



Università degli Studi di Padova
Scuola di Agraria e Medicina Veterinaria
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali
Corso di Laurea Magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

Monitoraggio di lungo periodo di ambienti forestali e prati alpini del Trentino: analisi della variabilità microclimatica e dei flussi di CO₂ a scala ecosistemica

Relatore: Prof. Tommaso Anfodillo

Correlatori: Dott. Damiano Gianelle

Dott. Luca Belelli Marchesini

Laureando: Franco Anderle

Matricola: 1242384

Anno Accademico 2021/2022

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUZIONE	7
1.1 Cambiamenti climatici sulle Alpi	7
1.2 Ciclo carbonio negli ecosistemi forestali	7
1.3 Stock di carbonio negli ambienti forestali	8
1.4 Effetti dei cambiamenti climatici sulle foreste	8
1.5 Obiettivi	10
2. MATERIALI E METODI	11
2.1 Inquadramento geografico delle stazioni sperimentali	11
2.1.1 Stazione Monte Bondone (MBO):	11
2.1.2 Stazione Lavarone (LAV):	11
2.2 Eddy covariance	12
2.2.1 Strumentazione	12
2.2.2 Base dati Fluxnet	13
2.3 Elaborazione dati	14
3. RISULTATI	16
3.1 Monte Bondone	16
3.1.1 Flussi cumulati di CO ₂ - Monte Bondone	34
3.2 Lavarone	38
3.2.1 Flussi cumulati di CO ₂ - Lavarone	55
3.3 Stima delle tendenze temporali (trend) delle variabili ambientali e dei flussi di CO ₂ – Monte Bondone	58
3.4 Stima delle tendenze temporali (trend) delle variabili ambientali e dei flussi di CO ₂ – Lavarone	63
3.5 Correlazione tra variabili ambientali e flussi di CO ₂ - Monte Bondone	68
3.6 Correlazione tra variabili ambientali e flussi di CO ₂ - Monte Bondone	69
4. DISCUSSIONE	71
5. CONCLUSIONI	73
6. BIBLIOGRAFIA	74

RIASSUNTO

Negli ultimi anni il fenomeno dei cambiamenti climatici sulle Alpi è stato argomento di numerosi studi e progetti di ricerca ed oggetto di attenzione da parte di istituzioni internazionali come l' IPCC e la Convenzione delle Alpi. Questo perché le Alpi sono un territorio ritenuto fragile dove i cambiamenti climatici in atto possono causare grandi squilibri sia per la popolazione che per la fauna e flora che ci vivono. Questo progetto di tesi è stato effettuato in due differenti ambienti alpini trentini: una foresta situata a Lavarone (TN) e un prato ubicato in Monte Bondone (TN). Lo scopo di questo studio è stato quello di analizzare, in un periodo quasi ventennale, la variabilità microclimatica e i flussi di CO₂ a scala ecosistemica e di trovare anomalie, trend e correlazioni tra le variabili e i flussi a scale temporale mensile. I dati, relativi al periodo 2003-2020, sono stati raccolti presso i rispettivi siti da stazioni micrometeorologiche dotate di sistema di misura eddy covariance, processati secondo un protocollo standardizzato e messi a disposizione per il presente lavoro.

Con i dati in possesso si sono calcolate le distribuzioni percentili per ricavare le anomalie climatiche e gli andamenti stagionali sia per le variabili meteorologiche che per i flussi di CO₂. Inoltre si sono analizzati gli andamenti a scala mensile per le variabili e i flussi in entrambi i siti. Con un'analisi di correlazione sono state studiate le relazioni tra le variabili relative ai flussi ed i parametri ambientali.

Dall'elaborazione dei dati ottenuti si è notato come le temperature dell'aria e della radiazione solare globale per entrambi i siti siano simili mentre è mediamente più fresco il suolo a Lavarone rispetto al Monte Bondone. Lavarone presenta anche maggiori precipitazioni e deficit di pressione di vapore dell'atmosfera. Il sito di Monte Bondone presenta maggiore umidità nel suolo e con un andamento più irregolare.

Circa lo scambio di CO₂ il sito a Lavarone assorbe CO₂ in modo netto durante tutto l'anno mentre a Monte Bondone in inverno il sito è emettitore netto di CO₂ ed in estate, con lo sfalciamento a luglio, l'assorbimento cala significativamente. La produzione lorda primaria è maggiore a Lavarone. La respirazione ecosistemica infine presenta valori decisamente più alti nel sito del Bondone.

La NEE nella foresta di Lavarone ha un notevole andamento positivo nell'assorbimento di CO₂ mentre nel prato del Bondone si registra un aumento solo ad ottobre con aumento delle emissioni. La GPP e la REco stanno aumentando in diversi periodi dell'anno per i due siti.

Entrambi i siti presentano anomalie, in particolare l'anno 2003 e il 2015 presentano negli stessi mesi anomalie per quanto riguarda le temperature medie: infatti sono stati anni molto caldi. Al contrario l'estate del 2014 è stata per entrambi i siti relativamente fresca.

In entrambi i siti si osserva un aumento significativo delle temperature dell'aria e del suolo soprattutto nei mesi di aprile e febbraio e ciò determina un allungamento della stagione vegetativa in alta quota.

Per concludere si è osservato come le variabili meteorologiche quali temperature dell'aria, temperatura del suolo e radiazione solare globale siano quelle che influenzano maggiormente il flusso di NEE in entrambi i siti.

ABSTRACT

In recent years, the phenomenon of climate change in the Alps has been the subject of numerous studies and research projects and the object of attention by international institutions such as the IPCC and the Alpine Convention. This is because the Alps are a considered fragile territory where changes climatic conditions can cause enormous imbalances both for the population and for the fauna and flora that live there.

This thesis project was carried out on two different Trentino Alpine environments: a forest located in Lavarone (TN) and a meadow located in Monte Bondone (TN). The purpose of this study was to analyze, over a period of almost twenty years, the microclimatic variability and CO₂ fluxes at ecosystem scale and to find anomalies, trends and correlations between variables and fluxes at different time scales: daily, weekly and monthly. The data, relating to the period 2003-2020, were collected at the respective sites by micrometeorological stations equipped with an eddy covariance measurement system, processed according to a standardized protocol and made available for this work.

With the data available, the percentile distributions were calculated to derive the climatic anomalies and seasonal trends for both the meteorological variables and the CO₂ fluxes. In addition, monthly trends were analyzed for the variables and fluxes in both sites. With a correlation analysis, the relationships between the variables relating to flows and environmental parameters were studied and how they change as the time aggregation of the data varies from the daily to monthly scale.

From the processing of the data obtained, it was noted that the air temperatures and global solar radiation for both sites are similar while the soil in Lavarone is cooler than in Monte Bondone. Lavarone also has higher rainfall and water vapor pressure deficit values. The Monte Bondone site has more moisture in the soil and with a more irregular course. The site in Lavarone absorbs CO₂ sharply throughout the year while in Monte Bondone the site is a net emitter of CO₂ in winter and in summer, with mowing in July, absorption decreases significantly. Gross primary production is higher in Lavarone. Finally, the ecosystem respiration shows much higher values at the Bondone site.

The NEE in the Lavarone forest has a significant positive trend in the absorption of CO₂ while in the Bondone meadow there is an increase only in October with an increase in emissions. The GPP and the REco are increasing at different times of the year for the two sites.

Both sites have anomalies, in particular the years 2003 and 2015 show anomalies in the same months as regards average temperatures: in fact, these have been very hot years. On the contrary, the summer of 2014 was relatively cold for both sites.

In both sites, a significant increase in air and soil temperatures is observed, especially in the months of April and February, and this determines an extension of the growing season at high altitudes.

To conclude, it was observed that the meteorological variables such as air temperatures, soil temperature and global solar radiation are the ones that most influence the NEE flux in both site.

1. INTRODUZIONE

1.1 Cambiamenti climatici sulle Alpi

I cambiamenti climatici sono un problema a livello globale che dovremo affrontare nel corso dei prossimi anni. Ovviamente l'innalzamento delle temperature sta comportando delle conseguenze su tutta la superficie terrestre, ma non in maniera omogenea. Infatti, basti pensare che ambienti freddi come l'Antartide, la tundra o le nostre Alpi sono già maggiormente soggetti ad un aumento della temperatura media rispetto ai climi più caldi come, ad esempio, quelli della savana o delle foreste tropicali.

Nella regione alpina gli effetti saranno sullo scioglimento dei ghiacciai, sull'avanzamento del limite superiore del bosco a quote superiori con scomparsa di ecotoni e ambienti come la prateria alpina, sull'innalzamento delle nevi perenni portando di conseguenza ad una amplificazione di fenomeni estremi quali precipitazioni intense e siccità.

Le Alpi esercitano un'influenza consistente sulle dinamiche climatiche delle zone limitrofe. Infatti, le loro caratteristiche geografiche, per estensione e altitudine, e le caratteristiche ambientali per vegetazione e copertura nevosa, determinano e influenzano il clima delle aree vicine. I fondovalle sono tendenzialmente più caldi e secchi dei rilievi montani. Le temperature medie invernali variano da -5 °C a 4 °C. Le temperature medie estive invece variano invece da 15 a 24 °C. I fenomeni di inversione termica sono molto comuni in autunno e in inverno fino a circa 1000 m. Le precipitazioni variano con un gradiente est-ovest.

Sopra i 1500 m s.l.m. le precipitazioni sono nevose nel periodo invernale e alcune volte anche estivo. La copertura nevosa dura circa da metà novembre alla fine di maggio ad un'altitudine di circa 2000 m.

Come già detto, il clima nelle Alpi, così come a livello globale, sta cambiando. La temperatura è la variabile climatica maggiormente interessata da questo cambiamento. La temperatura atmosferica nella regione dell'arco alpino sta aumentando due volte più velocemente che nel resto dell'emisfero boreale come risulta dall'aumento osservato di quasi +2 °C dalla fine del XIX secolo, e questo ovviamente ha già avuto un grandissimo impatto sull'ambiente alpino. La riduzione dell'estensione degli habitat delle specie animali e vegetali endemiche, la minore disponibilità di risorse idriche (inclusa la minor durata della copertura nevosa che fornisce acqua di fusione), e quindi la maggiore frequenza di deficit idrico per le foreste e le più frequenti infestazioni parassitarie sono alcune delle conseguenze di questo repentino innalzamento delle temperature.

L'aumento di temperatura più significativo è stato registrato a partire dagli anni '90. Gli anni 1994, 2000, 2002, e in particolar modo il 2003 e negli ultimi anni dal 2018 al 2021, sono stati gli anni più caldi registrati nelle Alpi negli ultimi 500 anni. Analogamente le precipitazioni sono diminuite a partire dal 1970.

1.2 Ciclo carbonio negli ecosistemi forestali

Le foreste sono sia un sink che un importante stock di carbonio della biosfera. Esse influenzano il clima a livello locale e globale attraverso gli scambi di energia, acqua e anidride carbonica (Alkama R, & Cescatti A, 2016). Le foreste tramite la fotosintesi clorofilliana e la respirazione autotrofa ed eterotrofa contribuiscono al bilancio e al ciclo del carbonio. Uno studio ha stimato che grazie alle foreste viene trattenuto il 45% circa del carbonio terrestre, e contribuiscono per circa il 50% alla produzione primaria netta della biosfera (Bonan, 2008).

La quantità di carbonio fissata dagli organismi autotrofi grazie alla fotosintesi clorofilliana definisce la Produzione Primaria Lorda che comunemente si indica con il termine inglese GPP (Gross Primary Production) e rappresenta l'assorbimento lordo di carbonio da parte della vegetazione dall'atmosfera.

Come detto in precedenza, il carbonio assimilato che viene utilizzato dalla pianta per soddisfare le proprie esigenze metaboliche (crescita, mantenimento, fruttificazione, etc.) viene quantificato attraverso la Respirazione Autotrofa (Ra – Autotrophic Respiration) a cui è associato ad un flusso di CO₂ verso l'atmosfera.

La Produzione Primaria Netta (NPP -Net Primary Production), cioè la quantità di biomassa vegetale prodotta, non è altro che la differenza tra la produzione primaria lorda (GPP) e respirazione autotrofa (Ra)

$$NPP = GPP - Ra$$

La respirazione eterotrofa (Rh-Heterotrophic Respiration) è la respirazione effettuata negli ecosistemi da parte dei consumatori primari come gli erbivori, secondari e dagli organismi decompositori della sostanza organica nei vari orizzonti del suolo e nella lettiera.

La NEP (Net Ecosystem Production) non è altro che la differenza tra produzione primaria netta (NPP) e la respirazione eterotrofa (Rh); da un punto di vista del bilancio del carbonio tale grandezza è di uguale

grandezza, ma di segno opposto, allo scambio netto di ecosistema (NEE-Net Ecosystem Exchange), cioè la quantità di carbonio che è assorbita o emessa da un ecosistema in un dato intervallo di tempo.

La NEP è la misura del bilancio del carbonio complessivo di un ecosistema che può sia sequestrare CO₂ dall'atmosfera agendo come un assorbitore (*sink*) che emetterla agendo come un emettitore (*source*). La somma delle due respirazioni (Ra e Rh) è definita respirazione di ecosistema (REco – Ecosystem Respiration). Pertanto la NEP può essere anche formulata come:

$$NEP = -NEE = GPP - REco$$

1.3 Stock di carbonio negli ambienti forestali

Nelle foreste vi è una notevole quantità di biomassa, cioè di carbonio immagazzinato, sia nella parte epigea (fusti, rami, apparati fogliari, ecc.) che in quella ipogea (suolo e radici). Il carbonio stoccato nella biomassa si stima per via diretta quantificandone il peso secco, dopo essiccazione del materiale, considerando un contenuto percentuale di carbonio pari al 50% quando non determinato sperimentalmente. La stima della corrispondente quantità di anidride carbonica sequestrata si ottiene moltiplicando il contenuto di carbonio della biomassa per il rapporto tra il peso molecolari dell'anidride carbonica e del carbonio elementare ($44/12=3.67$).

Le linee guida IPCC del 2003, stabilite per la contabilizzazione del bilancio tra carbonio emesso nell'atmosfera e carbonio assorbito dagli ecosistemi terrestri, individuano cinque stock di carbonio nelle foreste:

1. Biomassa epigea: costituita dai tessuti che costituiscono le parti aeree degli organismi vegetali viventi (fusti, rami e ceppaie, corteccia, foglie, semi e frutti).
2. Biomassa ipogea: rappresentata dagli apparati radicali di organismi vegetali viventi.
3. Necromassa: residui vegetali legnosi più grossolani (fusti, rami)
4. Lettieria: costituita dai residui più fini (foglie, fiori ed infiorescenze, frutti ed infruttescenze, rametti ecc), non ancora decomposti.
5. Suolo: che comprende il carbonio organico presente negli strati organici e minerali, incluse le radici più fini, fino ad una profondità convenzionale di 30 cm dello strato minerale.

Per reperire informazioni sulla presenza di carbonio in foresta, in Italia la fonte principale è rappresentata dall'inventario forestale nazionale, chiamato Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC).

1.4 Effetti dei cambiamenti climatici sulle foreste

I cambiamenti climatici hanno effetti, ovviamente, su tutto l'ambiente, e quindi anche sulle foreste. Infatti, i rapidi cambiamenti stanno già portando allo spostamento delle fasce di vegetazione verso altitudini più elevate e, di conseguenza, lo spostamento del limite superiore del bosco, con la scomparsa dei prati e pascoli di alta quota. Sulle Alpi le foreste sono più sensibili ai cambiamenti climatici e gli effetti potrebbero essere più marcati (Fischlin e Gyalistras, 1997). In quest'area un incremento della temperatura potrebbe determinare l'estendersi delle zone termiche favorevoli alle formazioni di latifoglie più termofile (sia nelle vallate che nelle parti montane inferiori), spostando le faggete alle fasce montane più elevate, attualmente occupate dalle conifere microterme (Pignatti, 2011).

Queste modifiche ambientali dei boschi di montagna porteranno alla modificazione del ruolo fondamentale che hanno nei confronti dell'erosione dei versanti e nella difesa dalle valanghe e dalle frane.

Come detto in precedenza, i cambiamenti climatici influenzano in modo significativo le foreste sia alpine che quelle nel resto del globo. Essi infatti agiscono influenzando il suolo, la crescita degli alberi, la biodiversità, la resistenza e la resilienza delle specie vegetali ai diversi stress sia naturali che antropici. I disturbi naturali che hanno il maggiore effetto sulle foreste comprendono gli insetti, le malattie parassitarie, la siccità, gli incendi naturali o antropici, e l'azione del vento come sempre più ricorrenti uragani o tempeste.

1.4.1 Effetti sul suolo

Molti processi del suolo sono alterati dai cambiamenti climatici, soprattutto dall'aumentare della temperatura. Le conseguenze ovviamente si ripercuotono sull'intero ecosistema. Le temperature più alte, le precipitazioni più sporadiche e le modifiche nella produzione primaria netta velocizzano lo sviluppo del suolo, da cui ne deriva un aumento dei carichi critici per gli inquinanti e una minore sensibilità degli ecosistemi agli inquinanti stessi.

Le temperature più alte aumentano la mineralizzazione del terreno con conseguente aumento di disponibilità e lisciviazione dell'azoto.

Un altro fattore riguarda l'acidificazione del suolo aumentando la produzione di HNO_3 da NO_x , e la proporzione di NH_3 convertito in solfato di ammonio, che si deposita nel terreno. Successivamente anche la naturale capacità dei suoli forestali di assorbire il metano diminuisce a causa della deposizione di NH_3 aumentando così la concentrazione di questo gas serra nell'atmosfera.

L'evaporazione può essere modificata dall'umidità aumentata per alti livelli di CO_2 in atmosfera.

1.4.2 Condizioni fitosanitarie:

I fattori che influenzano le condizioni fitosanitarie delle foreste agiscono sull'apertura e chiusura degli stomi. L'apertura degli stomi per via, ad esempio, delle temperature elevate aumenta la sensibilità delle piante a inquinanti gassosi come SO_2 e O_3 . Lo stress idrico o l'aumento dell'anidride carbonica favoriscono la chiusura degli stomi e aiutano a proteggere la pianta dagli inquinanti gassosi. Lo stress idrico influenza anche il periodo di accrescimento abbreviandolo e di conseguenza riduce l'esposizione e quindi il danno dei cambiamenti climatici. Invece fattori come il riscaldamento, conducono a un periodo di accrescimento più lungo e quindi aumentano l'esposizione delle piante agli inquinanti.

L'anidride solforosa (SO_2) nelle zone maggiormente industrializzate danneggia fortemente le foreste. Pure NO_x e NH_3 , come anche i vapori di HNO_3 , possono avere effetti fitotossici diretti, ma solo ad alte concentrazioni. L'azoto sia gassoso che solubile in acqua favorisce il processo dell'eutrofizzazione.

Comunque, alti livelli di inquinanti atmosferici non necessariamente si traducono in sostanziali effetti negativi sulle foreste (Paoletti, 2006). Al contrario, è stato dimostrato un aumento nella crescita delle foreste in diversi paesi europei (Spiecker et al., 1996). Le ragioni presunte riguardano l'aumento della deposizione azotata, della temperatura e della disponibilità di CO_2 , nonché i cambiamenti nelle pratiche selvicolturali.

1.4.3. Crescita degli alberi e stoccaggio del carbonio:

Nelle foreste dell'emisfero settentrionale la maggior parte del carbonio si trova nel suolo (de Vries et al., 2003). I fattori legati ai cambiamenti climatici come il riscaldamento atmosferico, il conseguente incremento della mineralizzazione dei suoli da cui deriva una maggiore disponibilità di azoto stimolano la crescita delle piante e quindi l'accumulo di carbonio, specialmente se l'azoto è un fattore limitante (Bazzaz e Sombroek, 1996).

Uno studio condotto nelle foreste temperate ha ipotizzato che l'aumento della produzione primaria netta dipenda dall'incremento della deposizione azotata, dalle concentrazioni di anidride carbonica, dalla temperatura e dall'allungamento del periodo vegetativo (Nadelhoffer et al., 1999). L'elevata deposizione azotata aumenta ed accelera il tasso di accumulo di sostanza organica nel terreno a causa di una maggiore produzione di foglie/ghi e lettiera, e di una riduzione nella decomposizione della sostanza organica.

La prolungata presenza di ozono può ridurre la crescita e, di conseguenza, lo stoccaggio del carbonio. Uno studio condotto in America sulla presenza di ozono in foresta, ha dimostrato che la presenza di ozono compensa una parte sostanziale degli incrementi causati da CO_2 e N (Felzer et al., 2004). In questo studio hanno calcolato che l'esposizione all' O_3 abbia ridotto il sequestro del carbonio di 18-38 Tg C anno⁻¹ negli ecosistemi statunitensi dagli anni '50.

Eventi ricorrenti di estrema siccità possono contrastare gli effetti del previsto riscaldamento globale e dell'allungamento della stagione vegetativa, e minare salute e produttività degli ecosistemi forestali, trasformando i *sink* di carbonio in emettitori netti (Ciais et al. 2005).

1.4.4. Cambiamenti nella biodiversità:

La presenza delle specie vegetali in un ecosistema dipende principalmente dal clima, dal suolo e i suoi nutrienti, dal tipo forestale e dall'altitudine.

Per esempio alcune specie arboree necessitano di basse temperature cioè di un fabbisogno in freddo, nella stagione invernale per poi iniziare in primavera il risveglio vegetativo. Se le temperature invernali si alzeranno di parecchi gradi queste specie non potranno più crescere in queste zone, lasciando il posto ad altre specie.

Anche l'aumento di azoto e di conseguenza il processo di eutrofizzazione, comporta modifiche agli ecosistemi forestali. Dal momento che i livelli critici degli inquinanti sono specie-specifici, la sensibilità all'inquinamento viene ad alterarsi se la composizione dell'ecosistema cambia.

Cambiamenti nella composizione delle specie vegetali possono inoltre modificare la sensibilità di un ecosistema al cambiamento climatico.

1.5 Obiettivi

La presente tesi ha avuto come obiettivo quello di analizzare delle serie storiche di dati micrometeorologici dal 2003 al 2020 di una prateria e di una foresta mista alpine, caratterizzandole statisticamente con particolare attenzione agli estremi climatici ed analizzando le correlazioni tra le variabili meteorologiche/ambientali e i flussi di CO₂ a scala ecosistemica.

L'obiettivo iniziale della prima parte dello studio è quello di analizzare l'andamento medio e le anomalie dei dati meteorologici, delle variabili per il periodo 2003-2020, usando dati a scala di aggregazione temporale mensile. Con i dati esaminati sono state calcolate le distribuzioni percentili (95%, 90%, 75%, 50%, 25%, 10%, 5%) ricavando pertanto gli eventi anomali dal punto di vista climatico. La stessa metodica per l'analisi degli andamenti stagionali e delle anomalie è stata eseguita per i flussi di carbonio (NEE, GPP, REco).

E' stata verificata successivamente l'esistenza di eventuali trend a scala mensile per le principali variabili ambientali e per quelle relative ai flussi di CO₂. Per mezzo di un'analisi di regressione lineare è stato determinato se e quali cambiamenti climatici ed ambientali statisticamente significativi stiano avvenendo nei due siti presi in esame, e se si registrano delle tendenze nella produttività netta di ecosistema e nelle sue componenti

Infine per mezzo di un'analisi di correlazione si analizzano le relazioni tra le variabili relative ai flussi ecosistemici di CO₂ ed i parametri ambientali per entrambi i siti e come cambiano al variare dell'aggregazione temporale dei dati dalla scala mensile.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Inquadramento geografico delle stazioni sperimentali

Le stazioni micrometeorologiche di cui sono stati analizzati i dati sono localizzate in Trentino Alto Adige, nella Provincia Autonoma di Trento, più precisamente sull'Altopiano di Lavarone (LAV) e sul Monte Bondone (MBO).

Il Trentino si trova nel nord Italia e confina a nord con la Provincia Autonoma di Bolzano, a est e sud-est con il Veneto mentre a ovest e sud-ovest con la Lombardia.

Il Trentino è quasi completamente montuoso ad eccezione della Valle dell'Adige e della Valle dei Laghi. Il territorio varia dai 65 m s.l.m. di Riva del Garda fino alle montagne più alte (Ortles 3905m s.l.m.) che raggiungono i 3900 m s.l.m. Il fiume principale è l'Adige che divide in due zone la regione.

La morfologia del Trentino è complessa, nonostante il territorio relativamente piccolo. Esso è distinto da numerose catene montuose innevate per gran parte dell'anno che favoriscono la presenza di acqua molto abbondante sul territorio tra fiumi, torrenti e laghi. Le valli sono orientate in diverse direzioni e con ampiezze diverse. Questi elementi consentono al territorio di avere una grande diversità climatica.

Generalmente le zone più basse come l'Alto Garda e la Valle dell'Adige hanno inverni relativamente freddi e abbastanza nevosi ed estati calde e temporalesche, spesso afose di giorno, con l'eccezione dell'alto Garda dove i pomeriggi estivi sono piacevolmente rinfrescati dalla "Ora" del Garda, la brezza pomeridiana.

Le valli laterali, come la val di Non e la Valsugana, hanno un clima con temperature più moderate d'estate e leggermente più fredde d'inverno. Le conche fredde e gli avvallamenti posti fra 500 e 1000 m come il Bleggio e il fondovalle della val di Fiemme offrono estati miti e inverni più rigidi.

Infine le zone di montagna più alte oltre i 1300-1600 m, con il tipico clima montano caratterizzato da estati fresche/miti e piovose con frequenti temporali, ed inverni freddi e alquanto nevosi.

Le precipitazioni hanno differenze elevate tra le diverse zone: le aree più piovose sono quelle meridionali e sudoccidentali, che sono quelle più esposte ai flussi umidi da sud; le zone invece più "chiuse" come le valli di Fiemme e Fassa, ricevono mediamente meno precipitazioni.

Differenze tra le diverse valli ci sono anche nel regime pluviometrico, dove nelle zone più vicine alle Prealpi, come val d'Adige, valle del Chiese, alto Garda e Valsugana, hanno un regime pluviometrico annuale caratterizzato da due massimi di precipitazione in primavera e autunno e due minimi in estate e soprattutto in inverno. Le zone invece più lontane dalla pianura Padana e alle quote più elevate mostrano invece un regime più "alpino" con un massimo di precipitazione stagionale piuttosto evidente in estate e dovuto ai frequenti eventi temporaleschi. (Climatrentino).

2.1.1 Stazione Monte Bondone (MBO):

La stazione è stata realizzata nel 2002 dal progetto UE CARBOMONT, e adesso è parte integrante dei progetti CARBOEUROPE e della rete internazionale di siti FLUXNET. Essa si trova sul Monte Bondone (6.01 N, 11.04 E, 1550 m s.l.m.) sull'altopiano delle Viote, in un prato alpino permanente. Il prato si presenta pianeggiante ed è facilmente raggiungibile con la macchina.

Il sito è caratterizzato da una temperatura media di 5,4°C. La piovosità annuale è di 1290 mm grazie ai valori registrati nel periodo dal 1958 al 2008 (Eccel et al., 2012), con massimi a maggio e ottobre, mentre la copertura nevosa è presente nel periodo invernale, da novembre fino ad aprile.

Il prato è concimato e viene effettuato uno sfalcio all'anno nel periodo di metà luglio. Le specie principali sono *Festuca rubra* (L.) con copertura basale del 25%, *Nardus stricta* (L.) 13% e *Trifolium sp.* (L.) 14,5%. Questa vegetazione erbacea è tipica dei prati a bassa produttività della regione alpina.

2.1.2 Stazione Lavarone (LAV):

Il sito è situato nell'Altopiano di Lavarone nel sud-est del Trentino (45.9 N, 11.2 E) in un'area di 80 km², che si trova ad un'altitudine di 1300 m s.l.m. in un bosco. La temperatura media della zona è di 7,2°C e le precipitazioni medie annuali sono di 1150 mm (Papale et al. 2015).

Il sito è ubicato in un bosco misto maturo a prevalenza di *Abies alba* Mill. (70%), *Fagus sylvatica* L. (15%) e *Picea abies* (L.) (15%) con piano dominante che le piante sono e raggiunge i 33-38m e sottobosco a prevalenza di faggio. La densità del popolamento arboreo è di circa 1300 fusti/Ha (dbh > 7,5) ed il Leaf Area Index (LAI) è pari a 9,6 (Papale et al. 2015). Il substrato su cui si sviluppa il bosco è calcareo e roccioso e la topografia dell'area si presenta dolcemente ondulata. Il bosco si mostra con un tratto vegetato omogeneo

più grande di 1 km in quasi tutte le direzioni. (Carbon, Water and Energy Fluxes of Terrestrial Ecosystems in Italy 2015).

2.2 Eddy covariance

La tecnica Eddy Covariance (EC) è un metodo micrometeorologico attualmente molto usato per studiare i flussi di energia e materia che si instaurano tra ecosistemi terrestri e l'atmosfera.

Una stazione micrometeorologica basata sulla tecnica Eddy covariance permette lo studio dei flussi turbolenti di materia (composti gassosi), di calore latente e sensibile, oltre ad includere tipicamente misure dei flussi di radiazione energetica (radiazione globale, radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), radiazione netta, flusso di calore nel suolo) e di parametri fisici dell'atmosfera, della vegetazione e del suolo (es. temperatura, umidità, precipitazioni, pressione atmosferica, direzione e velocità del vento, etc. Essa generalmente restituisce dati in continuo come medie semi-orarie, sebbene i dati relativi ai flussi siano acquisiti ad alta frequenza (10, 20Hz) e successivamente mediati in fase di processamento.

Negli ultimi anni la tecnica Eddy Covariance si è affermata a livello mondiale per la misura degli scambi ecosistemici di anidride carbonica. E' stato organizzato anche un network mondiale denominato Fluxnet che coordina network regionali (Euroflux, Ameriflux, Asiaflux) che comprende circa 600 siti di misura distribuiti nei diversi biomi terrestri, due dei quali sono presenti in Trentino; uno nella stazione di Lavarone su una foresta alpina e uno sul Monte Bondone in un prato alpino.

2.2.1 Strumentazione

La tecnica Eddy covariance si basa sulla misurazione dei flussi turbolenti che avviene per mezzo di particolare strumentazione per la misurazione in loco. La quota di dipende dall'altezza della vegetazione in una data area di studio. Per il sito del bosco a di Lavarone la quota di misura è di circa 40 m, mentre per il prato del Monte Bondone è di circa m 2.5 (Tabella 1). Per misurare i flussi turbolenti di energia e di massa tra un ecosistema e l'atmosfera è necessario misurare ad alta frequenza la componente verticale della velocità del vettore vento, la temperatura dell'aria e la concentrazione delle specie gassose. Inoltre per interpretare i risultati è necessario conoscere le variabili ambientali che guidano i processi alla base dei suddetti scambi di energia e materia (CO_2 e H_2O). I dati eddy covariance raccolti (dato grezzo) necessitano di un accurato controllo di qualità e di una fase di processamento (processing) che da il risultato dei flussi, che a loro volta nella fase di post-processamento vengono ulteriormente categorizzati in base alla qualità, ed elaborati per ottenere serie temporali continue (gap-filling) e la partizione del flusso di NEE nelle componenti di GPP e REco.

