

**CAPITOLO 5**  
**L'ESPERIMENTO "MASMEX" 2002**

## 5.1 – INTRODUZIONE

Questo capitolo descrive un esperimento condotto sulle Alpi italiane avente come obiettivo lo studio del ciclo di scioglimento della neve, e basato sulla combinazione di misure di tele-rilevamento a microonde con dati a terra e micrometeorologici.

L'esperimento, denominato MASMEX 2002, è stato condotto per studiare in modo sistematico sia le proprietà radiative e fisiche del manto nevoso che il suo ciclo di fusione. Nel marzo 2002 è stato installato sull'altopiano del Monte Cherz vicino ad Arabba, in provincia di Belluno nelle Alpi orientali, un radiometro a microonde multi-frequenza dell'IFAC-CNR di Firenze. La strumentazione comprendeva inoltre una stazione meteorologica ed alcuni strumenti per la misura del bilancio radiativo.

Durante il mese di marzo 2002 le condizioni della neve sono cambiate più volte per l'alternanza di fusione intensa con scioglimento quasi totale del manto e significativi apporti di neve fresca.

E' stata messa in evidenza una forte sensibilità dell'emissione a microonde ai cicli di fusione-rigelo, all'umidità della neve, nonché alle condizioni del terreno sottostante. I risultati hanno dimostrato la possibilità di utilizzare i dati a microonde come variabili in ingresso a modelli idrologici di fusione della neve.

La ricerca è stata parzialmente finanziata dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), dal Progetto EC ENVISNOW (EVG1-CT-2001-00052) e dal Progetto CNR-GNDICI (U.O.2.48).

## 5.2 – L'ESPERIMENTO

L'esperimento è stato condotto da Giovanni Macelloni, Simonetta Paloscia, Paolo Pampaloni, Roberto Ruisi, Emanuele Santi e Marco Tedesco dell'IFAC-CNR (Istituto di Fisica Applicata) di Firenze, da Anselmo Cagnati, Andrea Crepaz, Mauro Valt, Renato Zasso dell' ARPAV – Centro Valanghe di Arabba (BL) e da Roberto Ranzi e Massimo Tomirotti dell'Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile. In particolare, le attività sono state organizzate dall'IFAC-CNR di Firenze per la parte delle misure a microonde, dal Centro Valanghe di Arabba per le misure nivologiche e i dati meteo e dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia per la raccolta di dati micrometeorologici.

L'obiettivo principale di questo esperimento è stato quello di studiare il ciclo di fusione-rigelo della neve ed il bilancio radiativo e idrico dopo lo scongelamento del terreno. Sono stati raccolti dati nivologici, micrometeorologici e di telerilevamento dal 20 marzo al 20 giugno 2002.

