

GIANCARLO ROSSI (\*) & MARIO TOMASINO (\*)

## IMPIEGO DEI SISTEMI INFORMATIVI TERRITORIALI (S.I.T.) NELLA VALUTAZIONE DELLA PRODUCIBILITÀ IDROELETTRICA E DELLA SENSITIVITÀ CLIMATICA DEI BACINI NIVO-GLACIALI

**Abstract:** ROSSI G. & TOMASINO M., *A G.I.S. application to the evaluation of the hydroelectric producibility of snow cover and climate sensitivity of the nivo-glacial basins.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

The paper presents considerations regarding the information management and the distributed hydrological modelling for hydroelectric productivity evaluation of snow cover and glacier mass variations, using a G.I.S. (Geographical Information System). Results of practical application to two test cases enable to foresee interesting applications for sensitivity analyses of the response of hydrological basins to possible human climate impacts.

**KEY WORDS:** Geographical Information System, Snow cover, Glacier, Hydroelectric productivity.

**Riassunto:** ROSSI G. & TOMASINO M. - *Impiego dei sistemi informativi territoriali (S.I.T.) nella valutazione della producibilità idroelettrica e della sensibilità climatica dei bacini nivo-glaciali.* (IT ISSN 0391-9838, 1992).

Vengono analizzate le problematiche connesse con la realizzazione di un sistema di trattamento dell'informazione e di modellazione idrologica distribuita in ambiente S.I.T., per la valutazione della producibilità idroelettrica del manto nevoso e delle variazioni di massa dei ghiacciai in bacini sottesi da impianti di ritenuta. I risultati ottenuti con l'applicazione a due esempi pratici permettono di prevedere una interessante applicazione anche per quanto riguarda l'analisi della sensibilità dei bacini all'impatto di ipotizzabili variazioni climatiche di origine antropica.

**TERMINI CHIAVE:** Sistemi Informativi Territoriali, Manto nevoso, Ghiacciai, Producibilità idroelettrica.

### PREMESSA

Gli apporti da fusione nivale e glaciale esercitano la loro influenza sul bilancio idrico annuale di un bacino al punto a scale temporali che possono variare da quella stagionale a quella pluriennale. Infatti gli apporti provenienti dalla parte di bacino situata alle quote inferiori a quella della linea dei ghiacciai modulano la curva annuale dei deflussi ritardando verso la tarda primavera l'onda di piena che dovrebbe coincidere con i massimi delle precipitazioni

invernali (fig. 1; VAN DEN GRIEND, 1981). La parte di bacino coperta dai ghiacciai, negli anni caratterizzati da deposizioni nevose sufficientemente abbondanti da preservare la superficie glaciale dall'ablazione estiva, tende a mantenere la riserva idrica, mentre negli anni che sono caratterizzati dalla scarsità di deposizioni contribuisce a mitigare le magre estive. Da qui l'utilità di conoscere l'evoluzione temporale degli apporti idrici degli apparati nivoglaciali ai fini, innanzitutto, della valutazione della producibilità idroelettrica, ma anche della caratterizzazione climatica dell'ambiente. Riguardo quest'ultimo aspetto, infatti, le coperture nevosa e glaciale, in quanto funzione dei fattori attivi principali del bilancio idrico ed energetico terrestre, quali precipitazione, temperatura e radiazione solare incidente, risultano strettamente legate alle fluttuazioni climatiche. Di conseguenza l'evoluzione temporale di questa grandezza costituisce un indicatore della tendenza sul lungo periodo dei cambiamenti climatici.

Le risposte che i bacini nivoglaciali esibiscono alle sollecitazioni dei cambiamenti climatici, dipendono sia dal carattere della sollecitazione stessa che dalle caratteristiche del bacino in questione, quali geomorfologia e copertura pedologica-vegetativa. In particolare, rispetto a fluttuazioni climatiche di tipo casuale, il bacino nivoglaciale, attraverso i meccanismi già visti, presenta la capacità di attenuare l'azione del fattore forzante fintantoché le risorse glaciali hanno la possibilità di ripristinarsi.

Rispetto invece alle sollecitazioni a carattere monotono (ad. esempio *trend* crescente della temperatura), la capacità di attenuazione si riduce progressivamente al diminuire della disponibilità di risorse glaciali, con conseguente aumento della sensibilità del bacino alle fluttuazioni casuali.

È evidente che la risposta complessiva del bacino a questo tipo di sollecitazioni è difficilmente prevedibile per due ordini di ragioni: la prima è legata agli effetti diretti delle variazioni dei parametri climatici, quali le precipitazioni, l'evapotraspirazione, ecc., l'altra è legata alla risposta che le caratteristiche morfologiche e vegetative (quali la quota limite della presenza di determinati fenotipi, l'alterazione della distribuzione delle specie vegetali, ecc.) presentano per effetto delle modifiche subite dal ciclo idrologico.

(\*) ENEL C.R.I.S. Servizio Idrologico - Venezia Mestre.  
Comunicazione presentata al VI Convegno Glaciologico Italiano, Gressoney, 26-28 Settembre 1991 (Communication presented at the 6th Italian Glaciological Meeting, Gressoney, 26-28 September, 1991).

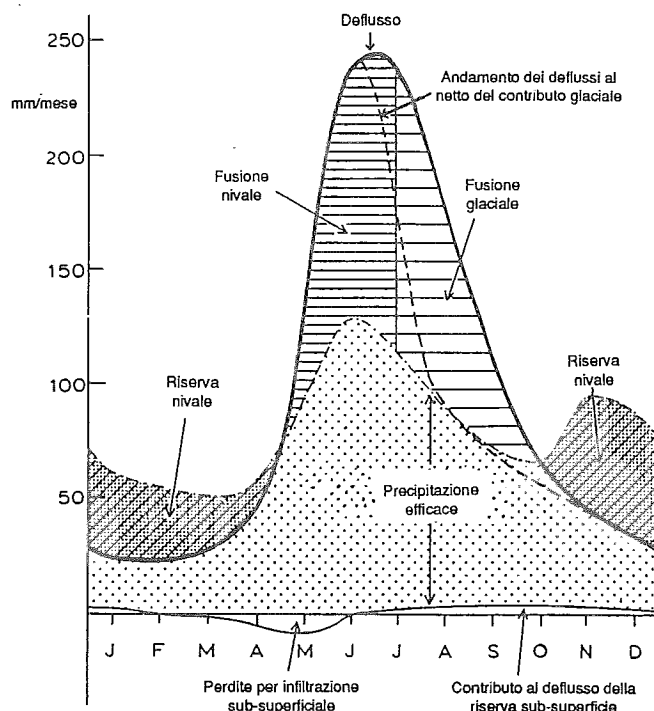


FIG. 1 - Andamento dei valori mensili medi sulle componenti del bilancio idrologico di un tipico bacino alpino nivo-glaciale (VAN DEN GRIEND, 1981).

FIG. 1 - Annual pattern of the monthly values of the hydrological balance terms, for a typical Alps nivo-glacial basin (from VAN DEN GRIEND, 1981).

## VALUTAZIONE DEGLI APPORTI IDRICI A BACINI NIVOGLACIALI

La componente del ciclo idrologico proveniente dalla fusione della copertura nivoglaciale gioca un ruolo determinante nella valutazione degli apporti idrici risultanti. Poiché la valutazione del volume idrico del manto nevoso di un bacino viene ottenuta attraverso l'integrazione dello spessore equivalente d'acqua sulla sua superficie, la precisione di tale valutazione dipende dagli errori di stima sia dell'equivalente in acqua che dell'estensione effettiva del manto nevoso (GALEATI & alii, 1986). Un aspetto importante di questa informazione riguarda la possibilità che essa venga impiegata nella gestione delle risorse idriche del bacino. A questo scopo l'informazione deve avere caratteristiche operative, nel senso che deve essere disponibile in tempi e modi compatibili con la catena del processo decisionale.

