

STIMA DELLA DISPONIBILITÀ IDRICA SOTTO FORMA DI NEVE NEI BACINI IDROGRAFICI ALPINI LOMBARDI MEDIANTE INTEGRAZIONE DI DATI SATELLITARI MODIS E MISURE NIVOMETRICHE A TERRA

Dario BELLINGERI , Enrico ZINI, Roberto SERRA, Giovanni PERETTI

ARPA Lombardia, Viale Restelli 3/1, Tel. 02 69666320, fax 02 69666259, d.bellingeri@arpalombardia.it

Riassunto

Viene qui presentata la metodologia di stima dell'equivalente idrico della neve (SWE) sui bacini idrografici montani lombardi, una delle informazioni inserite nel bollettino idrologico pubblicato con cadenza settimanale da ARPA Lombardia. La metodologia integra le misure nivometriche effettuate alle stazioni nivometeorologiche con i risultati delle elaborazioni delle immagini satellitari giornaliere MODIS.

Abstract

In this paper the methodology of Snow Water Equivalent (SWE) estimation is presented. The methodology is currently applied over Lombardy mountain catchments and it is one of the input for the hydrological bulletin of ARPA Lombardia. The workflow supplements snow measurements at ground stations with the results of MODIS data elaborations.

Introduzione

Dal 2004 la Regione Lombardia ha trasferito ad ARPA Lombardia le competenze e le infrastrutture dell'ex SIMN Servizio Idro-Mareografico Nazionale) che comprendono tra l'altro il monitoraggio quantitativo dei corpi idrici superficiali. L'intensificazione negli ultimi anni degli episodi di crisi idrica ha dato un'ulteriore stimolo ad approfondire e potenziare le metodologie di monitoraggio della disponibilità delle risorse idriche. Il verificarsi di situazioni di crisi idrica dovute a scarsità delle precipitazioni pluvio-nivali può generare infatti conflitti tra le diverse utilizzazioni delle risorse idriche che possono risultare di difficile risoluzione. E' quindi necessario disporre di metodi di stima rapidi ed efficienti delle diverse componenti del bilancio idrologico ed, in particolare, dell'acqua immagazzinata sotto forma di neve (in inglese: Snow Water Equivalent o SWE) che nei bacini lombardi dell'area alpina assume un'importanza rilevante.

La metodologia sviluppata in ARPA Lombardia dal Laboratorio di Telerilevamento e dalla Unità Operativa Idrografia, integra le analisi effettuate su immagini MODIS, con i dati derivanti dalla rete di stazioni nivometeorologiche automatiche e le misure nivologiche manuali effettuate dai tecnici del Centro Nivometeorologico di Bormio di ARPA Lombardia.

Metodologia

Le stime di SWE a scala di bacino idrografico montano sono basate su un modello semplificato, che rende conto dell'accumulo e dello scioglimento della neve, su una maglia di 100x100 metri, con una frequenza temporale di output di 7 giorni. Le inevitabili semplificazioni adottate, considerando le variabili in gioco e la complessità dei fenomeni di accumulo, scioglimento, trasporto e densificazione della neve, sono giustificate dalla necessità di fornire stime con cadenza regolare e relative ad ampie porzioni del territorio lombardo, oltre che basate su metodologie riproducibili, in un'ottica di supporto alle decisioni.

Una delle caratteristiche della metodologia di stima è quella di integrare le informazioni sull'estensione areale dell'innnevamento, derivate con cadenza regolare tramite classificazione di immagini satellitari. In figura 1 è schematizzato il diagramma di flusso della metodologia di stima.