Un sistema di misura dei flussi a stazione di misura include:

- Anemometro ultrasonico tridimensionale (Fig 1): utilizzato per la misurazione della velocità del vento e temperatura sonica dell'aria. È costituito da tre coppie di trasduttori disposti in maniera non parallela tra di loro per fornire le tre componenti della velocità del vento lungo la loro direzione. Lo strumento misura il tempo di transito di un impulso sonoro (grazie alla lunghezza nota) tra ogni coppia di trasduttori. Successivamente grazie alla relazione intercorrente tra velocità del suono e temperatura, si può calcolare la temperatura dell'aria.

Questo strumento fornisce dati ad alta frequenza (1-100 Hz)



Figura 1 strumento Eddy covariance

- Analizzatori di gas all'infrarosso: sono sensori a risposta rapida per la misurazione delle concentrazioni di CO₂ e dell'acqua. Possono essere sensori a percorso aperto cioè il percorso tra sorgente di radiazione e sensore è posto all'esterno, così l'aria passa direttamente sul percorso ottico, o chiuso, dove l'aria viene pompata all'interno di una cuvetta per poi venire analizzata. Entrambi operano grazie al fenomeno fisico dell'attenuazione della radiazione infrarossa per effetto dell'assorbimento dei gas a specifiche lunghezze d'onda. Il problema dei sensori a percorso chiuso è rappresentato dalla necessità di campionare l'aria raccolta vicino a all'anemometro ultrasonico con un sistema di tubi, pompe e filtri.

- Data logger per la memorizzazione dei dati

Completano il sistema altri strumenti meteorologici e per misure ambientali di parametri meteorologici e del suolo:

- Pluviometro: per la misurazione della pioggia
- Termoisgrometri: per la misurazione della temperatura dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria e del suolo.
- Barometro per la misura della pressione atmosferica
- Piranometro per la misura della radiazione solare globale
- Sensore di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR)
- Sensore di distanza sonico per la misura dell'altezza del manto nevoso
- Radiometro netto
- Termometri del suolo: per misurare la temperatura del suolo a diversi strati
- Sonde TDR (time domain reflectometry) per la misura del contenuto volumetrico di acqua nel suolo
- Sensore di flusso di calore nel suolo

Questa tecnica necessita di un'accurata precisione nell'installazione e nella calibrazione degli strumenti, di una attenta alla scelta del sito di studio dove verrà disposta la torre, nella durata dei periodi di mediazione dei flussi e della frequenza di misura degli strumenti (anemometro sonico/ analizzatore) e infine di organizzazione nell'elaborazione dei dati grezzi che possono raggiungere moli importanti.

Il sito di studio ideale è quello pianeggiante con una copertura della vegetazione uniforme sul terreno. L'altezza su cui installare la torre dipende ovviamente dalla vegetazione, dall'ampiezza dell'area di studio e dalla velocità del vento. La strumentazione posta sulla torre deve essere disposta mediamente sopra 5-10 m della copertura vegetale (canopy) nel caso di una foresta.

Il punto di misura deve essere posizionato all'interno del "constant flux layer", che non è altro che lo strato di atmosfera situato alcuni metri al di sopra della copertura analizzata, in cui il flusso non varia con la quota di misura. Se viene la strumentazione viene posizionata sotto questo strato, vicino alla copertura vegetale, la misura non rappresenterebbe una corretta footprint e sarebbe influenzata troppo dalla rugosità delle specie vegetali, mentre al di sopra di questo punto, la misura non sarebbe più rappresentativa del solo ecosistema in studio.

La distanza e la forma della footprint dipendono: dalla velocità del vento e dalle caratteristiche di turbolenza.

Normalmente più aumenta la velocità del vento e più aumenta la turbolenza per attrito con la superficie d'impatto. Questo fenomeno è visibile nell'interazione tra il vento e una superficie forestale "rugosa", cioè essa tende a fermare, con l'attrito di rami e foglie, le linee di flusso naturali del vento e così pertanto genera localmente moto turbolento. Questo è il motivo per cui il punto di misura e la strumentazione devono essere giustamente distanziate dalla copertura forestale. (Rannik et.al 2000 – 2003, Aubinet e. al. 2003; Aubinet et al. 2005, Rebmann et.al 2005).

2.2.2 Base dati Fluxnet

Il presente studio si è basato su di un set di dati eddy covariance e di parametri ambientali raccolto dal 2003 al 2020 presso i due siti di indagine. Il dataset è stato prodotto dal progetto ICOS per analizzare la variabilità inter-annuale dei flussi di carbonio ed energia in siti facenti parte di una rete di monitoraggio pan europea con particolare riferimento ad alcuni anni cardine quali il 2018 caratterizzato da ondate di calore e siccità diffuse ed il 2020 caratterizzato da un inverno particolarmente mite e da una significativa riduzione delle emissioni di CO₂ localizzate nei centri urbani a causa delle restrizioni alla circolazione imposte per il controllo dell'epidemia da COVID-19. Il dataset è stato prodotto seguendo il protocollo FLUXNET2015, una metodologia standard per le misure eddy covariance (Pastorello et al. 2015), che risulta in dati temporalmente continui aggregati a scala giornaliera, settimanale, mensile ed annuale (dato originale semi-

orario). Tra le numerose variabili del dataset, sono state prese in esame le seguenti riguardanti sia parametri meteorologici/ambientali che flussi di CO₂:

- TA_F: temperatura dell'aria media
 - TA_F_NIGHT: temperatura dell'aria notturna,
 - TA_F_DAY: temperatura dell'aria diurna,
 - SW_IN_F: radiazione solare globale,
 - VPD_F. deficit pressione vapore acqueo,
 - P_F: precipitazioni,
 - TS_F_MDS_1, TS_F_MDS_2, TS_F_MDS_3: temperatura del suolo a diversa profondità,
 - SWC_F_MDS_1, SWC_F_MDS_2, SWC_F_MDS_3: umidità del suolo a diversa profondità
- NEE: scambio netto ecosistemico
- NEE NIGHT: scambio netto ecosistema notturno
 - NEE DAY: scambio netto ecosistemico diurno
 - GPP DT: produzione primaria lorda (ottenuta con metodo di partizione di tipo "DayTime")
 - GPP NT: produzione primaria lorda (ricavata per differenza tra NEE e Reco NT)
 - REco DT: respirazione ecosistema (ottenuta con metodo di partizione di tipo "DayTime")
 - REco NT: respirazione ecosistema (ottenuta con metodo di partizione di tipo "NightTime")

2.3 Elaborazione dati

Per il rilevamento delle anomalie delle variabili si è utilizzato il programma Excel con i dati elaborati dei due siti per il periodo mensile, settimanale e giornaliero. Per prima cosa si è creata una tabella pivot per ordinare i dati in base all'anno e al mese di corrispondenza e successivamente per ogni mese si sono calcolati cinque percentili: 0,95, 0,90, 0,75, 0,5, 0,25, 0,10 e 0,05 e la media. Successivamente si sono calcolate le anomalie dei dati facendo la differenza tra media e valore dei dati. Per concludere si sono creati i grafici degli andamenti dei percentili e i grafici con l'andamento mensile annuale dei dati con il 95° e il 5° percentile.

Per il rilevamento dei trend si è usato il programma statistico chiamato Statgraphics 19. Per ogni variabile analizzata dello studio si è calcolato tramite un modello di regressione lineare i trend mensili tra le diverse variabili e i mesi degli anni dello studio. Successivamente grazie ai risultati sono stati utilizzati i parametri di pendenza della retta, errore standard della pendenza, p-value e R². Infine tutti i valori risultanti dalla regressione sono stati inseriti in una tabella per essere analizzati.

Infine è stata fatta una analisi di correlazione a più variabili utilizzando sempre il programma Statgraphics 19. Si sono inseriti tutti i dati giornalieri delle variabili e dei flussi nel programma e successivamente si è verificato il grado di correlazione tra le variabili temporali e i flussi di CO₂. Tutte le analisi sono risultate statisticamente significative e i valori riportati in una tabella a doppia entrata.

STRUMENTAZIONE MONTE BONDONE E LAVARONE

STRUMENTAZIONE MONTE BONDONE		
STRUMENTO	Modello	Altezza/Profondità montaggio (cm)
Termoigrometro	Rotronic MP103 A	348
Termoigrometro (ICOS)	Rotronic HC2A-S	250
Barometro		
Piranometro	LiCor LI200	
Sensore radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (direzione zenitale)	LiCor LI190 Delta-T BF5	
Sensore radiazione PAR (ICOS)	LiCor LI190	
Sensore radiazione PAR	LiCor LI190	250

(ICOS) (direzione nadirale)		
Radiometro netto quadricomponente	Kipp & Zonen CNR4	
Sensore distanza (altezza neve)	SR50	224
Sensore distanza (altezza neve)	SR50-A	244
Pluviometro	OT Pluvio 2	200
Radiometro netto quadricomponente	Kipp & Zonen CNR1	
Termometro (suolo)	Hukseflux SPT01	-2, -5, -10
Sensore umidità terreno	Campbell CS615	-10, -20
Anemometro sonico	Gill-R3	257,5
Analizzatore IRGA	LiCor LI7500	257,5
Anemometro sonico	Gill-HS	237,5
Analizzatore IRGA	LiCor LI7200	236,5
LI7200 RS		236,5
STRUMENTAZIONE LAVARONE		
STRUMENTO	Modello	Altezza/Profondità montaggio (cm)
Radiometro netto quadricomponente	Kipp&Zonen CNR1	
Piranometro	Li-Cor LI200	
Sensore radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (totale e diffusa),	Li-Cor LI190 Delta-T BF3	
Termoigrometro	Rotronic MP103 A	
Barometro	Vaisala PTB110	
Pluviometro		
Piastre di flusso di calore nel suolo	Model Rebs, Hukse Flux HFP01	
Termometro (suolo)	Hukseflux termocoppia Campbell 107	(-2,-5, -10, -20,-50 cm)
Anemometro sonico	Gill-R3-50	370 cm
Analizzatore IRGA	LiCor LI7500	370 cm

Tabella 1 lista strumenti Monte Bondone e Lavarone.

3. RISULTATI

3.1 Monte Bondone

TEMPERATURA MEDIA MENSILE DELL'ARIA (TA)

La temperatura media mensile dell'aria (Figura 2) presenta un andamento a campana lungo il corso dell'anno solare. Nei mesi invernali si registrano temperature più basse che si alzano arrivando al culmine in estate. Successivamente calano di nuovo. In particolare gennaio risulta il mese più freddo ($-2,9^{\circ}\text{C}$ 50° percentile) e luglio il più caldo ($14,5^{\circ}\text{C}$; 50° percentile). La differenza tra il 5° ed il 95° percentile è approssimativamente di 6°C in inverno mentre è inferiore in estate, quasi di 4°C . Nel corso degli anni si è assistito a valori anomali (Figura 3) in particolare gli anni con picchi più caldi sono stati il 2003 (a giugno e agosto) e il 2015 (luglio). Gli anni invece con anomalie negative della temperatura dell'aria sono stati il 2014 (giugno, luglio e agosto) e il 2019 (maggio).

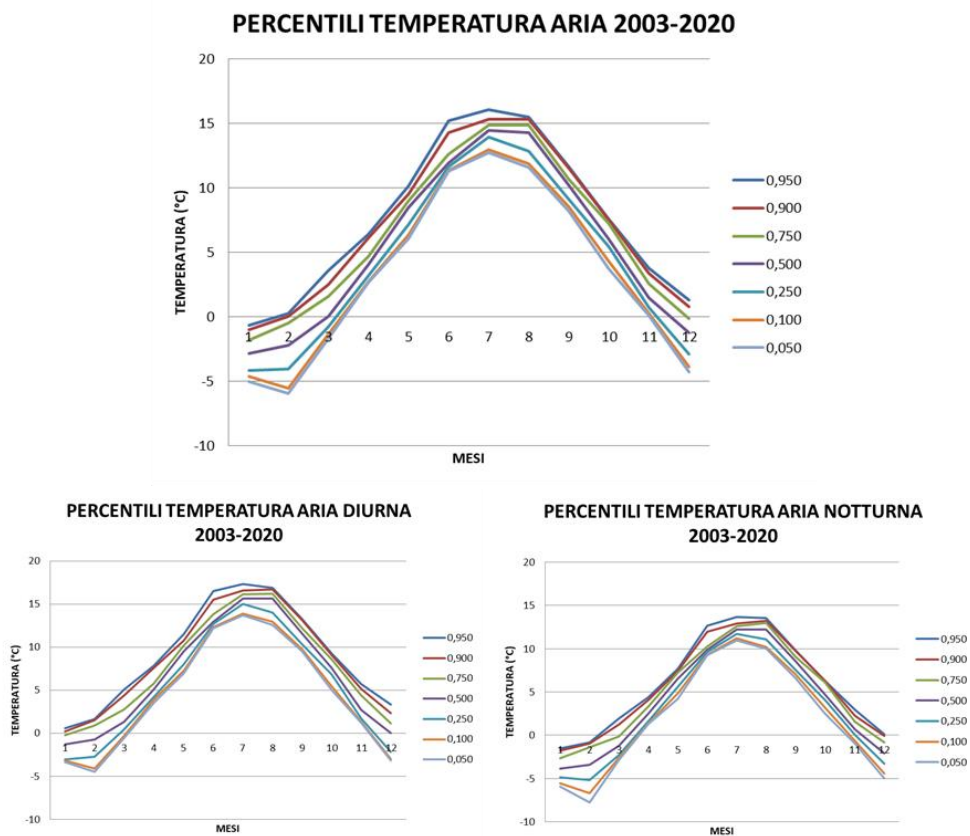


Figura 2 percentili temperatura dell'aria media, notturna e diurna 2003-2020 Monte Bondone.

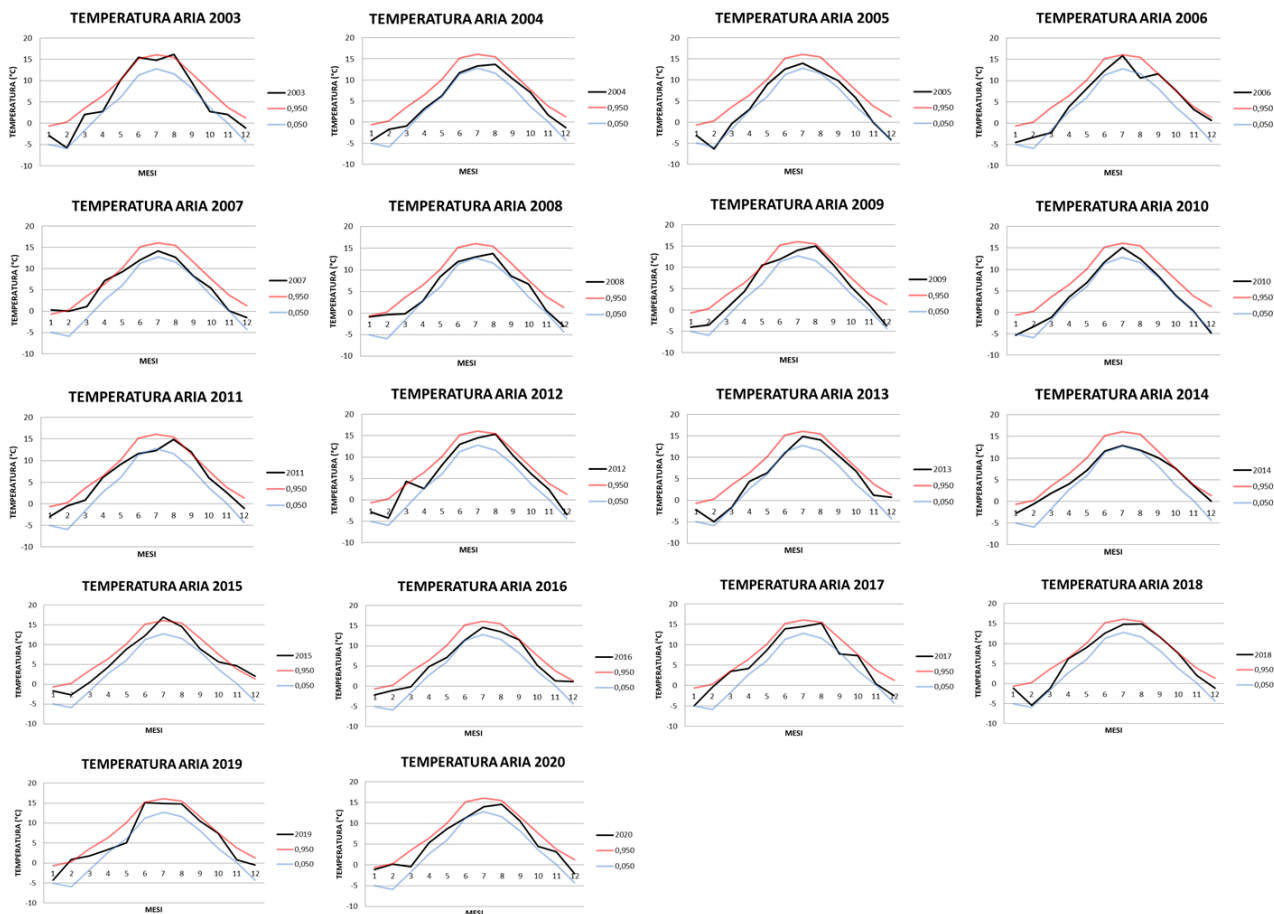


Figura 3 medie mensili della temperatura dell'aria 2003-2020 Monte Bondone.

TEMPERATURA DELL'ARIA NOTTURNA MENSILE (TA)

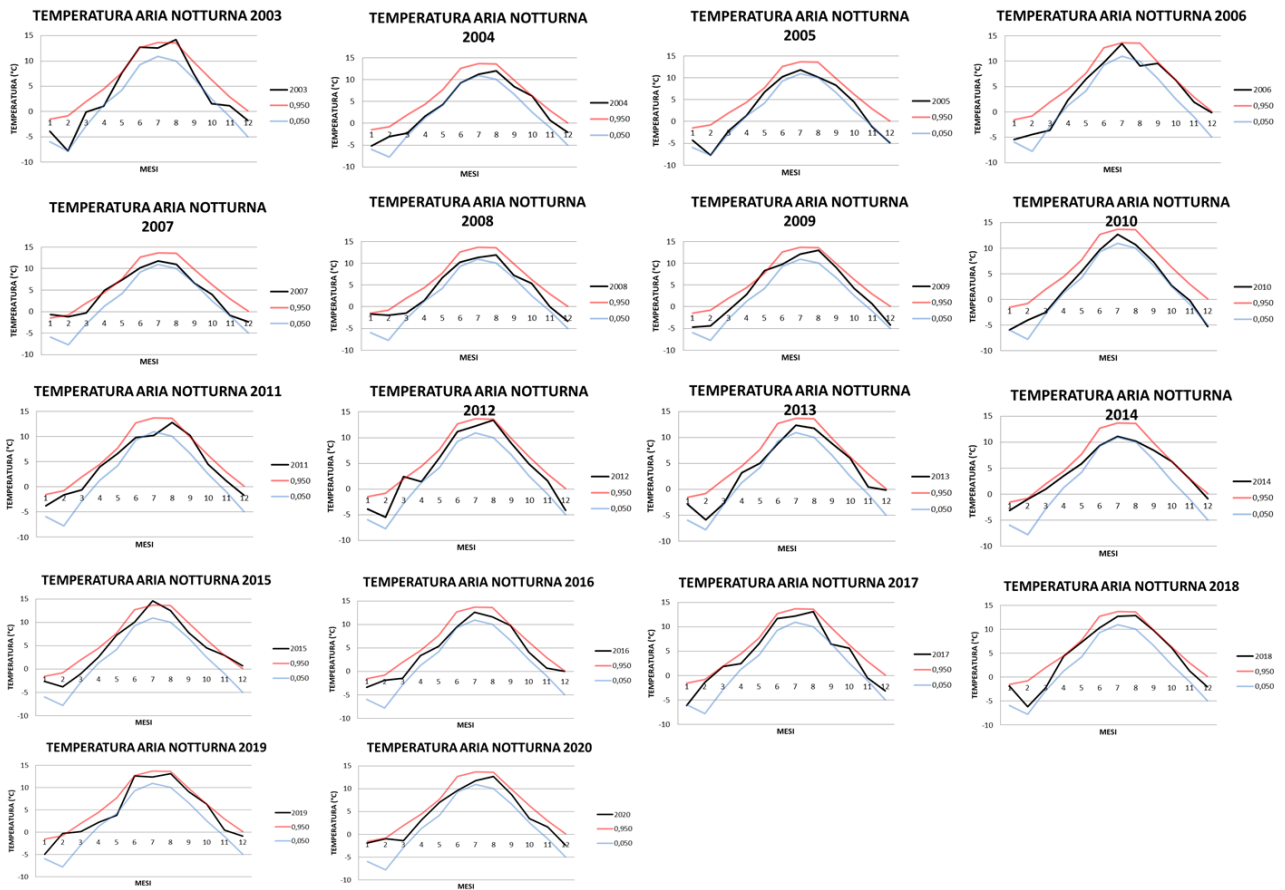


Figura 4 temperature mensili dell'aria notturna 2003-2020 Monte Bondone.

TEMPERATURA DIURNA MENSILE DELL'ARIA (TA)

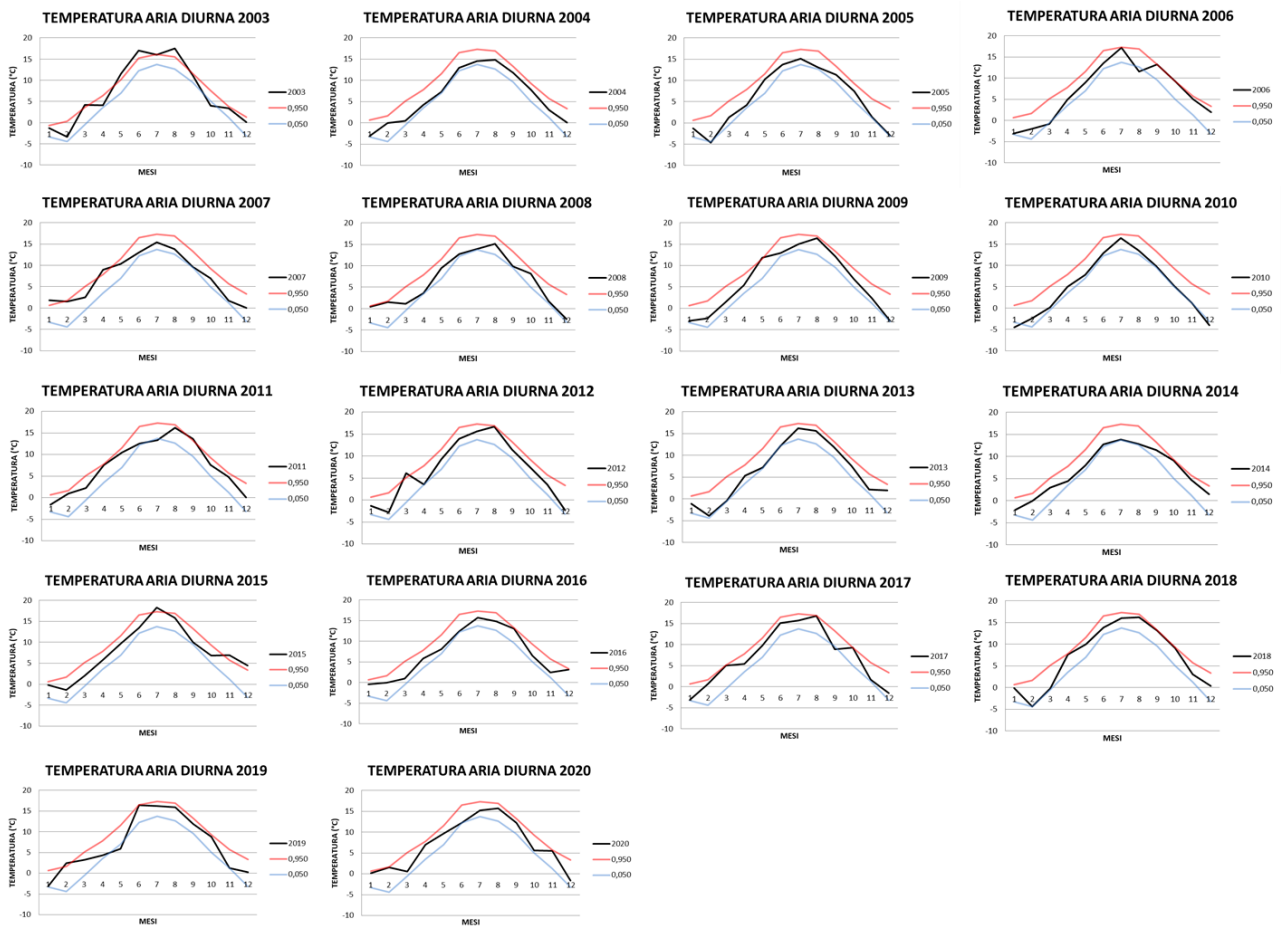


Figura 5 temperature mensili dell'aria diurna 2003-2020 Monte Bondone.

DEFICIT PRESSIONE VAPORE MENSILE (VPD)

L'andamento del deficit di pressione di vapore (VPD) è molto variabile (Figura 6). Si assiste ad un incremento fino a luglio per poi diminuire fino ad ottobre per poi crescere nuovamente fino alla fine dell'anno. Luglio risulta il mese con valori di VPD più alti (3,4 hPa; 50° percentile) e novembre il più basso (1.3 hPa; 50° percentile). Si ha una maggiore variabilità tra valori estivi di circa 3 hPa (0.05-0.95 percentile), mentre per quelli invernali è di circa 1,5 hPa.

PERCENTILI DEFICIT PRESSIONE VAPORE ACQUEO 2003-2020

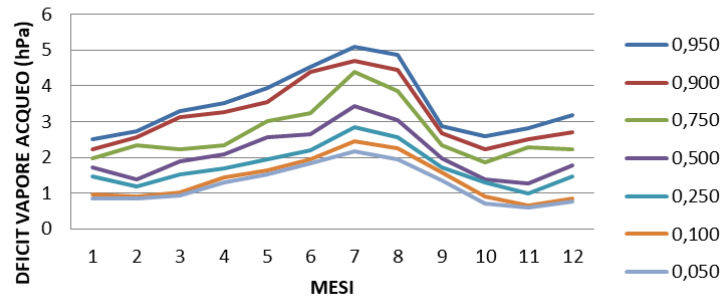


Figura 6 percentili mensili deficit vapore acqueo 2003-2020 Monte Bondone.

PRECIPITAZIONI MEDIE MENSILI (P)

L'andamento delle precipitazioni è molto irregolare (Figura 7). Il mese più piovoso risulta essere maggio (4,265 mm/giorno; 50° percentile). Gli anni più piovosi (Figura 8), dove si sono registrate anomalie sono stati il 2004 (ottobre), il 2006 (agosto) e il 2014 (luglio). Invece scarse piovosità per il periodo sono state registrate nel 2017 (aprile e maggio).

PERCENTILI PRECIPITAZIONI 2003-2019

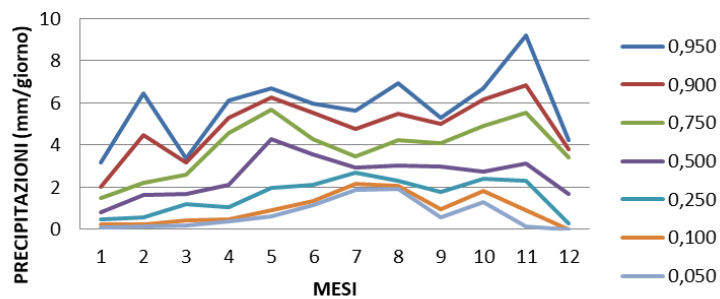


Figura 7 percentili mensili delle precipitazioni 2003-2019 Monte Bondone.

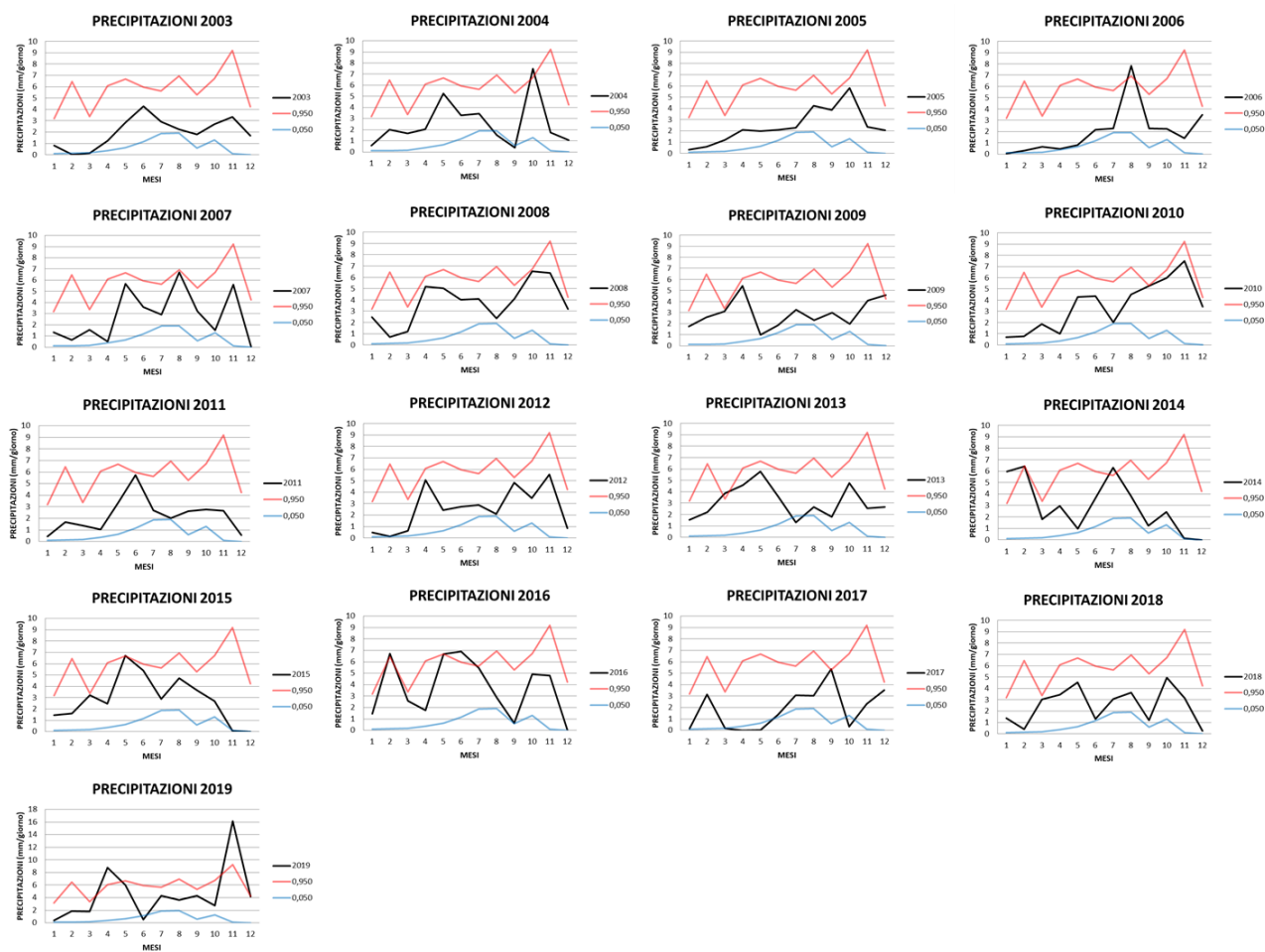


Figura 8 precipitazioni mensili 2003-201 Monte Bondone9.

