

Effetti ambientali delle dinamiche climatiche globali



Indicatori (I) e Approfondimenti (A)	DPSIR	Valutazione dell'indicatore			Pag.
		Qualità dell'informazione	Giudizio di stato	Tendenza	
I Bilancio di massa dei ghiacciai	S	☺	☹	↘	302
I Estensione della copertura nevosa e contenuto d'acqua della neve	S	☺	N.A.	N.A.	308
I Permafrost: spessore dello strato attivo	S	☺	N.A.	N.A.	312
I Fenologia dei lariceti	I	☺	☹	↘	316
I Il sequestro del carbonio da parte della vegetazione	S	☺	N.A.	N.A.	320
A <i>Monitoraggio e analisi del bilancio del carbonio in ecosistemi alpini</i>					323
A <i>Il Progetto PhenoALP</i>					328

Bilancio di massa dei ghiacciai

I ghiacciai alpini risentono direttamente delle condizioni meteorologiche stagionali modificando la propria massa e subendo variazioni delle proprie caratteristiche morfologiche a seguito di dinamiche quali l'arretramento della fronte glaciale. In particolare le variazioni di massa sono legate all'andamento delle precipitazioni nevose (quantità totale e distribuzione nel corso dell'anno) e dei fattori che controllano la fusione quali la temperatura dell'aria e il bilancio radiativo della superficie. L'analisi di tali variazioni consente di valutare la risposta dei singoli ghiacciai alle dinamiche di cambiamento climatico e di ipotizzare la persistenza degli apparati glaciali alpini in relazione agli scenari globali di progressivo riscaldamento considerati. Attraverso il bilancio di massa si determina la variazione della massa di un corpo glaciale calcolando la differenza fra gli accumuli, costituiti dalle precipitazioni nevose invernali e primaverili (*winter balance*), e la massa persa per fusione di neve e ghiaccio (ablazione) nella stagione estiva (*summer balance*). Il bilancio di massa viene indicato dall'Agenzia Europea come indicatore prioritario per il monitoraggio degli effetti del global change sui sistemi naturali. I dati di bilancio di massa di sette ghiacciai italiani (Calderone, Careser, Ciardoney, Fontana Bianca, Vedretta Lunga, Malavalle, Pendente,) sono trasmessi annualmente al World Glacier Monitoring Service e pubblicati sul sito <http://www.geo.unizh.ch/wgms/>.

Classificazione


Area tematica SINAnet
Biosfera


Tema SINAnet
Effetti dei cambiamenti climatici

DPSIR
S

Determinanti • Pressioni • Stato • Impatto • Risposte

Qualità dell'informazione 

Giudizio di stato 

Tendenza 

Riferimenti normativi

Normativa di riferimento
L'indicatore non ha riferimenti normativi.

Relazione con la normativa
Non applicabile

Livelli normativi di riferimento
Non applicabile

Copertura temporale e spaziale

Aggiornamento
31/12/2009

Periodicità di aggiornamento
Annuale

Copertura territoriale

Il bilancio di massa è condotto annualmente e con continuità su tre ghiacciai valdostani, caratterizzati da superficie, esposizione e altimetria differenti e localizzati nella Valsavarenche (Timorion e Grand Etret) e nella valle di La Thuile (Rutor).

I ghiacciai di Pré de Bard e di Indren sono oggetto di indagini preliminari al bilancio di massa avviate nel 2007 da Fondazione Montagna Sicura e dall'ARPA Valle d'Aosta nell'ambito delle attività coordinate dalla Cabina di regia dei ghiacciai valdostani. Sui ghiacciai dell'alta Valpelline, invece, la valutazione dei cambiamenti della massa glaciale è condotta mediante un approccio modellistico.



Elaborazione e presentazione

Il valore di bilancio (annuale) specifico netto, che costituisce una media per l'intero ghiacciaio riferita all'unità di superficie, è espresso in millimetri di equivalente in acqua (*millimeter water equivalent, mm w. e.*) e può essere determinato con differenti metodi.

Il metodo glaciologico, impiegato nelle attività di monitoraggio in Valle d'Aosta, prevede la realizzazione di misure puntuali in corrispondenza di paline ablatometriche infisse nel ghiaccio come riferimento degli abbassamenti progressivi della superficie. Ogni singola palina è considerata rappresentativa di una fascia altimetrica; l'estensione all'intero corpo glaciale dei valori puntuali è

realizzata assegnando i valori di massa accumulata e persa in ogni stagione, per ogni palina, ai vari settori altitudinali del ghiacciaio.

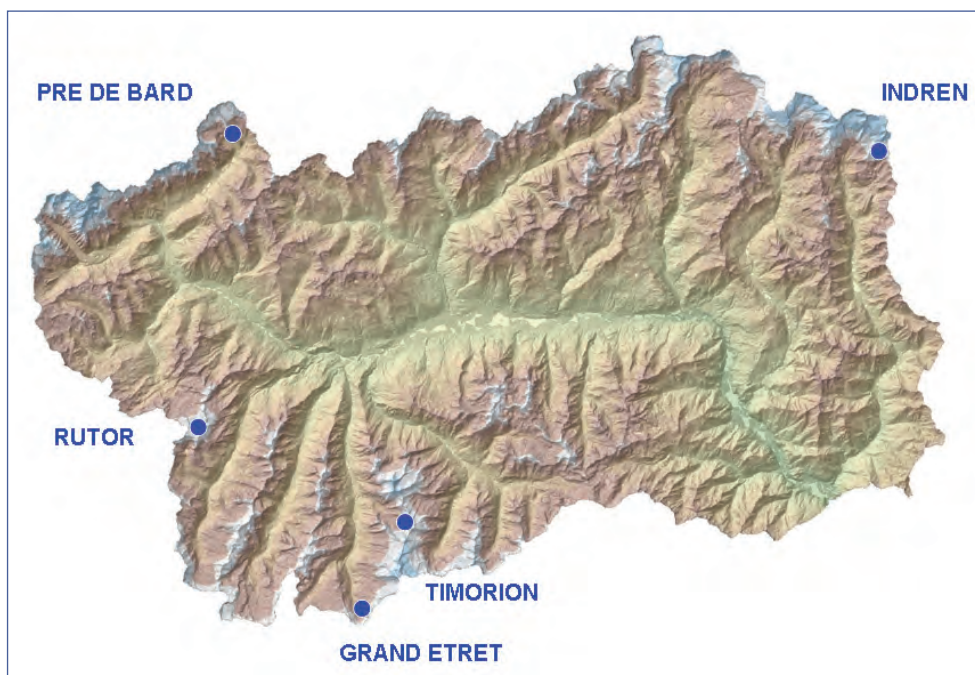
La trasformazione in equivalente in acqua viene effettuata, per gli accumuli e per la neve residua a fine estate, con i valori di densità misurati direttamente; per il ghiaccio si utilizza un valore standard di 910 Kg/m³.

In tabella 1 si riporta l'elenco dei ghiacciai monitorati con bilancio di massa o interessati da indagini relative alla dinamica di accumulo e di ablazione. In figura 1 è indicata la localizzazione degli stessi sul territorio regionale.

Ghiacciaio	Gruppo montuoso	Anno inizio serie / attività	Ente responsabile
Timorion	Gran Paradiso	2000-2001	ARPA VDA
Rutor	Rutor	2004-2005	FMS - ARPA VDA
Grand Etret	Punta Fourà	1999-2000	PNGP
Pré de Bard	Monte Bianco	2005	FMS
Indren	Monte Rosa	2006/2007	FMS - ARPA VDA

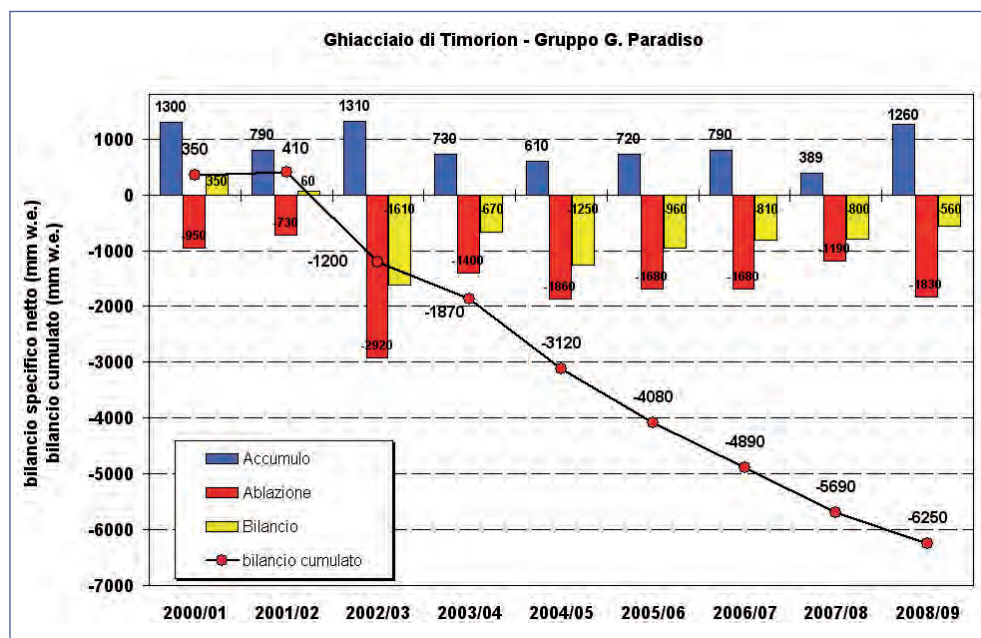
Tabella 1 Ghiacciai interessati da bilancio di massa o analisi sulle dinamiche evolutive in Valle d'Aosta, con indicazione dell'anno di avvio delle osservazioni/attività e dell'ente responsabile dell'attività (FMS= Fondazione Montagna Sicura, PNGP = Parco Nazionale Gran Paradiso).

LOCALIZZAZIONE DEI GHIACCIAI IN OSSERVAZIONE IN VALLE D'AOSTA





BILANCIO DI MASSA DEL GHIACCIAIO DEL TIMORION (GRAN PARADISO),
PERIODO 2000/01 – 2008/09



I dati di bilancio di massa costituiscono un'indicazione fondamentale per valutare gli effetti delle "forzanti" negli ambienti alpini: attualmente in Italia ne sono monitorati una decina, spesso con serie discontinue o di entità ridotta. Per l'elaborazione dell'indicatore è stato considerato il Ghiacciaio del Timorion (Valsavarenche, Gruppo del Gran Paradiso), monitorato dall'ARPA Valle d'Aosta con il supporto della Fondazione Montagna Sicura.

Il bilancio di massa del ghiacciaio del Timorion evidenzia ancora un biennio (anni idrologici 2007/08 e 2008/09) fortemente negativo per gli apparati valdostani che dal 2002/03 sono sottoposti ad importanti riduzioni della loro massa. In particolare nell'inverno 2007/08 si è registrata una significativa carenza di precipitazioni nevose, con un valore finale di equivalente di acqua ben al di sotto della media dell'intero periodo. Viceversa l'inverno 2008/09 risulta essere secondo solo all'anno 2000/01 per quantità di neve accumulata a fine maggio, questo soprattutto in relazione alle nevicate precoci (novembre-dicembre 2008) e ripetute nel

corso della stagione, che hanno permesso al manto nevoso di permanere a lungo sui ghiacciai. Ciononostante l'intensa stagione di ablazione, determinata da temperature che collocano l'estate 2009 in seconda posizione tra le più calde mai rilevate da almeno due secoli, conduce ad un valore di bilancio decisamente negativo a sottolineare come, anche a fronte di apporti notevoli, la massa di un ghiacciaio possa subire drastiche riduzioni in funzione dell'andamento della stagione estiva. Alla data del rilievo (22 maggio 2009), sono state registrate altezze del manto nevoso variabili da 110 cm, presso la fronte (3.150 m di quota), a 440 cm alla porzione superiore del bacino, con un accumulo specifico pari a 1260 mm di equivalente di acqua.

A partire dall'anno idrologico 2004/05 nell'ambito delle attività della Cabina di regia dei ghiacciai valdostani, ARPA Valle d'Aosta partecipa alla determinazione del bilancio di massa del ghiacciaio del Rutor, particolarmente complessa per la morfologia articolata e l'elevata crepacciatura: i valori di bilancio specifico netto sono riportati nella tabella seguente, a confronto con i dati del ghiacciaio del Timorion:

Ghiacciaio	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09
Timorion	350	60	-1610	-670	-1250	-960	-810	-800	-560
Rutor	-	-	-	-	-1480	-1710	-1360	-1130	nd

Tabella 2 Valori del bilancio di massa glaciale per i ghiacciai Rutor e Timorion, nel periodo 2000-2009.

Fonti dei dati

ARPA Valle d'Aosta (Ghiacciaio del Timorion)

ARPA Valle d'Aosta – Fondazione Montagna Sicura (Ghiacciaio del Rutor)



GHIACCIAIO DEL TIMORION - 22 MAGGIO 2009



La copertura nevosa si presenta abbondante e continua alla fine del periodo di accumulo, la densità media delle 5 trincee realizzate per calcolare l'equivalente di acqua si attesta intorno ai 410 Kg/mc.

GHIACCIAIO DEL TIMORION - 7 SETTEMBRE 2009



Il limite delle nevi è collocato ad una quota prossima alla quota massima dell'apparato. Risulta pertanto evidente l'intensa ablazione subita dal ghiacciaio nel corso della stagione estiva.



GHIACCIAIO DEL RUTOR - 29 MAGGIO 2009



A fine inverno la copertura nevosa appare "insolitamente" abbondante: oltre 400 cm di neve sono misurati sul ripiano in prossimità della vetta, mentre nella zona frontale gli accumuli variano da 2 a 2,5 m. La densità media del manto nevoso, rilevata in 7 trincee distribuite sull'intero ghiacciaio, risulta essere pari a circa 490 Kg/mc.

GHIACCIAIO DEL RUTOR - 20 AGOSTO 2009 (FOTO FMS)



L'intensa ablazione della prima parte dell'estate 2009 ha determinato la rapida scomparsa della neve dal settore inferiore del Ghiacciaio del Rutor che al 20 agosto appariva in gran parte oramai privo di copertura nevosa.



GHIACCIAIO DEL RUTOR - 16 OTTOBRE 2009



In occasione del rilievo di fine estate 2009 il ghiacciaio del Rutor si presenta con una copertura nevosa limitata unicamente alla parte superiore dell'intero corpo glaciale; una leggera nevicata tardo-estiva, insignificante dal punto di vista dell'apporto di massa nevosa, risulta essere estremamente importante in relazione all'effetto di drastica riduzione dei processi di fusione legata al repentino aumento dell'albedo della superficie (che riduce la quantità di energia disponibile per i processi di fusione). È comunque apprezzabile, dall'immagine, lo stato complessivo del ghiacciaio che manifesta i segni evidenti di una continua ed intensa perdita di massa.