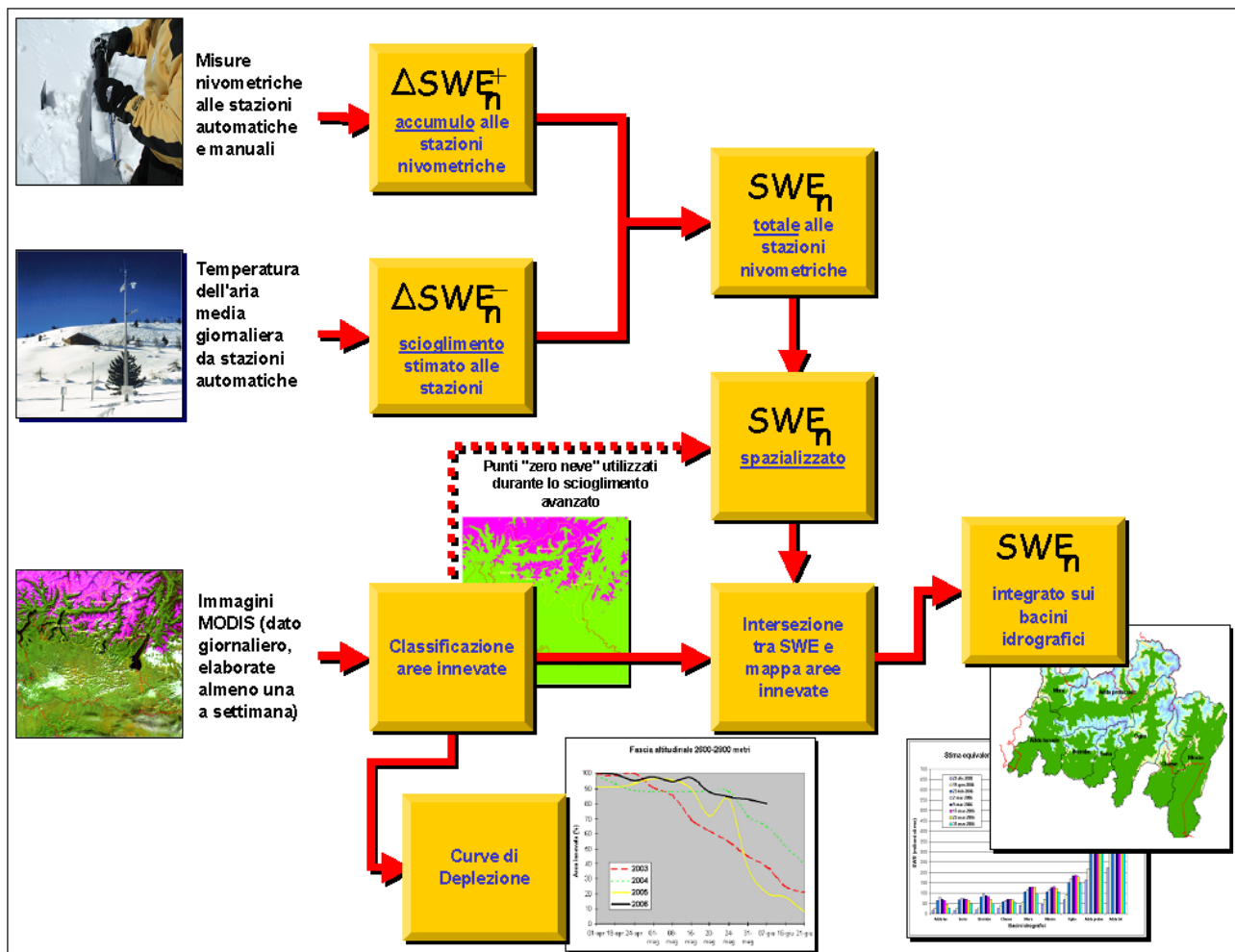


Figura 1: Schematizzazione delle diverse misure, attività ed elaborazioni che concorrono alla stima dell'equivalente idrico della neve.