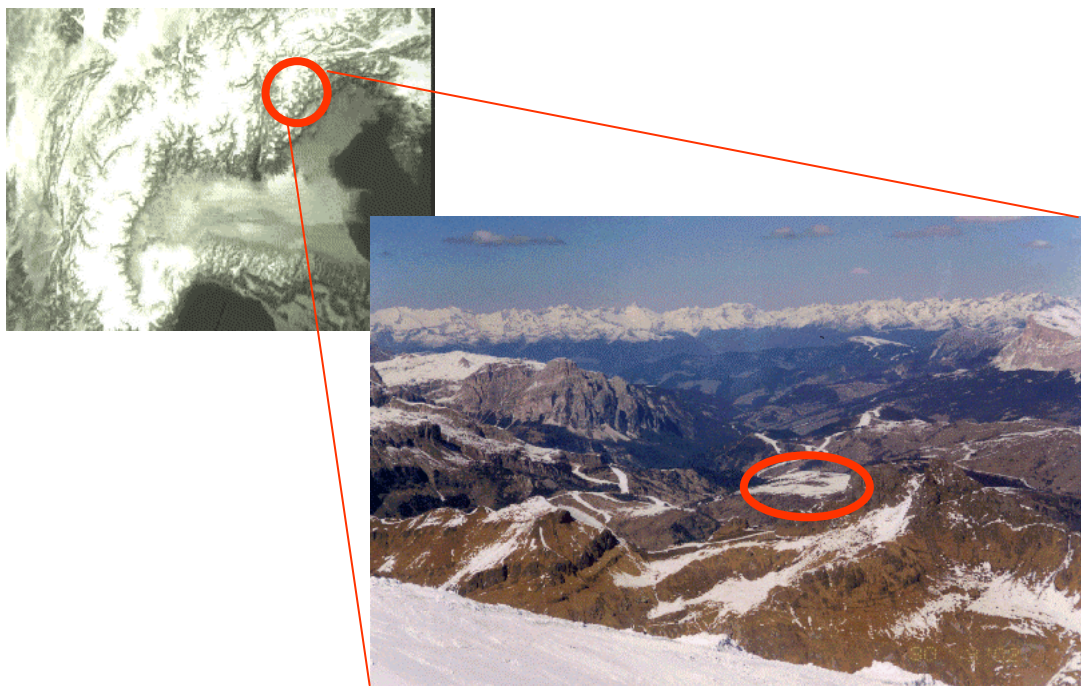
All'inizio dell'esperimento lo spessore del manto nevoso sull'area di test era di circa 30 cm; in aprile sono avvenute diverse nevicate ed il terreno è rimasto coperto fino al 10 maggio. Dopo questa data l'esperimento è stato indirizzato alla misura dell'umidità del suolo e del bilancio idrico e radiativo.

L'esperimento è stato condotto a 2000 m s.l.m., nel bacino del Cordevole (Figura 5.2.1 nella pagina seguente). Questo luogo è stato scelto per la topografia relativamente dolce e la disponibilità di dati storici e di modelli digitali del terreno.

Durante l'esperimento sono stati misurati sull'area molti parametri del manto

---

nevoso e meteorologici. Il Centro Valanghe di Arabba (BL) ha misurato i parametri convenzionali lungo il profilo verticale ad ogni cambiamento significativo di stato durante il ciclo giornaliero di fusione e ricongelamento.



**Figura 5.2.1** ? Il luogo scelto per l'esperienza sul Monte Chertz nel Bacino del Cordevole

Per ogni strato sono stati misurati:

- ?? la forma e le dimensioni dei cristalli
- ?? il contenuto di acqua liquida
- ?? la densità della neve
- ?? la durezza della neve
- ?? l'equivalente in acqua della neve
- ?? la temperatura della neve

La misura del contenuto in acqua liquida è stata effettuata con i metodi convenzionali (*Colbeck et al*, 1990) e per mezzo di due sonde elettromagnetiche:

una a forchetta (TOIKKA – Finland) e una costruita dall'IFAC. Entrambi i sensori misurano la costante dielettrica della neve calcolando il suo contenuto in acqua liquida e la densità. Per alcuni giorni è stato effettuato un confronto fra i tre approcci sugli stessi campioni di neve ed è stato evidenziato come la sonda a forchetta tendesse a dare un valore abbastanza simile, ma costantemente inferiore, rispetto alla sonda IFAC.

Una stazione meteorologica è stata installata dal Centro Valanghe di Arabba per misurare la velocità e la direzione del vento, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria. Inoltre il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Brescia ha collocato diversi sensori per lo studio e la simulazione delle proprietà fisiche e radiative del manto nevoso e del terreno, per poter descrivere e simulare in modo più adeguato i processi di fusione e ricongelamento, la metamorfosi dei cristalli e la percolazione dell'acqua all'interno del manto nevoso. La strumentazione comprendeva 3 sonde di temperatura (rispettivamente a 0.6, 0.4 m sopra il terreno ed a 0.05 m dentro il terreno), un radiometro netto (0.3-60.0  $\mu\text{m}$ ) e una sonda di flusso termico. I quattro sensori hanno permesso l'osservazione della temperatura dell'aria (a 0.6 m sopra la superficie del terreno) e della neve, il flusso radiativo nel manto nevoso e il flusso di calore nel terreno.

