior parte della sostanza secca.

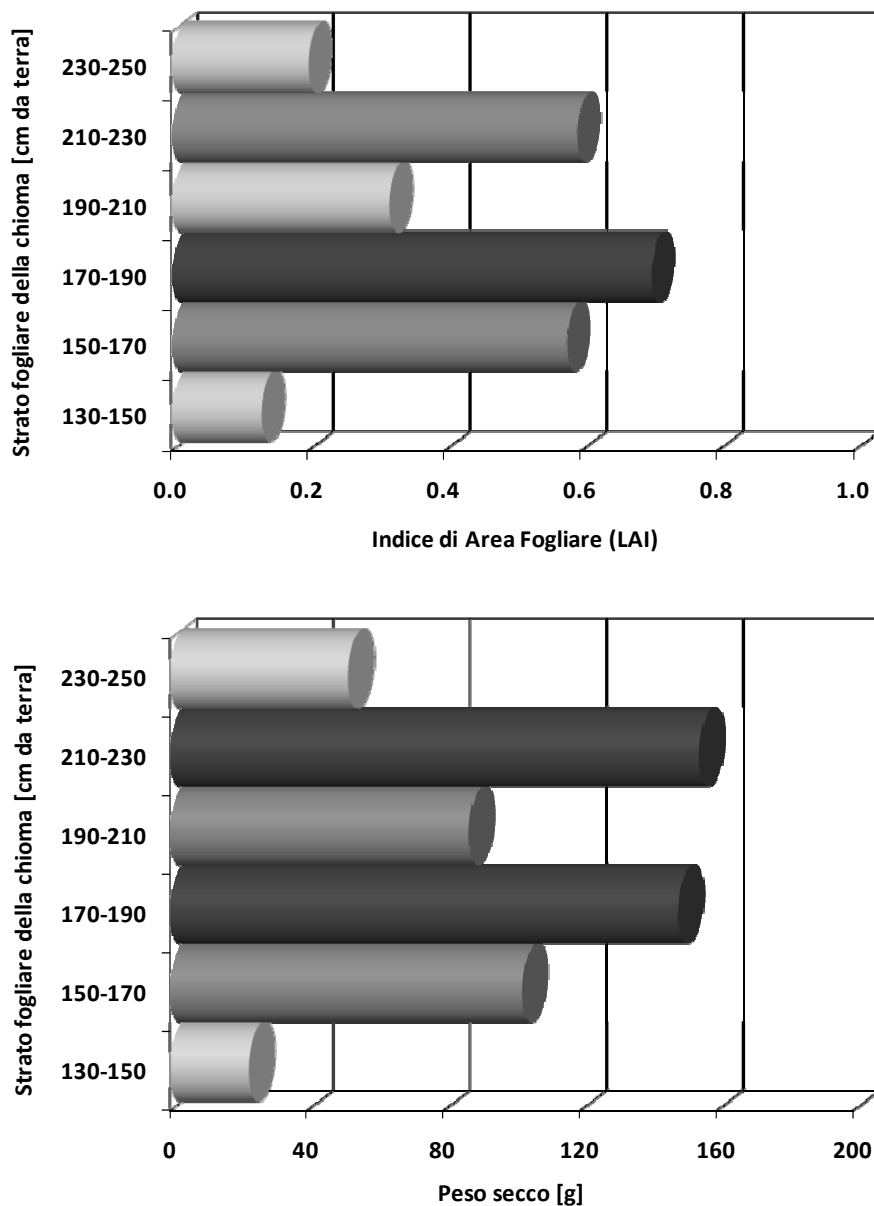


Figura 14 Suddivisione della chioma in sei strati di superficie fogliare. Ripartizione del LAI nei diversi strati (in alto); ripartizione della sostanza secca fogliare (in basso).

Dai dati ottenuti è possibile osservare come la chioma abbia risposto agli interventi in verde, in particolare ai due interventi di cimatura che sono stati effettuati precedentemente alla fase di invaiatura. Le cimature effettuate con barra laterale (sulla parete) e orizzontale (sopra la chioma) hanno determinato la lunghezza definitiva dei germogli principali e causato una proliferazione di femminelle al di sopra nella zona del cordone permanente.

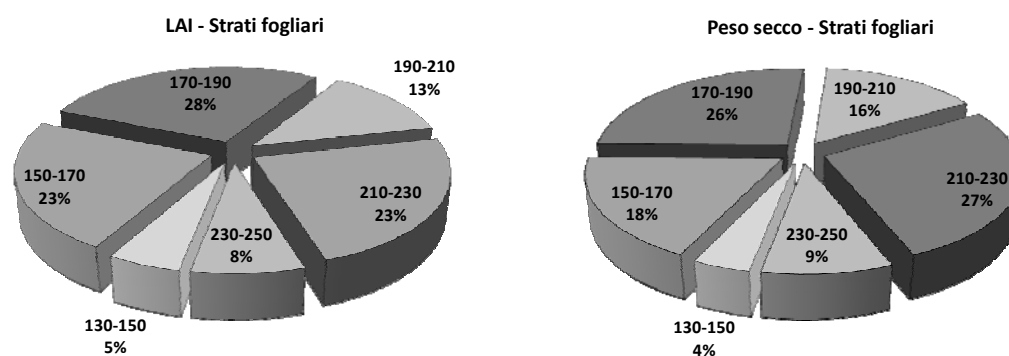


Figura 15 Ripartizione percentuale dei diversi strati fogliari in termini di LAI (sx) e di peso secco (dx).

La misura della superficie fogliare con metodi indiretti (metodi ottici) ha consentito di confrontare alcuni protocolli di misura del LAI in vigneto proposti in letteratura (JOHNSON & PIERCE, 2004; PATAKAS & NOITSAKIS, 1999; OLLAT ET AL., 1998; SOMMER & LANG, 1994) per valutare, mediante il confronto col il LAI ottenuto per via diretta distruttiva, quale fosse quello più idoneo per il vigneto di studio.

I protocolli testati (Tabella 4) hanno differito per la direzione del transetto rispetto al filare, per l'angolo di azimuth del sensore rispetto al filare e per l'altezza da terra. In Figura 16 è rappresentato il valore medio di LAI $\pm$ Errore Standard (ES)

ottenuto per ognuno dei protocolli testati. Il *range* di LAI determinato con le misure indirette tra i diversi protocolli è relativamente elevato con un valore minimo di 1.6 (P_B) ed un massimo di 3.2 (P_F).

Dai risultati ottenuti (Figura 16) appare evidente come il parametro che ha condizionato maggiormente la misura del LAI è stato l'angolo di azimuth a cui è stato orientato il sensore ottico rispetto alla direzione del filare. In particolare un angolo perpendicolare (PERP) al filare è quello che ha dato il miglior risultato (~2.1 - 2.2) in relazione al LAI misurato per via diretta (2.3). È possibile notare, invece, come un transetto effettuato con il sensore ottico orientato diagonalmente e parallelamente al filare abbia, in genere, sottostimato il LAI della chioma di vite (~1.6-1.8).

Tra i diversi protocolli che hanno utilizzato il sensore orientato perpendicolarmente al filare nel transetto, quelli che hanno raggiunto il miglior risultato sono stati P_D , J_B e O_A . In particolare tutti e tre hanno previsto di mantenere il sensore ad altezza terreno (GR) durante il protocollo di misura; è possibile notare che questa scelta abbia inciso notevolmente sul risultato, basti osservare il LAI di 3.2 ottenuto dal protocollo P_F , sempre con il sensore orientato perpendicolarmente al filare (PERP), ma portato ad altezza del cordone permanente (TR).

Tra i tre protocolli che hanno raggiunto i migliori risultati in termini di LAI (P_D , J_B e O_A) sembra che la variabile orientamento del sensore non abbia influito sensibilmente sul risultato, seppur il protocollo O_A è quello che si è avvicinato

maggiormente (2.2) al LAI misurato per via diretta distruttiva (2.3 ± 0.2), con un basso errore standard tra le diverse ripetizioni effettuate.

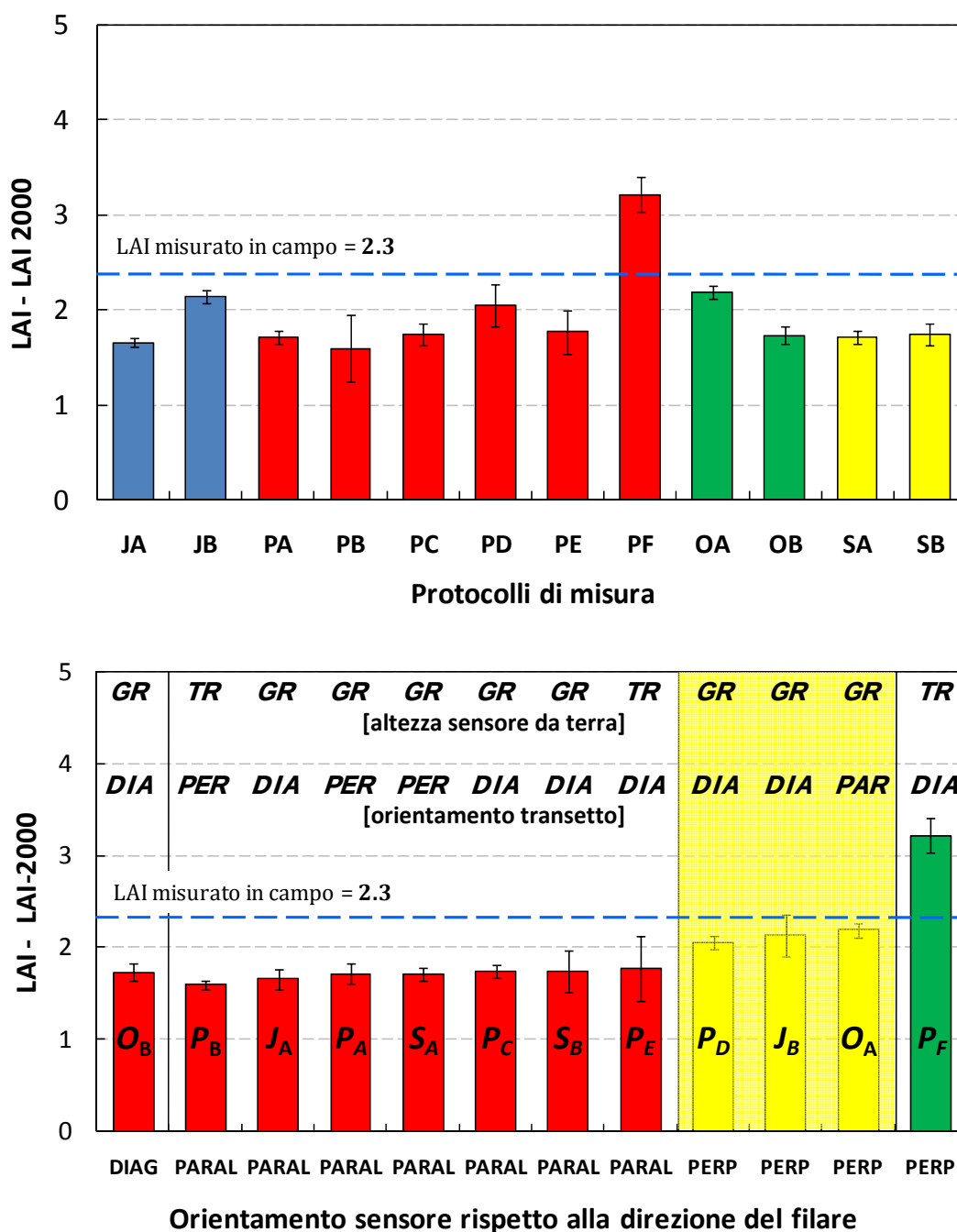


Figura 16 Confronto tra diversi protocolli di misura del LAI con il sistema LAI-2000.

I risultati ottenuti permettono di sottolineare l'importanza di una calibrazione dello strumento LAI-2000 effettuata preventivamente in campo e in generale di tutti i metodi indiretti di misura, per evitare di incorrere in errori grossolani e individuare, così, il protocollo di misura più idoneo alle condizioni del sito di studio.

3.3 ACCUMULO E RIPARTIZIONE DELLA SOSTANZA SECCA

3.3.1 Sviluppo fenologico

I rilievi biometrici effettuati in vigneto, oltre ad aver permesso un preciso studio dell'andamento della crescita e della ripartizione della sostanza secca della vite, hanno consentito di effettuare una analisi dello sviluppo fenologico tra le due annate 2006 e 2007. In particolare come conseguenza dello sfasamento osservato tra le curve di accumulo di gradi giorno nella stagione vegetativa tra i due anni (Figura 17), in cui si nota un *offset* di circa 15-20 giorni che rimane costante nel periodo vegetativo dal germogliamento alla raccolta, è possibile osservare come la comparsa degli stadi fenologici osservati non abbia risentito di questo sfasamento (Figura 17).

Il passaggio da uno stadio fenologico all'altro, infatti, è avvenuto pressoché al raggiungimento della stessa soglia di sommatoria termica in entrambe le annate. La sovrapposizione tra le due curve è stata migliore durante le prime fasi fenologiche dal germogliamento alla fioritura, periodo nel quale i rilievi sono stati effettuati con cadenza settimanale. Soprattutto nella fase di invaiatura, c'è stato il maggior sfasamento tra le due curve, probabilmente dovuto al rilassamento degli intervalli di campionamento da una settimana (fino all'invaiatura) a 15 giorni.

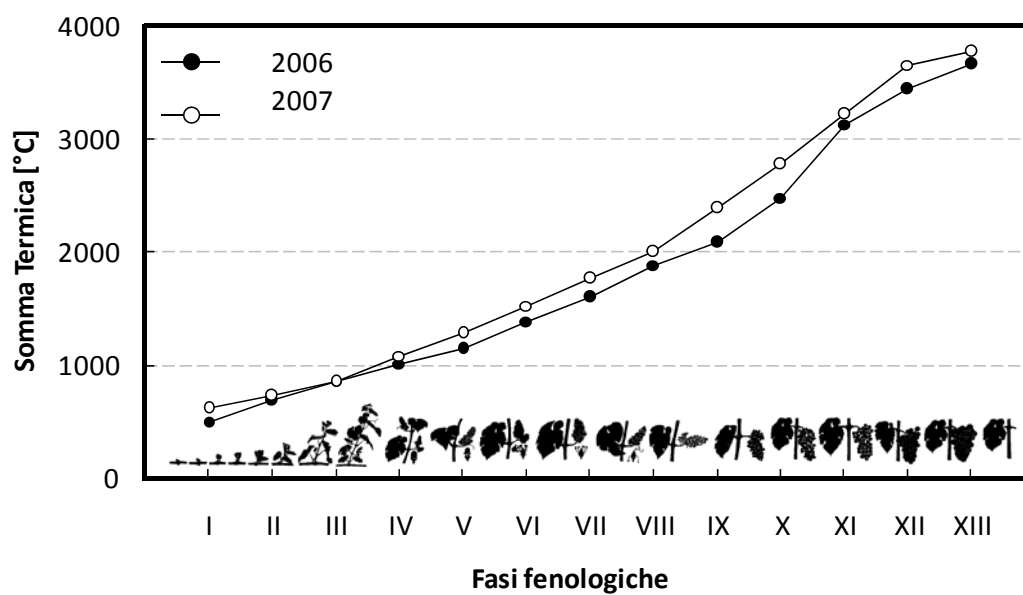
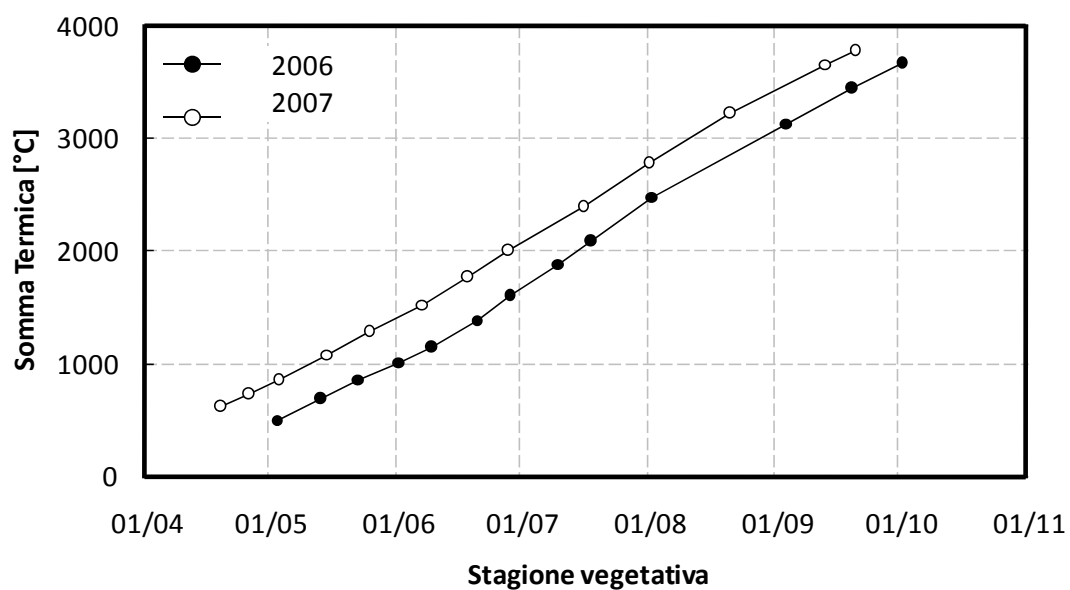


Figura 17 Andamento del valore di sommatoria termica durante la stagione in corrispondenza delle date di campionamento effettuate (in alto); fasi fenologiche osservate in funzione della somma termica (in alto).

3.3.2 Crescite - scala di germoglio

Di seguito sono presentati i risultati ottenuti dai rilievi biometrici effettuati nel sito di Negrisia per la varietà Carmenère durante la stagione vegetativa delle due annate di studio 2006 e 2007 . In particolare sono state prese in esame la crescita in termini di lunghezza del germoglio, area fogliare e numero foglie, e la ripartizione degli assimilati tra i diversi organi di un germoglio medio distinguendo tra l'asse principale e l'asse secondario.

3.3.2.1 Lunghezza del germoglio

La crescita del germoglio in termini di lunghezza (Figura 18) è stata osservata durante tutta la stagione vegetativa ed è stato possibile osservare la risposta della pianta nei confronti degli interventi colturali di cimatura effettuati in verde. La crescita dei germogli principali (Figura 18) è risultata molto rapida nel primo periodo: in circa 40 giorni dal germogliamento, in entrambe le annate anche se con un evidente anticipo del 2007, hanno raggiunto una lunghezza definitiva di 70 cm. Questa lunghezza è stata impostata dal primo intervento di cimatura meccanizzata che ne ha interrotto efficacemente lo sviluppo che, come si vede nel grafico, è rimasto tale fino a fine stagione ed invece ha innescato la crescita dei germogli secondari (Figura 18).

La crescita significativa dei germogli secondari è iniziata, solo dopo il primo intervento di cimatura (Tabella 1). La varietà Carmenère ha dimostrato essere piuttosto vigorosa, emettendo in poco più di un mese, assi secondari per una lunghezza complessiva superiore a quella del germoglio principale (circa 90 cm in entrambe le annate). Ancora una volta è visibile l'anticipo del 2007 rispetto alla crescita del 2006

che, tuttavia, non appare significativamente diversa. Il secondo intervento di cimatura in entrambe le annate ha provocato una leggera riduzione nella lunghezza media dei germogli principali ed ha, senza dubbio, ulteriormente stimolato la crescita degli assi secondari.

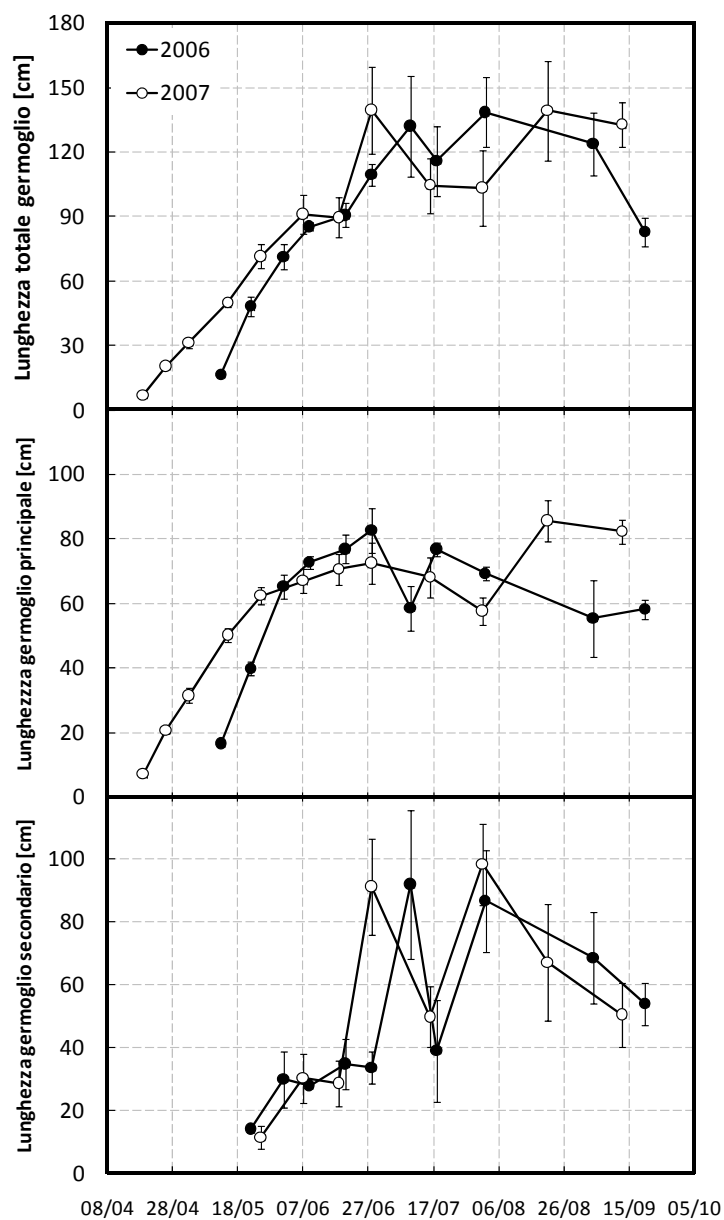


Figura 18 Crescita in lunghezza del germoglio nelle due annate di studio: germoglio totale (in alto), asse principale (al centro) e assi secondari (in basso).

In termini di lunghezza complessiva (Figura 18) degli assi presenti su un germoglio (germoglio principale e secondari), si può notare che questa cresca con regolarità fino alla fine di giugno, quando viene effettuato il primo intervento di cimatura, raggiungendo a fine stagione una lunghezza complessiva di circa 150 cm che ne conferma le caratteristiche di elevata vigoria.

3.3.2.2 Numero di foglie

Il numero delle foglie principali di un germoglio principale è risultato circa pari a 10-15 per entrambe le annate, in corrispondenza del primo intervento di cimatura (Figura 19) che ne asporta gli apici vegetativi. Successivamente, esso viene ridotto sensibilmente per l'effetto combinato dell'operazione meccanizzata di cimatura e defogliazione.

Il numero di foglie presenti sui germogli secondari (Figura 19) nel 2007 si stabilizza attorno a fine giugno probabilmente per la scarsità di precipitazioni, riprendendo successivamente con una notevole attività di crescita delle femminelle in tarda estate, probabilmente come conseguenza delle elevate piogge di fine luglio-inizio agosto. Nel 2006, invece, l'intervento di cimatura sembra comportare una maggior crescita di foglie secondarie rispetto al 2007, che si stabilizza ugualmente come conseguenza dello scarso regime di precipitazioni e rimane all'incirca costante fino a fine stagione. La ripartizione, in entrambe le annate, appare nettamente a favore degli assi secondari, come conferma della vigoria di questa varietà.

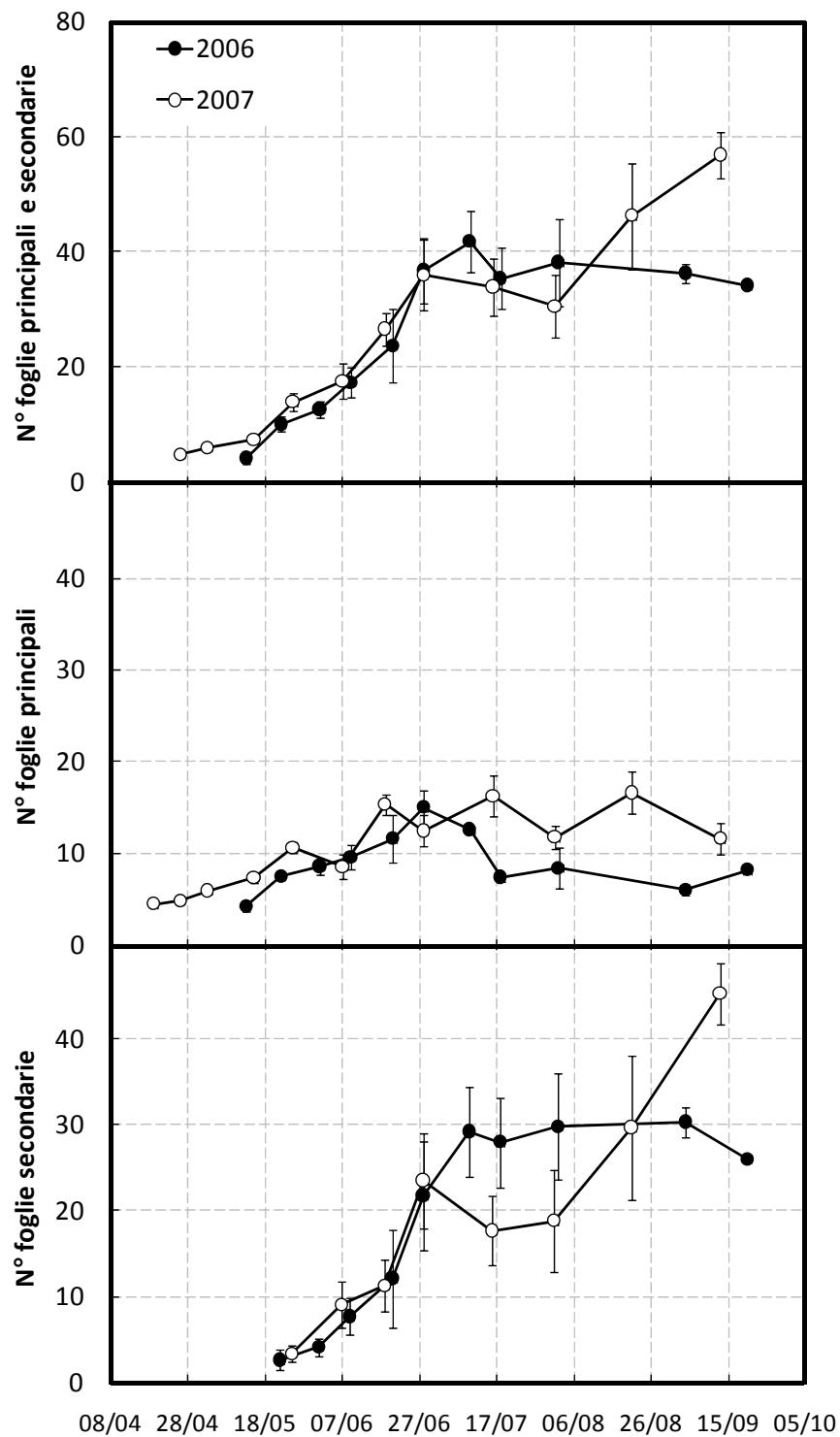


Figura 19 Andamento dello sviluppo del numero di foglie per germoglio nelle due annate di studio: germoglio totale (in alto), asse principale (al centro) e assi secondari (in basso).

Complessivamente, l'andamento del numero complessivo foglie di un germoglio (Figura 19) ha un andamento a “doppia sigmoide” nel 2007, determinato dai due interventi di cimatura/defogliazione eseguiti e dalla particolare distribuzione delle precipitazioni nella stagione. Nel 2006, invece, sebbene il numero complessivo non sia significativamente diverso dal 2007, l'andamento registrato della crescita del numero di complessivo di foglie sembra risentire maggiormente della siccità verificatasi a metà estate, soprattutto perché il bilancio idrico non aveva potuto contare su eventi di precipitazione significativi in primavera. Come conseguenza il numero di foglie del germoglio, una volta raggiunto il massimo a metà estate, si stabilizza fino a fine stagione.

3.3.2.3 Sviluppo della superficie fogliare

L'andamento della superficie fogliare del germoglio principale (Figura 20) ricalca quello del numero di foglie per entrambe le annate. All'epoca della prima cimatura raggiunge il valore di 750-800 cm² per entrambe le annate e successivamente si assiste ad una leggera diminuzione (2007) e ad una stasi (2006) come conseguenza dei successivi interventi di cimatura.

Per quanto riguarda la superficie fogliare delle femminelle (Figura 20), in entrambe le annate si assiste ad una reazione notevole al primo intervento di cimatura, con l'emissione di 600-700 cm² nel solo mese di giugno. Come per il numero di foglie, in entrambe le annate, si assiste ad una ulteriore attività vegetativa anche in tarda estate, sebbene nel 2006 questa non sia stata altrettanto elevata quanto nel 2007.

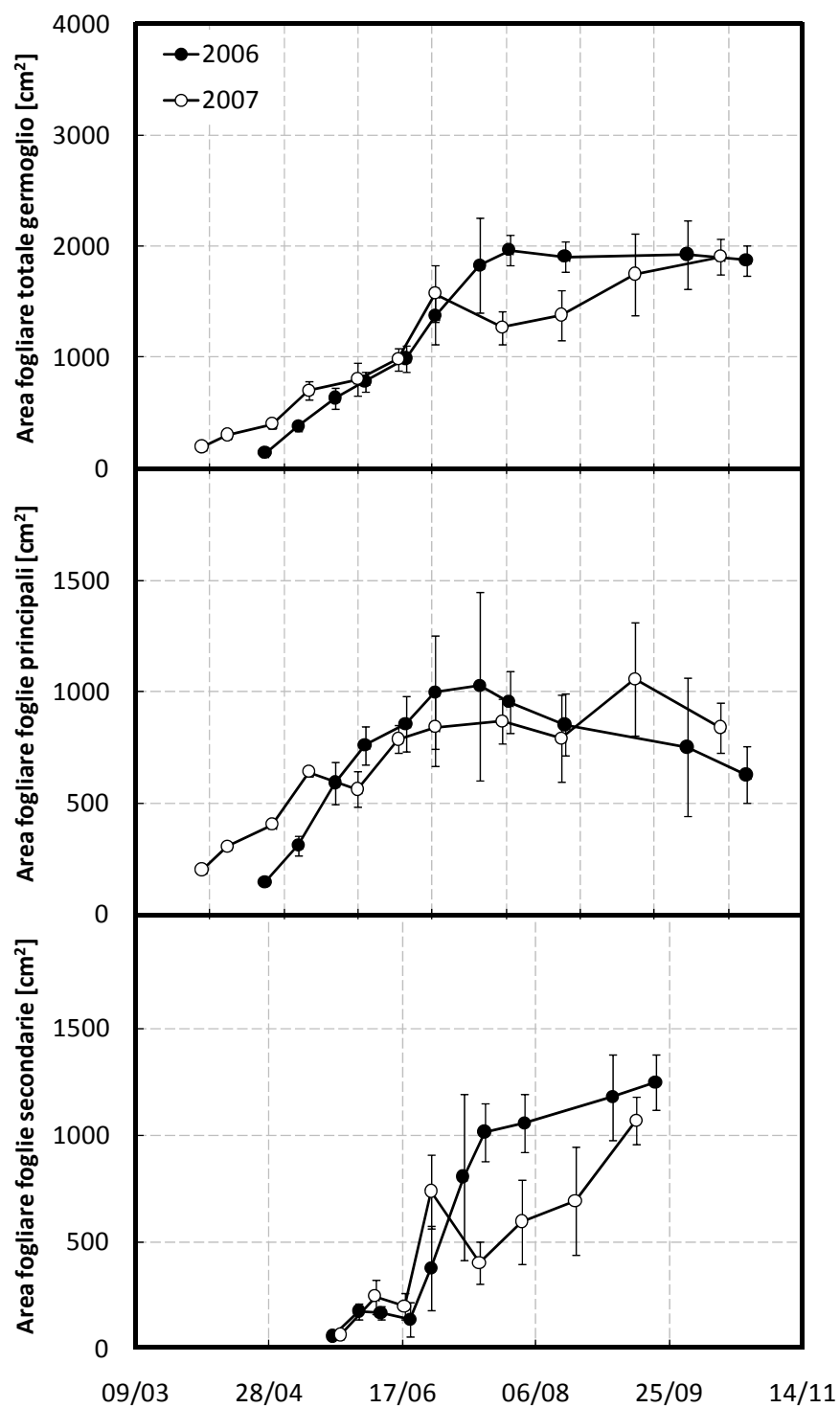


Figura 20 Andamento dello sviluppo della crescita della superficie fogliare per germoglio nelle due annate di studio: germoglio totale (in alto), asse principale (al centro) e assi secondarie (in basso).