TEMPERATURA MEDIA DEL SUOLO MENSILE (TS)

La temperatura del suolo (-2 cm) ha una curva a campana (Figura 9). Nei mesi invernali sono basse per poi crescere nei mesi estivi e poi calare di nuovo. Il mese in cui il terreno è più freddo risulta essere febbraio (0,6 °C; 50° percentile), mentre quello più caldo è agosto (16,6 °C; 50° percentile). Nei mesi invernali la variabilità è approssimativamente di 3°C, mentre in estate è di circa 5 °C.

L'andamento della curva della temperatura del suolo a -5 cm (Figura 10) è simile a quello della temperatura a -2 cm. La differenza sta nei valori più bassi di quello più profondo. Infatti il mese in cui è più freddo il terreno risulta essere febbraio (0,9 °C; 50° percentile) e quello più caldo è estivo, agosto (16,3 °C; 50° percentile) la variabilità tra i valori invernali è di circa 3°C, mentre per quelli estivi è approssimativamente di 3,5 °C.

Anche per temperatura del suolo a maggiore profondità (-10 cm) il discorso è simile per gli altri due andamenti sopra citati (Figura 11). Qua si hanno differenze inferiori tra l'inverno (2 °C circa) e tra i mesi estivi (2°C circa). Il mese in cui il terreno è più freddo è marzo, con 1,9°C (50° percentile), mentre il più caldo risulta essere agosto con 14,4°C (50° percentile). In questo andamento le temperature non scendono mai al di sotto dello zero.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-2 cm) 2003-2020

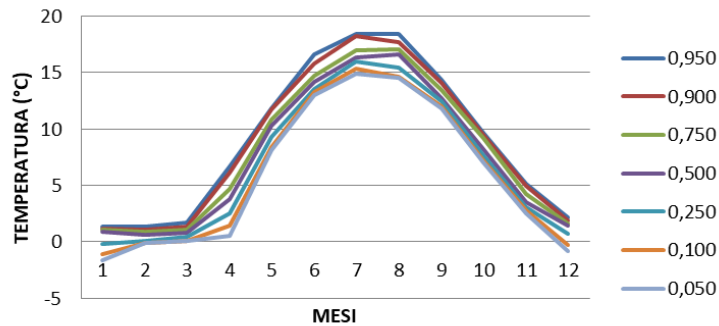


Figura 9 percentili temperatura del suolo mensile a 2 cm di profondità.2003-2020Monte Bondone.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-5 cm) 2003-2020

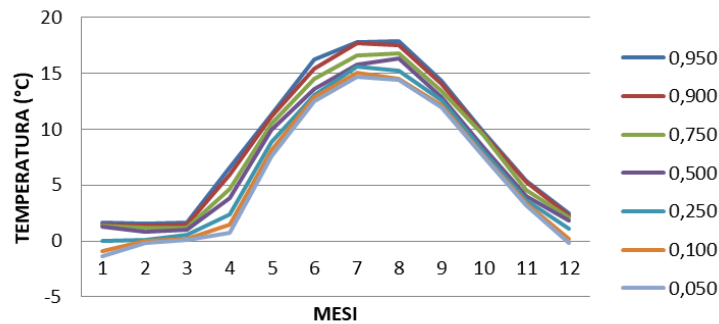


Figura 10 percentili temperatura del suolo mensile a 5 cm di profondità.2003-2020Monte Bondone.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-10 cm) 2003-2020

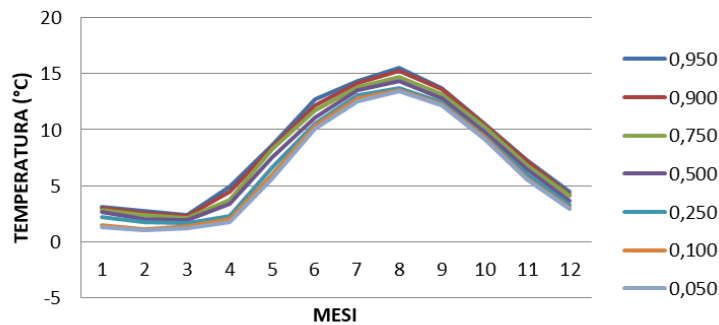


Figura 11 percentili temperatura del suolo mensile a 10 cm di profondità.2003-2020Monte Bondone.

RADIAZIONE GLOBALE SOLARE MENSILE (SW)

La curva della radiazione solare globale segue un andamento simile a quello della temperatura media (Figura 12 e 13). Nei mesi invernali si ha una bassa radiazione che aumenta in estate per poi calare in seguito. Il valore medio mensile più alto si registra in estate a luglio ($260,2 \text{ W/m}^2$; 50° percentile) e quello più basso a

dicembre ($57,8 \text{ W/m}^2$; 50° percentile). La differenza inter-annuale tra valori estivi è di circa 50 W/m^2 , mentre tra quelli invernali 20 W/m^2 . Gli anni associati ad una anomalia positiva della radiazione solare sono stati il 2007 (luglio) ed il 2008 (febbraio), mentre quello con una scarsa radiazione risulta essere il 2014 (luglio, agosto).

PERCENTILI RADIAZIONE GLOBALE SOLARE MEDIA MENSILE 2003-2020

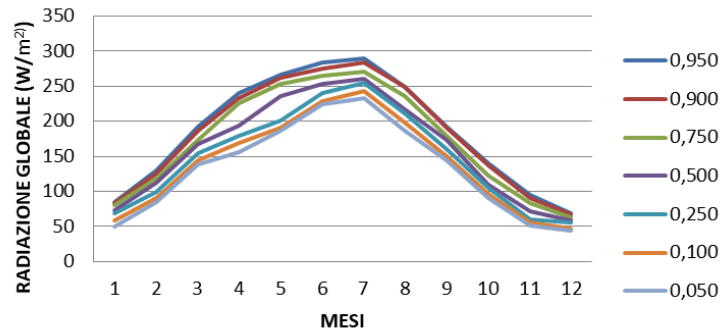
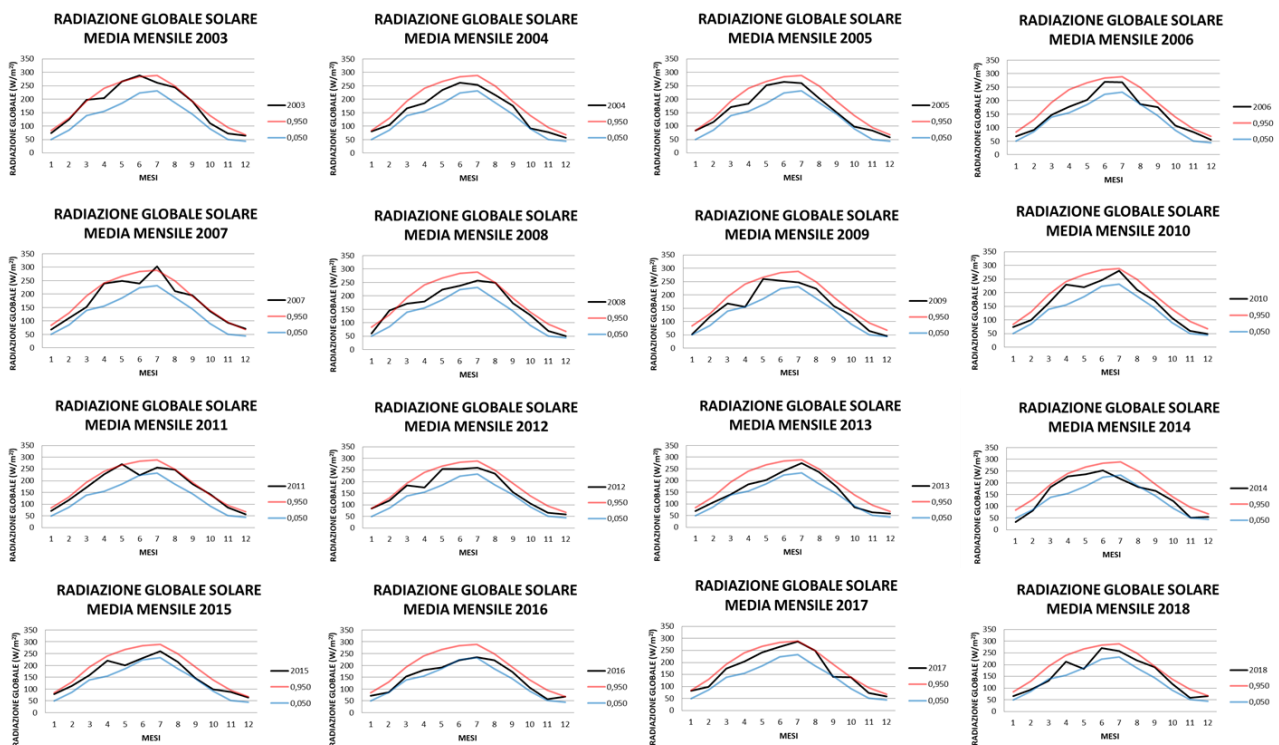


Figura 12 percentili mensili della radiazione globale 2003-202 Monte Bondone..



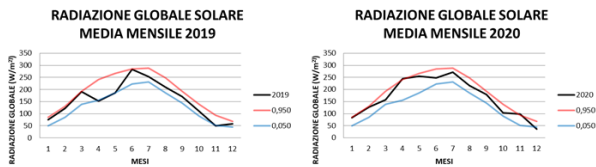


Figura 13 radiazione globale solare mensile 2003-2020 Monte Bondone.

CONTENUTO IDRICO DEL SUOLO MENSILE (SWC)

L'andamento dell'umidità del suolo a 10 cm di profondità è irregolare (Figura 14). Il valore più alto si registra a aprile (44,4 %; 50° percentile) mentre quello meno umido è a luglio (35,2%; 50° percentile). Le differenze inter-annuali sono elevate, infatti a gennaio risulta essere di quasi il 45%, mentre ad aprile è meno marcata, circa il 40%.

L'andamento dell'umidità del suolo (-20 cm) è abbastanza costante (Figura 15). Il mese in cui il suolo è più umido risulta essere aprile (52,5% vol; 50° percentile) mentre quello meno è giugno (46,2 % vol; 50° percentile). Nel mese più umido la differenza tra i valori è di circa il 24%, mentre a gennaio supera il 30%.

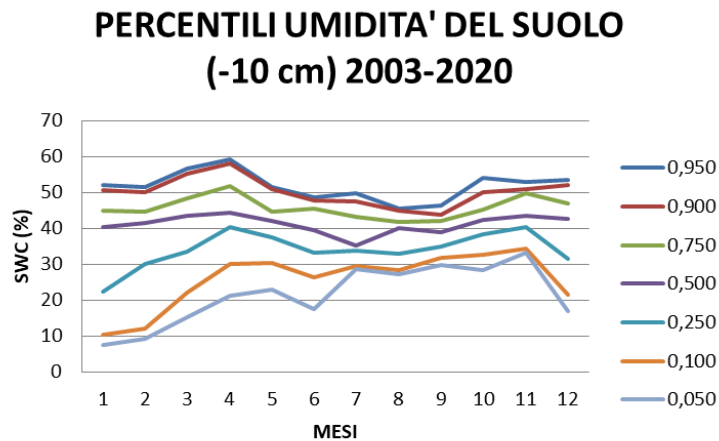


Figura 14 percentili umidità del suolo mensile a 10 cm di profondità 2003-2020 Monte Bondone.

PERCENTILI UMIDITA' DEL SUOLO (-20 cm) 2003-2020

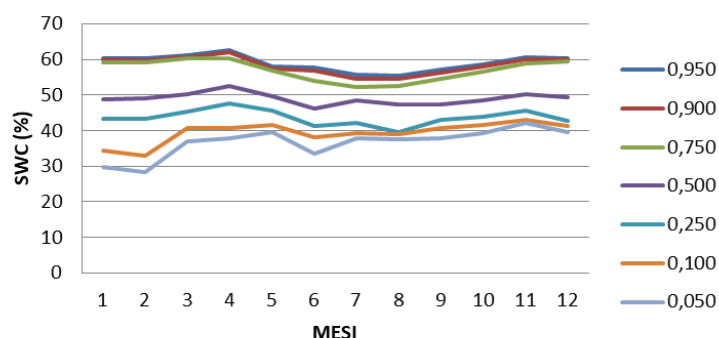


Figura 15 percentili umidità del suolo mensile a 20 cm di profondità 2003-2020 Monte Bondone..

Nella Figura 14 si può notare come l'umidità del suolo ad una profondità di 10 cm sia maggiore nei periodi invernali e minore in quella estivi. Nella Figura 15 invece i valori sono molto simili per tutta la durata dell'anno.

SCAMBIO NETTO ECOSISTEMICO (NEE)

La Figura 16, 17 e 18 rappresenta l'andamento dello scambio netto medio ecosistemico a intervallo mensile. Dalla figura si nota come nei periodi fine primaverili/estivi, cioè da aprile, i valori scendono abbondantemente sotto lo zero testimoniando un assorbimento netto di CO₂ atmosferica per poi a luglio tornare positivi. Questo è dovuto alla prevalenza dell'assorbimento del carbonio nei mesi estivi grazie alla fotosintesi. Successivamente a luglio, dopo il taglio del prato, si ha una emissione di CO₂ dovuta invece alla prevalenza della respirazione ecosistemica sulla fotosintesi. A settembre si ha un leggero declino della NEE, sempre dovuto alla prevalenza della fotosintesi della vegetazione erbacea ormai cresciuta nuovamente dopo il taglio estivo sullo scambio netto di CO₂ nell'atmosfera, per poi aumentare nei mesi autunnali e stabilizzarsi sui livelli di respirazione invernale. A giugno si registra il valore di massimo assorbimento (-3,9 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre a novembre il valore massimo di rilascio (1 gC/m²/giorno; 50° percentile). Tra i valori le maggiori differenze si hanno nel mese di giugno che raggiunge circa i 3 gC/m²/giorno. Il 2014 è stato l'anno con maggiori anomalie positive per la NEE (gennaio, marzo e novembre), è tuttavia necessario specificare che a differenza di tutti gli altri anni il 2014 ha una copertura di osservazioni dirette di solo il 54% nell'arco dell'anno e che di conseguenza i risultati di NEE riflettano in modo importante la loro integrazione con valori modellizzati. Anche a luglio 2015 è stata registrata un'anomalia positiva di NEE. Invece si ha avuto un cospicuo assorbimento netto di CO₂ a giugno 2009 e maggio 2011.

Per quanto riguarda lo scambio netto diurno il discorso è analogo allo scambio netto medio. L'andamento della curva è uguale, ma i valori sono più bassi (maggiori in assoluto). Infatti a giugno si raggiungono i -9,6 gC/m²/giorno (50° percentile), mentre a dicembre il valore massimo è a marzo 0,7 gC/m²/giorno 50° percentile. Qua le differenze nei mesi estivi sono contenute come per lo scambio netto medio, approssimativamente 3 gC/m²/giorno. luglio 2015 ha registrato un'anomalia di rilascio di CO₂.

Discorso differente per lo scambio netto notturno, dove la respirazione segue un andamento a campana. La massima respirazione si ha nei periodi estivi a luglio (8,5 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre la minima nei periodi invernali, più precisamente a gennaio (0,9 gC/m²/giorno; 50° percentile). Le differenze sono simili a quelle dei due andamenti precedenti. (circa 3 gC/m²/giorno). Gli anni in cui la NEE mensile è risultata oltre il 95° percentile manifestando assorbimenti netti ridotti o emissioni al di sopra della norma sono stati il 2003 (giugno), 2014 (marzo) e 2020 (dicembre); al contrario il 2004 (maggio) ha registrato una anomalia per quanto riguarda l'assorbimento.

L'andamento è simile sia per la GPP NT che per la GPP DT (Figura 19, 20 e 21). La GPP raggiunge un picco nei mesi estivi a giugno, per poi calare lentamente fino a dicembre. A settembre si ha un piccolo incremento di produzione. Per la GPP NT si ha a giugno un valore di 12,3 gC/m²/giorno (50° percentile) mentre per la GPP DT si ha 10,4 gC/m²/giorno (50° percentile). Anche i valori inferiori hanno mesi uguali, sempre invernali, per la GPP NT il valore minimo è a dicembre (0,1 gC/m²/giorno; 50° percentile), mentre per la GPP DT è 0,2 gC/m²/giorno; 50° percentile. Le differenze tra i valori sono maggiori per la GPP DT (circa 6 gC/m²/giorno) mentre per la GPP NT è di circa 3 gC/m²/giorno. Per la GPP NT gli anni anomali sono stati il 2018 (giugno) con un forte incremento mentre il 2003 (luglio e agosto) e il 2014 (giugno) con una forte diminuzione. Per la GPP DT invece il 2014 (ottobre) e il 2020 (maggio) risultato anomali positivamente.

L'andamento sia per i valori medi mensili di REco NT che la REco DT è a campana (Figura 22, 23 e 24). Il culmine della curva si raggiunge nei mesi estivi con un abbondante rilascio di anidride carbonica mentre nei mesi invernali è più contenuta. Nello specifico il mese con rilascio maggiore evidenziato da entrambe le curve è luglio. REco NT (9,5 gC/m²/giorno; 50° percentile) REco DT (7,7 gC/m²/giorno; 50° percentile). Nei mesi invernali si ha minore attività di respirazione. In particolare per REco NT si ha a febbraio il valore minimo (0,9 gC/m²/giorno; 50° percentile) e anche per REco DT si ha a febbraio come valore minimo (1,0 gC/m²/giorno; 50° percentile). Le differenze tra i valori estivi sono simili: circa +3 gC/m²/giorno per REco NT e per REco DT +4 gC/m²/giorno. Per quanto riguarda la REco NT gli anni 2003 (giugno) e 2014 (settembre) sono stati anomali positivamente mentre il 2008 (luglio) negativamente. La REco DT invece negli anni 2014 (ottobre), 2015 (giugno) e 2017 (agosto) ha mostrato anomalie oltre il 95 percentile, mentre il 2011 (giugno e luglio) ha anomalie al di sotto del 0,05 percentile.

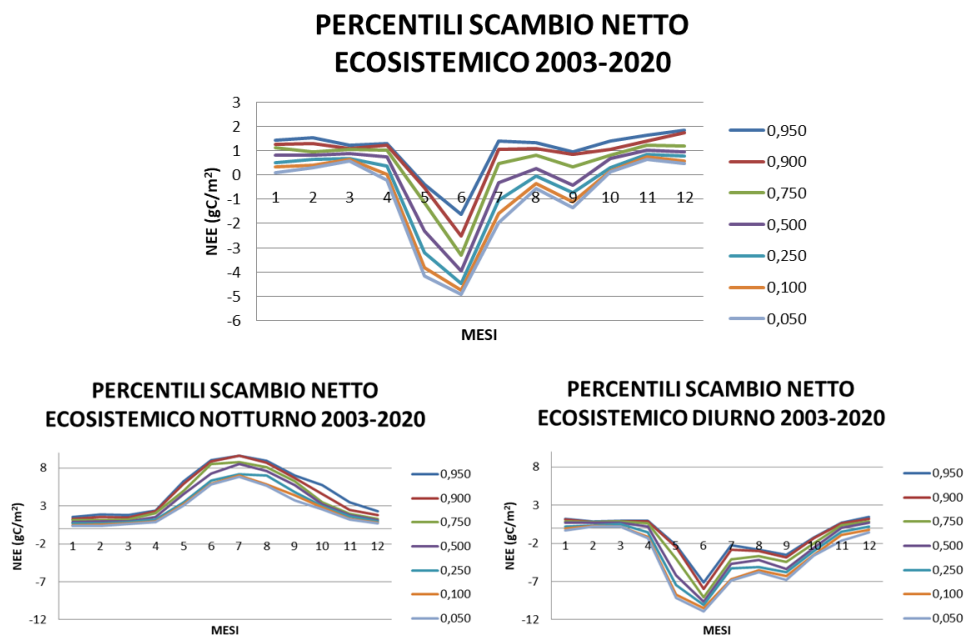


Figura 16 percentili scambio netto ecosistemico mensili 2003-2020 Monte Bondone.

NEE

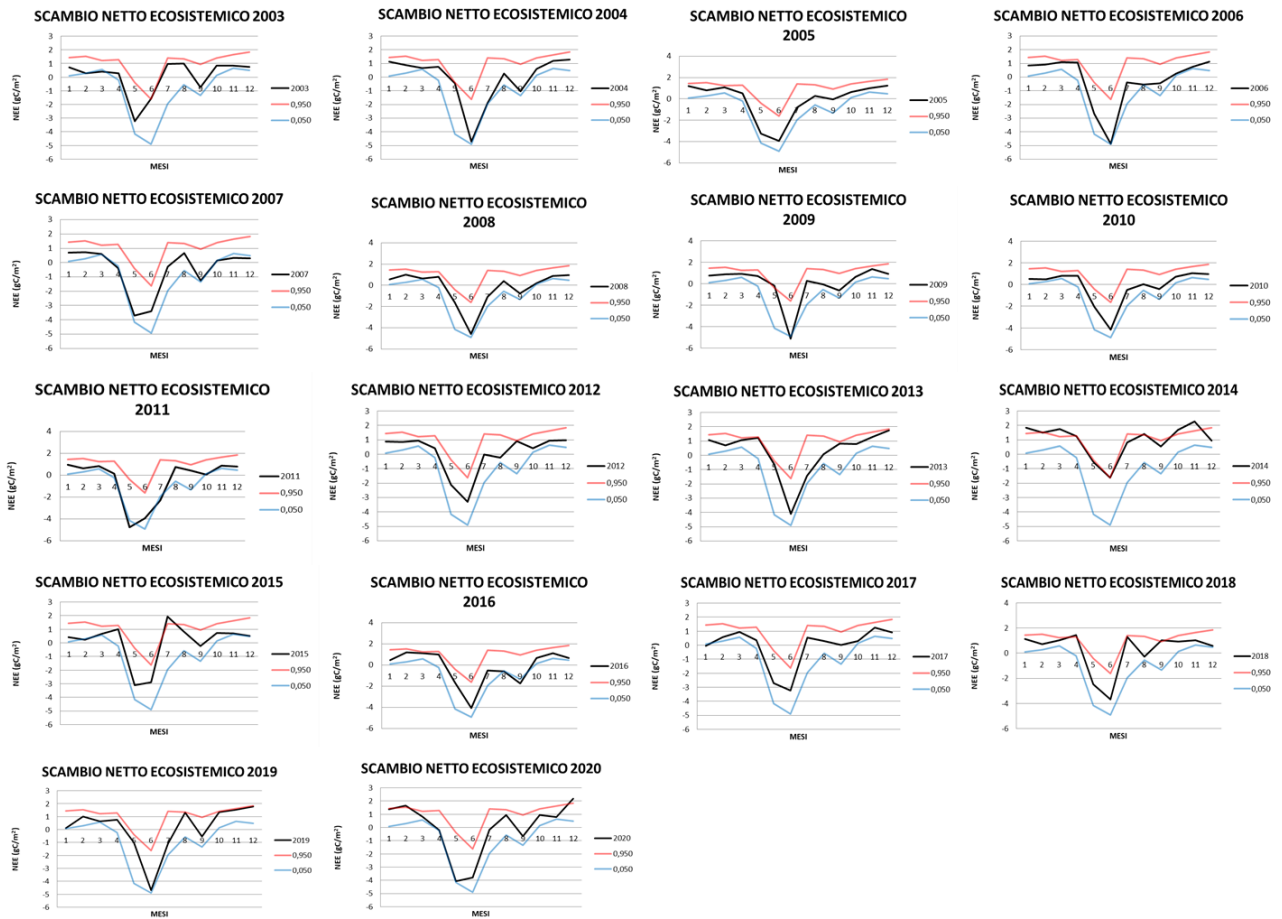


Figura 17 media mensile di dati giornalieri scambio netto ecosistemico 2003-202 Monte Bondone.

NEE NOTTURNO

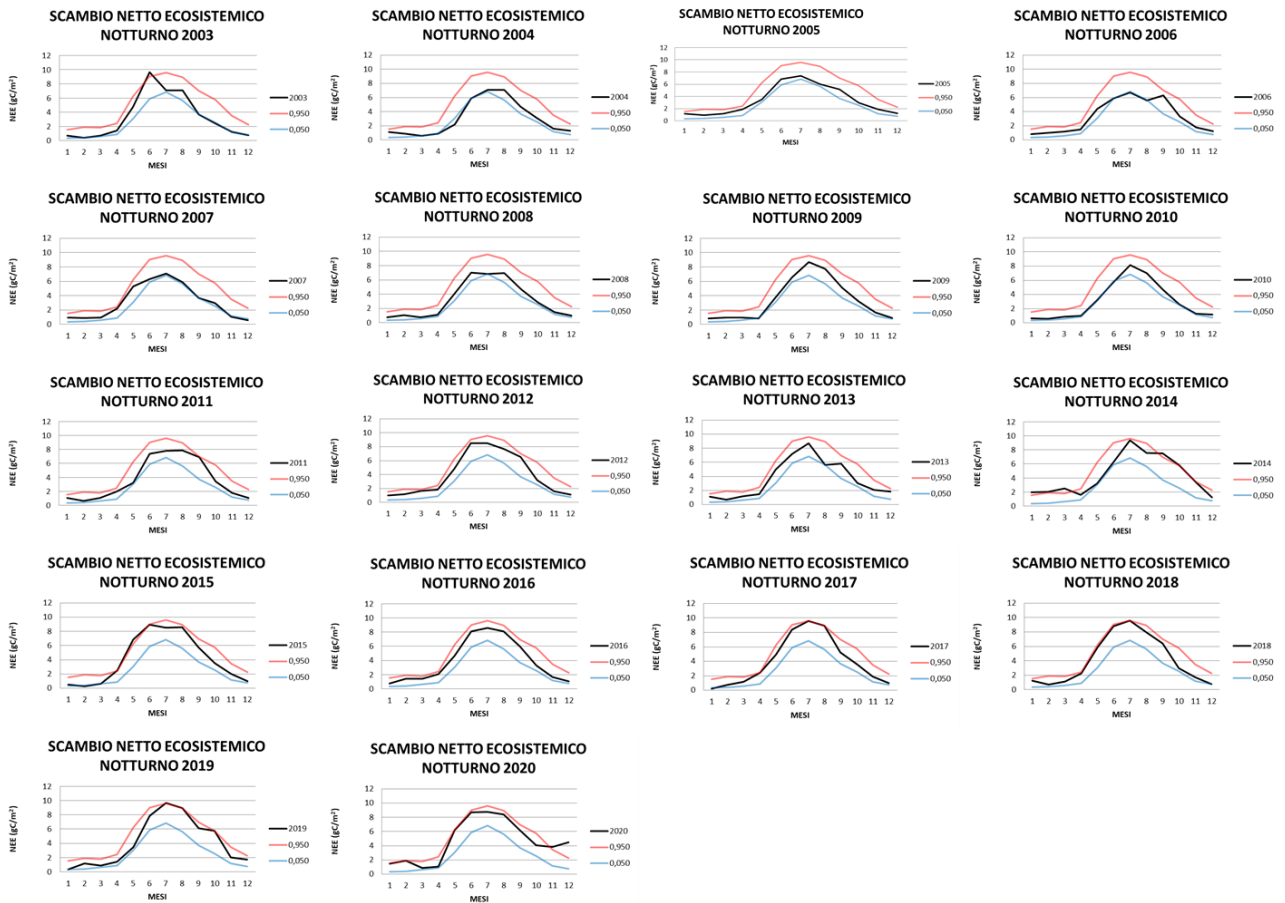


Figura 18 scambio netto ecosistemico notturno media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Monte Bondone.

NEE DIURNO

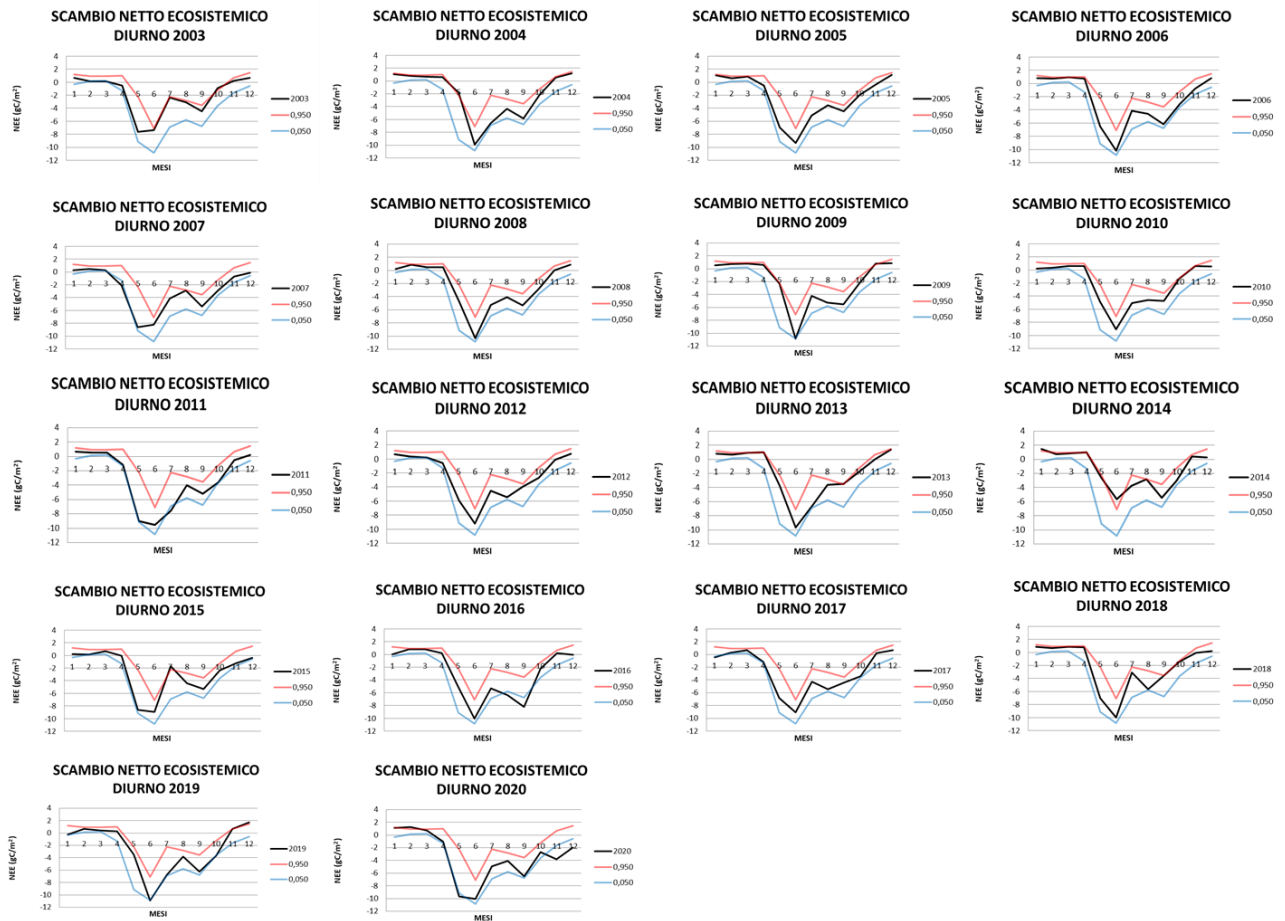


Figura 19 scambio netto ecosistemico diurno media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Monte Bondone.