La conoscenza della distribuzione spazio-temporale del manto nevoso e dei ghiacciai investe anche altri aspetti della gestione del territorio, quali la localizzazione del rischio da valanghe in relazione ai parametri topografici e meteorologici, e la valutazione del rischio di piene improvvise (*flash floods*) derivanti da dissesto idrogeologico o da eventi meteorologici eccezionali, quale ad esempio quello che ha causato il dissesto della Valtellina del 1988. L'analisi del-

l'evoluzione temporale degli apporti idrici nivoglaciali, e dei fattori di rischio idrogeologico connessi, richiedono quindi un sistema in grado di provvedere alla gestione integrata di grandi quantità di informazione spaziale e puntuale in forma georeferenziata.

## IL SISTEMA INFORMATIVO TERRITORIALE (S.I.T.)

Il Sistema Informativo è il processo che sovrintende al trattamento, all'elaborazione ed all'analisi dei dati, allo scopo di ottenere informazioni atte a supportare processi decisionali.

La disponibilità di grandi quantità di informazione di tipo non spaziale, da associare ad informazione di tipo geografico, quale quella derivata dalla cartografia digitale e dal telerilevamento, ha posto gli utilizzatori davanti alla necessità di sviluppare sistemi integrati per gestire, in forma razionale, questo tipo di informazioni. Il Sistema Informativo Territoriale è un processo unitario di elaborazione dell'informazione centrato su una data-base di tipo geografico; esso consiste quindi di un insieme di dati geografici, e dei relativi attributi non spaziali, memorizzati in una banca dati da cui possono essere richiamati, combinati e restituiti sotto forma di mappe o tabelle sintetiche (ALBERTI, 1989; STAR & ESTES, 1990).

Questi sistemi si caratterizzano per la capacità di analisi delle relazioni spaziali tra gli elementi che descrivono le caratteristiche geografiche di un'area; essi sono basati su un modello geo-relazionale che mette in relazione la localizzazione e la topologia degli elementi (punti, linee ed aree) con i loro attributi descrittivi. In definitiva, i S.I.T. consentono un notevole potenziamento nell'esecuzione di quelle che, in analogia con le quattro operazioni aritmetiche, vengono definite le operazioni fondamentali sulle informazioni territoriali, e sono conosciute come le «quattro M», e cioè:

Misurazione (osservazione); Mappatura; Monitoraggio; Modellazione.

La capacità dei Sistemi Informativi Territoriali di gestire *data-base* georeferenziati, permette di incrementare notevolmente l'accuratezza delle valutazioni della producibilità idroelettrica del manto nevoso, integrando le misure periodiche di equivalente in acqua ed i rilievi continui di parametri meteorologici in un modello di evoluzione del manto nevoso, con valutazione della copertura effettiva attraverso l'impiego di informazioni ottenute attraverso l'elaborazione di immagini telerilevate.

Per quanto riguarda le aree glaciali, i S.I.T. permettono sia la gestione delle informazioni a carattere distribuito, quali le caratteristiche superficiali ottenute da rilievi aerofotogrammetrici o da telerilevamento, la distribuzione del flusso di radiazione incidente e riflessa, la temperatura dell'aria, ecc., come pure la gestione delle informazioni ottenute da rilievi a carattere puntuale, quali i rilievi topografici, le misure delle stazioni meteorologiche ed idrometrografiche, ecc., nonché il passaggio da un tipo di in-

formazione all'altro attraverso interpolazione superficiale o ricampionamento.

### *Struttura del Sistema Informativo Territoriale*

Le informazioni contenute in un S.I.T. sono costituite dalla cartografia di base, da oggetti spaziali, da attributi non spaziali, e da livelli o tematismi. In particolare gli oggetti spaziali sono le strutture elementari (punto, linea, nodo, ecc.) in base alle quali sono rappresentabili le forme geometriche reali, gli attributi non spaziali sono le variabili da assegnare agli oggetti (ad es. nomi, relazioni gerarchiche, quantità scalari, relazioni topologiche, ecc.), i livelli sono l'elemento comune che identifica un insieme di attributi in base ai quali viene estratta l'informazione (ad esempio il tema vegetazionale, il tema copertura nevosa o glaciale, ecc.).

L'architettura di un S.I.T. si articola in cinque sistemi principali, ciascuno dei quali sovrintende ad una specifica attività:

- input di dati non spaziali;
- acquisizione di informazione geografica (cartografia o remote sensing);
- gestione del data-base (aggiornamento, correzione e stima dei parametri);
- manipolazione ed analisi dei dati attraverso funzioni di aggregazione integrazione e modellizzazione spaziotemporale dei dati stessi;
- rappresentazione grafica dei dati e creazione di mappe con capacità e funzioni di interrogazione interattiva.

### *Informazione geografica*

Il Sistema Informativo Territoriale ha quindi come supporto delle informazioni una cartografia digitale rappresentativa del territorio, la cui scala definisce ed individua la risoluzione a cui riferire le informazioni stesse.

I modelli utilizzabili per rappresentare l'informazione geografica, tenendo conto del fatto che la caratteristica fondamentale dei dati geografici è la loro indicizzazione spaziale, si possono realizzare:

- attraverso una rappresentazione degli oggetti spaziali (punto, linea, poligono, ecc.) tale che ognuno di essi utilizzi la propria collocazione spaziale come proprietà fondamentale;
- attraverso degli identificatori di posizione (tasselli, celle o pixel), ognuno dei quali sia caratterizzato da un insieme di proprietà legate all'oggetto.

Nel primo caso il modello di codifica dell'informazione cartografica è definito di tipo vettoriale, mentre nel secondo caso di tipo raster.

### *Data-Base*

Il trattamento dei dati spaziali e non spaziali avviene attraverso l'integrazione di sistemi specializzati nella gestione grafica dei dati e di sistemi di gestione di data-base (Data-Base Management System DBMS).

Attraverso questi sistemi è possibile creare e gestire tabelle di riferimento dei dati statistici e tematici, e relative interpretazioni e simboli di rappresentazione grafica.

Il contenuto del data-base viene strutturato conseguentemente al modello di rappresentazione geografica, quindi il formato raster si basa su una griglia regolare attraverso la quale sono identificati i diversi valori di una quantità spaziale, mentre il formato vettoriale registra i dati sotto forma di punti, archi e poligoni che rappresentano la topologia di una specifica mappa tematica.

La corretta strutturazione dei dati memorizzati si riflette direttamente sull'efficienza del sistema e delle possibili operazioni permesse, quindi il criterio per la scelta del tipo di data-base da impiegare, che può essere relazionale, gerarchico o a rete, deve tener conto anche della complessità delle operazioni da compiere.

### PROGETTO SIGMA

SIGMA è l'acronimo di «Sistema Informativo Geografico per la valutazione della producibilità del Manto nevoso»; con questo termine viene identificato il progetto ENEL per la realizzazione del prototipo di un sistema in grado di gestire, in maniera operativa, le informazioni relative alla producibilità idroelettrica del manto nevoso ed alle variazioni di massa dei ghiacciai.

### *Analisi dell'informazione disponibile*

Le informazioni necessarie alla realizzazione del sistema SIGMA possono venire classificate come segue:

- cartografia di base;
- altezza e densità del manto nevoso;
- grandezze meteorologiche associate al fenomeno nivale;
- estensione della copertura del manto nevoso.

### *Informazione meteo-nivometrica*

Le grandezze meteorologiche necessarie allo studio dei fenomeni nivali sono essenzialmente la precipitazione totale e la temperatura dell'aria.