Per quanto detto, la superficie fogliare complessiva del germoglio (Figura 20), pur frenata dai due interventi di cimatura, risulta tendenzialmente simile nei due anni, con un andamento a “doppia sigmoide” nel 2007 e con un andamento più regolare nel 2006, raggiungendo in entrambi i casi valori che, a fine stagione, raggiungono i 2 m². La vigoria dimostrata si riflette anche questa volta nella ripartizione dell’area fogliare, seppur con un comportamento differente tra le due annate. Nel 2006 si nota un certo equilibrio tra l’asse principale e secondario che, tuttavia, risulta maggioritario a fine stagione. Nel 2007, invece, l’equilibrio è spostato decisamente verso l’asse principale.

3.3.2.4 Specific Leaf Area (SLA)

L’analisi dell’andamento della crescita della singola foglia durante la stagione vegetativa è stato effettuato in relazione al peso secco medio e all’area fogliare media in relazione ad una singola foglia. In particolare è stata fatta una media dell’area delle foglie del germoglio senza fare distinzione tra asse principale e secondario.

La superficie fogliare media di una singola foglia (Figura 21) raggiunge il massimo ai primi di giugno (prima dell’intervento di cimatura) e successivamente diminuisce durante la stagione per effetto del prevalere del numero delle foglie secondarie, più piccole. Questo comportamento è chiaro nel 2007 ma solo in parte nel 2006, in cui si assiste, dopo la diminuzione in seguito all’intervento di cimatura, ad una ripresa dell’area fogliare media delle singola foglia dovuta all’assestamento del numero di foglie secondarie osservato.

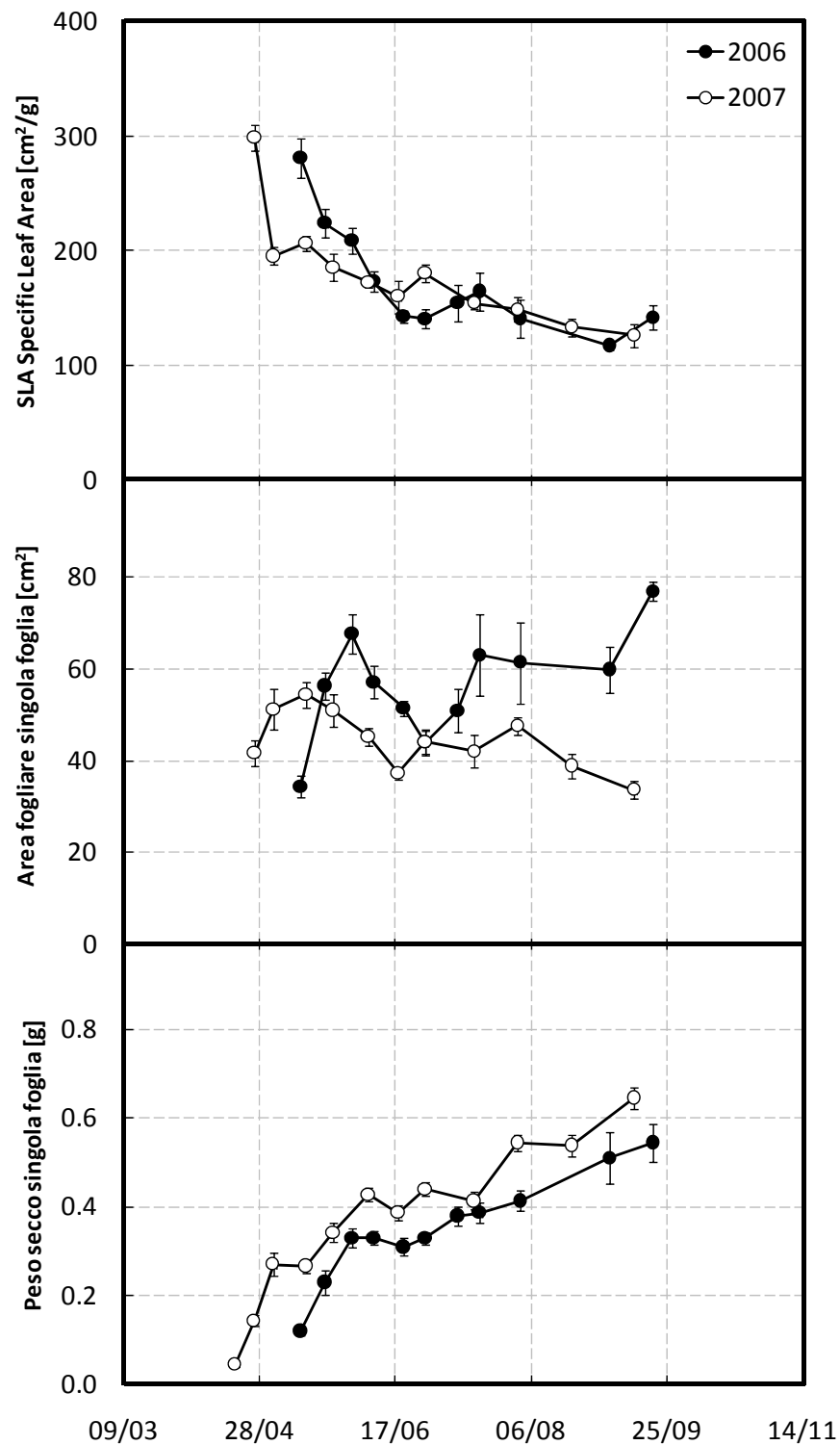


Figura 21 Andamento della superficie fogliare specifica per una singola foglia (in alto), cioè dal rapporto tra la superficie fogliare (al centro) ed il peso secco (in basso) di una foglia.

L'andamento del peso secco di una singola foglia del germoglio (Figura 21) è abbastanza simile tra le due annate, fatta eccezione per l'anticipo del 2007. In entrambi i casi, si assiste ad una crescita progressiva del peso secco medio della singola foglia dovuto all'ispessimento della lamina sia per quanto riguarda le foglie principali che le secondarie. Entrambe le annate mostrano un leggero flesso in corrispondenza del primo intervento di cimatura per poi riprendersi successivamente.

Come risultato degli andamenti stagionali della superficie fogliare media e del peso secco medio, lo Specific Leaf Area (SLA) (Figura 21), cioè il rapporto tra la superficie ed il peso secco di una singola foglia, diminuisce leggermente durante la stagione in entrambe le annate, indicando un graduale ispessimento della lamina fogliare a fronte, invece, del raggiungimento della massima superficie fogliare della lamina.

3.3.2.5 Carica produttiva fogliare

Per valutare l'equilibrio vegeto-produttivo, è stato calcolato il rapporto tra la carica produttiva (espressa come peso fresco dei grappoli presenti su un germoglio) e la superficie fogliare totale complessiva di un germoglio (g. principale e g. secondari). Questo è un indice che è in genere ben correlato con la qualità dell'uva e che, per garantire una maturazione ottimale, non dovrebbe essere superiore a 1.0-1.5 kg m⁻². L'andamento di questo rapporto (Figura 22) segnala una carica equilibrata in entrambe le annate con un valore pari circa a 1 kg m⁻² alla vendemmia.

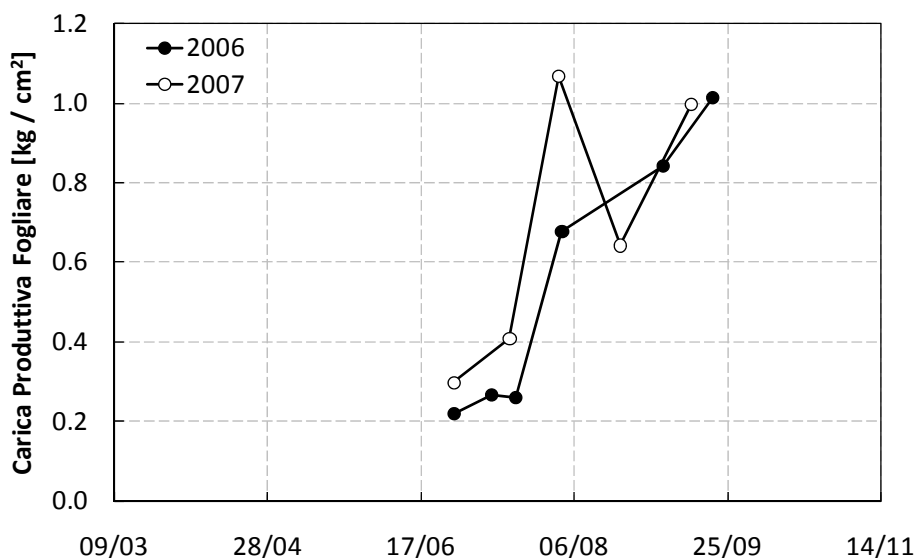


Figura 22 Andamento stagionale della carica produttiva fogliare.

3.3.2.6 Ripartizione della sostanza secca

In Figura 23 sono presentati gli andamenti dell'accumulo in peso secco durante la stagione vegetativa 2006 e 2007 tra i diversi comparti del germoglio: grappolo (in alto); foglie (in centro); legno (in basso).

3.3.2.6.1 Legno

L'andamento stagionale della crescita del legno del germoglio (Figura 23) è abbastanza regolare in entrambe le annate e sembra essere poco influenzata dagli interventi di cimatura che, pertanto, sembrano essere stati effettuati correttamente, sia per intensità che per epoca. In entrambe le annate si assiste ad una ripresa dell'attività di crescita in agosto, probabilmente sostenuta dall'intervento irriguo effettuato dall'azienda entrambi gli anni tra l'ultima decade di luglio e la prima di agosto e dalle precipitazioni successive. Complessivamente il peso medio del legno di un germoglio (secondari

inclusi) supera i 25 g in entrambe le annate dimostrando un elevato investimento di assimilati e, ancora una volta, le caratteristiche di vigoria e di tardività della varietà.

3.3.2.6.2 Foglie

Per quanto riguarda la sostanza secca complessivamente investita nelle foglie nelle due annate (Figura 23), è possibile notare come, tra asse principale e secondario, durante buona parte dell'estate ci siano circa 10-15 g rispettivamente per il 2007 ed il 2006. Come per l'accumulo in peso secco del legno, il Carmenère dimostra un ulteriore investimento in foglia a fine estate.

Complessivamente l'andamento dell'accumulo in peso secco del germoglio tra foglie e legno è risultato piuttosto simile tra le annate.

3.3.2.6.3 Grappolo

La crescita in peso secco dei grappoli (Figura 23) è piuttosto simile tra le due annate. In particolare, in entrambi i casi, si assiste ad un arresto della crescita attorno a metà luglio, probabilmente in risposta al periodo di siccità verificatasi in entrambe le annate. Nel mese di agosto si assiste ad una ripresa dell'accumulo in grappolo soprattutto in seguito agli intensi fenomeni di precipitazione permettendo una ulteriore crescita arrivando, alla vendemmia, a superare i 40 g per germoglio.

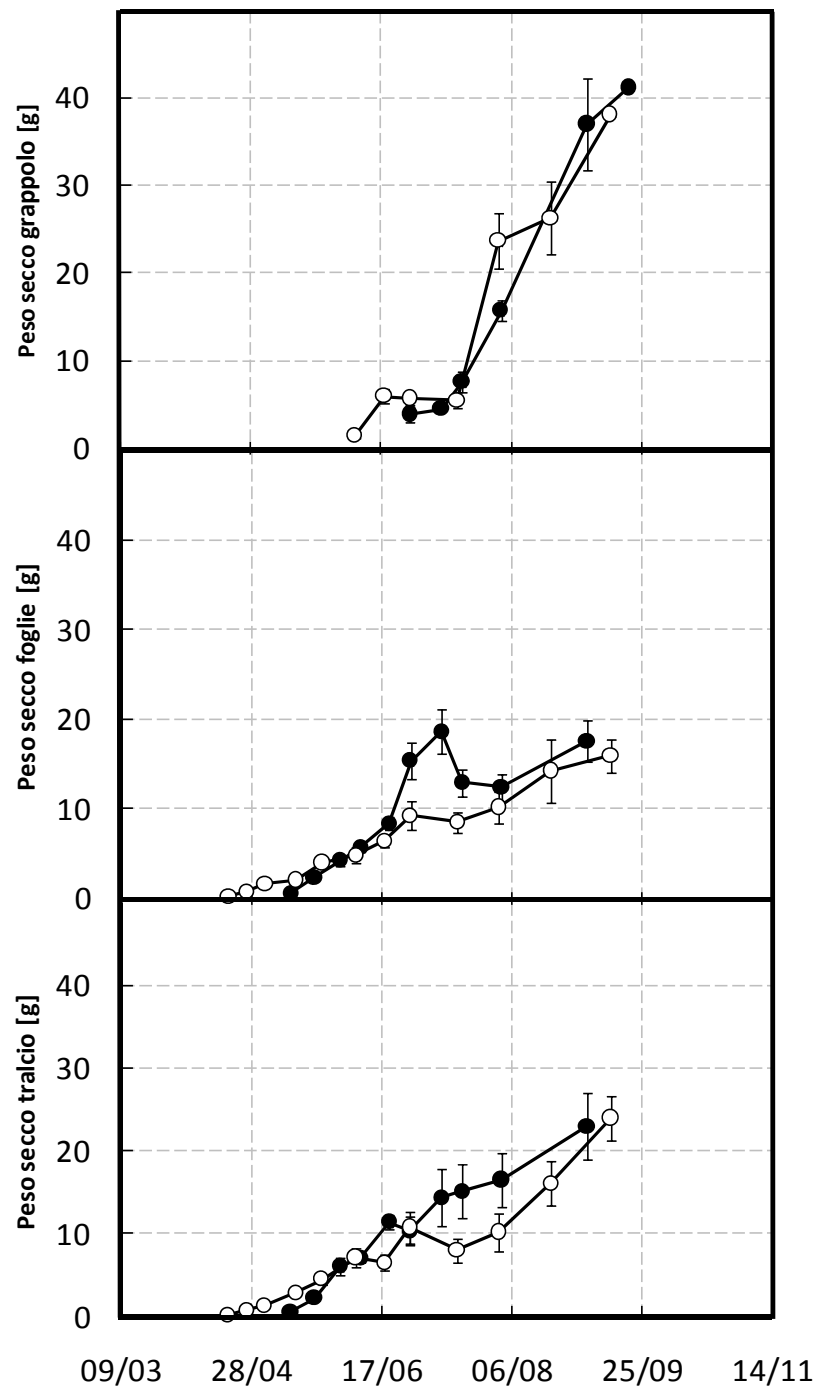


Figura 23 Andamento stagionale dell'accumulo in peso secco durante la stagione vegetativa 2006 e 2007 tra i diversi comparti del germoglio: grappolo (in alto); foglie (in centro); legno (in basso).

3.3.2.6.4 Germoglio Totale

Complessivamente, il peso secco di un germoglio (inclusendo legno, foglie del germoglio principale e dei germogli secondari e grappoli) cresce abbastanza regolarmente durante la stagione (Figura 24) arrivando a fine agosto ad un peso complessivo di 50 g. La dinamica della ripartizione della sostanza secca appare nel complesso regolare, fatta eccezione per una fase di stasi osservabile attorno a metà luglio (probabilmente dovuta alle condizioni di stress) e successivamente molto accelerata in agosto, sostenuta dalla disponibilità idrica, soprattutto verso il grappolo.

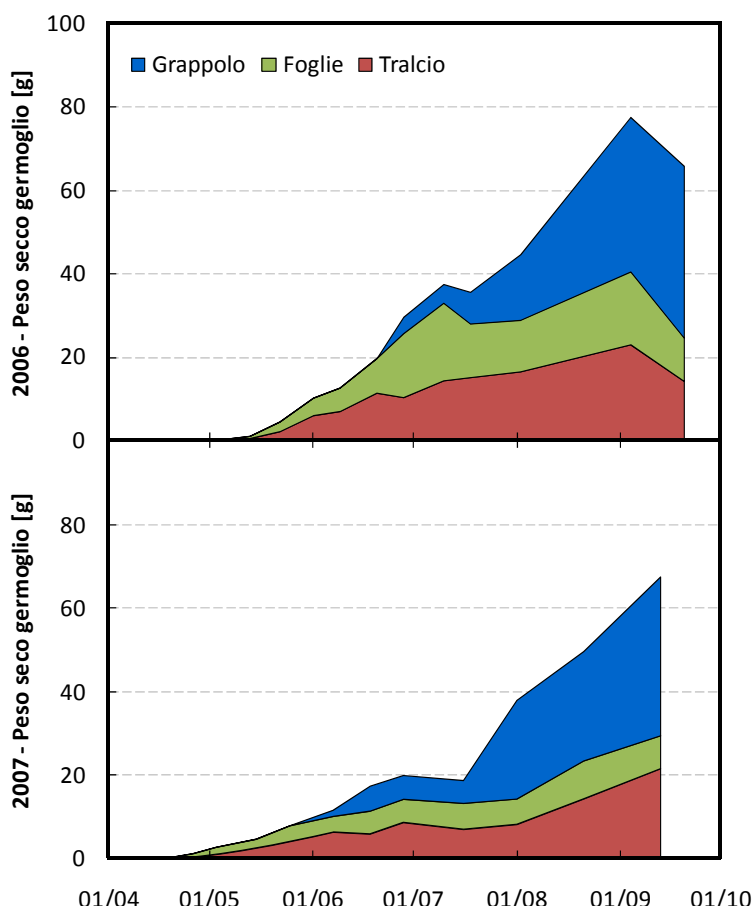


Figura 24 Andamento stagionale della ripartizione del peso secco di un germoglio (in rosso: peso secco germogli; in verde peso secco foglie; in blu peso secco grappoli).

3.3.2.7 Crescita del grappolo

La crescita in peso fresco dei grappoli (Figura 25) è molto rapida in entrambe le annate sebbene, nel 2006, si raggiunga un accumulo superiore alla vendemmia intorno ai 190 g rispetto ai 120 g del 2007. L'andamento del volume dei grappoli è molto simile. La densità dei grappoli è massima in pre-invaiaitura per poi diminuire regolarmente in entrambe le annate fino a stabilizzarsi sull'unità (g ml^{-1}).

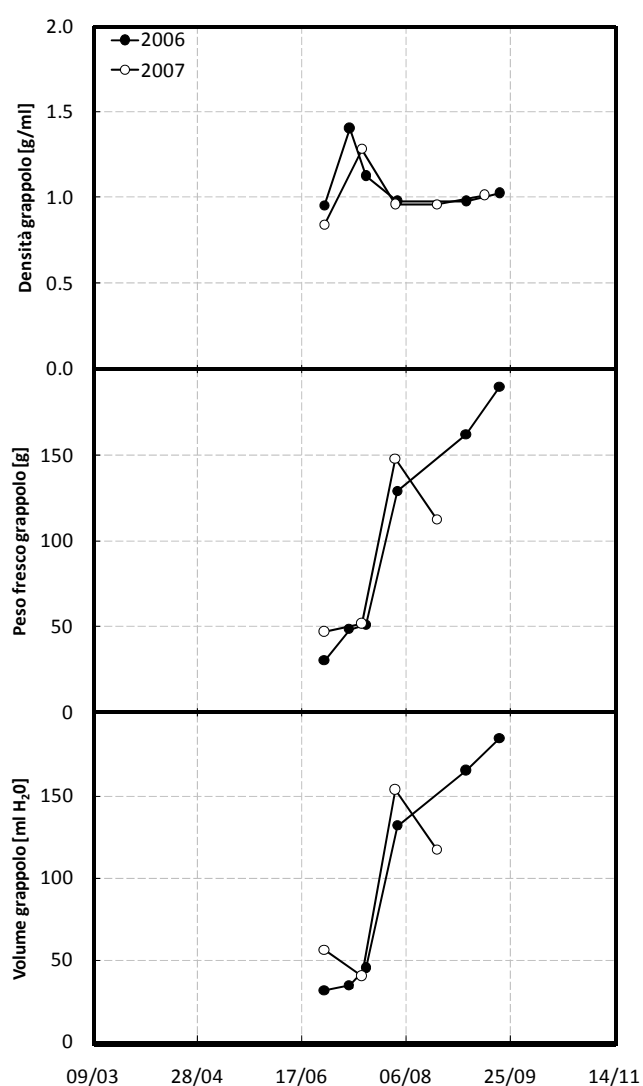


Figura 25 Andamento stagionale della densità media del grappolo (in alto) calcolata dal peso fresco grappolo (al centro) ed il suo volume (in basso).

3.3.3 Crescite e ripartizione – scala di vigneto

L'analisi dell'andamento della crescita e dell'accumulo degli assimilati nel germoglio ha permesso, conoscendo il numero medio di germogli per pianta ($n=40$) e la densità di impianto ($3077 \text{ p.te ha}^{-1}$), di estendere lo studio al metro quadrato di vigneto. Una volta determinato l'investimento medio della crescita è stato messo in relazione con le asportazioni avvenute durante la stagione ed arrivare così ad un bilancio crescite / asportazioni della sostanza secca sul metro quadrato di vigneto.

Il confronto tra le due annate è stato condotto dallo stadio di germogliamento alla raccolta, considerando la relazione esistente tra i susseguirsi degli stadi fenologici e la sommatoria termica (AMERINE & WINKLER, 1944; BONHOMME, 2000) raggiunta dalla pianta. In questo modo l'effetto dovuto all'anticipo della stagione 2007 rispetto al 2006 è stata minimizzato riferendo ogni singola data di campionamento alla determinata somma termica raggiunta dalla pianta in quel momento.

3.3.3.1 Ripartizione del peso secco nel germoglio

L'andamento dell'accumulo di sostanza secca totale nel germoglio (Figura 27) e la sua ripartizione tra i diversi organi (Figura 26): grappolo, foglie e legno è stato messo in relazione con l'accumulo di gradi giorni nella pianta considerando una soglia o zero di vegetazione di 10°C .

L'accumulo in peso secco in grappolo ha mostrato un'ottima relazione esponenziale con la somma termica (ST): in entrambe le annate 2006 e 2007 con valori di R^2 rispettivamente di 0.97 e 0.87. Dal grafico si nota come nelle due annate la crescita

del grappolo sia stata sostanzialmente simile; a fine stagione si può apprezzare come, a parità di ST, nel 2006 il metro quadro di vigneto abbia raggiunto un peso secco del grappolo leggermente più alto rispetto al 2007. Dai dati ottenuti è possibile ottenere, considerando le due annate insieme, una relazione ($R^2 = 0.89$) tra l'accumulo in peso secco e la sommatoria termica.

L'accumulo in peso secco delle foglie e del legno, invece, in entrambe le annate ha un diverso andamento rispetto alla crescita del grappolo. In entrambi i casi, foglie e legno, si assiste ad una rapida crescita iniziale, nella fase di intensa crescita vegetativa e successivamente, in corrispondenza della sovrapposizione con il ciclo riproduttivo con la crescita del grappolo, si osserva un fase di *plateau* in contrapposizione con la fase di crescita esponenziale del grappolo. Osservando il comportamento tra le due annate, a parità di somma termica, si osserva, in entrambi i comparti, un maggior accumulo di sostanza secca.

Osservando l'andamento dell'accumulo complessivo di sostanza secca del germoglio (la *crescita*) in funzione della somma termica (Figura 27), si osserva una relazione di tipo lineare in entrambe le annate con elevati valori di R^2 0.96 (2006) e 0.91 (2007). Anche in questo caso è possibile osservare come nel 2006 a parità di sommatoria termica, il metro quadro di vigneto abbia accumulato una maggior quantità di sostanza secca rispetto al 2007. Dall'unione delle due annate si ricava una relazione complessiva tra l'accumulo in peso secco del metro quadro di vigneto e la somma termica (R^2 0.85).

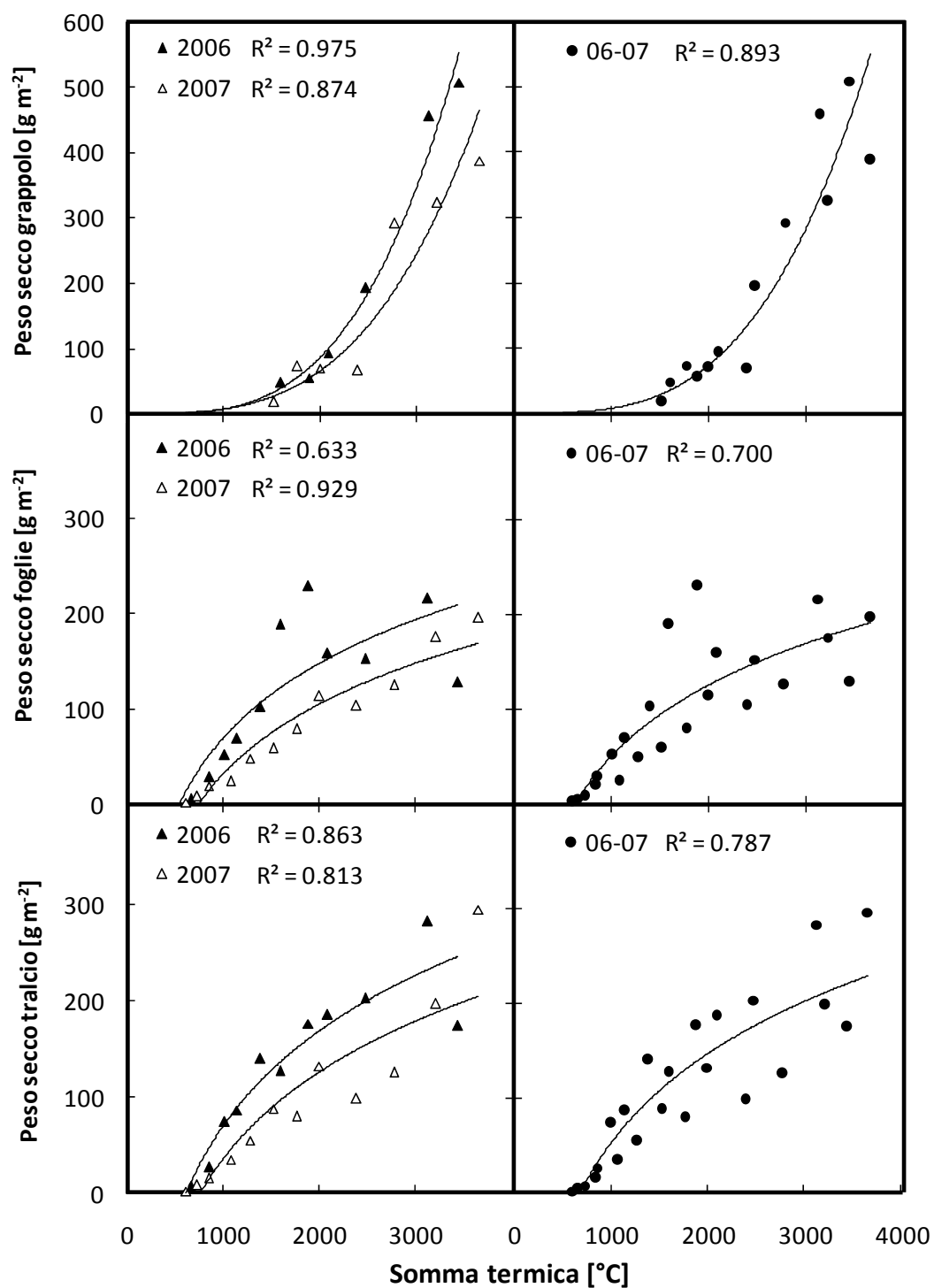


Figura 26 Accumulo in peso secco sul metro quadrato di vigneto in funzione della somma termica: grappolo (il alto), foglie (in centro) e legno (in basso).

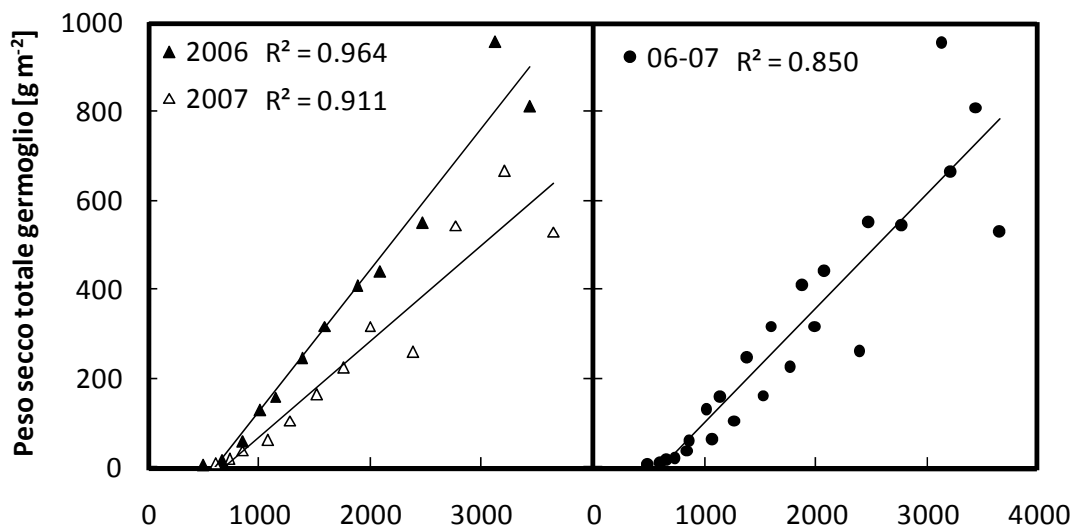


Figura 27 Accumulo complessivo del peso secco sul metro quadrato di vigneto in funzione della somma termica.

3.3.3.2 Indice di Area fogliare (LAI)

L'andamento della crescita della superficie fogliare del germoglio durante la stagione vegetativa per entrambe le annate, ha permesso di effettuare una stima del LAI del vigneto che è stato messo in relazione con la sommatoria termica delle giornate in cui è stato effettuato il campionamento. Il LAI complessivo è stato suddiviso nella quota parte delle foglie principali e delle foglie secondarie (Figura 28).

Se si osserva l'andamento dello sviluppo del LAI complessivo in funzione della somma termica, si nota come le due annate abbiano avuto un andamento simile seppur sia visibile a parità di ST, nel 2006, una crescita superiore in termini di LAI rispetto al 2007. In ogni caso alla vendemmia le due curve si riuniscono con un valore complessivo di LAI di circa 2.3 per entrambe le annate.

Se si scompone il LAI complessivo tra i due assi: principale e secondario si nota un andamento ancora una volta simile tra le due annate. La crescita della superficie fogliare dell'asse principale è caratterizzata in entrambi i casi da una rapida crescita iniziale cui segue una fase di *plateau* una volta raggiunta la massima superficie fogliare che appare superiore nel 2006 (LAI = 1.25) rispetto al 2007 (LAI = 1.1). Alla vendemmia si registra un LAI dell'asse principale di circa 1 per entrambe le annate.

Gli assi secondari invece mostrano un andamento di crescita abbastanza regolare sebbene caratterizzato, nel 2006, da una maggiore superficie fogliare rispetto al 2007 con un LAI che, alla vendemmia, raggiunge valori di 1.3 e di 1.5 rispettivamente nel 2006 e nel 2007. In entrambi i casi, tuttavia, non si assiste al *plateau* che invece ha caratterizzato l'asse principale testimoniando l'intensa attività di crescita secondaria in seguito agli interventi di cimatura e alle precipitazioni avvenute a fine estate.

Dai risultati ottenuti è possibile ottenere delle relazioni interessanti sulla crescita del LAI in funzione della somma termica per il sito di studio che in tutti e tre i casi hanno un $R^2 > 0.7$.