Estensione della copertura nevosa e contenuto d'acqua della neve

La neve riveste una grande importanza nel bilancio idrologico dei bacini alpini, i cui deflussi tardo primaverili ed estivi sono alimentati in gran parte dalla fusione delle riserve d'acqua accumulate sotto forma di neve durante la stagione invernale. Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle precipitazioni e sulla permanenza al suolo della neve possono influenzare direttamente la disponibilità idrica in una regione come la Valle d'Aosta.

Nella sintesi per i decisori politici del Quarto Rapporto di Valutazione, il *Working Group I dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007)*, afferma che "è stato osservato un recente declino nella permanenza al suolo della copertura nevosa nelle Alpi e che tale declino è principalmente dovuto al riscaldamento climatico". Il rapporto IPCC mette inoltre in evidenza come i futuri scenari di riscaldamento climatico potranno determinare un'ulteriore diminuzione delle precipitazioni ed un aumento delle temperature, influenzando in modo significativo sulla permanenza della neve.

La conoscenza dell'estensione della copertura nevosa e della quantità di acqua presente nel manto nevoso fornisce informazioni di notevole importanza se si considerano i molteplici impatti derivanti da una possibile riduzione della disponibilità idrica. Questi indicatori vengono utilizzati dall'Agenzia Ambientale Europea e dall'IPCC per il monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici.

Classificazione

Area tematica SINAnet
Idrosfera

Tema SINAnet
(Risorse idriche ed usi sostenibili)

DPSIR
S

Determinanti • Pressioni • Stato • Impatto • Risposte

Qualità dell'informazione 

Giudizio di stato* **N.A.**

Tendenza* **N.A.**

* La consistenza delle serie temporali disponibili non consente di evidenziare anche sul territorio regionale, i trend di riduzione dell'estensione della copertura nevosa evidenziati a scala globale e alpina nell'ultimo trentennio.

Riferimenti normativi

Normativa di riferimento
L'indicatore non ha riferimenti normativi

Relazione con la normativa
Non applicabile

Livelli normativi di riferimento
Non applicabile

Copertura temporale e spaziale

Aggiornamento
31/10/2010

Periodicità di aggiornamento
Mensile

Copertura territoriale
L'indicatore viene elaborato a scala regionale



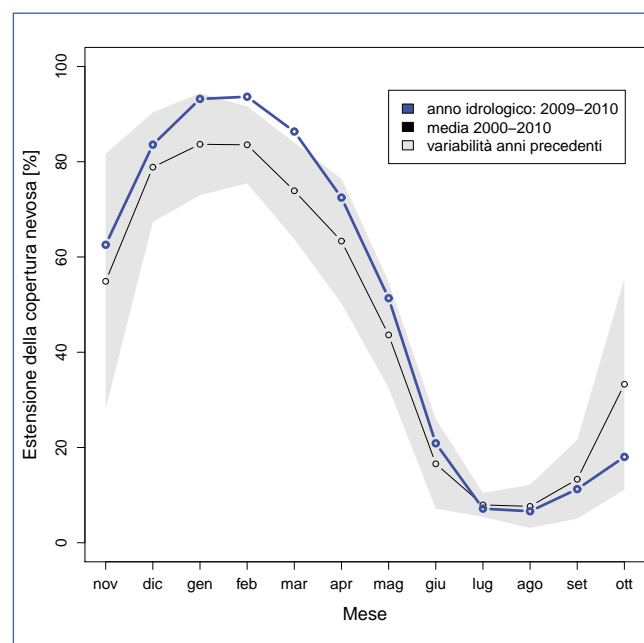
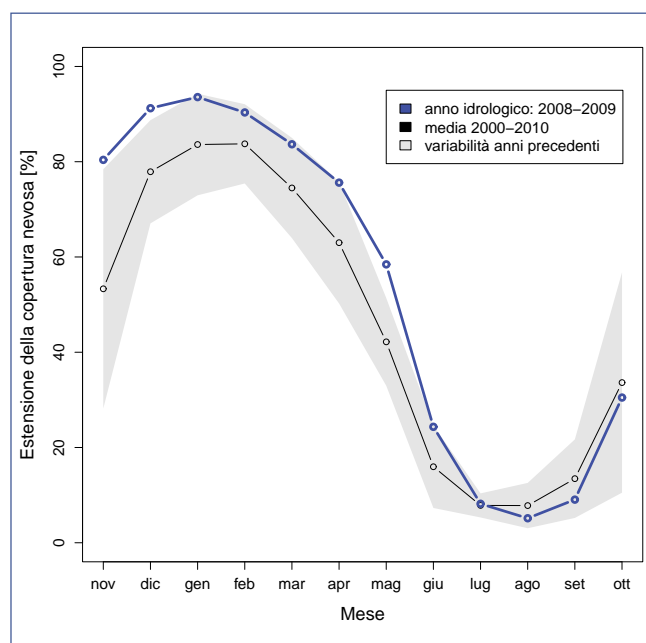
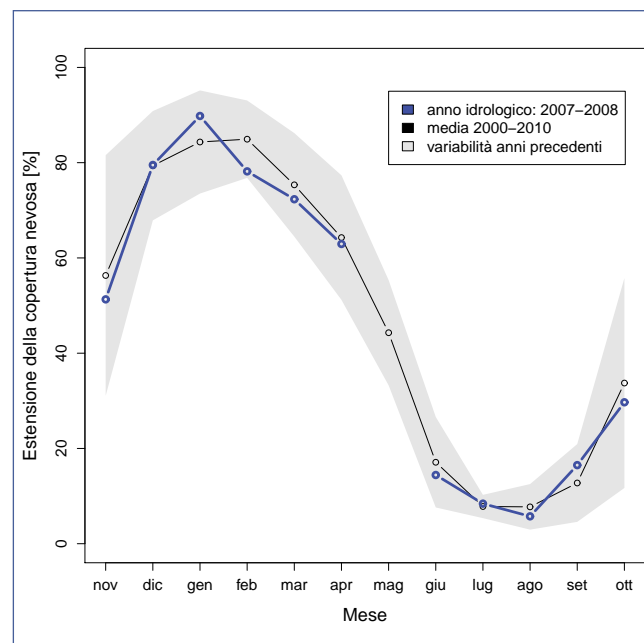
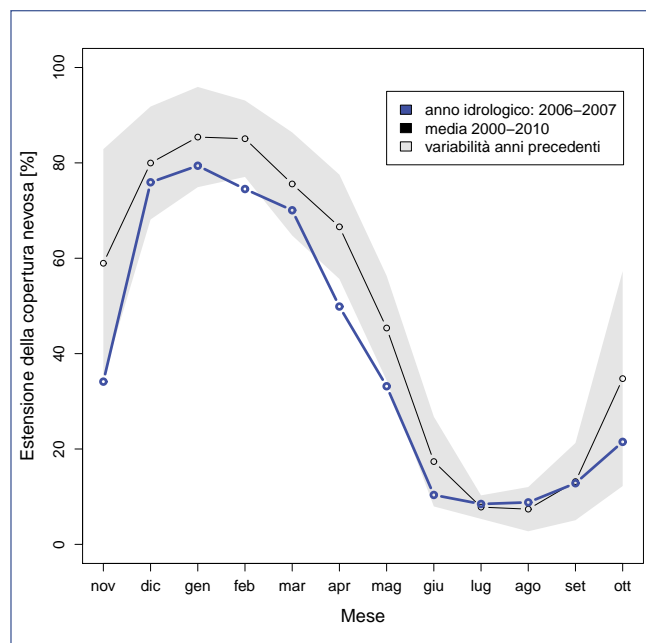
Elaborazione e presentazione

L'estensione della copertura nevosa indica la percentuale del territorio regionale occupato da neve. L'elaborazione di tale dato viene effettuata a partire da immagini satellitari acquisite dal sensore MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov>), con risoluzione spaziale (dimensione minima della cella alla quale sono associate le informazioni sul terreno) di 500m e una risoluzione temporale di 8 giorni. A partire dal dato ad 8 giorni è possibile calcolare la media

mensile e ricostruire la serie temporale della copertura nevosa mensile a partire dal febbraio del 2000, data dalla quale sono disponibili le immagini satellitari.

L'indicatore presenta l'andamento mensile dell'estensione della copertura nevosa degli ultimi 4 anni idrologici (per convenzione da inizio ottobre a fine settembre dell'anno successivo) rispetto alla media del periodo 2000-2010.

EVOLUZIONE MENSILE DELL'ESTENSIONE DELLA COPERTURA NEVOSA DEGLI ULTIMI 4 ANNI IDROLOGICI RISPETTO ALLA MEDIA DEL PERIODO 2000-2010



Il grafico mostra in blu il valore dell'estensione della copertura nevosa nell'anno considerato, in grigio è rappresentata la media del periodo 2000-2010 mentre l'area grigia indica la variabilità (deviazione standard) mensile osservata nel periodo 2000-2010. Nel calcolo della media è escluso l'anno scelto. Nell'anno idrologico 2006-2007, l'estensione della copertura

nevosa è stata quasi sempre minore della media con l'esclusione del periodo tardo estivo-autunnale. Il 2007-2008 si presenta come un anno i cui valori mensili sono sostanzialmente molto vicini alla media. L'assenza di dato per il mese di maggio è determinata dalla intensa copertura nuvolosa occorsa durante il mese. Il 2008-2009 è stato un anno eccezionalmente nevoso che ha mostrato i valori di



estensione maggiori riscontrati nel periodo 2000-2010 fino al mese di giugno. È interessante notare come l'estate, che ha registrato poche precipitazioni e temperature elevate, abbia fatto rapidamente diminuire l'estensione della copertura nevosa fino a renderla minore della media nei mesi estivi ed autunnali. Il 2009-2010 è stato molto simile all'anno precedente. I mesi invernali sono stati caratterizzati da valori molto elevati; in particolare in febbraio e marzo sono stati osservati i valori di estensione della copertura nevosa massimi degli ultimi 10 anni. A differenza dell'anno precedente, i mesi estivi hanno avuto condizioni di temperatura e precipitazione nella norma e quindi i valori di estensione della copertura nevosa sono simili alla media del decennio precedente.

Il calcolo del contenuto d'acqua del manto nevoso (Snow Water Equivalent, SWE) si basa sulla conoscenza dell'estensione della copertura nevosa e sulla stima effettuata con un modello matematico e riferita all'intero territorio regionale, dell'altezza e della densità del manto nevoso.

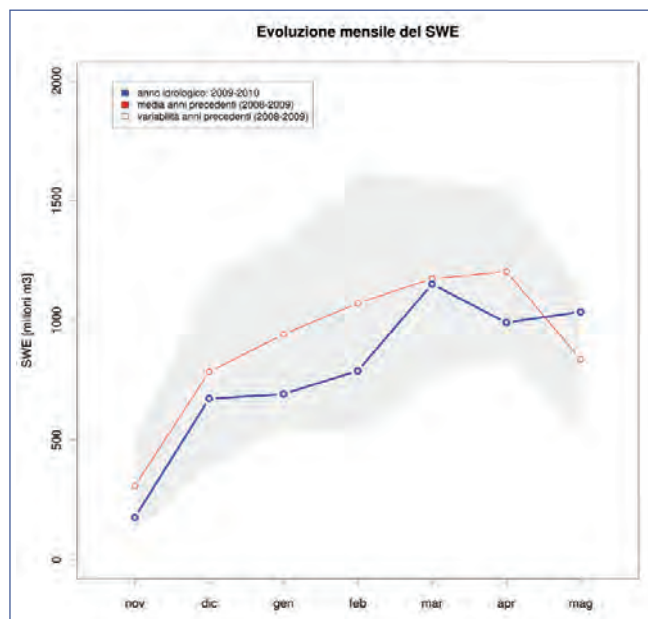
La distribuzione spaziale dell'altezza del manto nevoso si ottiene partendo dalle misure automatiche dei nivometri della rete regionale. La modellizzazione si basa sulla descrizione

matematica delle relazioni che esistono tra l'altezza della neve e le caratteristiche morfologiche del terreno: ad esempio, l'altezza della neve aumenta all'aumentare della quota o diminuisce all'aumentare della pendenza. Per quanto riguarda la densità della neve, vengono utilizzati i dati raccolti dal personale del Corpo Forestale della Valle d'Aosta e del Parco Naturale Mont Avic in appositi rilievi effettuati per la stima del SWE; a questi si aggiungono alcuni dati derivati dai rilevatori AINEVA (Associazione Interregionale Neve e Valanghe) a supporto della redazione del bollettino valanghe.

La stima del SWE a scala regionale consente di conoscere la quantità totale di acqua presente nella neve sul territorio regionale e la sua distribuzione spaziale. Tale stima viene effettuata a partire dal 2007, con una cadenza mensile, nel periodo novembre-maggio e confluisce nel bollettino idrologico predisposto dal Centro Funzionale Regionale dell'Assessorato opere pubbliche, difesa del suolo e edilizia residenziale pubblica (www.regione.vda.it/territorio/centrofunzionale/default_i.asp).

La figura presenta l'andamento mensile del SWE dell'anno idrologico 2009-2010 rispetto alla media dei due anni precedenti (2007-2008 e 2008-2009).

EVOLUZIONE MENSILE DEL CONTENUTO D'ACQUA DEL MANTO NEVOSO NELL'ANNO IDROLOGICO 2009-2010 RISPETTO AI DUE ANNI PRECEDENTI



Il grafico mostra in blu l'evoluzione mensile del SWE nell'anno 2009-2010. La linea rossa indica la media degli anni idrologici 2007-2008 e 2008-2009, mentre l'area grigia ne indica la variabilità. I valori sono espressi in milioni di metri cubi di acqua.

Rispetto ai due anni precedenti, l'inverno 2009-2010 è caratterizzato da un minor accumulo d'acqua nel manto nevoso nel periodo novembre – febbraio. Nei mesi successivi sono stati ottenuti valori più simili a quelli osservati negli anni precedenti. È importante tuttavia considerare che il confronto rispetto alla media è meno significativo in questo caso rispetto all'estensione della copertura nevosa in quanto il calcolo della media è basato sugli unici due anni per i quali la stima del SWE è disponibile. Inoltre in questi due anni è compreso un inverno particolarmente nevoso come quello del 2008-2009 che porta ad una sovrastima dei valori medi.

Il confronto tra l'evoluzione mensile dell'estensione della copertura nevosa e del SWE evidenzia come il picco annuale di copertura venga raggiunto all'inizio dell'inverno (gennaio-febbraio); nel caso del SWE invece, i valori massimi vengono raggiunti in primavera inoltrata (marzo-aprile) quando pur in presenza di una minor estensione della superficie innevata si hanno i massimi valori di altezza del manto derivanti dall'accumulo invernale e i massimi valori di densità derivanti dai processi di trasformazione della neve.



