

ANGELA MARINONI (*), STEFANO POLESELLO (**), SARA VALSECCHI (**),
GIANNI TARTARI (**), VALTER MAGGI (*) & CLAUDIO SMIRAGLIA (***)

COMPOSIZIONE CHIMICA DELLA NEVE E DEL GHIACCIO NELLA VALLE DEL KHUMBU (SAGARMATHA NATIONAL PARK, HIMALAYA, NEPAL)

ABSTRACT: MARINONI A., POLESELLO S., VALSECCHI S., TARTARI G., MAGGI V. & SMIRAGLIA C., *Snow and ice chemical composition in the Khumbu Valley (Sagarmatha National Park, Himalaya, Nepal)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

In 1998 fresh surface snow samples were collected, no more than two days after the snowfall, along the Khumbu valley, and its lateral valleys (Kongmala and Changri Nup), at the end of the summer monsoon period. Samples from the Island Peak and Pumori slopes were also collected by climbers during pre- and post-monsoon season at altitudes ranging from 5300 to 6100 m a.s.l. Two series of ice samples from seracs of two different glaciers (Changri Nup and Khumbu Glaciers) were also collected and analysed. Conductivity, pH and major inorganic ions were measured in samples and relative field blanks. Chemical results were interpreted in order to distinguish different sources of ions and study spatial and temporal distribution of ion concentrations. Two different sources have been identified, one correlated with calcium and sulphate, which represents local transport and background contribution, and the other, correlated with sodium and chloride, which is related to monsoon circulation. The orographic and micrometeorological influence on the chemical composition of the snow in the different sites has been discussed.

KEY WORDS: Chemical analysis, Ionic chromatography, Monsoon circulation, Nepal.

RIASSUNTO: MARINONI A., POLESELLO S., VALSECCHI S., TARTARI G., MAGGI V. & SMIRAGLIA C., *Composizione chimica della neve e del ghiaccio nella Valle del Khumbu (Sagarmatha National Park, Himalaya, Nepal)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

Nel 1998 è stato effettuato un campionamento di neve fresca e ghiaccio per approfondire la composizione chimica delle deposizioni che alimentano gli apparati glaciali della Valle del Khumbu (Sagarmatha National Park, Himalaya, Nepal) e il loro significato ambientale. La neve, rac-

colta nella stagione post-monsoonica 1998 a quote comprese tra 5050 e 5700 m, è rappresentativa sia del versante sinistro (Kongma-La valley), sia di quello destro (Lobuche ridge) della valle dell'Everest. Nella stessa campagna sono stati raccolti anche campioni in una valle laterale (Changri Nup Valley e versante orientale del Monte Pumori). Sono stati inoltre raccolti tre campioni durante il periodo pre-monsoonico (maggio 1998) lungo il versante dell'Island Peak. Sono state infine prelevate due serie di campioni di ghiaccio a quota 5400 m, poco sopra la fronte bianca del ghiacciaio Changri Nup, da un seracco con evidente stratificazione annuale, e da un seracco simile in prossimità del campo base Everest, a 5300 m.

L'analisi ha permesso di mettere in evidenza l'influenza delle sorgenti naturali e antropiche sull'atmosfera di un'area remota. Sodio e cloruro sono molto ben correlati e sono presenti in un rapporto molto simile a quello trovato per l'acqua di mare e sono stati quindi utilizzati come riferimento per la sorgente monsonica che porta un forte contributo marino. L'andamento simile del calcio e del solfato suggerisce l'identificazione di una sorgente continentale terrestre, dovuto a particolato ricco di gesso proveniente dall'Asia centrale. Le concentrazioni di nitrato e di ammonio sono diverse nelle varie zone di campionamento: questo indica l'importanza dei fenomeni meteorologici locali nella distribuzione delle masse d'aria a scala regionale.

TERMINI CHIAVE: Analisi chimica, Cromatografia ionica, Circolazione monsonica, Nepal.

INTRODUZIONE

Lo studio della chimica delle precipitazioni nell'area himalayana fino ad oggi è stato piuttosto limitato sia a scala temporale sia spaziale, soprattutto a causa delle difficoltà logistiche del campionamento. Tuttavia la regione dell'Himalaya si propone come ambiente ideale per gli studi sulle aree remote e su come queste, pur trovandosi lontano da centri altamente industrializzati, siano influenzate dalla circolazione atmosferica globale. Alcuni studi effettuati nel passato indicano che il livello di concentrazione di alcune specie inquinanti, come nitrati e solfati, risulta dello stesso ordine di grandezza di quelli misurati in

(*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano-Bicocca, Piazza della Scienza, 20126 Milano.

(**) CNR IRSA, Brugherio, Milano.

(***) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Via Mangiagalli 34 - 20133 Milano.

Ricerca eseguita nell'ambito del progetto CNR-Everest-K2.

altre aree remote del mondo (Mayewsky & alii, 1983; Mayewsky & alii, 1986; Jenkins & alii, 1987; Shrestha & alii, 1997).

La circolazione monsonica influenza fortemente il clima di questa regione, con precipitazioni estive che costituiscono il 90% del totale annuo, ed un gradiente di pressione opposto nelle stagioni invernale ed estiva, che determina l'alternanza stagionale dei venti dominanti (Rao, 1981; Yasunari, 1976; Bertolani & alii, 2000). Ne deriva che, mentre le concentrazioni di fondo dell'atmosfera sull'altopiano tibetano sono dominate dalle polveri provenienti dal deserto dei Gobi, nell'Himalaya occidentale, Karakorum e Tibet sudorientale è importante anche la sorgente monsonica, che costituisce il contributo principale nell'Himalaya orientale (Wake & alii, 1990, 1993). Nella stagione monsonica i venti soffiano infatti da sud-ovest portando aria calda ed umida dall'Oceano Indiano che, prima di collidere con la catena himalayana, attraversa le regioni industrializzate e urbanizzate dell'India, accumulando inquinanti antropogenici (Ciccioli & alii, 1993; Galassi & alii, 1997).

Va inoltre sottolineare che il sistema himalayano è composto da molte valli separate: in ciascuna di queste esistono diverse condizioni climatiche, e soprattutto una diversa circolazione locale, che dipendono dalla quota, dalle dimensioni, dall'orientazione, dalla presenza di ghiacciai. Il flusso dell'aria, a grande scala, è guidato dal monzone, ma a scala giornaliera prevalgono le brezze di monte e di valle (Yasunari, 1976).