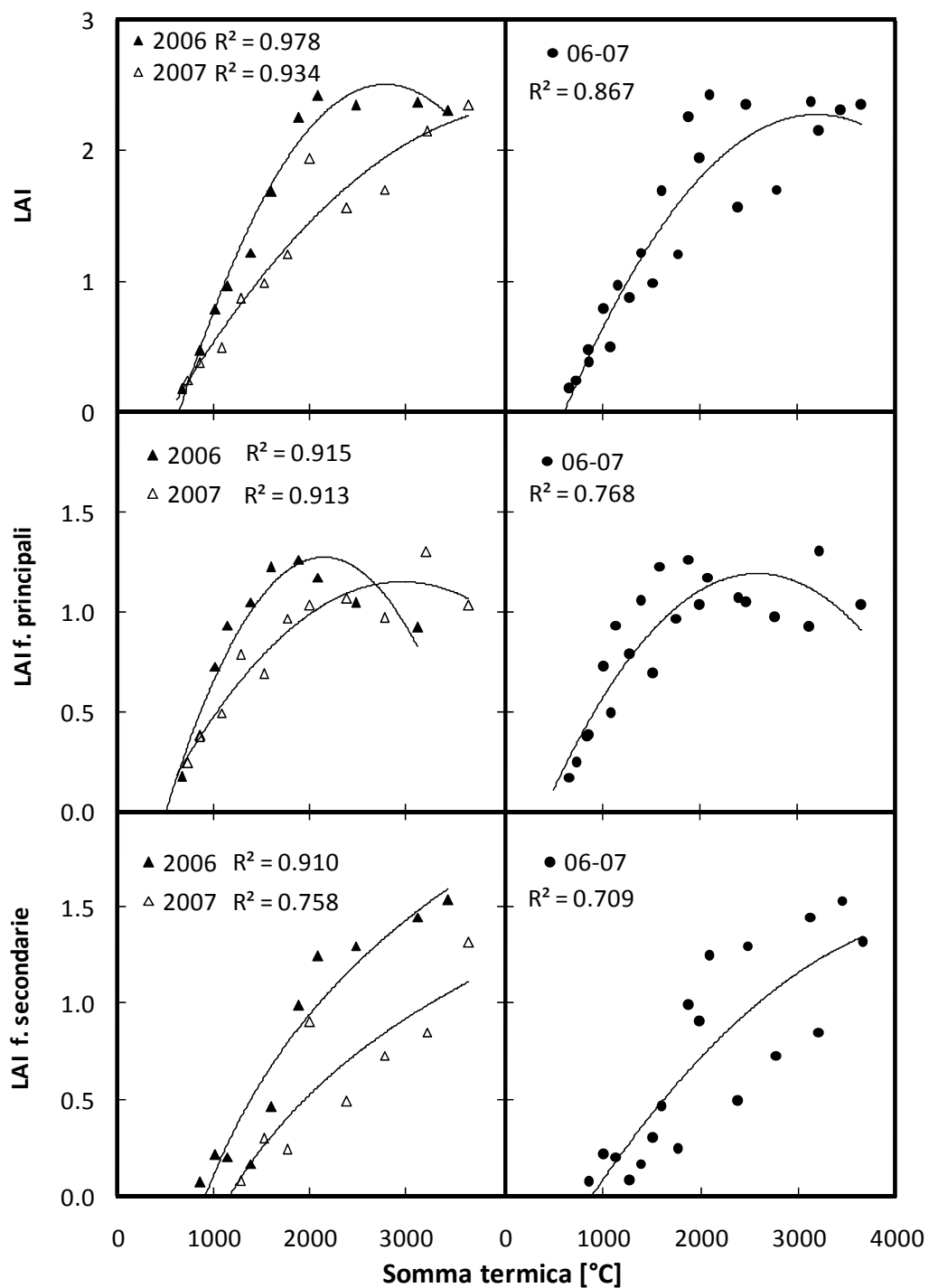


Figura 28 Andamento del LAI sul metro quadrato di vigneto in funzione della soglia di somma termica raggiunta dalla pianta nelle due annate (sx). LAI complessivo (il alto), LAI asse principale (in centro) e LAI assi secondarie (in basso).

3.3.3.3 Specific Leaf Area (SLA)

Osservando la Figura 29 che riporta l'andamento della SLA in funzione della somma termica è possibile notare come l'*offset* dovuto all'anticipo dell'annata 2007 rispetto al 2006, riscontrato precedentemente osservando l'andamento stagionale dello SLA (Figura 21), viene eliminato mostrando una buona relazione ($R^2 > 0.75$) in entrambe le annate.

Dai dati complessivi è possibile ottenere, di conseguenza, una relazione univoca della SLA in funzione della ST per il sito di Negrisia ($R^2 = 0.78$).

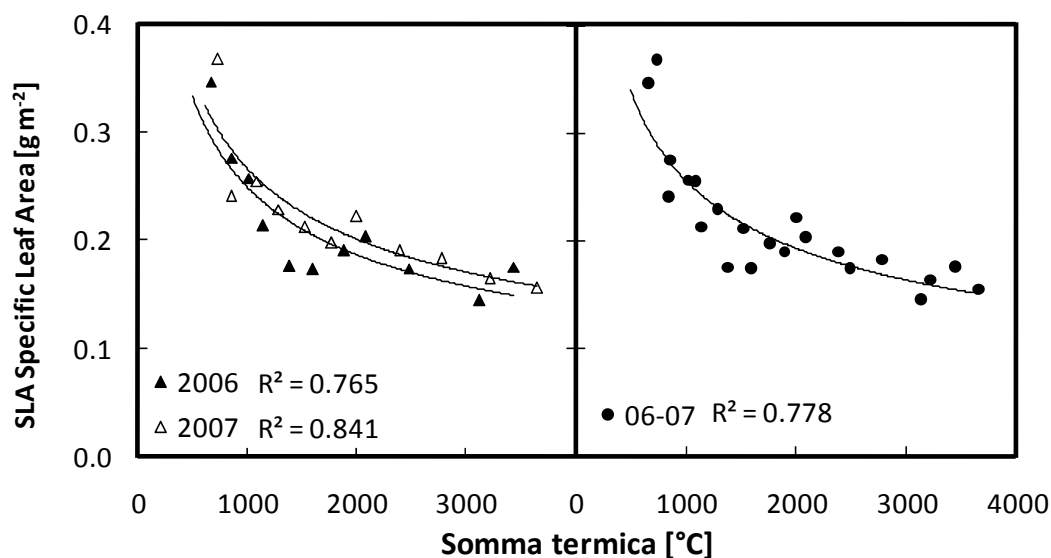


Figura 29 Andamento dell'indice di Specific Leaf Area (rapporto tra l'area di una foglia ed il suo peso secco) in funzione della somma termica nelle due annate (sx) ed andamento complessivo (a dx).

3.3.4 Asportazioni – scala di vigneto

Durante le annate 2006 e 2007, è stato eseguita, oltre ad una analisi approfondita delle crescite, anche una valutazione quantitativa delle asportazioni, in termini di sostanza secca, per effetto degli interventi colturali normalmente effettuati in un vigneto: potatura invernale, interventi in verde (cimatura, defogliazione spollonatura) e sfalcio (Tabella 7).

Tabella 7 Analisi degli asporti effettuati con gli interventi colturali. I valori misurati di sostanza secca (g m^{-2}) con relativo errore standard (SE) sono riportati per le due annate.

Asportazioni registrate durante le due annate per effetto degli interventi colturali.				
Tipo di intervento colturale	2006		2007	
	data	g s.s. m^{-2} (SE)	data	g s.s. m^{-2} (SE)
Potatura Invernale	17/3	169.39 (14.46)	16/3	175.7 (12.56)
Interventi in verde				
<i>Spollonatura</i>	20/6	9.02 (1.79)	11/5	2.57 (0.47)
<i>Cimatura e defogliazione</i>				
<i>I</i>	1/6	10.58 (1.76)	25/5	6.8 (1.56)
<i>II</i>	13/7	10.81 (1.52)	16/7	14.87 (1.72)
Raccolta	20/9	335.84	10/9	387.87
Sfalcio				
<i>I</i>	22/5	17.95 (0.81)	26/4	12.8 (0.5)
<i>II</i>	20/6	10.5 (0.63)	25/5	19.65 (0.78)
<i>III</i>	2/8	10.8 (0.52)	12/7	11.3 (3.91)
<i>IV</i>	15/11	28.9 (1.89)		

Questo studio ha avuto l'obiettivo di quantificare, nota la biomassa presente nel vigneto mediante i rilievi biometrici sopra descritti, le asportazioni ed arrivare così ad ottenere un bilancio tra le crescite e gli asporti a scala di metro quadrato di vigneto da confrontare con i dati di assimilazione netta e respirazione misurati alle diverse scale: fogliare, parcella e vigneto.

3.3.4.1 Crescita del cotico

La raccolta dei campioni di biomassa presente sul metro quadro di vigneto durante la stagione e degli asporti effettuati con gli interventi di sfalcio, ha permesso di ottenere una misura della quantità di sostanza secca del cotico presente ed asportata dal metro quadrato di vigneto (Tabella 7) per le annate 2006 (Figura 30) e 2007 (Figura 31).

Nella stagione 2006, la crescita del cotico viene controllata dall'azienda mediante quattro interventi di sfalcio che asportano complessivamente una quantità di sostanza secca pari a circa 70 g m^{-2} ; a fronte di una crescita che ha raggiunto, nella seconda decade di luglio, un peso secco di 50 g m^{-2} . È interessante notare che, a causa dell'inverno particolarmente mite verificatosi nel 2006, l'azienda è stata costretta ad effettuare un intervento di sfalcio in autunno (15-Nov) per controllare il cotico che, a causa della temperatura non limitante, ha continuato il suo accrescimento.

La crescita del cotico nella stagione 2007 (Figura 31), seppure iniziata con un forte anticipo, che ha comportato l'esecuzione del primo intervento di sfalcio un mese prima dell'anno 2006 (26/4), ha avuto un andamento regolare simile all'annata precedente. Il picco massimo di crescita è stato rilevato a fine giugno, ossia circa 15 giorni prima del 2006 con una quantità di sostanza secca misurata di circa 55 g m^{-2} , valore che avvicinandosi a quello del 2006, ne dimostra la significatività. Con il proseguo della stagione, a differenza del 2006, nel 2007 si assiste ad un autunno rigido che, pertanto, a differenza del 2006, non ha richiesto il quarto intervento di sfalcio. Complessivamente, quindi, nella stagione 2007 sono stati asportati dal metro quadrato di

vigneto circa 50 g di sostanza secca, valore minore rispetto al 2006, da imputare al minor numero di interventi effettuati (n=3) rispetto al 2006 (n=4).

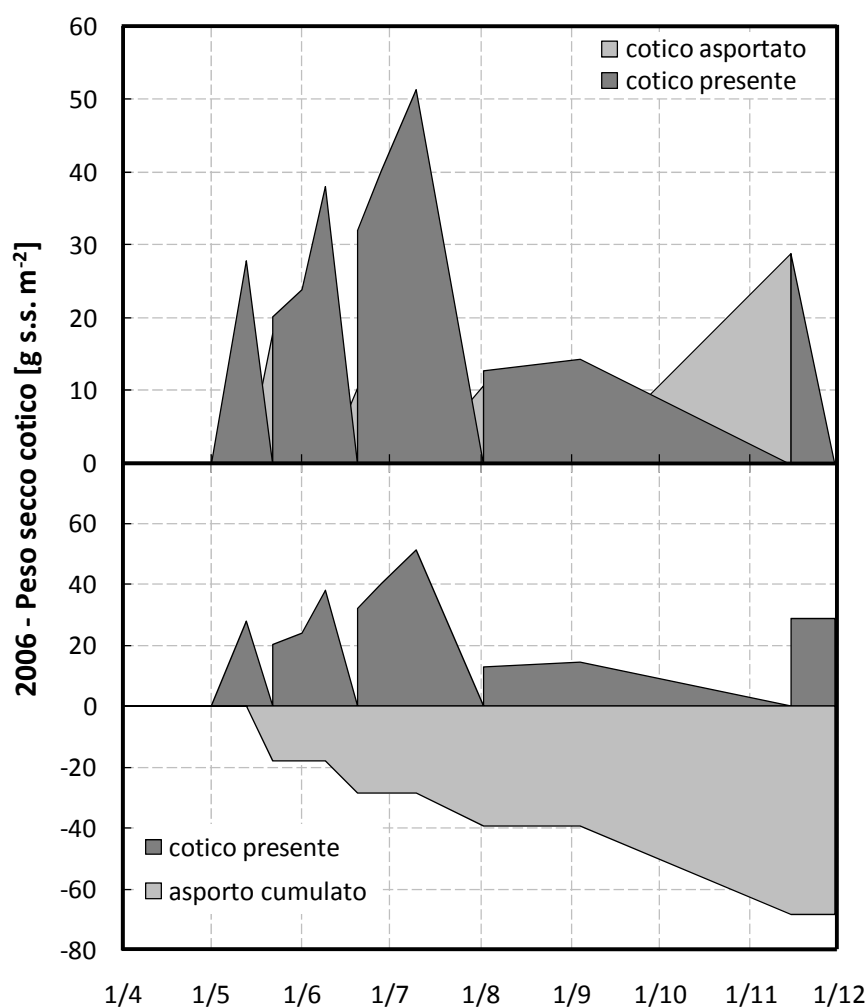


Figura 30 Crescita del cotico in risposta agli interventi di sfalcio (in alto). Bilancio tra crescite e asporti cumulati riferiti al metro quadrato di suolo (in basso).

Complessivamente, la crescita del cotico, presente come inerbimento permanente dell'interfilare, è stata ben controllata dagli interventi di sfalcio che nel complesso hanno comportato un asporto medio di sostanza secca di circa 15 g m⁻². Questo dato può, per tanto, rientrare nel conto del bilancio del carbonio sul metro quadrato di vigneto. In

particolare se si considera che le piante erbacee abbiano un contenuto di carbonio organico pari a circa il 45% del loro peso secco, è possibile stimare l'asportazione totale effettuata con l'intervento di sfalcio nelle due annate: 68 g s.s. m⁻² (nel 2006) e 44 g s.s. m⁻² (nel 2007). Ne consegue un asporto stimato di $68 * 0.45 = 34 \text{ g C m}^{-2}$ (nel 2006) e $44 * 0.45 = 20 \text{ g C m}^{-2}$ (nel 2007).

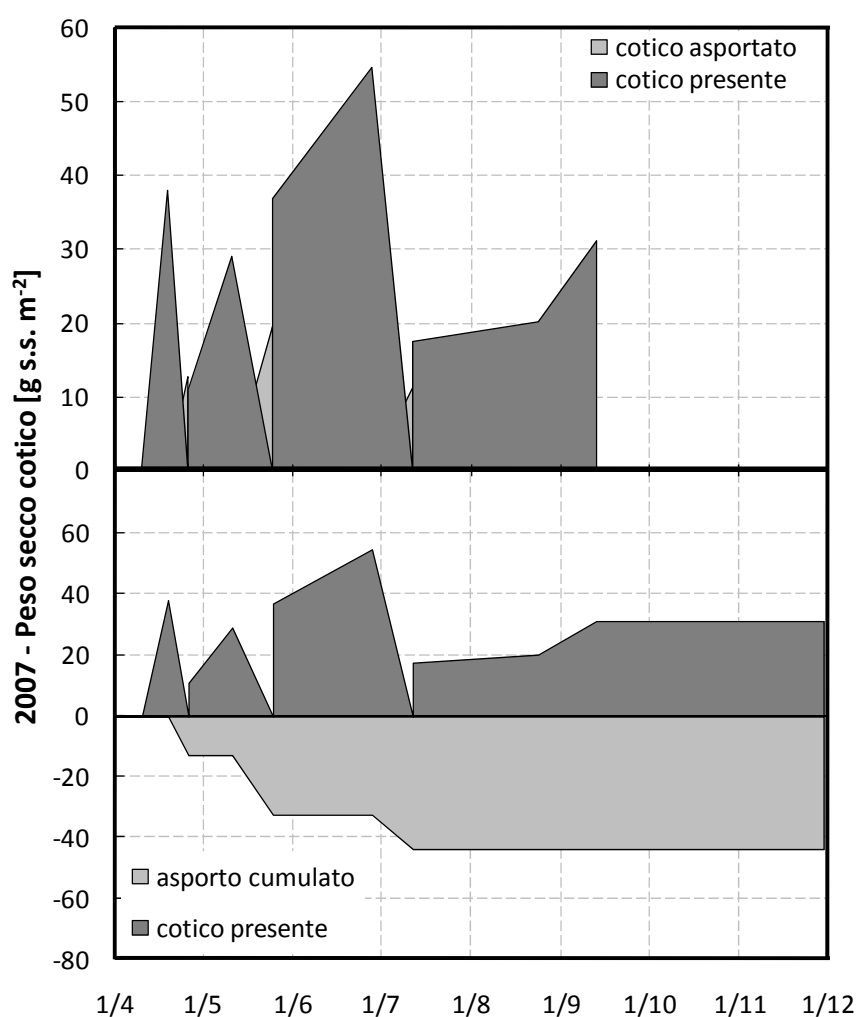


Figura 31 Crescita del cotico in risposta agli interventi di sfalcio (in alto). Bilancio tra crescite e asporti cumulati riferiti al metro quadrato di suolo (in basso).

3.3.4.2 Crescita e asporti della vite

I dati di sostanza secca presente sul metro quadro di vigneto e degli asporti effettuati con gli interventi colturali durante la stagione, sono presentati in Figura 32 e in Tabella 7 per le annate 2006 e 2007. Gli interventi colturali effettuati dall'azienda F.lli Mercante sono stati eseguiti meccanicamente e non hanno manifestato grosse differenze in termini di strategia di gestione del cantiere di lavoro. Gli interventi campionati sono stati: potatura invernale; interventi in verde: spollonatura, cimatura e defogliazione e vendemmia.

Il calcolo del bilancio tra crescita e asporto della sostanza secca della vite inizia con la potatura invernale che è stata eseguita nello stesso periodo (metà marzo) ed ha comportato un quantitativo di asporto che conferma la stessa intensità di esecuzione dell'intervento nelle due annate. In particolare la pratica di potatura invernale ha asportato una quantità di sostanza secca di 169 g m^{-2} e 175 g m^{-2} rispettivamente nel 2006 e nel 2007. Gli interventi colturali successivi hanno riguardato la gestione in verde della chioma con gli interventi di spollonatura e cimatura/defogliazione.

La spollonatura è stata eseguita in entrambi gli anni meccanicamente ma è stato registrato un anticipo nell'esecuzione dell'intervento nel 2007 rispetto al 2006 di circa 20 giorni. La raccolta è stata eseguita su un campione di dieci piante scelte casualmente all'interno del vigneto. L'asporto di sostanza secca dal metro quadrato di vigneto, riferito all'operazione colturale di spollonatura, ha mostrato una leggera differenza tra le due annate con un 2006 che, con un quantitativo di sostanza secca asportata di 9 g risulta maggiore rispetto al 2007 in cui vengono asportati 2.5 g m^{-2} di biomassa secca.

Le pratiche di cimatura e defogliazione sono state effettuate meccanicamente dalla stessa macchina scavallante (Trinova). In entrambe le annate sono stati compiuti due interventi di cimatura/defogliazione così distribuiti nella stagione: fine maggio (2006) - inizio giugno (2007) il primo; metà luglio in entrambe le annate il secondo. I dati raccolti permettono di osservare che complessivamente i due interventi hanno asportato lo stesso quantitativo nelle due annate: 21.4 g s.s. m⁻² (2006) e 21.7 g s.s. m⁻² nel 2007, sebbene nel 2007 il secondo intervento sia stato più intensivo (14.9 g) rispetto al primo (6.8 g). Nel 2006, invece, i due interventi sono stati eseguiti con la medesima intensità (~10 g).

Sicuramente la raccolta è la pratica colturale che comporta il maggiore asporto di sostanza secca dalla pianta che, nel frattempo, ha provveduto alla localizzazione di gran parte degli assimilati nel grappolo. La raccolta è stata eseguita meccanicamente per scuotimento verticale mediante la macchina scavallante Trinova. Non sono riscontrabili differenze elevate nell'asportazione di sostanza secca dovuta alla raccolta, nel 2006 è stata ultimata il 20/9 con un asporto di 335.85 g s.s. m⁻², nel 2007 è stata ultimata il 13/9 con un asporto complessivo di 387.87 g m⁻².

Se si effettua il bilancio tra le crescite misurate e le asportazioni registrate in occasione degli interventi colturali si può osservare, in Figura 32, come in entrambi gli anni 2006 e 2007, a fine stagione, nonostante l'asporto oneroso della raccolta, il metro quadro di vigneto mantenga un bilancio positivo. In particolare il metro quadrato di vigneto nel 2006 conserva una sostanza secca di 236.4 g m⁻²; nel 2007, invece, complessivamente il vigneto arriva a fine stagione con 361.5 g m⁻² di sostanza secca.

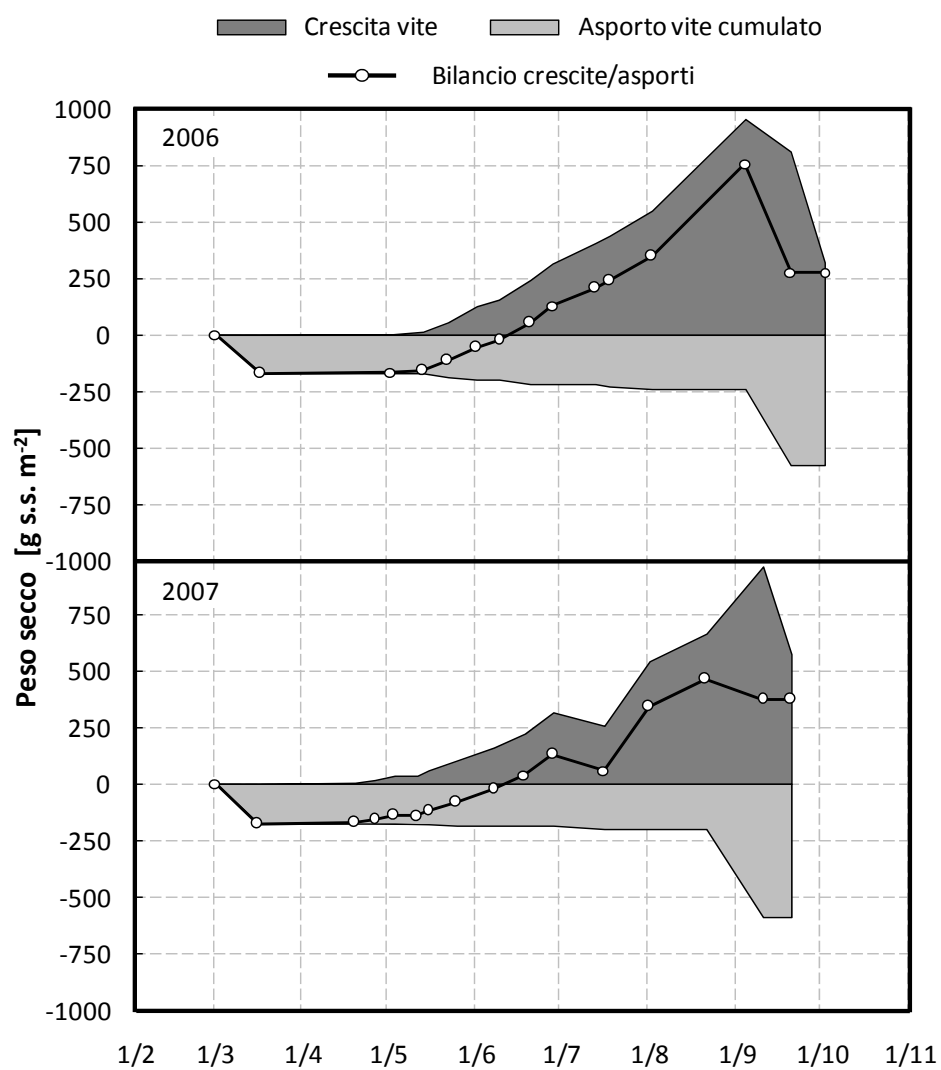


Figura 32 Bilancio sul metro quadro di vigneto tra crescita in peso secco della vite e asportazioni di sostanza secca mediante le pratiche culturali per le due annate: 2006 (in alto) e 2007 (in basso).

3.3.5 Bilancio del Carbonio sul metro quadrato di vigneto

Il calcolo del bilancio del carbonio per questa coltura assume una notevole importanza per gli studi di ecofisiologia della vite, soprattutto in un'ottica attuale in cui l'agricoltura è vista come una fonte di rilascio di CO₂. Per il calcolo del bilancio del carbonio si è assunto, su base stechiometrica, un contenuto di carbonio nei diversi organi della vite pari al 50% del loro peso secco. Il bilancio del carbonio del metro quadro di vigneto in Figura 33 rappresenta il rapporto tra le crescite di vite e cotico e le asportazioni che comprendono sia gli interventi colturali sulla vite che lo sfalcio. I risultati ottenuti permettono di ottenere il bilancio del carbonio del soprassuolo nelle due annate.

In entrambi gli anni il bilancio risulta in attivo nonostante l'onerosa asportazione subita con la vendemmia. Il 2006, a fine stagione, raggiunge un bilancio positivo con 118.2 g C m⁻² mentre, il 2007 raggiunge un bilancio maggiore con 180.7 g C m⁻².

Il bilancio del carbonio, rappresentato in Figura 33, tra le crescite e gli asporti sul metro quadrato di vigneto, tuttavia, considera tutti gli interventi colturali effettuati durante la stagione come delle asportazioni definitive di carbonio dal sistema. Ma in realtà l'unico intervento che provoca un asporto completo di carbonio dal sistema è la vendemmia la quale, per definizione, asporta la produzione utile della stagione utilizzata per la produzione di vino. La restante parte delle asportazioni registrate durante la stagione con gli interventi di potatura, cimatura, defogliazione e sfalcio, in realtà, non provoca una asportazione definitiva di carbonio dal sistema, rimanendo a terra come residuo colturale. Per questo motivo, nonostante i residui colturali (tralci di potatura, apici vegetativi recisi con la cimatura, foglie e polloni) lasciati a terra subiscano, in

parte, il processo di ossidazione nel lungo periodo, una quota parte del carbonio asportato ritorna nel sistema rientrando come componente del bilancio del carbonio annuale.

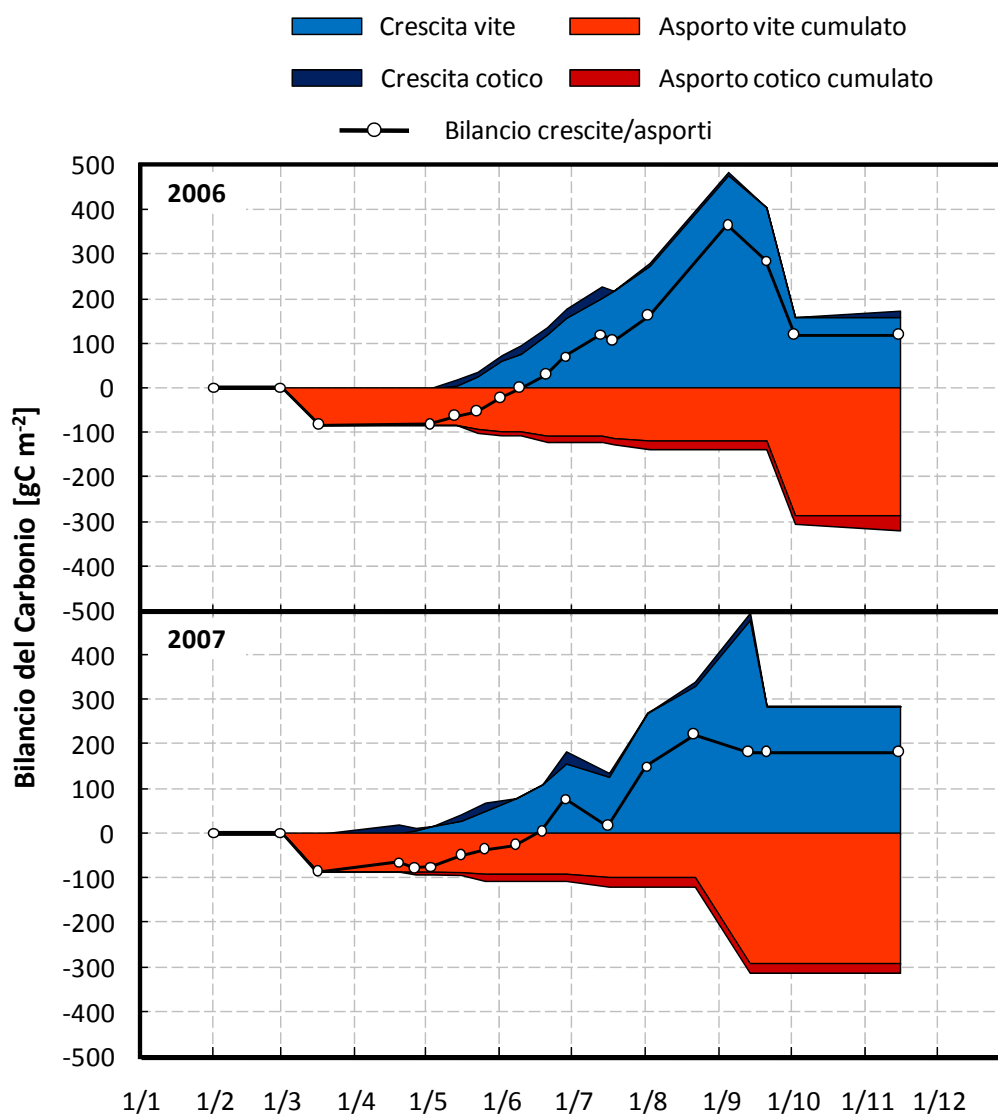


Figura 33 Bilancio del carbonio del soprassuolo effettuato con misure dirette di crescita e asportazioni di vite e cotico sul metro quadrato di vigneto nel 2006 (in alto) e 2007 (in basso).

Tenendo conto, quindi, che dal precedente conto il sistema risulta fissare, nonostante gli asporti siano stati considerati come tali, una quantità di carbonio pari a $118.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ (2006) e $180.7 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$, il conto può essere rivisto sulla base delle considerazioni appena effettuate. In particolare se si riportano a bilancio i termini asportati si arriva alla determinazione di un nuovo bilancio del carbonio potenziale al lordo delle perdite per ossidazione dei residui colturali. In particolare il bilancio del carbonio del metro quadrato di vigneto risulta in una fissazione di carbonio pari a $386.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ nel 2006 e $424.4 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ nel 2007, mantenendo quindi uno scarto tra le due annate di $\sim 50 \text{ g C}$.

La quantità di $\text{g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ fissata dal sistema rappresenta solo la quota di carbonio accumulata nel soprassuolo. La tecnica di misura adottata, cioè la determinazione diretta del peso secco dei diversi componenti del bilancio: vite (diversi organi) e cotico in relazione alle asportazioni effettuate con le pratiche colturali, ugualmente misurate mediante campionamento diretto distruttivo, non permette, infatti, di prendere in esame tutte le componenti del bilancio del carbonio. In particolare per forza di cose non è stato possibile determinare le seguenti componenti del bilancio:

- la quota di carbonio investita nella crescita del legno vecchio dell'apparato radicale e del cordone permanente;
- la quota di carbonio fissata in forma stabile nel terreno;
- la quota di carbonio persa dal metro quadro di vigneto per respirazione del suolo.

La necessità di mettere a bilancio questi comparti e di poter seguire un monitoraggio non distruttivo, impone la necessità di effettuare il bilancio del carbonio mediante tecniche indirette non invasive. In particolare nei successivi capitoli verranno

presi in esame i risultati ottenuti dalle misure di scambio gassoso condotte a diverse scale spaziali e temporali: la scala fogliare, la scala di *canopy* ed infine la scala di vigneto mediante il telerilevamento satellitare.

3.4 LA SCALA FOGLIARE

Le misure di scambio gassoso fogliare, effettuate con il sistema Licor LI-6400 durante le due stagioni vegetative 2006 e 2007, hanno permesso di ottenere una buona parametrizzazione della fisiologia fogliare della vite (var. Carmenère). In particolare la risposta fotosintetica di una foglia è stata studiata nel tempo in relazione al variare delle condizioni ambientali : disponibilità radiativa (curve A/Q) e concentrazione di CO_2 (curve A/C_i). Solo con l'esecuzione di curve di risposta è veramente possibile riuscire a studiare nell'intimo le complesse reazioni che regolano la fotosintesi a scala fogliare. La parametrizzazione dei modelli di Prioul & Chartier (1977) e di Farquhar (1980), rispettivamente per la risposta fotosintetica della foglia alla radiazione ed alla concentrazione di CO_2 , ha, inoltre, permesso di ottenere dei parametri biochimici intrinseci del processo foto sintetico utile alla parametrizzazione dei modelli di crescita. Misure effettuate singolarmente, senza l'impostazione di curve di risposta e l'utilizzo di modelli, non possono essere utilizzate per il confronto dei risultati ottenuti con altri esperimenti condotti alla stessa scala o ad altre scale spaziali e temporali.

Di seguito vengono presentati i risultati ottenuti dalle misure di scambio gassoso fogliare effettuate nelle due annate di studio e dal *fitting* dei modelli utilizzati per la caratterizzazione della risposta fotosintetica in risposta alla disponibilità di radiazione e alla concentrazione di CO_2 .

3.4.1 Risposta fotosintetica alla luce (Curve A/Q)

In Figura 34 vengono presentate le curve di risposta dell'assimilazione netta in funzione della disponibilità radiativa (curve di luce) elaborate durante le due stagioni

vegetative. Le fasi fenologiche in cui sono state effettuate le misure sono (BBCH; Baggiolini): piena fioritura (65; I), allegazione (71; J), acino della dimensione di un “grano di pepe” (73;J), acino della dimensione di un “pisello” (75; K), pre-chiusura grappolo (77; L), invaiatura (81; M) e maturazione (89; N).

Complessivamente è possibile notare un comportamento simile tra le due annate, soprattutto negli stadi 65, 73 e 75 secondo la scala BBCH. In particolare si possono notare delle differenze tra le annate soprattutto nella fase in cui la curva raggiunge un *plateau*, nel momento in cui la risposta fotosintetica è saturata dalla disponibilità radiativa (che si può osservare avvenire ad una soglia $> 1200 \mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in tutte le date di campionamento nelle due annate).