Rivestono comunque una notevole importanza anche altre grandezze quali la radiazione solare, l'umidità relativa dell'aria e la velocità e la direzione del vento.

Le informazioni riguardanti grandezze meteo-nivometriche possono venire classificate come segue:

- misure manuali sul campo dell'altezza e densità del manto nevoso condotte nel quadro di una campagna annuale che riguarda circa 500 punti di misura sull'intero arco alpino;
- misure manuali puntuali giornaliere dell'altezza neve al suolo rilevate in prossimità di impianti ENEL;
- misure meteorologiche rilevate dal personale degli impianti ENEL;
- misure meteo-nivometriche di stazioni sperimentali finalizzate a monitoraggi di tipo ambientale, che comprendono, tra gli altri parametri, anche il rilievo dell'altezza del manto nevoso effettuato, in genere, mediante mi-

suratore ad ultrasuoni. Queste misure, che possono venire effettuate con frequenza prefissata, sono suscettibili di venire inserite in una rete di trasmissione dati.

#### Informazioni da telerilevamento

La caratterizzazione del territorio sia sotto il profilo qualitativo (tipo di copertura), oltre che quantitativo (altitudine, pendenza, esposizione, ecc.), è di fondamentale importanza nella descrizione dei fenomeni nivali e glaciali.

L'informazione telerilevata ha la proprietà di dare un'immagine sinottica di una realtà complessa qual'è quella di un territorio. Analizzando le proprietà spettrali della radianza della superficie terrestre, si possono ottenere delle valutazioni qualitative e quantitative delle caratteristiche superficiali del territorio stesso.

Questa informazione, a causa della natura periodica dell'acquisizione, si presta al monitoraggio di fenomeni dinamici caratterizzati da costanti temporali compatibili con quelle del sistema di acquisizione dell'informazione stessa.

La disponibilità di un modello digitale del terreno (DTM), la cui risoluzione spaziale sia consistente con quella dell'immagine da elaborare, consente un notevole miglioramento nell'elaborazione dell'informazione contenuta nelle immagini telerilevate (ROSSI & *alii*, 1986).

Le attitudini e le potenzialità di questo genere di informazione variano a seconda delle caratteristiche orbitali della piattaforma di rilevamento (geostazionaria, polare, ecc.), della distanza dalla Terra e delle caratteristiche di sensibilità e risoluzione del sistema di rivelazione impiegato.

Le caratteristiche dei satelliti potenzialmente idonei al telerilevamento della copertura nevosa sono elencate nella tab. 1.

Per quanto riguarda gli aspetti relativi alla risoluzione spettrale dell'informazione telerilevata, la disponibilità di almeno un canale nel campo della radiazione infrarossa è utile, particolarmente nelle tecniche automatizzate, per il riconoscimento della copertura nuvolosa da quella della neve, sulla base della temperatura superficiale.

È possibile prevedere un impiego differenziato delle immagini telerilevate, a seconda della scala spaziale e temporale di rappresentazione dei fenomeni: in particolare le

immagini Landsat o SPOT, caratterizzate da un elevato livello di dettaglio spaziale ma da una periodicità relativamente lunga, possono essere utilizzate nella calibrazione periodica dei modelli, mentre le immagini dei satelliti TIROS o Meteosat, che al contrario sono caratterizzate da un basso livello di dettaglio spaziale ma sono disponibili a frequenza perlomeno giornaliera, possono venire utilizzate in maniera operativa per la valutazione della copertura nevosa.

#### ARCHITETTURA DEL SISTEMA SIGMA

L'architettura del Sistema SIGMA, secondo lo schema di fig. 2, prevede il collegamento di un S.I.T. con un modello per la valutazione dell'evoluzione del manto nevoso (modulo SNOW) e con un modello per la previsione degli apporti (modulo HYDRO) e l'interfaccia con una procedura di elaborazione delle immagini (modulo R.S.).

La procedura inizia con una stima iniziale della distribuzione dell'equivalente in acqua del manto nevoso alle varie quote, effettuata interpolando le misure sul campo disponibili alla data più prossima a quella di partenza.

Per quanto riguarda l'estensione della copertura, se sono disponibili immagini telerilevate, l'informazione relativa viene ricavata dalla loro elaborazione attraverso il Modulo R.S., altrimenti viene valutata dal Modulo SNOW, come la superficie di bacino avente altitudine superiore a quella della quota della linea delle nevi calcolata.

La stima viene aggiornata giorno per giorno, nell'intervallo tra una misura sul campo e l'altra (in genere un mese), per mezzo del modello matematico (Modulo SNOW), i cui risultati vengono calibrati con le misure puntuali di altezza o equivalente in acqua teletrasmesse.

Il modulo SNOW calcola la distribuzione dell'equivalente in acqua per fasce di altitudine, i volumi corrispondenti agli eventuali apporti delle precipitazioni liquide (depurate dalla quantità di neve immobilizzata al suolo) e di fusione della neve ed il volume di acqua contenuto nel manto nevoso residuo.

Le previsioni dei deflussi possono venire effettuate con un anticipo di un certo numero di passi, utilizzando un

TABELLA 1 - Caratteristiche delle immagini da satellite impiegabili nella valutazione dell'estensione della copertura nevosa.

TABLE 1 - Features of satellite images useful for snowcover evaluation.

Piattaforma	Meteosat	Noaa	Landsat Mss	Landsat Tm	Spot	Ers-1 Sar
Copertura (km)	globale	1600 × 1600	185 × 185	182 × 172	60 × 60	100 × 100
Risoluzione (m)	2500	1100	80	30	20	30
Periodo (giorni)	1/48	1/2	16	16	26	3-35
num. di canali:						
visibile	2	2	3	4	3	—
vicino I.R.	—	1	2	1	—	—
medio I.R.	—	—	—	1	—	—
lontano I.R.	2	2	—	1	—	—
microonde	—	—	—	—	—	1

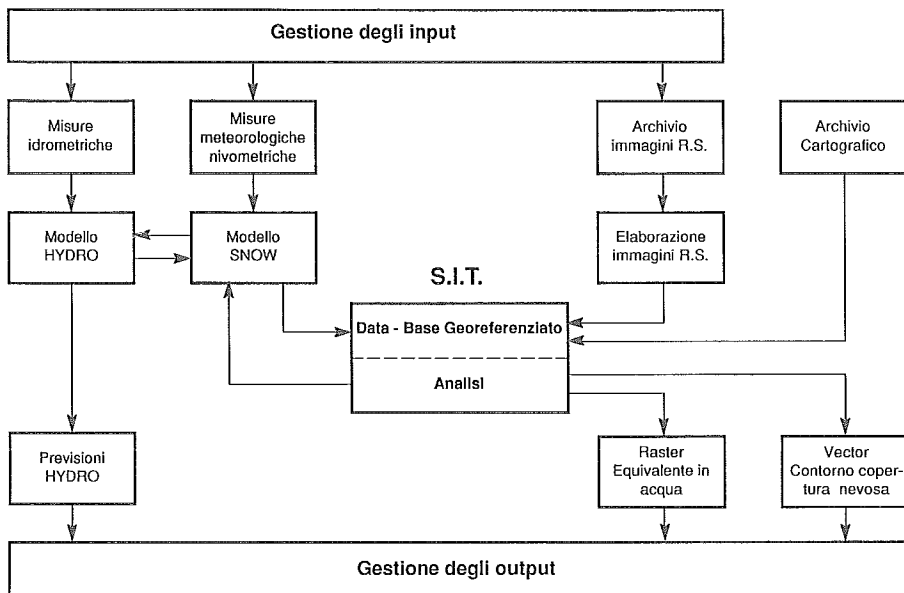


Fig. 2 - Architettura del sistema SIGMA.  
Fig. 2 - SIGMA Architecture.

modello idrologico a base statistica (Modulo HYDRO) che opera attraverso opportune funzioni di trasferimento, che tengono conto anche delle caratteristiche della risposta del bacino per la formazione delle portate alla sezione idrometrica di controllo.

