

ROCK GLACIER RELITTI E ANTICA DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST NEL GRUPPO ADAMELLO PRESANELLA (ALPI CENTRALI)

Roberto Seppi¹, Alberto Carton² & Carlo Baroni³

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pavia

²Dipartimento di Geografia "G. Morandini", Università di Padova.

³Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa.

Corresponding author: R. Seppi <roberto.seppi@unipv.it>

RIASSUNTO: Seppi R. et al., *Rock glacier relict e antica distribuzione del permafrost nel Gruppo Adamello Presanella (Alpi Centrali)*. (IT ISSN 0394-3356, 2010).

L'antica e l'attuale quota del limite inferiore del permafrost nel Gruppo Adamello Presanella (Alpi Centrali) sono state definite utilizzando un catasto dei rock glacier. Il catasto, basato sull'esame di fotografie aeree e su rilievi di terreno, documenta la presenza di un totale di 216 *rock glacier*, 128 dei quali sono stati classificati come relitti. Le forme relitte hanno un corpo appiattito, una scarpata frontale poco ripida e sono caratterizzate dalla presenza di numerose cavità. Nella maggior parte dei casi la superficie è coperta da una densa vegetazione e la loro fronte raggiunge l'attuale limite superiore degli alberi. La distribuzione delle forme attive/inattive consente di stimare un limite inferiore del *permafrost* attualmente collocato a circa 2500 m s.l.m., una quota 430 m più elevata di quella suggerita dalle forme relitte. Nell'area studiata non esistono stime dell'età delle forme relitte basate su datazioni cronologiche, tuttavia è stato possibile confrontare la distribuzione dei *rock glacier* relitti con l'estensione dei ghiacciai durante il Tardoglaciale, utilizzando una cartografia ottenuta dalla distribuzione delle morene. Il confronto consente di stimare un'età posteriore allo stadio di Gschnitz per la maggior parte dei *rock glacier* relitti (87 su 128). Poiché, a scala regionale, il limite inferiore del permafrost discontinuo è collocato ad una quota che corrisponde con l'isotema media annua dell'aria di $-1/-2^{\circ}\text{C}$, la differenza di temperatura media annua che corrisponde alla differenza di quota della fronte tra *rock glacier* attivi/inattivi e relitti può essere stimata utilizzando il gradiente medio di temperatura dell'aria calcolato per questo gruppo montuoso, pari a $0,59^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. La differenza di quota delle fronti dei *rock glacier* coincide con una differenza di temperatura media annua di circa $2,5^{\circ}\text{C}$ e varia da circa $2,4^{\circ}\text{C}$ sui versanti esposti a N a circa $2,7^{\circ}\text{C}$ su quelli esposti a sud. Questi dati forniscono una stima della differenza di temperatura media annua dell'aria intercorsa tra il Tardoglaciale (quando i *rock glacier* attualmente relitti erano attivi) e il presente.

ABSTRACT: Seppi R. et al., *Relict rock glaciers and past permafrost distribution in the Adamello Presanella Group (Central Alps)*. (IT ISSN 0394-3356, 2010).

The current and the past lower limit of permafrost has been estimated in the Adamello Presanella Group (Central Alps, Italy) using a rock glacier inventory. The inventory was based on aerial photographs analyses and field surveys. In the inventory, a total of 216 rock glaciers have been reported and described, and 128 of these are regarded as relict landforms. These rock glaciers have a flat morphology, a gently sloping frontal scarp and a surface characterized by several cavities. In most cases their surface is covered by dense vegetation, and often their front reach the present tree line. The distribution of active/inactive landforms allows to estimate a lower limit of discontinuous permafrost presently located at about 2500 m a.s.l., an altitude 430 m higher than that suggested by the relict landforms. No chronological data exist in this region about the age of the relict rock glaciers. Nevertheless, a visual comparison with the Late Glacial extent of glaciers, as provided by a map obtained from the moraines geometry, allows to estimate an age no older than the Late Glacial Gschnitz stage for the most of them (87 on 128). Since the lower boundary of discontinuous permafrost is located at an altitude corresponding with the MAAT (Mean Annual Air Temperature) of $-1/-2^{\circ}\text{C}$, the difference in MAAT that coincides with the difference in elevation between the fronts of active/inactive and relict rock glaciers can be estimated using the vertical temperature lapse rate calculated for this mountain group ($0,59^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). The altitudinal difference between the fronts of active/inactive and relict rock glaciers coincides with a difference of about $2,5^{\circ}\text{C}$ in the MAAT. This difference reduces to about $2,4^{\circ}\text{C}$ on northern slopes and increases to about $2,7^{\circ}\text{C}$ on southern slopes. This data gave us an estimate of the MAAT difference between the Late Glacial (when the presently relict rock glaciers were active) and the present day.