A supporto delle attività di stima del contenuto d'acqua della neve l'ARPA Valle d'Aosta è impegnata in alcune attività di sperimentazione svolte in collaborazione con il Centro Funzionale. Nel corso degli ultimi inverni sono stati installati alcuni pluviometri "a pesa" che consentono di misurare con sufficiente precisione l'entità e l'intensità delle precipitazioni nevose anche a quote elevate. Nella foto il pluviometro installato al Colle Nord di Cime Bianche (Valtournenche) a 3.100 m di quota.



Il rilievo delle caratteristiche del manto nevoso e il monitoraggio delle dinamiche glaciali interessano settori altitudinali per i quali, a volte, si rende necessario l'impiego dell'elicottero per il trasferimento del personale e del materiale. Professionalità e disponibilità di piloti, tecnici e guide alpine sono qualità fondamentali per la buona riuscita delle operazioni in ambienti "estremi". Nella foto elicottero AB412 in avvicinamento per lo sbarco di personale in prossimità del seracco pensile delle Grandes Jorasses (4.050 m di quota).

Permafrost: spessore dello strato attivo

Il permafrost è definito come un terreno (suolo o substrato roccioso, inclusi ghiaccio e materiale organico eventualmente presenti) che rimane ad una temperatura inferiore o uguale a 0°C per più di due anni consecutivi.

In un'area soggetta a permafrost, con il termine strato attivo (dall'inglese *active layer*) si fa riferimento alla porzione più superficiale di terreno che stagionalmente è soggetta a fusione e congelamento. Ai fini del monitoraggio dei cambiamenti climatici lo spessore dello strato attivo è un parametro particolarmente interessante poiché riflette direttamente le condizioni climatiche delle stagioni dell'anno idrologico in quanto dipende principalmente dallo spessore e persistenza della neve al suolo, dalla temperatura media annua dell'aria e dall'ampiezza del ciclo annuale di temperatura (escursione termica tra le temperature medie estive e quelle invernali).

Lo spessore dell'active layer è citato tra gli indicatori degli effetti dei cambiamenti climatici nel rapporto 2007 del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change).


Classificazione

Area tematica SINAnet
Biosfera

Tema SINAnet
(*Effetti dei cambiamenti climatici*)

DPSIR
S

Determinanti • Pressioni • Stato • Impatto • Risposte

Qualità dell'informazione 

Giudizio di stato* **N.A.**

Tendenza* **N.A.**

* La ridotta lunghezza del periodo di osservazione non consente ancora di effettuare valutazioni di tendenza o di stato del permafrost per il sito del Colle Nord di Cime Bianche.

Riferimenti normativi

Normativa di riferimento
L'indicatore non ha riferimenti normativi.

Relazione con la normativa
Non applicabile

Livelli normativi di riferimento
Non applicabile

Copertura temporale e spaziale

Aggiornamento
30/04/2010

Periodicità di aggiornamento
Annuale

Copertura territoriale
Puntuale
Le misure necessarie all'elaborazione dell'indicatore sono eseguite in comune di Valtournenche presso il sito di monitoraggio del permafrost del Colle Nord di Cime Bianche (3100 m.s.l.m.)



Elaborazione e presentazione

Il permafrost rappresenta un elemento importante, anche se poco appariscente, dell'ambiente glacializzato terrestre (criosfera) poiché, a seconda delle aree in cui si sviluppa, variazioni delle sue condizioni possono influenzare il regime idrico del terreno e dei corsi d'acqua, la stabilità dei pendii e delle infrastrutture su di essi presenti, il ciclo del carbonio e del metano.

Attualmente le regioni soggette a permafrost nell'emisfero settentrionale hanno una estensione di circa 23 milioni di km², ma se si includono anche le zone soggette a scongelamento superficiale stagionale si raggiungono i 48 milioni di km² pari a circa il 51% delle terre emerse e non coperte dai ghiacci dell'emisfero settentrionale.

A livello globale il permafrost è presente esclusivamente alle alte latitudini ed in alta quota, poiché il primo fattore ambientale che ne determina la possibile presenza è la temperatura media annua dell'aria. A livello regionale però, l'eventuale presenza di permafrost, è il risultato dell'interazione reciproca di numerosi altri fattori legati principalmente alle caratteristiche climatiche, topografiche e geologiche dell'area: l'abbondanza delle precipitazioni nevose, la persistenza della copertura nevosa al suolo, la quantità di radiazione solare disponibile e la capacità del terreno ad immagazzinare e scambiare calore con l'atmosfera. Le dinamiche di cambiamento climatico, ed in particolare l'attuale riscaldamento globale, interferiscono direttamente con tali fattori inducendo variazioni più o meno veloci nella localizzazione, estensione e caratteristiche fisiche del permafrost. Infatti, come evidenziato nella sintesi per i decisori politici del quarto rapporto di valutazione dell'IPCC, la temperatura del permafrost nell'emisfero settentrionale è cresciuta da un minimo di 0,5 ad un massimo di 4 °C (a seconda delle zone) nel corso degli ultimi 20 anni. In Europa tale incremento oscilla tra 0,5 e 2 °C; in particolare nelle Alpi la temperatura del permafrost alla profondità di 11,5m è cresciuta di circa 1°C dal 1987 ad oggi, arrivando a scaldarsi fino a -1°C nel corso delle estati 2001 e 2003, le più calde dall'inizio delle misure (dati della rete di monitoraggio svizzera PERMOS: www.permos.ch).

Nelle Alpi lo strato attivo ha uno spessore che può variare da pochi centimetri fin oltre i 10 metri al di sotto del quale si trova il permafrost vero e proprio caratterizzato da una temperatura costantemente minore di 0°C.

Per poter impiegare lo strato attivo come indicatore di cambiamento climatico non si può però fare riferimento al valore assoluto del suo spessore, poiché è strettamente dipendente dalle caratteristiche del sito in cui si effettuano le misure. Bensì è necessario analizzare le variazioni che intercorrono tra un anno e l'altro, quindi tanto maggiore è il numero di anni di osservazione, tanto migliore sarà la significatività dell'indicatore climatico.

Dal punto di vista pratico, per poter valutare lo spessore dello strato attivo in una zona soggetta a permafrost è necessario disporre di misure di temperatura del sottosuolo a diverse profondità e ripetute nel tempo; tali misure vengono effettuate tramite sensori di temperatura installati all'interno di fori appositamente realizzati nel substrato detritico o roccioso.

In Valle d'Aosta i dati di temperatura utilizzati per la costruzione dell'indicatore provengono da due fori profondi rispettivamente 6 e 41 metri situati presso il Colle Nord di Cime Bianche, sulla sinistra idrografica dell'alta Valtournenche ad una quota di circa 3100 metri. I fori sono attrezzati con catene termometriche collegate ad un unico datalogger che misura e registra la temperatura del sottosuolo con frequenza oraria a diverse profondità. Il monitoraggio ha avuto inizio nel gennaio del 2005 nel foro da 6 metri ed a fine agosto 2008 nel foro profondo.

La determinazione dello spessore dell'active layer e del giorno dell'anno in cui esso raggiunge il suo valore massimo presuppone l'individuazione della profondità dell'isoterma 0°C; tale parametro è ottenuto mediante interpolazione lineare dei dati misurati dai singoli sensori posti alle diverse profondità.

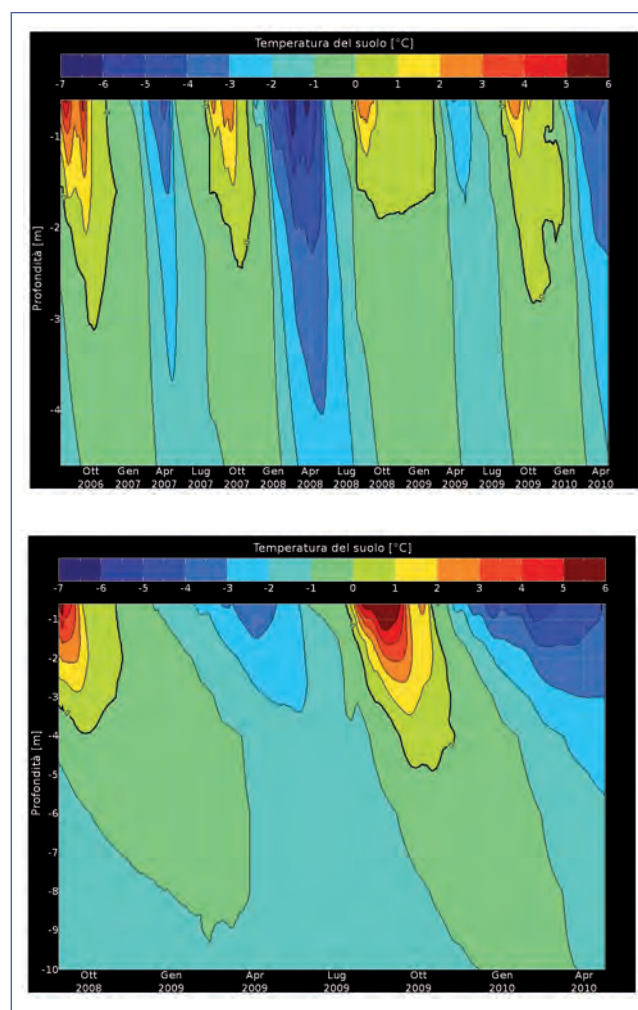


Figura 1 Contour plots relativi alle misure di temperatura nei fori situati presso il Colle Nord di Cime Bianche. Sopra: foro superficiale (profondità da -0.6 a -4.6 m); sotto: foro profondo (profondità da -0.6 a -10 m). Questa rappresentazione permette di apprezzare l'evoluzione termica del substrato nel periodo considerato. La linea nera rappresenta l'isoterma 0°C.

Per ogni anno di osservazione, la profondità massima raggiunta dall'isoterma 0°C definisce lo spessore dell'active layer. Il valore di profondità pari a zero, indica il piano campagna. Paragonando gli spessori dello strato attivo sui due fori per il 2008 e 2009 è possibile apprezzare quanto lo spessore della copertura nevosa giochi un ruolo fondamentale nella definizione del profilo termico di un suolo soggetto a permafrost. Il foro profondo è infatti ubicato in una leggera depressione che favorisce un accumulo nevoso invernale più consistente e duraturo rispetto al foro superficiale, maggiormente esposto all'azione del vento. La maggiore quantità di neve ha l'effetto di proteggere il suolo dalle rigide temperature invernali impedendo contemporaneamente la dissipazione del calore accumulato dal terreno al termine della stagione estiva. Il risultato è uno spessore dello strato attivo del foro profondo quasi doppio rispetto al foro superficiale. In tabella 1 sono riportati oltre agli spessori massimi anche i giorni di occorrenza per ciascun anno di misura sui due fori.



Anno idrologico	Spessori Strato Attivo (m)		Data profondità massima	
	Foro Superficiale	Foro Profondo	Foro Superficiale	Foro Profondo
2005/2006	3.12	-	7 ottobre	-
2006/2007	2.36	-	11 ottobre	-
2007/2008	1.9	3.9	30 settembre	27 settembre
2008/2009	2.8	4.85	22 ottobre	17 ottobre

Tabella 1 Valori relativi allo spessore massimo dello strato attivo per gli anni disponibili e dei relativi giorni in cui il valore è stato raggiunto.

Come accennato, le differenze di spessore dello strato attivo visibili tra i vari anni di osservazione sono il risultato delle condizioni meteo-climatiche dell'intera stagione (convenzionalmente riferita all'anno idrologico: ottobre-settembre). Osservando i grafici in figura 2 e confrontandoli con la figura 1 è evidente una stretta relazione sia con la quantità media di neve al suolo che con le anomalie termiche dei periodi primaverili ed estivi.

La relazione tra le condizioni meteo-climatiche registrate in sito e gli spessori osservati in foro dimostrano la buona qualità dei dati da cui l'indicatore è stato ricavato e l'ottima sensibilità dell'indicatore nel valutare gli effetti sul permafrost della variabilità meteo-climatica interannuale in alta montagna. Allo stato attuale il ridotto numero di anni di osservazione non permette ancora valutazioni di carattere climatico ma i meccanismi di interazione clima-permafrost sono chiari.

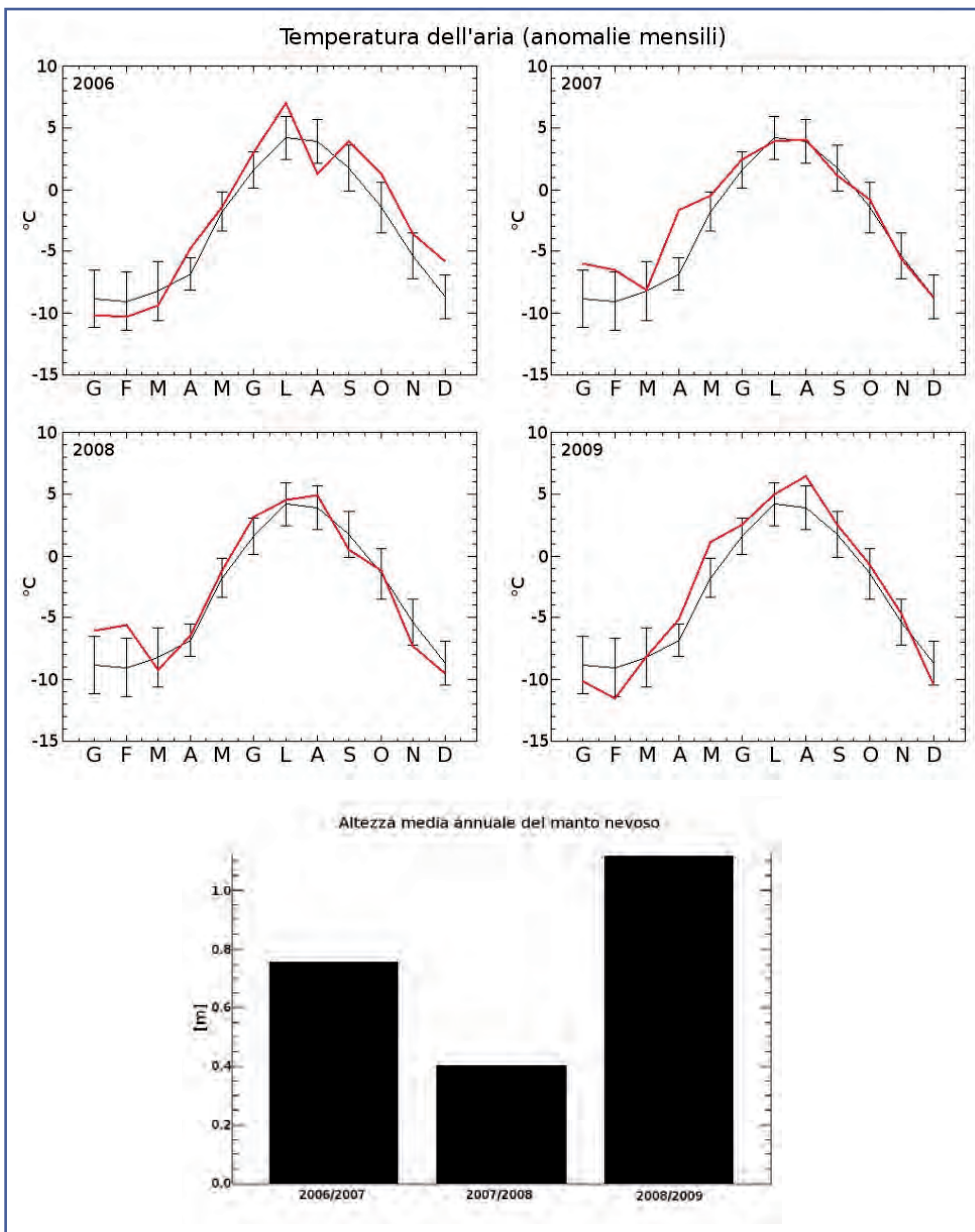


Figura 2 In alto: anomalie termiche della temperatura dell'aria rispetto alla media del periodo 1960-1998, per gli anni 2006, 2007, 2008, 2009. Sotto: altezze medie annue della neve al suolo in corrispondenza del foro superficiale.