### **5.2.1 – LA STRUMENTAZIONE A MICROONDE**

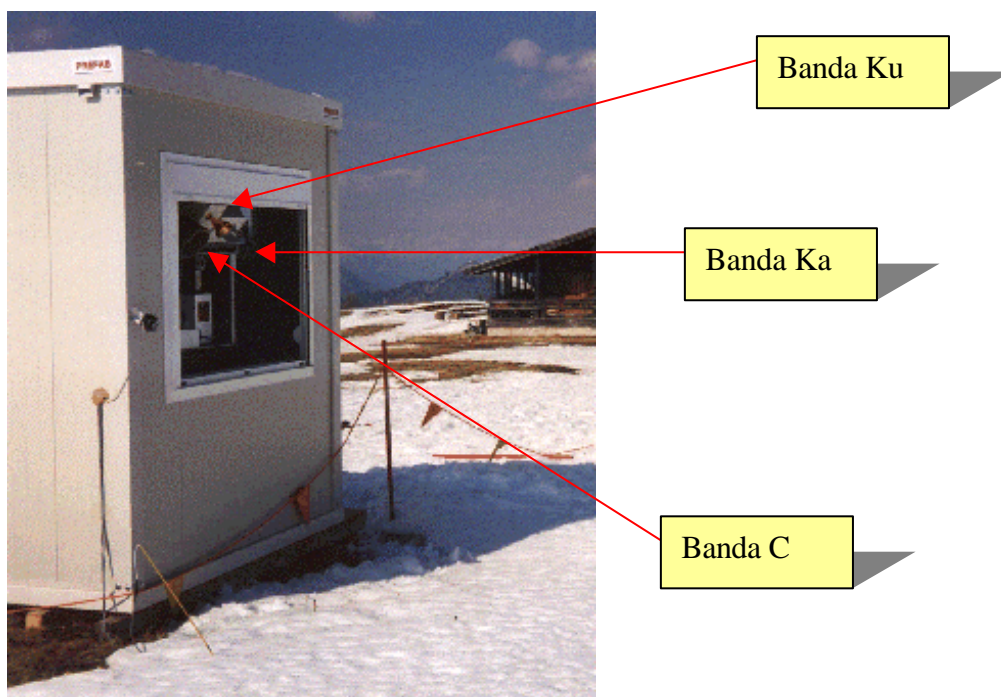
Per quanto riguarda le misure a microonde durante l'esperienza sono state utilizzate diverse apparecchiature, installate dall'IFAC in un piccolo prefabbricato riscaldato (Figura 5.2.1.1 nella pagina seguente).

Le apparecchiature installate erano le seguenti:

?? un radiometro a microonde multifrequenza (IROE: *Instrument for the Radio-Observation of the Earth*) di proprietà dell'IFAC-CNR

?? un radiometro operante nell'infrarosso termico, nella banda 8-12  $\mu$ m.

Le principali caratteristiche dei radiometri a microonde impiegati sono illustrate nella Tabella 5.2.1.1.



**Figura 5.2.1.1:** Il prefabbricato nel quale sono stati installati i radiometri a microonde

Il radiometro a microonde ha operato in banda C (6.8 GHz), Ku (19 GHz), e Ka (37 GHz) sul terreno coperto da neve dal 20 marzo al 10 maggio 2002, e in banda L (1.4 GHz), C e Ka su terreno nudo dal 20 maggio al 30 giugno.

I sensori sono rimasti in funzione 24 ore su 24, con un angolo di incidenza di circa 60°.

Frequenza	Polarizzazione	Angolo Inc.	Precisione
1.4 GHz *	V, H	60° fisso + 30°-70° scansione	± 0.5 K
6.8 GHz	V, H		
19 GHz **	V, H, 45°		
37 GHz	V, H, 45°		
* dopo il 20 Maggio      ** fino al 20 Maggio			

**Tabella 5.2.1.1** ? Caratteristiche dei radiometri a microonde installati sul monte Chertz

### 5.3 – I RISULTATI DELL'ESPERIMENTO

I dati raccolti sono stati divisi in due diversi periodi: uno dal 30 marzo al 5 aprile 2002, quando il manto nevoso spesso circa 35 cm era caratterizzato da una successione regolare di cicli di fusione e rigelo, e un altro dall' 1 al 20 maggio 2002, caratterizzato da una sequenza di piogge e nevicate e anche da cicli di fusione-rigelo che hanno portato successivamente ad una progressiva scomparsa del manto nevoso.