PRODUZIONE PRIMARIA LORDA ECOSISTEMICA (GPP)

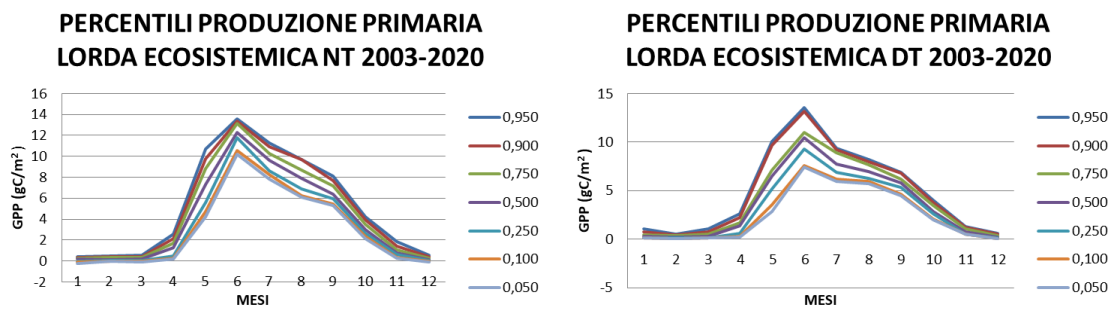


Figura 20 andamento GPP NT e DT Monte Bondone.

GPP NT

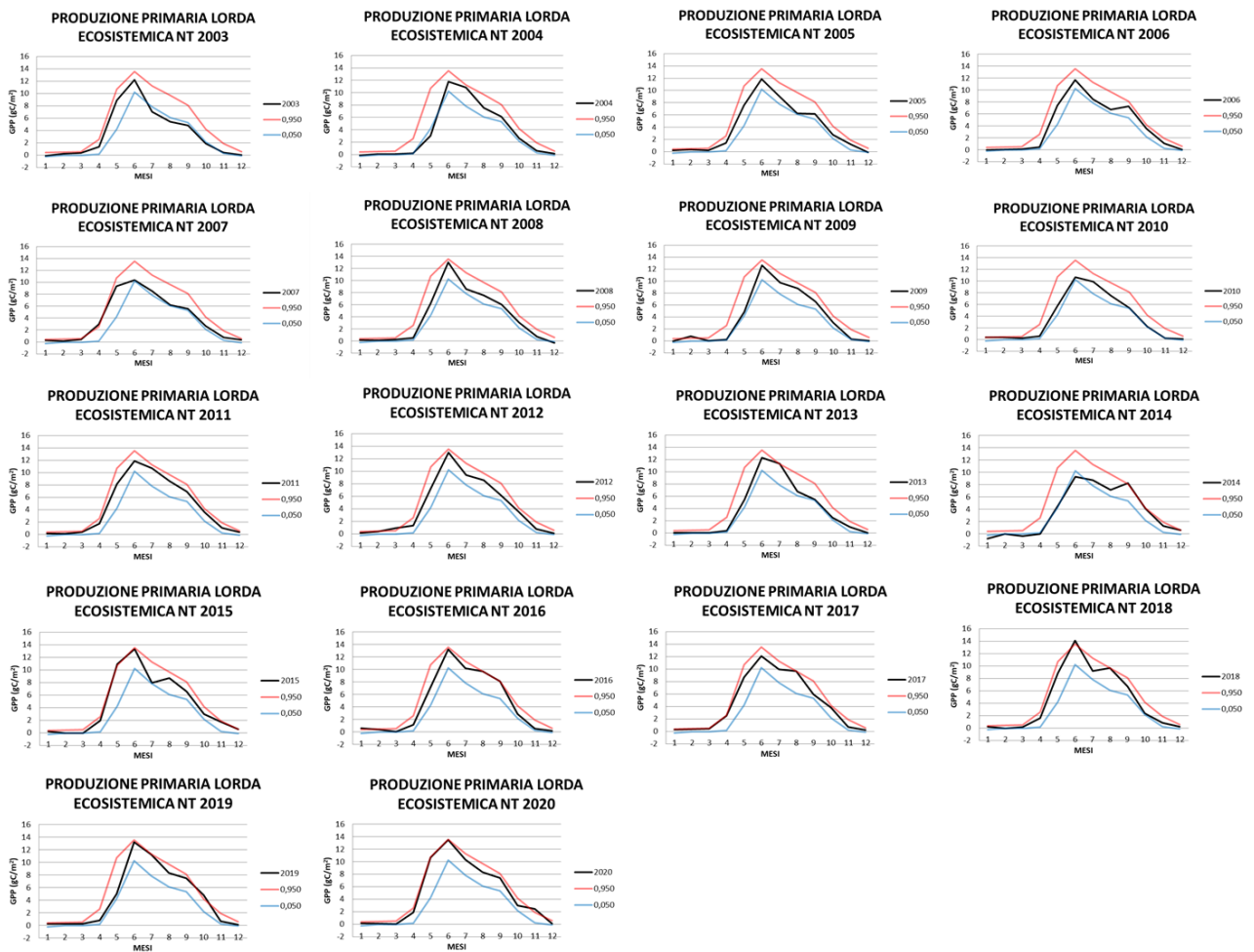


Figura 21 produzione primaria lorda ecosistemica NT media mensile d dati giornalieri 2003-202 Monte Bondone.

GPP DT

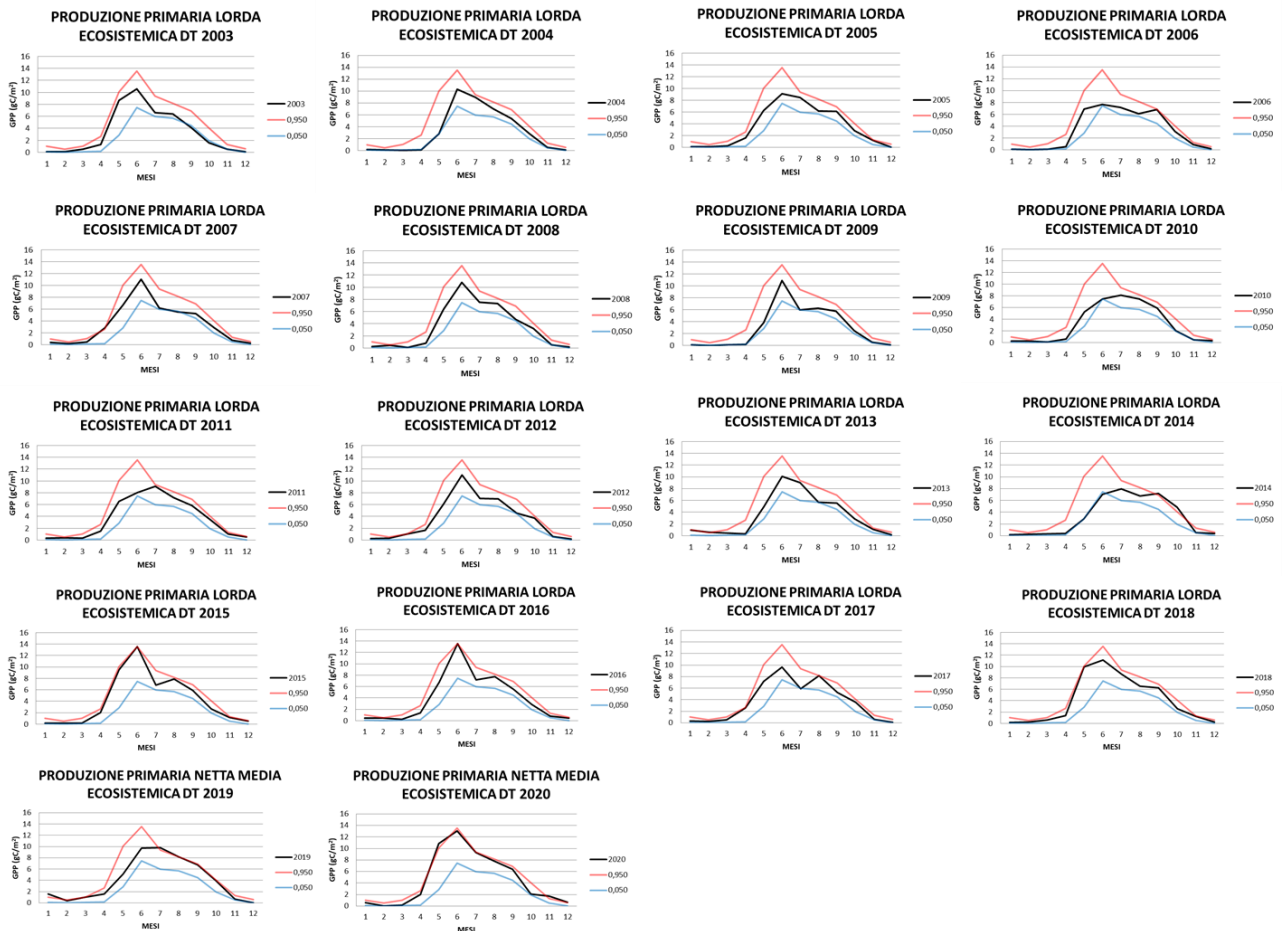


Figura 22 produzione primaria lorda ecosistemica DT media mensile d dati giornalieri 2003-202 Monte Bondone.

RESPIRAZIONE ECOSISTEMICA (REco)

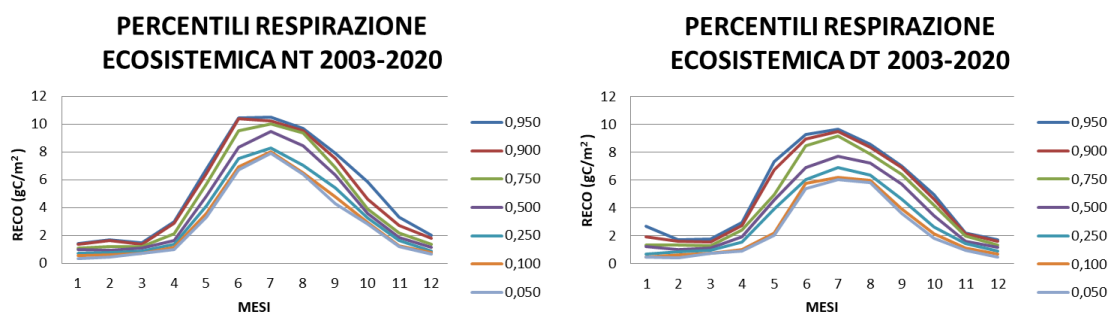


Figura 23 percentili respirazione ecosistemica mensile 2003-202 Monte Bondone.

REco NT

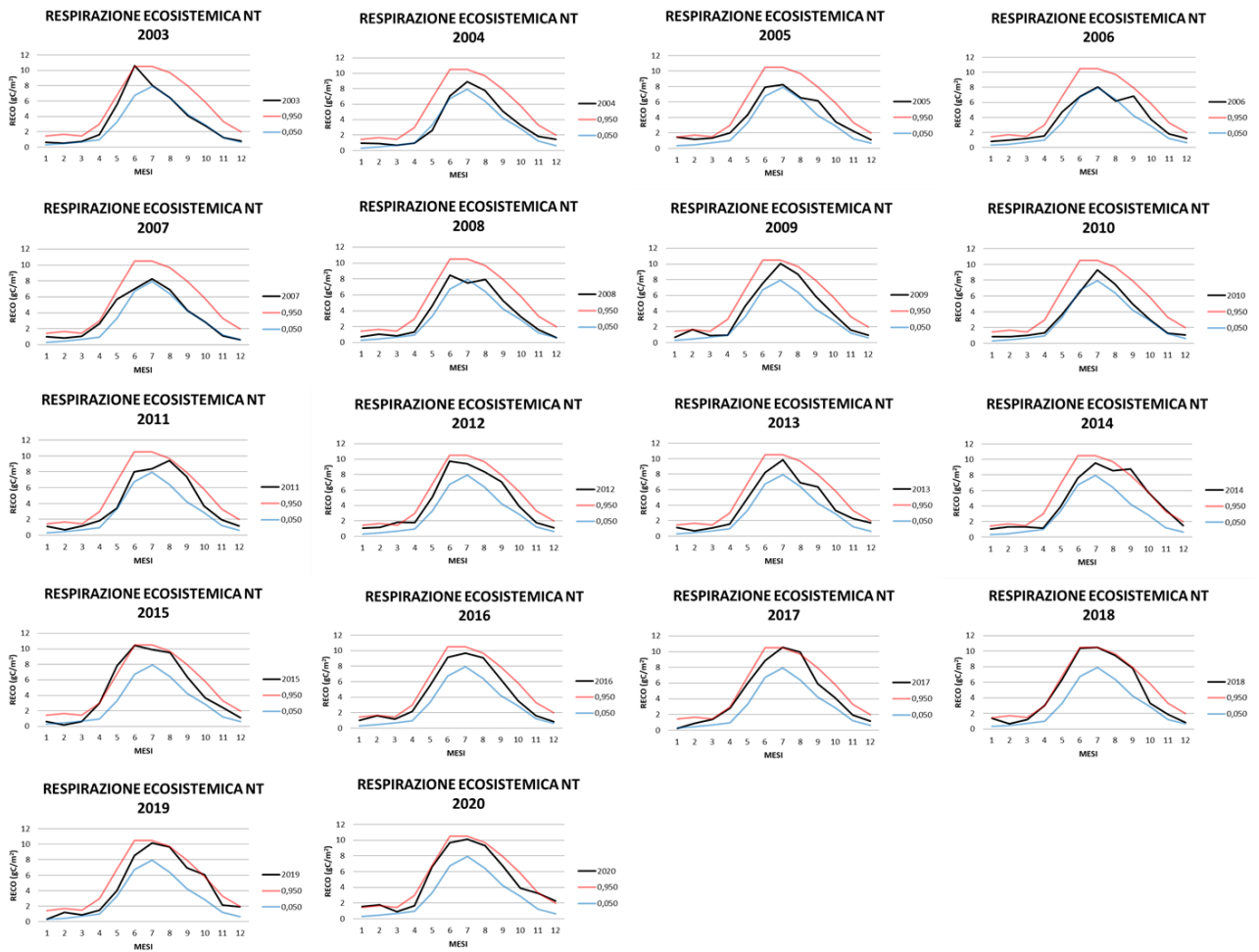


Figura 24 respirazione ecosistemica NT media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Monte Bondone.

REco DT

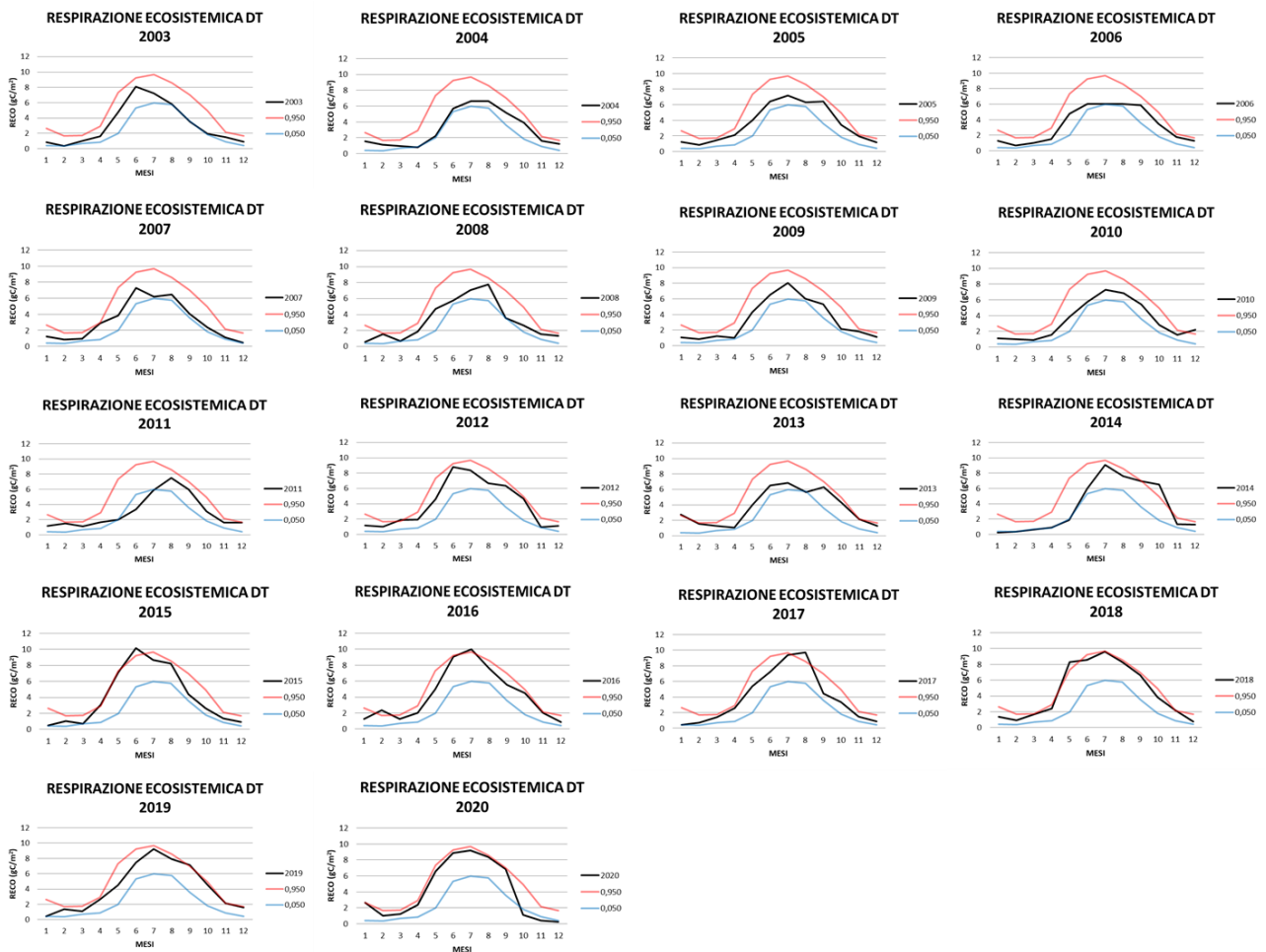


Figura 25 respirazione ecosistemica DT media mensile di dati giornalieri 2003-2020.

Nella Tabella 2 vengono riportati i valori massimi e minimi delle variabili analizzate con i relativi anni e mesi del sito di Monte Bondone. Al segno positivo significa che i valori della variabili erano maggiori del percentile 0,95, viceversa al segno negativo vengono assegnati i valori al di sotto del percentile 0,05.

VARIABILI	RECORD	
	+	-
TA MEDIA	2003 giugno, agosto 2015 luglio	2014 giugno, luglio, agosto 2019 maggio
TA NOTTURNA	2003 agosto 2015 luglio	2006 agosto 2014 giugno, luglio, agosto
TA DIURNA	2003 giugno, agosto 2012 marzo	2006 agosto 2014 giugno, luglio, agosto 2019 maggio
P	2004 ottobre 2006 agosto 2014 luglio	2017 aprile, maggio
SW	2007 luglio 2008 febbraio	2014 luglio, agosto
	EMISSIONE CO ₂	ASSORBIMENTO CO ₂
NEE MEDIA	2014 gennaio, marzo, novembre	2009 giugno

	2015 luglio	2011 maggio
NEE NOTTURNA	2003 giugno 2014 marzo 2020 dicembre	2004 maggio
NEE DIURNA	2015 luglio	
GPP NT	2018 giugno	2003 luglio, agosto 2014 giugno
GPP DT	2014 ottobre 2020 maggio	
RECO NT	2003 giugno 2014 settembre	2008 luglio
RECO DT	2014 ottobre 2015 giugno 2017 agosto	2011 giugno, luglio

Tabella 2 record anni e mesi Monte Bondone .

3.1.1 Flussi cumulati di CO₂ - Monte Bondone

L'andamento cumulato della NEE (Figura 26) evidenzia un'emissione netta di CO₂ fino ad aprile, per poi assumere una pendenza negativa fino a luglio, e successivamente rialzarsi. Il 2011 risulta essere l'anno con maggiore assorbimento di CO₂ (circa 250 gC/m²/giorno). Il 2014 ha un andamento che, per la scarsità di dati originali, non può essere considerato pienamente affidabile e rappresentativo del bilancio del carbonio del sito.

La GPP NT e la GPP DT cumulate annualmente (Figura 27 e 28) presentano lo stesso andamento a crescere dal 151esimo giorno dell'anno circa fino alla fine dell'anno. Con un massimo di 1700 gC/m²/anno circa.

Anche la RECO NT e DT (Figura 29 e 30) hanno lo stesso andamento della GPP. Qua però si ha un aumento da dopo il primo mese con un deciso incremento dopo il 121esimo giorno. Per la RECO NT il valore massimo è quasi 1800 gC/m²/anno, mentre per la RECO DT è di quasi 1650 gC/m²/anno.

SCAMBIO NETTO ECOSISTEMICO CUMULATO 2003-2020

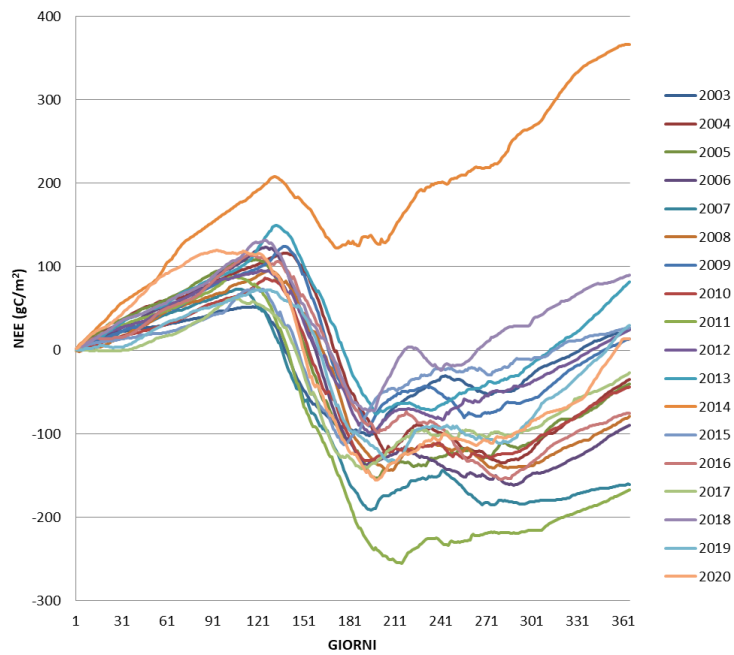


Figura 26 flusso cumulato scambio netto ecosistemico 2003-202 Monte Bondone.

PRODUZIONE PRIMARIA LORDA ECOSISTEMICA CUMULATA NT 2003-2020

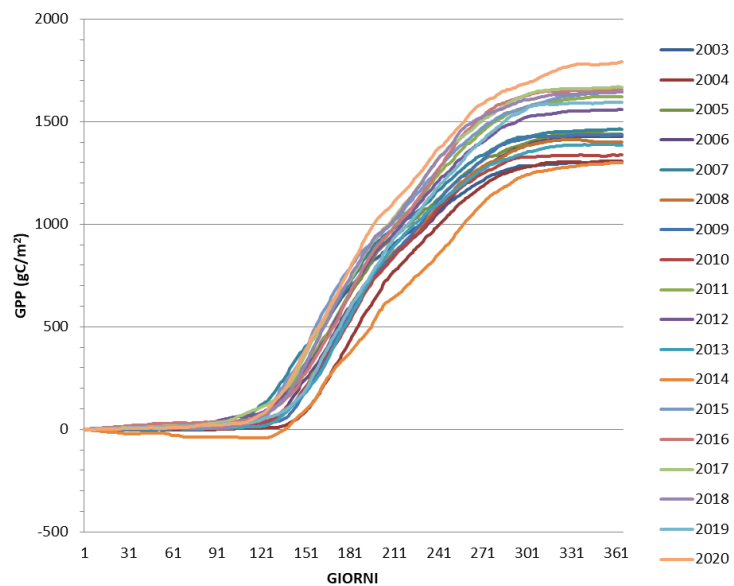


Figura 27 flusso cumulato produzione primaria lorda ecosistemica NT 2003-202 Monte Bondone.

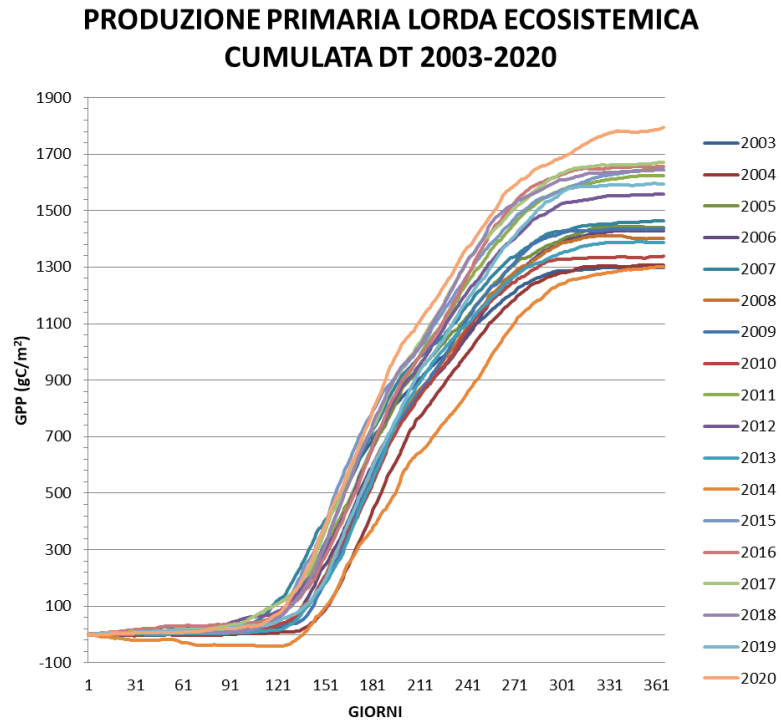


Figura 28 flusso cumulato produzione primaria lorda ecosistemica DT 2003-202 Monte Bondone.

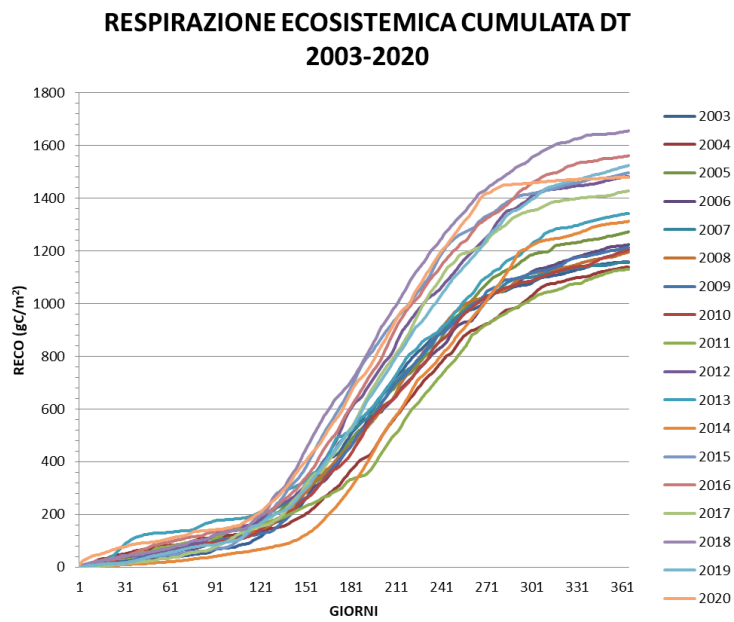


Figura 29 flusso cumulato respirazione ecosistemica DT 2003-202 Monte Bondone.

RESPIRAZIONE ECOSISTEMICA CUMULATA NT 2003-2020

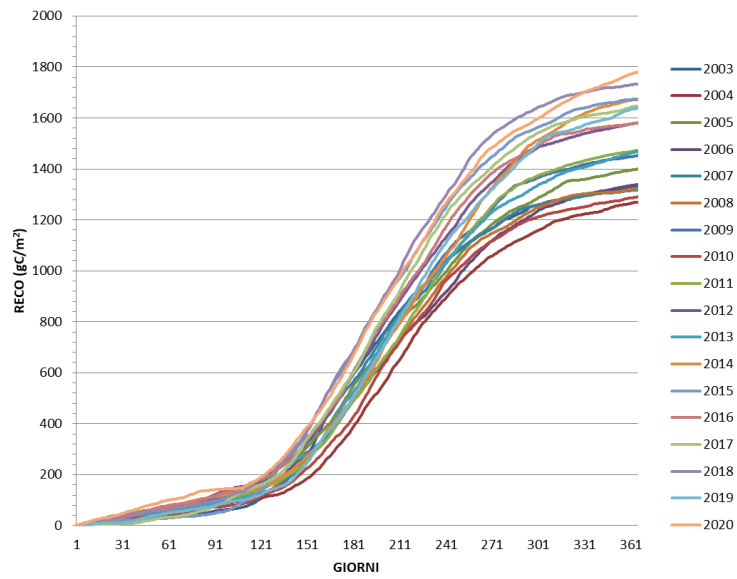


Figura 30 *flusso cumulato respirazione ecosistemica NT 2003-202 Monte Bondone.*

3.2 Lavarone

TEMPERATURA DELL'ARIA (TA)

La curva della temperatura media dell'aria segue il classico andamento a campana durante il periodo annuale (Figura 31 e 32). Nei mesi estivi raggiunge i valori più alti. In particolare il picco delle temperature dell'aria si ha a agosto (16,5°C; 50° percentile) mentre a gennaio si osserva il valore più basso (-0.9 °C; 50° percentile). La variabilità nei mesi estivi è poco più di 4°C mentre nei mesi invernali è più elevata (circa 6°C). Le temperature invernali scendono di poco sotto lo zero. Le anomalie più alte per l'elevata temperatura si sono riscontrate nel 2003 (agosto), 2015 (luglio), 2017 (marzo) e 2019 (febbraio). Temperature invece al di sotto del 5° percentile si sono registrate nel 2006 (agosto) e 2014 (giugno, luglio e agosto).