Per garantire il corretto funzionamento della strumentazione e il rilievo di dati significativi ai fini del monitoraggio, il personale ARPA svolge regolare attività di manutenzione e aggiornamento delle stazioni. Nella foto intervento di aggiornamento del software sulla stazione di monitoraggio del permafrost di Cime Bianche (Valtournenche).

Fenologia dei lariceti

La fenologia vegetale è lo studio della periodicità degli stadi di sviluppo della vegetazione. L'inizio e la fine della stagione vegetativa delle piante sono fenomeni fortemente controllati dalle dinamiche climatiche annuali: l'aumento della temperatura e l'allungamento delle giornate determinano il rinverdimento della vegetazione in primavera, mentre in autunno la diminuzione della temperatura e l'accorciarsi delle giornate causano l'ingiallimento e la caduta delle foglie. La fenologia è dunque un ottimo indicatore biologico in grado di quantificare gli effetti del riscaldamento climatico e di valutarne la variabilità tra un anno e l'altro e a scale temporali maggiori. Questo indicatore è incluso in quelli citati nel rapporto 2007 redatto dal gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change).

Classificazione


Area tematica SINAnet
Biosfera


Tema SINAnet
(*Effetti dei cambiamenti climatici*)

DPSIR
I

[Determinanti](#) • [Pressioni](#) • [Stato](#) • [Impatto](#) • [Risposte](#)

Qualità dell'informazione 

Giudizio di stato* 

Tendenza* 

Riferimenti normativi

Normativa di riferimento
L'indicatore non ha riferimenti normativi.

Relazione con la normativa
Non applicabile

Livelli normativi di riferimento
Non applicabile

Copertura temporale e spaziale

Aggiornamento
31/12/2009

Periodicità di aggiornamento
Annuale

Copertura territoriale

Le osservazioni fenologiche che consentono l'elaborazione dell'indicatore sono eseguite in una foresta di larice localizzata nel comune di Torgnon ad una quota compresa tra 2050 e 2140 m slm. Le osservazioni vengono condotte su 30 piante selezionate all'interno del popolamento forestale indagato.

* La variazione delle date di inizio e fine della stagione vegetativa è un indice dell'effetto dei cambiamenti climatici. La possibilità che le variazioni fenologiche possano avere un impatto positivo o negativo sulla produttività (e quindi sulle dinamiche di sequestro del carbonio) dei lariceti valdostani e della vegetazione più in generale, è un importante ambito di indagine presentato nel prossimo indicatore 12.5).

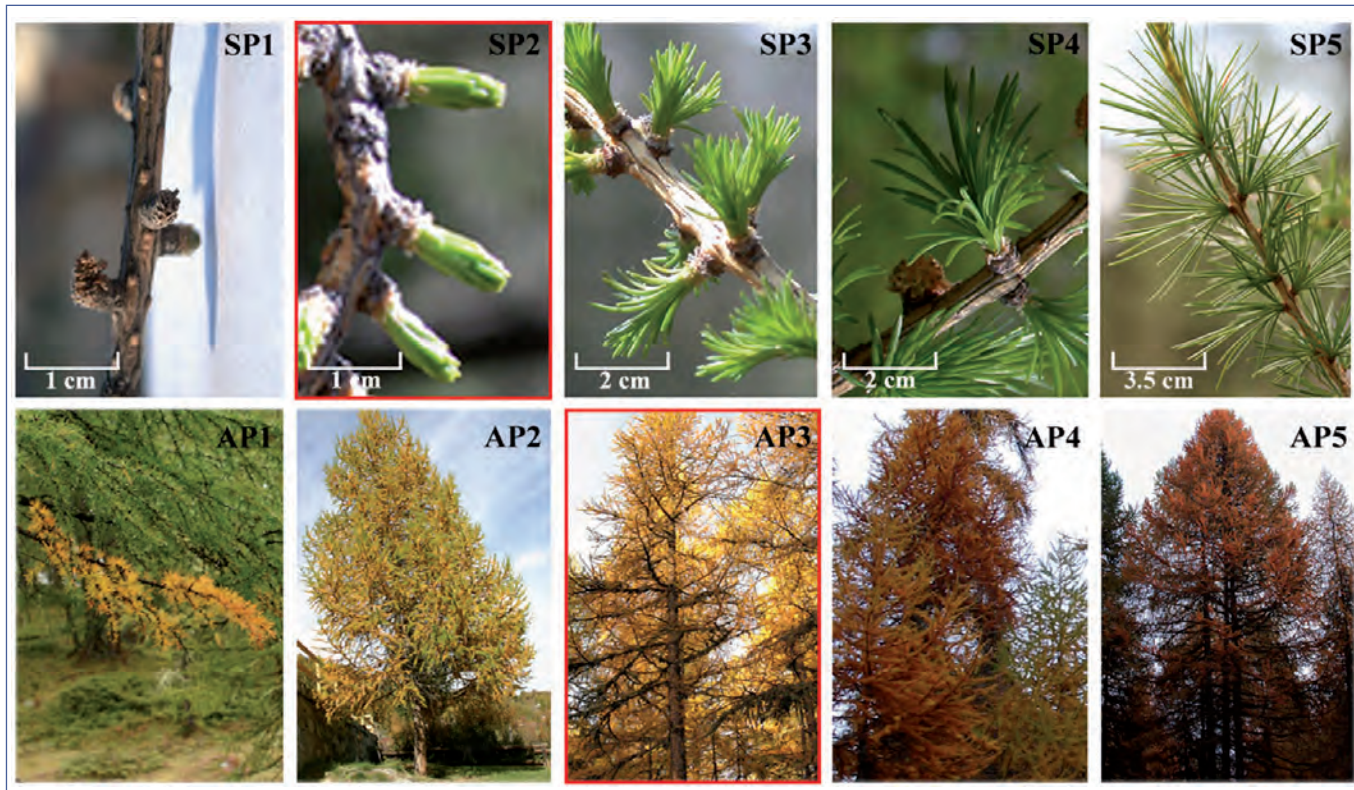


Elaborazione e presentazione

L'indicatore presenta i risultati dei cinque anni di monitoraggio della fenologia del larice (*Larix decidua*) condotti seguendo un protocollo di osservazione appositamente sviluppato. Per le fasi primaverili di fogliazione è stata predisposta una scala di valori indicativi delle

diverse fasi di sviluppo, basata principalmente sulla lunghezza degli aghi e sulle loro espansioni. Le fasi autunnali vengono descritte mediante la definizione di classi basate sulla colorazione predominante e sulla diffusione sulla chioma del fenomeno di ingiallimento.

FASI DI SVILUPPO PRIMAVERILE ED INGIALLIMENTO AUTUNNALE NEL LARICE

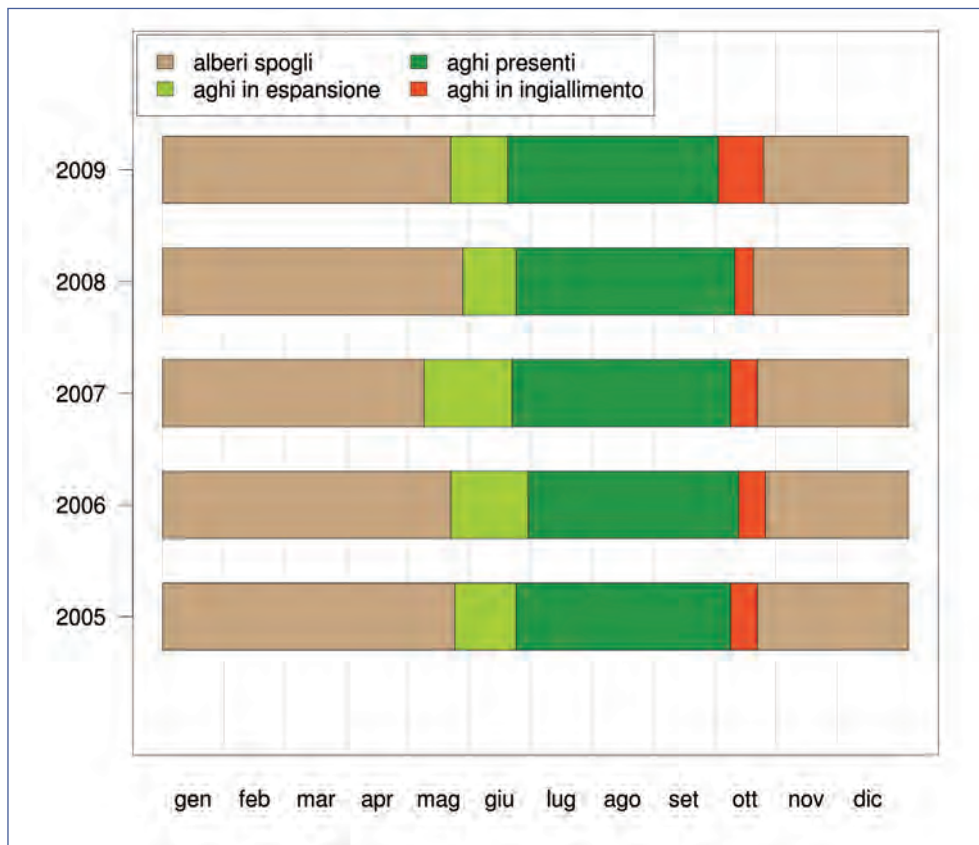


I riquadri rossi indicano le fasi utilizzate per definire l'inizio e la fine della stagione vegetativa. I valori degli indici di fogliazione e ingiallimento ricavati attraverso le osservazioni vengono elaborati al fine di individuare le date di inizio e di fine della stagione vegetativa.

La durata della stagione viene calcolata come il numero di giorni compresi tra la fine e l'inizio. Le variazioni delle date di inizio e fine della stagione, osservate tra un anno e l'altro, consentono di quantificare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla fenologia.



VARIAZIONI ANNUALI DELLA DURATA DELLA STAGIONE VEGETATIVA NEL LARICETO DI TORGNON



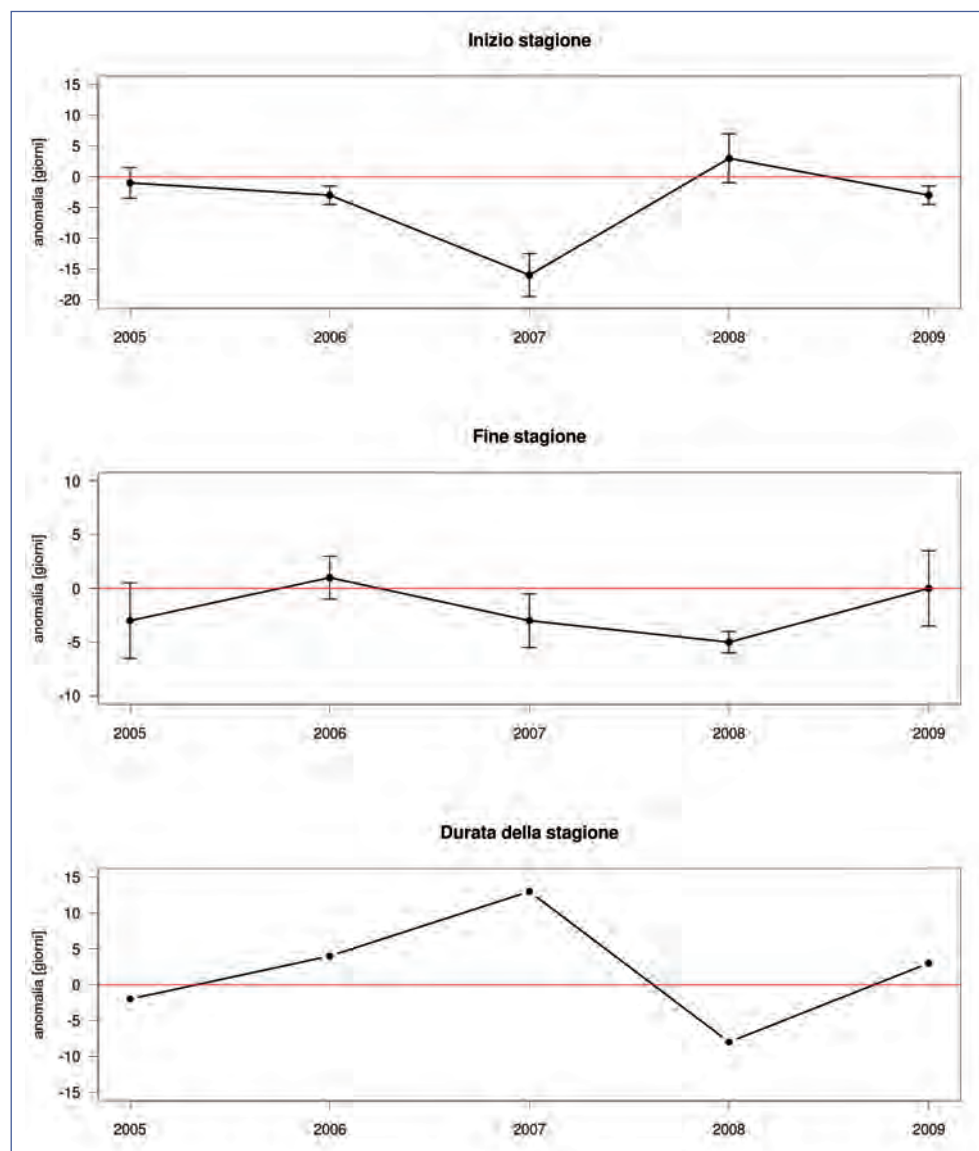
Il grafico mostra la durata della stagione vegetativa nei cinque anni di monitoraggio nel sito di Torgnon. La lunghezza delle barre orizzontali rappresenta la durata delle differenti fasi fenologiche. A partire da sinistra si vede la durata del periodo tra l'inizio dell'anno e la primavera, in cui le piante sono prive di aghi (marrone chiaro). In verde chiaro è rappresentato il periodo in cui gli aghi escono dalle gemme e si sviluppano. L'inizio e la durata di questa fase sono fortemente influenzati dalle condizioni di temperatura, come mostrato dall'eccezionale caldo dell'inverno 2007 che ha causato un anticipo dell'inizio della stagione vegetativa di più di due

settimane. La durata del periodo in cui gli aghi sono al massimo dello sviluppo è indicata in verde scuro. La porzione arancione rappresenta la durata del periodo in cui avviene il cambiamento di colore autunnale. Tale fase, come quella primaverile, è influenzata dalle condizioni climatiche: il 2006 e il 2009, ad esempio, sono stati anni dall'autunno caldo e hanno visto una fine di stagione ritardata. La seconda porzione in marrone chiaro indica il periodo fino alla fine dell'anno in cui gli alberi sono spogli. Nella tabella sono riportate le date di inizio e fine stagione e la durata, espressa in numero di giorni, osservate nei 5 anni.