#### ☞☞ **PRIMO PERIODO (30 MARZO – 5 APRILE 2002)**

Il primo periodo è stato caratterizzato da un progressivo calo della temperatura dell'aria, dopo che il 3 aprile è passata da valori positivi a valori negativi. In questa fase il minimo di temperatura è stato sempre negativo durante la notte, originando una serie di cicli di fusione-rigelo, di intensità più bassa nella notte fra il 2 e il 3 aprile quando il cielo era leggermente nuvoloso e la temperatura è rimasta vicina a 0° C.

Il 2 aprile lo spessore della neve era di circa 30 cm, l'aria era ad una temperatura

---

vicina a 0° C e la sua umidità era compresa fra 0-3% e 3-8%. La forma dei grani indicava un’espansione del processo di fusione fino alla base del manto nevoso dove si trovava uno strato basale composto di cristalli umidi (classificati come 6c, secondo la classificazione internazionale *Colbeck et al*, 1990) mescolati con diverse forme di cristalli angolari (4c). Questo strato era separato dagli strati sovrastanti da una leggera crosta (9e) a causa dei processi di ricongelamento. La superficie del manto era liscia, composta da un film di firnspiegel (9b), che determinava un contenuto in acqua liquida maggiore nello strato sottostante (3-8% contro 0-3%).

In Figura 5.3.1 è riportata la scheda nivometrica fornita dal Centro Valanghe di Arabba relativa al 2 aprile 2002.