#### Modello di evoluzione del manto nevoso (Modulo SNOW)

Il modello sperimentato dal CRIS-Servizio Idrologico per la fase giornaliera comprende un modello di evoluzione del manto nevoso di tipo parametrico, basato sul metodo dei gradi-giorno (TOMASINO & alii, 1986; GALEATI & alii, 1982; BUTTLE & McDONNELL, 1987).

Essenzialmente la quantità di equivalente in acqua fusa giornalmente da una copertura nevosa (SM) è funzione di questo parametro, calcolato ogni giorno attraverso la differenza tra la temperatura media giornaliera dell'aria ( $T_a$ ) ed una temperatura di soglia per la fusione ( $T_f$ ):

$$SM = C * (T_a - T_f) \quad (T_a > T_f)$$

L'accrescimento (SP) del manto nevoso avviene invece quando le precipitazioni (P) si verificano con una temperatura dell'aria inferiore alla soglia di formazione della neve ( $T_n$ )

$$SP = P \quad (T_a < T_n)$$

La superficie del bacino viene ripartita per fasce equispaziate di altitudine e per classi di orientamento dei pendii, sulla base della curva ipsografica. Disponendo quindi di un adeguato numero di stazioni meteorologiche distribuite a varie quote, è possibile calcolare la precipitazione efficace e la temperatura media dell'aria per ogni fascia per mezzo di vari metodi di interpolazione (regressione multipla, gradiente, ecc.).

A partire da questi valori, mediante le relazioni precedenti è possibile risolvere l'equazione di bilancio dell'equivalente in acqua del manto nevoso (SS) per ciascuna fascia:

$$SS = SSo + SP - SM - L$$

dove (SSo) è il valore precedente ed (L) sono le eventuali perdite (ad esempio per evaporazione o sublimazione), che per il momento vengono trascurate.

I parametri del modello vengono calibrati utilizzando i dati storici delle misure di equivalente in acqua.

L'iterazione del metodo su tutte le fasce di altitudine, e l'integrazione delle superfici di tutti i contributi specifici, permette di valutare le seguenti grandezze:

- volume complessivo delle precipitazioni depurate della neve depositata
- volume complessivo della neve fusa
- volume complessivo di acqua immobilizzata come neve al suolo
- producibilità idroelettrica del manto nevoso
- equivalente in acqua del manto nevoso ad una certa quota
- quota della linea della neve (snowline)

#### Modulo per l'elaborazione delle immagini (Modulo R.S.)

L'elaborazione delle immagini telerilevate (che sono memorizzate in formato raster) prevede innanzitutto una correzione geometrica per eliminare le distorsioni provocate dall'assetto della piattaforma di rilevamento, ed un successivo adattamento (registrazione) dell'immagine corretta sul modello digitale del terreno (D.T.M.) per mezzo di algoritmi standard (minimi quadrati con polinomi di 1° ordine).

La registrazione delle immagini può venire automatizzata attraverso il riconoscimento e la sovrapposizione di elementi di controllo (quali le linee delle creste montuose e dei fondovalle) sui corrispondenti elementi di controllo del D.T.M., che è stato ottenuto in precedenza attraverso la discretizzazione delle caratteristiche topografiche su una griglia a maglia regolare. Gli elementi di controllo dei DTM vengono riconosciuti per mezzo di un algoritmo di verifi-

ca della condizione di annullamento delle derivate parziali del primo ordine (WALSH & *alii*, 1990; BAUMGARTNER & *alii*, 1987). L'interpretazione viene condotta attraverso l'estrazione manuale di campioni relativi a quattro classi di innevamento del suolo (DALLA VENTURA & *alii*, 1986; ROSSI & *alii*, 1991), sulla base di una analisi visiva supportata da considerazioni topografiche (elevazione, pendenza, orientazione). Le classi di innevamento sono caratterizzate dalle seguenti proprietà superficiali:

- neve su pendii in ombra;
- neve su pendii poco illuminati;
- neve su pendii molto illuminati;
- neve coperta da vegetazione.

Il software utilizzato per l'elaborazione delle immagini è il sistema ELIAS prodotto dal CISE di Milano.

In una fase successiva è prevista l'utilizzazione anche di immagini AVHRR, allo scopo di sfruttare le caratteristiche di continuità del monitoraggio dei satelliti TIROS-NOAA. Queste immagini richiedono l'impiego di tecniche di classificazione non standard per la compensazione delle maggiori incertezze introdotte dalla minore risoluzione topografica e dalle differenti caratteristiche spettrali dei sensori.

Per quanto riguarda le possibilità di utilizzazione delle immagini da satellite per la caratterizzazione delle superfici glaciali, le difficoltà legate alla risoluzione spaziale e spettrale dei sensori montati sulle piattaforme satellitari, che finora hanno limitato l'impiego di queste tecniche, sono state superate con l'entrata in servizio del satellite ERS-1 (tab. 2).

TABELLA 2 - Applicazione delle immagini da satellite all'analisi delle superfici glaciali.

TABLE 2 - Applicability of the satellite-image features to glacier-surface analysis.

campo spettrale	micron	piattaforma	applicazione
visibile	0.3:0.8	SPOT LandsatMSS LandsatTM	separazione neve - ghiaccio
vicino I.R.	0.8:2.4	SPOT Landsat TM	separazione neve - ghiaccio
medio e lontano I.R.	1.55:1.75 5.:12.5	Landsat TM	dimensione dei grani contenuto in acqua liquida della neve
microonde	2000.	ERS1-1 SAR	dimensioni dei grani equivalente in acqua contenuta in acqua liquida temperatura superf. della neve

#### Modulo per la simulazione idrologica HYDRO

Il modulo SNOW prevede in uscita tre grandezze che rappresentano i contributi alla formazione delle portate derivanti dalle precipitazioni liquide (depurate dall'effetto della neve depositata), dalla fusione della neve e dalla fusione del ghiaccio; esse vengono impiegate come input per

il modulo HYDRO ai fini della valutazione degli afflussi ai serbatoi a scala giornaliera.

La struttura del modello utilizzato è di tipo statistico (autoregressivo), in considerazione della semplicità di impiego derivante dal ridotto numero di parametri da calibrare (TODINI & WALLIS, 1977).

La relazione che lega le grandezze di input con la previsione, nel caso del bacino nivo-pluviale, è del tipo:

$$Q^t + 1 = Q^t + Q^{t-1} + P^t + P^{t-1} + N^t + N^{t-1} + et$$

dove:

$P^t$  è il contributo alle portate ( $m^3/s$ ), ad un determinato tempo  $t$ , rappresentato dalle precipitazioni liquide, depurate cioè dall'effetto della neve depositata;

$N^t$  è il contributo alle portate ( $m^3/s$ ), ad un determinato tempo  $t$ , rappresentato dalla fusione della neve;

$Q^t$  è la portata misurata alla sezione di controllo del bacino al tempo  $t$ ;

$Q^{t+1}$  è la portata prevista al tempo  $t+1$ .

L'iterazione di questa relazione permette di prevedere, a meno del rumore ( $et$ ) le portate al passo  $t+1$ ,  $t+2$ ,  $t+n$  in funzione dei valori delle variabili misurate oppure stimate relative ai passi precedenti.