Anno	Inizio stagione	Fine stagione	Durata (giorni)
2005	23 mag	18 ott	148
2006	21 mag	22 ott	154
2007	8 mag	18 ott	163
2008	27 mag	16 ott	142
2009	21 mag	21 ott	153



ANOMALIE NELLA DURATA DELLA STAGIONE VEGETATIVA NEL LARICETO DI TORGNON



Nei grafici relativi all'inizio e alla fine della stagione le barre verticali indicano la variabilità (deviazione standard) nella stima della data derivante dalle osservazioni condotte su 30 piante.

Il grafico mostra le stesse informazioni riportate nella figura precedente ma espresse in termini di differenza rispetto alla media delle osservazioni nel periodo 2005-2009 (anomalia). Un punto al di sopra della linea rossa, indica, nel caso della data di inizio stagione, un inizio ritardato rispetto alla media degli ultimi 5 anni. Un punto al di sotto della linea rossa indica un inizio anticipato rispetto alla media. Nel caso della fine e della durata della stagione, punti al di sopra della linea rossa indicano rispettivamente, una fine posticipata e una durata maggiore rispetto alla media, mentre punti al di sotto indicano una fine anticipata e una durata minore. Nelle serie temporali di anomalie presentate non è ancora possibile evidenziare trend a lungo termine ma è possibile analizzare il risultato delle condizioni climatiche dei singoli anni sulla fenologia del larice. Considerando scale temporali maggiori, è stato osservato che l'aumento di temperatura, misurato negli ultimi decenni, influisce in modo significativo sulla fenologia vegetale anticipando la data di inizio della stagione vegetativa e posticipandone la fine. Negli ultimi 30 anni in Europa è stato osservato che, mediamente, ad un aumento di 1°C corrisponde un anticipo dell'inizio della stagione di 5 giorni e un posticipo di 2 giorni della fine della stagione. Ad una simile conclusione si è giunti anche in Valle d'Aosta, a seguito di

un'analisi condotta utilizzando dati climatici e immagini satellitari del periodo 2000-2009: ad un aumento di 1°C nella temperatura media del periodo compreso tra marzo e maggio, corrisponde un anticipo di 7 giorni dell'inizio della stagione. Un aumento di 1°C nelle temperature di settembre invece ha un effetto meno pronunciato e causa un ritardo della fine della stagione di circa un giorno. Le osservazioni condotte in Europa nel periodo 1970-2000 su diverse specie vegetali, hanno mostrato un anticipo del risveglio primaverile di 2.5 giorni ogni 10 anni e un posticipo dell'ingiallimento autunnale di 1,3 giorni ogni 10 anni. In Valle d'Aosta non sono disponibili lunghe serie storiche di osservazioni della fenologia del larice (sono disponibili solo i 5 anni presentati nei grafici precedenti). Ad una conclusione simile si è però giunti utilizzando modelli fenologici che basandosi sulle relazioni tra temperatura e fenologia prevedono la data di inizio della stagione vegetativa. A partire da lunghe serie storiche di temperatura è stato possibile simulare l'andamento degli ultimi 70 anni (1931-2007) della data di inizio della stagione del larice ed è emerso un anticipo del risveglio primaverile di circa 9 giorni ogni 10 anni. Il trend di anticipo osservato è più pronunciato di quelli trovati in altri studi svolti a livello europeo e conferma la maggior sensibilità degli ecosistemi alpini al cambiamento climatico.

Il sequestro del carbonio da parte della vegetazione

Tramite la fotosintesi, la vegetazione sequestra dall'atmosfera anidride carbonica (CO₂), uno dei più importanti gas ad effetto serra. Attraverso la respirazione, al contrario, la vegetazione libera CO₂. Il bilancio tra l'attività fotosintetica e quella respiratoria determina il sequestro netto di carbonio e consente di valutare se un ecosistema svolge un ruolo di cattura (pozzo) o di emissione (sorgente) di CO₂. Diversi fattori meteo-climatici (temperatura, umidità, precipitazione, irraggiamento solare) ed ecologici (tipologia di ecosistema, fenologia...) influenzano il bilancio del carbonio alle diverse scale temporali: giornaliera, stagionale e annuale. Il monitoraggio a lungo termine del sequestro di carbonio, è un utile indicatore per valutare l'impatto del cambiamento climatico sulle dinamiche di scambio di CO₂ tra vegetazione e atmosfera e verificare il ruolo di mitigazione dell'effetto serra da parte degli ecosistemi vegetali. Il monitoraggio del ciclo del carbonio, che permette l'elaborazione dell'indicatore, viene realizzato in un pascolo alpino situato nel comune di Torgnon ad una quota di 2160 m slm, a partire dal giugno 2008. Tale sito è inserito in FLUXNET (<http://daac.ornl.gov/FLUXNET/fluxnet.shtml>), la rete globale dei siti di monitoraggio degli scambi di CO₂ tra vegetazione e atmosfera.


Classificazione

Area tematica SINAnet
Biosfera

Tema SINAnet
(*Effetti dei cambiamenti climatici*)

DPSIR
S

Determinanti • Pressioni • Stato • Impatto • Risposte

Qualità dell'informazione 

Giudizio di stato **N.A.**

Tendenza **N.A.**

Riferimenti normativi

Normativa di riferimento
L'indicatore non ha riferimenti normativi.

Relazione con la normativa
Non applicabile

Livelli normativi di riferimento
Non applicabile

Copertura temporale e spaziale

Aggiornamento
31/12/2009

Periodicità di aggiornamento
Annuale

Copertura territoriale
I dati derivano dalle misure di scambio di carbonio eseguite in un pascolo alpino a 2160 m slm (Comune di Torgnon).



Elaborazione e presentazione

L'indicatore riporta i dati relativi al sequestro annuale di carbonio da parte della vegetazione, espresso in termini di produttività netta, durante i primi due anni di monitoraggio (2008 e 2009). La produttività netta dell'ecosistema (NEP, *Net Ecosystem Production*) viene quantificata mediante la tecnica della correlazione turbolenta, *eddy covariance*, che valuta gli scambi di CO₂ tra vegetazione e atmosfera, attraverso la misurazione simultanea e ad alta frequenza della velocità e direzione del vento e delle concentrazioni

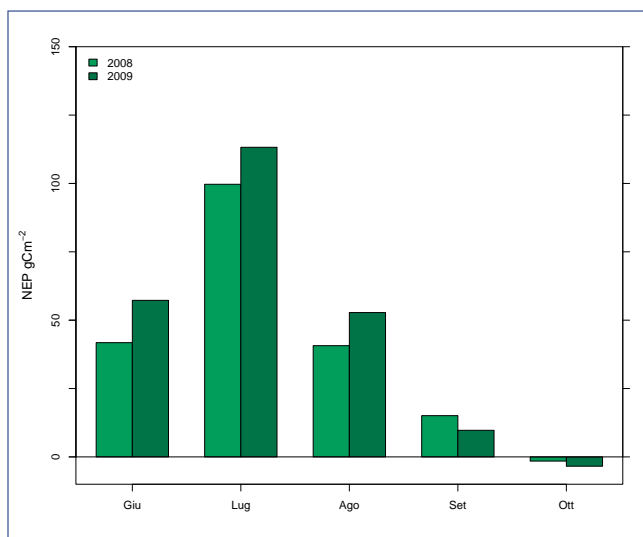
di CO₂ e vapor acqueo. La NEP è una quantità fondamentale nel monitoraggio della funzionalità degli ecosistemi e per la valutazione delle loro risposte al cambiamento climatico; la NEP è definita come la differenza tra la quantità di carbonio fissato attraverso la fotosintesi e la respirazione totale dell'ecosistema. Valori positivi di NEP indicano assorbimento di CO₂ da parte dell'ecosistema, mentre valori negativi significano rilascio di CO₂ e quindi indicano che i processi respiratori superano quelli fotosintetici.

LOCALIZZAZIONE DEL SITO DI MONITORAGGIO DEL CICLO DEL CARBONIO



Nell'immagine si possono osservare il pascolo in località Tellinod (comune di Torgnon) situato a 2160 m s.l.m. e la strumentazione (*eddy covariance* e stazione meteorologica) necessaria alla misura degli scambi di carbonio tra vegetazione e atmosfera.

SEQUESTRO NETTO DI CARBONIO MENSILE NEI DUE ANNI DI MONITORAGGIO

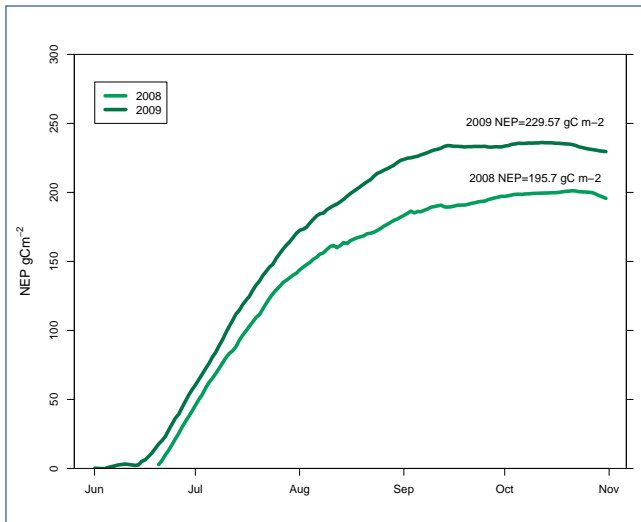


Il grafico mostra l'andamento mensile del sequestro netto di carbonio (NEP) da parte del pascolo nel sito di Torgnon. Le barre verticali indicano la quantità di carbonio cumulato mensilmente nel 2008 (in verde chiaro) e nel 2009 (in verde scuro), nel periodo da giugno a ottobre. I mesi rappresentati corrispondono al periodo dell'anno in cui il pascolo è libero dalla neve, la vegetazione è attiva e in cui, di conseguenza, avviene l'assorbimento di CO₂. Nel 2008 la strumentazione è stata installata alla fine di giugno; ne consegue che le misure cominciano tardivamente nel primo anno rispetto al secondo e che la differenza nella NEP che si può notare tra 2008 e 2009, esclusivamente per il mese di giugno, è in parte influenzata da una minor quantità di dati disponibili nel primo anno. In generale, le quantità di carbonio cumulato mensilmente sono simili tra i due anni. Durante i mesi di giugno, luglio e agosto la NEP sembra essere maggiore nel 2009, mentre nel mese di settembre si nota una inversione di tendenza. Questo comportamento è determinato da una differenza nelle principali variabili meteorologiche che hanno effetto sulla fotosintesi e sulla respirazione, come temperatura, precipitazioni e umidità del suolo e nelle loro interazioni.

Il mese di ottobre è invece caratterizzato da valori di NEP negativi in entrambi gli anni: tale andamento indica che processi respiratori iniziano a superare la fotosintesi. Il grafico mette in evidenza anche il trend stagionale di NEP: la quantità di carbonio assorbito dall'ecosistema aumenta durante i primi mesi estivi, diminuisce progressivamente nel corso della tarda estate e durante l'autunno, fino ad annullarsi completamente.



SEQUESTRO NETTO DI CARBONIO (NEP) CUMULATO NEI DUE ANNI DI MONITORAGGIO



Il grafico presenta i valori del sequestro di carbonio (NEP) cumulato nel corso dell'intera stagione vegetativa nel pascolo di Torgnon. Le due linee rappresentano il valore di NEP cumulata nel 2008 (verde chiaro) e nel 2009 (verde scuro), dal mese di giugno al mese di ottobre. Il grafico mette in evidenza come la quantità totale di carbonio assimilata nel 2009 sia maggiore rispetto alla quantità assimilata nel 2008. È comunque sempre necessario tener presente, che lo sfasamento tra le due curve deriva, in una certa misura, dal fatto che le misure cominciano tardivamente nel primo anno rispetto al secondo. In entrambi gli anni monitorati, la vegetazione pascoliva svolge complessivamente il ruolo di sequestro e non di emissione di carbonio. Il valore totale di carbonio sequestrato dall'ecosistema nella stagione di crescita (giugno-novembre) del 2008 e del 2009 è pari a 195.7 g C m⁻² e 229.65 g C m⁻² rispettivamente. Queste cifre rientrano ampiamente tra quelle misurate con la stessa metodologia (*eddy covariance*) negli ecosistemi simili appartenenti alle reti di monitoraggio internazionali.

Monitoraggio e analisi del bilancio del carbonio in ecosistemi alpini

Marta Galvagno - Edoardo Cremonese - Umberto Morra di Cella



Nel seguente approfondimento vengono illustrati con maggior dettaglio, il contesto e le attività che hanno portato alla formulazione dell'indicatore di sequestro di carbonio da parte della vegetazione (12.5). Il monitoraggio del ciclo del carbonio in ecosistemi alpini viene realizzato da ARPA Valle d'Aosta a partire dal giugno 2008. Attualmente sono oggetto di monitoraggio un pascolo alpino ed una foresta di larice (*Larix decidua* Mill.), localizzati nel comune di Torgnon ad una quota rispettivamente di 2160 m slm e 2050 m slm. Il monitoraggio viene realizzato tramite un approccio altamente integrato che sfrutta diverse tecniche di analisi al fine di ottenere una corretta quantificazione del sequestro di carbonio e valutare le relazioni con le principali variabili meteo-climatiche.