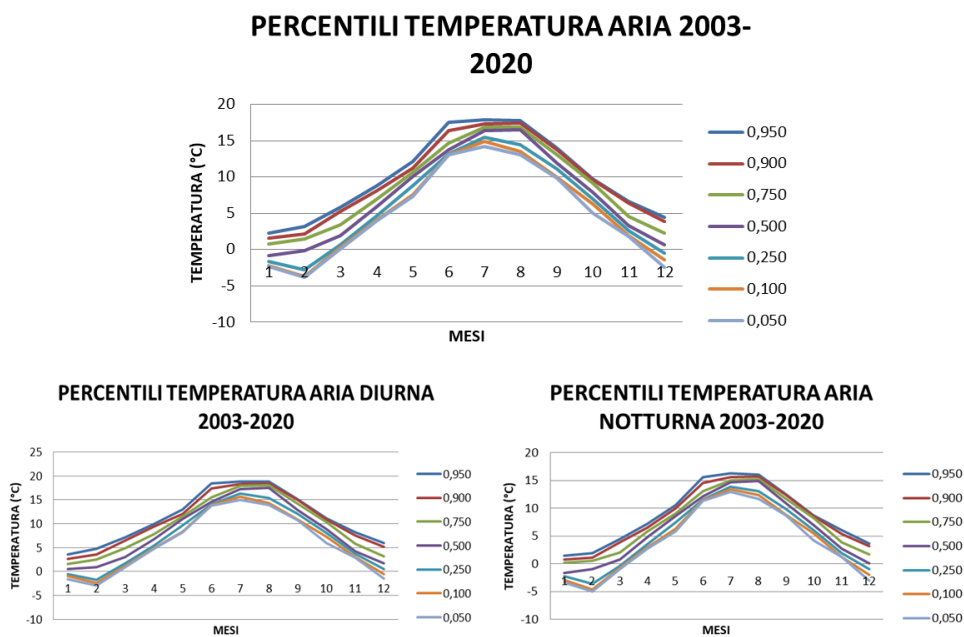


Figura 31 percentili temperatura dell'aria media, notturna e diurna 2003-202 Lavarone.

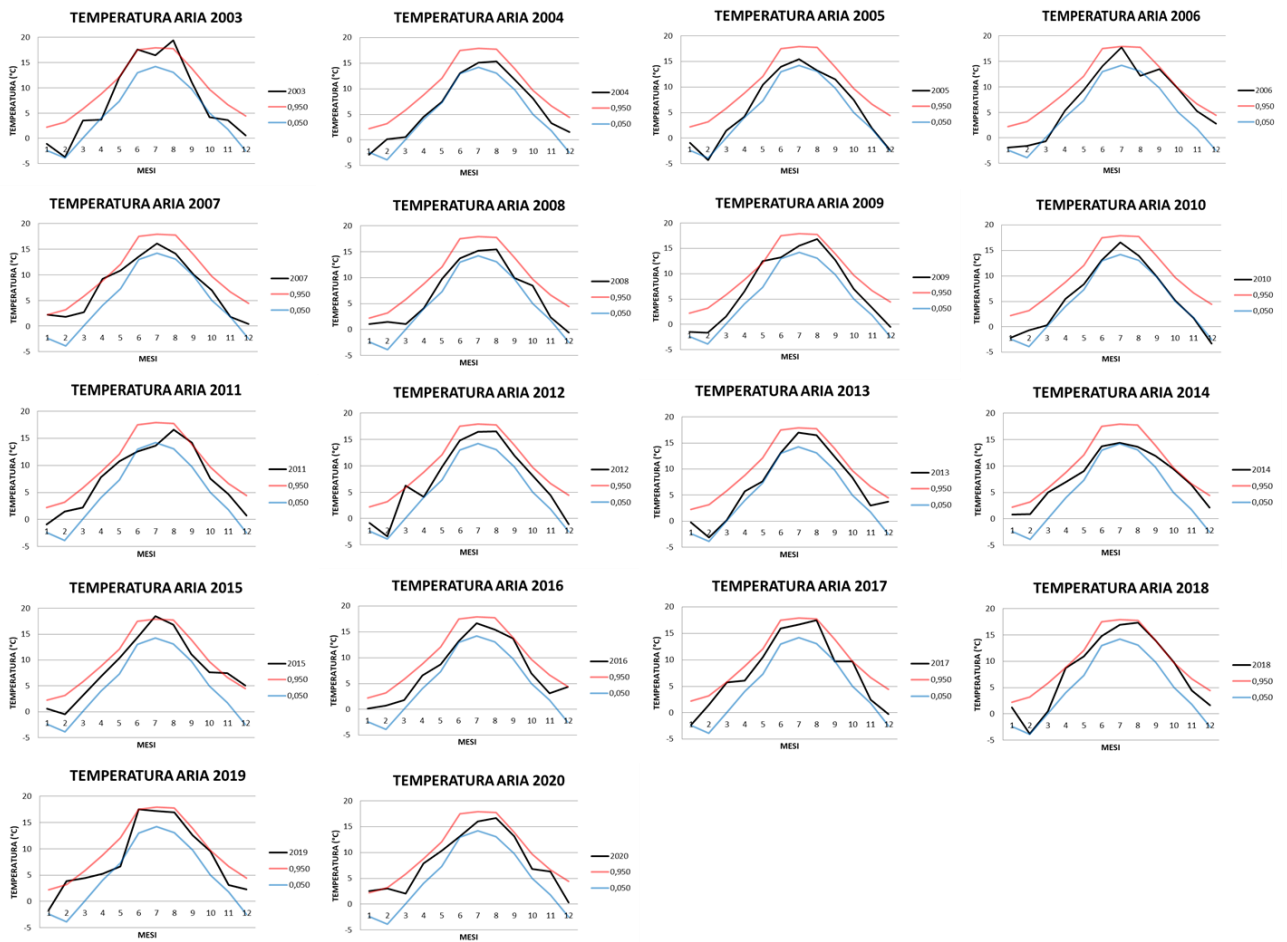


Figura 32 medie mensili della temperatura dell'aria 2003-2020 Lavarone.

TA NOTTURNA

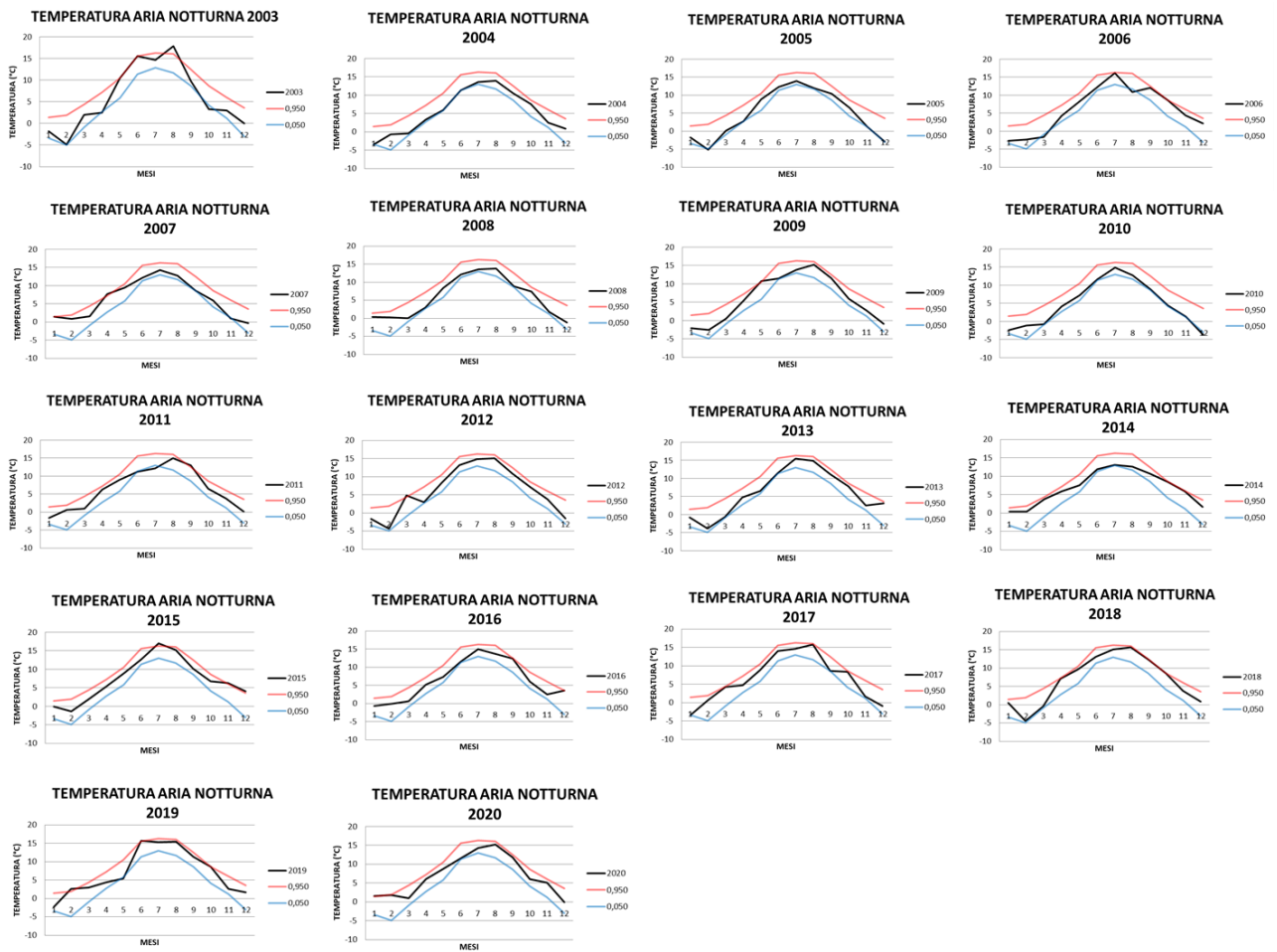


Figura 33 temperature mensili dell'aria notturna 2003-202 Lavarone.

TA DIURNA

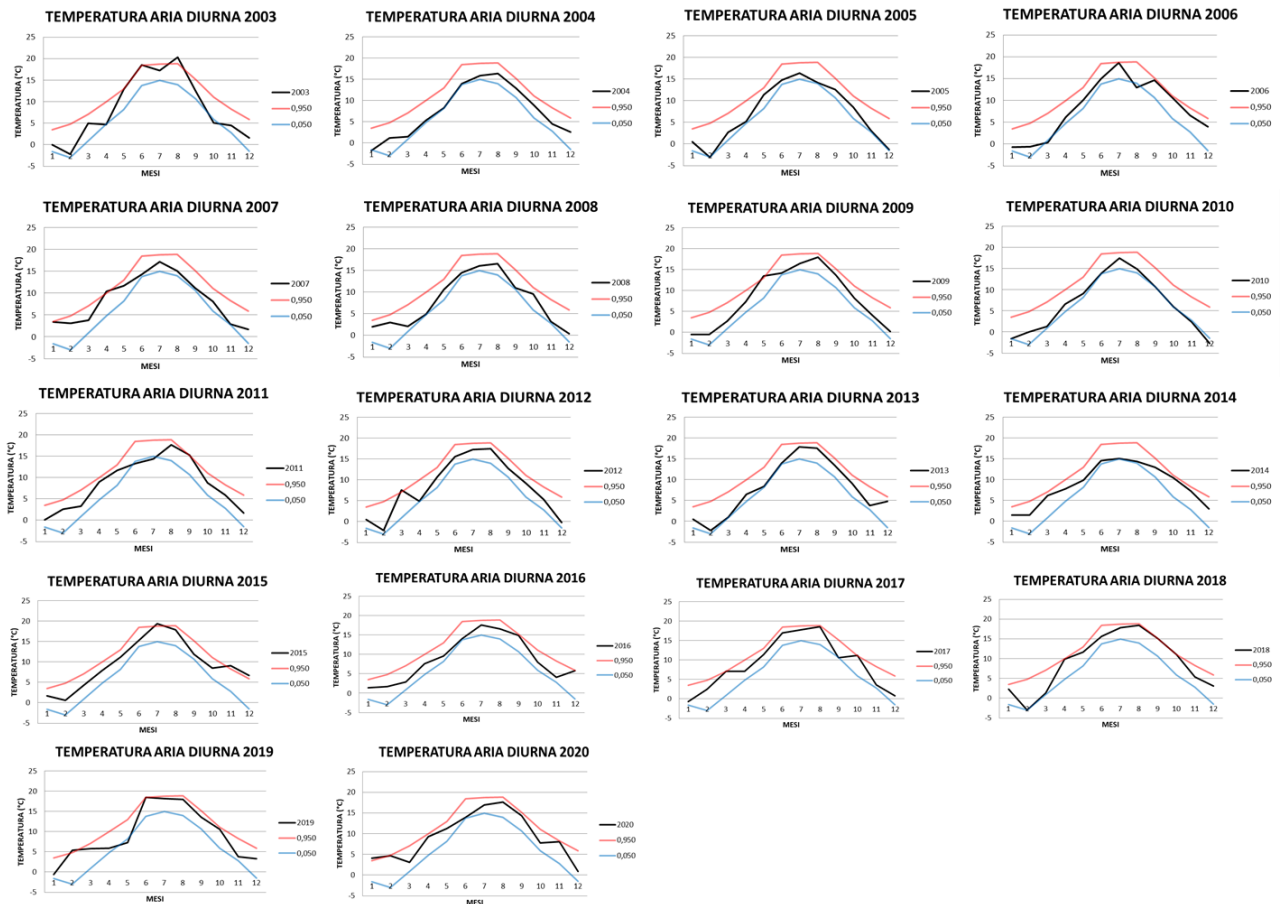


Figura 34 temperature mensili dell'aria notturna 2003-202 Lavarone.

DEFICIT PRESSIONE VAPORE MENSILE (VPD)

L'andamento del deficit della pressione di vapore acqueo è crescente fino al culmine nel mese di luglio per poi calare leggermente ad agosto e in maniera marcata a settembre (Figura 35). Da novembre a dicembre è in leggera risalita. Luglio è il mese con il valore più alto (4,4 hPa; 50° percentile) mentre novembre ha il valore più basso 1,6 hPa (50° percentile). Nei mesi invernali la differenza tra il 5° e il 95° percentile è di massimo 3,5 hPa, mentre in quelli estivi arriva all'incirca a 4 hPa.

PERCENTILI DEFICIT PRESSIONE VAPORE ACQUEO 2003-2020

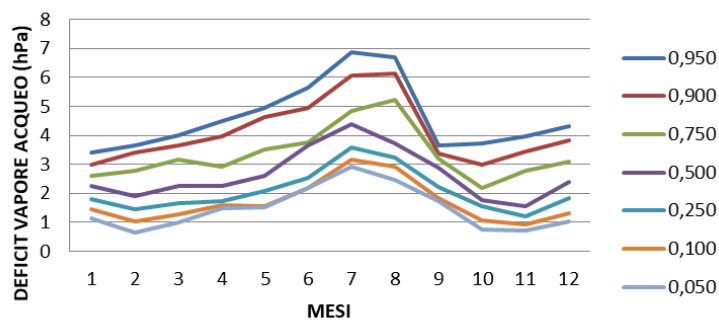


Figura 35 percentili mensili deficit vapore acqueo 2003-202 Lavarone.

Dai primi mesi dell'anno fino ad agosto la pressione esercitata aumenta. da agosto fino a settembre diminuisce per poi aumentare leggermente fino a dicembre.

PRECIPITAZIONI MEDIE MENSILI (P)

L'andamento delle precipitazioni è quasi costante per tutto il periodo dell'anno, ma a novembre si ha un notevole incremento (Figura 36 e 37). Infatti novembre risulta essere il mese con più precipitazioni (4,2 mm/giorno; 50° percentile) mentre il mese meno piovoso risulta essere gennaio (1,3 mm/giorno; 50° percentile). La variabilità tra i percentili nel mese di novembre è la più alta ed è di quasi 11 mm/giorno mentre la più bassa si registra a settembre di poco più di 3 mm/giorno. Le precipitazioni più alte si sono registrate nel 2007 (agosto), 2011 (giugno), 2013 (maggio), 2014 (gennaio, febbraio e luglio) e nel 2019 (aprile e novembre). Invece precipitazione al di sotto dell'ultimo percentile si sono registrate nel 2015 (novembre) e 2016 (giugno).

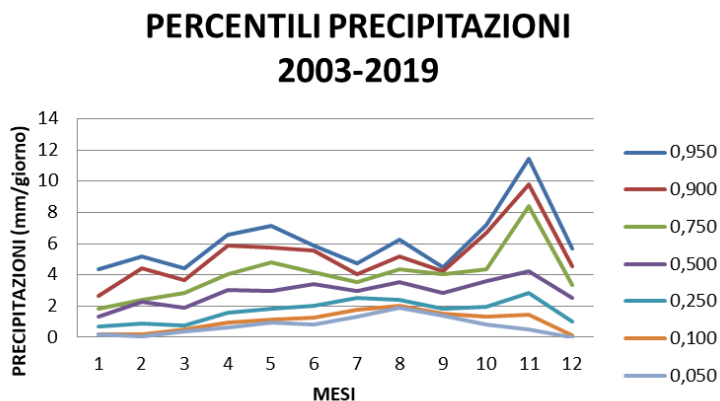


Figura 36 percentili mensili delle precipitazioni 2003-201 Lavarone.

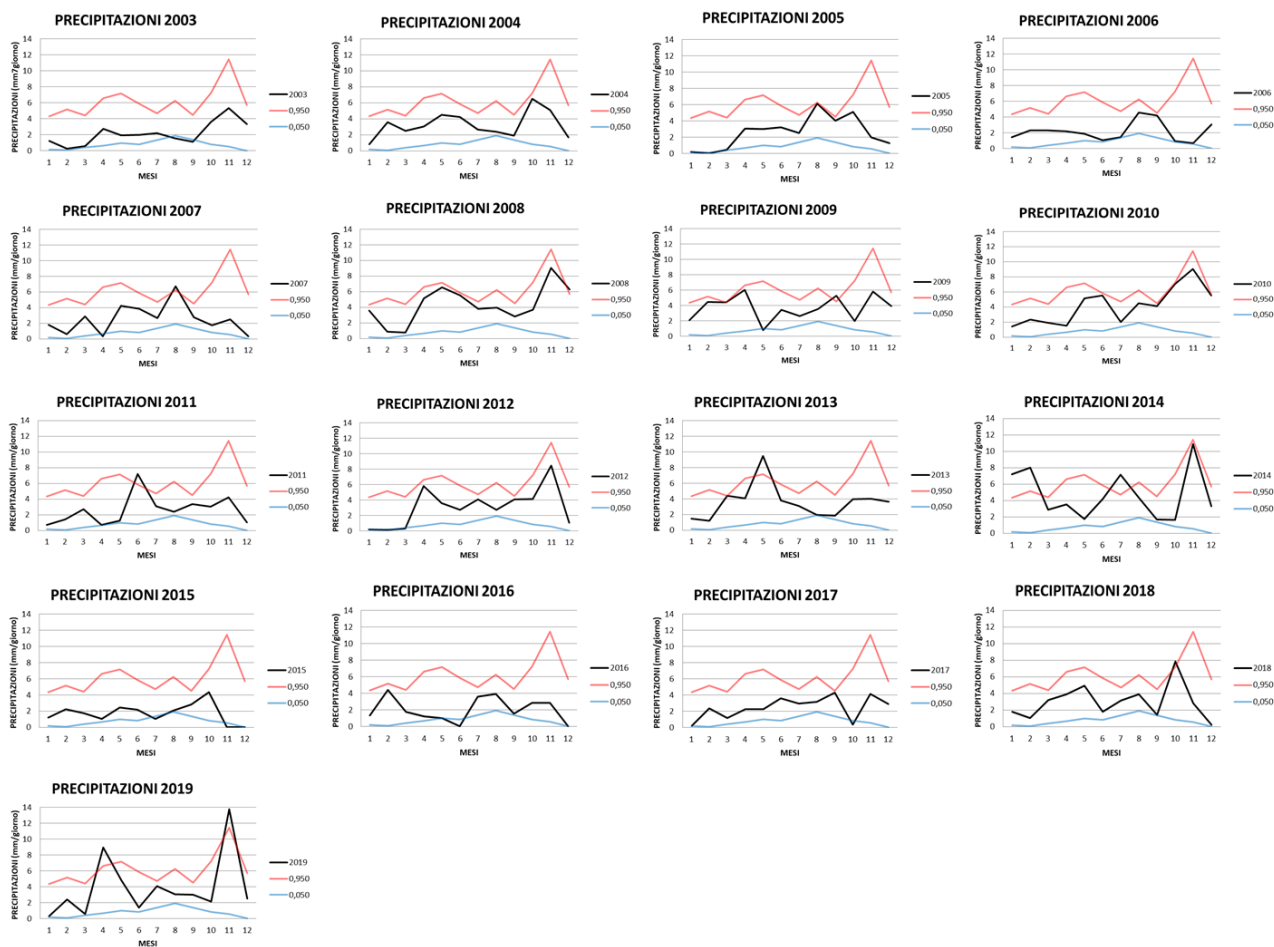


Figura 37 precipitazioni mensili 2003-201 Lavarone.

TEMPERATURA MEDIA DEL SUOLO MENSILE (TS)

A campana è la curva della temperatura del suolo -2 cm (Figura 38). Nei mesi invernali sono più basse per poi aumentare nei mesi estivi e poi calare successivamente. Il mese in cui il terreno è più caldo è agosto (13,2 °C; 50° percentile), mentre quello più freddo risulta essere febbraio (0,2°C; 50° percentile). Nei mesi invernali la differenza è approssimativamente di 2,5°C, mentre in estate è di circa 3 °C.

Anche per il sito di Lavarone l'andamento della curva della temperatura del suolo a -5 cm (Figura 39) è simile a quello della temperatura a -2 cm. Il mese in cui è più freddo il terreno risulta essere febbraio (0,6 °C; 50° percentile) e quello più caldo è agosto (12,7 °C; 50° percentile) la differenza tra i valori invernali è minima, massimo 2°C, mentre per quelli estivi è approssimativamente di 3°C.

Per la terza temperatura del suolo il discorso non cambia (Figura 40). L'andamento è a campana con i mesi più caldi, quelli estivi. Il mese in cui il terreno è più freddo è febbraio, con 1,1 °C (50° percentile), mentre il più caldo risulta essere agosto con 12,5 °C (50° percentile). Le temperature non scendono mai al di sotto dello zero. La differenza nei mesi invernali tra il 5° e il 95° percentile è approssimativamente di 1,5°C mentre per quelli estivi è di massimo 4°C.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-5 cm) 2003-2020

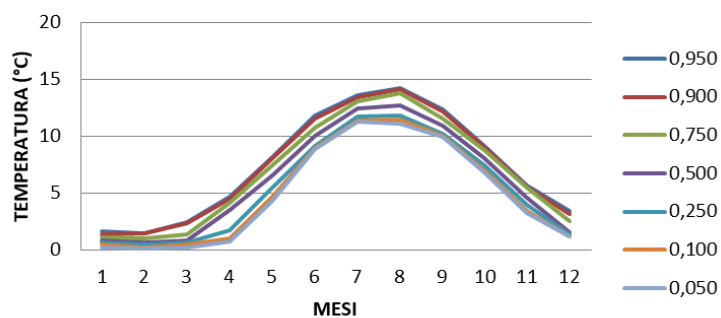


Figura 38 percentili temperatura del suolo mensile a 2 cm di profondità.2003-2020 Lavarone.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-2 cm) 2003-2020

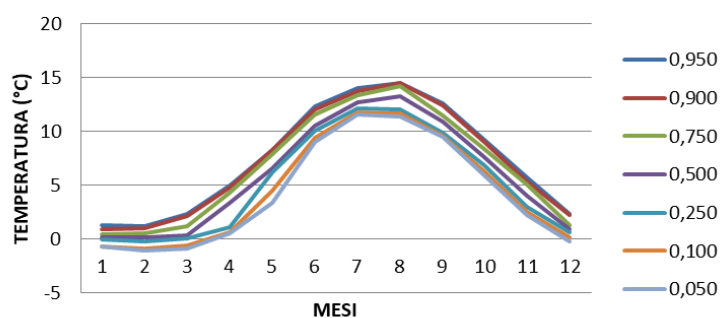


Figura 39 percentili temperatura del suolo mensile a 5 cm di profondità.2003-202 Lavarone.

PERCENTILI TEMPERATURA DEL SUOLO (-10 cm) 2003-2020

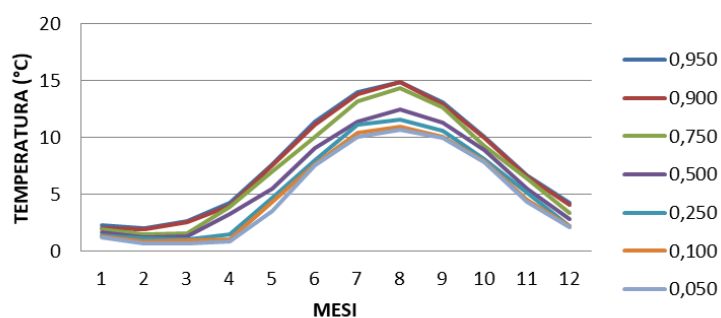


Figura 40 percentili temperatura del suolo mensile a 10 cm di profondità.2003-202 Lavarone.

RADIAZIONE GLOBALE SOLARE MENSILE (SW)

L'andamento annuale della radiazione solare globale (Figura 41 e 42) forma una curva a campana, dove nei mesi estivi si raggiungono i valori più alti e quelli invernali hanno valori più bassi. Il mese con più alta radiazione solare è luglio ($263,8 \text{ W/m}^2$; 50° percentile dei valori medi giornalieri), mentre quella più bassa si registra a dicembre ($55,2 \text{ W/m}^2$; 50° percentile). La variabilità di radiazione tra il 5° e il 95° percentile nei mesi estivi è di circa 50 W/m^2 mentre nei mesi invernali è approssimativamente di $40\text{-}50 \text{ W/m}^2$. La radiazione globale solare invece presenta solo nel 2014 a luglio ed agosto dei valori al di sotto dell'ultimo percentile.

PERCENTILI RADIAZIONE GLOBALE SOLARE MEDIA MENSILE 2003-2020

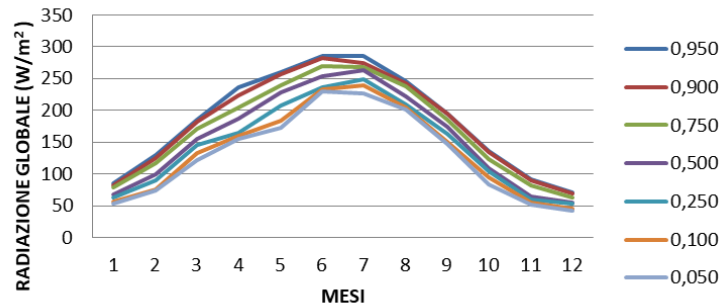


Figura 41 percentili radiazione globale mensile 2003-202 Lavarone.

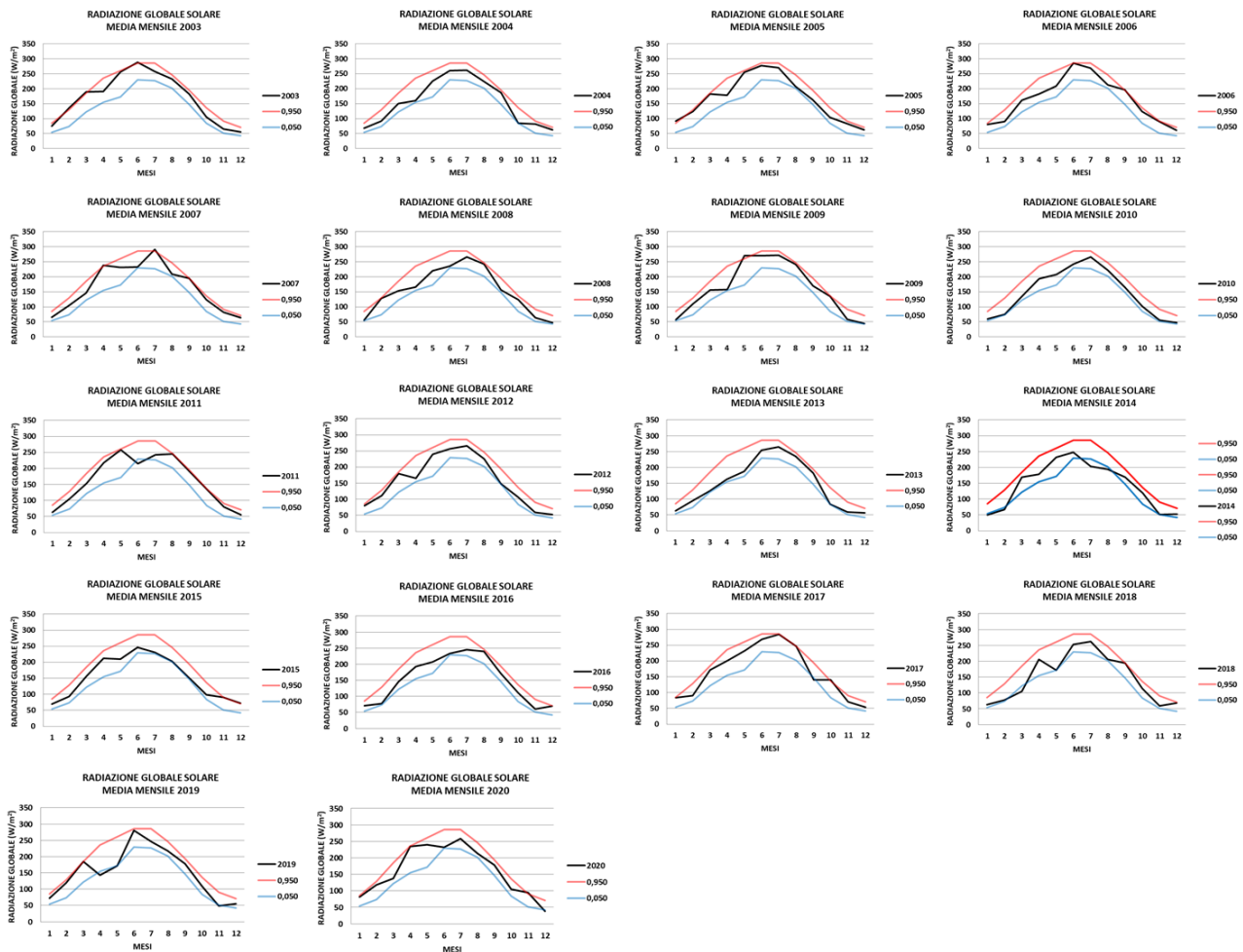


Figura 42 radiazione globale solare mensile 2003-202 Lavarone.

CONTENUTO IDRICO DEL SUOLO (SWC)

L'andamento dell'umidità del suolo a 10 cm è regolare, si ha una minima flessione da luglio ad ottobre(Figura 43). Il valore più alto si registra a marzo (40,3 %; 50° percentile) mentre quello meno umido è a agosto (32,3 %; 50° percentile). Le differenze sono mediocri in tutto l'anno. Esse sono circa il 10%.

L'andamento dell'umidità del suolo (-20 cm) è ancora più costante rispetto a quello alla profondità minore(Figura 44). In questo andamento si ha una minima flessione da luglio a ottobre. Il mese in cui il suolo è più umido risulta essere marzo (43,9% vol; 50° percentile) mentre quello meno è agosto (37,3% vol; 50° percentile). Le differenze tra i percentili durante tutto l'anno sono minime e simili come per l'andamento precedente. Infatti sono inferiori tutte al 10%. Tranne agosto che lo supera leggermente.