Stima dello SWE alle stazioni nivometeorologiche

Per quanto riguarda le stime locali di SWE (ovvero alle stazioni nivometeorologiche), il modello consente l'aggiornamento, con cadenza settimanale, del valore di SWE stimato la settimana precedente, considerando la componente "positiva" dei nuovi accumuli nevosi e "negativa" degli scioglimenti stimati.

$$SWE_n = SWE_{n-1} + \Delta SWE_n^+ + \Delta SWE_n^-$$

Dove:

SWE_n e SWE_{n-1} sono rispettivamente gli SWE della settimana n-esima e n-1esima.

ΔSWE_n^+ rappresenta i nuovi accumuli di neve avvenuti durante la settimana n-esima e sono definiti da:

$$\Delta SWE_n^+ = \sum_i \rho_i h_i$$

dove ρ_i è la densità della neve e h_i è lo spessore dell'i-esima nevicata avvenuta durante la settimana n-esima. La densità ρ_i e lo spessore h_i sono misurati direttamente nel caso delle stazioni manuali. Le stazioni automatiche invece dispongono solo di sensori per misurare l'altezza del manto nevoso e non la densità. Si stabilisce quindi un valore costante di densità della neve fresca pari a 108 Kg/m³ derivato da analisi statistiche.

Il numero totale di stazioni utilizzate nella stagione invernale 2005-2006, dopo l'eliminazione di alcuni punti di misura non affidabili o troppo discontinui nel tempo, è stato di 25, comprendenti 12 stazioni manuali e 13 automatiche.

ΔSWE_n^- è il fattore di scioglimento e viene stimato applicando un modello di scioglimento di tipo *degree-day*:

$$\Delta SWE_n^- = -c \sum_j (T_j - T_o)$$

dove T_j è la temperatura media quotidiana dell'aria del giorno j-esimo, T_o è la temperatura soglia di scioglimento (assunta pari a 0 C°), C è la costante di scioglimento. Il valore del parametro C , dapprima desunto dalla letteratura (Lundberg et al., 2005), è stato affinato tramite calibrazioni su misure effettive di scioglimento su alcune stazioni test.

Oltre alle stazioni automatiche e manuali sopra menzionate si aggiungono alcuni rilievi speciali (detti "itinerari") effettuati dagli operatori del Centro Nivometeorologico di Bormio di ARPA Lombardia per la stima del rischio di valanga. Questi rilievi risultano utili anche per validare le stime di SWE perché comprendono misure dettagliate dello spessore e della densità di ciascuno strato del manto nevoso. Inoltre, tali rilievi sono effettuati spesso a quote medio alte e vengono protratti anche in primavera inoltrata.

Le stime locali di SWE così ottenute vengono quindi spazializzate su una maglia regolare con passo di 100 metri sull'intero territorio lombardo e sulle porzioni dei bacini idrografici extra-regionali attraverso relazioni lineari con la quota; tali relazioni lineari sono stimate separatamente su quattro aree di innevamento scelte in base a caratteristiche di omogeneità meteo-climatica.