Il lavoro qui presentato si inserisce nell'ambito del progetto Ev-K²-CNR, nel quadro degli studi avviati dall'I-

stituto di Ricerca sulle Acque, a partire dal 1989, nel settore delle deposizioni atmosferiche, allargatosi poi al Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano. La prima fase del progetto, fino al 1992, è consistita nella raccolta di deposizioni umide presso la Piramide, cui è seguita, tra il 1992 e il 1994, la raccolta di campioni di nevato a quote superiori, grazie alla collaborazione di spedizioni scientifiche ed alpinistiche. Queste misure hanno permesso di definire i processi chimici e meteorologici legati alla chimica delle deposizioni in questa regione (Valsecchi & alii, 1999). I risultati di queste ricerche hanno suggerito che il contributo monsonico e quindi il trasporto a lunga distanza, responsabile delle precipitazioni al Laboratorio Piramide, non raggiungono le quote più elevate. Poiché rimaneva l'incertezza che i dati ottenuti nelle campagne del 1992 e 1994 potessero essere influenzati da fenomeni post-deposizionali, è stata programmata questa nuova campagna di prelievi di neve fresca, effettuata al termine della stagione monsonica 1998. I risultati delle analisi chimiche compiute su questi campioni formano l'oggetto del presente contributo.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E METEOROLOGICO

L'area di studio (fig. 1) è situata nella regione Khumbu-Himal del Nepal, tra 27°55' e 28° di latitudine Nord e 86°45' e 86°50' di longitudine Est. I campioni della stagione pre-monsoonica 1998 provengono dal versante meridionale dell'Island Peak (6173 m), nella seconda valle per

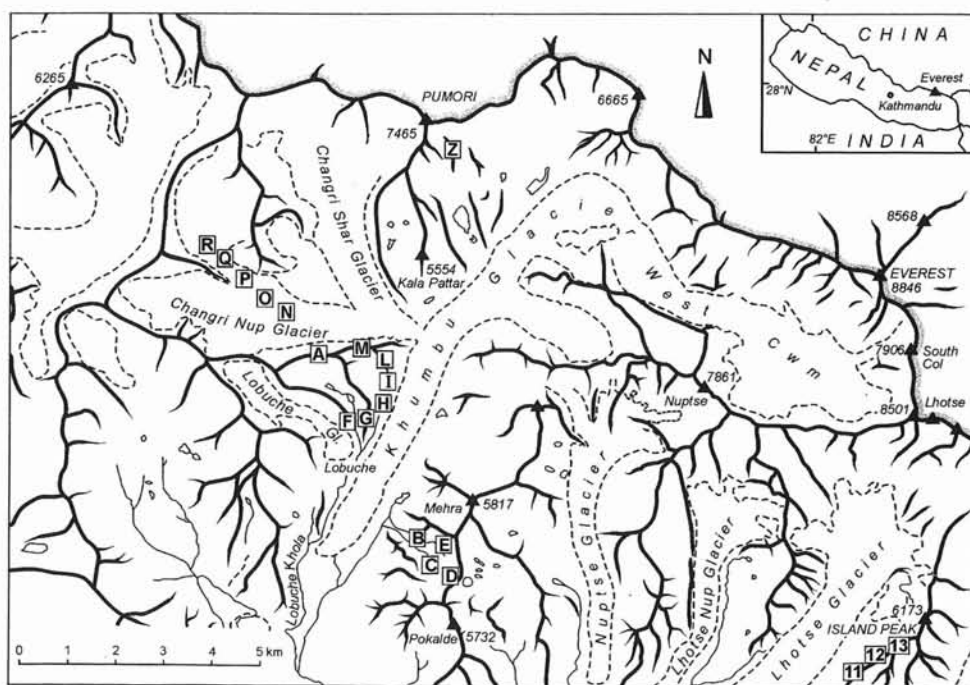


FIG. 1 - Ubicazione dei campioni di neve e di ghiaccio.

FIG. 1 - Snow and ice samples location.

importanza del bacino dell'Imja Khola, tra i ghiacciai Lhotse, Lhotse Shar e Imja. I campioni di neve fresca della stagione post-monsoonica 1998 sono stati raccolti, entro due giorni dalla deposizione, in aree prossime al Laboratorio Piramide. I siti di campionamento appartengono sia al versante sinistro della Valle del Khumbu (pendio occidentale del Passo Kongma La), sia al versante destro (Piramide, cresta del Lobuche Peak); sei campioni sono stati raccolti in una valle laterale (Changri Nup); infine un campione è relativo al margine settentrionale estremo dell'area, il Monte Pumori. I campioni di neve sono riferibili a quattro eventi deposizionali in una fase di «coda di monzone» della stagione post-monsoonica 1998, tra il 22 Settembre e l'11 Ottobre 1998.

Sono state inoltre raccolte due serie di campioni di ghiaccio da due seracchi con evidente stratificazione annuale: il primo poco sopra la fronte bianca del Ghiacciaio Changri Nup, a 5400 m, il secondo sul Ghiacciaio Khumbu, in prossimità del campo base per l'Everest, a 5300 m. Dal primo seracco sono stati prelevati ventisette campioni, alternando uno strato invernale a uno estivo, per un totale di quattordici anni di deposizioni; dal secondo seracco sono stati prelevati nove campioni a partire dalla neve superficiale della stagione monsonica 1998.

Dal 1994, presso la Piramide, è attiva una stazione meteorologica per l'acquisizione automatica, ogni due ore lungo l'intero anno solare, dei principali parametri meteorologici: temperatura dell'aria, precipitazioni, velocità e direzione del vento, irraggiamento solare globale, umidità relativa e pressione atmosferica. Le caratteristiche tecniche della stazione e dei sensori sono descritte in Stravisi & alii (1998), mentre i dati giornalieri e le relative elaborazioni sono riportati in Tartari & alii (1998) e Bertolani & alii (2000). Dall'analisi del quinquennio 1994-1998 si ricava che sono definibili quattro diverse stagioni: la stagione invernale da Dicembre a Febbraio, quella pre-monsoonica da marzo a maggio, che rendono conto globalmente del 10% delle precipitazioni annue, seguite da una stagione estiva monsonica (da Giugno a Settembre) che contribuisce per il 86% alla precipitazione annua. A questa stagione piovosa, caratterizzata da temperatura media di 3,1 °C, umidità relativa media del 91%, segue una stagione poco piovosa (solo il 4% delle precipitazioni annue), con una temperatura media di -4°C, umidità relativa media del 57,6% e caratterizzata da venti generalmente deboli, con raffiche improvvise, associabili principalmente a brezze di valle (Bertolani & alii, 2000).

METODOLOGIE DI PRELIEVO E ANALISI

I prelievi sono stati condotti in condizioni controllate sia per la localizzazione del punto di raccolta, sia per la procedura di campionamento; ogni campione è costituito da tre aliquote raccolte in un'area omogenea di circa 100 m². Per la neve fresca si è cercato di raccogliere campioni della stessa nevicata a quote diverse, per valutare l'esistenza di una variazione della composizione dovuta a un maggior contatto dei fiocchi di neve con le particelle dell'at-

mosfera nei campioni raccolti più in basso. Per la neve meno recente si è scelto un luogo poco ripido, non soggetto a fenomeni di accumulo per il vento o per scivolamento di neve da pareti sovrastanti. Prima di ogni prelievo si è verificato che non esistessero tracce del passaggio di alpinisti o di animali e di depositi superficiali di polveri eoliche.