PERCENTILI UMIDITA' DEL SUOLO (-10cm) 2003-2020

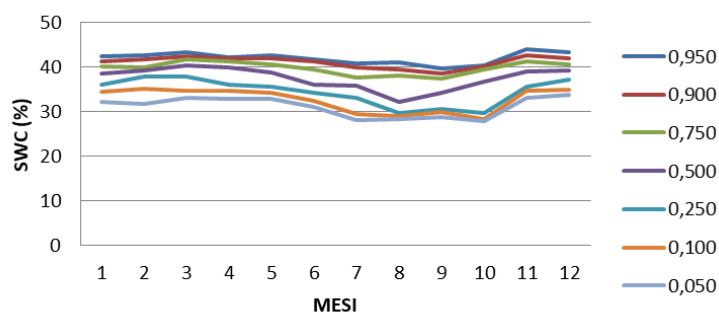


Figura 43 percentili umidità del suolo mensile a 10 cm di profondità 2003-202 Lavarone.

PERCENTILI UMIDITA' DEL SUOLO (-20 cm) 2003-2020

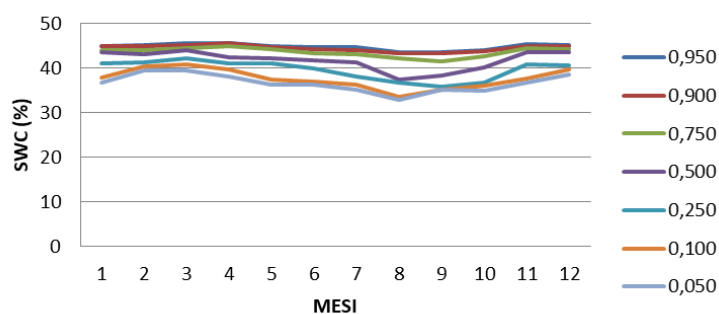


Figura 44 percentili umidità del suolo mensile a 20 cm di profondità 2003-202 Lavarone.

Nelle Figure 43 e 44 si può notare come i livelli di umidità del suolo siano pressoché costanti durante tutto il periodo dell'anno. Ad una profondità maggiore si hanno valori di umidità leggermente più alti rispetto ad strati più superficiali.

SCAMBIO NETTO ECOSISTEMA (NEE)

Lo scambio netto medio ecosistemico è rappresentato nella Figura 45 e 46 . Dalla figura si analizza come tutti i valori sono inferiori allo zero, quindi nella foresta di Lavarone il rapporto tra fotosintesi e respirazione è sempre a favore della fotosintesi. Questo significa che il bilancio è sempre a favore all'assorbimento del

carbonio sottoforma di CO₂. I mesi da aprile fino a settembre sono quelli con maggiore assorbimento. Nei mesi iniziali e finali dell'anno si hanno i valori più elevati. A maggio si registra il valore di massimo assorbimento (-8,4 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre a dicembre il valore minimo (-1,6 gC/m²/giorno; 50° percentile). Tra i valori le maggiori differenze tra i percentili sono di circa i 3 gC/m²/giorno. Gli anni 2003 (agosto e settembre), 2007 (maggio) e 2008 (giugno) sono stati anni con abbondante rilascio di CO₂ sopra il 95°percentile. Mentre gli anni con assorbimento record sono stati 2008 (settembre) e 2009 (giugno, luglio e agosto).

Lo scambio netto diurno ha un discorso simile allo scambio netto medio ecosistemico (Figura 48). L'andamento della curva è simile, con però due piccoli picchi di assorbimento a maggio ed a agosto. I valori sono più alti rispetto alla NNE. Infatti ad agosto si raggiungono i -13,5 gC/m²/giorno (50° percentile) e ad maggio i -13,2 gC/m²/giorno (50° percentile), mentre a gennaio il valore massimo -3,0 gC/m²/giorno (50° percentile). Le differenze tra i percentili è intorno ai 6 gC/m²/giorno. Meno marcata nei periodi invernali. Gli anni con maggiore rilascio di anidride carbonica sono stati 2003 (agosto, settembre, ottobre), 2007 (maggio) e 2008 (giugno). Anni invece al di sotto del 5° percentile sono stati: 2008 (settembre, ottobre), 2009 (maggio, giugno, luglio) e 2020 (novembre).

Discorso differente ovviamente per lo scambio netto notturno perché la respirazione ha un andamento a campana (Figura 47). È più bassa nel periodo invernale, cresce e arriva al culmine nel periodo estivo per poi calare nuovamente verso la fine dell'anno. La respirazione più alta si ha a luglio (2,4 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre a febbraio la più bassa (-0,9 gC/m²/giorno; 50° percentile). Le differenze tra i percentili sono minime, più o meno di 2 gC/m²/giorno. Gli anni con rilascio record di CO₂ sono stati: 2003 (febbraio), 2009 (maggio, settembre) e 2013 (luglio). Invece nel 2017 (aprile), 2018 (gennaio, febbraio, marzo, novembre) e 2019 (maggio) si sono registrati i valori di respirazione più bassi rispetto alla media mensile.

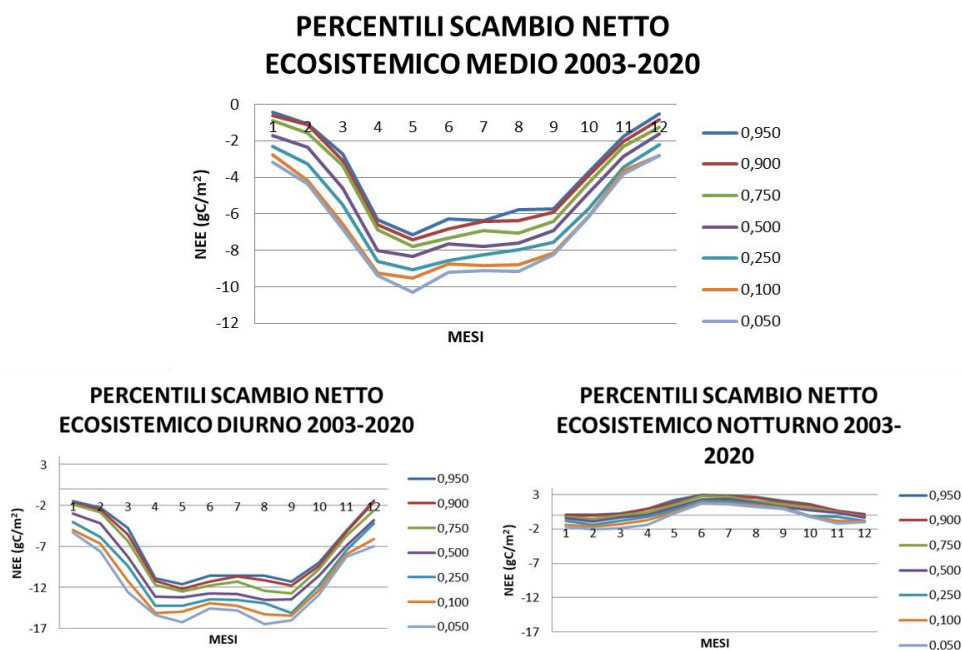


Figura 45 percentili scambio netto ecosistemico mensile 2003-202 Lavarone.

NEE

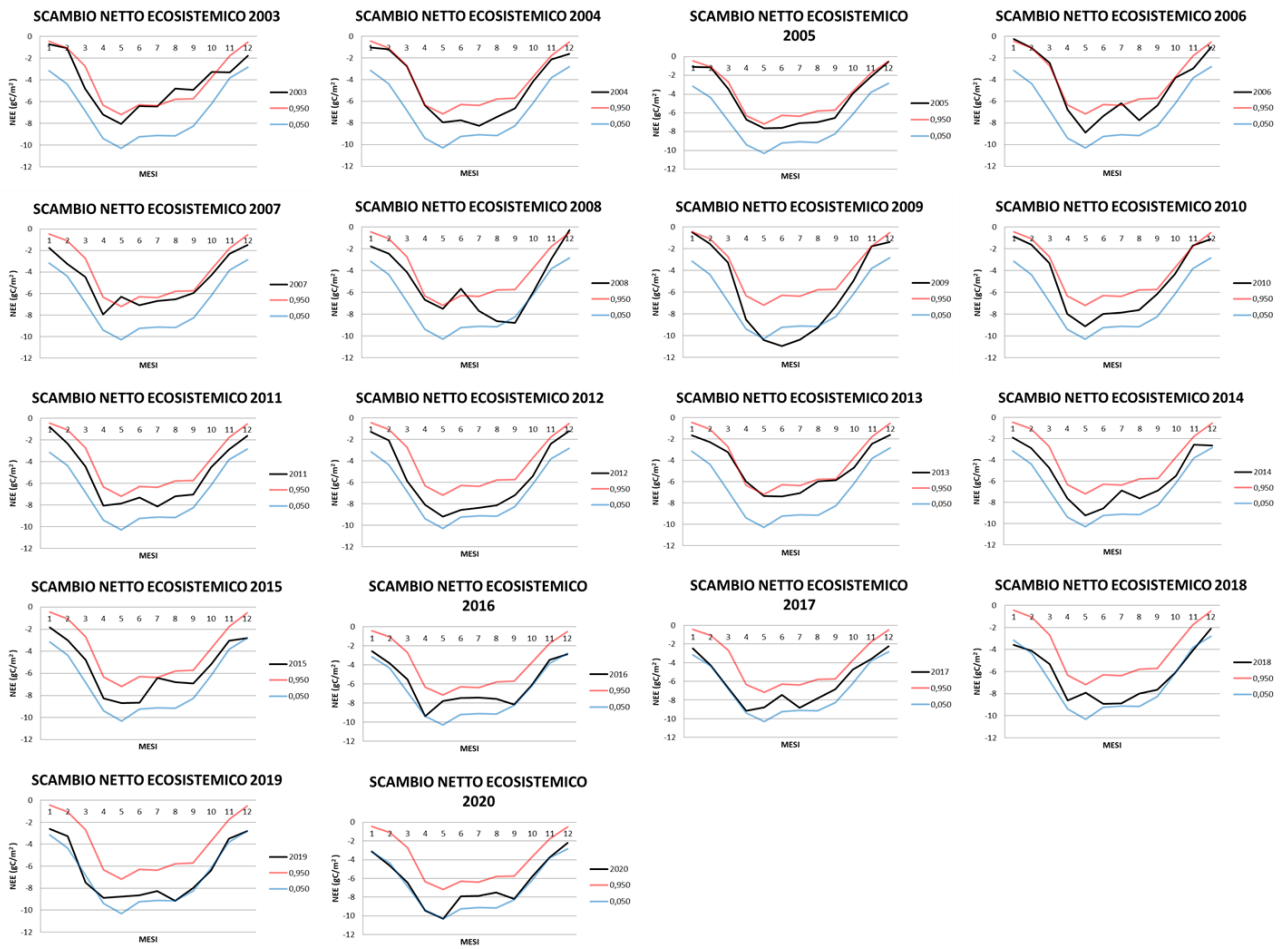


Figura 46 scambio netto ecosistemico media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Lavarone.

NEE NOTTURNO

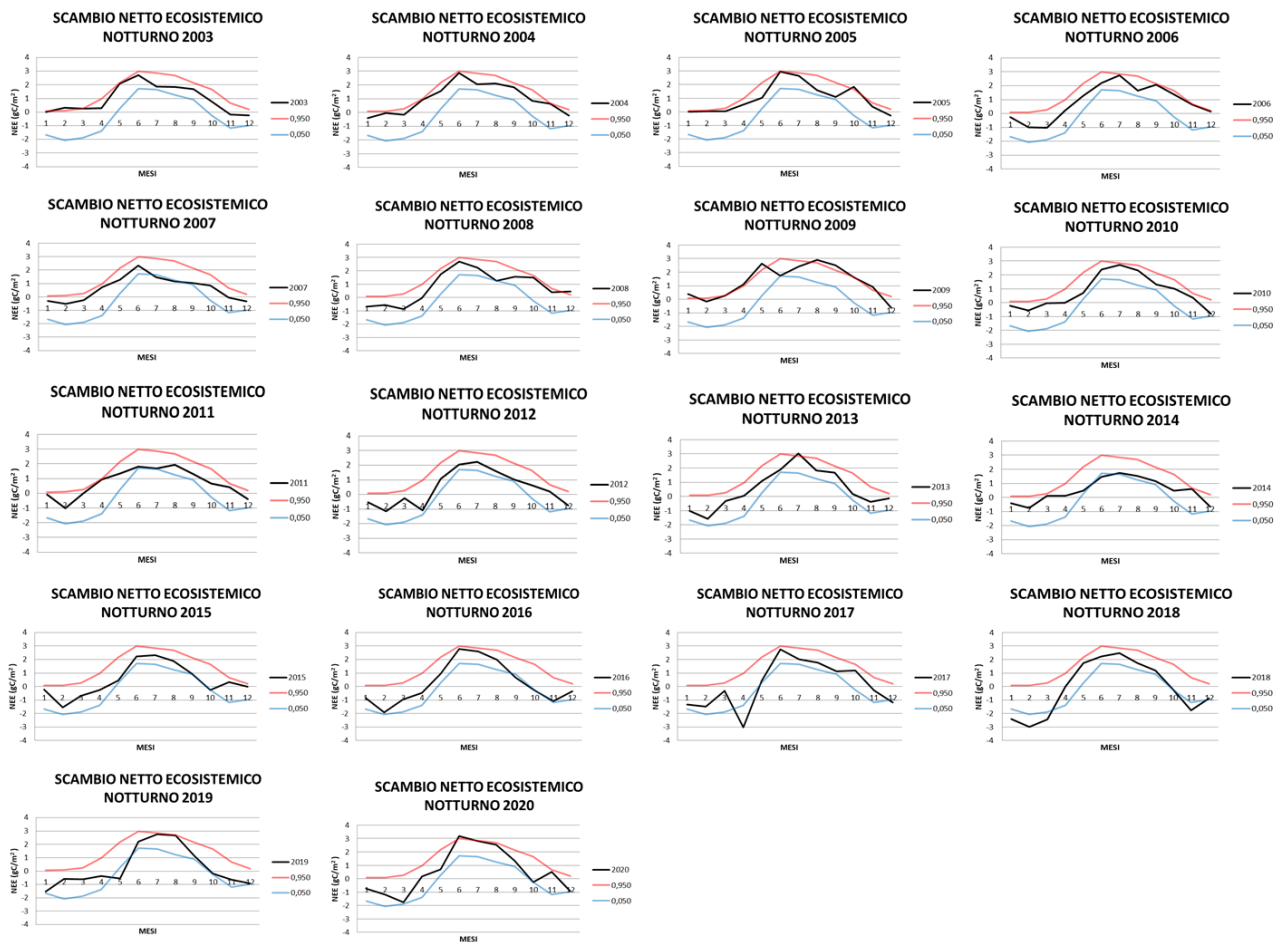


Figura 47 scambio netto ecosistemico notturno media mensile di dati giornalieri 2003-202 Lavarone.

NEE DIURNO

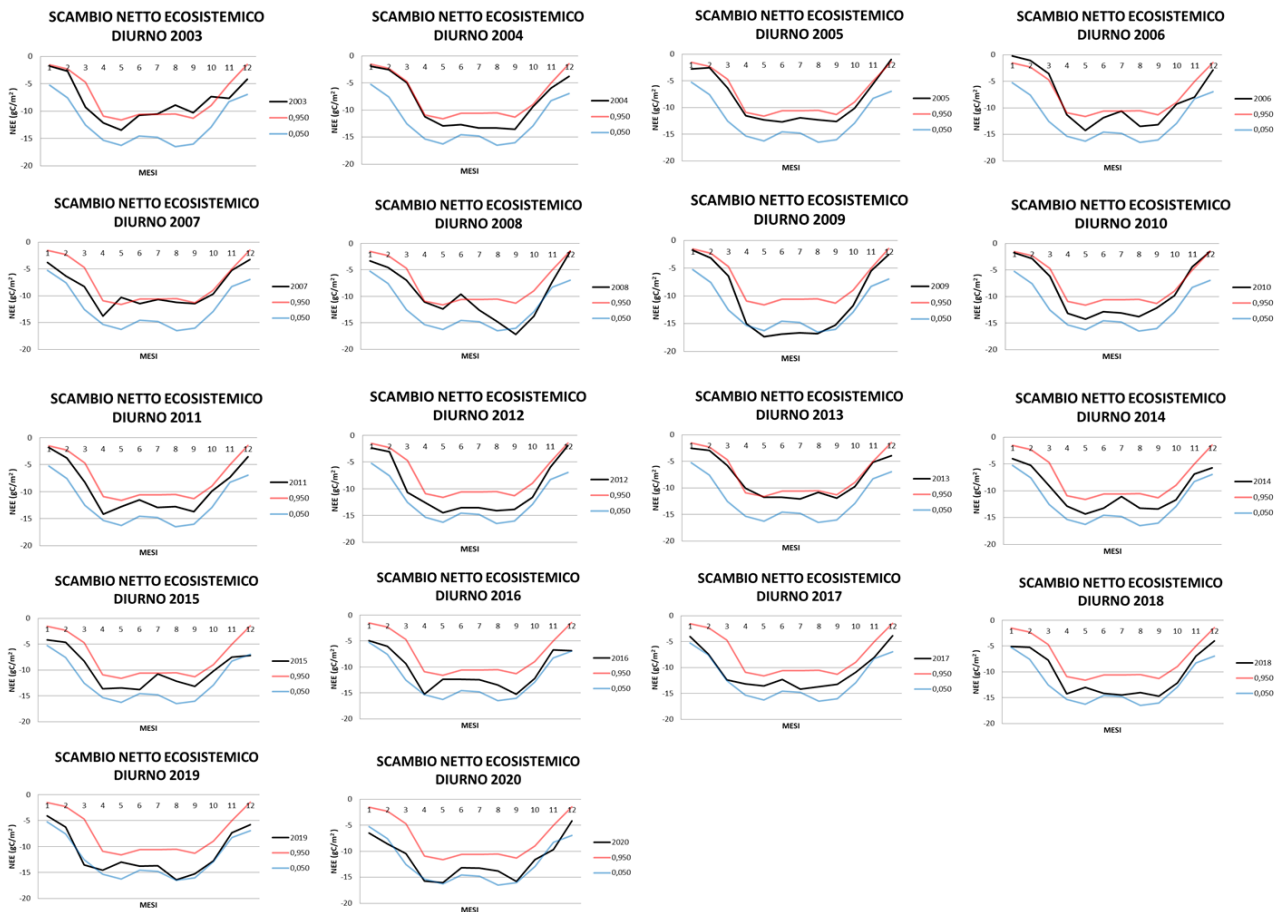
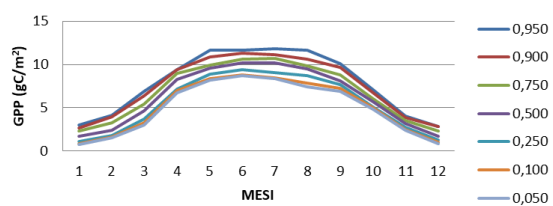


Figura 48 scambio netto ecosistemico diurno media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Lavarone.

PRODUZIONE PRIMARIA LORDA (GPP)

L'andamento della produzione primaria lorda (Figura 49) è simile sia per la GPP NT (Figura 50) che per la GPP DT (Figura 51). Il trend della curva è crescente fino ai mesi estivi a luglio per la GPP NT e a giugno per la GPP DT, per poi calare lentamente fino a dicembre. I valori sono tutti positivi, infatti essendo piante sempreverdi si ha sempre assorbimento di CO₂ con la fotosintesi. Per la GPP NT si ha a luglio un valore di 10,2 gC/m²/giorno (50° percentile) mentre per la GPP DT si ha a giugno 10,4 gC/m²/giorno (50° percentile). I valori inferiori invece sono nei mesi invernali, per la GPP NT il valore minimo è a dicembre (1,7 gC/m²/giorno; 50° percentile), mentre per la GPP DT è a gennaio (1,5 gC/m²/giorno; 50° percentile). La variabilità tra il 5° e il 95° percentile è maggiore per la GPP DT nei mesi estivi (circa 5 gC/m²/giorno) mentre per la GPP NT è di massimo 4 gC/m²/giorno. Le anomalie riscontrate per la GPP NT sono positive nel 2009 (maggio, giugno, luglio) e negative a 2003 (agosto) e 2007 (maggio). Mentre per la GPP DT sono positive a 2006 (novembre), 2008 (settembre) e 2009 (maggio, giugno, agosto) e negative a 2010 (agosto), 2015 (luglio) e 2017 (giugno).

**PERCENTILI PRODUZIONE PRIMARIA
LORDA ECOSISTEMICA
NT 2003-2020**



**PERCENTILI PRODUZIONE PRIMARIA
LORDA ECOSISTEMICA
DT 2003-2020**

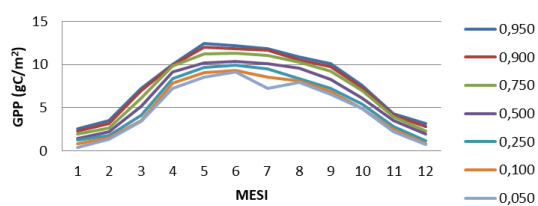


Figura 49 percentili produzione primaria lorda ecosistemica mensile 2003-2020 Lavarone.

GPP NT

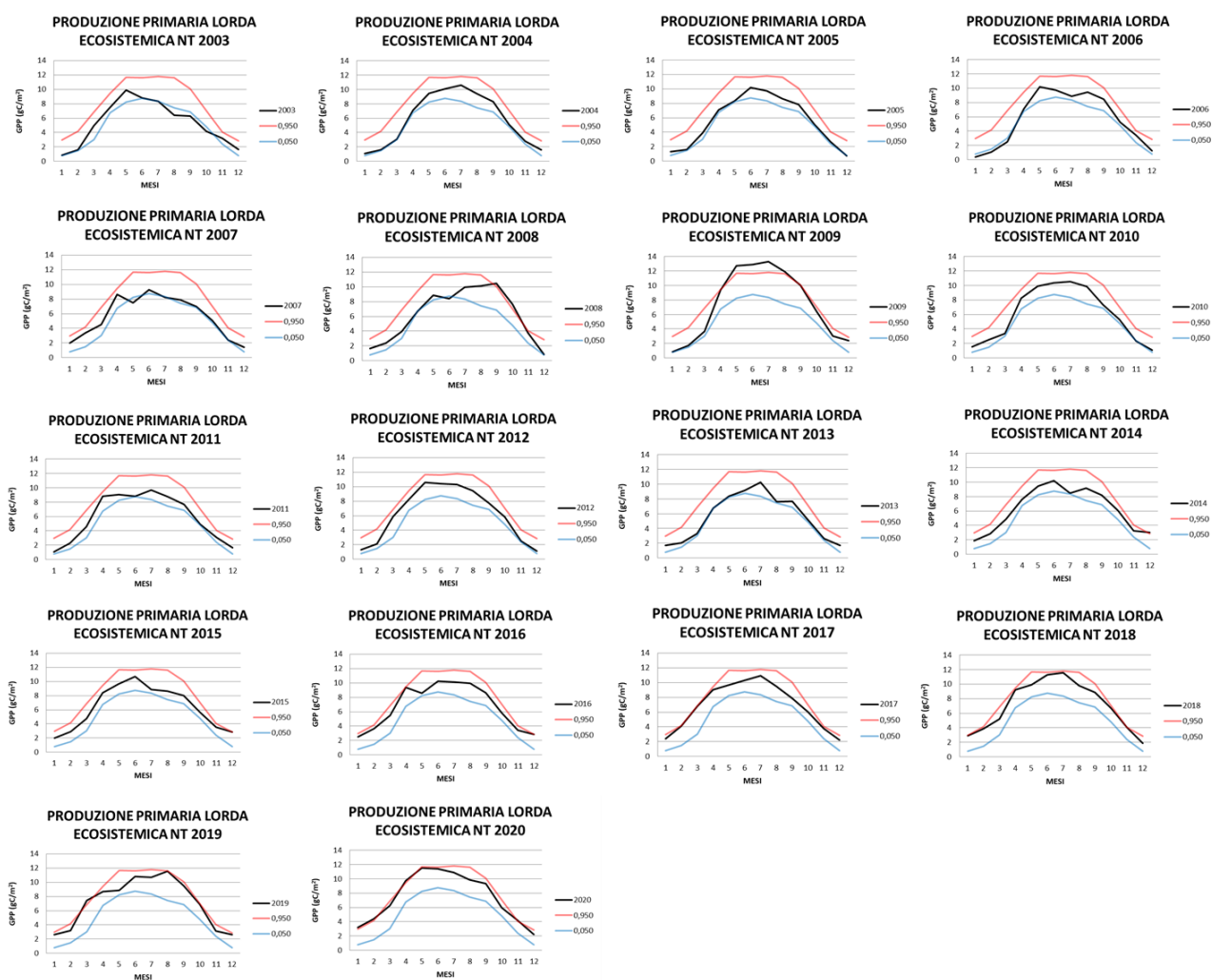


Figura 50 produzione primaria lorda ecosistemica NT media mensile d dati giornalieri 2003-2020 Lavarone.

GPP DT

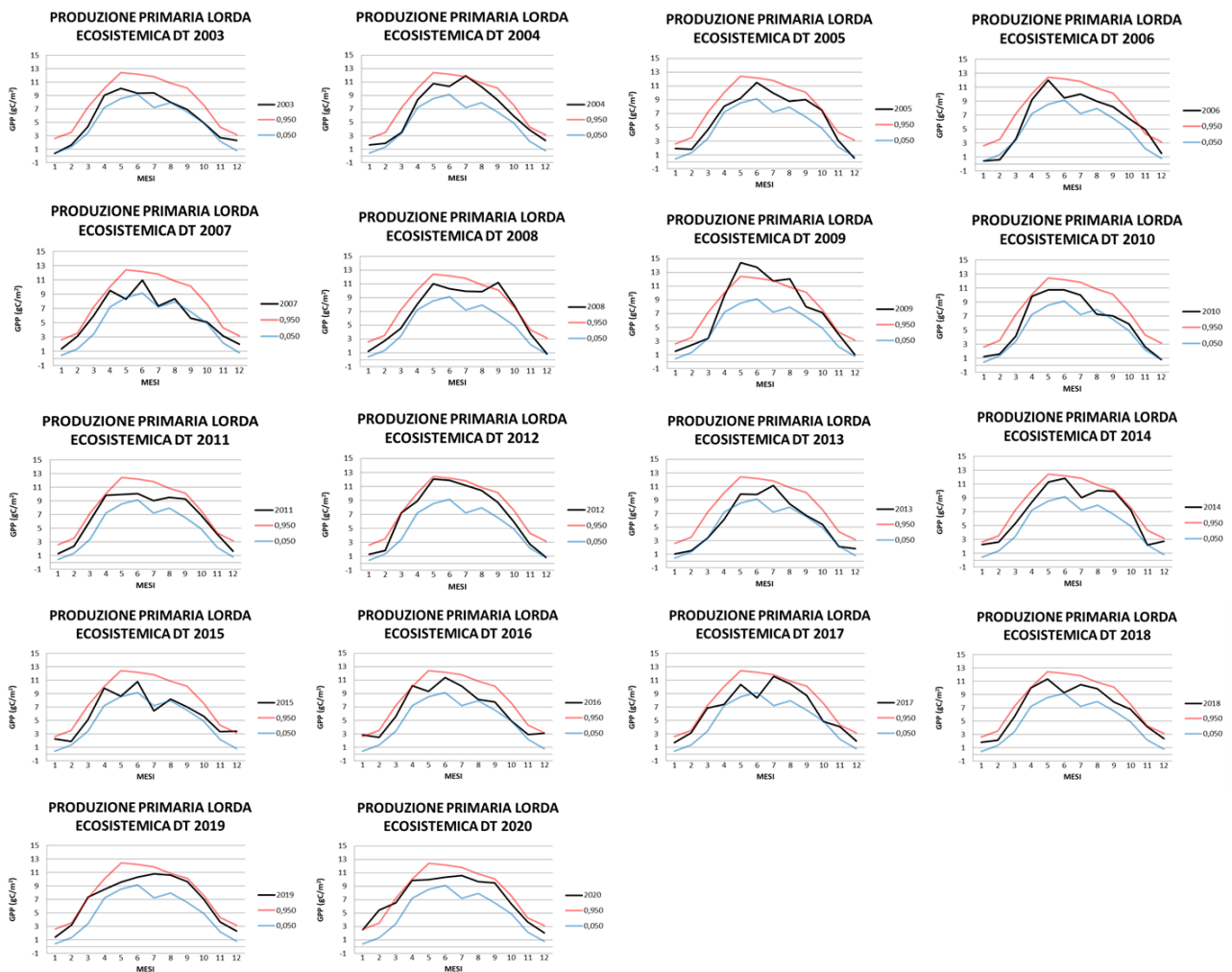
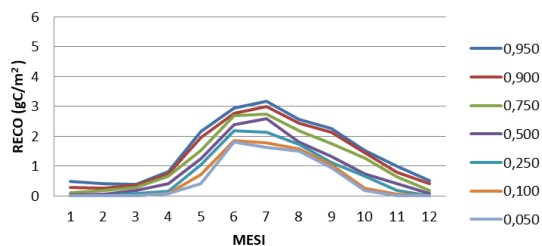


Figura 51 produzione primaria lorda ecosistemica DT media mensile d dati giornalieri 2003-2020 Lavarone.

RESPIRAZIONE ECOSISTEMA (REco)

La respirazione ecosistemica (Figura 52) presenta per la REco NT una tendenza a campana (Figura 53), mentre per la REco DT (Figura 54) si hanno due picchi, a giugno e a settembre. Quello di giugno presenta valori più alti. Per la REco NT il valore più alto è a luglio (2,6 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre il più basso è 0,0 gC/m²/giorno; 50° percentile nel mese di gennaio. Per quanto riguarda la REco DT invece il mese con maggiore respirazione risulta essere giugno (3,9 gC/m²/giorno; 50° percentile) mentre quello più basso è gennaio (1,2 gC/m²/giorno; 50° percentile). La differenza tra i percentili è di circa 2 gC/m²/giorno sia per la REco NT che per la REco DT. Per la REco NT si hanno molti anni al di sopra del 5° percentile: 2005 (marzo), 2008 (ottobre), 2009 (aprile, maggio, settembre, dicembre), 2010 (gennaio, febbraio), 2013 (luglio) e 2020 (giugno). Mentre al di sotto del 95° percentile (0,95) è nel 2019 a maggio. Per quanto riguarda la REco DT invece si hanno anni come il 2003 (agosto), 2005 (giugno, ottobre), 2006 (maggio, luglio), 2009 (novembre) e il 2011 (settembre) al di sopra del primo percentile (0,95) e anni come il 2015 (novembre) e 2016 (aprile) al di sotto dell'ultimo percentile (0,05).

PERCENTILI RESPIRAZIONE ECOSISTEMICA NT 2003-2020



PERCENTILI RESPIRAZIONE ECOSISTEMICA DT 2003-2020

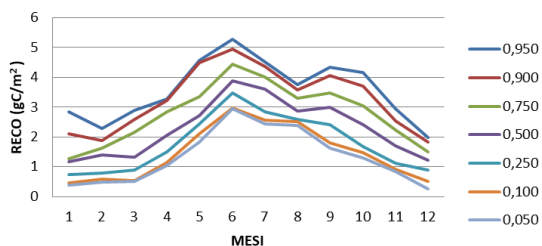


Figura 52 percentili respirazione ecosistemica mensile 2003-202 Lavarone.