Figura 1 Pascolo alpino situato nel comune di Torgnon ad una quota di 2160 m slm

PERCHÉ È IMPORTANTE MONITORARE IL BILANCIO DEL CARBONIO?

L'aumento in atmosfera della concentrazione di anidride carbonica (CO_2), uno dei più importanti gas ad effetto serra, rappresenta attualmente una questione ambientale di interesse globale. Le variazioni nelle quantità atmosferiche di gas a effetto serra, rivestono un ruolo di grande importanza nella regolazione e alterazione del sistema climatico (IPCC 2007); in particolare, è ormai riconosciuto che le emissioni di anidride carbonica (CO_2) sono direttamente legate all'aumento globale delle temperature. In seguito alla notevole crescita della concentrazione atmosferica di CO_2 degli ultimi 200

anni (da circa 280 ppm nell'epoca preindustriale a circa 390 ppm oggi), dovuta principalmente a fonti antropiche, la comunità scientifica internazionale sottolinea la necessità di svolgere attività di analisi e monitoraggio riguardanti gli scambi gassosi tra gli ecosistemi terrestri e l'atmosfera. Gli ecosistemi terrestri svolgono infatti un importante ruolo nel bilancio globale del carbonio. Le piante, attraverso la fotosintesi, assorbono CO_2 dall'atmosfera per produrre le sostanze organiche necessarie alla loro vita. Una parte del carbonio sequestrato dall'ecosistema, viene poi nuovamente rimesso in atmosfera sotto forma di CO_2 attraverso la respirazione sia degli organismi fotosintetici (autotrofi) che non fotosintetici (eterotrofi). La differenza tra la quantità di CO_2 assorbita e quella rimessa in atmosfera determina il bilancio netto del carbonio di un ecosistema e permette di valutare se quest'ultimo svolge complessivamente il ruolo di cattura o di sorgente di CO_2 . La risposta di un ecosistema al cambiamento climatico potrebbe infatti essere duplice, anche in dipendenza della sua localizzazione geografica: in particolare, l'innalzamento delle temperature provoca un aumento dell'efficienza della vegetazione nell'assorbire CO_2 o al contrario il possibile stress causato da condizioni climatiche anomale diminuisce le capacità fotosintetiche? Lo sforzo di estendere il monitoraggio del ciclo del carbonio ad un numero sempre crescente di tipologie ambientali contribuisce alla comprensione delle alterazioni che il cambiamento climatico potrebbe esercitare sul ruolo degli ecosistemi e sulla loro capacità di mitigarne degli impatti. Una miglior conoscenza del ciclo del carbonio è inoltre fondamentale per una gestione e una pianificazione mirate delle risorse.

I SITI DI MONITORAGGIO

Gli ambienti alpini si collocano tra gli ecosistemi più sensibili al global change, per tale motivo è di grande importanza ampliare l'analisi e il monitoraggio degli effetti che i cambiamenti climatici hanno sulla loro funzionalità. Gli ecosistemi d'alta quota sono relativamente poco indagati per quel che riguarda il bilancio annuale del carbonio e come questo sia influenzato dalla variabilità interannuale delle condizioni climatiche.

ARPA Valle d'Aosta ha iniziato nell'estate del 2008 il monitoraggio a lungo termine del sequestro di carbonio a livello di un pascolo alpino situato nella Valtournenche, presso il comune di Torgnon, ad un'altitudine di 2160 m (vedi figura 2). Il sito costituisce la stazione di misura dei flussi di CO_2 situata alla quota più alta in Europa. Le principali motivazioni che hanno portato alla scelta di questo sito sono la volontà di monitorare il ciclo del carbonio in un ecosistema poco indagato e situato ad una quota in cui le variabili climatiche hanno una forte importanza e la rilevanza che tale tipologia ambientale riveste sul territorio regionale. Il sito è inserito nel network FLUXNET (<http://www.fluxnet.ornl.gov>) una rete globale che raccoglie tutti i dati relativi ai flussi di CO_2 derivanti da misure in continuo e a lungo termine realizzate con la stessa metodologia di analisi. Attualmente fanno parte di questo network circa 400 siti distribuiti in tutto il mondo. La condivisione delle informazioni e dei dati derivanti da questo tipo di monitoraggio è infatti un elemento fondamentale per comprendere meglio le dinamiche del sequestro di carbonio a livello globale.

Nell'inverno del 2009, ARPA Valle d'Aosta ha terminato l'installazione della strumentazione necessaria alle misure dei flussi di CO_2 in un secondo sito di monitoraggio: una foresta di larice localizzata anch'essa nel comune di Torgnon ad una quota di 2050 m slm, a circa 8 km dal sito in pascolo. Anche in questo caso la scelta del sito è stata motivata da alcuni elementi chiave: tra gli ecosistemi terrestri, le foreste sono i maggiori sequestratori di CO_2 , il larice (*Larix decidua* Mill.), oltre ad essere una tipologia ambientale molto rappresentativa del territorio regionale, è poco indagato a livello internazionale ed infine ARPA Valle d'Aosta realizza ormai da cinque anni il monitoraggio della fenologia nello popolamento forestale (vedi indicatore 12.4). Anche questo secondo sito di monitoraggio sarà inserito nella rete FLUXNET.



Figura 2 Sito di monitoraggio dei flussi di CO₂ nel pascolo e nella foresta di larice

LE ATTIVITÀ

Il monitoraggio del ciclo del carbonio viene realizzato mediante un approccio che integra diverse attività (vedi figura 3), con lo scopo di considerare i molteplici fattori che possono influire sul sequestro del carbonio. Le principali attività svolte per il monitoraggio del sequestro di carbonio consistono di:

- misura diretta dei flussi di CO₂ e vapor acqueo tra vegetazione e atmosfera attraverso la tecnica eddy covariance (tecnica della correlazione turbolenta);
- misura delle principali variabili meteo-climatiche;
- monitoraggio del ciclo fenologico della vegetazione attraverso un approccio integrato;
- utilizzo di tecniche di telerilevamento per la misura di indici legati alla fisiologia della piante.



Figura 3 Strumentazione utilizzata per il monitoraggio dei flussi di CO₂ in pascolo

MONITORAGGIO DEI FLUSSI DI CO₂

Il monitoraggio dei flussi di CO₂ e di tutte le componenti del ciclo del carbonio viene realizzato tramite la tecnica eddy covariance. Nell'atmosfera avvengono moti turbolenti di masse d'aria e dei gas in esse contenuti come la CO₂ e il vapor acqueo, diretti verso l'alto e verso il basso. L'eddy covariance misura questi moti turbolenti e consente di determinare i flussi netti di gas a livello dell'interfaccia tra atmosfera e vegetazione. Il sistema strumentale utilizzato (vedi figura 4) consiste di un anemometro sonico (modello CSAT3D, Campbell Scientific Inc.) e di un analizzatore ad infrarossi a cammino aperto (modello LI7500, LI-COR) che consentono la rilevazione simultanea della velocità e direzione del vento e delle concentrazioni di CO₂ e vapor acqueo.



Figura 4 Strumentazione eddy covariance costituita da un anemometro sonico tridimensionale e un analizzatore di CO₂ a infrarossi a cammino aperto

La distanza alla quale gli strumenti devono essere posti rispetto al terreno viene determinata principalmente sulla base della tipologia di vegetazione monitorata e della sua altezza. Nel sito in pascolo, dove la vegetazione raggiunge circa i 30-40 cm, anemometro e analizzatore di CO₂ sono posizionati su un treppiede all'altezza di 3 m dal suolo, mentre nel sito in larice, in cui le piante sono alte mediamente 12-14 m, la strumentazione è installata su una struttura che raggiunge i 20 m di altezza. La frequenza di acquisizione utilizzata da entrambi gli strumenti è impostata a 10 Hz, ovvero avviene una misurazione ogni 0.1 s. Queste misure ad alta frequenza vengono mediate dal sistema per fornire dati semiorari, registrati automaticamente su una scheda di memoria digitale.

A partire dalle misure grezze dei flussi viene applicata una serie progressiva di elaborazioni che permette di ottenere i dati relativi alle principali componenti del ciclo del carbonio: produttività primaria lorda (GPP, Gross Primary Production), produttività netta dell'ecosistema (NEP, Net Ecosystem Productivity) e respirazione dell'ecosistema (Re). La produzione primaria lorda corrisponde alla quantità totale di CO₂ assorbita dalla vegetazione tramite la fotosintesi. Una frazione di questa CO₂ viene poi consumata dalla piante stesse tramite la respirazione cellulare e per il mantenimento di organi e tessuti. Tenendo conto anche della respirazione degli organismi non fotosintetici, la differenza tra la CO₂ assorbita e quella respirata costituisce la produzione primaria netta (vedi figura 5).

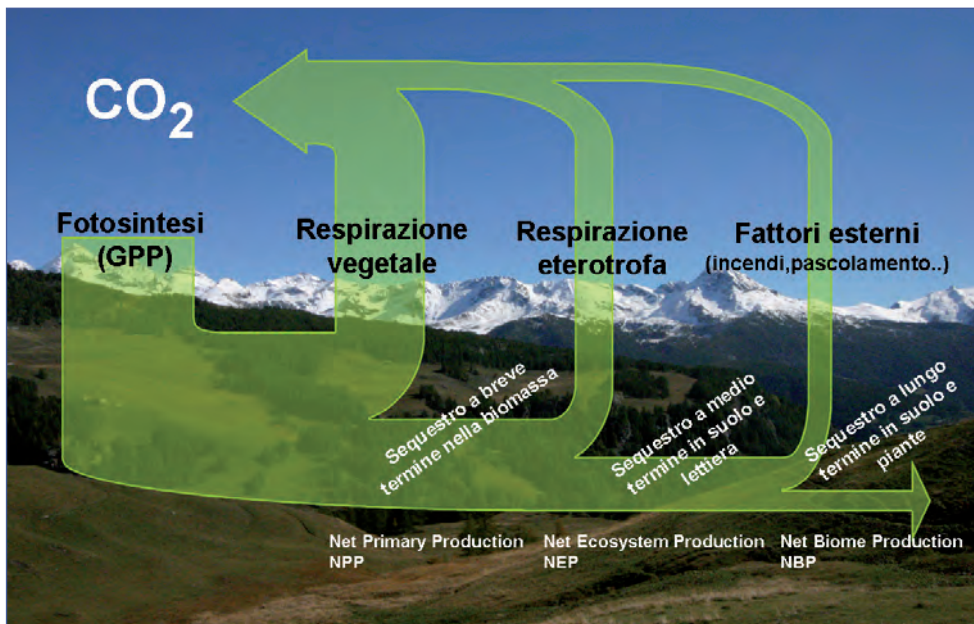


Figura 5 Rappresentazione schematica delle principali componenti del bilancio del carbonio

Gli andamenti su scala giornaliera, stagionale e annuale di NEP, GPP e Re sono utili per comprendere le complesse interrelazioni tra le singole componenti del ciclo e le diverse variabili meteo-climatiche e valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sul sequestro di carbonio. Il grafico in figura 6 mostra l'andamento giornaliero dei dati di NEP, GPP e Re misurati nel pascolo a partire dal giugno 2008 fino a novembre 2009. I flussi raggiungono i valori massimi durante i mesi di luglio ed agosto in corrispondenza del periodo di massima attività della vegetazione. Il decremento osservato nei mesi autunnali è causato dal progressivo ingiallimento della vegetazione e dalla progressiva riduzione dell'attività fotosintetica. Il periodo in cui i valori dei flussi sono vicini allo zero corrisponde al periodo con neve al suolo. In particolare, l'aumento dei flussi, che coincide con l'inizio dell'attività di sequestro svolta dalla vegetazione, osservato nella primavera del 2009 avviene in corrispondenza dei giorni in cui il manto nevoso fonde fino a scomparire (vedi figura 7).

MISURA DELLE PRINCIPALI VARIABILI METEO-CLIMATICHE

La strumentazione per la rilevazione delle principali variabili meteorologiche è installata nel caso del pascolo, nelle vicinanze della stazione eddy covariance. Nel caso del lariceto invece la strumentazione è installata alla base e in cima alla struttura di sostegno della sensoristica eddy. Le variabili misurate sono: la temperatura e umidità dell'aria, la temperatura e l'umidità del suolo, i flussi di calore nel suolo, le varie componenti della radiazione solare, la precipitazione e l'altezza della neve. Tali variabili vengono misurate al fine di analizzare l'influenza delle condizioni climatiche, e della loro variabilità stagionale ed interannuale, sulle dinamiche di scambio di CO₂ dell'ecosistema. In figura 7 viene illustrato l'andamento di alcune delle variabili importanti nel monitoraggio del ciclo del carbonio nei due anni monitorati: in alto, l'andamento della temperatura dell'aria, al centro, i valori di precipitazione e contenuto idrico del suolo, in basso, l'altezza della neve nel periodo invernale. Si può notare come il momento di fusione della neve coincida con uno spiccato aumento dell'umidità del suolo. Inoltre, riferendosi alla figura 6 si può notare come l'inizio e la fine dell'attività di sequestro di CO₂ siano strettamente legati al momento di comparsa e scomparsa del manto nevoso.