Per ogni campione di neve, durante le operazioni di campionamento, è stato aperto nelle vicinanze del sito un bianco di controllo, contenente 50 ml di acqua ultrapura Milli-Q, per verificare il deposito di eventuali contaminanti durante il campionamento. I campioni trasportati in Italia e mantenuti congelati, sono stati scongelati immediatamente prima dell'analisi cromatografica in una cappa a flusso laminare: l'acqua ottenuta dallo scongelamento non è stata filtrata prima delle analisi per minimizzare la possibilità di contaminazione.

Le analisi del pH, con elettrodo a vetro (PHM 80 Portable pH Meter Radiometer), e della conducibilità, con tecnica potenziometrica (CDM 80 Conductivity Meter Radiometer) sono state effettuate presso il Laboratorio Osservatorio Piramide del CNR, secondo procedure standardizzate (Emep, 1996).

Le analisi cromatografiche sono state svolte presso il CNR-IRSA di Brughiero (MI), utilizzando la tecnica della preconcentrazione in linea. Per la separazione dei cationi è stata utilizzata una colonna Dionex IonPac CG12 e CS12, per gli anioni una colonna Dionex IonPac AG4A-SC e AS4A-SC secondo le procedure descritte in precedenza (Valsecchi & alii, 1999). Il limite di rivelabilità per ciascuno ione è di 0,010 meq l⁻¹. L'accuratezza è stata verificata analizzando materiali certificati (NBS 2694-I). La riproducibilità è stata valutata dal coefficiente di variazione delle repliche, in giorni diversi, degli standard utilizzati per la taratura: esso varia dal 30%, per il limite di rivelabilità, al 2-3% a 10 meq l⁻¹.

RISULTATI

Campioni di neve

Le concentrazioni dei maggiori ioni inorganici determinate nei campioni di neve raccolti nel 1998, sono riportate nella tab. 1. Questi dati vanno confrontati coi dati ottenuti sui bianchi di campo, aperti nell'area di campionamento, che mostrano concentrazioni non trascurabili e piuttosto omogenee nelle diverse zone di campionamento (tab. 2). Gli ioni presenti in concentrazioni inferiori al limite di rivelabilità (0.010 meq/l) sono stati considerati assenti dal bianco di controllo. Per quanto riguarda i bianchi di campo, si nota che il nitrato è sempre presente in concentrazioni molto vicine al limite di rivelabilità e quindi, nei campioni, il contributo dovuto a fattori esterni (deposito di particolato o assorbimento di gas durante il campionamento, il trasporto e lo scongelamento) può essere considerato trascurabile per questo ione. La stessa considerazione può essere fatta per solfato e magnesio, mentre maggiore attenzione è necessaria nell'interpreta-

TABELLA 1 - Analisi chimiche dei campioni di neve fresca (concentrazioni in $\mu\text{eq l}^{-1}$)TABLE 1 - Fresh snow samples chemical analysis (concentration values in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

	Zona di campionamento	Altitudine m	Data	pH	Conducibilità μScm^{-1}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
A	Lobuche ridge	5700	22/09/98	6.47	1.21	2.1	0.31	3.1	2.1	1.1	1.4	0.41	7.8
B	Kongma-La valley	5260	28/09/98	6.11	1.86	2.6	1.0	0.57	3.0	7.7	2.6	0.78	3.4
C	Kongma-La valley	5335	28/09/98	6.05	1.79	2.9	1.4	0.76	2.7	3.3	1.8	0.49	2.6
D	Kongma-La valley	5500	28/09/98	6.11	1.28	1.6	0.85	0.42	1.4	0.61	1.1	0.36	1.4
E	Kongma-La valley	5440	28/09/98	5.96	1.35	3.4	0.60	0.60	3.3	1.1	1.7	0.45	1.7
F	Ev-K ² -CNR-Pyramid	5050	29/09/98	5.75	1.97	4.0	1.3	0.38	2.8	4.0	6.1	1.8	4.2
G	Ev-K ² -CNR-Pyramid	5050	02/10/98	5.75	1.75	3.7	0.60	0.52	3.6	1.9	2.0	0.37	1.2
H	Lobuche ridge	5130	02/10/98	5.88	1.67	4.1	0.48	0.63	3.6	<DL	2.1	0.78	1.7
I	Lobuche ridge	5200	03/10/98	5.70	2.07	6.7	1.5	0.91	6.1	1.3	3.7	0.62	3.8
L	Lobuche ridge	5275	03/10/98	5.83	1.70	2.4	0.85	0.37	1.9	0.65	1.5	0.25	1.1
M	Lobuche ridge	5410	03/10/98	5.82	1.46	1.0	0.93	0.26	0.98	0.58	0.70	0.14	0.61
N	Changri Nup valley	5355	05/10/98	5.68	1.60	0.33	1.2	0.26	0.33	0.67	0.11	0.06	0.64
O	Changri Nup valley	5385	05/10/98	5.69	1.59	0.42	1.1	0.22	0.32	0.26	0.14	0.05	0.29
P	Changri Nup valley	5425	05/10/98	5.77	1.71	0.71	1.4	0.38	0.69	0.53	0.67	0.09	0.38
Q	Changri Nup valley	5485	05/10/98	5.68	1.59	0.61	1.4	0.41	0.70	0.53	0.44	0.08	0.32
R	Changri Nup valley	5520	05/10/98	5.73	1.47	0.88	1.6	0.44	0.75	0.52	0.59	0.10	0.56
Z	Pumori	6050	11/10/98	n.d.	n.d.	2.5	0.32	0.98	3.0	<DL	1.0	0.48	1.3
I1	Island Peak	5300	02/05/98	n.d.	n.d.	1.0	7.6	40.3	0.80	9.7	0.84	1.4	23.4
I2	Island Peak	5700	02/05/98	n.d.	n.d.	1.8	2.4	2.2	2.0	1.0	0.37	1.5	9.3
I3	Island Peak	6100	02/05/98	n.d.	n.d.	2.5	6.3	5.2	1.7	6.3	1.2	0.74	5.1

n.d. = non determinato

DL = Limite di rilevabilità

zione dei dati di cloruro, sodio, ammonio, potassio e calcio, maggiormente soggetti ad inquinamento sia per deposito di particolato (calcio) e assorbimento di gas (ammonio) che a causa della manipolazione dei campioni (cloruro, sodio e potassio).