#### APPLICAZIONE SPERIMENTALE DELLA PREVISIONE DEGLI APPORTI

Il sistema SIGMA è in corso di sperimentazione nel bacino del Piave, nell'ambito di un progetto per il monitoraggio idrometeorologico di un bacino alpino, denominato Progetto Vallata (fig. 3), progetto che il CRIS-Servizio Idrologico gestisce dal 1983.

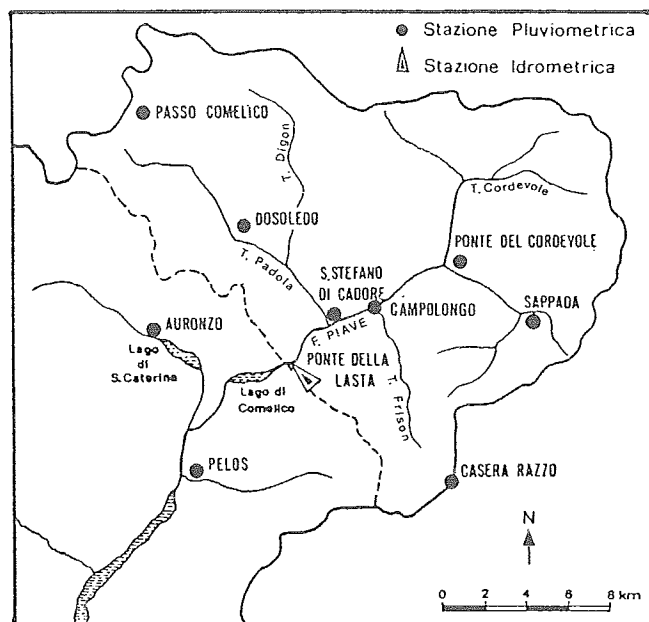


Fig. 3 - Planimetria generale del bacino dell'alto Piave.

Fig. 3 - General chorography of the upper part of the Piave River basin.

Il bacino in questione, le cui caratteristiche sono riportate nella tab. 3, è limitato alla parte iniziale del corso del Fiume Piave, con chiusura alla sezione idrometrica di Ponte della Lasta, immediatamente a monte del serbatoio del Comelico.

I dati meteorologici sono disponibili da 1 Gennaio 1983, la calibrazione dei modelli SNOW ed HYDRO è stata fatta su tutto il periodo (tab. 4), mentre per la calibrazione della procedura di elaborazione delle immagini è stato scelto l'anno 1984 in considerazione dell'abbondanza delle precipitazioni nevose e della disponibilità di immagini R.S.

Il DTM è stato generato per interpolazione di triangolo ottenuti da circa 10.000 punti estratti attraverso la digitalizzazione delle tavolette (I.G.M. 1:25.000, e successiva generazione dei relativi valori di pendenza e di orientazione.

TABELLA 3 - Caratteristiche del bacino del Piave.

TABLE 3 - Features of the Piave river basin.

Sezione di chiusura	Ponte della Lasta (BL)
Intervallo di altitudine	855 : 3 092 m s.l.m.
Altitudine media	1681 m s.l.m.
Superficie	357 km <sup>2</sup>

TABELLA 4 - Valori di calibrazione dei parametri modello SNOW.

TABLE 4 - Calibration of the SNOW model parameters.

Classe di esposizione:	S	E/W	N
Coeff. gradi-giorno Kj (mm/d/°C)	3.0	2.5	2.5
Soglia di fusione T <sub>sj</sub> (°C)	2.5	2.0	1.8
Soglia precipit. neve Tr <sub>j</sub> (°C)	-1.0	-1.0	-1.0

La simulazione inizia con la data del primo rilievo dell'Indice Neve (1° Febbraio 1983), data alla quale il modello calcola la distribuzione iniziale dell'equivalente in acqua per le varie quote, mediante regressione con l'altitudine. La simulazione procede quindi fino alla successiva data di controllo, data alla quale il modello confronta la distribuzione dell'equivalente in acqua calcolata dal modello (fig. 4) con quella calcolata attraverso i valori misurati sul terreno.

TABELLA 5 - Risultati della classificazione delle aree di copertura nevosa ottenuta attraverso elaborazione delle immagini MSS.

TABLE 5 - Results of snow-covered area classifications by mean of Landsat MSS image elaboration.

Data	soleggiate		in ombra		poco illuminate		forestate		totale	
	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%	km <sup>2</sup>	%
29.1.83	42.346	11.8	148.092	41.5	34.369	9.5	99.257	27.8	324.145	90.6
17.2.84	26.668	7.5	90.195	25.3	100.455	28.2	99.687	27.9	317.005	88.5
21.4.84	35.542	10.0	29.770	8.3	101.928	28.6	86.706	24.3	253.946	71.2
16.6.84	8.444	2.4	6.397	1.8	53.391	14.9	—	—	68.232	19.1

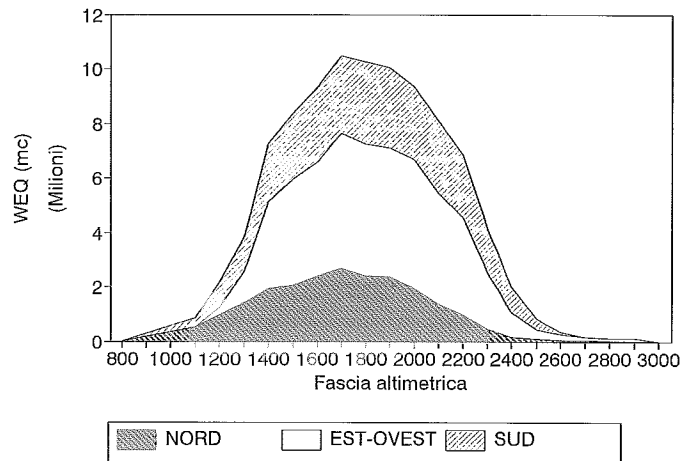


FIG. 4 - Distribuzione dell'equivalente in acqua del manto nevoso al suolo calcolata dal modulo SNOW per la data dell'immagine Landsat (Bacino del Piave, 21 Aprile 1984).

FIG. 4 - Distribution of the snow cover water equivalent computed by the SNOW model for the date of the Landsat image (Piave Basin, April 21, 1984).

A questo punto il modello aggiorna la distribuzione dell'equivalente in acqua e procede allo stesso modo per tutte le date di controllo successive, fino alla fine della simulazione.

Gli outputs giornalieri del modello SNOW ottenuti dalla simulazione relativa all'anno 1985 sono riportati in fig. 5; il grafico a) riporta le precipitazioni ed i valori dell'altitudine del manto nevoso misurati (linea a tratteggio) e calcolati (linea continua), relativi al punto di controllo di Sappada (m 1 500 s.l.m., appartenente alla classe di esposizione 2).

Altri parametri che presentano spiccato interesse gestionale della risorsa idrica, quali il valore giornaliero del volume totale dell'equivalente in acqua del manto nevoso depositato al suolo e la quota della linea della neve (metri s.l.m.), sono riportati nel grafico b) (fig. 5). I grafici c) e d) riportano i valori giornalieri dei contributi derivanti dalla neve fusa e dalle precipitazioni liquide (al netto della neve eventualmente depositata) alla formazione dei deflussi naturali (m<sup>3</sup>/s), grandezze che vengono passate al Modulo HYDRO per il calcolo della portata.