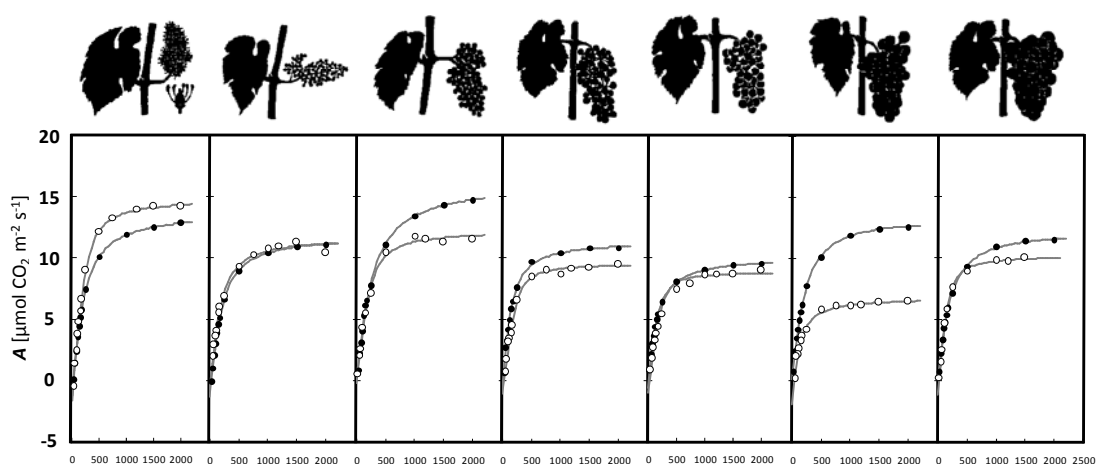


Figura 34 Curve di luce ottenute dalle misure di scambio gassoso fogliare nelle due annate di studio: 2006 (-●-) e 2007 (-○-) nelle fasi fenologiche dalla fioritura alla vendemmia.

Dall’andamento delle curve è possibile osservare come si assista ad una generale riduzione della capacità fotosintetica (parametro collegato alla assimilazione massima della foglia in condizioni saturanti) nella fase di pre-invaiatura che coincide in entrambe

le annate nel massimo periodo di stress verificatosi durante la stagione nel mese di Luglio. Nel 2006 è possibile osservare una notevole ripresa dell'assimilazione a fine estate come possibile conseguenza della ripresa delle precipitazioni. Nel 2007, invece, questa ripresa non si verifica probabilmente per il maggior livello di stress raggiunto a metà luglio rispetto al 2006.

Tabella 8

Parametrizzazione del modello di Prioul & Chartier durante la stagione. (errore standard)								
2006		20/6	27/6	10/7	18/7	2/8	4/9	20/9
R_{dark}	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.29 (6.61E-02)	1.34 (6.83E-02)	1.23 (4.47E-01)	0.80 (2.60E-01)	0.64 (7.18E-02)	0.09 (2.54E-01)	0.05 (2.99E-01)
QE	$\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol fot}$	0.057 (1.63E-03)	0.057 (1.58E-03)	0.073 (1.52E-02)	0.069 (1.02E-02)	0.065 (3.51E-03)	0.049 (5.42E-03)	0.05 (7.26E-03)
A_{max}	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	15.10 (1.12E-01)	13.20 (1.10E-01)	15.60 (6.91E-01)	12.20 (4.31E-01)	10.80 (1.28E-01)	13.40 (4.30E-01)	12.3 (4.79E-01)
Γ^*	$\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	21.70	25.40	16.80	11.60	9.84	-0.19	-0.99
2007		31/5	16/6	28/6	12/7	25/7	9/8	29/8
R_{dark}	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1.63 (3.39E-01)	0.798 (5.61E-01)	0.62 (4.32E-01)	1.11 (3.07E-01)	1.36 (1.52E-01)	1.96 (4.87E-01)	1.18 (2.54E-01)
QE	$\mu\text{mol CO}_2 / \mu\text{mol fot}$	0.0576 (5.52E-03)	0.0542 (1.32E-02)	0.05 (7.32E-03)	0.0399 (5.00E-03)	0.0497 (3.92E-03)	0.0596 (1.72E-02)	0.0576 (5.81E-03)
A_{max}	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	16.6 (5.27E-01)	12.5 (8.26E-01)	12.4 (5.89E-01)	10.7 (4.54E-01)	10.9 (2.27E-01)	8.77 (6.02E-01)	11.4 (3.52E-01)
Γ^*	$\mu\text{mol fotoni m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	28.2	14.7	12.5	27.9	27.4	32.9	20.5

Dal *fitting* del modello di Prioul & Chartier (1977) sui dati delle curve di luce è stato possibile parametrizzare la risposta fotosintetica in funzione della disponibilità radiativa (Tabella 8) nelle due annate.

La prima parte di crescita lineare della curva fornisce il valore di respirazione al buio (R_{dark}). Un andamento complessivamente decrescente in entrambe le annate è osservabile con il raggiungimento del valore minimo di ($\sim 1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) a fine

stagione nella data di vendemmia (Figura 35). Nel 2007, tuttavia, si assiste ad una crescita ulteriore di R_{dark} nella parte centrale dell'estate che dimostra il superiore livello di stress percepito dalla foglia che, di conseguenza, ha molte perdite di assimilati per respirazione. In questa fase i dati di potenziale idrico fogliare (Figura 11) confermano la situazione di stress percepita dal vigneto.

La resa quantica delle fotosintesi (QE), ossia la massima quantità di moli di CO_2 fissate per numero di moli di fotoni ricevuti dalla lamina fogliare, mostra un andamento che riflette quello della R_{dark} (Figura 35). L'andamento stagionale infatti conferma lo stato superiore di stress dimostrato dalla foglia nel 2007, con una minore resa quantica nella parte centrale della stagione ($\sim 0.04 \mu\text{mol } CO_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ fot}$) rispetto al 2006 ($\sim 0.07 \mu\text{mol } CO_2 \mu\text{mol}^{-1} \text{ fot}$).

Un'ulteriore conferma proviene dall'andamento del punto di compensazione della luce (I^*) (Figura 35), ossia il punto in cui la quantità di moli di CO_2 fissata con la fotosintesi è pari a quella persa per respirazione. Durante la stagione infatti si assiste ad una prima parte simile nelle due annate, con una diminuzione del valore del punto di compensazione, come conseguenza di una progressiva riduzione delle elevate perdite per respirazione dovute al giovane apparato fotosintetico della foglia. Una volta raggiunto il valore di $\sim 15 \mu\text{mol fot m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in corrispondenza dello stadio di allegagione (71) le due annate iniziano a differenziarsi. Nel 2006 si assiste ad un proseguimento della diminuzione osservata precedentemente in favore di minori perdite per respirazione. Nel 2007, invece, si assiste ad un aumento delle perdite per respirazione rispetto alla quantità di CO_2 fissata con la fotosintesi (valori pari a quelli di inizio estate), indice della situazione di stress subita dalla foglia a metà estate.

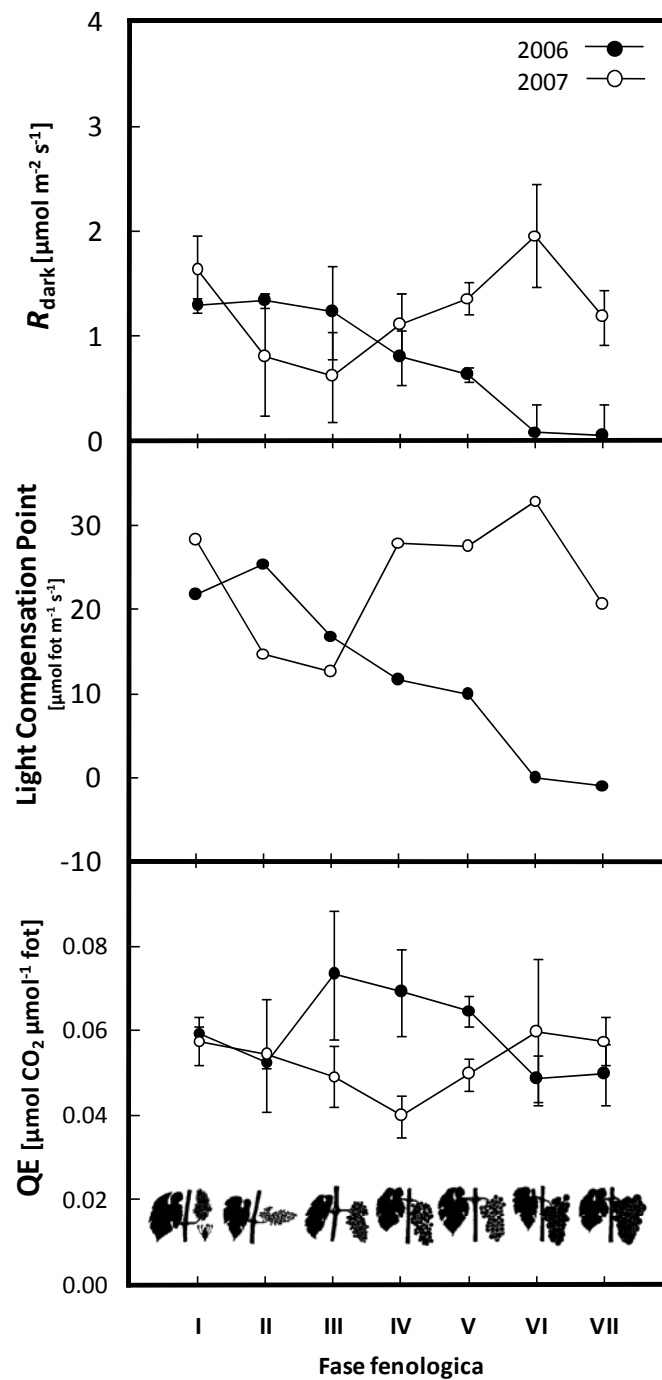


Figura 35 Parametri biochimici ottenuti dal *fitting* del modello di Prioul & Chartier (1977) sulle curve A/Q nelle due annate di studio: respirazione al buio (R_d); resa quantica (QE); Assimilazione massima (A_{max}). Le barre di errore rappresentano l'errore standard.

Dopo una prima parte di crescita lineare (la cui massima pendenza fornisce il valore di massima (*QE*) la curva di luce raggiunge un punto di flesso ed inizia a saturare come conseguenza dell'incapacità della foglia di utilizzare tutta la radiazione che riceve per la fotosintesi. Gran parte di questa energia, nelle piante metabolismo C₃, infatti, è persa come calore o ri-emessa come fluorescenza. L'assimilazione massima che la foglia raggiunge in condizioni di saturazione luminosa (*A*_{max}) da una indicazione della capacità fotosintetica massima di quel tessuto in quelle condizioni di campo.

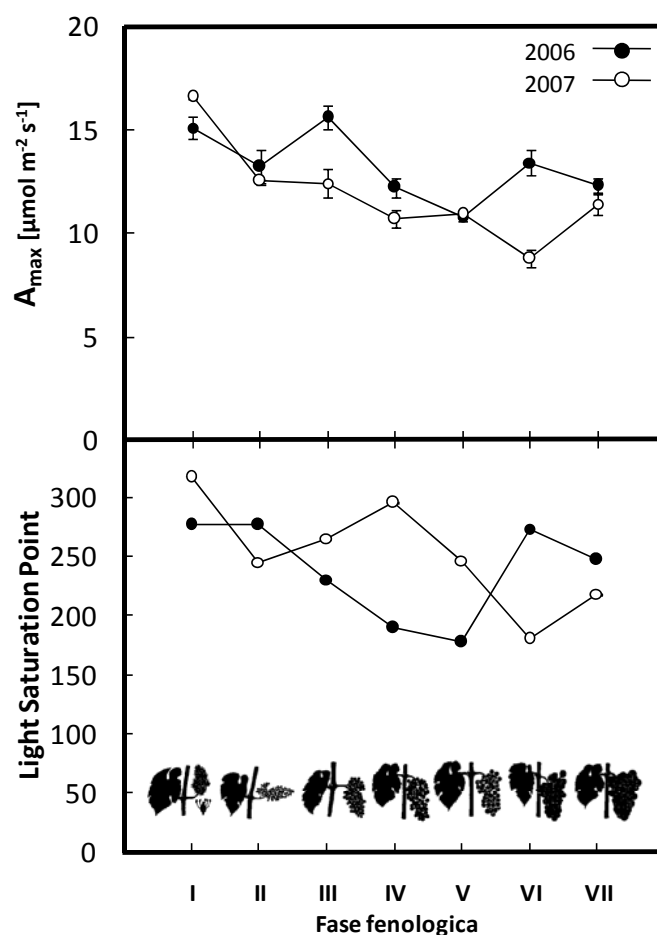


Figura 36 Parametri biochimici ottenuti dal *fitting* del modello di Prioul & Chartier (1977) sulle curve di luce: Punto di compensazione della luce (in alto) e punto di saturazione (in basso). Le barre rappresentano l'errore standard.

Il fitting del modello di Prioul & Chartier (1977) permette di ottenere una stima del valore di A_{max} della risposta della foglia durante la stagione (Figura 36). Complessivamente non ci sono differenze significative tra le due annate, sebbene sia sensibile un significativo effetto di invecchiamento con la forma complessiva delle curve che da inizio stagione diventa più piatto progressivamente fino a fine stagione mostrando le modifiche sostanziali di V_{cmax} , J_{max} e TPU derivabili dalle misure di curve A/C_i . Questo andamento stagionale riflette l'invecchiamento graduale del tessuto della foglia e quindi del suo apparato fotosintetico.

3.4.2 Risposta fotosintetica alla concentrazione di CO_2 (Curve A/C_i)

In Figura 37 sono rappresentate le curve A/C_i ottenute dalle misure di scambio gassoso effettuate sulla stessa foglia nei diversi stadi fenologici durante le stagioni vegetative 2006 e 2007.

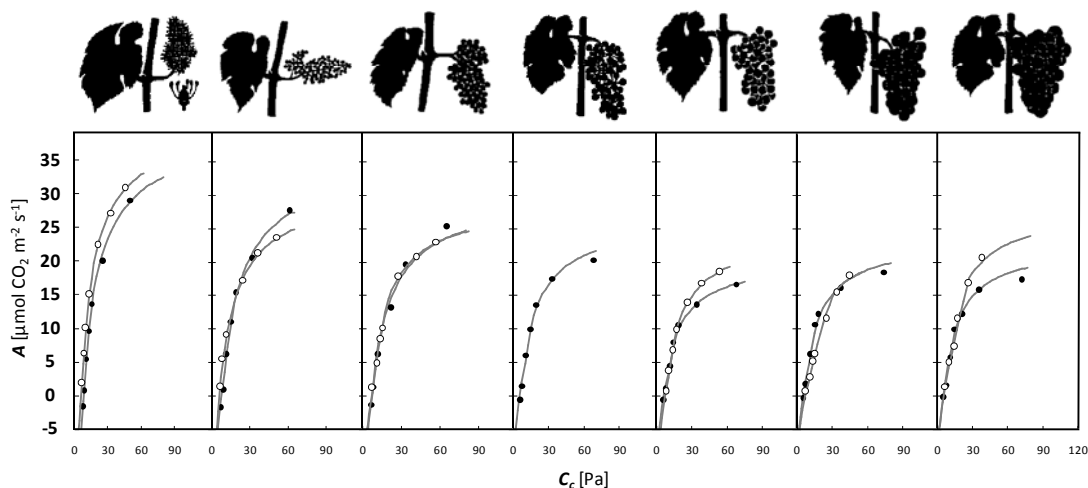


Figura 37 Curve A/C_i ottenute dalle misure di scambio gassoso fogliare nelle due annate di studio: 2006 (●) e 2007 (○) nelle fasi da fioritura a maturazione. Le curve si interrompono al raggiungimento della saturazione (fase di *plateau*).

Complessivamente non sono riscontrabili differenze significative tra le due annate nelle quali si assiste ad un graduale abbassamento delle curve da valori di assimilazione netta massima di $\sim 30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ad inizio stagione, a valori di 15-20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ alla maturazione dei grappoli. Per poter effettuare uno studio della diversa *performance* della foglia di vite alle diverse condizioni di concentrazione di CO_2 si è parametrizzato il modello di Farquhar *et al.*, (1980) per ottenere i parametri biochimici del modello di fotosintesi con cui effettuare dei confronti tra le diverse fasi fenologiche e le due annate.

3.4.2.1 Parametrizzazione del modello di Farquhar

Il *fitting* del modello ha previsto diverse fasi in funzione delle diverse regioni (W_c ; W_j ; W_p) descritte dalla curva di risposta dell'assimilazione netta (A_n) alla concentrazione interna di CO_2 (C_i). Per la stima di V_{cmax} , J_{max} e TPU è stata utilizzata una analisi in due parti consecutive: prima sono stati stimati V_{cmax} e R_{day} dalla curva A/C_i fino a 20 Pa e poi è stato fittato il modello intero sulla curva intera per la stima di J_{max} e TPU mediante una routine di regressione ai minimi quadrati. In particolare, a basse C_i ed elevati valori di PPFD (saturanti) il RuBP è presente in eccesso e la fotosintesi viene limitata dalle proprietà cinetiche della Rubisco, determinata dal valore di V_{cmax} (FARQUHAR & VON CAEMMERER, 1981). La rigenerazione del RuBP determinata da J_{max} diventa limitante solo a più basse PPFD e/o più elevate temperature e valori superiori maggiore C_i . Dal momento che tutte le misure delle curve A/C_i sono state condotte in condizioni di PPFD saturanti ($> 1400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e i valori di C_i hanno raggiunto al massimo ~ 100 Pa, non c'è stata co-limitazione tra V_{cmax} e J_{max} e la rigenerazione del

RuBP è diventata limitante solo ai più alti valori misurati di C_i . Il terzo parametro, TPU , l'utilizzazione dei trioso-fosfati, diventa raramente limitante completamente e la sua stima diventa difficoltosa nel caso in cui le curve A/C_i non diventino completamente piatte ad elevati valori di C_i , per questo motivo è ignorata spesso nella parametrizzazione di molti modelli (SCHULTZ, 2003). Le stime di TPU in questo studio hanno richiesto, spesso, un numero elevato di iterazioni della *routine* di *fitting* prima di raggiungere la convergenza adeguata.

I risultati della parametrizzazione del modello di Farquhar sulle curve di risposta alla CO_2 sono presentati in Tabella 8. Dai dati ottenuti è evidente una diminuzione di tutti e tre i parametri graduale nel corso della stagione, seppur rimangano ben coordinati tra loro come riportato nei lavori di Schultz (2003) e Maroco *et al.* (2002).

Tabella 9

Parametrizzazione del modello di Farquhar durante la stagione vegetativa. (errore standard)								
	2006	20/6	27/6	10/7	18/7	2/8	4/9	20/9
V_{cmax}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	121.7 (2.08E-01)	103.7 (2.41E-01)	98.1 (2.97E-01)	66.5 (2.57E-01)	53.5 (5.49E-02)	58.4 (1.28E-01)	59.0 (1.52E-01)
J_{max}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	161.7 (2.75E-01)	147.5 (3.92E-01)	121.0 (8.24E-01)	97.0 (1.53E-01)	81.0 (7.84E-04)	85.9 (4.28E-01)	84.3 (1.07E-01)
TPU	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	12.9	10.6	9.6	7.0	6.1	6.5	6.16
R_{day}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	5.6 (3.44E-03)	2.6 (8.86E-02)	2.6 (1.80E-09)	0.8 (8.30E-02)	2.3 (7.05E-03)	1.2 (5.96E-02)	1.3 (1.49E-01)
Γ^*	Pa	7.83	7.77	7.21	5.75	6.54	5.66	5.475
	2007	31/5	16/6	28/6	25/7	9/8	29/8	
V_{cmax}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	120.4 (2.99E-01)	106.6 (2.91E-01)	71.2 (9.87E-02)	66.0 (1.72E-03)	46.3 (1.93E-01)	54.71 (5.19E-01)	
J_{max}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	155.7 (1.78E-01)	119.6 (1.45E-01)	114.1 (7.25E-02)	98.1 (9.39E-02)	91.8 (2.58E-01)	102.5 (3.73E-01)	
TPU	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	11.9	9.3	9.6	6.9	6.6	8.8	
R_{day}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	3.0 (1.0E-01)	3.1 (1.08E-01)	3.1 (2.40E-02)	3.1 (2.67E-05)	2.3 (1.87E-01)	1.1 (2.11E-03)	
Γ^*	Pa	5.05	6.08	6.94	7.65	7.38	5.59	

L'andamento della respirazione giornaliera (R_{day}) che, in quanto non misurata al buio, non risente delle quota di fotorespirazione (come invece per la respirazione al buio, R_{dark}) ha un andamento decrescente (Figura 38) raggiungendo, in entrambe le annate, il valore minimo a fine stagione, pari a $\sim 1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, come osservato da Schultz (2003). In ulteriore accordo con Schultz (2003), confrontando i valori di R_{day} e R_{dark} si osserva un rapporto di circa 1:3, nel presente lavoro i valori di R_{day} risultano essere superiori a quelli di R_{dark} ad inizio stagione per poi ri-avvicinarsi a fine stagione (Tabella 9) come conseguenza del contributo della fotorespirazione alla respirazione notturna.

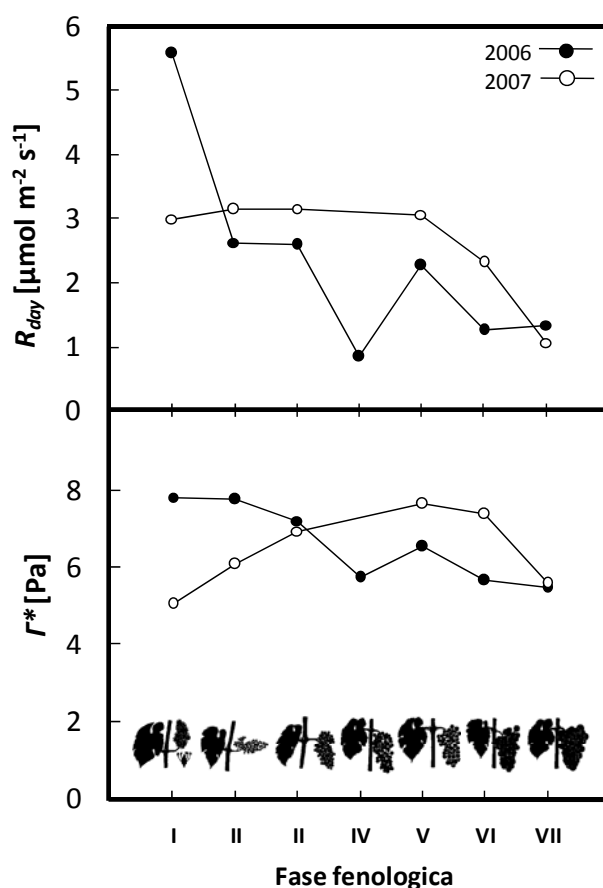


Figura 38 Parametri biochimici ottenuti dal *fitting* del modello di Farquhar: respirazione giornaliera (R_{day}); punto di compensazione per la CO_2 (Γ^*).

V_{cmax} , la velocità massima di carbossilazione, da inizio stagione mostra una riduzione di circa la metà del suo valore iniziale in entrambe le annate (Figura 39), passando da 121.7 e 120.4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (fase di piena fioritura) a 59.0 e 54.71 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (maturazione) rispettivamente nel 2006 e nel 2007, indicando una progressiva riduzione della capacità di carbossilazione dell'enzima Rubisco.

J_{max} , la velocità massima del trasporto elettronico, riduce anch'essa il suo valore di circa la metà (Figura 39) passando da 161.7 e 155.7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (piena fioritura) a 84.3 e 102.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (maturazione), rispettivamente nel 2006 e nel 2007, indicando una notevole riduzione della capacità di rigenerazione del RuBP.

Anche l'utilizzazione dei trioso-fosfati, *TPU*, risente in maniera significativa dell'invecchiamento del tessuto, con una evidente riduzione progressiva passando da 12.9 e 11.9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (piena fioritura) a 6.2 e 8.8 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (maturazione) rispettivamente nel 2006 e nel 2007 (Figura 39).

Conferma ulteriore di questa buona coordinazione tra i parametri biochimici del modello di Farquhar è visibile graficamente osservando la relazione lineare ($R^2 > 0.8$) tra V_{cmax} Vs J_{max} in Figura 40, da inizio a fine stagione. Considerando i valori di entrambe le annate (Figura 40) si ottiene una relazione lineare tra V_{cmax} e J_{max} con $R^2 = 0.863$ che indica una relazione coordinata tra l'attività e/o le proprietà cinetiche della Rubisco e la capacità di rigenerazione del RuBP in tutte le differenti condizioni ambientali (temperatura e umidità dell'aria) e per le diverse età della foglia incontrate nel corso delle stagioni di studio. Il rapporto J_{max}/V_{cmax} può essere utilizzato nella modellistica della dinamica stagionale della fotosintesi della *canopy* con elevate differenze di età fogliari, assumendo che segua la stessa dipendenza dalla temperatura

per tutte le età fogliari e che il rapporto rimanga circa costante nel corso della stagione anche se i valori assoluti di V_{cmax} e J_{max} possono cambiare (Figura 40; Figura 41).

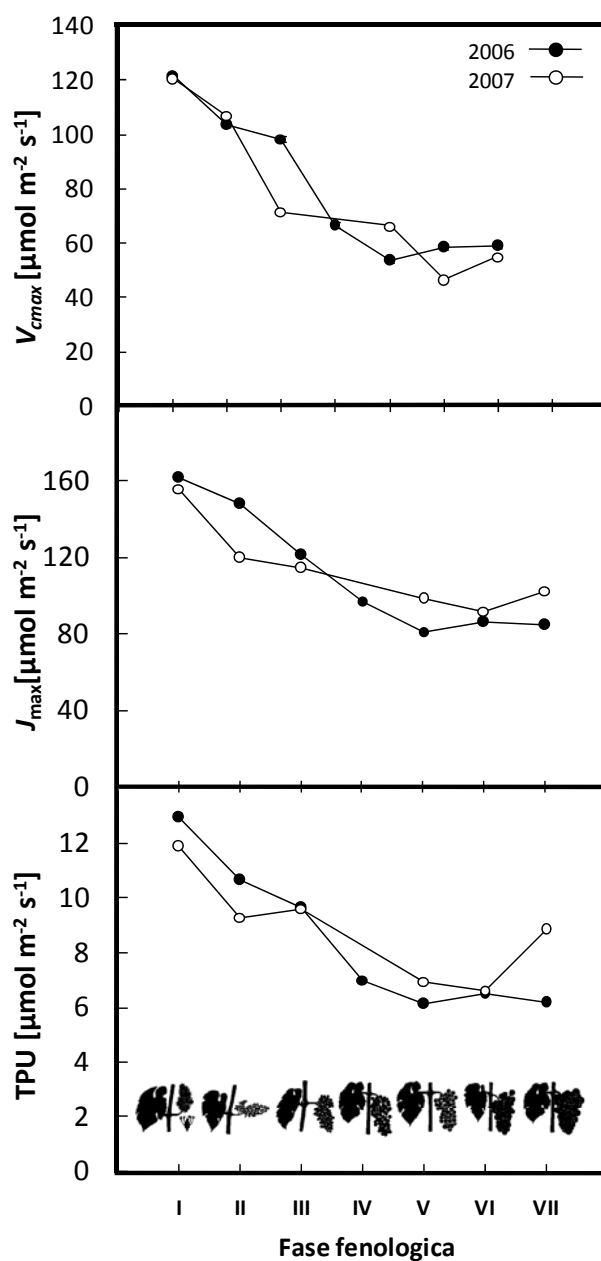


Figura 39 Parametri biochimici ottenuti dal *fitting* del modello di Farquhar (1980) sulle curve A/C_i nelle due annate di studio: velocità massima di carbossilazione (V_{cmax}); velocità del massima del flusso di trasporto elettronico (J_{max}); utilizzazione dei trioso fosfati (TPU).

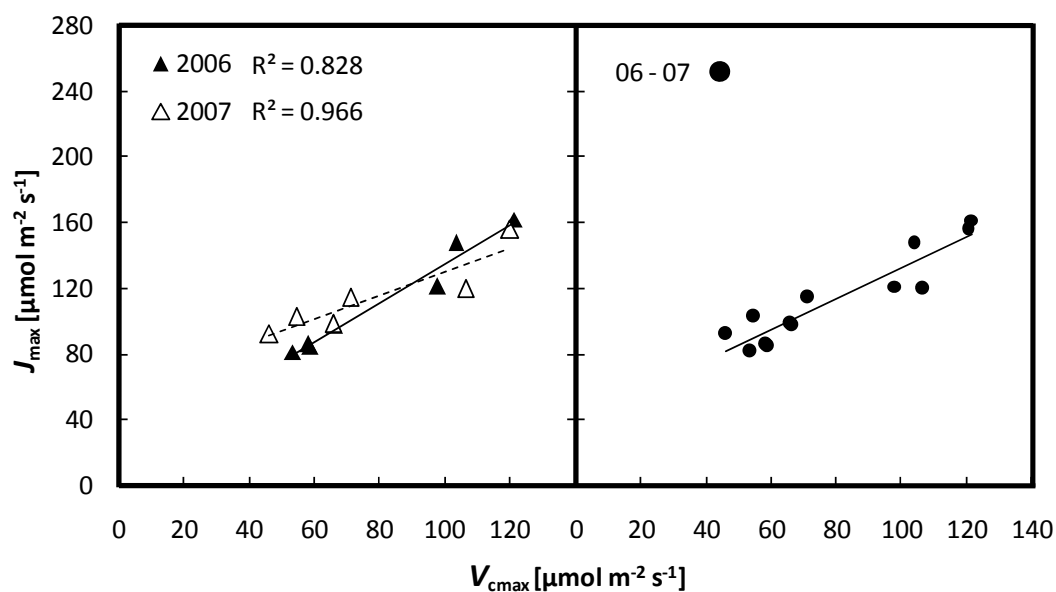


Figura 40 Relazione esistente tra la velocità massima del trasporto elettronico ($J_{\max}$) e la velocità massima di carbossilazione (V_{cmax}) nei due anni di studio (sx) e complessivamente (dx). L'equazione di regressione complessiva (dx) è: $J_{\max} = 37.62 + 0.946V_{\text{cmax}}$ ($r^2 = 0.863$).

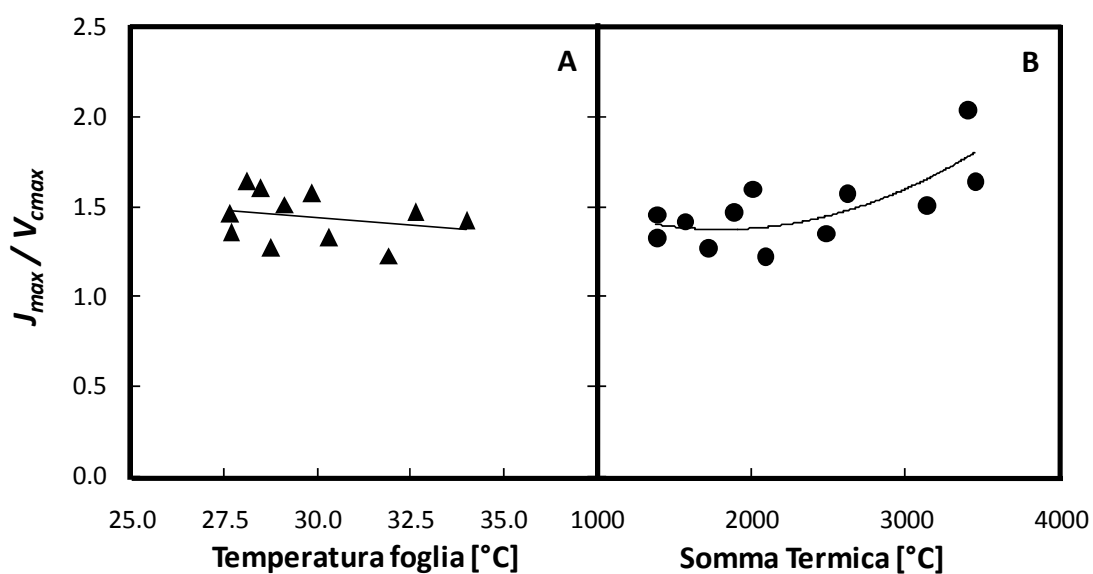


Figura 41 Relazione tra il rapporto $J_{\max}/V_{\text{cmax}}$ in funzione della temperatura della foglia (A) e della sommatoria termica, ST (B). Le equazioni di regressione sono: per A, $J_{\max}/V_{\text{cmax}} = 1.951 - 0.017T$ ($r^2 = 0.071$); per B, $1.903 - 0.000ST + 2.0E-07ST$ ($r^2 = 0.538$).