Nei campioni (tab. 1), il pH è compreso tra 5.68 e 6.47 unità di pH; questi valori si riferiscono ai soli campioni di neve fresca raccolti nella stagione post-monsoonica 1998, per i quali l'analisi è stata effettuata al Laboratorio Piramide, a una quota poco differente da quella dei punti di raccolta. Per i restanti campioni, giunti direttamente in Italia, non è stato possibile misurare il pH poiché la variazione dovuta al diverso equilibrio con l'anidride carbonica al livello del mare rende i dati non confrontabili (Legrand & *alii*, 1987). Non era infatti disponibile, nei laboratori italiani, un sistema per lo scongelamento e la misura dei campioni in atmosfera inerte.

La conducibilità è compresa tra 1.21 e 2.07 mS cm^{-1} , i valori tendono ad essere inferiori con l'aumento della quota. I valori trovati per i campioni di neve raccolti nel 1992 al Monte Everest e nel 1994 sul Ghiacciaio Changri Nup cadono nello stesso intervallo, ma è meno evidente una correlazione con la quota (Valsecchi & *alii*, 1999).

La somma dei cationi supera sempre la somma degli anioni per circa il 35%: poiché il pH non è alcalino, si può escludere un'elevata presenza di carbonati e quindi la differenza ionica può essere attribuita alla presenza di acidi

TABELLA 2 - Media e deviazione standard percentuale (RSD%) dei bianchi di campo per ogni zona di campionamento (concentrazioni in $\mu\text{eq l}^{-1}$)TABLE 2 - Mean value and percent standard deviation (RSD%) about field blanks for every sample site (concentration values in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

Zona di campionamento	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Lobuche ridge								
N	5	5	5	5	5	5	5	5
Media	0.74	0.03	0.06	0.62	0.35	0.27	0.07	0.98
RSD%	55	123	41	42	61	70	54	62
Kongma-La valley								
N	3	3	3	3	3	3	3	3
Media	0.45	0.01	0.06	0.51	0.30	0.15	0.05	1.1
RSD%	41	53	30	68	97	77	37	18
Ev-K ² -CNR-Pyramid								
N	2	2	2	2	2	2	2	2
Media	0.69	0.02	0.06	0.67	0.27	0.22	0.07	1.7
RSD%	70	90	49	67	79	96	57	92
Changri Nup valley								
N	5	5	5	5	5	5	5	5
Media	0.42	0.01	0.06	0.33	0.18	0.14	0.07	0.84
RSD%	43	21	9	37	68	70	48	18
Island Peak								
N	4	4	4	4	4	4	4	4
Media	0.72	0.05	0.06	0.48	0.16	0.32	0.06	0.43
RSD%	55	98	59	53	39	38	38	16

N = numero di campioni

organici, sia di origine naturale, sia derivanti dal rilascio dei contenitori. Non è stata possibile l'analisi degli acidi organici poiché il campionamento è stato effettuato in contenitori di polietilene. L'alcalinità non è stata misurata perché i valori massimi attesi (alcalinità calcolata dalla differenza tra anioni e cationi) sono quasi sempre inferiori al limite di rivelabilità (10 meq/l) del metodo tradizionale per titolazione con due punti finali (Tartari & Mosello, 1997).

Sodio e cloruro sono gli ioni che in media presentano le concentrazioni più elevate; sono anche molto ben correlati tra loro ($R^2=0.931$) e possono quindi essere attribuiti ad una sorgente comune. Il rapporto Na/Cl è compreso tra 0.705 e 1.319, con una media di 0.963, vicina al rapporto tipico dell'acqua di mare (0.86); queste due specie costituiscono un riferimento per l'identificazione della sorgente monsonica che porta un forte contributo marino (Valsecchi & *alii*, 1999).

La composizione ionica percentuale nelle diverse aree di campionamento è mostrata nei grafici riportati in figura 2.

Esiste una buona correlazione anche tra solfato e calcio ($R^2=0.834$), specie che possono essere messe in relazione con una sorgente continentale, con il contributo dominante di polveri provenienti dai deserti dell'Asia Centrale. Particolarmente elevate sono le concentrazioni del campione A (5700 m) e della serie Island (periodo premonsonico). Le elevate concentrazioni di questi ioni nei campioni pre-monsonici, già rilevate da Jenkins & *alii* (1987) nell'area del Monte Everest, avvalorano l'ipotesi di una provenienza continentale di queste polveri, in quanto, in questo periodo prevale una circolazione locale con alcune inclusioni di venti geotropici da Nord-Est che portano aria continentale fredda e secca (Bertolani & *alii*, 2000).

I solfati di origine non marina sono stati calcolati dalla formula:

$$nssSO_4^{2-} = SO_4^{2-} - (0.121 \cdot Na^+)$$

utilizzando il sodio come specie di riferimento per la sorgente marina. In presenza di una sorgente di sodio crostale può essere utile calcolare il contributo dei solfati non marini dalle concentrazioni di cloruro. Nel nostro caso, i dati calcolati mediante il sodio o il cloruro sono assolutamente identici, confermando così l'ipotesi che questi ioni possano essere utilizzati come traccianti di un contributo monsonico di origine marina. I valori di $nssSO_4$ sono compresi tra 0.045 e 0.62 meq/l per tutti i campioni di neve fresca, con l'eccezione del campione A che presenta un valore di 2.87 meq/l, rappresentando così una situazione meteorologica anomala rispetto agli altri campioni.

Significativa è anche la correlazione tra magnesio e potassio ($R^2=0.884$), con un contenuto di potassio quattro volte superiore a quello di magnesio.

Ammonio e nitrato non presentano alcuna correlazione, facendo così scartare l'ipotesi di un contributo da aerosol. L'ammonio presenta inoltre una variabilità molto elevata, che può essere attribuita al contributo gassoso post-deposizionale di ammoniaca emessa dalla vegetazione stessa della morena: è assente in alcuni campioni e arriva a concentrazioni superiori a 7 meq/l nel campione B,

raccolto infatti su una morena erbosa. Il nitrato mostra invece spiccate differenze nelle diverse zone dove sono stati effettuati i campionamenti; in particolare le concentrazioni relative al Ghiacciaio Changri Nup sono significativamente più elevate di tutte le altre in valore assoluto (comprese tra 1.09 e 1.63 meq/l), e inoltre rappresentano una percentuale significativa (49%) del totale degli ioni in questa zona (fig. 2).

Campioni di ghiaccio

I risultati delle analisi chimiche relative ai campioni di ghiaccio dei seracchi sono riportati nelle tabelle 3 (Changri Nup) e 4 (Campo base Everest); sono mostrati inoltre i valori delle grandezze statistiche che descrivono la distribuzione dei dati.