Le immagini da satellite sono state registrate con l'appoggio di 10 punti di controllo estratti manualmente; l'ac-

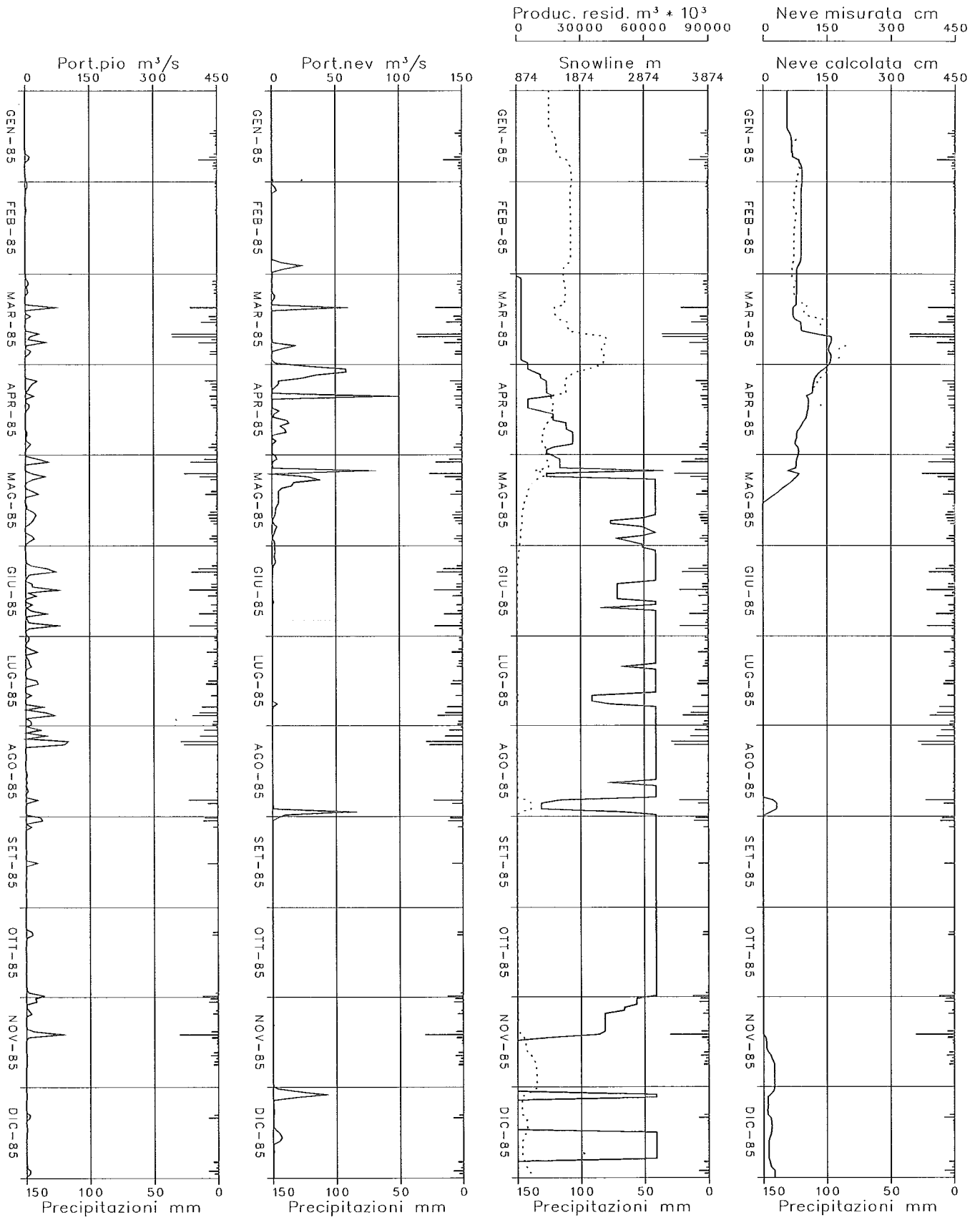


Fig. 5 - Grafici delle grandezze calcolate da SIGMA.

Fig. 5 - Plot of the SIGMA outputs.



curatezza dell'operazione è stata valutata sulla base dello scarto quadratico medio sui punti di controllo. I risultati della classificazione delle aree coperte di neve sono riportati in tab. 5.

Una valutazione delle differenze tra le stime delle aree innevate (e relativo equivalente in acqua) e della quota della linea delle nevi, calcolate utilizzando in un caso la sola informazione R.S. (attraverso il G.I.S.) e nell'altro il solo modello SNOW, può venire effettuata dal confronto tra i valori contenuti nella tab. 6 e nella tab. 7. La validità dei risultati finali del modello SNOW può venire valutata attraverso il confronto dei valori riportati in tab. 8, che rappresentano il valore medio dell'equivalente in acqua calcolato con i valori misurati e con quelli calcolati dal modello, relativamente all'intero set dei punti controllo ripartiti secondo l'esposizione dei versanti.

Il confronto tra la copertura nevosa valutata dal G.I.S., sia direttamente dal modello SNOW, che attraverso le immagini R.S., evidenzia una ovvia tendenza del modello SNOW a sovrastimare le superfici innevate poiché non si tiene conto delle zone a copertura parziale che possono essere identificate solo attraverso il R.S.

## MONITORAGGIO DEI GHIACCIAI

Una valutazione immediata dell'importanza e della dimensione che può rivestire per l'ENEL il problema del monitoraggio dei ghiacciai compresi dei bacini sottesi da impianti di ritenuta a regolazione stagionale, appare dalla tab. 9, nella quale sono riportate le valutazioni della superficie dei ghiacciai aventi estensione superiore a 5 ha, sulla base dei dati rilevati nel 1982 per la nuova edizione del Catasto dei Ghiacciai Italiani, non ancora pubblicata.

Come è noto, le variazioni dei termini del bilancio di massa dei sistemi glaciali, nonché alterazioni nella distribuzione spaziale di proprietà fisiche della massa glaciale sono considerati degli indicatori climatici di grande interesse ai fini del monitoraggio del «global change».

Infatti le fluttuazioni della massa e di alcuni parametri morfologici sono in relazione a variazioni di grandezze meteo-climatiche a grande scala, in particolare la media della temperatura dell'aria nei mesi estivi, le precipitazioni to-

TABELLA 7 - Confronto tra le quote del limite delle nevi (m s.l.m.) calcolate con il GIS-RS e con il modello SNOW.

TABLE 7 - Comparison between the snow-line elevation (m a.s.l.) calculated with the GIS-RS and the SNOW model.

Classe espos.:	Calcolate GIS-RS			Calcolate Modello SNOW		
	S	E/W	N	S	E/W	N
29.1.83 MSS	850	1050	850	850	1350	850
17.2.84 MSS	850	1050	850	850	850	850
21.4.84 MSS	1450	1450	1550	850	1250	850
16.6.84 TM	1750	1650	1650	2600	1800	1600

tali ed alcune componenti del bilancio di radiazione solare sulla superficie.

Le caratteristiche morfometriche dei ghiacciai, che possono risultare indicative della dinamica del clima sono:

- dimensioni geometriche e perimetro;
- variazioni della fronte;
- pendenza ed orientazione degli elementi superficiali;
- classificazione superficiale;
- quota della linea di equilibrio;
- bilancio di massa annuale;
- spessore della massa glaciale;
- velocità superficiale.

Viene evidenziato quindi il ruolo fondamentale che riveste la conoscenza del bilancio di massa annuale con riferimento sia al bilancio idrologico del bacino che gli aspetti climatologico-ambientali.

Le potenzialità del sistema SIGMA possono venire utilizzate anche per il recupero e la riqualificazione di informazioni ottenibili da rilievi storici, sia fotogrammetrici che topografici, finalizzate alla ricostruzione della serie delle variazioni nel bilancio di massa del passato.

Questa esigenza è quanto mai sentita poiché nel versante italiano delle Alpi, considerando l'elevata sensibilità climatica che caratterizza i ghiacciai localizzati in zona temperata, si dispone di una sola serie storica di misure del bilancio di massa, quella del ghiacciaio Careser, la cui origine risale solo al 1966.