Parole chiave: permafrost, rock glacier relitti, Tardoglaciale, Alpi italiane.

Keywords: permafrost, relict rock glaciers, Late Glacial, Italian Alps.

1. INTRODUZIONE

I *rock glacier* sono tra le più diffuse forme degli ambienti periglaciali alpini e rappresentano evidenti manifestazioni della presenza di *permafrost* discontinuo. Si originano a seguito della lenta deformazione di materiale detritico perennemente congelato e sono caratterizzati da particolari strutture superficiali quali rughe, solchi, cavità e contropendenze.

Il dibattito scientifico sull'origine di queste forme è ancora attuale e le diverse interpretazioni nascono da una duplice spiegazione dell'origine del ghiaccio conte-

nuto nei corpi detritici: se esso sia ghiaccio formatosi *in situ* per processi di aggradazione del *permafrost* o se invece sia essenzialmente ghiaccio di origine glaciale e quindi il *rock glacier* sia sostanzialmente un ghiacciaio coperto di detrito. I principali dati a supporto dell'origine glaciale di queste forme riguardano il rinvenimento in numerosi di essi di corpi di ghiaccio massivo i quali, secondo molti Autori americani (si veda ad esempio POTTER et al., 1998), non possono essere spiegati con processi di tipo periglaciale, ma sono il prodotto di un processo di metamorfismo della neve analogo a quello che si verifica sui ghiacciai. Numerose indagini hanno

riguardato il *rock glacier* di Galena Creek negli Stati Uniti (POTTER *et al.*, 1998; STEIG *et al.*, 1998), ma anche nelle Alpi italiane recenti osservazioni hanno dimostrato che in alcune forme riconducibili a *rock glacier* è presente ghiaccio di origine glaciale (KRAINER & MOSTLER, 2000; GUGLIELMIN *et al.*, 2004; RIBOLINI *et al.*, 2007).

Un tentativo di sintesi delle diverse interpretazioni sull'origine dei *rock glacier* è stato proposto da HAEBERLI (2000), secondo il quale, senza tenere conto dell'origine del ghiaccio contenuto nei depositi detritici, è comunque necessario che vi siano permanenti temperature negative nel suolo (*permafrost*) affinché si possano conservare per millenni masse di ghiaccio nei *rock glacier*. L'Autore afferma anche che molti degli equivoci sono nati da un'errata definizione di ghiacciaio e che spesso quelli che alla testata di molti *rock glacier* sono stati definiti ghiacciai (e che in seguito possono essere inglobati nel corpo del *rock glacier*), altro non sono che nevai semipermanenti o glacio-nevati, non costituiti da ghiaccio di origine sedimentaria e privi di una precisa condizione dinamica (trasferimento di massa da una zona di alimentazione a una di ablazione).

Secondo la classificazione di BARSCH (1996) possono essere distinti *active rock glacier* (contenenti ghiaccio e dotati di movimento), *inactive rock glacier* (contenenti ghiaccio ma non dotati di movimento) e *relict rock glacier* (privi di ghiaccio e completamente stabilizzati). I primi due, che hanno morfologie molto simili e sono spesso difficilmente distinguibili se non si dispone di misure che documentino l'effettivo movimento del deposito, sono stati raggruppati dallo stesso Autore nella categoria degli *intact rock glacier* (BARSCH, 1996). Tale categoria era stata in precedenza proposta da HAEBERLI (1985) ed è oggi largamente utilizzata. Nel presente lavoro è stata adottata la classificazione proposta da BARSCH (1996), distinguendo i *rock glacier* in due categorie: a. *rock glacier* attivi/inattivi; b. *rock glacier* relitti. Sono state utilizzate due sole categorie di forme, allo scopo di differenziare quelle che attualmente contengono *permafrost* (attive/inattive) da quelle che ne sono prive (relitte), indipendentemente dalle loro condizioni dinamiche.