Il rapporto J_{max}/V_{cmax} rappresenta, inoltre, una stima delle relative attività di rigenerazione del RuBP e delle capacità di carbossilazione nella foglia. Sebbene la risposta alla radiazione ambientale non sia tuttora chiara (SCHULTZ, 2003). In alcuni casi sono riportati in letteratura elevati rapporti in condizioni crescenti di PPFD di crescita (FERRAR & OSMOND, 1986; EVANS, 1987); in altri sono stati trovati rapporti decrescenti o inalterati nella stagione (VON CAEMMERER & FARQUHAR, 1981; SIMS & PEARCY, 1989). Sage (1990) osservò che la capacità di rigenerazione del RuBP e l'attività della Rubisco sono controllate, così, se una delle due diventa limitante, l'altra viene sottoregolata, pertanto il rapporto tra J_{max} e V_{cmax} resterebbe approssimativamente costante. I dati riportati nel presente lavoro sembrano confermare questa osservazione, in quanto il rapporto rimane pressoché costante al variare delle condizioni di temperatura fogliare ed età della foglia. Nelle viti, è stato osservato solo un leggero spostamento verso valori più elevati nelle ultime fasi di sviluppo (Figura 41) (invasatura e maturazione dei grappoli) a fine stagione, sottolineando un elevato grado di stabilità tra l'attività e/o la quantità di Rubisco e la capacità di rigenerazione del RuBP, oltre ad un probabile elevato aumento di contenuto della concentrazione di azoto fogliare col passare del tempo (WILLIAMS & SMITH, 1985). L'aumento nel rapporto J_{max}/V_{cmax} riportato anche a Wilson *et al.* (2000) potrebbe essere stato dovuto, parzialmente, anche ai fenomeni di stress verificatisi in campo a fine stagione.

In generale i rapporti di J_{max}/V_{cmax} trovati nel presente lavoro variano tra 1.23 e 2.05, per questo leggermente inferiori rispetto a quelli osservati da Schultz (2003) in uno studio sugli effetti dell'età fogliare e della natura delle foglie (foglie di luce e di ombra)

e in Maroco *et al.*, (2002) in uno studio sugli effetti dello stress idrico sulla vite (2.45 per viti in salute, 2.63 per viti stressate).

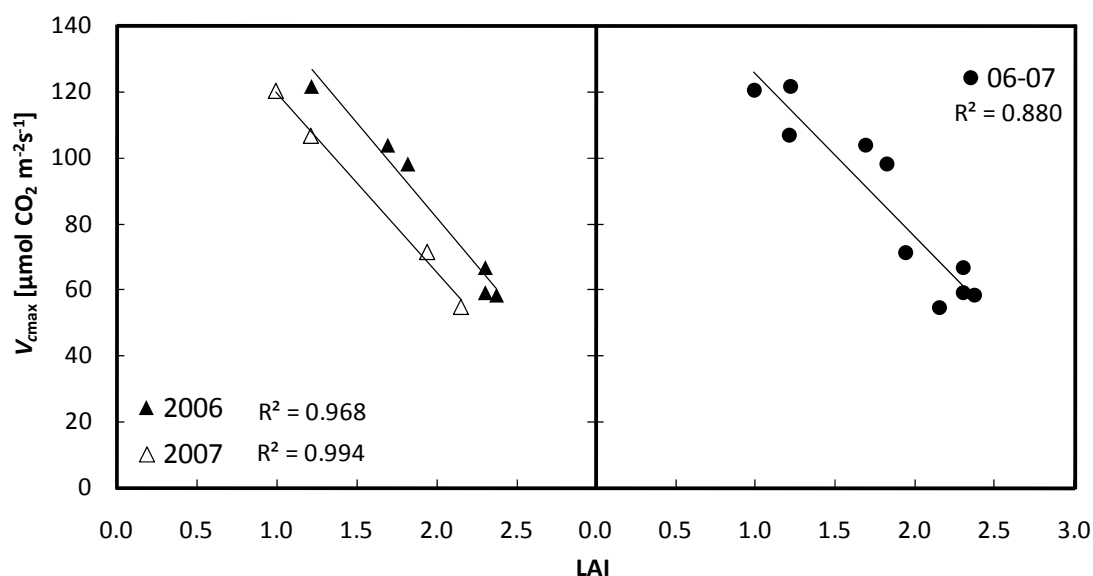


Figura 42 Relazione tra V_{cmax} e LAI nelle due annate (sx) e complessivamente (dx). L'equazione di regressione (dx) è: $V_{cmax} = 174.7 - 49.24 \text{ LAI}$ ($r^2 = 0.880$).

V_{cmax} , l'indice della capacità di carbossilazione della Rubisco, è usualmente molto correlato con la quantità di azoto fogliare nelle foglie (SIMS & PEARCY, 1989). La relazione tra la velocità massima di carbossilazione della Rubisco e il LAI, indice di area fogliare sicuramente correlato con la quantità di azoto fogliare, è presentata in Figura 42 per le due annate di studio. È possibile osservare come la relazione sia di tipo lineare ma con un evidente offset tra le due annate, in particolare a parità di valore di LAI, nel 2006 la foglia ha un V_{cmax} superiore rispetto al 2007 di circa 15-20 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Considerando le due annate insieme si ricava una buona relazione ($r^2 = 0.88$) tra V_{cmax} e il LAI misurato direttamente in campo durante la stagione.

La parametrizzazione del modello di Farquhar ha consentito di effettuare uno studio della relazione esistente tra i parametri del modello: V_{cmax} , J_{max} e TPU e la somma termica raggiunta dalla foglia (Figura 43). Non sono riscontrabili differenze significative tra le annate di studio per tutti e tre i parametri che decrescono col passare della stagione restando tuttavia coordinati tra loro.

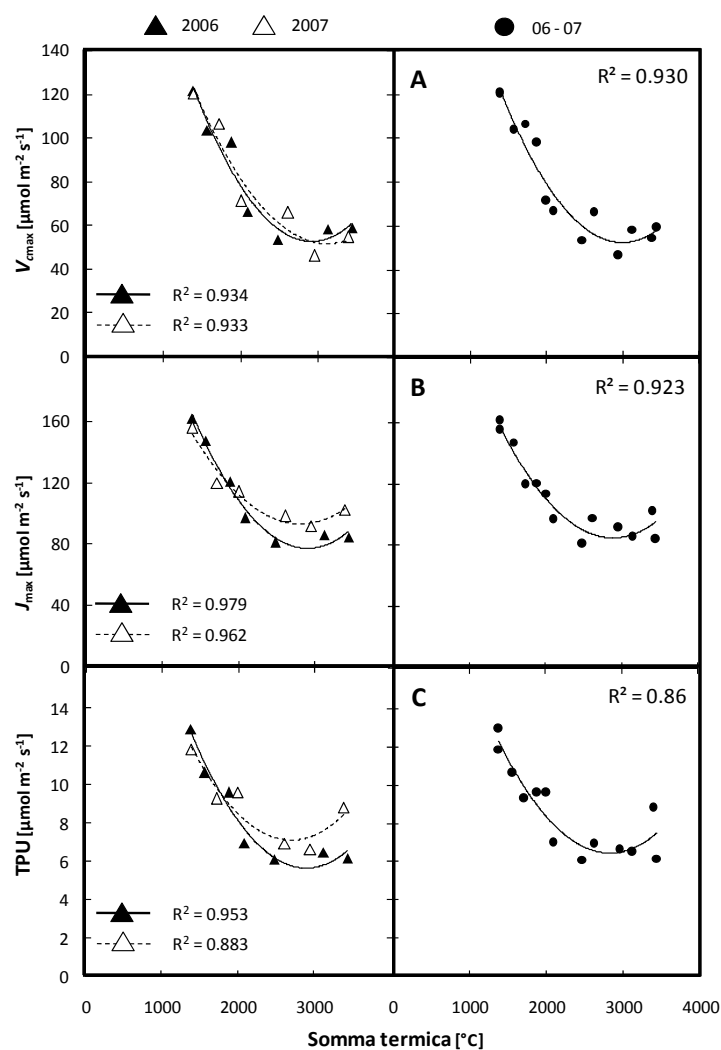


Figura 43 Relazione tra l'andamento dei parametri del modello di Farquhar & von Caemmerer (1981) e la sommatoria termica (ST) raggiunta nelle date di misura per i due anni di studio. Equazioni di regressione: per A: $V_{cmax}=295.5-0.162ST+3.0E-05ST^2$ ($r^2=0.93$); per B: $J_{max}=354.9-0.187ST+3.0E-05ST^2$ ($r^2=0.923$); per C: $TPU=28.86-0.015ST+3.0E-06ST^2$ ($r^2=0.86$).

3.5 LA SCALA DI PARCELLA

L'installazione di una stazione permanente di misura, mediante la tecnica micrometeorologica dell'*eddy covariance*, dei flussi di energia (radiazione, calore sensibile e calore latente) e di materia (CO₂ e H₂O) ha permesso di monitorare, alla scala di *canopy*, l'andamento del bilancio energetico, del bilancio idrico e del carbonio del vigneto di Negrisia. Dalle misure istantanee di velocità verticale del vento, di temperatura dell'aria e della densità di vapor d'acqua e anidride carbonica sono stati, quindi, calcolati i flussi di calore sensibile (H), evapotraspirazione (λE) e di CO₂ con una risoluzione temporale di 30 minuti. Le misure micrometeorologiche ancillari dei flussi discendenti e ascendenti della radiazione ad onda corta (rad. solare) e ad onda lunga (rad. IR termica), hanno permesso di arrivare alla misura della ripartizione del bilancio radiativo in onda corta ed in onda lunga e a verificare la chiusura del bilancio energetico.

Di seguito verranno presentati i risultati ottenuti a questa scala di misura. In particolare sono stati studiati i flussi di energia, arrivando a ripartire il bilancio energetico nelle sue componenti principali, e si è analizzato il comportamento nel tempo del bilancio di materia, in particolare di acqua e di CO₂, arrivando ad una conoscenza dettagliata dell'evapotraspirazione reale della vite e del bilancio del carbonio sul metro quadrato di vigneto.

3.5.1 Flussi di Energia

La misura dei flussi di energia, monitorati durante le annate 2006 e 2007, ha permesso di arrivare ad uno scorporo delle principali componenti del bilancio

energetico: radiazione netta (R_N), flusso di calore sensibile (H) e flusso di calore latente (λE). È dallo studio dell'andamento del bilancio energetico che è possibile arrivare a conoscere realmente come la coltura ha risposto alle condizioni ambientali verificatesi durante il periodo di studio.

3.5.1.1 Bilancio Radiativo

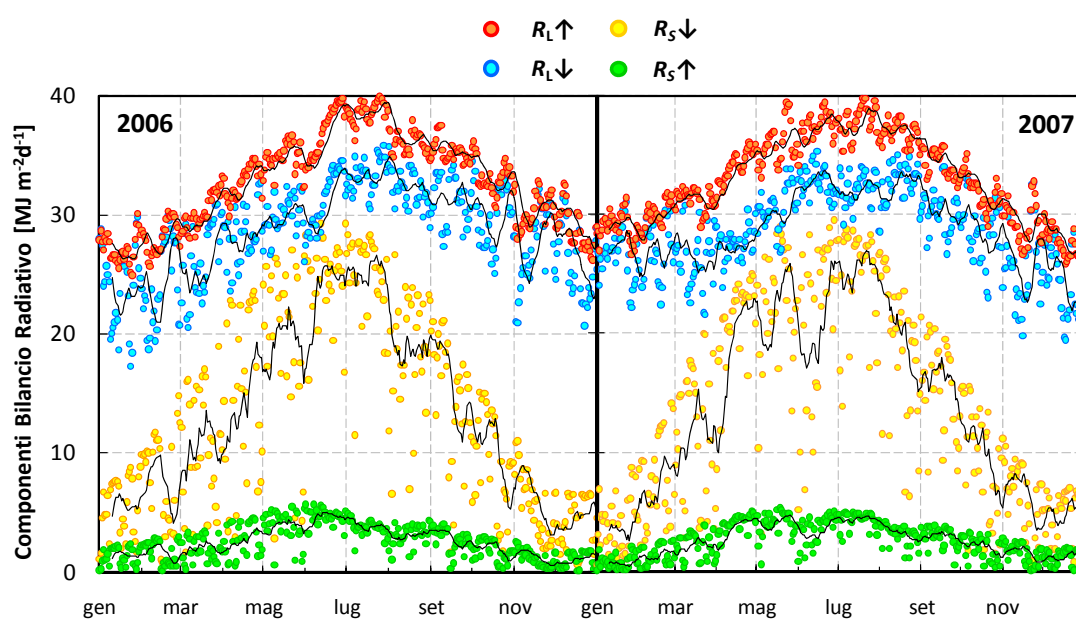


Figura 44 Ripartizione annuale del bilancio radiativo nelle componenti in onda corta/lunga e ascendente/discendente: rad. discendente in onda corta ($R_{S\downarrow}$); rad. ascendente in onda corta ($R_{L\uparrow}$); rad. discendente in onda lunga ($R_{L\downarrow}$); rad. ascendente in onda lunga ($R_{S\uparrow}$).

La scomposizione del bilancio radiativo nelle sue componenti discendenti ed ascendenti sia per l'onda corta (radiazione solare) che per l'onda lunga (IR termico) è presentato in Figura 44. Dai dati ottenuti è interessante osservare la differenza sostanziale esistente tra bilancio in onda corta ed in onda lunga. Il bilancio in onda corta, infatti, alle nostre latitudini è sempre positivo durante l'anno (in altri paesi esso può

anche essere negativo in alcuni periodi dell'anno). La radiazione solare in onda corta ha un flusso incidente ($R_{s\downarrow}$) che raggiunge mediamente durante l'estate valori intorno ai 25-30 MJ m⁻², mentre nei mesi di dicembre e gennaio ha i suoi valori minimi registrati pari a 3-5 MJ m⁻². Parte di questo flusso incidente è immediatamente riflesso in parte dalla superficie ($R_{s\uparrow}$). Un parametro importante che è stato ricavato dal rapporto tra la radiazione in onda corta incidente e riflessa è l'Albedo che rappresenta la riflettenza in onda corta (Figura 45). È possibile osservare come il valore di Albedo misurato durante le due annate è variato tra il 15 ed il 20%, ossia la percentuale della radiazione in onda corta riflessa è stata nell'ordine del 15-20% della incidente. In particolare la minore quota percentuale, in onda corta, che è stata riflessa da parte della vegetazione (Albedo = 0.15) si è avuta nei mesi centrali dell'anno in corrispondenza della massima copertura vegetale del vigneto. Durante i primi mesi dell'anno e in autunno invece è stato registrato il maggior valore di Albedo (20%) in entrambe le annate.

Per quanto riguarda invece il bilancio in onda lunga, va considerato il rapporto tra la radiazione emessa dalla terra ($R_{L\uparrow}$) e dalla atmosfera ($R_{L\downarrow}$). Principale differenza rispetto con alla radiazione in onda corta è che il bilancio in onda lunga è sempre negativo, perché tipicamente tutti gli oggetti presenti sulla terra sono ad una temperatura maggiore rispetto alla temperatura del flusso in onda lunga incidente ed hanno tipicamente anche una maggiore emissività (ϵ). Dai dati ottenuti, infatti, si può osservare (Figura 44) come nel sito di Negrizia la radiazione in onda lunga emessa dalla superficie terrestre e dall'atmosfera ($R_{L\uparrow}$) è risultata superiore per tutta la durata dell'anno rispetto alla radiazione in onda lunga emessa dall'atmosfera ($R_{L\downarrow}$). In particolare i valori più

elevati di $R_{L\uparrow}$ e $R_{L\downarrow}$ sono verificati nei mesi più caldi dell'anno con valori rispettivamente di 40 MJ m^{-2} e 35 MJ m^{-2} .

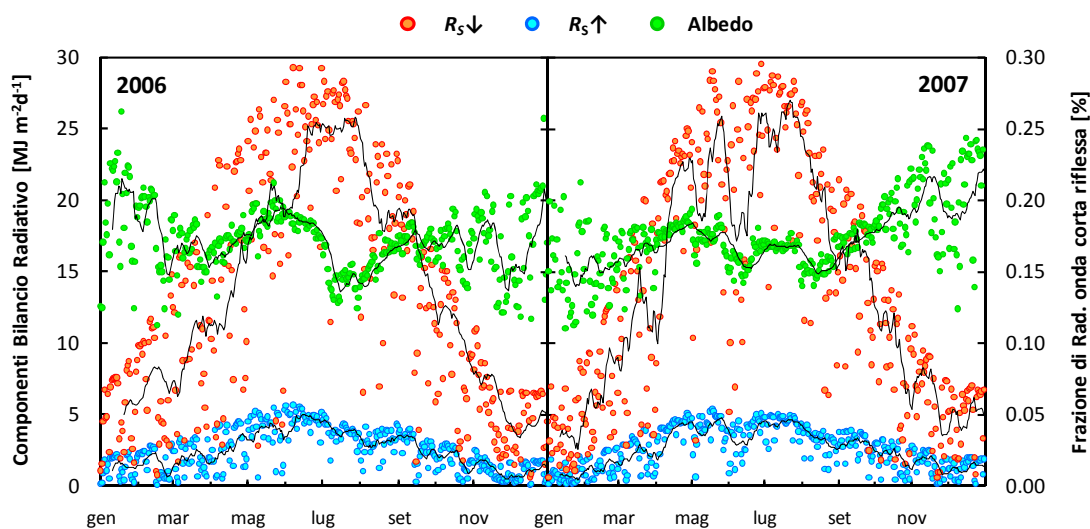


Figura 45 Bilancio radiativo in onda corta (rad. solare). Andamento stagionale dell'albedo, rapporto tra radiazione in onda corta incidente ($R_{s\downarrow}$) e riflessa dalla vegetazione ($R_{s\uparrow}$).

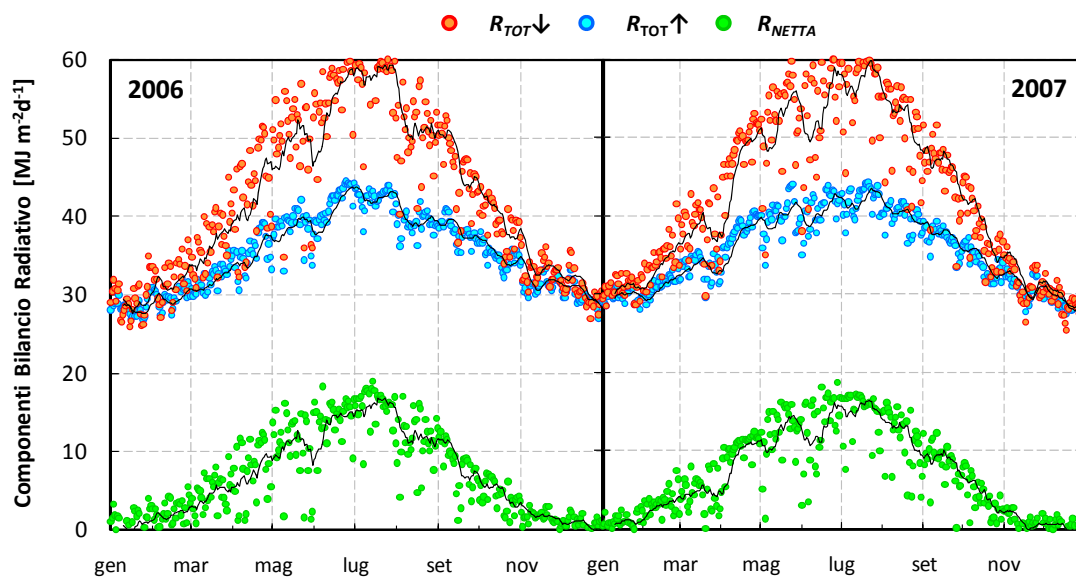


Figura 46 Bilancio della radiazione totale ascendente ($R_{TOT\uparrow}$) e totale discendente ($R_{TOT\downarrow}$). Andamento stagionale della Radiazione Netta (R_{NETTA}) durante le annate di studio.

Dai dati ottenuti è stato possibile arrivare alla determinazione della radiazione netta a disposizione del sistema vigneto durante la stagione (Figura 45), determinata dal rapporto tra la radiazione totale discendente ($R_{TOT\downarrow}$) e ascendente ($R_{TOT\uparrow}$). In particolare è possibile osservare che in entrambe le annate il metro quadrato di vigneto ha avuto una disponibilità energetica netta (R_{NET}) che è variata dai 0.5-15 MJ d⁻¹, il risultato del bilancio tra la radiazione ricevuta ed emessa dal sistema. La radiazione netta è sempre negativa durante la notte, in quanto prevale la radiazione in onda lunga rilasciata dal sistema verso l'atmosfera ($R_L\uparrow$). Man mano che il flusso radiativo in onda corta ($R_S\downarrow$) cresce, con la comparsa del sole, viene compensata la perdita in onda lunga da parte del sistema ed il bilancio torna in attivo, raggiungendo il suo massimo durante le ore centrali della giornata per poi ritornare in passivo dopo il tramonto.

Di seguito vedremo come il vigneto ha saputo ripartire questa disponibilità energetica tra il flusso di calore sensibile (H) ed il flusso di calore latente (λE).

3.5.1.2 Bilancio Energetico

Osservando l'andamento giornaliero medio del bilancio energetico durante la stagione (Figura 47) è possibile studiare la ripartizione dell'energia disponibile (R_N) all'interno del sistema. In particolare è possibile osservare come il sistema vigneto applichi una diversa strategia di ripartizione giornaliera dell'energia durante la stagione. In particolare, durante i primi mesi dell'anno, quando la vite non è ancora germogliata, il vigneto dissipa circa il 70% dell'energia disponibile per riscaldare l'atmosfera (calore sensibile) mentre il resto viene utilizzato nel processo di evaporazione dell'acqua (calore

latente). Una volta che, invece, la vite ha raggiunto una superficie fogliare significativa si nota come il sistema inverte la tendenza, investendo gran parte dell'energia disponibile nel processo di evaporazione dell'acqua. Questa ripartizione poi, rimane all'incirca costante fino a fine stagione, con una netta prevalenza della dissipazione in calore latente dell'energia disponibile nel sistema.

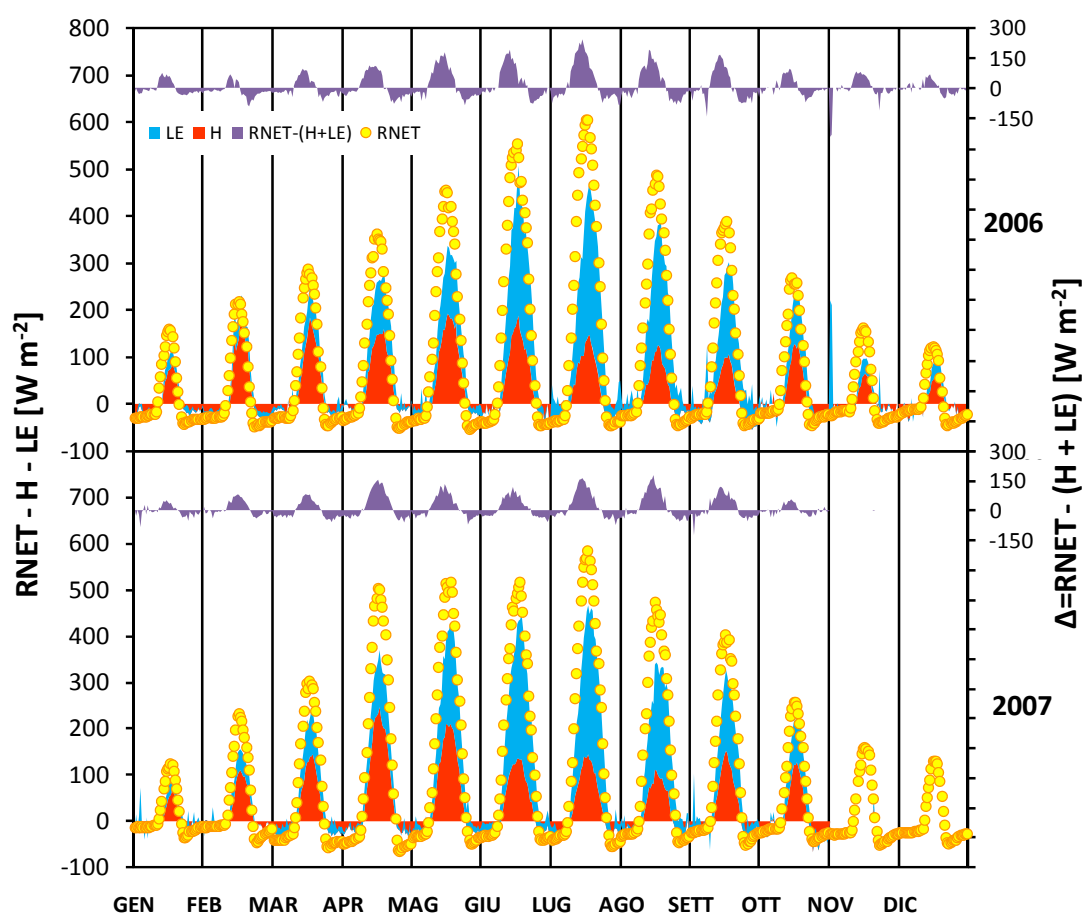


Figura 47 Andamento giornaliero del bilancio energetico del giorno medio del mese. In rosso il flusso di calore sensibile (H); in grigio il flusso di calore latente (LE) e in giallo la radiazione netta ($RNET$). La differenza (Δ) tra radiazione netta e flussi di calore sensibile e latente rappresenta il flusso di calore immagazzinato nelle componenti del sistema (vite e suolo).

La differenza tra la radiazione netta ed i flussi turbolenti di calore latente e sensibile è la componente di energia immagazzinata nel suolo e nella vite (*storage*). Nel

caso in cui tutte le componenti del bilancio vengano correttamente stimate, la media mensile del flusso di *storage* dovrebbe risultare prossima a zero. Durante le stagioni osservate, la chiusura del bilancio energetico, calcolata su base giornaliera, è stata soddisfacente, nell'ordine del 90%. Va tenuto conto, infatti, che le stime del flusso turbolento non possono essere fatte durante eventi di precipitazione, in quanto sia l'anemometro ultrasonico che l'analizzatore IRGA a percorso aperto non funzionano correttamente con le testine bagnate, per cui è inevitabile che la percentuale dei dati misurati non sia pari al 100% di quelli potenzialmente ottenibili.

Nel corso della stagione vegetativa l'energia ricevuta per radiazione dal vigneto è stata, in entrambe le annate, attorno ai $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nel mese di luglio mentre in agosto l'apporto è stato discontinuo e irregolare, essendo disturbato dalle frequenti perturbazioni (Figura 48). Dall'inizio di Aprile fino ai primi di Giugno, quando il LAI della vite ha raggiunto il suo valore massimo (2.5-3), il sistema vigneto ha ripartito all'incirca ugualmente l'energia disponibile in calore sensibile e latente (rapporto di Bowen vicino a 1). È osservabile come nel mese di aprile 2007 il bilancio dell'energia sia stato spostato per una 65% in calore sensibile, in risposta, probabilmente, alla scarsità di precipitazioni e per il regime anomalo di temperatura registrato in primavera.

Dal mese di Giugno in poi, una volta sviluppato un apparato fogliare significativo, il flusso di calore latente (λE) è risultato sempre prevalente su quello di calore sensibile (H) ed nel mese di luglio si sono misurati i valori più elevati di λE ($\sim 10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), a fronte di valori di H attorno ai $2.5\text{-}3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

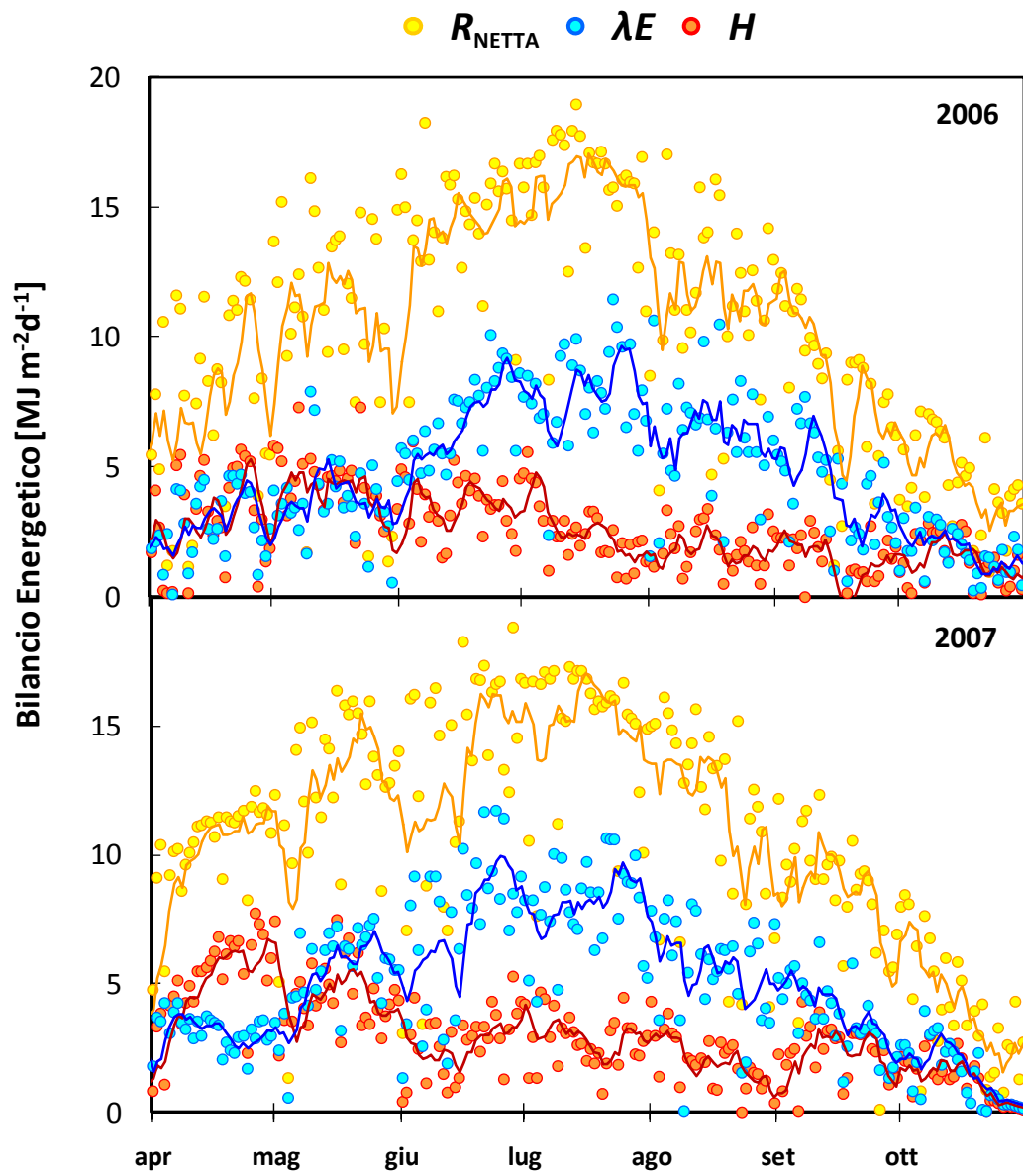


Figura 48 Andamento della ripartizione del bilancio energetico durante la stagione vegetativa. Radiazione netta (R_{NET}); flusso di calore sensibile (H) e latente (λE).

3.5.2 Flussi di Materia

Oltre alla misura ed alla ripartizione delle componenti del bilancio energetico, le misure effettuate mediante la tecnica dell'*eddy covariance* hanno permesso di misurare i flussi di materia che avvengono nel sistema vigneto. In particolare i flussi di CO₂ e vapor d'acqua, arrivando ad ottenere una "misura reale", non una stima, del bilancio del carbonio e del bilancio idrico della vite.

La misura dei flussi di CO₂, in particolare, permette di determinare lo Scambio Ecosistemico Netto (*NEE – Net Ecosystem Exchange*) di anidride carbonica del vigneto. L'andamento del **NEE** di CO₂ nel giorno medio di ciascuna decade dell'anno nel sistema vigneto è presentata in Figura 49 (2006) – Figura 50 (2007).

Per convenzione stabilita all'interno della comunità scientifica, valori negativi di *NEE* indicano un flusso di assorbimento di CO₂ da parte della vegetazione, mentre valori positivi un flusso opposto di emissione di respirazione dal parte del sistema.

Nel 2006 si osserva il flusso di respirazione notturno abbia raggiunto i valori massimi notturni ($\sim 15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) nel mese di luglio in corrispondenza delle temperature più elevate e del periodo di scarsità di precipitazioni. Durante il giorno invece è prevalso il flusso di assimilazione della CO₂ che è cresciuto visibilmente durante la stagione raggiungendo i valori massimi giornalieri di ($\sim 25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), nelle ore centrali della giornata, nel mese di Agosto, con la ripresa delle precipitazioni che hanno ripristinato le riserve idriche del sistema. È visibile il periodo di stress idrico subito dalla vegetazione nel mese di Luglio, che ha portato ad una riduzione sensibile, in

particolare nella terza decade di luglio (40%), dei flussi di assimilazione netta potenziali della copertura vegetale, con valori massimi giornalieri di ($\sim 15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Il 2007, invece, non sembra aver subito le stesse condizioni di stress verificatesi nel 2006. Ha mostrato i massimi valori di respirazione notturna a fine Maggio-inizio Giugno ($\sim 20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), in corrispondenza di un periodo caratterizzato da un anomalo regime termico che ha portato le temperatura alle soglie massime stagionali di oltre 30°C . Al contrario, i flussi assimilativi di CO_2 più elevati sono stati riscontrati nel mese di Giugno, con valori che hanno spesso superato le $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. In corrispondenza dell'ultima decade di Luglio si assiste ancora una volta ad una riduzione del flusso di assimilazione netta giornaliera che però rimane comunque su livelli buoni ($\sim 20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), evidenziando una buona risposta della vegetazione allo stress subito.