RECO NT

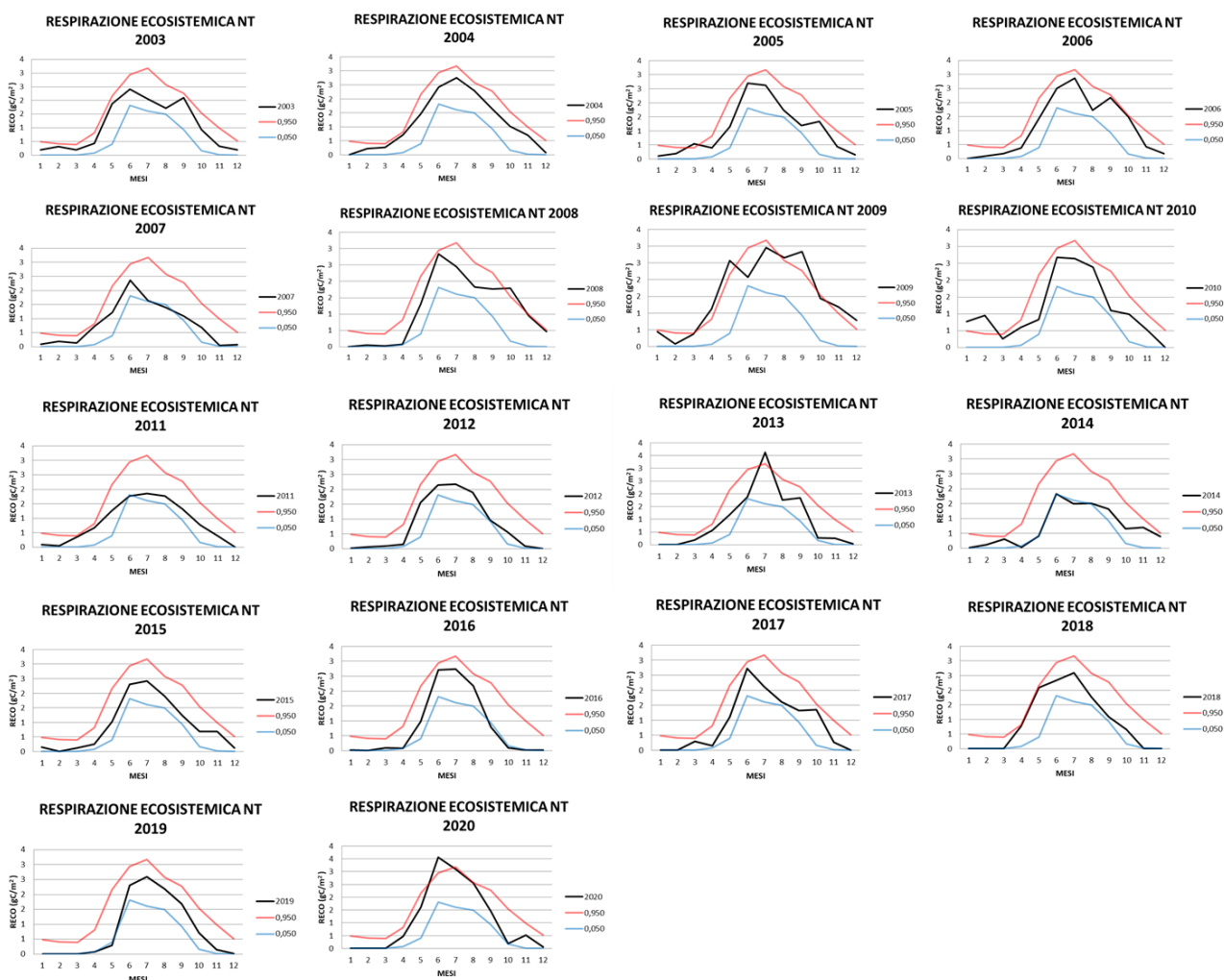


Figura 53 respirazione ecosistemica NT media mensile d dati giornalieri 2003-202 Lavarone.

REco DT

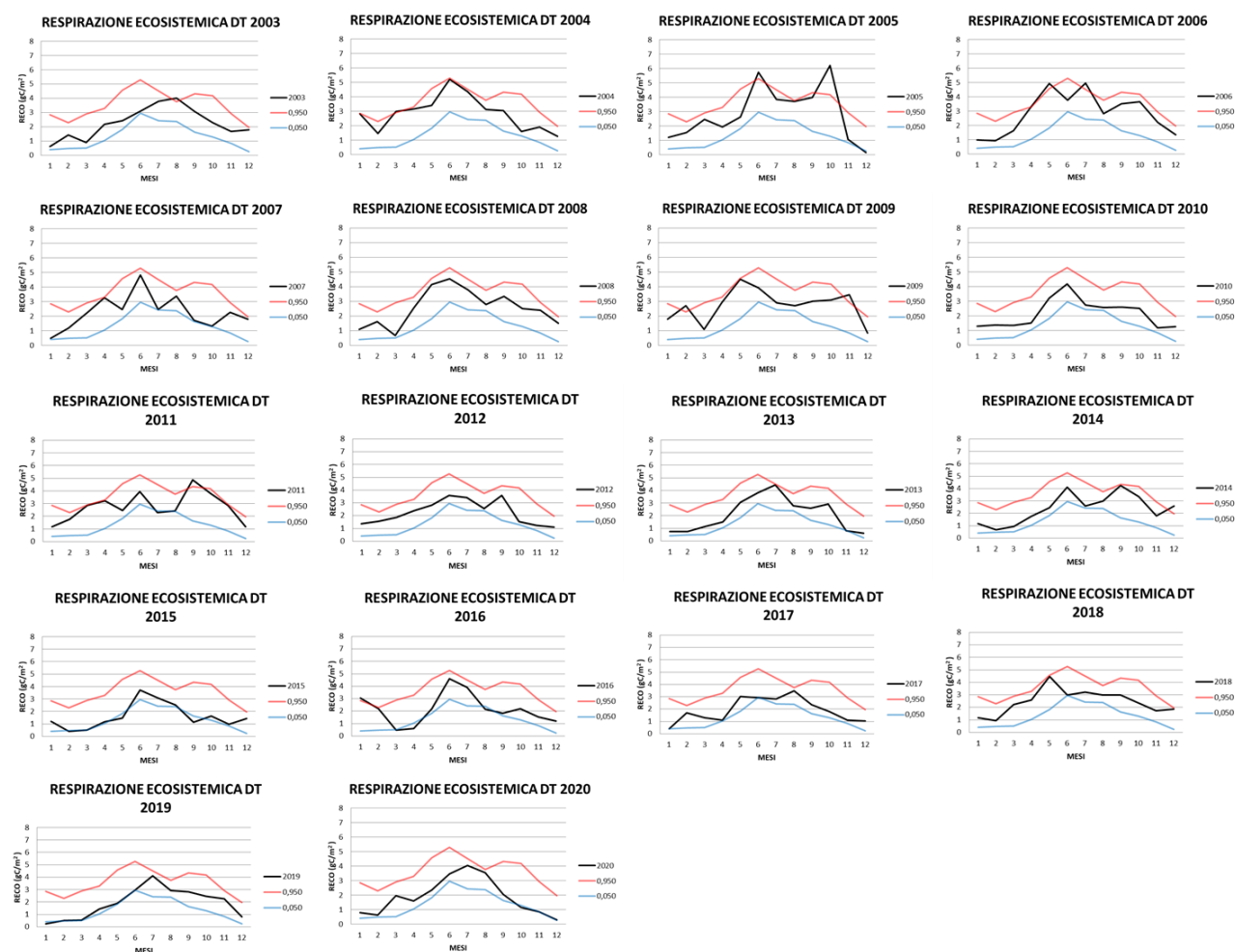


Figura 54 respirazione ecosistemica NT media mensile di dati giornalieri 2003-2020 Lavarone.

Nella Tabella 3 vengono riportati i valori massimi e minimi delle variabili analizzate con i relativi anni e mesi del sito di Lavarone. Al segno positivo significa che i valori della variabili erano maggiori del percentile 0,95, viceversa al segno negativo vengono assegnati i valori al di sotto del percentile 0,05.

VARIABILI	RECORD	
	+	-
TA MEDIA	2003 agosto 2015 luglio 2017 marzo 2019 febbraio	2006 agosto 2014 giugno, luglio, agosto
TA NOTTURNA	2003 agosto 2012 marzo 2015 luglio 2019 febbraio	2003 ottobre 2006 agosto 2014 giugno, luglio, agosto 2019 maggio
TA DIURNA	2003 agosto 2007 aprile 2009 maggio 2012 marzo 2015 luglio, novembre, dicembre	2003 ottobre 2006 agosto 2011 giugno, luglio 2014 giugno, luglio, agosto 2019 maggio

	2019 febbraio	
P	2007 agosto 2011 giugno 2013 maggio 2014 gennaio, febbraio, luglio 2019 aprile, novembre	2015 novembre 2016 giugno
SW		2014 luglio, agosto
	EMISSIONE CO ₂	ASSORBIMENTO CO ₂
NEE MEDIA	2003 agosto, settembre 2007 maggio 2008 giugno	2008 settembre 2009 giugno, luglio, agosto
NEE NOTTURNA	2003 febbraio 2009 maggio, settembre 2013 luglio	2017 aprile 2018 gennaio, febbraio, marzo, novembre 2019 maggio
NEE DIURNA	2003 agosto, settembre, ottobre 2007 maggio 2008 giugno	2008 settembre, ottobre 2009 maggio, giugno, luglio 2020 novembre
GPP NT	2009 maggio, giugno, luglio	2003 agosto 2007 maggio
GPP DT	2006 novembre 2008 settembre 2009 maggio, giugno, agosto	2010 agosto 2015 luglio 2017 giugno
RECO NT	2005 marzo 2008 ottobre 2009 aprile, maggio, settembre, dicembre 2010 gennaio, febbraio 2013 luglio 2020 giugno	2019 maggio
RECO DT	2003 agosto 2005 giugno, ottobre 2006 maggio, luglio 2009 novembre 2011 settembre	2015 novembre 2016 aprile

Tabella 3 record variabili con anno e mese Lavarone.

3.2.1 Flussi cumulati di CO₂ - Lavarone

L'andamento cumulato della NEE (Figura 55) presenta un deciso declino fino a raggiungere valori compresi tra -1600 e -2400 gC/m²/anno. La GPP NT cumulata e la GPP DT cumulata presentano lo stesso andamento crescente dal 91esimo giorno circa fino alla fine dell'anno (Figura 56 e 57). Quasi sigmoideale. I valori massimi sono compresi tra 2000 e 2700 per entrambe le GPP. La REco NT e DT hanno lo stesso andamento crescente (Figura 58 e 59). Si ha un aumento dal primo mese fino alla fine dell'anno. Per la REco NT il valore massimo è quasi 440 gC/m²/anno, mentre per la REco DT è di quasi 1020 gC/m²/anno. L'anno 2009 presenta un alto valore di REco (circa 560 gC/m²/anno) e 2014 un basso valore (circa 280 gC/m²/anno). Il 2018 per la REco DT è l'anno con il più alto valore (quasi 1700 gC/m²/anno).

SCAMBIO NETTO ECOSISTEMICO CUMULATO 2003-2020

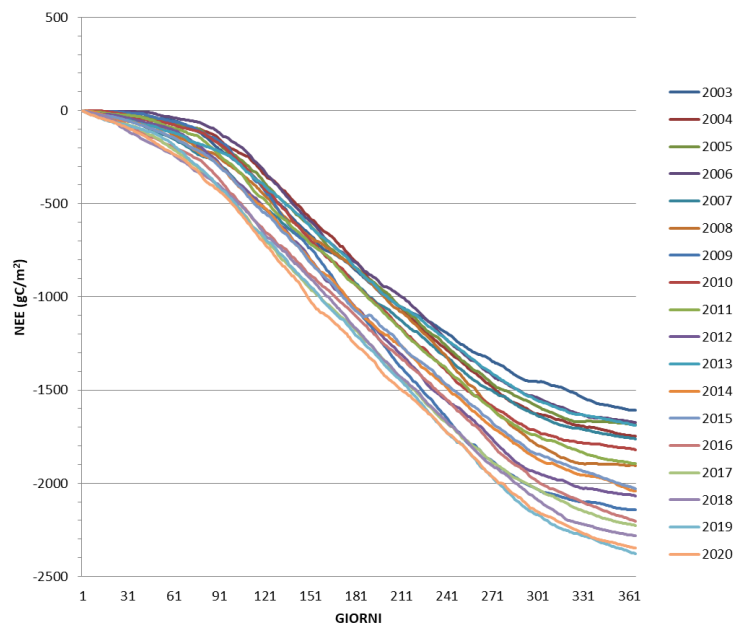


Figura 55 flusso cumulato scambio netto ecosistemico 2003-202 Lavarone.

PRODUZIONE PRIMARIA LORDA NT ECOSISTEMICA CUMULATA 2003-2020

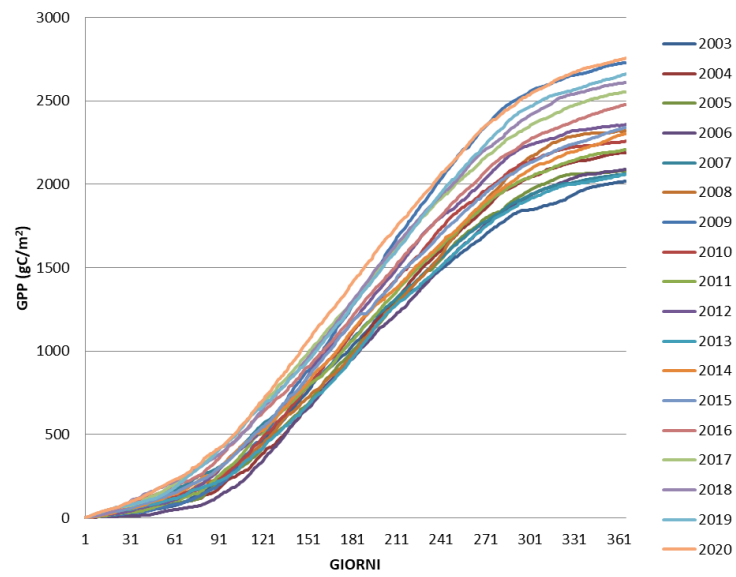


Figura 56 flusso cumulato produzione primaria lorda ecosistemica NT 2003-2020 Lavarone .

PRODUZIONE PRIMARIA LORA ECOSISTEMICA DT CUMULATA 2003-2020

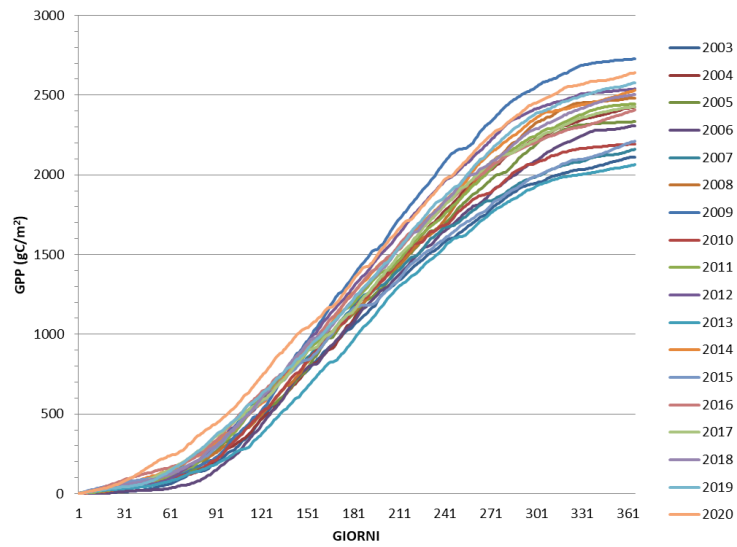


Figura 57 flusso cumulato produzione primaria lorda ecosistemica DT 2003-2020 Lavarone.

RESPIRAZIONE ECOSITEMICA NT CUMULATA 2003-2020

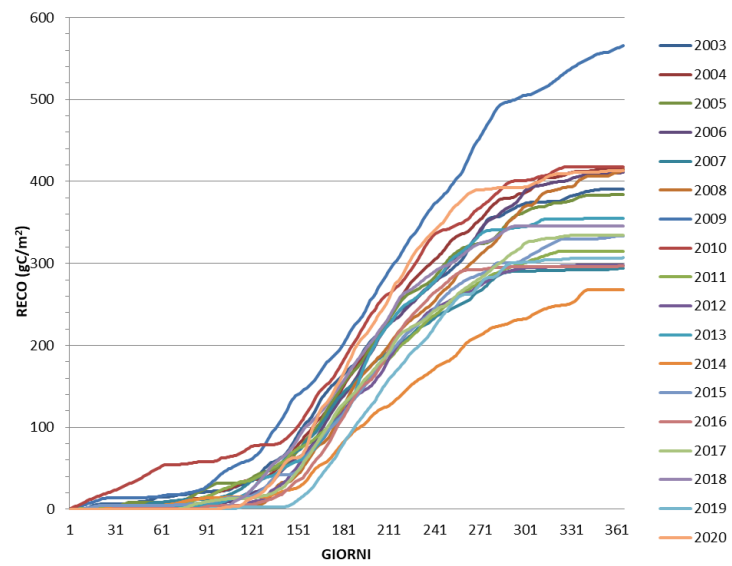


Figura 58 flusso cumulato respirazione ecosistemica NT 2003-2020 Lavarone.

RESPIRAZIONE ECOSISTEMICA DT CUMULATA 2003-2020

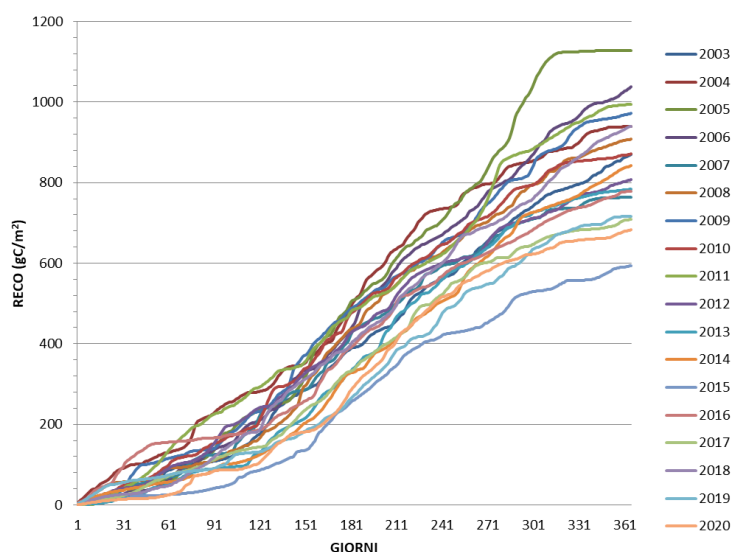


Figura 59 flusso cumulado respirazione ecosistemica DT 2003-2020 Lavarone.

3.3 Stima delle tendenze temporali (trend) delle variabili ambientali e dei flussi di CO₂ – Monte Bondone

Nel sito del Monte Bondone (Tabella 4) si osservano dei trend significativi nella variabile della temperatura media notturna del mese di febbraio e aprile ($P < 0,05$ e $P < 0,09$). È un trend debolmente significativo che segna un innalzamento delle temperature e quindi un riscaldamento dei due mesi.

La temperatura del suolo, a tutte e tre le profondità analizzate, mostra un trend significativo nel mese di novembre ($P < 0,01$; $0,05$ e $0,01$). Questo prova che in quel mese le temperature si stanno innalzando, con un terreno più caldo in quel periodo.

L'umidità del terreno presenta una forte relazione in tutte e due le profondità analizzate. Questo dimostra una diminuzione dell'umidità del suolo in tutti i periodi dell'anno.

Anche il deficit della pressione del vapore acqueo presenta dei trend significativi nei mesi di maggio, luglio e settembre ($0,01$; $0,01$). Questo determina un minor deficit in quei periodi dell'anno.

La NEE presenta per il mese di ottobre un trend positivo debolmente significativo ($0,09$) il che ci porta a constatare un aumento tendenziale del rilascio di CO₂ verso l'atmosfera in quel mese, risultato consistente con il trend positivo del rilascio di CO₂ nelle ore notturne osservato (NEE NOTTURNA) che presenta da maggio fino a dicembre una significatività alta.

La GPP NT presenta un trend positivo che è debolmente significativo a giugno, luglio e ottobre ma pienamente significativo ad agosto ($P < 0,001$) e settembre ($P < 0,05$). Analogamente la GPP DT mostra un trend positivo nella seconda parte della stagione vegetativa che è molto significativo ad agosto ($P < 0,01$) e debolmente significativo a settembre ($P < 0,1$). Questo prova che nonostante il bilancio netto tra fotosintesi e respirazione sia favorevole a quest'ultima, con conseguente un rilascio netto CO₂ in atmosfera ($NEE > 0$), l'attività fotosintetica sta aumentando nel tempo. Questo è possibilmente dovuto alla durata della stagione vegetativa prolungata nel tempo. Anche la respirazione ecosistemica mostra un tendenziale aumento nel tempo, infatti sia la REco NT che la REco DT presentano alti valori di significatività: in particolare la prima da maggio a dicembre, mentre la seconda da aprile a settembre.

TA	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,04	0,17	0,06	0,08	-0,07	-0,01	0,03	0,08	0,04	0,07	0,06	0,10
ERR STANDARD Trend [°C /anno]	0,07	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06	0,05	0,07	0,06	0,06	0,06	0,09
R ² %	2,17	15,83	2,86	11,66	7,69	0,05	2,77	8,86	2,60	6,40	5,07	6,93
P-VALUE	0,56	0,10	0,50	0,17	0,27	0,93	0,51	0,23	0,52	0,31	0,37	0,29

TA DAY	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,03	0,13	0,03	0,08	-0,09	-0,01	0,04	0,09	0,07	0,07	0,05	0,10
ERR STANDARD PENDENZA	0,08	0,10	0,09	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,11
R ² %	1,02	8,67	0,65	8,44	9,97	0,20	2,96	9,37	6,09	6,09	2,45	5,04
P-VALUE	0,69	0,24	0,75	0,24	0,20	0,86	0,50	0,22	0,32	0,32	0,54	0,37

TA NIGHT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,05	0,21	0,08	0,09	-0,04	0,01	0,03	0,07	0,05	0,06	0,06	0,10
ERR STANDARD PENDENZA	0,07	0,10	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,05	0,08
R ² %	2,95	21,52	7,35	17,03	3,07	0,10	2,18	8,03	6,16	6,39	7,88	8,28
P-VALUE	0,50	0,05	0,28	0,09	0,49	0,90	0,56	0,26	0,32	0,31	0,26	0,25

TS 1	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	-0,07	-0,02	0,00	0,16	-0,01	-0,03	0,00	0,06	0,06	0,06	0,10	0,01
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]	0,05	0,03	0,03	0,09	0,07	0,05	0,05	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04
R ²	13,18	2,51	0,08	17,03	0,05	1,66	0,00	6,18	12,90	8,71	33,35	0,59
P-VALUE	0,15	0,54	0,92	0,10	0,93	0,61	0,99	0,32	0,14	0,24	0,01	0,76

TS 2	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	-0,08	-0,03	-0,01	0,15	0,02	-0,01	0,02	0,07	0,05	0,04	0,07	0,00
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]	0,05	0,03	0,03	0,08	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04
R ²	14,90	6,89	1,04	18,91	0,91	0,06	0,62	8,77	10,97	5,02	22,43	0,02
P-VALUE	0,13	0,31	0,70	0,08	0,72	0,92	0,76	0,23	0,18	0,37	0,05	0,95

TS 3	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	-0,03	-0,04	-0,02	0,08	0,04	-0,04	-0,01	0,03	0,02	0,02	0,07	0,02
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]		0,03	0,03	0,02	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02
R ²	4,89	9,75	7,50	15,10	3,62	3,35	1,15	3,30	3,37	4,60	33,01	5,30
P-VALUE	0,39	0,22	0,29	0,12	0,47	0,47	0,67	0,47	0,47	0,39	0,01	0,36

SWC 1	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [%vol /anno]	-2,25	-2,39	-2,36	-2,01	-1,52	-1,34	-1,04	-0,86	-0,84	-1,11	-1,17	-1,65
ERR STANDARD PENDENZA [%vol /anno]	0,66	0,51	0,46	0,51	0,44	0,43	0,26	0,26	0,22	0,26	0,20	0,46
R ²	45,54	61,05	65,09	52,53	45,50	39,33	51,21	42,13	49,78	55,67	68,72	46,08
P-VALUE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

SWC 2	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [%vol /anno]	-1,98	-2,10	-1,76	-1,69	-1,28	-1,22	-1,10	-1,11	-1,16	-1,25	-1,34	-1,48
ERR STANDARD PENDENZA [%vol /anno]	0,40	0,44	0,22	0,23	0,18	0,24	0,15	0,22	0,21	0,17	0,14	0,18
R ²	63,87	62,23	81,90	79,21	77,11	63,59	78,83	62,60	67,09	78,56	86,47	82,57
P-VALUE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

P	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [mm /anno]	0,05	0,17	0,09	0,17	0,09	-0,04	0,08	-0,03	0,04	-0,10	0,20	-0,03
ERR STANDARD PENDENZA [mm /anno]	0,07	0,09	0,05	0,11	0,11	0,09	0,06	0,09	0,08	0,10	0,18	0,08
R ²	2,66	19,30	15,88	13,05	4,36	1,36	10,84	0,66	1,78	6,77	7,52	0,62
P-VALUE	0,53	0,08	0,11	0,15	0,42	0,66	0,20	0,76	0,61	0,31	0,29	0,76

VPD	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [hPa /anno]	0,00	0,01	-0,02	0,03	-0,09	-0,06	-0,11	-0,05	-0,07	0,03	-0,02	0,01
ERR STANDARD PENDENZA [hPa /anno]	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,02	0,03	0,05	0,04
R ²	0,10	0,20	1,06	5,02	37,30	11,88	35,85	5,45	41,69	3,82	0,96	1,01
P-VALUE	0,90	0,86	0,68	0,37	0,01	0,16	0,01	0,35	0,00	0,44	0,70	0,69

NEE	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,05	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,02	0,01	0,02	0,06	0,05	0,05	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02
R ² %	1,78	12,55	7,86	2,62	0,00	0,22	6,52	2,09	7,00	16,70	7,93	7,79
P-VALUE	0,60	0,15	0,26	0,52	0,99	0,85	0,31	0,57	0,29	0,09	0,26	0,26

NEE NIGHT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,00	0,03	0,02	0,03	0,10	0,10	0,16	0,14	0,12	0,10	0,07	0,07
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,05	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04
R ² %	0,03	13,43	5,42	9,38	20,81	20,51	75,60	50,53	34,69	30,62	31,08	20,43
P-VALUE	0,95	0,13	0,35	0,22	0,06	0,06	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,06

NEE DAY	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,03	0,01	0,01	0,00	-0,06	-0,04	-0,01	-0,07	-0,03	-0,05	-0,06	-0,06
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,01	0,01	0,04	0,11	0,06	0,07	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04
R ² %	7,43	6,30	4,68	0,04	1,56	2,94	0,08	13,07	1,87	9,38	8,27	15,08
P-VALUE	0,27	0,32	0,39	0,94	0,62	0,50	0,91	0,14	0,59	0,22	0,25	0,11

GPP NT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,01	0,00	-0,01	0,03	0,10	0,10	0,09	0,17	0,09	0,06	0,04	0,01
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,01	0,01	0,01	0,04	0,10	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01
R ² %	4,53	1,41	1,74	4,92	6,30	17,51	17,31	52,54	28,37	17,93	15,71	11,99
P-VALUE	0,40	0,64	0,60	0,38	0,32	0,08	0,09	0,00	0,02	0,08	0,10	0,16

GPP DT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,03	0,01	0,02	0,05	0,14	0,12	0,06	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,01	0,01	0,01	0,04	0,10	0,09	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01
R ² %	25,05	7,49	10,91	10,77	11,77	10,74	7,64	36,28	16,86	7,00	14,77	18,50
P-VALUE	0,03	0,27	0,18	0,18	0,16	0,18	0,27	0,01	0,09	0,29	0,12	0,07

RECO NT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,00	0,02	0,01	0,05	0,10	0,11	0,15	0,19	0,13	0,09	0,06	0,04
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,02	0,01	0,03	0,05	0,06	0,03	0,03	0,05	0,04	0,02	0,02
R ² %	0,01	5,93	2,43	15,04	18,85	18,59	66,14	65,62	34,58	28,04	27,29	23,25
P-VALUE	0,97	0,33	0,54	0,11	0,07	0,07	0,00	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04

RECO DT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,01	0,02	0,02	0,06	0,15	0,14	0,20	0,15	0,11	0,05	0,00	-0,02
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,03	0,02	0,01	0,03	0,07	0,07	0,04	0,03	0,05	0,06	0,02	0,02
R ² %	0,45	7,60	7,68	19,81	23,30	19,86	62,60	53,93	24,35	4,22	0,34	4,64
P-VALUE	0,79	0,27	0,27	0,06	0,04	0,06	0,00	0,00	0,04	0,41	0,82	0,39

Tabella 4 tendenze temporali delle variabili ambientali e di flussi di CO₂ Monte Bondone.

3.4 Stima delle tendenze temporali (trend) delle variabili ambientali e dei flussi di CO₂ – Lavarone

Per il sito di Lavarone (Tabella 5) c'è un trend significativo ($P < 0,05$) per quanto riguarda la temperatura dell'aria nel mese di Aprile che riguarda sia la TA NOTTURNA che la TA DIURNA e ovviamente la TA MEDIA. Anche a febbraio la TA MEDIA e TA NOTTURNA denotano un tendenziale riscaldamento sebbene associato ad una bassa significatività (0,09 e 0,08).

La temperatura del terreno a tutte e tre le profondità analizzate sta aumentando. E quanto è emerso dai trend delle variabili in esame, tutti altamente significativi da aprile a settembre, ad eccezione del mese di maggio. In particolare, per la temperatura del suolo superficiale (-2 cm) il trend è molto significativo anche nei mesi di febbraio, marzo, mentre per ottobre e novembre lo è debolmente. Il riscaldamento autunnale, limitatamente al mese di Ottobre, si riscontra anche alla profondità di 20 cm.

L'umidità del terreno invece presenta dati differenti. Nello strato più superficiale vi è un incremento di umidità del terreno significativo nei mesi compresi tra marzo e luglio mentre nello strato più profondo (-20cm) vi è una diminuzione di umidità significativa nei mesi tra gennaio e aprile, ed in autunno a settembre (bassa significatività) e a dicembre.

Il deficit di pressione di vapore nel sito presenta una diminuzione tendenziale significativa nei mesi di maggio ($P < 0,01$), luglio e agosto ($P < 0,06$).

I dati sullo scambio netto ecosistemico sono interessanti. Essi valgono per la NEE MEDIA, la NEE NOTTURNA e la NEE DIURNA. Infatti vi è un trend negativo associato ad una alta significatività da gennaio ad aprile e da settembre a dicembre. Questo indica che al di fuori del periodo primaverile-estivo è in atto un aumento dell'assorbimento di CO₂ da parte della foresta. Questo aumento è associato ad un aumento della fotosintesi in tale periodo come confermato dai dati della GPP NT e DT. Per la GPP NT anche nei mesi estivi di giugno e agosto vi è un tendenziale aumento anche se di debole significatività (0,07 e 0,10).