Le misure di pH e conducibilità non sono state effettuate perché, per la maggiore difficoltà nel campionamento di ghiaccio da un seracco rispetto a quello della neve, si è prelevato una quantità ridotta di materiale per ogni strato campionato. Come detto in precedenza, le analisi di pH e conducibilità dovrebbero essere condotte entro un piccolo dislivello di quota dal sito di campionamento e non sono state effettuate sulla stessa quantità di materiale per problemi di contaminazione: l'analisi cromatografica è stata considerata prioritaria.

La somma dei cationi supera abbondantemente la somma degli anioni: in entrambi i seracchi gli anioni costituiscono il 27% della somma ionica totale e i cationi sono il 73%. Tale differenza può essere attribuita alla presenza di acidi organici o di carbonati.

La somma ionica totale rivela una notevole differenza tra i due punti di prelievo dei campioni: nel seracco del Changri Nup varia da 7.78 meq/l a 35.24 meq/l, con una media di 18.73 meq/l; nel seracco del Ghiacciaio Khumbu il valore minimo è 16.44 meq/l, mentre quello massimo è 52.96 meq/l, con una media di 32.39 meq/l. Questo dato rispecchia quello già emerso dall'analisi della composizione ionica della neve, da cui si è evidenziato che proprio la Valle del Changri Nup presenta le più basse concentrazioni ioniche totali di tutta la Valle del Khumbu.

Gli ioni più diffusi, come nelle nevi, sono cloruro e sodio, che rappresentano il 96% degli anioni e il 45% dei cationi nel seracco Changri Nup, l'87% e il 41% nel seracco del Khumbu. I due ioni sono scarsamente correlati, tranne che negli strati invernali dove il loro rapporto molare è prossimo all'unità. Presentano concentrazioni considerevoli anche il calcio e il potassio, che rappresentano il 18% (Ca) e il 19% (K) della somma ionica totale del seracco del Khumbu, il 19% (Ca) e il 14% (K) in quello del Changri Nup.

Il nitrato, in contrasto con i dati ottenuti per la neve, è pressoché assente nel ghiaccio del Changri Nup, mentre presenta concentrazioni significative in quello in prossimità del Campo base dell'Everest; l'ammonio costituisce il 5% (Campo base Everest) e il 6% (Changri Nup) della somma ionica totale.

Infine il solfato in entrambi i casi è presente in concentrazioni piuttosto basse.

TABELLA 3 - Analisi chimiche dei campioni del seracco del Ghiacciaio Changri Nup (concentrazioni in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

TABLE 3 - Chemical analysis about Changri Nup Glacier serac samples (concentration values in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

Strato	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1MON	3.7	<DL	0.14	4.8	<DL	1.8	0.83	4.5
1INV	2.5	<DL	0.01	5.9	0.62	2.7	0.33	2.1
2MON	6.1	<DL	0.02	9.4	4.44	4.5	0.76	4.5
2INV	7.6	<DL	0.11	8.7	0.81	3.8	1.07	2.8
3MON	6.4	<DL	0.01	6.5	1.15	2.7	0.42	2.1
3INV	8.4	0.22	0.05	9.4	2.49	3.9	0.34	3.1
4MON	4.7	<DL	0.03	5.6	1.15	2.3	0.22	2.7
4INV	6.5	<DL	0.03	7.5	0.75	3.3	0.38	3.5
5MON	5.0	<DL	0.03	5.8	1.86	2.4	0.20	2.3
5INV	3.9	<DL	0.03	4.2	0.26	1.7	0.24	2.4
6MON	5.9	<DL	0.03	6.6	2.42	2.7	0.33	3.1
6INV	11.1	<DL	0.03	12.6	4.56	5.3	0.50	4.1
7MON	4.3	<DL	0.02	6.0	<DL	2.7	0.40	3.3
7INV	5.2	<DL	0.02	7.9	1.02	3.8	0.33	5.3
8MON	9.6	<DL	0.03	11.0	2.62	5.2	0.48	6.6
8INV	9.3	<DL	0.03	11.0	2.25	5.0	0.57	5.3
9MON	3.2	<DL	0.09	3.6	0.06	1.2	0.26	4.3
9INV	3.2	<DL	0.34	3.8	<DL	1.3	0.25	2.8
10MON	3.6	<DL	0.18	3.9	<DL	1.4	0.25	3.5
10INV	4.5	<DL	0.20	4.9	<DL	1.5	0.26	3.7
11MON	3.5	<DL	0.18	3.9	0.60	1.4	0.26	2.5
11INV	3.1	<DL	0.29	4.9	<DL	1.9	0.26	3.4
12MON	3.3	0.04	1.99	4.9	1.25	2.2	0.29	3.1
12INV	2.9	<DL	0.31	3.9	<DL	1.0	0.20	2.0
13MON	3.6	<DL	0.04	3.5	0.03	1.8	0.23	3.1
13INV	1.5	<DL	0.04	1.8	0.07	1.0	0.24	3.4
14MON	1.2	<DL	0.04	1.8	0.25	0.7	0.13	2.5

DL = Limite di rilevabilità

TABELLA 4 - Analisi chimiche dei campioni di ghiaccio del seracco al Campo base Everest (concentrazioni in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

TABLE 4 - Chemical analysis about ice sample of Everest base Camp (concentration values in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

Strato	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1MON	10.8	<DL	0.40	13.6	<DL	9.06	1.34	9.6
1INV	7.1	0.46	0.15	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2MON	11.8	1.01	0.61	16.4	3.83	10.48	1.34	11.0
2INV	9.0	0.48	0.35	11.7	1.43	7.23	0.98	5.5
3MON	2.7	0.09	0.07	5.9	1.06	3.65	0.61	2.9
3INV	10.4	0.16	0.23	10.9	3.33	7.04	0.77	3.2
4MON	7.3	0.53	0.51	9.8	2.25	5.84	0.98	4.6
4INV	7.4	0.35	0.01	8.8	1.95	5.32	0.92	8.6
5MON	4.4	<DL	0.02	4.5	<DL	2.99	1.46	8.8

n.d. = non determinato

DL = Limite di rilevabilità

DISCUSSIONE

Campioni di neve

Se si osservano i valori assoluti (tab. 1) e relativi (fig. 2) della composizione ionica della neve campionata, si osserva che il contributo maggiore alla composizione chimica della neve e del ghiaccio di questa regione è dato dagli ioni di origine marina, in particolare sodio e cloruro; un'interessante eccezione è l'area del Ghiacciaio Changri Nup dove, probabilmente, la conformazione della valle determina una particolare circolazione atmosferica che si traduce in una differente composizione delle deposizioni. Il rapporto molare Na/Cl è stato utilizzato per identificare il contributo marino al contenuto chimico della neve (Wake & *alii*, 1990). Il rapporto medio di 1,1, caratteristico della neve studiata in questo lavoro, è simile a quello delle altre regioni dell'Asia centrale ed è poco superiore a quello trovato nell'acqua di mare (0,86). Si può perciò supporre un arricchimento parziale in sodio per trasporto di particolato di origine terrestre proveniente dai depositi evaporitici a nord del Tien Shan e del Bogda Shan (Williams & *alii*, 1992; Wake & *alii*, 1992).