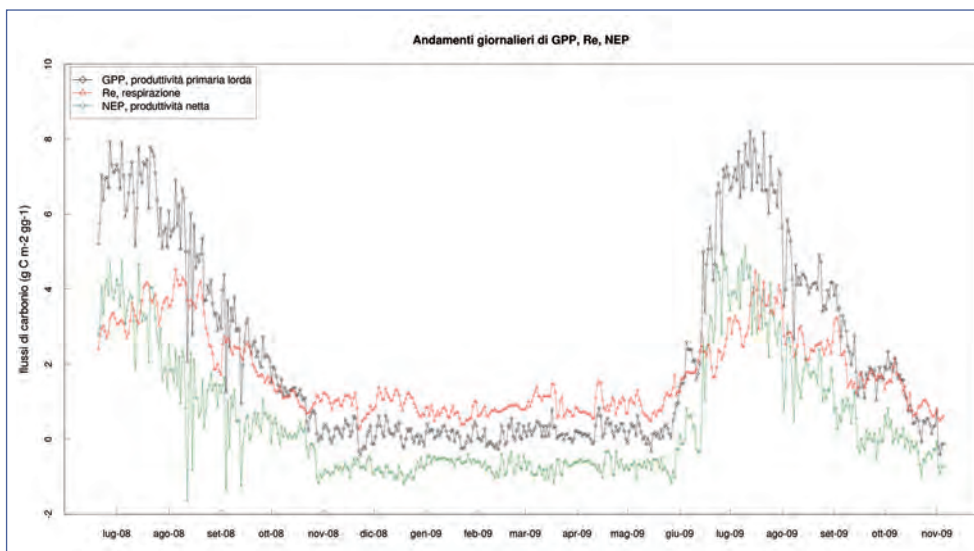


Figura 6 Andamento stagionale dei valori giornalieri di NEP, GPP e Re espressi in grammi di carbonio per metro quadrato

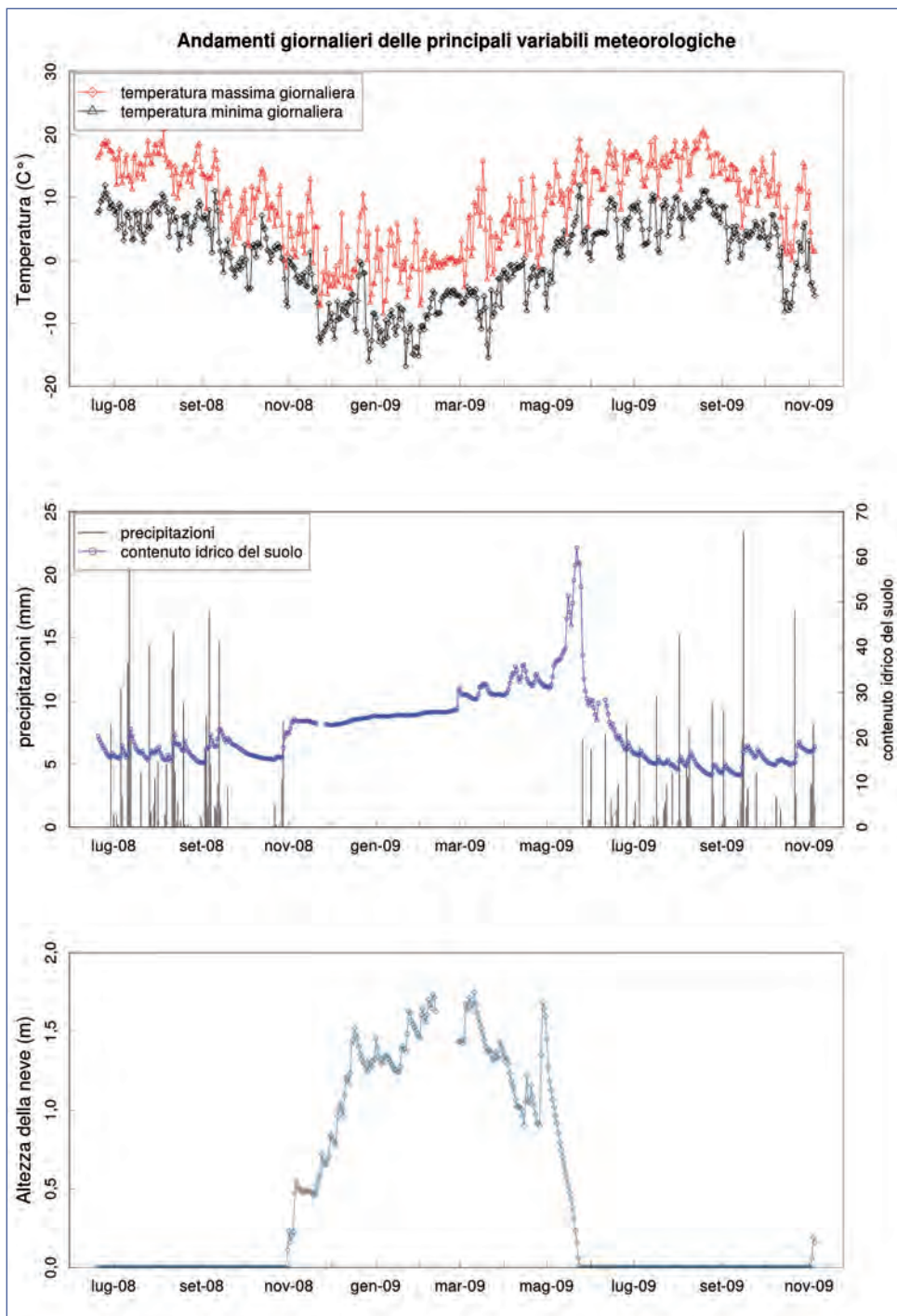


Figura 7 Andamento stagionale dei valori giornalieri di Temperatura dell'aria, precipitazione, contenuto idrico del suolo, l'altezza della neve.

MONITORAGGIO DEL CICLO FENOLOGICO DELLA VEGETAZIONE ATTRAVERSO UN APPROCCIO INTEGRATO

Il monitoraggio della fenologia della vegetazione, ovvero il manifestarsi di eventi chiave del ciclo vitale delle piante come la comparsa o l'ingiallimento delle foglie, viene realizzato con lo scopo di valutare le relazioni tra la durata della stagione vegetativa e l'entità di sequestro di carbonio da parte dell'ecosistema. Scopo di questo monitoraggio, svolto in collaborazione con il Dipartimento di Biologia Vegetale dell'Università degli Studi di Torino, è valutare se l'allungamento della stagione vegetativa, causato dall'aumento delle temperature, si traduce o meno in un maggior assorbimento di CO₂. Il ciclo fenologico viene monitorato principalmente attra-

verso le osservazioni fenologiche in campo e mediante immagini acquisite in automatico da una webcam. La figura 8 mostra alcune immagini, acquisite a partire da maggio a novembre 2009, dei momenti più importanti dello sviluppo vegetativo: la fusione della neve, il progressivo rinverdimento primaverile, l'ingiallimento autunnale e la ricomparsa della neve.

La serie completa delle immagini giornaliere viene elaborata in modo automatico e consente di quantificare l'andamento stagionale dello stato di rinverdimento della vegetazione, attraverso un indice di verde. In figura 9 si può notare come l'indice di verde, ottenuto dall'elaborazione delle immagini, cresca progressivamente a partire dall'inizio della stagione, raggiunga un massimo all'incirca a metà luglio per poi decrescere, a fine stagione, fino a valori minimi.

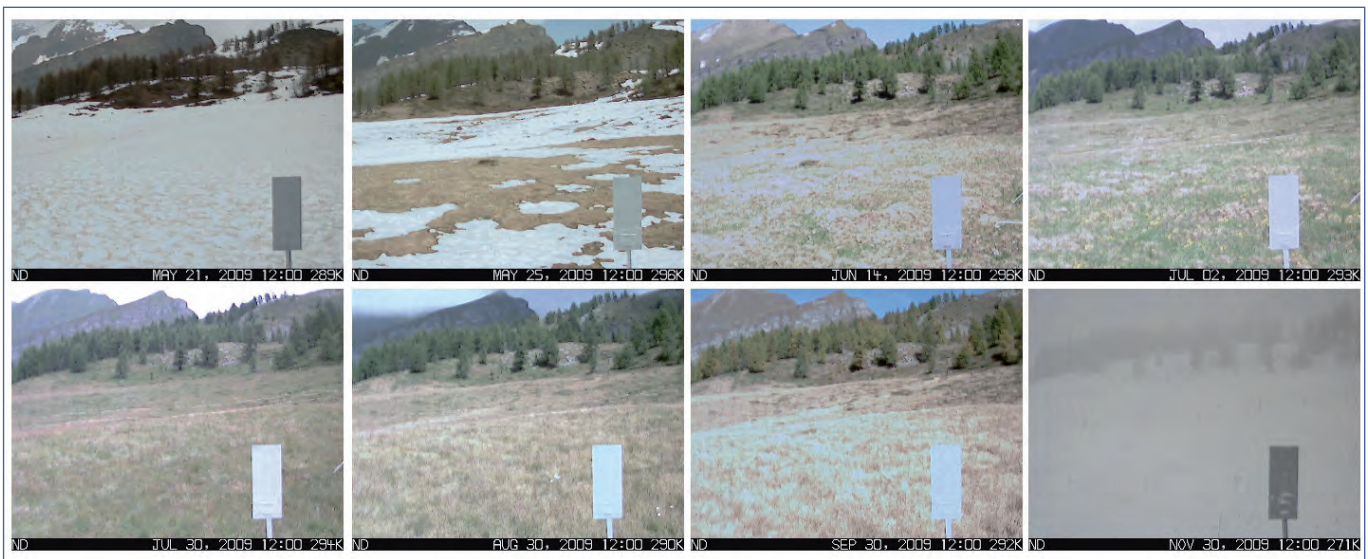


Figura 8 Esempio di immagini acquisite dalla webcam nel periodo maggio – novembre 2009

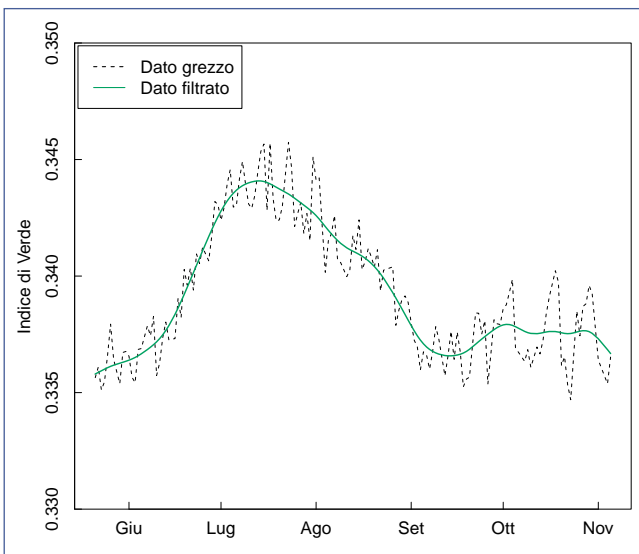


Figura 9 Serie stagionale dell'indice di verde del pascolo calcolato a partire da immagini webcam

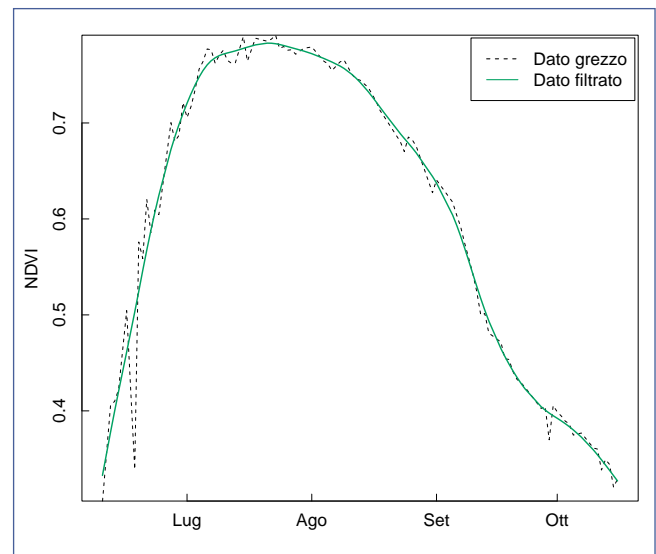


Figura 10 Serie stagionale dell'indice NDVI nel pascolo

TELERILEVAMENTO DELLA VEGETAZIONE

Un ambizioso obiettivo dell'attività di monitoraggio svolta, consiste nel tentativo di legare gli scambi di carbonio ad indici dello stato fisiologico della vegetazione quantificati a partire da osservazioni remote dalle proprietà ottiche della vegetazione. Con proprietà ottiche s'intendono sostanzialmente le modalità attraverso le quali la vegetazione interagisce con la radiazione solare incidente. Nel sito del pascolo, durante la stagione 2009, è stato installato, ad un'altezza da terra di 3m, uno spettroradiometro che acquisisce in continuo dati relativi alle proprietà ottiche della vegetazione. Lo strumento, chiamato HyperSpectral Irradiometer (HSI) e sviluppato dal Laboratorio di Telerilevamento dell'Università degli Studi di Milano Bicocca, è costituito da un braccio robotizzato che consente di orientare i sensori alternativamente verso l'alto e verso il basso, garantendo così la misura rispettivamente della radiazione solare incidente e di quella riflessa dalla vegetazione. Il sistema è composto da due spettroradiometri specifici per il calcolo di indici di vegetazione tradizionali (ad esempio l'NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), legati principalmente alle caratteristiche strutturali della vegetazione, e di alcuni indici come il Photochemical Reflectance Index (PRI) o

la fluorescenza naturale della clorofilla (Fs) maggiormente legati alla fisiologia delle piante. A partire dalle misure radiometriche è possibile calcolare tali indici e ricavarne l'andamento temporale durante la stagione vegetativa. In figura 10 viene illustrato, l'andamento stagionale dell'indice NDVI che è rappresentativo della quantità di biomassa verde della vegetazione osservata ed è quindi legato all'andamento fenologico stagionale.

L'NDVI e gli altri indici misurati dal HSI sono strettamente legati ai processi di utilizzazione della luce da parte delle piante e sono quindi correlabili alle componenti del ciclo del carbonio. Le misure eseguite dal HSI sono simili ai dati ricavabili dalle immagini satellitari ma hanno dei vantaggi rispetto alle osservazioni da satellite, come la possibilità di osservare le proprietà ottiche della vegetazione in continuo e ad una scala appropriata per l'associazione con le misure dei flussi. L'obiettivo che ci si pone in questo contesto è quello di sviluppare delle relazioni tra flussi e indici ottici attraverso le rilevazioni di campo e in un secondo momento valutare la potenzialità di usare tali relazioni per realizzare delle stime di produttività dell'ecosistema da satellite ad una scala spaziale più ampia.

Il Progetto PhenoALP

Edoardo Cremonese - Umberto Morra di Cella - Marta Galvagno



PhenoALP è un progetto Interreg triennale (2009-2012), cofinanziato dalla Comunità Europea che rientra nel programma operativo per la cooperazione transfrontaliera Italia-Francia (ALCOTRA). La fenologia è lo studio della periodicità degli stadi di sviluppo degli organismi viventi; il progetto ha lo scopo di migliorare la comprensione delle variazioni fenologiche indotte dai cambiamenti climatici nelle Alpi.

Gli obiettivi principali di PhenoALP sono:

1. lo sviluppo di una rete di osservazioni fenologiche nelle regioni coinvolte nel progetto (Valle d'Aosta e Alta Savoia);
2. la definizione di protocolli di osservazione comuni
3. il coinvolgimento di volontari e scuole nelle attività di osservazione come mezzo per sensibilizzare la popolazione locale sul tema del cambiamento climatico

ARPA Valle d'Aosta è leader del progetto e i partners sono: Il Parco Naturale del Mont Avic, il Servizio Area Protette dell'Assessorato Agricoltura e Risorse Naturali in Valle d'Aosta, il Centre de Recherche des Ecosystème d'Altitude (CREA) e il Parc Naturel des Massifs des Bauges in Francia. Nel progetto è coinvolto anche il Parco Nazionale del Gran Paradiso.