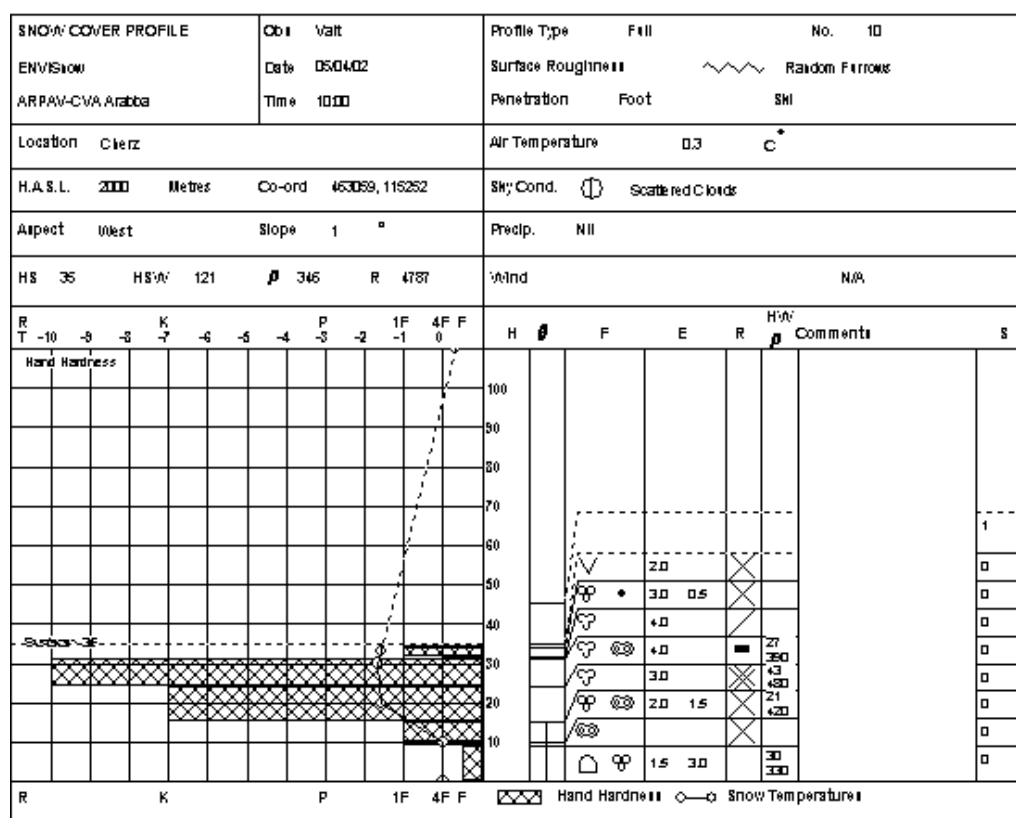
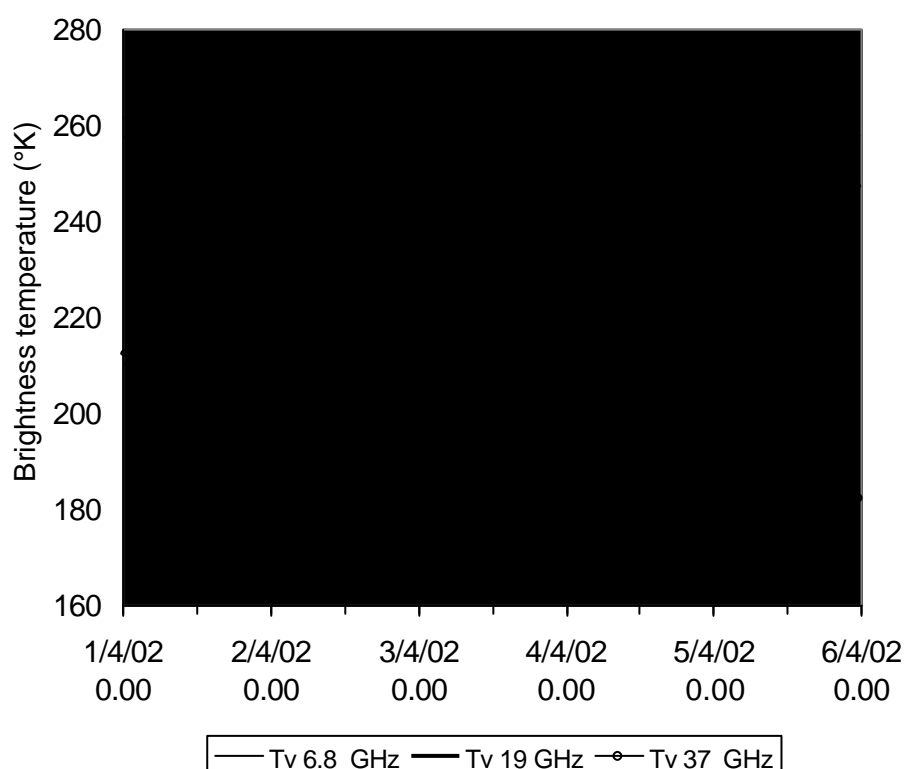


Figura 5.3.1 – Il profilo del manto nevoso il 2 aprile 2002



Il profilo misurato il 5 aprile mostra chiaramente che il calo di temperatura ha causato un consolidamento generale dello strato con una forte presenza di policristalli (causati dal processo di fusione-rigelo) di taglia molto maggiore di quelli osservati il 2 aprile (2-4 mm invece di 1-3 mm). La fusione ha influenzato anche lo strato caratterizzato da cristalli arrotondati, che sono stati completamente trasformati in cristalli umidi. Il rigelo ha riguardato quasi tutto il manto nevoso, tranne che i 15 cm vicino al terreno dove era evidente una certa percentuale di acqua libera (0-3%).

I dati rilevati con lo strumento a microonde sono visibili in Figura 5.3.2 che rappresenta gli andamenti temporali della temperatura di brillantezza a 6.8, 19 e 37 GHz.



**Figura 5.3.2** – La temperatura di brillantezza a 6.8 GHz, 19 GHz e 37 GHz (Bande C, Ku e Ka) con polarizzazione verticale in funzione del tempo fra il 30 marzo e il 6 aprile 2002 sul monte Chertz.