La REco invece sta in generale diminuendo. Per la REco NT nei mesi di febbraio ($P < 0,1$), marzo ($P < 0,05$) e ottobre ($P < 0,05$) la tendenza alla diminuzione della respirazione è significativa. Per la REco DT si osserva una diminuzione della respirazione generalizzata in tutti i mesi ma statisticamente significativa solo nei mesi di aprile ($P < 0,01$) e giugno ($P < 0,05$).

TA	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,10	0,19	0,12	0,15	-0,06	0,03	0,06	0,11	0,08	0,12	0,11	0,14
ERR STANDARD Trend [°C /anno]	0,07	0,11	0,09	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,06	0,07	0,07	0,10

R ² %	12,22	17,05	10,28	23,10	4,23	1,24	7,06	9,79	8,38	16,33	13,27	10,65
P-VALUE	0,16	0,09	0,19	0,04	0,41	0,66	0,29	0,21	0,24	0,10	0,14	0,19

TA DAY

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,11	0,19	0,12	0,16	-0,06	0,03	0,06	0,11	0,08	0,12	0,12	0,14
ERR STANDARD Trend [°C /anno]	0,07	0,11	0,10	0,07	0,07	0,07	0,06	0,08	0,07	0,07	0,08	0,11
R ² %	13,33	15,33	8,78	22,43	4,40	1,11	7,48	10,22	7,20	16,59	12,26	9,25
P-VALUE	0,14	0,11	0,23	0,05	0,40	0,68	0,27	0,20	0,28	0,09	0,15	0,22

TA NIGHT

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,10	0,19	0,12	0,14	-0,05	0,03	0,05	0,10	0,08	0,11	0,11	0,13
ERR STANDARD Trend [°C /anno]	0,07	0,10	0,08	0,06	0,07	0,06	0,05	0,08	0,06	0,06	0,07	0,09
R ² %	11,10	18,07	11,97	23,62	3,84	1,56	6,00	9,08	9,99	15,85	13,89	11,53
P-VALUE	0,18	0,08	0,16	0,04	0,44	0,62	0,33	0,22	0,20	0,10	0,13	0,17

TS 1

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	0,01	0,07	0,10	0,24	0,10	0,10	0,09	0,13	0,12	0,09	0,11	0,05
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]	0,03	0,03	0,04	0,06	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04
R ²	0,59	25,19	26,50	49,98	12,61	24,50	29,56	37,36	33,00	19,21	17,85	12,99
P-VALUE	0,77	0,04	0,03	0,00	0,15	0,04	0,02	0,01	0,02	0,08	0,09	0,16

TS 2

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	-0,04	0,01	0,04	0,19	0,08	0,13	0,11	0,18	0,11	0,03	0,03	0,01
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]	0,03	0,03	0,04	0,07	0,07	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04

R ²	14,39	0,41	6,84	35,62	9,20	39,30	39,67	62,67	38,63	3,81	3,19	0,64
P-VALUE	0,15	0,81	0,33	0,01	0,24	0,01	0,01	0,00	0,01	0,45	0,49	0,76

TS 3

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [°C /anno]	-0,02	0,01	0,05	0,19	0,15	0,22	0,23	0,28	0,19	0,07	0,03	0,01
ERR STANDARD PENDENZA [°C /anno]	0,03	0,02	0,04	0,06	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
R ²	4,58	0,91	10,91	44,19	25,15	59,43	73,32	85,13	72,61	19,31	3,63	0,48
P-VALUE	0,43	0,73	0,21	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,46	0,79

SWC 1

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [%vol /anno]	0,02	0,21	0,40	0,15	0,49	0,41	0,49	0,30	0,26	0,25	0,31	0,24
ERR STANDARD PENDENZA [%vol /anno]	0,21	0,21	0,19	0,16	0,14	0,17	0,17	0,24	0,21	0,24	0,19	0,16
R ²	0,06	6,53	24,13	5,44	44,05	28,67	34,64	9,24	9,65	6,65	14,92	13,01
P-VALUE	0,93	0,34	0,05	0,37	0,00	0,03	0,01	0,24	0,22	0,32	0,13	0,15

SWC 2

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [%vol /anno]	-0,39	-0,26	-0,21	-0,34	-0,10	-0,20	-0,13	-0,24	-0,28	-0,24	-0,16	-0,28
ERR STANDARD PENDENZA [%vol /anno]	0,12	0,08	0,08	0,11	0,15	0,13	0,18	0,18	0,15	0,18	0,17	0,13
R ²	42,47	42,27	29,25	38,64	2,61	13,83	3,07	9,87	17,99	10,55	5,47	25,21
P-VALUE	0,01	0,00	0,03	0,01	0,54	0,14	0,50	0,22	0,09	0,20	0,37	0,04

P

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [mm /anno]	0,01	0,11	0,02	0,11	0,03	-0,09	0,09	-0,05	-0,02	-0,04	0,16	-0,09
ERR STANDARD PENDENZA [mm /anno]	0,09	0,10	0,07	0,11	0,12	0,09	0,06	0,07	0,06	0,11	0,19	0,09

R ²	0,10	6,87	0,47	5,98	0,39	6,57	12,61	3,21	1,02	0,91	4,83	6,19
P-VALUE	0,90	0,31	0,79	0,34	0,81	0,32	0,16	0,49	0,70	0,72	0,40	0,34

VPD	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [hPa /anno]	0,02	0,00	-0,01	0,04	-0,12	-0,04	-0,11	-0,04	-0,07	0,04	-0,01	0,03
ERR STANDARD PENDENZA [hPa /anno]	0,03	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,08	0,03	0,04	0,06	0,05
R ²	1,60	0,01	0,10	5,47	31,82	3,82	21,66	1,19	19,85	4,54	0,13	1,56
P-VALUE	0,62	0,97	0,90	0,35	0,01	0,44	0,05	0,67	0,06	0,40	0,89	0,62

NEE	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,14	-0,19	-0,20	-0,14	-0,07	-0,07	-0,06	-0,07	-0,10	-0,14	-0,08	-0,10
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,03	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
R ² %	67,24	74,87	56,24	53,68	11,93	11,58	7,88	12,99	32,31	63,49	37,70	48,68
P-VALUE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,17	0,26	0,14	0,01	0,00	0,01	0,00

NEE NIGHT	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,08	-0,11	-0,08	-0,09	-0,08	-0,01	0,03	0,03	-0,04	-0,10	-0,06	-0,05
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
R ² %	46,04	50,86	31,84	23,99	35,33	0,69	9,96	10,26	23,12	52,64	22,58	35,79
P-VALUE	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,74	0,20	0,20	0,04	0,00	0,05	0,01

NEE DAY	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,22	-0,28	-0,31	-0,18	-0,05	-0,10	-0,10	-0,13	-0,15	-0,17	-0,10	-0,18
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,05	0,06	0,09	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,06	0,06	0,07

R ² %	58,46	55,28	41,30	36,09	3,36	12,15	10,66	14,80	22,06	35,04	17,30	28,85
P-VALUE	0,00	0,00	0,00	0,01	0,47	0,16	0,19	0,11	0,05	0,01	0,09	0,02

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,12	0,15	0,18	0,12	0,03	0,09	0,08	0,10	0,07	0,08	0,05	0,08
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,03	0,04	0,04	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,03	0,02	0,03
R ² %	72,19	67,70	51,42	41,36	1,75	18,90	11,12	16,32	12,15	26,11	27,38	40,26
P-VALUE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,60	0,07	0,18	0,10	0,16	0,03	0,03	0,00

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	0,07	0,11	0,16	0,02	-0,04	-0,03	0,02	0,05	0,05	-0,01	0,00	0,07
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,02	0,04	0,05	0,05	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03
R ² %	34,23	32,08	40,37	1,31	1,74	1,63	0,63	4,09	4,55	0,10	0,01	18,34
P-VALUE	0,01	0,01	0,00	0,65	0,60	0,61	0,75	0,42	0,40	0,90	0,97	0,08

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,03	0,01	0,01	0,01	-0,03	-0,05	-0,02	-0,01
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
R ² %	5,94	16,96	25,41	9,61	7,59	2,25	1,69	3,53	12,77	30,45	9,42	9,64
P-VALUE	0,33	0,09	0,03	0,21	0,27	0,55	0,61	0,46	0,15	0,02	0,22	0,21

	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
Trend [gC/m ² /anno]	-0,02	-0,04	-0,05	-0,09	-0,05	-0,08	-0,02	-0,02	-0,06	-0,08	-0,04	-0,01
ERR STANDARD PENDENZA [gC/m ² /anno]	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,02	0,04	0,05	0,03	0,03

R ² %	2,86	12,53	9,15	35,73	9,14	31,91	1,74	7,11	11,05	11,93	8,82	1,47
P-VALUE	0,50	0,15	0,22	0,01	0,22	0,01	0,60	0,28	0,18	0,16	0,23	0,63

Tabella 5 tendenze temporali delle variabili ambientali e di flussi di CO₂ Lavarone.

3.5 Correlazione tra variabili ambientali e flussi di CO₂ - Monte Bondone

L'analisi di correlazione tra le variabili ambientali ed i flussi di CO₂ a scala media mensile (Figura 60) al sito del Monte Bondone indicano che vi è una forte correlazione inversa tra le temperature dell'aria e la NEE DIURNA ($r=-0,8$ circa), mentre tra le temperature dell'aria e le GPP e REco vi è una correlazione positiva, ovvero all'aumentare delle une aumentano anche le altre, con valori intorno a 0.9. Le temperature dell'aria e del suolo hanno una correlazione positiva forte.

La radiazione solare invece presenta correlazione media con i flussi. In particolare ha una correlazione negativa con la NEE DIURNA.

Anche le temperature del suolo hanno una forte correlazione positiva con i flussi e negativa con la NEE DIURNA.

Il deficit della pressione del vapore acqueo risulta mediamente correlato con i flussi di CO₂ ($r: 0.4-0.5$) mentre l'umidità del suolo invece presenta valori di correlazione tra i più bassi e compresi tra 0.05 e 0.25 ..

In conclusione le variabili più importanti per la determinazione dei flussi sia positive che negative sono le temperature dell'aria e del suolo (tranne che per la NEE). La correlazione tra radiazione globale solare e i flussi è intermedia.

MENSILE

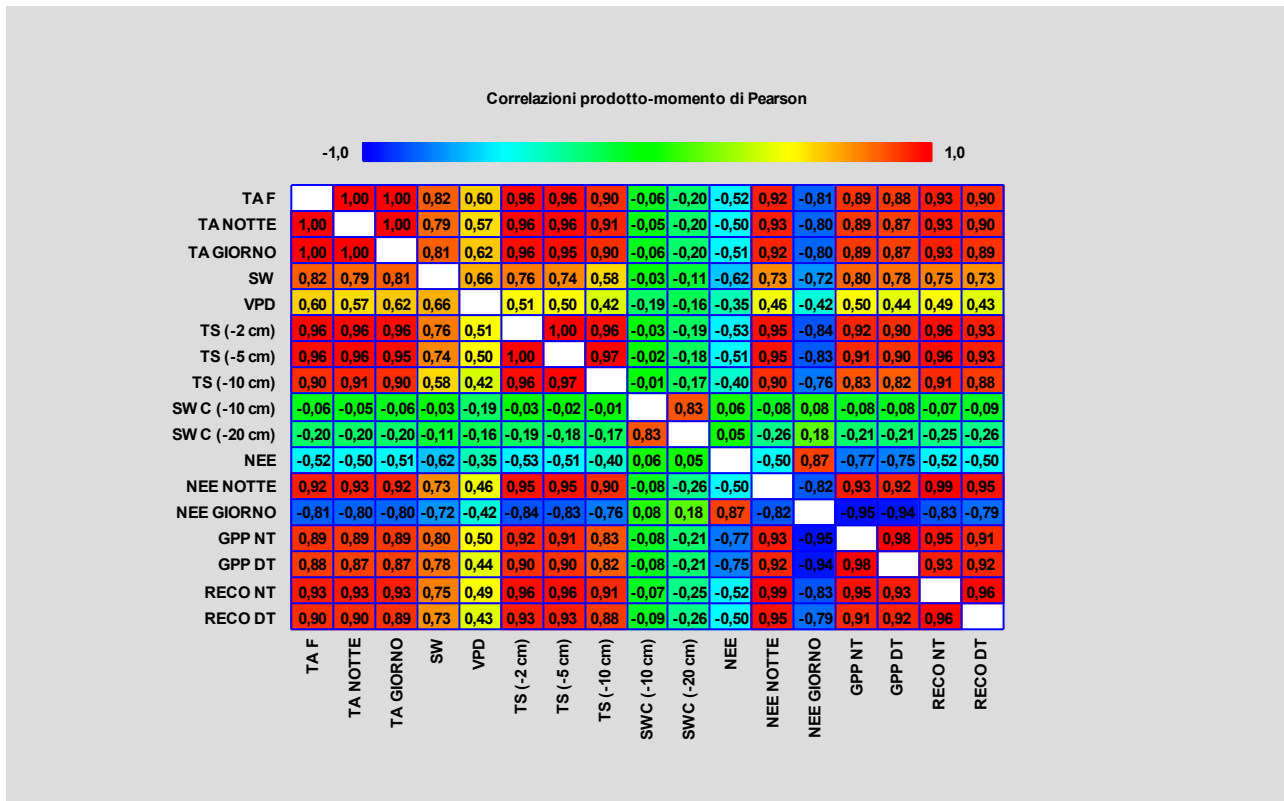


Figura 60 analisi di correlazione mensile.

3.6 Correlazione tra variabili ambientali e flussi di CO₂ - Monte Bondone

Per il sito di Lavarone le correlazioni mensili (Figura 61) tra la temperatura dell'aria e la NEE e la NEE DIURNA sono elevate ($r=0.79-0.84$) e di segno negativo mentre per gli altri flussi sono elevate ($r=0.84-0.96$) e di segno positivo. Discorso a parte per la REco DT per la quale la correlazione è positiva e più debole ($r=0.69$). Nonostante il livello alto di correlazione ma minori rispetto al sito del Monte Bondone. Vi è una correlazione mensile più scarsa a Lavarone.

La radiazione globale e i flussi presentano una alta correlazione (0.73-0.91). La più alta correlazione si ha con le variabili di GPP NT e GPP DT rispettivamente $r=0.91$ e $r=0,89$. La REco DT risulta essere sempre la più debole tra i flussi.

Per quanto riguarda il deficit della pressione del vapore la correlazione con i flussi di CO₂ è da debole a moderata (0.28-0.5) mentre l'umidità del terreno è scarsamente correlata.

Le temperature del suolo e i flussi invece presentano una correlazione discreta (intorno al 0,7-0,8 e -0,7) per tutte e tre le profondità analizzate.

In conclusione nel sito di Lavarone si assiste ad un declino dei valori di correlazione in base al periodo di mediazione. La variabili che influenzano maggiormente i flussi sono la temperatura dell'aria e del suolo.

MENSILE

Correlazioni prodotto-momento di Pearson

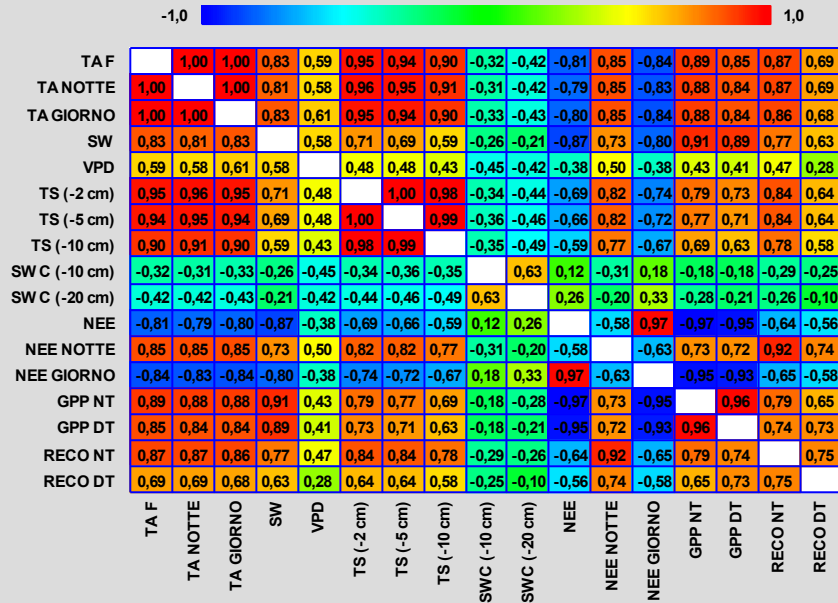


Figura 61 analisi di correlazione mensile.

4. DISCUSSIONE

I due siti presentano andamenti simili per quanto riguarda le temperature, e entrambi mantengono le temperature estive in media attorno ai 15°C e quelle invernali di poco sotto lo zero. Il sito del Monte Bondone presenta temperature invernali più rigide.

Il sito di Lavarone presenta valori più alti di deficit di pressione del vapore acqueo. Oltre i 6 hPa rispetto al massimo 5 hPa del Monte Bondone. Entrambi hanno in estate il loro massimo deficit.

Anche le precipitazioni sono maggiori nel sito di Lavarone rispetto a quello del Bondone, fattore dovuto esclusivamente al clima della zona, mediamente più umido nell'Altopiano di Lavarone e Folgaria. Entrambi i siti hanno il loro picco a novembre. 12 mm/giorno per Lavarone e circa 9 mm/giorno per il Monte Bondone.

La temperatura del suolo è più calda nel sito di Monte Bondone con temperature estive che si aggirano a 18°C (-2 cm di profondità) rispetto alle circa 15°C di Lavarone. Questo perché le alte chiome della foresta di Lavarone garantiscono al terreno meno penetrazione della radiazione solare e quindi meno irraggiamento e di conseguenza riscaldamento del terreno. Al contrario, la vegetazione erbacea ha una forte penetrazione al suolo della radiazione solare essendo più piccola e creando meno ombra al terreno.

La radiazione globale solare è identica per entrambi i siti.

L'umidità del terreno è maggiore nel sito di Monte Bondone ed è anche più irregolare. Circa 50% anziché il massimo 43% di Lavarone. Nel sito di Lavarone vi è meno umidità al suolo ma costante in tutto l'arco dell'anno. Anche questo fattore è dovuto alla vegetazione presente.

L'andamento della NEE denota un continuo assorbimento di carbonio atmosferico a Lavarone lungo l'arco dell'anno (fino a -10 gC/m²/giorno rispetto al massimo di -5 gC/m²/giorno nel Bondone), questo perché la foresta assorbe di più CO₂ di quanta ne rilascia con la respirazione. In estate ha un forte assorbimento dovuto alle giornate più lunghe. Anche in inverno vi è più assorbimento perché la foresta è formata da piante sempreverdi, quindi in ogni periodo dell'anno sono in grado di compiere la fotosintesi se le temperature lo consentono. Discorso diverso a Monte Bondone dove in inverno la vegetazione erbacea è in stato senescente e coperta dalla neve ed in assenza fotosintesi l'ecosistema è in costante respirazione. In estate vi è un buon assorbimento che cala drasticamente con il primo sfalcio nel mese di luglio.

La GPP invece è differente per i due siti. Nel sito di Monte Bondone presenta un picco a giugno (circa 14 gC/m²/giorno) e una forte variabilità mentre a Lavarone è più costante durante l'anno (massimo 14 gC/m²/giorno). La produzione lorda invernale è maggiore a Lavarone appunto perché le piante sono sempreverdi. Invece nel Bondone sia per la copertura della neve che per le piante spesso annuali o biennali vi è un azzeramento della produzione lorda primaria nei mesi invernali.

La REco infine presenta valori decisamente più alti nel sito del Bondone. Questo perché vi è una grande respirazione ecosistemica.

Per quanto riguarda i periodi record tra i due siti, gli anni sono molto simili. L'anno 2003 e il 2015 presentano negli stessi mesi anomalie per quanto riguarda le temperature medie. Infatti sono stati anni molto caldi. Invece i due siti dimostrano che l'estate del 2014 è stata per entrambi fredda, al di sotto delle medie stagionali. Anche le temperature diurne e notturne lo confermano.

Il 2014 è stato un anno piovoso per entrambi i siti. Mediamente il sito di Lavarone presenta più anomalie climatiche riguardanti la piovosità rispetto a quello del Monte Bondone.

Per quanto riguarda lo scambio netto ecosistemico si hanno annate molto differenti. Il 2014 nel sito del Bondone vi è un notevole rilascio di CO₂, mentre per Lavarone sono stati gli anni 2003, 2007 e 2008. L'assorbimento invece è comune nell'anno 2009.

La GPP presenta anomalie in diversi periodi temporali. Per il monte Bondone sono presenti nell'ultima parte degli anni studiati (dal 2014 al 2020) mentre per Lavarone nei primi anni (dal 2006 al 2009).

Anche la respirazione presenta periodi diversi per i siti. Nel sito di Lavarone vi è una più alta frequenza di anomalie negative nel corso del ventennio studiato rispetto a quelle positive.

Inoltre si nota una rilevante differenza tra la REco NT e la REco DT stimate per il sito di Lavarone. Questa differenza tra i valori di respirazione ecosistemica ottenuta con i due diversi metodi dipende dall'avvezione notturna di CO₂ che non è contabilizzata dal sistema Eddy Covariance e che causa una sottostima di REco con il metodo NT. Per quanto riguarda il sito del Monte Bondone non si nota questa differenza tra i risultati dei due metodi di partizione della respirazione ecosistemica. Il bilancio cumulato di NEE è fortemente in assorbimento nel sito di Lavarone tra -1600 e -2400 gC/m²/anno, rispetto a quello del Bondone per le differenze viste in precedenza. Stesso discorso vale per la GPP (circa massimo 1700 gC/m²/anno al Monte Bondone e invece 2000 e 2700 gC/m²/anno. La REco è maggiore nel sito del Monte

Bondone quasi 1800 gC/m²/anno (o 1650 gC/m² / anno REco DT) rispetto ai 440 gC/m²/anno di REco NT o ai valori massimi di REco DT di 1020 gC/m²/anno.

Osservando i trend significativi delle variabili ambientali dei due siti si trovano delle analogie. Per quanto riguarda la temperatura dell'aria si sta assistendo in entrambi i siti ad un aumento della temperatura nel mese di aprile e nel mese di febbraio. Per le temperature del suolo il solo novembre è il mese comune dove avviene il riscaldamento del terreno. A Lavarone sta procedendo in tutto l'anno l'aumento mentre per il Bondone no. Per l'umidità del terreno invece nei due siti solo lo strato a 20 cm di profondità sta diminuendo il contenuto in acqua. Il deficit di pressione di vapore acqueo è uguale per i mesi di maggio e luglio.

Discorso differente per lo scambio netto ecosistemico dove nella foresta di Lavarone si assiste ad un notevole trend positivo nell'assorbimento di CO₂ (trend negativo di NEE) mentre nel prato del Bondone si registra una tendenza significativa di NEE solo ad ottobre con un aumento delle emissioni di CO₂, guidato dal trend positivo della NEE notturna.

La GPP NT in entrambi i siti sta aumentando in diversi mesi però. Nel periodo estivo nel sito del Monte Bondone e nel periodo invernale in quello di Lavarone.

La REco NT sta aumentando per entrambi i siti a marzo e ottobre. Nel sito del Bondone vi è una notevole significatività da metà anno fino alla fine. Per la REco DT i mesi in comune sono aprile e giugno.

5. CONCLUSIONI

Questo studio ha preso in considerazione due ambienti alpini molto differenti tra loro, una foresta e un prato. L'obiettivo dello studio era quello di analizzare le differenze nelle serie storiche di dati micrometeorologici tra i due siti e verificare come i flussi di CO₂ sono correlati alle variabili ambientali.

I risultati di questo studio hanno dimostrato come nel sito del Monte Bondone si sta assistendo ad un aumento delle temperature dell'aria soprattutto quella notturna e delle temperature del suolo a tutti i tre diversi strati di profondità. Un aspetto rilevante è quello dell'allungamento della stagione vegetativa. Infatti essa inizia tendenzialmente prima (maggio) rispetto alla stagione estiva (metà giugno), perché il sito presenta fin da maggio le condizioni necessarie per lo sviluppo della vegetazione. Aumentando le temperature del suolo si sta assistendo ad un calo dell'umidità del suolo.

Per quanto riguarda i flussi si sta assistendo ad un aumento della respirazione del sito ma il bilancio del carbonio annuale ha evidenziato mediamente un assorbimento netto di carbonio atmosferico. Nei prossimi anni, qualora si assisterà come previsto ad un ulteriore aumento delle temperature, il sito di Monte Bondone anziché uno *sink* di carbonio potrebbe diventare un sito dove si emette in atmosfera più CO₂ di quella assorbita dalla vegetazione.

Per quanto riguarda il sito di Lavarone si sta assistendo ad un aumento delle temperature dell'aria e del suolo in buona parte dell'anno. Mentre per quanto riguarda l'umidità del suolo vi è un incremento nello strato più superficiale e un calo in quello più profondo.

I dati analizzati sui flussi di CO₂ dimostrano che è in atto un aumento dell'assorbimento di CO₂ da parte della foresta nei mesi invernali. Quindi la foresta di Lavarone sta aumentando il suo assorbimento di CO₂ durante l'anno, a dimostrazione come le piante sempreverdi in ambiente alpino possono sfruttare condizioni climatiche favorevoli per la fotosintesi anche nei periodi invernali.

A scala giornaliera, per il sito di Monte Bondone le variabili che influenzano la NEE sono in ordine di importanza la radiazione globale, la temperatura del suolo e la temperatura dell'aria.

A Lavarone invece i parametri ambientali che risultano più incidenti nelle determinare NEE osservata, sono risultate la radiazione globale, la temperatura dell'aria e la temperatura del suolo.

6. BIBLIOGRAFIA

- Alberti G, Barbata A, Bianchi M, Colangelo G, Corona P, De Filippis D, Fioravanti M, guerci L, Gasparini P, Laforteza R, Ieroni V, Matteucci G, Minotta G, Minunno F, Nolè A, Notarangelo G, Notarnicola G, Peressotti A, Pettenella A, Sanesi G, Scarascia Mugnozza G, Tabacchi G (2010). *Foreste e ciclo del carbonio in Italia, come mitigare il cambiamento climatico*. Fondazione Gas Natural, Barcelona, España, pp 241.
- Alkama R, & Cescatti A. (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* 351: 600–604.
- Baldocchi D (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology* 9: 479–492.
- Baldocchi D (2008). ‘Breathing’ of the Terrestrial Biosphere: Lessons Learned from a Global Network of Carbon Dioxide Flux Measurement Systems. Turner Review. *Australian Journal of Botany* 56: 1-26.
- Bogataj T, Bartol B, Onida M, Ruffini FV (2010). *Le Alpi per la riduzione delle emissioni climalteranti*. Karo Druck KG, Appiano, Italia, pp 96.
- Bosello F, Luca Marazzi L, Nunes PALD (2007). *Le Alpi italiane e il cambiamento climatico: Elementi di vulnerabilità ambientale ed economica e possibili strategie di adattamento*. APAT and CMCC
- Burba G, Anderson D. (2010) *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow example for scientific and industrial applications*. LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA, pp 212.
- Cescatti A, Gianelle D, Marcolla B, Rodeghiero M, Zorer R (2003). Il ciclo del carbonio negli ecosistemi forestali. In: *Centro di Ecologia Alpina: Il ruolo delle foreste nel bilancio del carbonio. Aspetti ecologici ed economici* (1): 3-34. Tipografia Esperia srl, Lavis, Italia, pp 56.
- Crespi, A., Matiu, M., Bertoldi, G., Petitta, M., and Zebisch, M.: A high-resolution gridded dataset of daily temperature and precipitation records (1980–2018) for Trentino-South Tyrol (north-eastern Italian Alps), *Earth Syst Sci Data Discuss* 13: 2801–2818.
- De Angelis P, Valentini R, Scarascia Mugnozza G (2007). Foreste e cambiamenti climatici: 10 anni di ricerche italiane. *Forest@* 4 (4): 450.
- Di Piazza A, Eccel E (2012) *Analisi di serie giornaliere di temperature e precipitazioni in Trentino nel periodo 1958-2010*. Litotipografia Alcione, Trento, Italia, pp 89.
- Falkowski P, Scholes RJ, Boyle E, Canadell J, Canfield D, Elser J, Gruber N, Hibbard K, Högberg P, Linder S, Mackenzie FT, Moore B 3rd, 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* 13 (5490): 291-296.
- Gaudioso D (2010). I cambiamenti climatici in Italia: quadro attuale, scenari, gap conoscitivi. *Agriregionieuropa* 21: 12.
- Wohlfahrt G, Anderson-Dunn M, Bahn M, Balzarolo M, Berninger F, Campbell C, Carrara A,

- Cescatti A, Christensen T, Dore S, Eugster W, Friborg T, Furger M, Gianelle D, Gimeno C, Hargreaves K, Hari P, Haslwanter A, Johansson T, Marcolla B, Milford C, Nagy Z, Nemitz E, Rogiers N, Sanz MJ, Siegwolf RTW, Susiluoto S, Sutton M, Tuba Z, Ugolini F, Valentini R, Zorer R, Cernusca A (2008). Biotic, Abiotic, and Management Controls on the Net Ecosystem CO₂ Exchange of European Mountain Grassland Ecosystems. *Ecosystems* 11: 1338–1351. Springer, Berlino, Germania.
- Gobiet A, Kotlarski S, Beniston M, Heinrich G, Rajczak J, Stoffe M (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. *Science of The Total Environment* 493, 15: 1138-1151.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021). “Climate Change 2021 – The Physical Science Basis”. *VI Rapporto dell’IPCC*, Dossier scientifico.
- Marcolla B, Cescatti A, Manca G, Zorer R, Cavagna M, Fiora A, Gianelle D, Rodeghiero M, Sottocornola M, Zampedri R (2011). Climatic controls and ecosystem responses drive the inter-annual variability of the net ecosystem exchange of an alpine meadow. *Agricultural and Forest Meteorology* 151 (9): 1233-1243.
- Paoletti E (2007). Impatto di inquinamento atmosferico e cambiamento climatico sugli ecosistemi forestali: le attività del Research Group 7.01 della IUFRO. *Forest@* 4 (4): 451-459.
- Papale D, Migliavacca M, Cremonese E, Cescatti A (2015). Carbon, Water and Energy Fluxes of Terrestrial Ecosystems in Italy In: *The Greenhouse Gas Balance of Italy*. Environmental Science & Engineering: 11- 45, Springer, Berlino, Germania.
- Pastorello G., Trotta C, Canfora E (2020). The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Earth Syst Sci Data Discuss* 7: 225.
- Petriccione B, Cindolo C, Cocciuffa C (2009). Gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali. *Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura*: 570-574.
- Pignatti G, (2011). La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia. *Forest@* 8: 1-12.
- Pullens JWM, Sottocornola M, Kiely G, Toscano P, Gianelle D (2016). Carbon fluxes of and alpine peatland in Northern Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 220: 69-82.
- Scarascia Mugnozza G (1999). *Ecologia strutturale e funzionale di faggete italiane*. Edagricole, Bologna, Italia, pp 372.