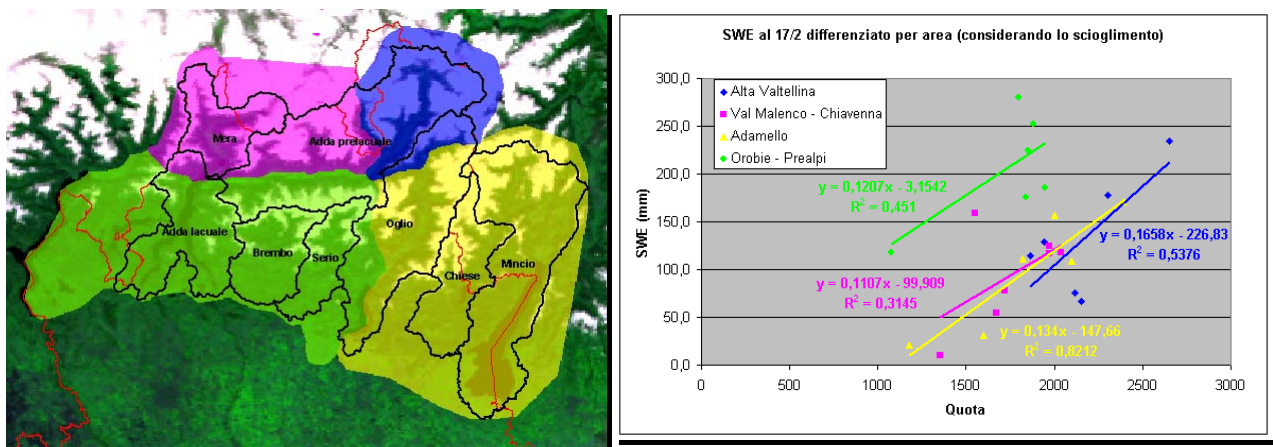


Figura 2: Sovrapposizione ad una immagine MODIS dei bacini idrografici montani considerati e delle 4 aree omogenee di innevamento, per le quali vengono estratte a cadenza settimanale le regressioni lineari con la quota.

Utilizzo immagini MODIS

Il dato satellitare utilizzato per derivare le mappe multitemporali di innevamento sono le immagini riprese quotidianamente dal sensore MODIS, montato sul satellite Terra della NASA. Il prodotto utilizzato è il “MOD09ghk”, ovvero le bande spettrali del visibile, infrarosso vicino e medio già espresse in riflettività spettrale, a 500 metri di risoluzione. La scelta di questo dato è il risultato di un compromesso: a fronte di una risoluzione a terra non eccezionale, si dispone di un dato giornaliero gratuito con le informazioni derivanti dall’infrarosso medio (essenziale per discriminare la neve). Le operazioni di pre-elaborazione del dato, una volta selezionato e scaricato dal sito della NASA, prevedono la conversione dal formato .hdf e la georeferenziazione nel sistema di riferimento Gauss-Boaga (Roma40).

La classificazione delle immagini viene effettuata con algoritmo Unsupervised ISODATA, con assegnazione dei cluster effettuata dall’operatore in 3 classi sintetiche (pixel innevato, non innevato, no-data). Questa metodologia è stata preferita rispetto, ad esempio, a classificazioni basate su indici spettrali, in modo da aver maggiormente sotto controllo la discriminazione di tipologie di pixel misti o non discriminabili automaticamente, come in situazioni di nuvolosità rada, o di nuvole ghiacciate. Le aree identificate come no-data (sostanzialmente nuvole, ombre di nubi particolarmente dense o, in misura minore, ombre topografiche) vengono “recuperate” utilizzando la classificazione relativa alle immagini dei giorni immediatamente precedenti.

Le mappe così prodotte vengono utilizzate come maschere per eliminare dalle mappe di SWE spazializzato tutti i pixel che non sono innevati. Le mappe di innevamento vengono inoltre combinate con il Modello Digitale del Terreno per costruire le curve di deplezione che descrivono l’andamento dell’innnevamento percentuale delle diverse fasce altitudinali.

Per valutare l’importanza del contributo delle mappe di innevamento derivate da satellite nella stima dello SWE è stata condotta una sperimentazione specifica. Per alcune date significative è stato calcolato lo SWE potenziale sui bacini idrografici con e senza l’utilizzo delle mappe di innevamento: le differenze, riassunte nella tabella seguente, sono espresse in milioni di metri cubi di SWE ed in percentuale.

Tabella 1: Differenze espresse in milioni di m³ e % fra le stime di SWE effettuate con e senza l’uso delle mappe di innevamento derivate da classificazione delle immagini MODIS sui principali bacini montani. (Note: Adda_lac = Adda lacuale, Adda_prelac = Adda prelacuale, Adda tot = Adda_lac + Adda_prelac + Mera).