Il comportamento della Tv è ben correlato con il ciclo giornaliero di fusione-rigelo: le fasi crescenti sono collegate alla fusione della neve, mentre le decrescenti al rigelo. Infatti, durante la fase di fusione, la generazione di acqua liquida causa un aumento dell'assorbimento, per l'aumento della parte immaginaria della costante dielettrica della neve, ed un conseguente aumento di emissione.

La variazione del segnale è molto maggiore alle frequenze più alte che a 6.8 GHz; infatti, a questa frequenza la penetrazione nel manto nevoso è alta e tale da rendere dominante il contributo del terreno.

Nella notte fra il 3 e il 4 aprile il rigelo non è stato completo e la Tv è rimasta perciò relativamente alta.

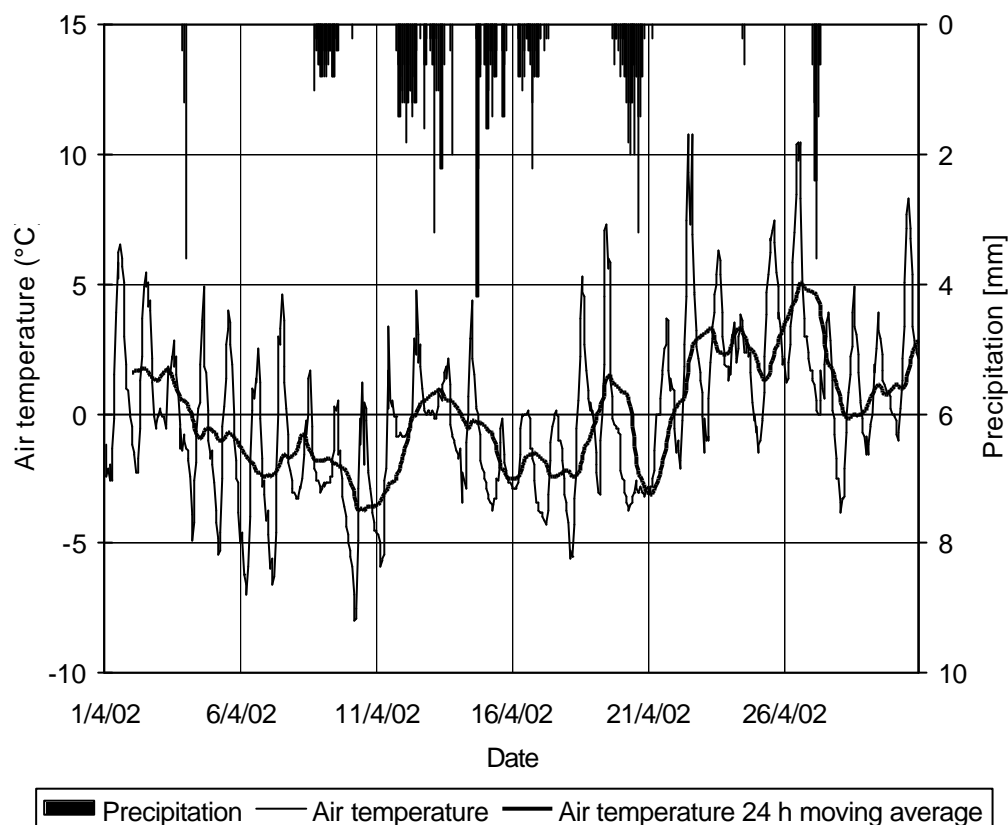
Il valore massimo di Tv si ottiene di solito quando l'umidità della neve raggiunge un valore vicino al 2-3%.

Nella fase di rigelo la diminuzione della Tv è dovuta sia alla diminuzione della temperatura termometrica che alla scomparsa delle particelle di acqua liquida (e quindi alla diminuzione della parte immaginaria della costante dielettrica della neve).

La temperatura di brillantezza della neve misurata durante il ciclo giornaliero di fusione è stata simulata con buona approssimazione da un modello a due strati basato sulla teoria delle Strong Fluctuations (SFT) e il teorema di fluttuazione-dissipazione (*Cagnati et al*, 2002).