Esistono peraltro numerose fonti di dati rilevati nel passato relativamente a ghiacciai che sono stati oggetto di os-

TABELLA 6 - Confronto tra le superfici delle aree coperte di neve calcolati con il GIS-RS e stimati con il modello SNOW.

TABLE 6 - Comparison between snow-covered areas computed by GIS-RS and estimated by SNOW model.

Data	calcolati GIS-RS			calcolati Modello SNOW		
	Area		Volume	Area		Volume
	km <sup>2</sup>	%	hm <sup>3</sup>	km <sup>2</sup>	%	hm <sup>3</sup>
29.1.83 MSS	320.0	89.5	43.2	350.1	98.0	45.5
17.2.84 MSS	317.9	88.9	71.6	357.6	100.0	79.0
21.4.84 MSS*	253.9	71.7	128.2	354.3	99.0	169.9
16.6.84 TM	68.2	19.1	13.4	106.5	29.8	30.0

\* L'immagine presenta una piccola copertura nuvolosa (32 km<sup>2</sup>) che non è stata considerata.

TABELLA 8 - Valori medi delle stime dell'equivalente in acqua (w.e., in mm) calcolati con il modello SNOW, valori misurati e residui.  
TABLE 8 - Comparison between the average values of estimated water equivalent (mm) with the SNOW model and the measured ones.

Classe:	calcolati Mod. SNOW			punti di controllo			residui (calc.-mis.)		
	S	E/W	N	S	E/W	N	S	E/W	N
01.2.84	111.	113.	111.	176.	146.	205.	-65.	-96.	-94.
01.3.84	166.	224.	286.	286.	318.	280.	-47	-109.	-1.
01.4.84	317.	383.	312.	327.	383.	361.	-10.	0.	-51.
15.4.84	334.	371.	392.	407.	472.	380.	-73.	-102.	13.
01.5.84	281.	371.	258.	206.	373.	239.	75.	-2.	18.
01.6.84	218.	448.	223.	22.	103.	62.	195.	345.	161

servazioni e di studi, e per i quali ci potrebbe essere la possibilità di ricostruire serie storiche anche di rilevante importanza, anche ai fini della valutazione delle potenzialità di produzione energetica.

Tra questi in particolare il ghiacciaio Careser, la cui serie storica, in base alla grande quantità di rilievi esistenti, potrebbe venire ricostruita sino dagli anni venti.

Le caratteristiche di sintesi delle proprietà superficiali del territorio, contenute dell'informazione telerilevata da satellite, in particolare dei satelliti che vengono correntemente impiegati per la caratterizzazione del suolo (Landsat TM, SPOT ed ora anche ERS-1) potrebbero venire utilizzate per la valutazione dei parametri geometrici e per la classificazione superficiale dei ghiacciai e dei glacionevati con procedure automatizzate. È importante, in particolare, la valutazione della quota della linea di equilibrio, poiché in genere si stabilisce una relazione molto stretta tra questa grandezza ed il bilancio di massa.

La classificazione delle superfici glaciali in relazione ai termini del bilancio di massa, può venire eseguita per mezzo dell'analisi di immagine da satellite. Poiché la precisione che può offrire questa tecnica è in relazione alla risoluzione spaziale dell'immagine ed alle caratteristiche spettrali del rilevamento, i migliori risultati si possono ottenere usando le immagini SPOT, oppure ERS-1 quando disponibili (DEDIEU, 1990), che comunque non può, allo stato attuale, scendere al di sotto di 15 m.

Per quanto riguarda l'aspetto dei ghiacciai come archivio climatico, che attiene alla possibilità di recuperare e decodificare eventuali informazioni paleoclimatiche e paleoambientali conservate sequenzialmente nella massa glaciale, questa potenzialità è limitata dall'eventualità di disporre di ambienti glaciali permanentemente freddi, cioè preservati dalla possibilità che sia avvenuta una percolazione di acqua di fusione.

Questa limitazione è oggettivamente molto restrittiva per il versante italiano delle Alpi, poiché tali risorse sono da ricercare nei ghiacciai molto elevati posti sui versanti settentrionali, che in Italia sono molto scarsi.

La decodifica e la datazione di tali informazioni richiede, tra l'altro, una conoscenza molto dettagliata della dinamica, per la quale può risultare utile l'impiego di un sistema informativo del tipo dei S.I.T.

Il Sistema SIGMA viene attualmente impiegato anche per la sperimentazione della gestione delle informazioni relative ad un progetto glaciologico completo dello studio delle caratteristiche di due sistemi glaciali: i ghiacciai della Valle della Mare e quelli della Valle di Gressoney.

I dati disponibili per il bacino del ghiacciaio Careser, le cui caratteristiche geometriche sono riportate in tab. 10, sono:

- rilievi aerofotogrammetrici;
- D.T.M. calcolati su un reticolo di m 50 × 50 a partire da linee di livello ottenute da rilievi a scala 1:5000 eseguiti in date diverse;
- rilievi cartografici.

In fig. 6 è riportata la rappresentazione delle curve di livello dell'intero bacino Careser con evidenziata l'estensione dell'area glaciale relativa al rilievo del 1990, come esempio delle possibilità offerte dalle risorse grafiche del S.I.T. sul quale è stata sviluppata la procedura.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati cartografici allo scopo di valutare le variazioni di estensione e di vo-

TABELLA 9 - Estensione dei bacini glaciali sottesi da serbatoi ENEL.  
TABLE 9 - Dimensions of the basins subtended by ENEL water reservoirs.

	capacità		bacino sotteso	
	hm <sup>3</sup>		totale km <sup>2</sup>	glaciale km <sup>2</sup>
Torino	266.2		618.3	54.27
Milano	247.3		237.2	37.96
Venezia	274.4		890.5	58.72

TABELLA 10 - Caratteristiche del bacino del Ghiacciaio Careser.  
TABLE 10 - Characteristic of the basin of the Careser Glacier.

Sezione di chiusura	diga del Careser
Intervallo di altitudine del bacino	2 598:3 386 m s.l.m.m.
Superficie totale del bacino	14.5 km <sup>2</sup>
Superficie del ghiacciaio (1990)	3.8 km <sup>2</sup>
Volume dell'invaso	15.6 hm <sup>3</sup>

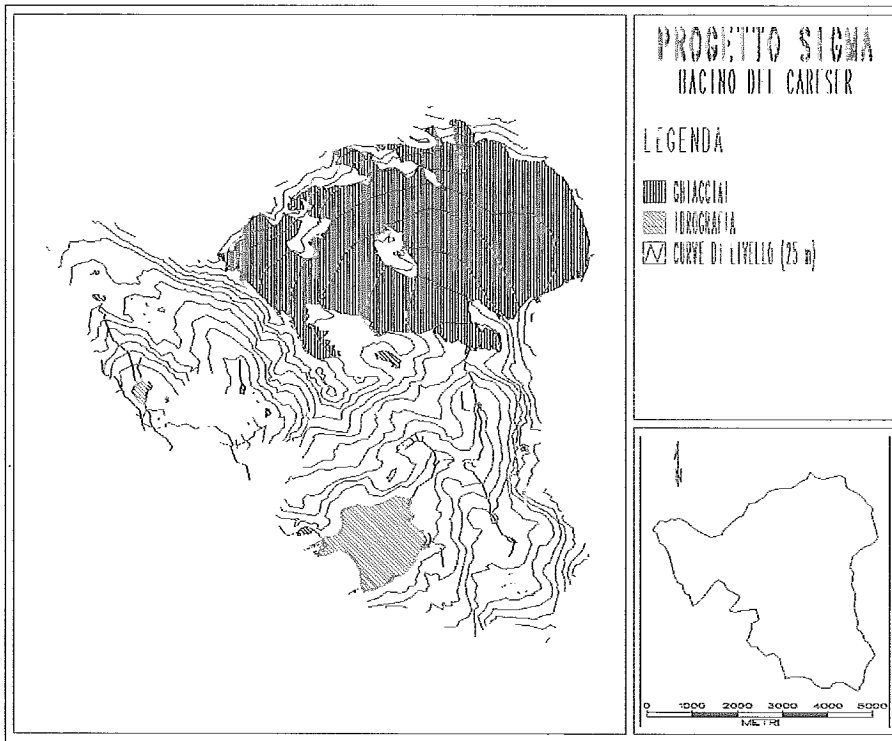


FIG. 6 - Cartografia numerica del bacino del Careser.