	Adda lac		Serio		Brembo		Chiese		Mera		Mincio		Oglio		Adda prelac		Adda tot	
	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %	diff	sovr %
17-feb-06	47,1	147%	35,1	119%	48,5	134%	0,0	0%	2,6	4%	0,0	0%	17,1	14%	47,3	16%	97,0	24%
02-mar-06	20,1	26%	9,6	13%	12,6	13%	3,1	5%	9,5	8%	11,1	10%	21,8	13%	40,3	9%	69,9	11%
31-mar-06	18,1	67%	9,4	20%	15,2	30%	4,1	7%	7,8	8%	10,6	10%	18,5	12%	30,8	7%	56,7	10%
28-apr-06	4,0	80%	9,0	77%	0,5	3%	7,4	20%	21,9	29%	17,7	23%	32,6	31%	74,6	21%	100,5	23%
25-mag-06	2,2	1934%	4,0	63%	4,1	196%	6,4	38%	20,3	48%	11,7	24%	33,4	69%	91,4	46%	113,9	47%
23-giu-06	0,0	0%	0,1	406%	0,0	47%	0,0	0%	0,8	15%	0,1	1%	1,1	14%	3,1	6%	3,9	7%

Focalizzando l’attenzione sui soli tre bacini dell’Adda pre-lacuale, dell’Oglio e dell’Adda lacuale (figura 4), è evidente che, pur con andamenti differenti in funzione della dimensione e delle altitudini medie dei vari bacini considerati, le differenze sono notevoli. Ad esempio, in assenza delle mappe di innevamento sarebbero marcate le sovrastime dello SWE in un bacino relativamente piccolo e ad altitudini medio basse come l’Adda lacuale (in particolare nella fase di accumulo), mentre per la porzione pre-lacuale dell’Adda o per il bacino dell’Oglio (più vasti e a quote superiori) gli errori maggiori si hanno nel periodo primaverile, dove la rapida scomparsa dell’innnevamento al suolo è ben identificata dalle immagini satellitari.

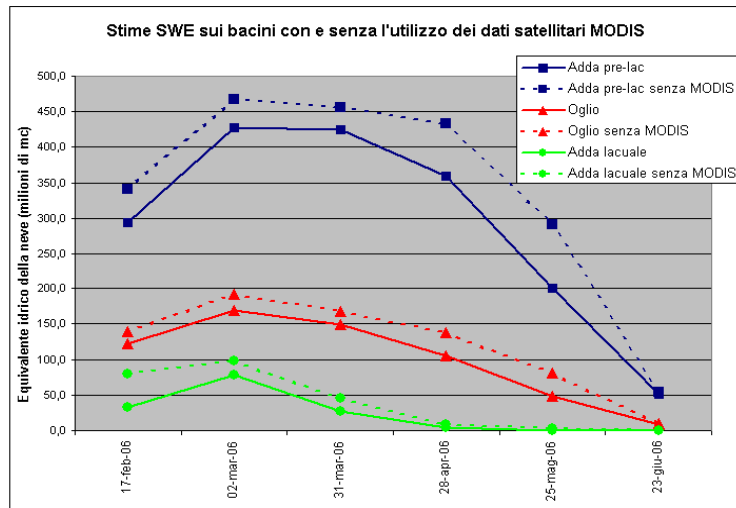


Figura 4: Andamento dello SWE stimato per tre bacini idrografici (Adda pre-lacuale, Adda lacuale, Oglio), con e senza l'uso delle mappe derivate da MODIS

Risultati

La stima quantitativa dello SWE è diventata operativa in ARPA Lombardia nella stagione invernale 2005-2006. Inoltre, sono state condotte anche retroattivamente delle analisi per effettuare dei confronti relativi allo SWE nelle stagioni invernali a partire dal 2001, grazie alla disponibilità di serie storiche di immagini MODIS. Nella figura seguente, vengono raccolti sinteticamente alcuni dei prodotti realizzati, come ad esempio, l'andamento stimato dell'SWE sui bacini idrografici montani lombardi e l'andamento delle curve di deplezione per la stagione 2006, ed un confronto retroattivo sull'innevamento al 31 marzo dei 6 anni dal 2001 al 2006.