Il solfato non marino presente può essere legato alle emissioni antropogeniche del subcontinente indiano, trasportate all'Himalaya dalla circolazione monsonica (Wake & *alii*, 1990), ma l'alta correlazione tra calcio e solfato ($R^2=0.83$) indica una possibile sorgente terrestre continentale da particolato ricco di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) proveniente da aree desertiche dell'Asia centrale (Deserto del Gobi).

La buona correlazione tra magnesio e potassio ($R^2=0.88$) porta ad ipotizzare anche per questi ioni una sorgente comune di origine terrestre, poiché entrambi mostrano un rapporto K/Na e Mg/Na maggiore di quello trovato in acqua di mare (Nijampurkar & *alii*, 1993).

Un discorso a parte merita il nitrato, poiché è una specie a prevalente origine antropogenica, e che, come abbiamo visto, non presenta un'evidente contaminazione dovuta a manipolazione dei campioni.

I valori di questo ione nei campioni di neve del periodo post-monsonico risultano in genere molto bassi, a livello di quelli misurati in campioni di neve dell'Antartide interna (Legrand, 1987; Whitlow & *alii*, 1992); nell'area del Ghiacciaio Changri Nup si raggiungono le concentrazioni più elevate, superiori anche a quelli di cloruro e sodio, ioni dominanti nelle altre aree.

Dai risultati delle analisi chimiche dei campioni di neve emergono differenze nella composizione ionica delle diverse aree in cui sono stati raccolti i campioni. Se confrontiamo queste differenze con l'orografia della zona e con i dati meteorologici registrati dalla stazione del Laboratorio Piramide, gestita dal CNR IRSA (Stravisi & *alii*, 1998; Tartari & *alii*, 1998; Bertolani & *alii*, 2000), si può dedurre che la circolazione atmosferica locale agisce sulla redistribuzione delle masse d'aria e influenza la composizione delle precipitazioni.

L'andamento giornaliero delle precipitazioni e dei venti nella stagione monsonica e post-monsoonica suggerisce

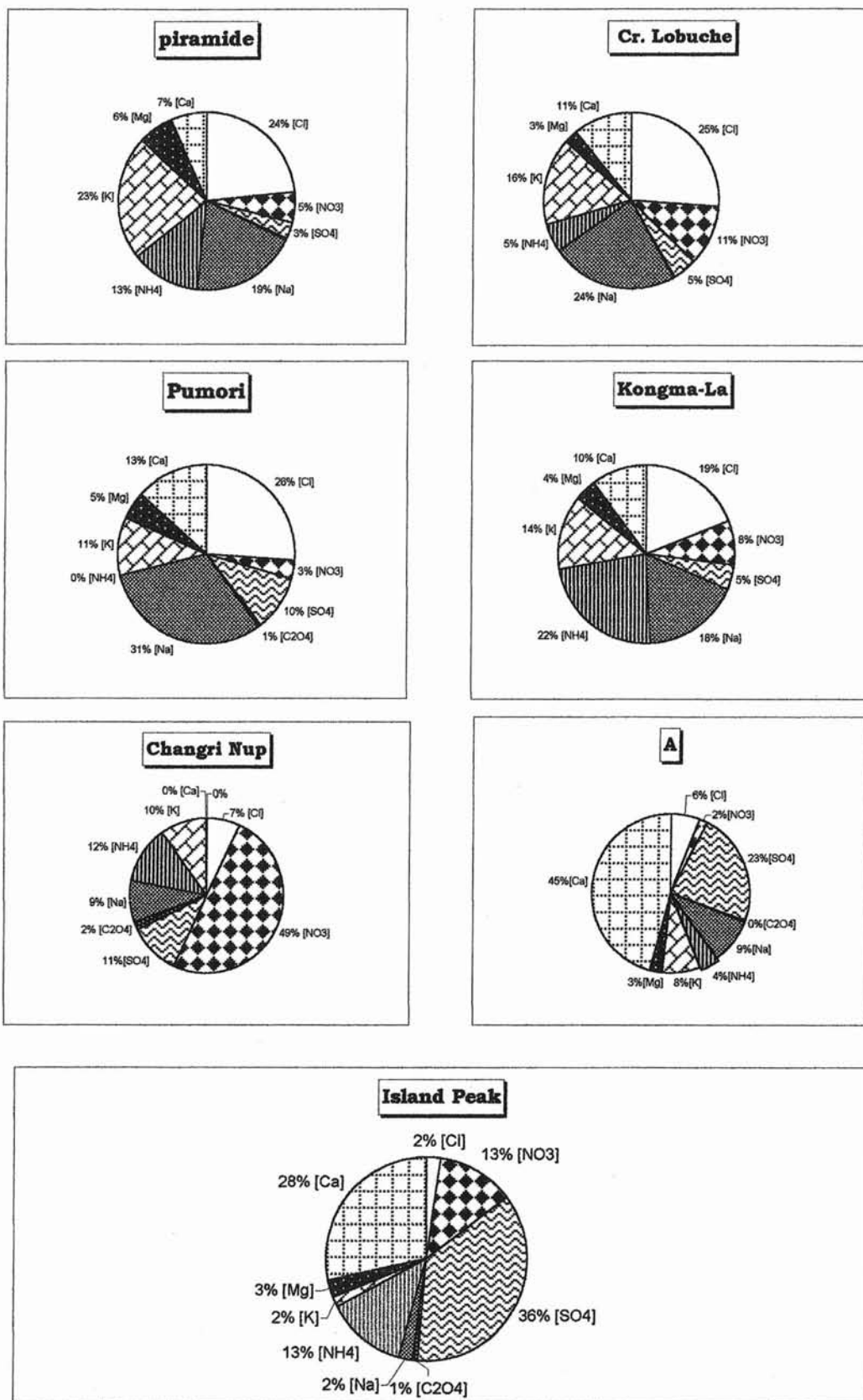


FIG. 2 - Composizione ionica percentuale nelle diverse aree di campionamento.