Dall'elaborazione dei dati di NEE del vigneto è stato possibile effettuare una determinazione reale della capacità assimilativa della vite, arrivando a determinare, la quantità di carbonio fissata dal vigneto durante la stagione vegetativa delle due annate di studio.

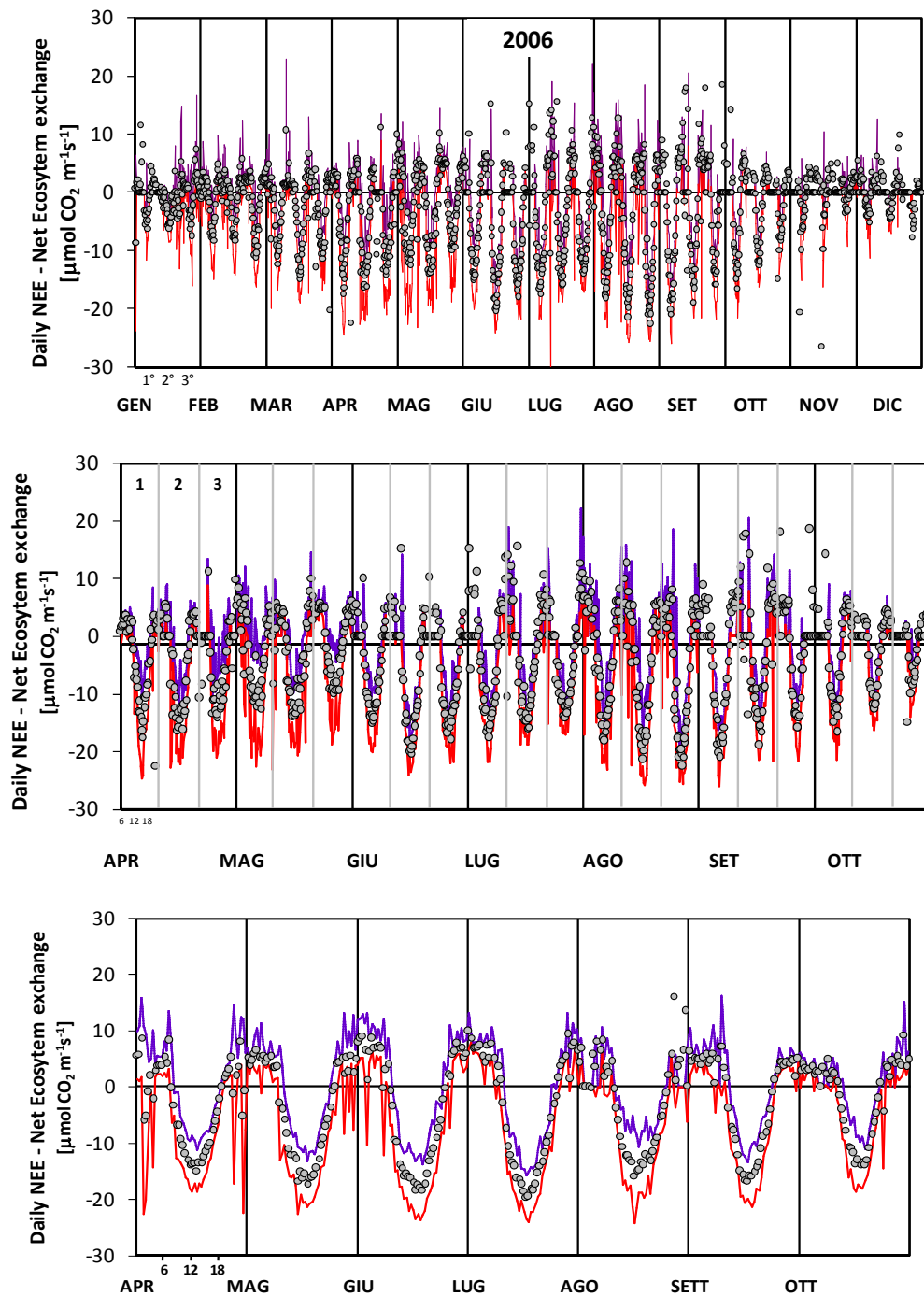


Figura 49 Andamento dello scambio ecosistemico netto (*NEE*) di CO₂ nel giorno medio della decade media del 2006 (in alto); del periodo vegetativo (in centro); di ogni mese del ciclo vegetativo (in basso). Valori negativi di *NEE* indicano assorbimento di CO₂ da parte della vegetazione, valori positivi emissione di respirazione. Le linee viola e rossa delimitano la deviazione standard entro cui si colloca la *NEE* media giornaliera.

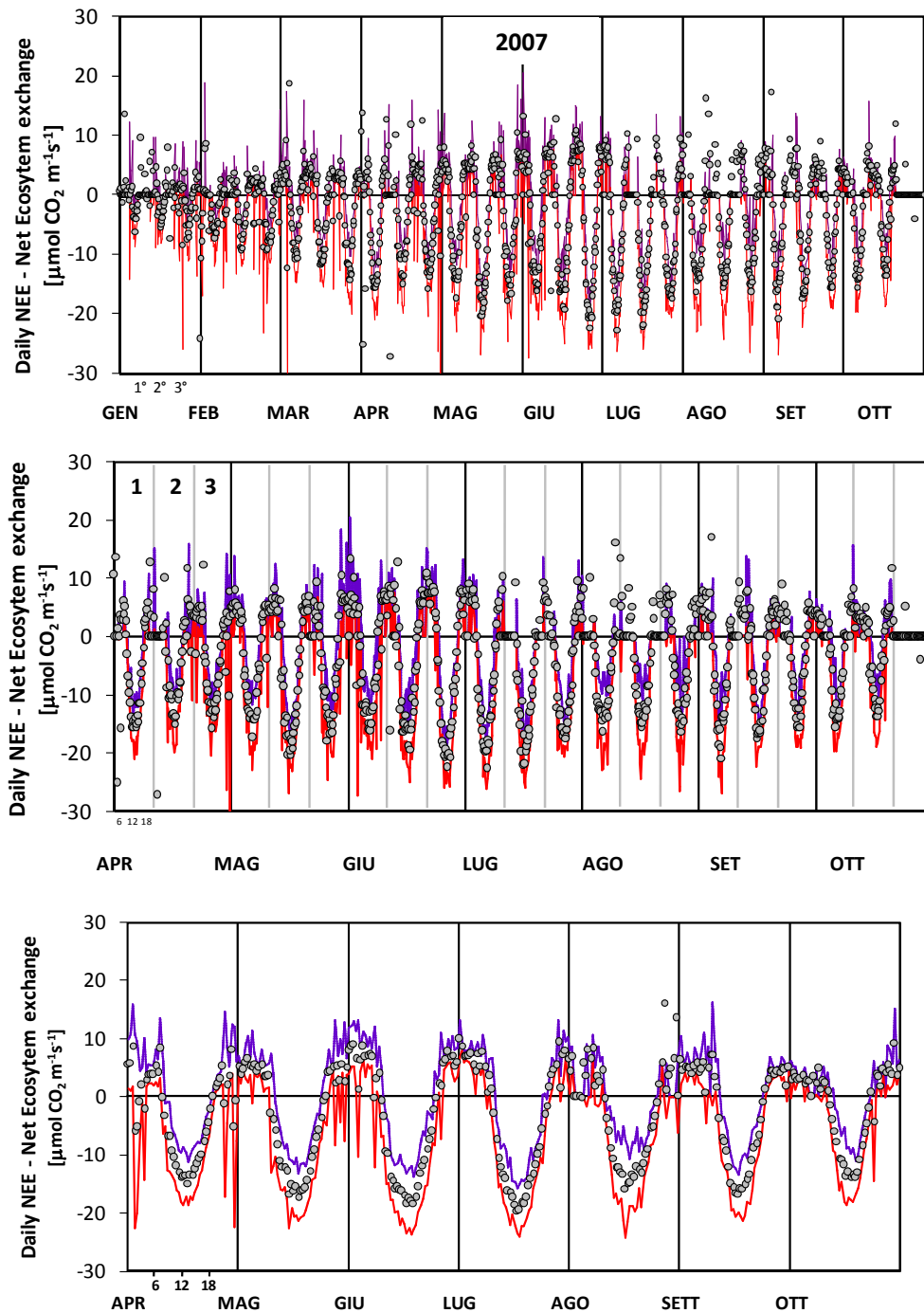


Figura 50 Andamento dello scambio ecosistemico netto (*NEE*) di CO₂ nel giorno medio della decade media del 2006 (in alto); del periodo vegetativo (in centro); di ogni mese del ciclo vegetativo (in basso). Valori negativi di *NEE* indicano assorbimento di CO₂ da parte della vegetazione, valori positivi emissione di respirazione. Le linee viola e rossa delimitano la deviazione standard entro cui si colloca la *NEE* media giornaliera.

3.5.3 Bilancio del Carbonio

Dai dati di Scambio Netto dell'Ecosistema (NEE) di CO₂ misurati a Negrisia nelle due annate è stato possibile, nota la quantità di CO₂ assimilata dal metro quadrato di vigneto, arrivare a determinare, per via stechiometrica, la quantità di carbonio fissata in forma stabile dal metro quadrato di vigneto.

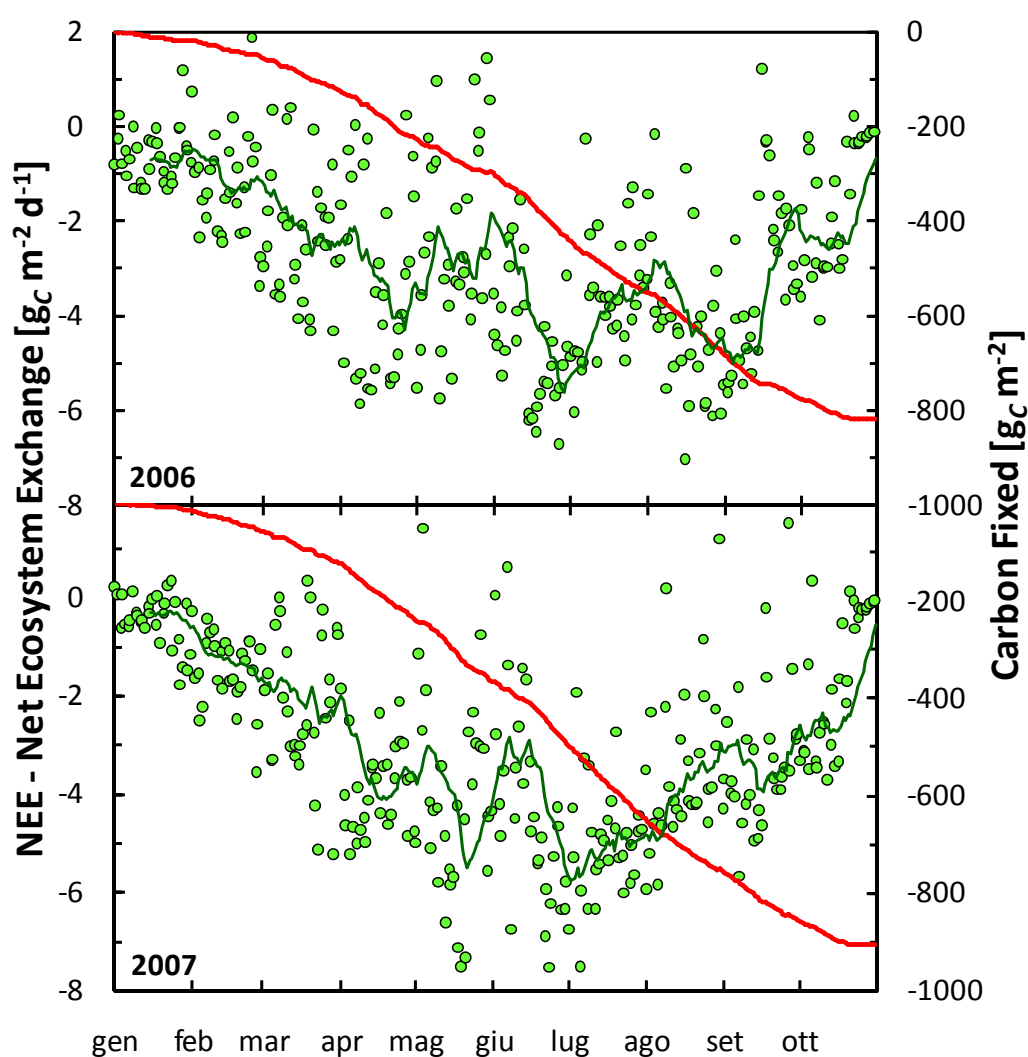


Figura 51 Bilancio del carbonio del vigneto nelle due annate di studio. La NEE giornaliera cumulata (verde) rappresenta la quantità di C fissata dal sistema (media mobile di 15gg).

In particolare nel 2006 (Figura 51) l'andamento del NEE, durante la stagione vegetativa del vigneto (vite+cotico), da gennaio a ottobre, ha mostrato un *range* di valori giornalieri di assimilazione netta che è oscillato dai 0 ai $-6 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$ nel mese di Giugno con un brusco calo nell'ultima decade di Luglio, come osservato in precedenza, in corrispondenza di uno stato di stress idrico per scarsità di precipitazioni perdurata, in condizioni di elevate temperature, per oltre un mese e mezzo. Dal conto cumulato a fine stagione vegetativa (fine ottobre) il vigneto di Negrizia nel 2006 ha fissato in forma stabile una quantità di carbonio pari a $\sim 820 \text{ g C m}^{-2}$ che rappresentano una notevole capacità di *sink* del sistema vigneto ($\sim 8 \text{ t C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$).

Il 2007, a fronte della superiore capacità fotosintetica dimostrata durante la stagione e la miglior risposta alle condizioni di stress verificatesi nel mese di luglio, ha raggiunto nel mese di Maggio e nella prima decade del mese di Luglio valori di NEE giornalieri che hanno spesso superato i $7 \text{ g C m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Di conseguenza se si effettua il conto cumulato a fine stagione dello Scambio Netto dell'Ecosistema, si arriva a una capacità di fissazione del carbonio che ha raggiunto i 907 g C m^{-2} ($\sim 9 \text{ t C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$), cioè circa 80 g C in più fissati sul metro quadrato rispetto al 2006.

È interessante osservare come chiudendo il bilancio del carbonio a fine stagione si trovi un *offset* tra le due annate ($\sim 80 \text{ g C m}^{-2}$) analogo a quello determinato mediante le tecniche biometriche ($\sim 50 \text{ g C m}^{-2}$). È stato effettuato così il confronto dei due bilanci (metodi biometrici distruttivi – metodi micrometeorologici non invasivi), tenendo conto che il bilancio della NEE, determinato con le misure micrometeorologiche, rappresenta la quantità di carbonio fissata dal sistema al netto delle perdite di respirazione,

comprendendo, quindi, anche quella componente del bilancio che non era stato possibile calcolare con i rilievi biometrici in campo: ossia l'accumulo di carbonio nel suolo e la quantità di carbonio investita dal metro quadrato di vigneto nell'accrescimento del legno vecchio (cordone e radici). La stima di queste componenti può essere effettuata, quindi, per differenza tra i due bilanci.

In particolare nel 2006 il sistema vigneto ha fissato un totale di 820 g C m^{-2} dei quali, una quota pari a 386 g C m^{-2} , è stata utilizzata nella crescita annuale del soprassuolo (vite + coticco), il restante 434 g C m^{-2} si può assumere siano stati investiti dal sistema nell'accrescimento del legno vecchio (cordone + radici) e fissato in forma stabile nel suolo.

Nel 2007 il sistema vigneto ha fissato un totale di 907 g C m^{-2} dei quali una quota pari a 424 g C m^{-2} è stata utilizzata nella crescita annuale del soprassuolo (vite + coticco), il restante 484 g C m^{-2} si può assumere siano stati investiti dal sistema nell'accrescimento del legno vecchio (cordone + radici) e fissato in forma stabile nel suolo.

Questi dati appaiono di grande importanza in relazione alla possibilità di considerare il vigneto come un efficace *sink* di CO_2 atmosferica a differenza della visione classica che attribuisce all'agricoltura in generale uno dei principali *source* dell'aumento della concentrazione di CO_2 atmosferica.

3.5.4 Bilancio Idrico

L'altro flusso di materia, oltre alla CO_2 , misurato mediante la tecnica dell'*eddy covariance* è il flusso di vapore acqueo. In particolare dalla ripartizione del bilancio energetico è possibile utilizzare la misura del flusso di calore latente, ossia la quantità di energia investita dalla vegetazione per l'evaporazione dell' H_2O , per determinare l'evapotraspirazione reale del vigneto (Figura 52).

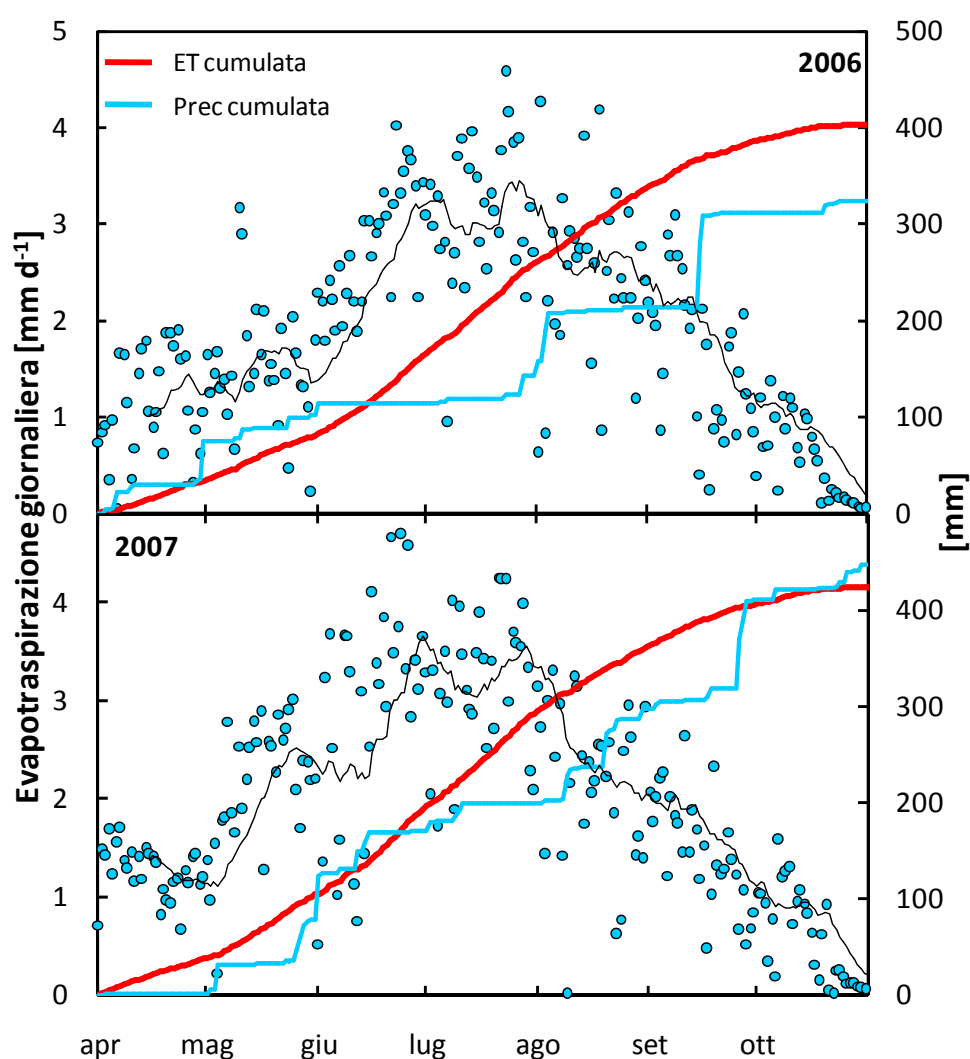


Figura 52 Andamento stagionale dell'evapotraspirazione misurata in relazione alle precipitazioni cumulate (linea azzurra). Evapotraspirazione cumulata (linea rossa).

Nella determinazione del bilancio idrico del vigneto di Negrisia, è doveroso osservare che, nonostante sia presente un sistema di irrigazione, il suo apporto al bilancio non è stato possibile quantificarlo a causa della tipologia di metodo irriguo utilizzato. Il vigneto, infatti, è dotato di un sistema di subirrigazione freatica (mediante dreni sotterranei), il cui contributo al bilancio idrico, seppur limitato ad una sola settimana in entrambe le annate (fine Luglio - inizio Agosto), rimane di difficile quantificazione e pertanto è stato determinato per differenza tra le precipitazioni totali annuali e l'evapotraspirazione del vigneto.

Nel 2006 i flussi di evapotraspirazione (Figura 52 – in alto), hanno raggiunto i valori massimi nel mese di Giugno ($4 - 4.5 \text{ mm d}^{-1}$), mentre nel periodo di massima domanda (Luglio), per effetto di fenomeni di stress, sono calati a valori di 3 mm d^{-1} . In questo momento l'azienda ha ritenuto opportuno un intervento irriguo che ha, visibilmente, ripristinato le capacità evapotraspirative della coltura ($4 - 4.5 \text{ mm d}^{-1}$). Nel successivo mese di Agosto si è assistito ad una ripresa delle precipitazioni che ha portato ad una diminuzione dei valori di evapotraspirazione del vigneto (3 mm d^{-1}). Complessivamente, nel periodo vegetativo da Aprile a Ottobre, il consumo da parte della vite è stato di 402 mm, a fronte di una dotazione idrica derivata dal regime di precipitazioni, di 324 mm. Per differenza è possibile osservare come si siano raggiunte delle condizioni di deficit idrico ($\sim 100 \text{ mm}$) che sono state presumibilmente reintegrate nel sistema con l'irrigazione effettuata a Luglio, in conseguenza all'evidente stress verificatosi dimostrato anche riduzione dell'evapotraspirazione del vigneto.

Nel 2007, invece, i flussi di evapotraspirazione (Figura 52) hanno raggiunto valori elevati già alla fine di giugno ($4.5 - 5 \text{ mm d}^{-1}$). Nel mese di Luglio, come osservato precedentemente, si è assistito ad un calo dell'attività evapotraspirativa del vigneto che ha raggiunto, in piena fase di stress, valori di 3 mm d^{-1} . Anche nel 2007, in questo momento dell'anno, l'azienda ha effettuato un intervento irriguo, per risollevare lo stato della coltura. L'intervento irriguo, ha portato ripristinato lo stato della coltura che si è riportato sui valori precedenti ($4 - 4.5 \text{ mm d}^{-1}$) e per poi ridursi nel mese di Agosto on abbondanti fenomeni di precipitazione. Complessivamente nel periodo vegetativo da Aprile a Ottobre, il consumo da parte della vite è stato di 423 mm, a fronte di una pari dotazione idrica derivata dal regime di precipitazioni, di 433 mm, per gran parte come conseguenza delle abbondanti precipitazioni verificatesi a fine estate. Questo può spiegare come, nonostante si sia verificato, come nel 2006, un periodo di carenza idrica nel mese di Luglio, questo sia stato efficacemente controllato dall'intervento irriguo ma soprattutto dalle intense precipitazioni verificatesi nel mese di Agosto.

3.5.5 Respirazione del suolo

La CO₂ respirata dal suolo rappresenta l'ultima fase del destino del carbonio del suolo. Lo studio della *Net Primary Production* (NPP) degli ecosistemi necessita, oltre alla misura dei flussi di evapotraspirazione della vegetazione, anche una misura reale del flusso di respirazione del suolo, principale causa della perdita di carbonio dagli ecosistemi terrestri (AMUNDSON, 2001).

I risultati ottenuti dalle misure del flusso di CO₂ del suolo mediante il sistema Licor LI-6400-09 permettono, attraverso l'utilizzo di modelli, di arrivare a conoscere quantità di carbonio persa annualmente per respirazione dal suolo. L'impostazione delle misure effettuate in vigneto ha cercato di studiare l'effetto della differente gestione del suolo tipica della viticoltura italiana: inerbimento permanente dell'interfila e diserbo localizzato sulla fila. Le misure, quindi, sono state effettuate su un suolo inerbito, preventivamente sfalcato, nel primo caso e nudo nel secondo caso. Le misure sono state effettuate durante tutta la stagione per cercare di ottenere delle misure in un *range* di temperature il più grande possibile, per arrivare ad una parametrizzazione adeguata del modello.

L'andamento dei flussi di respirazione di CO₂ dal suolo (Figura 53) mostra un andamento regolare durante la stagione in funzione della variazione del regime termico, principale fattore che influenza la respirazione del suolo, durante la stagione. Nella stagione 2006, caratterizzata da un inverno rigido, le prime misure condotte ad inizio stagione (metà febbraio), non hanno mostrato differenze significative tra il suolo inerbito e il suolo nudo ($0.5-0.6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), dimostrando come la crescita del cotico non fosse ancora iniziata. Con il passare della stagione si differenziano sempre di più i flussi

di CO₂ emessi dalle due diverse condizioni di suolo, raggiungendo entrambi un valore massimo nel mese di luglio: 9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (inerbito) e 7.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (terreno nudo), in corrispondenza del raggiungimento delle temperature massime stagionali. Con la graduale diminuzione delle temperature si assiste ad una riduzione anche nelle emissioni di CO₂ che ritornano sul *range* di inizio stagione, confermando le ridotte differenze tra le due diverse gestioni del suolo riscontrate ad inizio anno.

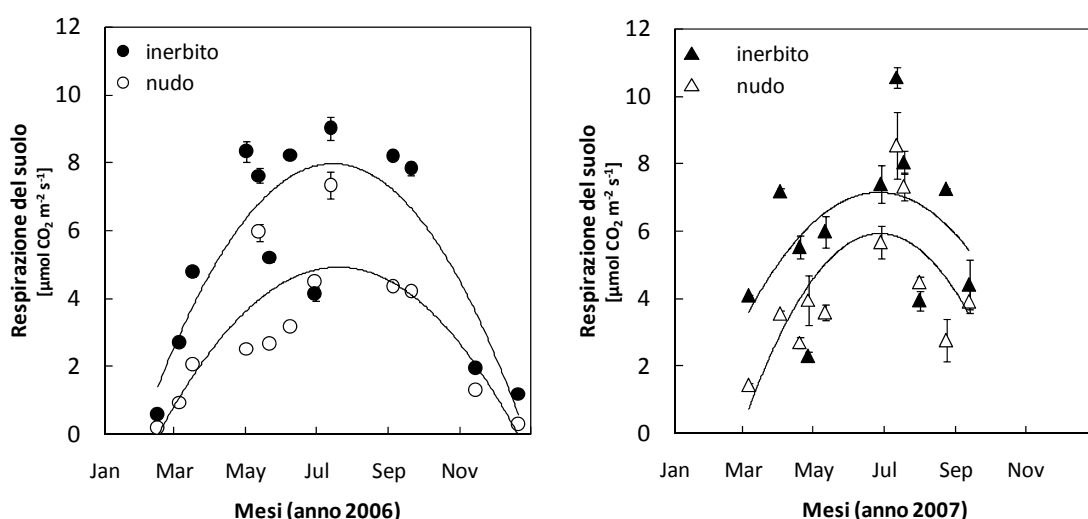


Figura 53 Flusso di respirazione di CO₂ dal suolo misurato nel 2006 (sx) e 2007 (dx). Effetto della respirazione di CO₂ in funzione della diversa gestione del suolo: inerbimento permanente nell'interfila (●); diserbo localizzato sulla fila (○) – le barre rappresentano l'errore standard.

Le misure condotte nella stagione 2007 (Figura 53), a conferma dell'anticipo osservato con un inizio anno caratterizzato da temperature abbondantemente sopra la media stagionale, mostrano flussi più elevati ad inizio stagione (primi di marzo) in cui appare evidente una differenziazione tra le due diverse gestioni del suolo: 4 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (inerbito) e 1.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (terreno nudo). Ancora una volta si assiste ad un andamento stagionale regolare della respirazione del suolo che raggiunge valori massimi

in corrispondenza delle massime temperature annuali nel mese di luglio con valori: 9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (inerbito) e 7.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (nudo).

3.5.5.1 Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura

Nota la relazione esistente tra la respirazione del suolo e la temperatura è stata analizzata la relazione tra i flussi di CO_2 , separatamente per il suolo inerbito e nudo, con la temperatura del suolo, misurata a 10 cm in prossimità della misura effettuata con il sistema LI-6400-09 (Figura 54) e con la temperatura dell'aria, acquisita in continuo dalla vicina stazione meteorologica (Figura 55).

3.5.5.1.1 Temperatura del suolo

L'andamento dell'efflusso di CO_2 nelle due stagioni è stato messo in relazione con la temperatura del suolo misurata a 10 cm nel punto di misura. I risultati ottenuti mostrano come esista una relazione di tipo esponenziale tra la respirazione e la temperatura del suolo (Figura 54). Osservando la stagione 2006 si osserva come a basse temperature la differenza tra il flusso di CO_2 emesso dal suolo inerbito e nudo sia abbastanza simile. A parità di temperatura del suolo infatti si osserva, ad inizio stagione ($T = 0-10^\circ\text{C}$), un aumento del flusso di CO_2 pari a $\sim 0.5-1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. In corrispondenza dell'aumento delle temperature si osserva un aumento esponenziale del flusso di CO_2 che, in corrispondenza di temperature giornaliere $> 20^\circ\text{C}$, mostra valori di respirazione di CO_2 del cotico pari circa al doppio di quelli misurati su terreno nudo. Nella stagione 2007 è possibile osservare lo stesso andamento esponenziale della risposta della respirazione alla temperatura del suolo sebbene non sia stato possibile

ottenere misure di respirazione del suolo a basse temperature riducendo il *range* di temperatura del suolo a 10-25°C, rispetto a 0-28°C nel 2006.

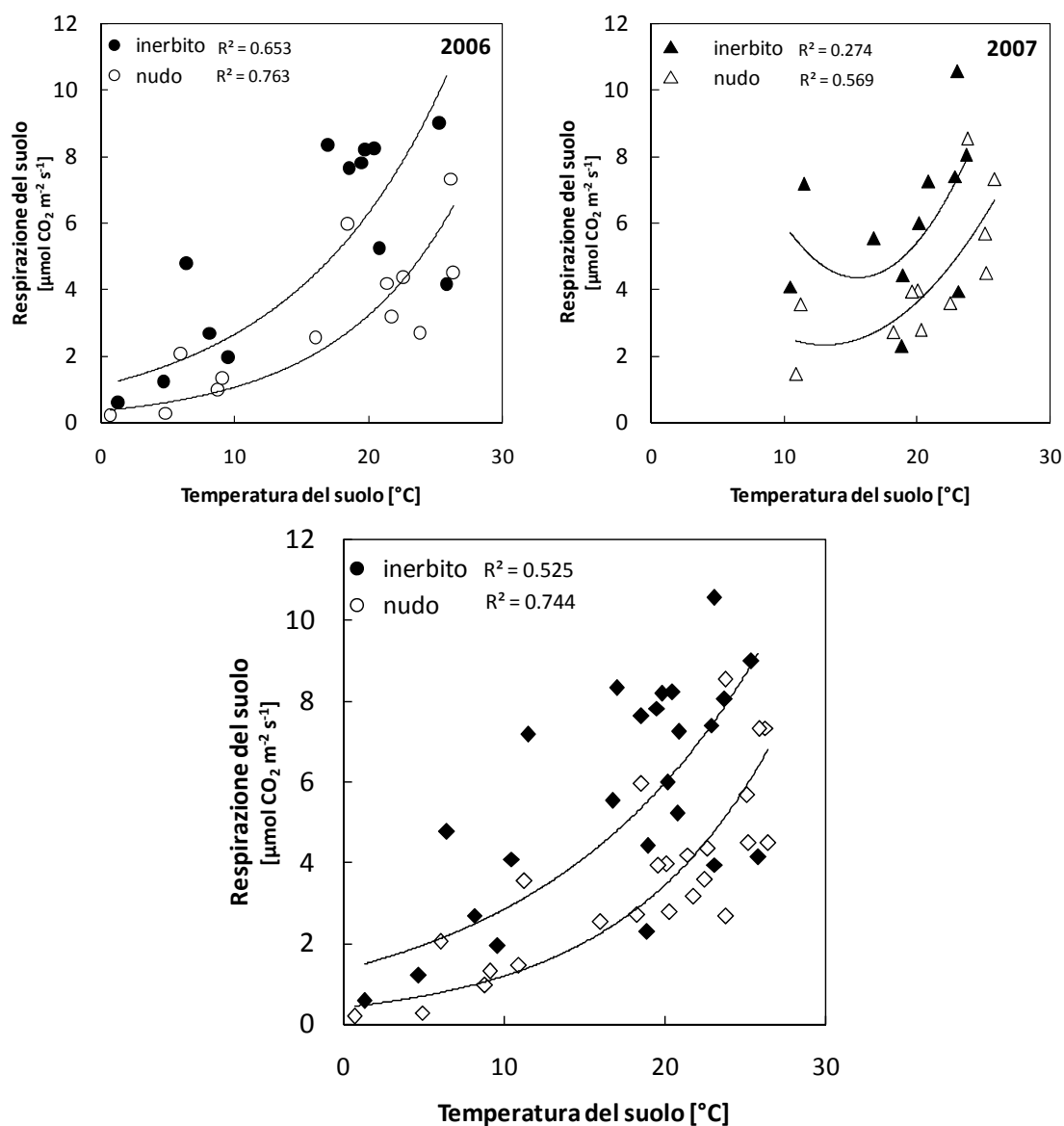


Figura 54 Relazione esponenziale tra respirazione e temperatura del suolo misurata nel 2006 (in alto-sx) e 2007 (in alto-dx) e complessivamente nelle due annate (in basso). Effetto della respirazione di CO_2 in funzione della diversa gestione del suolo: inerbimento permanente nell'interfila (●); diserbo localizzato sulla fila (○).