FIG. 6 - Careser basin level curves represented with the SIGMA display facility.

lume del ghiacciaio sono state sottratte le quote del DTM relativo al rilievo 1990 da quelle del 1980. In questo decennio, caratterizzato dal fatto che il ghiacciaio ha subito l'ablazione più forte del periodo di osservazione, si è verificata una variazione di spessore variabile da 0 a 10 metri, con una perdita netta in volume di  $54,2 \text{ hm}^3$ , pari a più di tre volte il volume dell'invaso.

La superficie nello stesso periodo è diminuita da  $4,83$  a  $3,86 \text{ km}^2$  (ZANON, 1991). Il ghiacciaio, che presenta vaste zone con spessore ormai molto ridotto, è soggetto a subire, in un futuro molto prossimo, ulteriori drastiche riduzioni di superficie che potranno indurre sensibili variazioni nel regime annuale degli apporti del bacino.

#### MONITORAGGIO DELLE SITUAZIONI DI RISCHIO IDROGEOLOGICO

Le condizioni di rischio idrogeologico, per quanto riguarda la possibilità di piene improvvise (flash floods), sono provocate dal verificarsi di precipitazioni liquide di eccezionale intensità sopra estese superfici glaciali, conseguenti all'innalzamento dello zero termico al di sopra del limite dei ghiacciai. Il ruolo del sistema SIGMA in questo caso potrebbe essere quello di fornire una valutazione del potenziale idrico immobilizzato dal manto nevoso e di quello potenzialmente asportabile dalla superficie delle masse glaciali e dei glacionevati, come premessa per la classificazione del rischio connesso al verificarsi di ipotetici eventi estremi.

Il ruolo di previsione degli eventi estremi di natura meteorologica e la conseguente gestione del sistema di allerta dovrebbero venire svolti da un sistema in grado di operare in tempo reale.

#### CONCLUSIONI

Il sistema SIGMA, basato sull'integrazione in un SIT di modelli matematici e di informazioni ottenute attraverso l'elaborazione di immagini R.S., rappresenta uno strumento efficace per la valutazione della distribuzione dell'equivalente in acqua del manto nevoso come supporto decisionale per la gestione delle risorse idroelettriche e per il monitoraggio dell'effetto dei cambiamenti climatici sulla distribuzione del manto nevoso e sulla riserva glaciale.

Una applicazione operativa dell'elaborazione delle immagini R.S. può essere ottenuta utilizzando immagini AVHRR ottenute direttamente attraverso una stazione ricevente.

L'identificazione di opportuni indici di copertura nevosa riferiti alla superficie totale di aree di controllo molto vaste, può fornire informazioni utili nella valutazione della distribuzione dell'equivalente in acqua ottenuta attraverso il modulo SNOW.

La conoscenza dell'evoluzione della distribuzione spazio-temporale della riserva idrica contenuta nel manto nevoso e negli apparati nivoglaciali dei bacini sottesi da impianti di produzione idroelettrica riveste grande importanza nella programmazione delle risorse energetiche.

Le esperienze finora condotte hanno dimostrato che il problema riveste una notevole complessità soprattutto per la grande quantità e varietà di informazioni in gioco, per i tempi di risposta richiesti e per la dispersione dei punti da controllare.

La verifica della funzionalità di un sistema informativo così strutturato, può avvenire solo attraverso la realizzazione di un prototipo, in grado di garantire la completa funzionalità operativa, nel senso di fornire un supporto decisionale in tempi compatibili con le esigenze della programmazione delle risorse energetiche per alcuni bacini campione.

#### BIBLIOGRAFIA

- ALBERTI M. (ined.) - *I Sistemi Informativi Geografici versus Mapping automatizzato*. Seminario FAST «I Sistemi Informativi Geografici», Milano, 14-17 Nov. 1989, 19.
- BAUMGARTNER M., SEIDEL K. & MARTINEC J. (1987) - *Toward snow-melt runoff forecasts based on multisensor R.S. information*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-25 N° 6 Nov. 1987, 746-750.
- BUTTLE J.M. & McDONNELL J.J. (1987) - *Modelling the areal depletion of snowcover in a forested catchment*. J. Hydrol. 90, 43-60.
- DEDIEU J.P. (ined.) - *Caracterisation des surfaces enneigees par teledetection dans les Alpes: lien avec mesures au sol*. Annual Meeting della Section Glaciologie della Societé Hydrotechnique de France, Grenoble 15-16 Marzo 1990.
- DELLA VENTURA A., RAMPINI A., RABAGLIATI R., ROSSI G. & SERANDREI BARBERO R. (1986) - *Integration of Remote Sensing Data on an Information System*. XX Int. Symp. Remote Sensing of Environment, Nairobi, Kenia 4-10 Dec. 1986, 1-8.
- GALEATI G., ROSSI G., TODINI E. & TOMASINO M. (1982) - *La calibrazione interattiva di un modello di fusione della neve*. Atti XVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche - Bologna 1982, 183-196.
- GALEATI G., ROSSI G., PINI G. & ZILLI G. (1986) - *Optimization of a snow network by multivariate stistical analysis*. Hydr. Sci. Jour. 31, 93-108.
- ROSSI G., TOMASINO M., DELLA VENTURA A. & RAMPINI A. (1986) - *Landsat registration for a snow melt model of Piave River Basin*. IAHS Publ. N° 155, 215-229.
- ROSSI G., CARUSO C., MARAN S. & PENNATI G.P. (1991) - *An Operational G.I.S. Integrating Snow Cover and Glacier R.S. & F.D. for Hydroelectric Management Purposes*. Proc. 24th Int. Symp. Remote Sensing of Environment - Rio de Janeiro, Maggio 1991, 649-662.
- STAR J. & ESTES J. (1990) - *Geographic Information Systems: An introduction*. Prentice Hall, New Jersey, 303 pp.
- TOMASINO M., GALEATI G. & ROSSI G. (1986) - *La previsione dei deflussi a diverse scale temporali per il bacino dell'alto Piave*. Atti Convegno sul XX dell'alluvione del 1966 - Belluno, Sett. 1986, 87-98.
- TODINI E. & WALLIS J.R. (1977) - *Using CLS for daily or longer rainfall-runoff modelling*. In: CIRIANI T.A., MAIONE U. & WALLIS J.R. (Eds.), *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*. J. Wiley & Sons, London, 149-168.
- VAN DEN GRIEND A.A. (1981) - *A weather-type hydrologic approach to runoff phenomena*. - Ph. D. thesis Vrije Universiteit, 163 pp., Amsterdam.
- WALSH S., BUTLER D., BROWN D. & BRIAN L. (1990) - *Cartographic modelling of snow avalanche path location within Glacier National Park, Montana*. Photogrammetric Engineering and R.S., 56.
- ZANON G. (ined.) - *Bilancio di massa del Ghiacciaio del Careser: rilievo aerofotogrammetrico e misure sul campo*. Relazione a fronte contratto ENEL - CRIS con il C.G.I. n. 41 del 21.6.90, 16 pp.