FIG. 2 - Percent ionic composition in the different sampling sites.

sce che le precipitazioni siano legate più a fenomeni locali che ai movimenti a grande scala delle masse d'aria, in quanto i massimi di precipitazione sono registrati in corrispondenza dell'alba e del tramonto, quando si risente maggiormente dei gradienti termici locali. La circolazione atmosferica locale è anche responsabile delle differenze trovate nella composizione chimica delle deposizioni nelle varie aree dove è stato effettuato il campionamento. In tutte le zone direttamente esposte al flusso monsonico la somma ionica totale è maggiore e prevalgono le specie di origine marina (sodio e cloruro). Nei campioni raccolti sul ghiacciaio della Valle Changri Nup, che si trova sottovento rispetto alla direzione del monsone, la somma ionica è molto inferiore e in percentuale risulta più elevato il tenore di nitrato (figura 2). Questa valle, orientata trasversalmente, probabilmente non riceve precipitazioni monsoniche che sono causate da venti che hanno direzione meridiana perché è protetta dalla cresta di Lobuche, sulla quale si scarica l'umidità delle masse d'aria monsoniche ancora presente a questa quota. I valori minimi di calcio, pari a quelli riscontrati nei bianchi di campo, indicano che anche i contributi settentrionali sono minimi, poiché questa valle è protetta a nord dalla cresta principale che separa il Tibet dal versante meridionale dell'Himalaya. Le deposizioni che interessano la Valle del Changri Nup possono essere quindi attribuite alla sola brezza di valle mattutina, che percorrendo la Valle del Khumbu trasporta verso Nord gli strati più bassi dell'atmosfera, relativamente carichi di emissioni antropogeniche e biogeniche derivanti dalle attività rurali (agricoltura, allevamento, combustione di legna e di sterco animale), che risultano intense nella valle soprattutto nel periodo estivo (Vivarelli & alii, 1991). Anche l'abbondanza relativa del nitrato è quindi da attribuire alla morfologia della Valle del Changri Nup, che convoglia i venti locali che trasportano precursori di nitrato, quali ossidi di azoto o acido nitrico gassoso, in grado di assorbirsi sulla neve fresca (Dominé & alii, 1995; Sommerfeld & alii, 1998), derivanti dalle attività rurali dei villaggi del Solu Khumbu, nei quali infatti sono stati misurati livelli molto elevati di smog e particolato atmosferico, dovuto soprattutto alla combustione di legna, fino a 3900 m (Davidson & alii, 1986).

Questa ipotesi, per essere confermata, richiederebbe rilievi meteorologici in questa valle, in grado di evidenziare l'eventuale assenza del massimo pomeridiano delle precipitazioni in questa valle laterale, oltre ad un volume inferiore di deposizione totale rispetto a quanto rilevato presso il Laboratorio Piramide.

Campioni di ghiaccio

Anche nei campioni di ghiaccio gli ioni più diffusi sono il sodio e il cloruro, che sono anche gli ioni meno mobili nel ghiaccio: la loro presenza in concentrazioni elevate è dovuta al massiccio apporto di aria marina durante il periodo monsonico, ma il fatto che la percentuale rispetto agli altri ioni sia predominante è sicuramente accentuata dai processi post-deposizionali e dalla segregazione degli ioni nel ghiaccio. Nonostante il nitrato sia uno ione che

presenta uno dei più elevati coefficienti di diffusione nel ghiaccio (Dominé & alii, 1995; Sommerfeld & alii, 1998), esso presenta concentrazioni significative nel seracco del Ghiacciaio Khumbu (tab. 4); invece nel seracco Changri Nup (tab. 3), il nitrato è inferiore al limite di rivelabilità nella maggior parte degli strati, a differenza di quanto riscontrato nella neve. L'elevato tenore di nitrato nel primo seracco è giustificato dalla sensibile pressione antropica al Campo base dell'Everest, che è raggiunto ogni anno da centinaia di spedizioni che quivi si accampano per alcune settimane. La Valle del Changri Nup è isolata, difficilmente raggiungibile, relativamente lontana dalle vette più alte, non è quindi quasi mai meta dei frequentatori della Valle del Khumbu e rimane così estranea al flusso diretto di inquinanti che questi portano.

Sia nei campioni del seracco Changri Nup, sia in quelli del Campo base Everest, non emerge un andamento stagionale della concentrazione degli ioni. Il fatto è probabilmente dovuto alla tipologia di ghiaccio scelta per il campionamento: la parete di un seracco fa parte infatti della zona di ablazione del ghiacciaio ed è esposta al vento e alla radiazione solare. La deposizione e la rimozione di particelle, operate dall'azione del vento determinano una uniformazione degli strati; inoltre l'intensità della radiazione può provocare una parziale fusione della superficie esposta: la percolazione dell'acqua di fusione trascina gli ioni cancellando le differenze tra strati monsonici e invernali.

Per trovare ghiaccio non soggetto a fenomeni di fusione e rigelo a basse latitudini, è necessario salire almeno sopra i 5700 m: al di sotto le precipitazioni estive possono cadere anche in forma liquida e la copertura nevosa subisce processi di fusione e scorrimento dell'acqua di fusione (Steiniger & alii, 1993).

CONCLUSIONI

Questo lavoro ha permesso di ricavare interessanti informazioni sulla composizione chimica delle deposizioni nell'area del Monte Everest.

Il contributo principale alla composizione della maggior parte dei campioni raccolti nella stagione post-monsoonica è dato dalla sorgente marina, che testimonia l'importanza del trasporto a lunga distanza del monsone estivo che spira da Sud-Ovest. Nei campioni relativi alla stagione pre-monsoonica sono invece risultati rilevanti i contenuti di calcio e solfato, che indicano una sorgente terrestre (particolato ricco di gesso), proveniente dalle zone aride dell'Asia centrale.

Lo studio ha messo in luce la particolarità della valle laterale del Changri Nup, dove le deposizioni presentano una concentrazione ionica totale notevolmente inferiore rispetto a tutti gli altri campioni, e nella cui composizione percentuale domina lo ione nitrato, probabilmente derivante dalle attività rurali della Valle del Khumbu, piuttosto intense nel periodo estivo. L'arricchimento relativo in nitrato è determinato dalla conformazione orografica della valle che, essendo orientata perpendicolarmente al flusso monsonico, non riceve precipitazioni determinate dal

movimento sinottico delle masse d'aria, ma prevalgono i venti a scala locale.

Una campagna di misure meteorologiche nella Valle del Changri Nup durante il periodo estivo dovrebbe evidenziare l'assenza delle precipitazioni pomeridiane, caratteristiche della stagione monsonica e la sola presenza di quelle mattutine, dovute alla brezza di valle che porta il contributo antropogenico, poiché coinvolge solo gli strati più bassi dell'atmosfera. Se questa ipotesi fosse confermata, la Valle del Changri Nup, poiché non influenzata dal trasporto a lungo termine del monzone, si candida come area ideale per lo studio dei livelli di fondo della troposfera continentale.