Combinando i dati ottenuti nelle due annate complessivamente, è possibile ottenere una buona relazione tra la respirazione del suolo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) in un *range* di temperature del suolo 0-28°C (Figura 54). La relazione è di tipo esponenziale per entrambi i tipi di suolo con equazione di regressione: suolo inerbito: **RespCO₂=1.358e^{0.074T_{soil}}** ($R^2=0.525$); suolo nudo: **RespCO₂=0.410e^{0.106T_{soil}}** ($R^2=0.744$).

3.5.5.1.2 Temperatura dell'aria

La necessità di conoscere l'ammontare annuo delle perdite di carbonio per respirazione del suolo dal metro quadrato di vigneto e calcolare così la $\text{NPP}=\text{GPP}-\text{Resp}$, ha imposto di mettere in relazione la respirazione del suolo con la temperatura dell'aria misurata in continuo dalla stazione meteorologica nel vigneto per poter utilizzare un modello esponenziale che mette in relazione la respirazione del suolo con la temperatura (LLOYD & TAYLOR, 1994). L'andamento della relazione tra l'efflusso di CO_2 dal suolo e la temperatura dell'aria appare evidentemente in sintonia con quello osservato per la temperatura del suolo (Figura 55). Dall'analisi complessiva dei dati ottenuti nelle due annate in funzione del *range* di temperatura dell'aria osservato in campo, è stato possibile parametrizzare il modello esponenziale di risposta (LLOYD & TAYLOR, 1994) ed ottenere i parametri *A* e *B* dell'equazione esponenziale [eq. 25] del modello con cui stimare il flusso annuale di carbonio dal metro quadrato di vigneto. Il *fitting* del modello sui dati misurati è stato fatto separatamente mediante regressione ai minimi quadrati per il suolo nudo ed inerbito ottenendo le seguenti equazioni di regressione ($R^2 > 0.5$):

Suolo nudo	$R = 0.547 * e^{0.069 * T_{air}}$	$\text{SE} = 0.221 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Suolo inerbito	$R = 1.959 * e^{0.043 * T_{air}}$	$\text{SE} = 0.35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

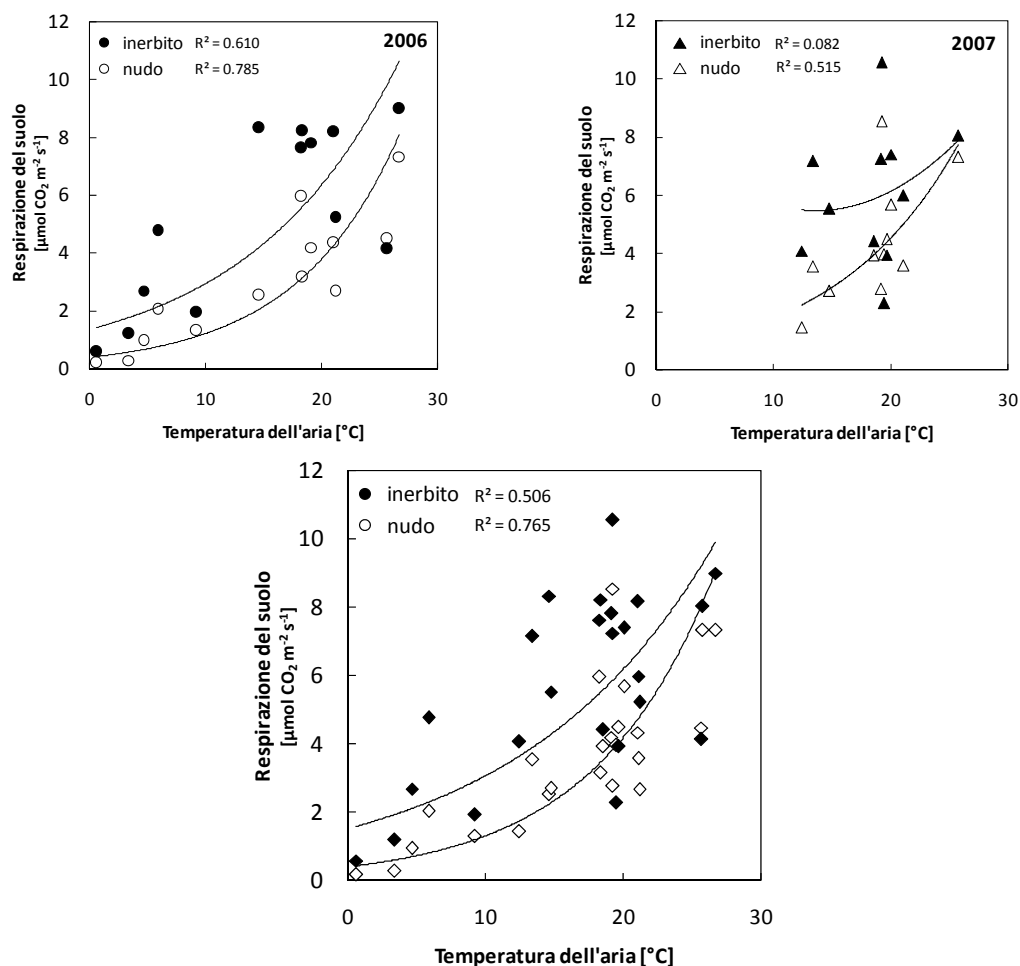


Figura 55 Relazione esponenziale tra flusso di respirazione del suolo e temperatura dell'aria misurata nel 2006 (in alto-sx) e 2007 (in alto-dx) e complessivamente nelle due annate (in basso). Effetto della respirazione di CO_2 in funzione della diversa gestione del suolo: inerbimento permanente nell'interfila ($\bullet$); diserbo localizzato sulla fila ($\circ$).

Utilizzando le relazioni ottenute attraverso il *fitting* del modello, sui dati di misurati in campo, è stato possibile stimare il flusso di respirazione ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) per le due annate (Figura 56) partendo dai dati di temperatura dell'aria raccolti ogni 30' dalla stazione meteorologica installata in vigneto. I valori ottenuti dalla stima risultano simili in valore con quelli ottenuti in altri studi trovati in letteratura sempre sulla

respirazione del suolo in vigneto: su suolo lavorato (CARLISLE *ET AL.*, 2006) e su suolo inerbito.

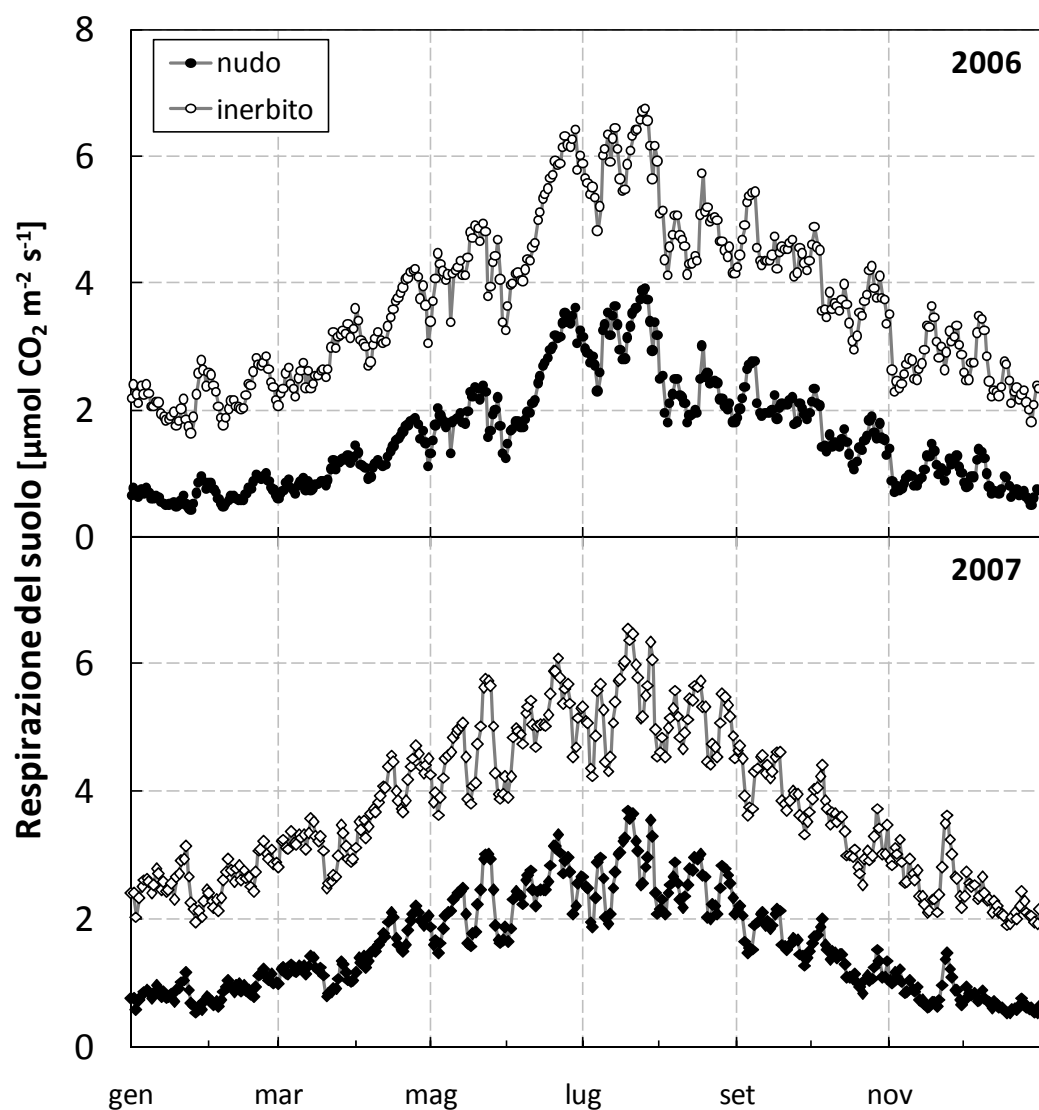


Figura 56 Andamento stagionale della respirazione del suolo per il sito di Negrizia stimato sulla base dei dati di temperatura media giornaliera dell'aria con il modello (LLOYD & TAYLOR, 1994). Confronto tra annate: 2006 (in alto) e 2007 (in basso). Confronto tra la gestione del suolo: inerbimento nell'interfila (●); diserbo localizzato sulla fila (○).

Dai dati di respirazione del suolo giornaliera ottenuti ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) è stato possibile calcolare, su base stechiometrica, la perdita di carbonio per respirazione del suolo nel sito di Negrisia nelle due annate (Figura 57). Complessivamente nel sito di Negrisia si può così effettuare una stima della perdita annuale di carbonio per respirazione del suolo riferita al metro quadrato di vigneto. In particolare non ci differenze significative tra le due annate e complessivamente un metro quadro di vigneto ha perso $0.6 \text{ Kg C anno}^{-1}$ (suolo nudo) e $1.4 \text{ Kg C anno}^{-1}$ (suolo inerbito).

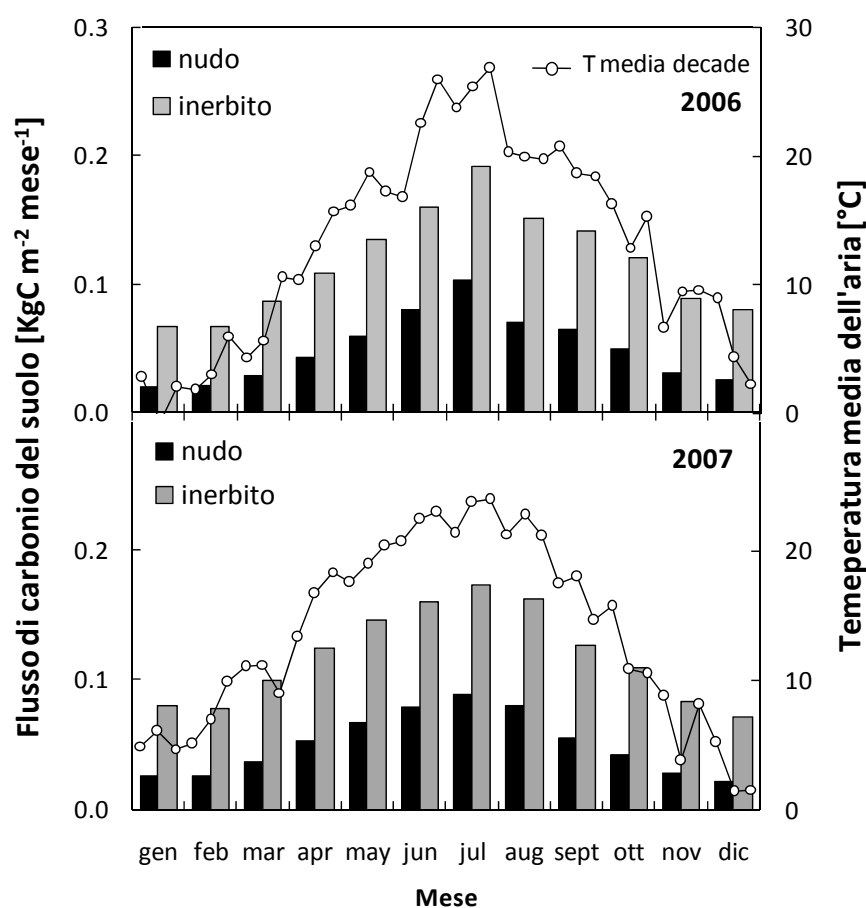


Figura 57 Andamento stagionale della temperatura media decadale e delle perdite mensili di *C* per respirazione del suolo per il sito di Negrisia stimato con il modello (LLOYD & TAYLOR, 1994). Confronto tra annate: 2006 (in alto) e 2007 (in basso). Confronto tra la gestione del suolo inerbimento nell'interfila e diserbo localizzato sulla fila.

Conoscendo le distanze di impianto e poiché il vigneto di Negrisia ha un interfila di 2.5 m, per 1 m diserbata ed per i restanti 1.5 m è inerbita, è possibile considerare il metro quadrato di vigneto per il 60% inerbito e per il restante 40% diserbato. Sulla base di questa proporzione l'ettaro di vigneto di Negrisia perde una quantità pari a $\sim 10.8 \text{ t C anno}^{-1}$ per respirazione del suolo.

3.6 TELERILEVAMENTO – SCALA DI VIGNETO

I dati ottenuti dalla rete satellitare MODIS che, in collaborazione con la rete mondiale di monitoraggio dei flussi di materia (FLUXNET), a cui il sito di Negrisia è iscritto, ha fornito una serie di prodotti pre-calcolati dalla NASA, hanno permesso di confrontare i dati di crescita, ripartizione e attività fotosintetica ottenuti alle scale minori (fogliare, *canopy*). In particolare questo accordo FLUXNET-MODIS ha fornito, come contributo alla validazione dei suoi prodotti, delle immagini satellitari centrate sulla torre di misura di *eddy covariance* del nostro sito di studio. Il *dataset* a disposizione per il sito di Negrisia, seppur permetta di ottenere dati telerilevati centrati sul sito sin dal 2000, anno di stipulazione dell'accordo, è attualmente oggetto di revisione ed rielaborazione. Per questo motivo non è stato ancora possibile confrontare i dati misurati in campo con quelli tele rilevati nelle annate 2006 e 2007, ma si è potuto effettuare uno studio “a posteriori” per le annate dal 2000 al 2005 che risultano essere invece disponibili.

Le immagini satellitari acquisite negli anni dai due satelliti MODIS (TERRA ed AQUA) hanno una risoluzione spaziale variabile, a seconda della lunghezza d'onda, da 250 m - 500 m - 1 km. Le immagini ottenute dal sensore MODIS sono state calibrate

centrando il i rilievi e le elaborazioni sulla stazione di Negrisia permettendo quindi di ottenere un *pixel*, vista la notevole estensione ed omogeneità del sito, davvero rappresentativo del vigneto. I dati di riflettenza calcolati hanno permesso, mediante l'uso di algoritmi di calcolo standard, di fornire gratuitamente in rete alcuni prodotti specifici per il sito di Negrisia, in particolare: Indice di Area Fogliare (**LAI**); Indici di vegetazione: *Normalized Difference Vegetation Index* (**NDVI**) e il successivo *Enhanced Vegetation Index* (**EVI**); la Produzione Primaria Netta (**GPP** - *Gross Primary Production*) e la Fotosintesi Netta (**PSN** – *Net Photosynthesis*).

3.6.1 Indice di Area Fogliare - LAI

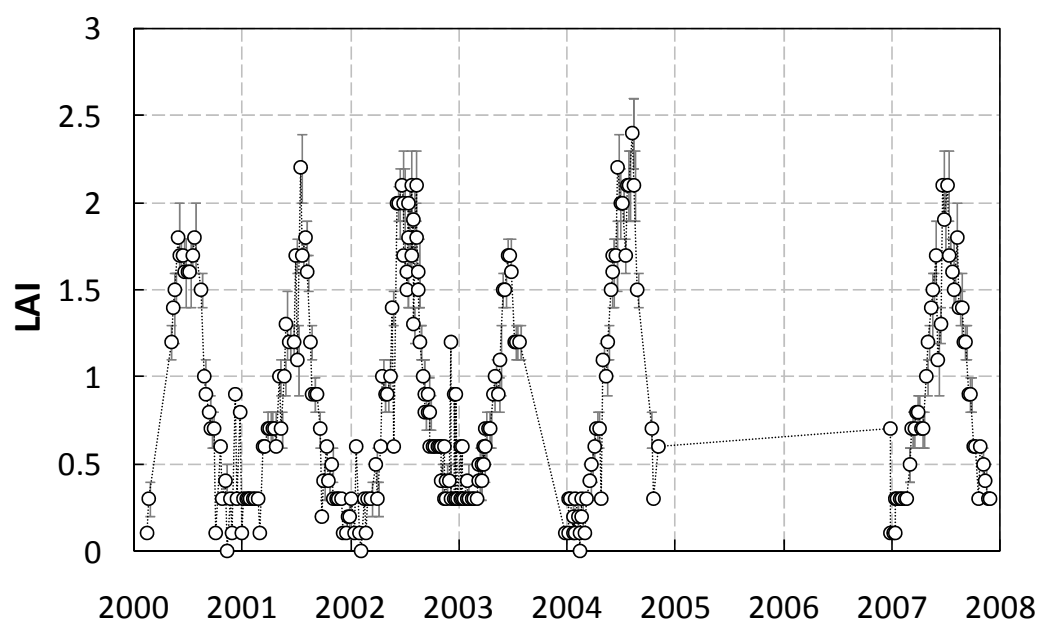


Figura 58 Andamento annuale del LAI misurato dalla piattaforma satellitare MODIS.

Il LAI misurato a Negrisia (Figura 58) con risoluzione spaziale di 250 m, e quindi perfettamente centrato sul *footprint* del vigneto, ha raggiunto i valori massimi di 2 - 2.5

nelle annate dal 2000 al 2007 mostrando una ottima convergenza con i dati misurati in campo.

3.6.2 Indici di Vegetazione Multispettrali

Nel sito di Negrisia sono stati valutati due indici di vegetazione, **NDVI** e **EVI** (Figura 59 - 60) misurati dal sensore MODIS con risoluzione spaziale di 250 m. Questi indici sono stati ampiamente utilizzati in quanto ritenuti buoni indicatori del vigore della vegetazione. Dai dati ottenuti è infatti osservabile come il valore dell'indice vari in rapporto al LAI presente durante la stagione raggiungendo i valori massimi ($\text{NDVI}=0.8 - 0.9$; $\text{EVI} = 0.6 - 0.7$) nei mesi centrali dell'anno, in presenza della maggiore superficie fogliare del vigneto.

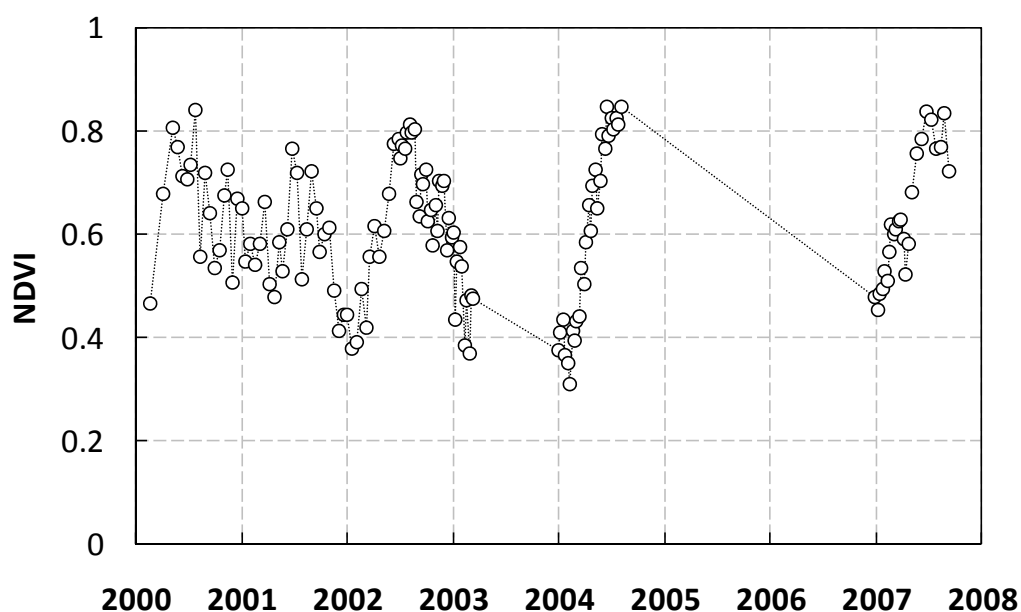


Figura 59 Andamento annuale dell'indice di vegetazione NDVI nel sito di Negrisia misurato dalla piattaforma satellitare MODIS.

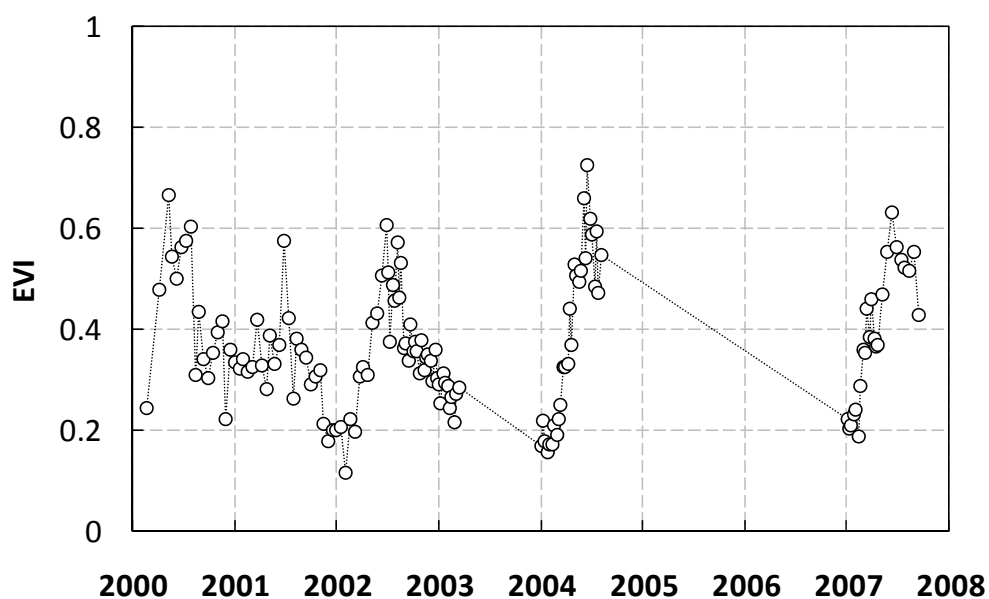


Figura 60 Andamento annuale dell'indice di vegetazione NDVI nel sito di Negrizia misurato dalla piattaforma satellitare MODIS.

3.6.3 Misura della Fotosintesi – GPP; PSN

Dai dati di riflettanza raccolti mediante l'analisi d'immagine satellitare centrata sul sito di Negrizia, il sensore MODIS è in grado di stimare la Produttività Primaria Lorda (**GPP**) e la Fotosintesi Netta (**PSN**) sulla base di un algoritmo che utilizza alcuni prodotti MODIS precedentemente calcolati: Indice di Area Fogliare (LAI), la frazione di Radiazione Fotosinteticamente Attiva ($fPAR$) e la riflettanza superficiale della vegetazione. Essendo questa volta il prodotto MODIS GPP/PSN rilevato con una risoluzione spaziale di 1 km, non ci si aspetta la convergenza ottenuta con il prodotto LAI. Di seguito vengono presentati i risultati dell'elaborazione del prodotto MODIS: GPP/PSN sul sito di Negrizia.

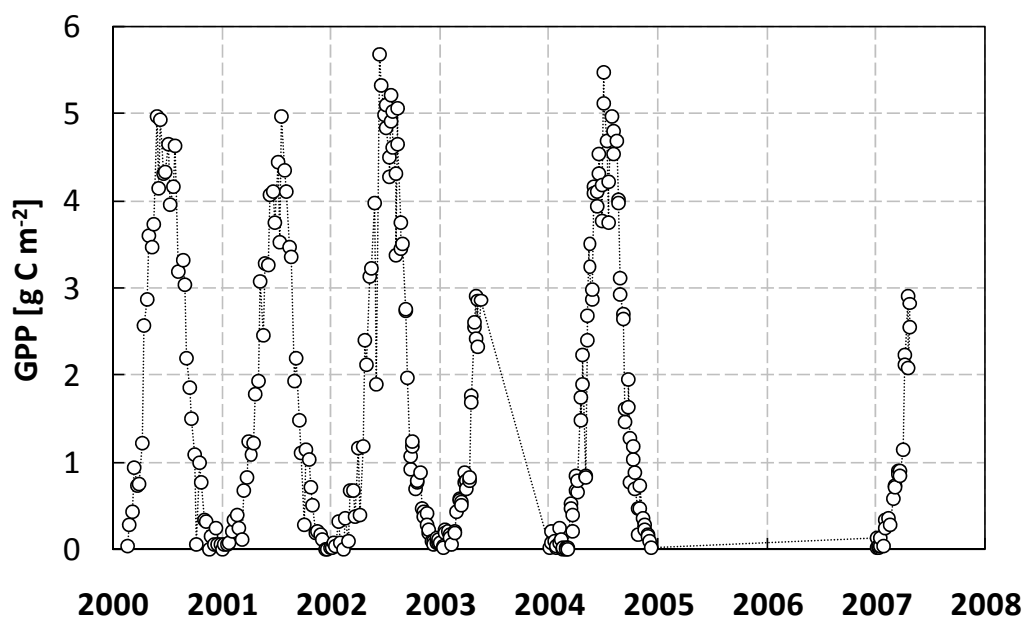


Figura 61 Andamento annuale della *Gross Primary Production* (GPP) misurata da MODIS su base giornaliera ogni 8 giorni nel sito di Negrisia.

L'andamento della Produzione Primaria Lorda (*Gross Primary Production* - GPP) del sito di Negrisia (Figura 61) è risultata abbastanza costante nel tempo (considerando solo le annate complete nel *dataset*: 2000, 2001, 2002, 2004), con dei valori massimi annuali di 5 – 5.5 g C m⁻².

L'andamento della Fotosintesi Netta (*Net Photosynthesis*- PSN) del sito di Negrisia (Figura 62) è risultata ben correlata nel tempo con la GPP (considerando solo le annate complete nel *dataset*: 2000, 2001, 2002, 2004), con dei valori massimi annuali di 4 – 4.5 g C m⁻² che stanno ad indicare la perdita di carbonio da parte del sistema per respirazione.

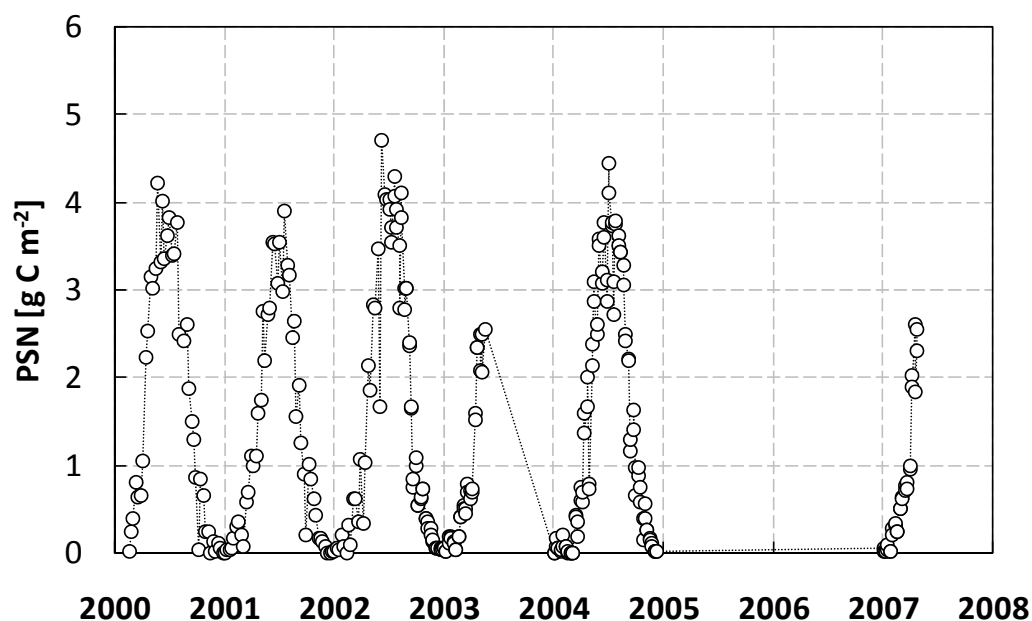


Figura 62 Andamento annuale della *Net Photosynthesis* (PSN) misurata da MODIS su base giornaliera ogni 8 giorni nel sito di Negrisia.

In particolare, prendendo in considerazione una annata completa come il 2002, risultata simile per quanto riguarda il LAI a quella del 2006 e del 2007 oggetto di studio, è stato possibile studiare l'andamento annuale del bilancio del carbonio misurato per via remota (Figura 63). In particolare è possibile osservare l'andamento annuale della GPP e della PSN misurata dal sensore MODIS con una risoluzione spaziale di 1 km. L'andamento della GPP giornaliera su base annuale mostra i valori massimi di Produzione Primaria in corrispondenza dei mesi centrali della stagione, raggiungendo valori di $6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Di conseguenza si osserva l'andamento della Fotosintesi Netta (PSN) del sito di Negrisia che rappresenta la quota di GPP al netto delle perdite per respirazione. È possibile osservare come, fino al mese di Maggio, non ci sono perdite significative per respirazione da parte del sistema. Dal mese di Maggio (germogliamento) in poi invece si ha uno scostamento sensibile della curva di GPP

rispetto alla PSN in seguito alla crescita della vite ed del cotico che è massima nei mesi centrali della stagione ($PSN_{max} = \sim 4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

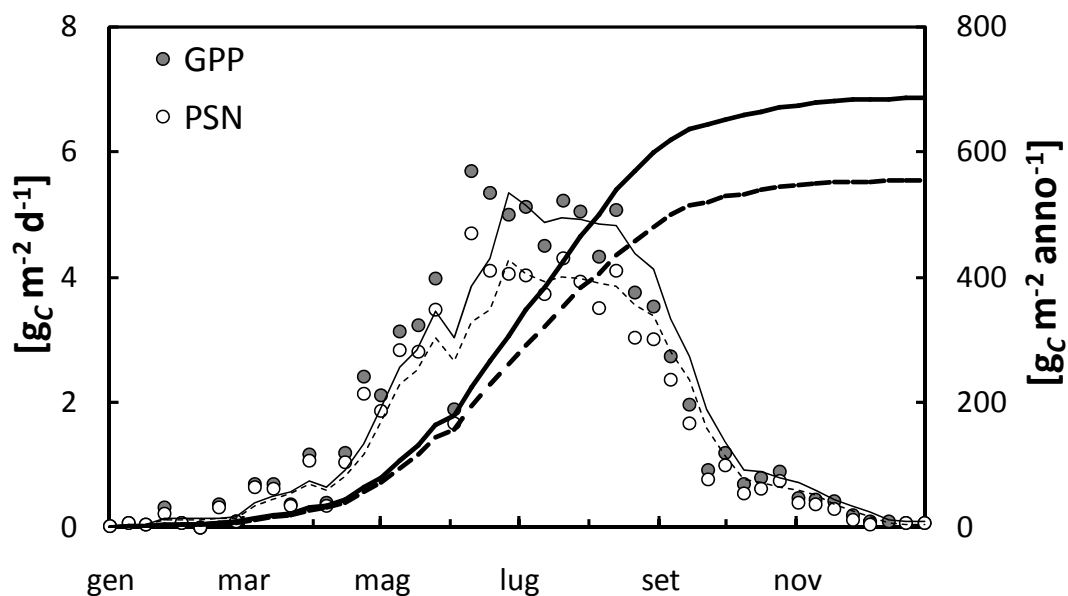


Figura 63 Confronto tra GPP e PSN giornaliera nell'anno 2002 per il sito di Negrisia. Analisi dell'andamento dell'accumulo di C sul metro quadrato di vigneto tra GPP e PSN. L'area tra le due curve rappresenta la quota di C perso dal sistema per respirazione.