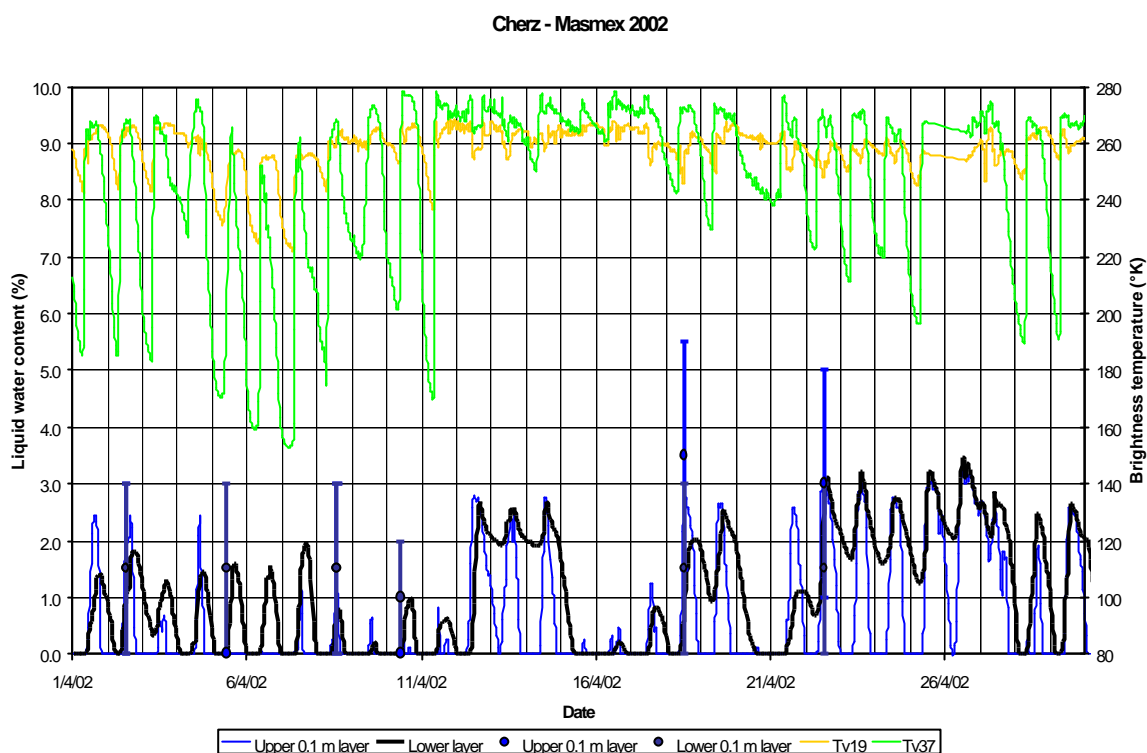
Di seguito vengono riportati gli andamenti di alcune grandezze monitorate durante l'esperimento.

In particolare nella Figura 5.3.3 è riportato il grafico con l'andamento della temperatura dell'aria e delle precipitazioni relative al mese di aprile 2002.



**Figura 5.3.3** – Andamento della temperatura e delle precipitazioni in funzione del tempo (aprile 2002)

In Figura 5.3.4 nella pagina seguente sono rappresentati i valori misurati della temperatura di brillantezza  $T_v$  ed i valori simulati del contenuto in acqua liquida in funzione del tempo. La linea verde rappresenta la  $T_b$  del radiometro a 37 GHz, la linea gialla la  $T_b$  di quello a 19 GHz, la linea blu l' LWC (contenuto in acqua liquida) simulato dello strato di neve di 10 cm superiore, la linea nera l' LWC simulato dello strato di neve più basso, i punti LWC misurato dello strato più alto.



**Figura 5.3.3** – Andamento di temperatura di brillantezza misurata e contenuto in acqua liquida simulato. (Linea verde  $\equiv$  Tb 37 (GHz), Linea gialla = Tb (19 GHz), Linea blu = LWC simulato dello strato di neve di 10 cm superiore, Linea nera = LWC simulato dello strato di neve più basso, Punti = LWC misurato dello strato più alto.)