Per maggiori informazioni visitare www.phenoalp.eu

LE AZIONI DEL PROGETTO PHENOALP

Il progetto è articolato nelle seguenti azioni

1- Pheno-plantés: ha lo scopo di definire protocolli di osservazione comuni per la fenologia vegetale di specie arboree ed erbacee e di sviluppare una rete di punti di osservazione. Per quanto riguarda le specie arboree (*Picea abies*, *Larix decidua*, *Betula pubescens*, *Betula pendula*, *Fraxinus excelsior*, *Sorbus aucuparia* e *Corylus avellana*) l'esperienza derivante dal progetto Phenoclim (www.crea.hautesavoie.net/eng/phenoclim/), sviluppato in Francia dal CREA, viene trasferita ai partner valdostani che ne promuovono la diffusione. Le osservazioni si basano su protocolli già definiti presentati con schede semplici e di facile applicabilità e portano alla individuazione delle date di inizio e fine della stagione vegetativa delle specie monitorate. Le osservazioni vengono svolte da specialisti (guardiaparco, guardie forestali) e da volontari.

Per quanto riguarda le formazioni erbacee è stato sviluppato un nuovo protocollo fenologico per i pascoli alpini basato sulle "forme vegetali" al fine di essere indipendente dalla presenza/assenza di specie particolari e quindi applicabile in contesti diversi. Le forme vegetali considerate sono 7: ciperacee, graminacee appetibili e non, asteracee, leguminose, arbusti sempreverdi e arbusti a foglie decidue. Per ogni forma durante la stagione vegetativa vengono monitorate variabili quantitative come la lunghezza delle foglie, il numero di gemme, il numero di fiori, ... e variabili qualitative come le fasi riproduttive. Le osservazioni vengono svolte all'interno di aree permanenti su individui marcati. I siti di osservazione ricoprono un gradiente altitudinale compreso tra 1560 m e 2580 m slm.

I dati raccolti vengono gestiti ed elaborati in modo omogeneo al fine di realizzare una serie storica di osservazioni fenologiche nelle Alpi nord occidentali e di evidenziare le relazioni tra vegetazione, clima e topografia.

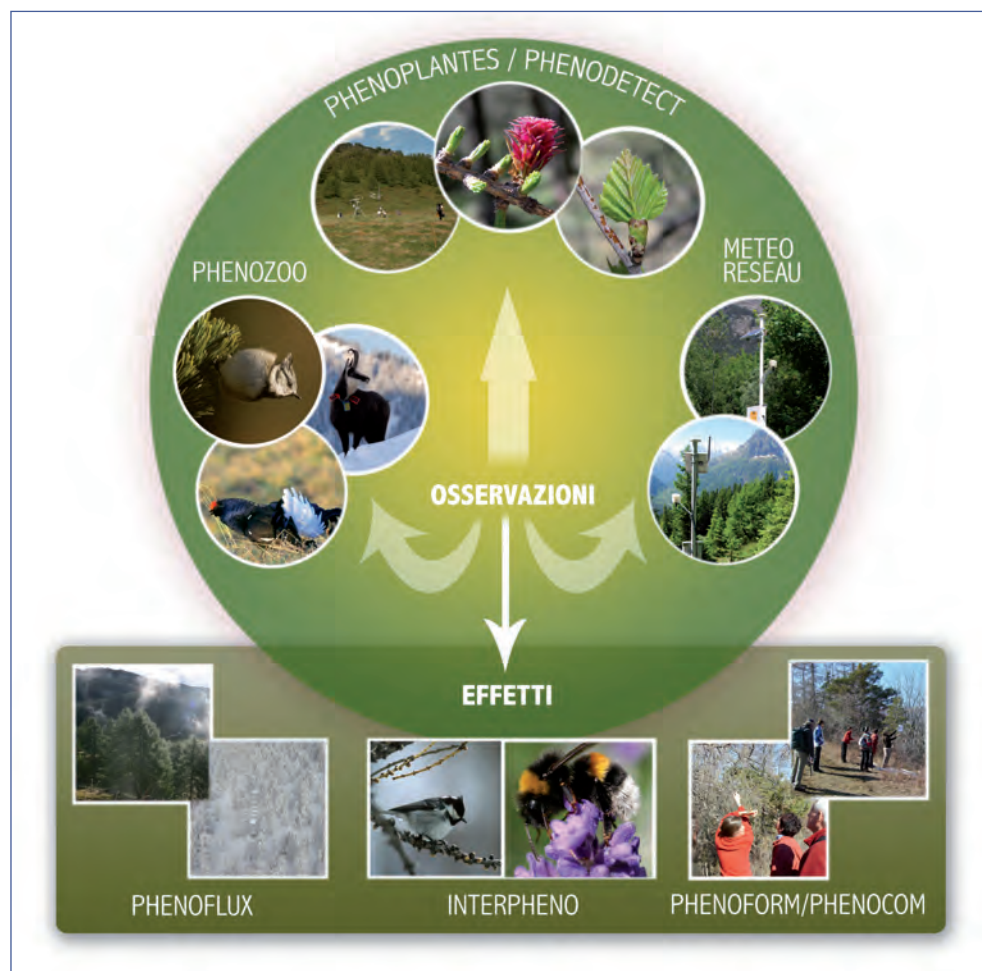


Figura 1 Rappresentazione schematica delle azioni svolte nel progetto e delle loro relazioni



Figura 2 Area permanente per il monitoraggio della fenologia delle formazioni erbacee (Vallorcine – Chamonix FR)

2- Pheno-detection. Scopo dell'azione è utilizzare dati satellitari per monitorare la fenologia dei boschi di larice e dei pascoli alpini in Valle d'Aosta e Alta Savoia. Le immagini saranno elaborate secondo tecniche sviluppate sul territorio valdostano negli anni passati al fine di ottenere le date di inizio e fine stagione vegetativa degli ambienti indagati. I dati raccolti nell'ambito dell'azione Pheno-plantes saranno utilizzati per verificare l'esattezza delle stime fornite dalle immagini satellitari. Il vantaggio di usare immagini satellitari rispetto alle osservazioni di campo consiste nel fatto che si possono ottenere informazioni su tutto il territorio compreso nelle immagini e per tutto l'intervallo di tempo in cui sono disponibili i dati (2000-2010).

In alcuni siti le osservazioni fenologiche sono condotte in modo automatico e continuo attraverso l'uso di webcam (vedi figura 3): nelle ore centrali della giornata vengono acquisite immagini che poi sono elaborate in modo automatico per ottenere le date di inizio e fine della stagione vegetativa. I siti dotati di webcam sono inclusi nel network internazionale Phenocam (<http://klima.sr.unh.edu/>).

3- Pheno-flux. L'azione si pone l'obiettivo di indagare le relazioni tra la variabilità inter-annuale della fenologia vegetale e la produttività degli ecosistemi, quantificata misurando gli scambi di CO₂ tra vegetazione ed atmosfera mediante la tecnica della correlazione turbolenta (vedi indicatore 12.5 e l'approfondimento: monitoraggio e analisi del bilancio del carbonio in ecosistemi alpini). Lo scopo

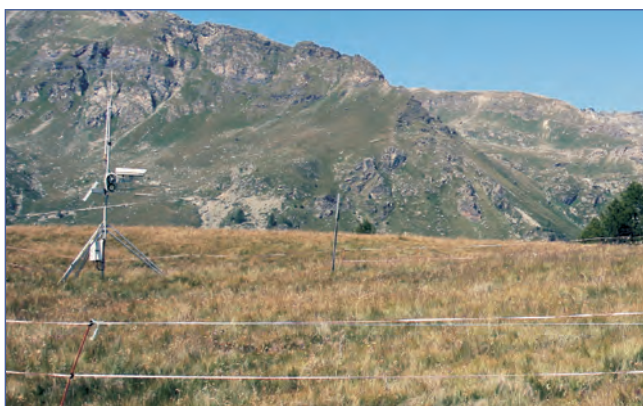


Figura 3 Monitoraggio della fenologia di un pascolo alpino tramite webcam

dell'attività è quello di capire l'effetto che il progressivo allungamento della stagione vegetativa, osservato nell'ultimo decennio e previsto per gli anni futuri, avrà sulla produttività degli ecosistemi alpini: un ecosistema che nelle attuali condizioni climatiche svolge il ruolo di sottrarre anidride carbonica dall'atmosfera, risentirà in modo positivo o negativo di un allungamento della stagione vegetativa?

Per rispondere a questa domanda vengono utilizzate le osservazioni fenologiche e i dati di scambio di carbonio misurati in due siti localizzati nel comune di Torgnon: un pascolo alpino (2160 m slm) in cui le attività di misura sono iniziate nel giugno del 2008 e una foresta di larice (2050 m slm) in cui la strumentazione è stata recentemente installata (inverno 2010). I dati di scambio di carbonio sono elaborati secondo procedure definite a livello internazionale nell'ambito delle reti globali (FLUXNET: <http://daac.ornl.gov/FLUXNET/>) che riuniscono i siti in cui vengono svolte questo tipo di misure e in cui confluiscono anche i due siti valdostani.

4. Pheno-zoo: scopo dell'azione è la definizione di comuni protocolli di osservazione della fenologia animale di specie alpine e la realizzazione di una rete di monitoraggio distribuita secondo gradienti altitudinali. Viene considerato un elevato numero di specie animali al fine di individuare quali sono le più sensibili al cambiamento climatico e più adatte alla realizzazione di osservazioni fenologiche.

Nel caso degli uccelli vengono osservate le fasi riproduttive di alcune specie di passeriformi forestali mediante l'utilizzo di nidi artificiali posizionati all'interno del bosco. I nidi vengono visitati settimanalmente al fine di rilevare variabili quantitative come il numero di nidi occupati rispetto a quelli posizionati, la data di deposizione e la data di schiusa del primo uovo, le fasi di sviluppo dei pulcini e la data di involo dei giovani. Tali osservazioni sono realizzate nel Parco Naturale del Mont Avic e nella Zona a Protezione Speciale Mont Avic e Mont Emilius in Valle d'Aosta e nell'area di Chamonix (Vallorcine) e nel Parc Naturel des Massifs des Bauges in Francia. (vedi figura 4). Per quanto riguarda il gallo forcello sarà sviluppato un protocollo per l'osservazione delle fasi iniziali del ciclo riproduttivo annuale e saranno analizzati dati pregressi per verificare l'effetto della variabilità della copertura nevosa sui comportamenti di ricovero durante la stagione invernale.

Il camoscio verrà studiato per definire un protocollo per l'osservazione delle fasi del ciclo riproduttivo e per condurre un'analisi retrospettiva al fine di comprendere l'influenza delle condizioni climatiche sui parametri demografici. Per gli anfibi è stata realizzata una rete di mo-



Figura 4 Nidi artificiali per il monitoraggio della fenologia degli uccelli

monitoraggio della fenologia riproduttiva della rana temporaria in alcune zone umide valdostane e francesi comprese tra 1800 e 2200 m slm. In tali siti con frequenza settimanale vengono osservati il numero di deposizioni e le date delle principali fasi di metamorfosi dei girini.



Figura 5 e 6 Monitoraggio della fenologia della rana temporaria. Sopra: zona umida nell'area di Vallorcine (Cahmonix -FR) in cui vengono fatte le osservazioni; sotto: giovane di *Rana temporaria* poco dopo la metamorfosi



Per quanto riguarda gli insetti sono stati sviluppati protocolli di osservazione della fenologia dei carabidi, delle farfalle e dei bombi in siti di monitoraggio localizzati nel Parco Naturale del Mont Avic e nella ZPS Mont Avic e Mont Emilius. Tali protocolli hanno l'obiettivo di monitorare, durante la stagione estiva, la data in cui si presenta il picco nella presenza delle differenti specie appartenenti ai taxa considerati e di mettere in relazione tale data con le condizioni climatiche.

5. Inter-Pheno: scopo dell'azione è l'individuazione dei legami tra la fenologia vegetale e quella animale al fine di analizzarne gli impatti reciproci in relazione ai cambiamenti climatici. L'azione verrà condotta nell'ultimo anno di progetto analizzando in modo congiunto le osservazioni della fenologia animale e vegetale al fine di comprendere se variazioni nella durata della stagione vegetativa possono avere effetti sugli animali (es. variazioni nella disponibilità di risorse trofiche, variazioni nelle dinamiche prede/predatori, ...).

6. Meteo-Reseau: il manifestarsi degli eventi fenologici dipende dalle condizioni climatiche. Nelle Alpi uno dei parametri climatici che maggiormente influenza i cicli vitali di piante ed animali è la temperatura. Lo scopo di Meteo-Reseau è la creazione di un network di stazioni di misura della temperatura in Valle d'Aosta e Alta Savoia. Il network sarà composto da circa un centinaio di stazioni installate nelle vicinanze dei siti di monitoraggio fenologici. Le stazioni misurano la temperatura dell'aria ad un'altezza da terra di 30 e 200 cm e la temperatura del suolo alla profondità di 2 e 10 cm.

7. Pheno-Form: scopo dell'azione è la creazione di un gruppo di educatori ambientali (insegnati, accompagnatori della natura, guardaparco e guardie forestali) che possa diffondere e promuovere lo svolgimento delle osservazioni fenologiche come strumento per sensibilizzare la popolazione sugli effetti dei cambiamenti climatici nelle Alpi attraverso un elemento immediatamente percepibile come la comparsa delle foglie sulle piante. Nell'ambito di Pheno-Form inoltre vengono coinvolte alcune istituzioni scolastiche (scuole elementari e medie inferiori) nelle attività di osservazione. In particolare sono state coinvolte le scuole dei comuni di Torgnon, Nus, Fenis e Saint Marcel, comuni nei quali sono presenti i siti di monitoraggio delle azioni Pheno-plantes e Pheno-zoo. Lo svolgimento delle attività si basa sull'esperienza francese del progetto Phenoclim: gli studenti partecipano ad incontri di presentazione delle attività e soprattutto svolgono le osservazioni scegliendo le piante presenti nel cortile della scuola o nelle immediate vicinanze.





Nell'ambito del progetto Interreg Alcotra n. 044 "PHENOALP-Phénologie alpine" è stata installata, su una struttura metallica temporanea posizionata in un lariceto di Torgnon (AO), la strumentazione per il monitoraggio degli scambi di carbonio fra atmosfera e ecosistema. Per il corretto funzionamento del sistema di misura gli operatori dell'ARPA svolgono interventi di manutenzione e controllo anche nel periodo invernale.



Finito di stampare nella città di Aosta
nel mese di dicembre dell'anno duemiladieci
per i tipi della «Tipografia Valdostana», corso Padre Lorenzo, 5