Osservando l'accumulo a fine stagione della GPP e della PSN giornalieri si arriva a stimare, per differenza tra la GPP e la PSN, la quantità di carbonio persa dal sistema per respirazione nel 2002. In particolare a fronte di una GPP annuale di $685 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$ il sistema dimostra una Fotosintesi Netta (PSN) di $553 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$. Il rapporto tra le due curve di accumulo rappresenta la quota parte di GPP persa dal sistema per respirazione pari a: $685 - 553 = \sim 132 \text{ g C m}^{-2} \text{ anno}^{-1}$.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti hanno consentito di arrivare ad una caratterizzazione approfondita del sistema vigneto, dettagliata nei flussi di energia, acqua e carbonio che lo interessano e che sono alla base della sua produttività.

L'utilizzazione di un approccio multi – scala ha consentito una validazione incrociata dei dati ottenuti ponendo le basi per una futura modellizzazione del sistema vigneto e della sua funzionalità, fondata non su relazioni empiriche ma sulla conoscenza dei processi fisici e fisiologici fondamentali. L'applicazione del modello meccanicistico di fotosintesi e scambio gassoso fogliare proposto da Farquhar, ha permesso di interpretare efficacemente sia l'evoluzione stagionale della capacità fotosintetica che la risposta agli stress ambientali. Le misure micrometeorologiche condotte a scala di parcella hanno consentito il monitoraggio continuo dei flussi di energia, evapotraspirazione e anidride carbonica nei due anni di osservazione.

Nel contesto in cui la prova si è svolta i consumi idrici del vigneto sono stati in media di poco superiori ai 400 mm (2007) nel periodo vegetativo da aprile a ottobre. L'accumulo di carbonio misurato nei due anni è risultato rilevante, nell'ordine 8-900 g C m⁻² dimostrando, anche per questa coltura, una notevole capacità di sequestro. Gli accumuli osservati per via micrometeorologica concordano con quelli riscontrati in via diretta mediante le misure distruttive, al netto delle incertezze legate alla stima della rizodeposizione, la crescita del legno e l'accumulo di sostanza organica nel terreno.

Se l'agricoltura è in genere considerata una sorgente di anidride carbonica, i dati ottenuti hanno invece dimostrato che il vigneto è un *sink* significativo di CO₂, anche al netto della produzione asportata. È evidente che questo risultato è legato anche alla attività del cotico erboso che rappresenta un importante elemento di protezione della sostanza organica accumulata nel terreno. Sulla base di questi dati il ruolo virtuoso dell'assorbimento della CO₂ potrebbe anche essere migliorato sviluppando anche tecniche ottimali per garantire una corretta stabilizzazione dei residui di potatura.

È stata ottenuta anche un'ottima convergenza tra i risultati misurati a terra e quelli ricavati da misure di telerilevamento satellitare; in particolare i prodotti dello spettroradiometro MODIS hanno consentito stime precise del Leaf Area Index, della radiazione assorbita e anche della produttività primaria netta del vigneto. Questi risultati aprono una prospettiva importante per la regionalizzazione dei processi e dei bilanci misurati.

Benché la ricerca non abbia considerato gli aspetti più strettamente qualitativi della produzione, essa ha consentito di raccogliere il primo dataset utile per lo studio stagionale del bilancio del carbonio del vigneto, dimostrando come questa coltura, se correttamente gestita, possa contribuire meglio delle altre colture agrarie, alla mitigazione dell'aumento della concentrazione dei gas serra. Questo risultato ci sembra strategico e innovativo per la viticoltura, contribuendo ad una sua ulteriore valorizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R. PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56.
- AMERINE, M. A., WINKLER, A.J. (1944). Composition and quality of musts and wines of California grapes, *Hilgardia*, 15:493-675.
- ANDERSON, D.E., VERMA, S.B., ROSENBERG, N.J. (1984). Eddy correlation measurements of CO₂, latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface. *Boundary-Layer Meteorol.* 29:167-183.
- AUBINET, M., GRELLÉ, A., IBROM, A., RANNIK, Ü., MONCRIEFF, J., FOKEN, T., KOWALSKY, A.S., MARTIN, P.H., BERBIGIER, P., BERNHOFER, CH., CLEMENT, R., ELBERS, J., GRANIER, A., GRÜNWALD, T., MORGENSTERN, K., PILEGAARD, K., REBMANN, C., SNIJDERS, W., VALENTINI, R., VESALA, T. (2000). Estimates of the annual carbon net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Adv. Ecol. Res.* 30:113-175.
- BALDOCCHI D., VALENTINI R., RUNNING S.R., OECHEL W., DAHLMAN R. (1996). Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.*, 2, 159-168.
- BALDOCCHI, D., FINNINGAN, J., WISON, K., PAW, U.K.T., FALGE, E. (2000). On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary. Layer. Meteor.* 96:257-291.
- BALDOCCHI, D., HICKS, B.B., MEYERS, T.P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gas with micrometeorological methods. *Ecology* 69:1331-1340.

- BALDOCCHI, D.D. AND K.B.WILSON. (2001). Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. *Ecol. Mod.* 142:155-184.
- BAUMGARTNER, A. (1969). Meteorological approach to the exchange of CO₂ between atmosphere and vegetation, particularly forests stands. *Photosynthetica* 3:127-149.
- BETTS R.A. (2001). Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing. *Atmos. Sci. Lett.*, 1.
- BJÖRKMAN, O., DEMMIG, B. (1987). Photon yield of O₂ evolution chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 170:489-504.
- BLACK T.A., CHEN W.J., BARR A.G., ARAIN M.A., CHEN Z., NESIC Z. , HOGG E.H., NEUMANN H.H. (2000). Increased carbon sequestration by a boreal deciduous forest in years with a warm spring. *Geophys. Res. Lett.*, 27 , 9, 1271.
- BLACKMAN, F.F. (1985). Optima and limiting factors. *Ann. Bot.* 19:281-295.
- BONHOMME, R. (2000). Based and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*. 13:1-10.
- BOUYOUCOS, G. J. (1936). Directions for Making Mechanical Analysis of Soils by the Hydrometer Method. *Soil Sci.* 42(3).
- BROOKS, A., FARQUHAR, G.D. (1985), Effect of temperature on the CO₂/O₂ specificity of ribulose-1.5-biphosphate carboxylase/oxygenase and the rate of respiration in the light: estimates from gas exchange experiments on spinach. *Planta* 165: 397-406.
- BROWN M.E., ARNOLD D.L. (1998). Land surface-atmosphere interactions associated with deep convection in Illinois. *Int. J. Climatol.*, 18, 1637-1653.
- CARLISLE, E.A., STEENWERTH, K.L., SMART, D.R. (2006). Effects of Land Use on soil respiration: conversion of oak woodlands to vineyards. *J. Environ. Qual.* 35:1396-1404.

- CARMO VASCONCELOS M.C.C., KOBLET, W. (1991). Influence of partial defoliation on gas exchange parameters and chlorophyll content of field grown grapevines. Mechanism and limitations of the compensation capacity. *Vitis* 30:129-141.
- COLLATZ, G.J., BERRY, J.A., FARQUHAR, G.D., PIERCE, J. (1990). The relationship between the Rubisco reaction mechanism and models of photosynthesis. *Plant Cell and Environ.*, 13:219-225.
- COX, P.M., BETTS, R.A., JONES, C.D., SPALL, S.A., TOTTERDELL, I.J. (2000). Acceleration of Global Warming due to a carbon-cycle feed-back in a coupled climate model. *Nature*, 408:184-7.
- DAAMENA C.C., DUGASA W.A., PRENDERGASTA P.T., JUDDA M.J. AND MCNAUGHTON K.G. (1999). Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. *Agric. For. Meteorol.*, 93, 3, 171-183.
- DE PURY D.G.G, FARQUHAR, G.D. (1997) Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant Cell Environ.* 20:537-557
- DE SOUZA, C, MAROCO, J.P., DOS SANTOS, T.P., RODRIGUES, M., LOPES, L., PEREIRA, C., JOAO S., CHAVES, M.M. (2003). Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. *Agr. Ecosys. Environ.* 106(2-3): 261-274.
- DENMEAD, O.T. (1969). Comparative micrometeorology of a wheat field and a forest of *Pinus radiata*. *Agric. For. Meteorol.* 6:357-371.
- DESJARDINS, R.L., BUCKLEY, D.J., ST. AMOUR, G. (1984). Eddy flux measurements of CO₂ above corn using a microcomputer system. *Agric. Meteorol.* 32:257-265.
- DIETRICH S., SANTORELLI E., SAVIN E., (2004): Uso dei satelliti per il monitoraggio di parametri utili alla modellistica in agricoltura. III Giornate di Studio Metodi Numerici, Statistici e Informatici nella Difesa delle Colture Agrarie e delle Foreste: Ricerca e Applicazioni pp. 10-14

- DOWNTON, W.J.S., GRANT, W.J.R., LOVEYS, B.R., (1987). Diurnal changes in the photosynthesis of field-grown grapevines. *New Phytologist*, 105(1): p. 71-80.
- ESCALONA, J., DELAGADO, E., MEDRANO, H. (1997). Irrigation effect of grapevine photosynthesis. *Acta Hort.* 449:449-455.
- ESWARAN H., VAN DEN BERG E. & REICH P. (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. J. Am.* 57:192-194.
- Evans, J.R. (1987). The relationship between electron transport components and photosynthetic capacity in pea leaves grown at different irradiances. *Aust. J. Plant Physiol.* 14:157-170.
- FALKOWSKI, P., SCHOLES, R.J., BOYLE, E., CANADELL, J., CANFIELD, D., ELSEY, J., GRUBER, N., HIBBARD, K., HÖGBERG, P., LINDER, S., MACKENZIE, F.T., MOORE III, B., PEDERSEN, T., ROSENTHAL, Y., SEITZINGER, S., SMETACEK, V., STEFFEN, W. (2000). The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290:291-296.
- FANG, C., MONCRIEFF, J.B. (2001). The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biol. Biochem.* 33:155-165.
- FARAZDAGHI, H., EDWARDS, G.E. (1988a) A mechanistic model for photosynthesis based on the multisubstrate ordered reaction of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase. *Plant Cell and Environ.*, 11:789-798.
- FARAZDAGHI, H., EDWARDS, G.E. (1988b) A model for photosynthesis and photorespiration in C₃ plants based on the biochemistry and stoichiometry of the pathways. *Plant Cell and Environ.*, 11:799-809.
- FARAZDAGHI, H., EDWARDS, G.E. (1992). The co-limiting and mono-limiting theories of photosynthesis and photorespiration in C₃ plants. (Abst. no. 49) *Plant Physiol.* 99:S-p 9.

- FARQUHAR, G.D., (1980). Models of integrated photosynthesis of cells and leaves. Phil. Trans. R. Soc Lond.. 323:357-367.
- FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER S., BERRY, J.A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149:78-90.
- FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER S., BERRY, J.A. (2001) Models of photosynthesis. *Plant Physiol.* 125:42-45
- FARQUHAR, G.D., VON CAEMMERER, S. (1982). Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. *Physiological Plant Ecology*. LANGE, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.B., ZIEGLER, H. eds. *Encycl. Plant Physiol. (NS) Vol. 12B*.
- FERRAR, P.J., OSMOND, C.B. (1986). Nitrogen supply as a factor influencing photoinhibition and photosynthetic acclimation after transfer of shade grown *Solanum dulcamara* to bright light. *Planta* 168:563-570.
- FIELD, C.B., GAMON, J.A., PENUELAS, J.(1995). Remote Sensing of Terrestrial Photosynthesis. In: "Ecophysiology of Photosynthesis". Eds. Schulze, E.-D. and Caldwell, M.M. Springer, pp. 511-527.
- FLEXAS, J., BOTA, J., ESCALONA, J. M., SAMPOL, B., MEDRANO, H. (2002) Effects of drought on photosynthesis in grapevines under field conditions: an evaluation of stomatal and mesophyll limitations. *Funct. Plant Biol.* 29: 461-471.
- FOKEN, T., WICHURA, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agric. For. Meteorol.* 78:83-105.
- GHASHGHAIE, J., CORNIC, G. (1994). Effect of temperature on partitioning of photosynthetic electron flow between CO₂ assimilation and O₂ reduction and on the CO₂/O₂ specificity of Rubisco. *Plant Physiol.* 143: 643-650.
- GUO LB AND GIFFORD RM (2002) Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Glob.Ch. Biol.* 8:345-360.

- HALL, A.E. (1979) A model of leaf photosynthesis and respiration for predicting carbon dioxide assimilation in different environments. *Planta*, 143:299-316.
- HALL, D.O., SCURLOCK, J.M.O., BOLHÀR-NORDENKAMPF, H.R., LEEGOOD, R.C., LONG, S.P. (1993). Photosynthesis and Production in a changing environment. A field and laboratory manual (Chapman & Hall eds.).
- HALL, F. G., TOWNSHEND, J.R.G., ENGMAN, E.T. (1995). Status of remote sensing algorithms for estimation of land surface parameters. *Remote Sens. Environ.*, 51:138–156.
- HANSON, P.J., WULLSCHLEGER, S.D., BOHLMAN, S.A., TODD, D.E. (1993). Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from an upland oak forest. *Tree Physiol.* 13:1-15.
- HARLEY, P.C, TENHUNEN, J.D. (1991). Modelling the photosynthesis response of C₃ leaves to environmental factors. *Modelling Crop Photosynthesis – from Biochemistry to Canopy*. CSSA special Publication 19:17-38.
- HARLEY, P.C., SHARKEY, T.D. (1991). An improved model of C₃ photosynthesis at high CO₂: Reversed O₂ sensitivity explained by lack of glycerate re-entry into the chloroplast. *Photosyn. Res.*, 27: 169-178.
- HARLEY, P.C., THOMAS, R.B., REYNOLDS, J.F., STRAIN, B.R. (1992). Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO₂. *Plant , Cell Environ.* 15:271-282.
- HENDERSON-SELLERS A., PITMAN, A.J. (1997). Land-surface schemes for future climate models: Specification, aggregation, and heterogeneity. *J. Geophys. Res.*, 97:2687–2696.
- HSIAO, T.C., (1990). Measurements of plant water status. *Irrigation of Agricultural Crops – Agron. Monog.* 30:243-280.
- HUETE, A.R., LIU, H.O., VAN LEEUWEN, W., DIDAN, K. (1997). The use of vegetation indices in forested regions: issues of linearity and saturation, *Proceedings of*

- IGARSS '97—International Geoscience and Remote Sensing Seminar, ESA Publications, Noordwijk, pp. 1966–1968.
- HUNTER, J.J., VISSER, J.H. (1988). The effect of partial defoliation, leaf position and development stage of the vine on the photosynthetic activity of *Vitis vinifera* L. cv. Cabernet sauvignon. *South Africa J. of Enol. Vitic.* 10:67-73.
- IOUNE, I. (1989). An aerodynamic measurement of photosynthesis over a paddy field. *Proc. Seventh Japan National Congress of Applied Mechanics*: 211-214.
- JANSSENS, I.A., EPRON, D., DORE, S., LANKREIJER, H., BUCHMANN, N., LONGDOZ, B., BROSSAUD, J., MONTAGNANI, L. (2002). Climatic influence on seasonal and spatial differences in soil CO₂ efflux. In: VALENTINI, R. eds. *Canopy Fluxes of Energy, Water and Carbon Dioxide on European Forests*. Berlin:Springer-Verlag.
- JARVIS, P.G., JAMES, G.B., LANDSBERG, J.J. (1976). Coniferous forest. In: “Vegetation and the atmosphere”, Ed J.L. Monteith, Vol.2 Academic press.
- JARVIS, P.G., STANDFORD, A.P. (1985). The measure of carbon dioxide in air, in *Instrumentation for Environmental Physiology* (B. Marshall and F.Woodward, eds), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 29.58.
- JENSEN, L.S., MUELLER, T., TATE, K.R., ROSS, D.J., MAGID, J., NIELSEN, N.E. (1996). Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: a comparison of two chamber methods. *Soil Biol. Biochem.* 28(10-11): 1297-1306.
- JENSEN, R.G. (2000) From the cover: Activation of Rubisco regulates photosynthesis at high temperature and CO₂. *PNAS* 97(24):12937-12938.
- JESSEN-HANSEN, H. & KJELDAHL, J. (1932). In: Meisen, V. *Prominent Danish Scientists through the Ages*. University Library of Copenhagen 450th Anniversary. Levin & Munksgaard, Copenhagen. pp. 169-172
- JOBBÁGY EG AND RB JACKSON. (2000) The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.*, 10:397-398.

- JOHNSON, L.F., PIERCE, L.L. (2004). Indirect measurements of Leaf Area Index in California North Coast Vineyards. *Hort. Sci.* 39(2):236-238.
- JONES, H.G. (1990). Plant water relations and implications for irrigation scheduling. *Acta Hort.* 278:67-76.
- JORDAN, D.B., OGREN, W.L. (1984). The CO₂/O₂ specificity of ribulose 1.5 biphosphate carboxylase/oxygenase. Dependence on ribulosebiphosphate concentration, pH and temperature. *Planta* 161: 308-313.
- JUSTICE, C. *et al.* (1998): The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 36, 1228-1249.
- KADUK, J., M. HEIMANN (1997). Assessing the Climate Sensitivity of the Global Terrestrial Carbon Cycle Model SILVAN. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*. MS No.: OA 13:2-048
- KAIMAL, J.C., FINNINGAN, J.J. (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows*. Oxford University Press. New York.
- KAUFMAN, Y.J., AND TANRÈ, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 30:261–270.
- KIRSCHBAUM, M.U.F., KUPPERS, M., SCHNEIDER, H., GIERSCHE, C., NOE, S. (1998). Modelling photosynthesis fluctuating light with inclusion of stomatal conductance, biochemical activation and pools of key photosynthetic intermediates. *Planta* 204: 14-26.
- KU, S.B., EDWARDS, G.E. (1977) Oxygen inhibition of photosynthesis. II. Kinetic characteristic as affected by temperature. *Plant Physiol.* 59:591-599
- LAISK, A. (1993) Mathematical modelling of free-pool and channelled electron transport in photosynthesis: evidence for a functional supercomplex around photosystem I. *Proc R SOC Lond B* 251:243-251

- LEE, X. (1998). On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 91:39-49.
- LEMON, E.R. (1960). Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. *Agron. J.* 52:697-703.
- LI-COR INC. (2005). LI-6400-09 Soil Flux Chamber Instruction Manual, Lincoln Nebraska USA.
- LI-COR INC. (2005). Using the LI-6400 version 5.3. LI-COR Inc., Lincoln Nebraska USA.
- LLOYD J., SHIBISTOVA O., ZOLOTOUKHINE D., KOLLE O., ARNETH A., WIRTH C., STYLES J.M., TCHEBAKOVA N.M., SCHULZE E.D. (2002). Seasonal and annual variations in the photosynthetic productivity and carbon balance of a central Siberian pine forest. *Tellus*, 54 B, 590-610.
- LLOYD, J. TAYLOR, J.A. (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.* 8:315-323.
- LONG, S.P. (1989). Gas exchange of plants in the field. In *Toward a More Exact Ecology*, 30th Symposium of the British Ecological Society (P.J. Grubb, J.B. Whittaker, eds.). Blackwell, Oxford, pp. 33-62.
- LONG, S.P., DRAKE, B.G. (1991). Effect of the long-term elevation of CO₂ concentration in the field on the quantum yield of photosynthesis on the C₃ sedge, *Scirpus olneyi*. *Plant Physiol.* 96:221-226.
- LOTSCH, A., Y. TIAN, M.A. FRIEDL AND R.B. MYNENI (2003). Land cover mapping in support of LAI/FPAR retrievals from EOS MODIS and MISR. Classification methods and sensitivities to errors, *Int. J. Remote Sensing*, 24, 1997-2016.

- MAROCO, J.P., RODRIGUES, M.L., LOPES, C., CHAVES, M.M. (2002). Limitations to leaf photosynthesis in field-grown grapevine under drought – metabolic and modeling approaches. *Funct. Biol.* 29:451-459.
- MEDRANO, H., ESCALONA, J. M., CIFRE, J. BOTA, J. FLEZAS, J. (2003). A ten-years study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effect of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality." *Funct. Plant Biol.* 30: 607-619.
- MEYERS, T.P., BALDOCCHI, D.B. (2005). Current micrometeorological flux methodologies with applications in agriculture. In: "Micrometeorological Measurements in Agricultural Systems". Ed J.L. Hatfield. American Agronomy Society Monograph no. 47:381-396.
- MONTEITH, J.L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain," *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 281: 277–294.
- MONTEITH, J.L., SZEIEZ, G. (1960). The CO₂ flux over a field of sugar beets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 86:205-214.
- MYNENI, R.B.; ASRAR, G., GERSTL, S.A.W. (1990). Radiative transfer in three-dimensional leaf canopies. *Trans. Theory Stat. Phys.* 19:205–250.
- NORMAN, J.M., KUCHARICK, C.J., GOWER, S.T., BALDOCCHI, D.D., CRILL, P.M., RAYMENT, M., SAVAGE, K., STRIEGL, R.G. (1997). A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *J. Geophys. Res.* 102(D24):28:771-777.
- ODUM, E.P. (1988). *Basi di Ecologia*. Piccin Nuova Libreria, Padova.
- OLLAT, N., FERMAUD, M., TANDONNET, J.P., NEVEUX, M. (1998). Evaluation of an indirect method of estimating leaf area index determination in the vineyard: Combined effect of cultivar, year and training system. *Vitis* 37(2): 73-78.

- PARSONS, R., WEYERS, J.D.B., LAWSON, T., GODBER, I.M. (1997). Rapid and straightforward estimates of photosynthesis characteristics using a portable gas exchange system. *Photosynthetica*, 34(2): 265-279.
- PATAKAS, A., NOITSAKIS, B. (1999). An indirect method of estimating leaf area index in cordon trained spur pruned grapevines. *Sci. Hort.* 80:299-305.
- PEREIRA, L.S., PERRIER, A., ALLEN, R.G., ALVES, I. (1999). Evapotranspiration: concepts and future trends. *J. Irrig. Drain.Eng.* 125:45-51.
- PIELKE R.A., AVISSAR R., RAUPACH M., DOLMAN A.J., ZENG X., DENNING S. (1998). Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate. *Global Change Biol.*, 4, 461-475.
- PONI, S., INTRIERI, C., SILVESTRONI, O. (1994, a). Interactions of leaf age, fruitine and exsogenous cytokinins in the gas exchange of Sangiovese grapevines. I, Geas exchange. *Am. J. Enol. Vitic.* 45:71-78.
- PONI, S., LAKSO, A.N., TURNER, J.R., MELIOUS, R.E. (1994, b). Interactions of crop level and late season water stress on growth and physiology of field grown Concord grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 45:252-258.
- PRIOUL, J.L., CHARTIER, P. (1977). Partitioning of transfer and carboxylation components of intracellular resistance to photosynthetic CO₂ fixation: a critical analysis of the method used. *Ann. Bot.* 41:789-800.
- RANNIK, Ü., VESALA, T. (1999). Autoregressive filtering versus linear detrending in estimation of fluxes by the eddy covariance methods. *Boundary Layer Meteorol.* 91:259-280.
- ROBERTS, J., WHITEHOUSE, D.G. (1983). *Fisiologia vegetale pratica*. Ed Agrisole. Ed. Italiana a cura di Giannino Laudi.

- RUNNING, COUGHLAN, 1988 A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budget. *Tree Physiology*, 9: 147-160.
- RUNNING, S.W., THORNTON, P., NEMANI, R.R., GLASSY, J.M. (2000). Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System *Methods in Ecosystem Science*, 44-57.
- SAGE, R.F. (1990). A model describing the regulation of the ribulose-1.56-biphosphate carboxylase, electron transport, and triose phosphate use in response to light intensity and CO₂ in C₃ plants. *Plant Physiol.* 94-1728-1734.
- SAIGUSA N., YAMAMOTO S., MURAYAMA S., KONDOA H., NISHIMURA N. (2002). Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agric. Forest Meteorol.*, 112, 3-4, 203-215.
- SCHIMEL DS (1995): Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Glob. Ch. Biol.*, 1:77-91.
- SCHULTZ, H.R. (2003). Extension of a Farquhar model for limitations of leaf photosynthesis induced by light environment, phenology ad leaf age in grapevines (*Vitis vinifera L. cvv.* White Riesling and Zinfandel). *Funct. Plant Biol.* 30:673-687.
- SELLERS, P.J., TUCKER, C.J., COLLATZ, G.J., LOS, S., JUSTICE, C.O., DAZLICH, D.A., RANDALL, D.A. (1994). A global 10 * 10 NDVI data set for climate studies. Part 2—The adjustment of the NDVI and generation of global fields of terrestrial biophysical parameters,” *Int. J. Remote Sensing*, vol. 15: 3519–3545.
- SHARKEY, T.D. (1985). O₂-insensitive photosynthesis in C₃ plants. *Plant Physiol.* 78:71-75.

- SHARKEY, T.D. (1985). Photosynthesis in intact leaves of C₃ plants: physics, physiology and rate limitations. *The Botanical Review* 51(1):53-105.
- SHARKEY, T.D., BERNACCHI, C.J., FARQUHAR, G.D., SINGSAAS, E.L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C₃ leaves. *Plant, Cell Environ.* 30:1035-1040.
- SHUTTLEWORTH, W.J. (2006). Towards one-step estimation of crop water requirements. *Trans. ASABE* 49:925-935.
- SIMS D.A., PEARCY, R.W. (1989). Photosynthetic characteristics of a tropical forest understory herb, *Alocasia macrorrhiza*, and a related crop species, *Colocasia esculenta* grown in contrasting light environments. *Oecologia* 79:53-59.
- SOMMER, K.J., LANG, A.R.G. (1994). Comparative analysis of two indirect methods of measuring Leaf Area Index as applied to minimal and spur pruned grape vines. *Aust. J. Plant Physiol.* 21:197-206.
- SPANO D., SNYDER R.L., DUCE P., PAW U.K.T. (2000). Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal. *Agric. Forest Meteorol.*, 104, 171-183.
- SPANO, D., DUCE, P., SNYDER, R.L. (2004). Estimate of mass and energy fluxes over grapevines using eddy covariance technique. *Acta Hort.* 664:631-638.
- SPREITZER, J.R., SALVOCCI, M.E. (2002) Rubisco: Structure, regulatory interactions, and possibilities for a better enzyme. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2002. 53:449-475.
- STOLBOVOY, V., MONTANARELLA L., FILIPPI, N., SELVARADJOU, V., PANAGOS, P., GALLEG0, J. (2005). Soil Sampling Protocol to Certify the Changes of Organic Carbon Stock in Mineral Soils of European Union. EUR 21576 EN, 12 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

- TOWNSHEND, J.R.G. (1994). Global data sets for land applications for the advanced very high resolution radiometer: An introduction,” *Int. J. Remote Sensing*, vol. 11, pp. 51–54.
- TOWNSHEND, J.R.G., JUSTICE, C.O., SKOLE, D., MALINGREAU, J.-P., CIHLAR, J., TEILLET, P., SADOWSKI, F., RUTTENBERG, S. (1994). The 1 km resolution global data set: Needs of the International Geosphere Biosphere Programme, *Int. J. Remote Sensing*, vol. 15:3417–3441.
- TUCKER, C.J., VANPRAET, C.L., BOERWINKLE, E., EASTON, E. (1983). Satellite remote sensing of total dry matter accumulation in the Senegalese Sahel,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 13:461–469.
- VAN BAVEL, C.H.M. (1975) A behavioral equation for leaf carbon dioxide assimilation and a test of its validity. *Photosynthetica*, 9:165-76.
- VON CAEMMERER, S., (2000) Biochemical models of photosynthesis. *Techniques in Plant Sciences*, No.2 CSIRO Publishing, Australia.
- VON CAEMMERER, S., EDMONSON, D.L. (1986) Relationship between steady state gas exchange in vivo, ribulose biphosphate carboxylase activity and some carbon reduction intermediates in *Raphanus sativus*. *Austl. Journal of Plant Physiology*, 13:669-88.
- VON CAEMMERER, S., EVANS J.R., HUDSON G.S., ANDREWS T.J. (1994). The kinetics of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in vivo inferred from measurements of photosynthesis in leaves of transgenic tobacco. *Planta* 195:88-97.
- VON CAEMMERER, S., FARQUHAR, G.D. (1981). Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta*, 53:376-387.

- WALKLEY, A. & BLACK, I. A. (1934). An Examination of Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Sci.* 37:29-37.
- WAN, Z., Y. ZHANG, Q. ZHANG, AND Z.-L. LI, (2002): Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data, *Remote Sens. Environ.*, 83, 163-180.
- WANNER, W., STRAHLER, A., HU, B., LEWIS, P., MULLER, J.-P., LI, X., BARKER SCHAAF, C.L., BARNSLEY, M. (1997). Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and algorithm. *J. Geophys. Res.*, 102:17 143–17 162.
- WEBB, E., PEARMAN, G., LEUNING, R. (1980). Correction of fluxes measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106:85-100.
- WELLES, J.M., DEMETRIADES-SHAH, T.H., MCDERMITT, D.K. (2001). Consideration for measuring ground CO₂ effluxes with chambers. *Chem. Geol.* 177:3-13.
- WHITNEY, S.M., S. VON CAEMMERER, G.S., HUDSON, ANDREWS T.J. (1999). Directed mutation of the Rubisco large subunit of tobacco influences photorespiration and growth. *Plant Physiol.* 121(2):579-588.
- WIELICKI, B.A., B. R. BARKSTROM, B. A. BAUM, T. P. CHARLOCK, R. N., GREEN, D. P. KRATZ, R. B. LEE, III, P. MINNIS, G. L. SMITH, T. WONG, D. F. YOUNG, R. D. CESS, J. A. COAKLEY, JR., D. A. H. CROMMELYNCK, L. DONNER, R. KANDEL, M. D. KING, A. J. MILLER, V. RAMANATHAN, D. A. RANDALL, L. L. STOWE, R. M. WELCH, (1998). Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): Algorithm overview," *IEEE Trans. Geosci. Rem Sens.* 36:1127–1141.
- WILCZAC, J.M., ONCLEY, S.P., STAGE, S.A. (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithm. *Boundary Layer Meteorol.* 99:127-150.

- WILLIAMS, L.E., AYARS, J.E. (2005). Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132: 201-211.
- WILLIAMS, L.E., PHENE, C.J., GRIMES, D.W., TROUT, T.J. (2003). Water use of mature Thompson seedless grapevines in California. *Irrig. Sci.* 22:11-18.
- WILLIAMS, L.E., SMITH, R.J. (1985). Net CO₂ assimilation rate and nitrogen content of grape leaves subsequent to fruit harvest. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110:846-850.
- WILSON, K.B., BALDOCCHI, D.D., HANSON, P.J. (2000). Spatial and seasonal variability of photosynthetic parameters and their relationship to leaf nitrogen in a deciduous forest. *Tree Physiol* 20:565-578.
- WOODWARD, F.I., SMITH, T.M. (1994). Global photosynthesis and stomatal conductance: Modelling the controls by soils and climate, *Advances in Botanical Research*, 20:1-41.
- WOODWARD, F.I., SMITH, T.M., EMANUEL, W.R. (1995). A Global land primary productivity and phytogeography model, *Global Biogeochemical Cycle*, 9 (4):471-490.
- WULLSCHLEGER, S.D. (1993). Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 plants – A retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. of Exp. Bot.* 44:907-920.
- YUNUSA, L. A. M., WALKER, R. R. LU, P. (2004). Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 127: 93-107.