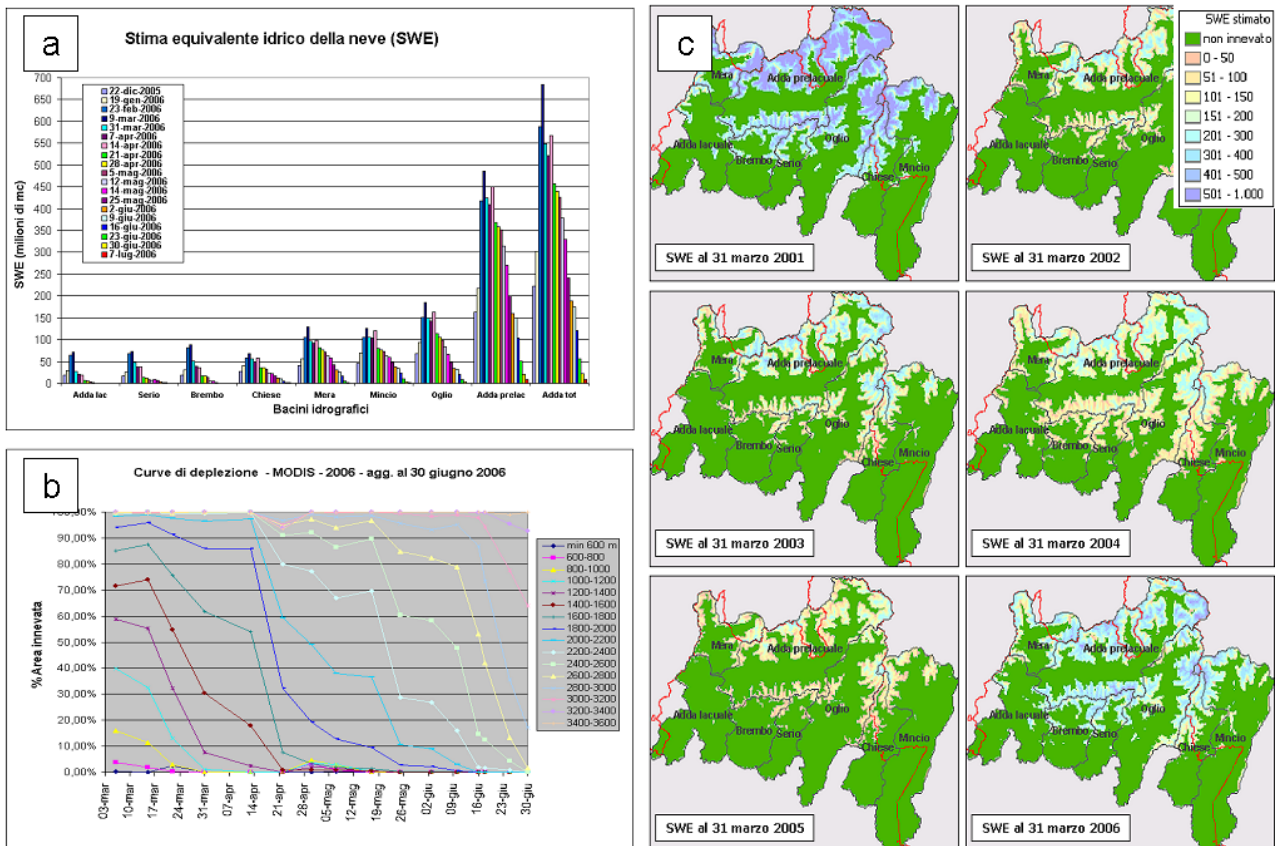


Figura 5: Tre esempi di prodotti: a) andamento dell'SWE stimato sui bacini idrografici montani lombardi per la stagione 2005-2006; b) andamento delle curve di deplezione 2006; c) analisi retroattiva dell'SWE sugli anni 2001-2006 al 31 marzo.