L'obiettivo dello studio delle serie di campioni di ghiaccio prelevate dagli strati di due seracchi sui ghiacciai Khumbu e Changri Nup doveva essere la valutazione della variazione temporale del contenuto chimico delle deposizioni. Dai risultati non è emerso nessun andamento stagionale nella composizione chimica degli strati, in quanto i processi post-deposizionali hanno determinato una uniformazione degli strati di ghiaccio rimescolando le informazioni su vari anni, rendendo impossibile la ricostruzione delle successioni cronologiche. Il contenuto chimico dei campioni di ghiaccio ha però evidenziato una differenza nei due siti di prelievo: nonostante il nitrato sia uno degli ioni più mobili nel ghiaccio, esso presenta un contenuto significativo nel seracco del Ghiacciaio Khumbu, mentre è assente negli strati della fronte bianca del Ghiacciaio Changri Nup. Questa differenza è dovuta all'elevata presenza di turisti e alpinisti presso il Campo base dell'Everest, mentre la Valle del Changri Nup, è raramente meta dei frequentatori della Valle del Khumbu e rimane così estranea al flusso di inquinanti che questi producono.

BIBLIOGRAFIA

- BERTOLANI L., BOLLASINA M., VERZA G.P. & TARTARI G. (2000) - *Pyramid Meteorological Station, Summary Report*, Ev-K²-CNR Committee, Milano.
- CICCIOLI P., BRANCALEONI E., CECINATO A., SPARAPANI R. & FRATTONI M. (1993) - *Identification and determination of biogenic and anthropogenic volatile organic compounds in forest areas of Northern and Southern Europe and a remote site of the Himalayan region by high-resolution gas chromatography-mass spectrometry*, Journ. Chromatogr., 643, 55-69.
- DAVIDSON C.I., LIN S., OSBORN J.F., PANDEY M.R., RASMUSSEN R.A. & KHALIL M.A.K. (1986) - *Indoor and outdoor air pollution in the Himalayas*, Environ. Sci. Technol. 20, 561-567.
- DOMINE F. & THIBERT E. (1995) - *Relationship between atmospheric composition and snow composition for HCl and HNO₃*, In: Tonnesen K.A., Williams M.W. & Tranter M., *Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchment*, IASH Publ. 228, 3-10.
- EMEP (1996) - *Manual for sampling and chemical analysis*, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller, Norway.
- GALASSI S., VALSECCHI S. & TARTARI G.A. (1997) - *The distribution of PCB's and chlorinated pesticides into connected Himalayan lakes*, Water Air & Soil Pollut., 99, 717-725.
- JENKINS M.D., DREVER J.I., REIDER R.G. & BUCHANAN T. (1987) - *Chemical composition of fresh snow on Mount Everest*, Journ. Geophys. Res., 92, 10999-11002.
- LEGRAND M. (1987) - *Chemistry of Antarctic snow and ice*, Journ. Phys., 48, C1,77- C1,86.
- LEGRAND M., ARISTARAIN A. & DELMAS R.J. (1982) - *Acid titration of polar snow*, Anal. Chem., 54, 1336-1339.
- MAYEWSKI P.A., LYONS W.B. & AHMAD N. (1983) - *Chemical composition of a high altitude fresh snowfall in the Ladakh Himalayas*, Geophys. Res. Lett., 10, 105-108.
- MAYEWSKI P.A., LYONS W.B., SPENCER M.J. & CLAYTON J.L. (1986) - *Snow chemistry from Xixabangma Peak, Tibet*, J. Glaciol. 32, 542-543.
- NIJAMPURKAR V.N., SARIN M.M. & RAO D.K. (1993) - *Chemical composition of snow and ice from Chhota Shigri glacier, Central Himalaya*, Journ. Hydrol. 151, 19-34.
- RAO Y.P. (1981) - *The climate of the Indian subcontinent*. In: Takahashi K. & Arakawa H. eds.: *Climates of Southern and Western Asia*, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, 67-182.
- SHRESTHA A.B., WAKE C.P. & DIBB J.E. (1997) - *Chemical composition of aerosol and snow in the high Himalaya during the summer monsoon season*, Atmos. Environ., 31, 2815-2826.
- SOMMERFELD R.A., KNIGHT C.A. & LAIRD S.K. (1998) - *Diffusion of HNO₃ in ice*, Geophys. Res. Lett., 25 (6), 935-938.
- STEINEGGER U., BRAUN L.N., KAPPENBERGER G. & TARTARI G. (1993) - *Assessment of annual snow accumulation over the past 10 years at high elevations in the Langtang region*, in *Snow and Glacier Hydrology*, Proceeding of the Kathmandu Symposium, November 1992, IAHS Publ. n° 218.
- STRAVISI F., VERZA G.P. & TARTARI G. (1998) - *Meteorology and Climatology*. In: Tartari G., Baudo R. & Munawar M. (Eds). *Top of the World Environment Research*. World Monograph Series, SPB Academic Publishing, Amsterdam, 101-122.
- TARTARI G., BERTOLANI L. & VERZA G.P. (1998) - *Meteorological data at the Pyramid Observatory Laboratory*. In: Lami A. & Giussani G. (eds.), *Limnology of high altitude lakes in the Mt. Everest Region (Nepal)*, Mem. Ist. It. Idrobiologia, 57, 23-40.
- TARTARI G.A. & MOSELLO R. (1997) - *Metodologie analitiche e controlli di qualità nel laboratorio chimico dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, Documenta Ist. It. Idrobiologia, 60, 1-160.
- VALSECCHI S., SMIRAGLIA C., TARTARI G. & POLESSELLO S. (1999) - *Chemical composition of Monsoon deposition in the Everest region*, Sci. Total Environ., 226, 187-199.
- VIVARELLI F., SANTACHIARA G. & PRODI F. (1991) - *Characteristic of atmospheric particles (airborne and in snowpack) at Khumbu glacier in the Nepalese Himalayas*. Ev-K²-CNR Project, in: *Proceeding of the European Aerosol Conference*, Karlsruhe (Germany), 16-20 September 1991.
- WAKE C.P., MAYEWSKI P.A. & SPENCER M.J. (1990) - *A review of Central Asian glaciochemical data*, Ann. Glaciol., 14, 301-306.
- WAKE C.P., MAYEWSKI P.A., PING W., QINZHAO Y., JIANKANG H. & ZICHU X. (1992) - *Anthropogenic sulphate and Asian dust signals in snow from Tien Shan, northwest China*, Ann. Glaciol., 16, 45-52.
- WAKE C.P., MAYEWSKI P.A., ZICHU X., PING W. & ZHONGQIN L. (1993) - *Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers*, Geophys. Res. Lett., 20, 1411-1414.
- WHITLOW S., MAYEWSKI P.A. & DIBB J.E. (1992) - *A comparison of major chemical species seasonal concentration and accumulation at the South Pole and the Summit, Greenland*, Atmos. Environ., 26A, 2045-2054.
- WILLIAMS M.W., TONNESSEN K.A., MELACK J.M. & DAQING Y. (1992) - *Sources and spatial variations of the chemical composition of snow in the Tien Shan, China*, Ann. Glaciol., 16, 25-32.
- YASUNARI T. (1976) - *Seasonal weather variations in Khumbu Himal*, Seppyo., 39, 74-83.