## SECONDO PERIODO (2-20 MAGGIO)

Il 2 maggio, il sito era coperto da uno strato sottile non uniforme di neve, spesso circa 10 cm. Il profilo misurato mette in evidenza un manto nevoso composto da croste, dovute ai cicli di fusione-rigelo (9c), con uno strato intermedio di ghiaccio (8a). I cristalli della crosta presentavano una struttura policristallina con dimensioni di 1.5-2.0 mm e un alto contenuto in acqua (3-8%). La temperatura, vicina a 0° C, ha avviato un processo di fusione lungo l'arco dell'intera giornata, che è continuato nei giorni successivi quando si sono verificate precipitazioni

liquide fino alla quota di 2200 m s.l.m. La radiazione netta  $H_n$  era abbastanza alta, con valori di picco orari fino a  $400 \text{ W/m}^2$ ; la completa fusione del manto nevoso è evidenziata dal rapido aumento del flusso di calore nel terreno dovuto allo scongelamento e al riscaldamento dello strato sovrastante. Il flusso nel terreno,  $H_g$ , ha raggiunto un valore massimo di circa  $290 \text{ W/m}^2$ . Successivamente, il 4 Maggio, la graduale diminuzione di temperatura ha causato un abbassamento della quota minima delle nevicate con un contributo di 40 cm di neve fresca sull'area di test e 65 cm a 2200 m s.l.m. L'albedo è aumentata e la radiazione netta è diminuita fino a circa  $200 \text{ W/m}^2$ .

Nei giorni successivi la radiazione incidente riflessa dalla neve fresca era molto alta come pure il contributo di radiazione netta. Il 5 maggio una debole perturbazione ha portato altri 5 cm di neve fresca. Nella notte fra il 5 e il 6 si è verificato un breve ciclo di rigelo, seguito da tre cicli successivi nelle notti 6/7, 7/8 e 8/9. Tutti questi cicli con un massimo di rigelo nella notte fra il 7 e l'8 sono stati ben individuati dai radiometri a microonde, soprattutto quello a 37 GHz, mentre solo quelli più forti sono debolmente evidenti nel segnale dell'infrarosso termico. Nei giorni 8 e 9 le nuvole hanno ridotto la componente a onda corta cosicché la radiazione netta è risultata negativa a causa dell'emissività più alta della copertura nevosa rispetto a quella atmosferica. Anche il flusso di calore nel terreno è diminuito per via di un profilo più omogeneo di temperatura nel terreno. Il 10 maggio la copertura nevosa è sparita e il terreno ha cominciato decisamente a scaldarsi, così si sono generati gradienti verticali di temperatura e il flusso di calore nel terreno  $H_g$  è aumentato rapidamente fino a valori medi di diverse centinaia di  $\text{W/m}^2$ . Un fronte riscaldante si è propagato verso il basso nel terreno

---

fino a raggiungere un equilibrio termico. Un flusso medio di circa  $130 \text{ W/m}^2$  è stato registrato nel periodo 16-18 maggio. Durante il 19 e il 20 maggio la diminuzione di radiazione solare e temperatura dell'aria corrispondeva a due precipitazioni di 17.6 e 8.6 mm. Il flusso di calore nel terreno aumentava, probabilmente perché l'acqua di percolazione cambiava il comportamento termico dello strato superiore di terreno.

## 5.4 – CONCLUSIONI

L'esperimento ha messo in evidenza le potenzialità di misure multi-sensore nella caratterizzazione delle diverse condizioni del manto nevoso. In particolare è stata riscontrata un'alta sensibilità del tele-rilevamento a microonde con sensori passivi ai cicli di fusione-rigelo della neve.

D'altra parte, i dati micrometeorologici come la radiazione netta, la temperatura ed il flusso di calore nel terreno aggiungono ulteriori informazioni sui processi di fusione e rigelo nel manto nevoso e nei meccanismi di percolazione dell'acqua e riscaldamento del terreno. Tutti questi dati possono essere impiegati vantaggiosamente per simulare i cambiamenti del manto nevoso e per verificare i modelli matematici dei processi del manto nevoso basati su misure meteorologiche.