Le verifiche e le validazioni delle stime di SWE prodotte sono state condotte a diversi livelli:

- verifiche dei sottomodelli (di accumulo e di scioglimento) tramite confronti con valori misurati indipendenti;
- validazioni delle stime locali di SWE alle stazioni nivometeorologiche, tramite il confronto con misure dirette indipendenti effettuate in prossimità delle stazioni;
- confronti fra le stime di SWE a livello di piccoli bacini su invasi regolati come quello del lago Barbellino (Alta Val Seriana) e volumi dell'invaso e portate turbinate in uscita (grazie alla collaborazione di ENEL S.p.A.);
- valutazioni delle stime sui grandi bacini idrografici montani, tramite il confronto con indicatori indipendenti (come ad esempio, l'“indice neve” del Consorzio dell'Adda).

Conclusioni e sviluppi futuri

Le stime multitemporali di SWE sui bacini montani sono diventate una delle componenti essenziali del bollettino idropluviometrico di ARPA Lombardia, redatto con cadenza settimanale e con consuntivi mensili. Considerando la difficoltà di modellizzare un fenomeno estremamente variabile nello spazio e nel tempo come l'innevamento, la metodologia di stima dell'SWE a scala di grandi bacini idrografici montani ha raggiunto un buon livello di affidabilità, come hanno dimostrato anche diverse verifiche indipendenti. In particolare, la combinazione delle misure a terra con le mappe di innnevamento multitemporali derivate da classificazione di immagini satellitari apporta sicuri benefici nelle stime.

Gli sviluppi principali prevedono:

- La revisione generale delle stazioni nivometeorologiche automatiche e manuali utilizzate, con integrazione dei punti di misura precedentemente esclusi e ripristino di stazioni prima non funzionanti; è inoltre previsto l'aumento dei punti di misura ad alta quota;
- L'aumento del numero di stazioni di misura permetterà, in particolare, un miglioramento nelle spazializzazioni delle misure puntuali di SWE, ad esempio nella “zonizzazione” delle aree omogenee di innnevamento;
- Il test sull'utilizzo delle immagini MODIS a 250 metri di risoluzione, combinando le bande dell'infrarosso medio (essenziali per classificare la neve) con le bande nel rosso e nel vicino IR per migliore risoluzione spaziale;
- Il miglioramento della stima della densità della neve fresca per le stazioni dove non viene misurata direttamente;
- La stima, in particolare in primavera avanzata e in estate, del contributo al ciclo idrologico della fusione glaciale, in particolare proseguendo gli studi a scala locale anche con l'utilizzo di immagini satellitari stereoscopiche ad alta risoluzione Ikonos (Bellingeri et al., 2005);
- L'aumento delle fasi di validazione delle stime, in particolare tramite verifiche su bacini controllati sottesi a invasi idroelettrici, con la collaborazione dei gestori idroelettrici.

Il miglioramento delle conoscenze acquisite sulla disponibilità di risorse idriche, ed in particolare dello SWE, dovrà consentire lo sviluppo di un sistema in grado di generare scenari valutativi per ottimizzare le politiche di gestione.

Bibliografia

Bellingeri et al., (2004), “Utilizzo di immagini satellitari a media risoluzione e di immagini IKONOS stereoscopiche per il monitoraggio del manto nevoso e dei ghiacciai”, *Atti della 8^a Conferenza Nazionale ASITA*, Roma

Bellingeri et al., (2005), “Planimetric and volumetric glacier monitoring with IKONOS high spatial resolution stereoscopic images”, *9th Alpine Glaciological Meeting*, Milano

Lundberg, Beringer, (2005), “Albedo and snowmelt rates across a tundra-to-forest transition”, *15th International Northern Research Basins Symposium and Workshop*, Lulea, Svezia