La quota minima raggiunta dai *rock glacier* viene spesso utilizzata per stimare la quota del limite inferiore del *permafrost* discontinuo di una regione (BARSCH, 1996). La presenza di *rock glacier* relitti mette quindi in evidenza condizioni climatiche diverse da quelle attuali, durante le quali il limite inferiore del *permafrost* discontinuo si collocava a quote meno elevate rispetto al presente. Basandosi su questo concetto, una stima della quota dell'antico limite inferiore del *permafrost* può essere ottenuta da quella delle fronti delle forme relitte.

L'applicazione di questo metodo, tuttavia, deve tener conto di alcuni limiti. I *rock glacier*, infatti, conservano il *permafrost* in modo preferenziale, a causa del particolare regime termico che caratterizza il loro strato più superficiale, costituito da massi privi di matrice (tessitura di tipo *openwork*). Tali substrati, infatti, possono determinare un abbassamento della temperatura media annua della superficiale del suolo fino a 1÷4°C rispetto alle aree coperte da materiale sciolto ricco in matrice fine (HARRIS & PEDERSEN, 1998; JULIUSSEN & HUMLUM, 2008). Il ghiaccio contenuto in questi depositi può quindi essere localmente trasportato verso valle fino a 300 m più in basso rispetto alla quota media del limite infe-

riore del *permafrost* definita a scala regionale e rispetto alle condizioni ambientali che ne consentono l'esistenza (HARRIS & PEDERSEN 1998). È emerso, ad esempio, che nel Gruppo Adamello Presanella, i *rock glacier* attivi/inattivi, pur contenendo ghiaccio, potrebbero non essere più in equilibrio con l'attuale ambiente morfoclimatico (BARONI *et al.*, 2004). L'utilizzo dei *rock glacier*, tuttavia, consente di ottenere con una buona approssimazione una stima della diffusione spaziale del *permafrost* di una regione, anche se può indurre a sovrastimare la presenza (IMHOF *et al.*, 2000).

Il Gruppo Adamello Presanella è situato nel settore meridionale delle Alpi Centrali (45° 54'–46° 19' N; 10° 21'–10° 53' E) e si estende su una superficie superiore a 1100 km² (Fig. 1). Confina a N con il Gruppo Ortles Cevedale, a E con il Gruppo delle Dolomiti di Brenta e a W con le Alpi Orobie. Le cime più elevate del gruppo superano i 3500 m di quota.

Dal punto di vista climatico, l'area si trova in una fascia di transizione fra le Alpi meridionali, caratterizzate da precipitazioni elevate (fino a 1800÷2500 mm/anno), concentrate nelle stagioni primaverile e autunnale, e la zona interna, caratterizzata da un clima più continentale con precipitazioni concentrate nei mesi invernali e, generalmente, non superiori a 1000÷1200 mm/anno (SCHWARB *et al.*, 2001). Le precipitazioni medie annue per l'area studiata sono comprese tra un minimo di circa 800 mm nel settore settentrionale (stazione meteorologica di Ponte di Legno, 1200 m s.l.m.) a poco più di 1500 mm nel settore meridionale (stazione meteorologica di Bagolino, 800 m s.l.m.) (CERIANI & CARELLI, 2000). La temperatura media annua va da circa 8°C, poco sopra i 1200 m di quota, a circa 0°C ad una quota di poco superiore a 2500 m. Il gradiente termico verticale medio per il gruppo montuoso è pari a 0,59°C/100 m (BARONI *et al.*, 2004).

In questo lavoro vengono presentati i risultati del censimento dei *rock glacier* relitti del Gruppo Adamello Presanella e sono discusse le relazioni tra la loro distribuzione spaziale e l'antica presenza di *permafrost*.

2. METODI

Il censimento dei *rock glacier* dell'area in esame è stato effettuato mediante l'analisi di fotografie aeree e l'uso di ortofoto digitali. Le forme individuate, classificate come attive/inattive o relitte sulla base di numerose caratteristiche morfologiche diagnostiche, sono state digitalizzate in ambiente GIS, delimitandole con elementi geometrici di tipo poligonale. La descrizione e la definizione dei principali parametri morfometrici e delle caratteristiche geomorfologiche delle forme censite è stata effettuata tramite fotointerpretazione e interrogazione del GIS. Le informazioni ottenute sono state perfezionate con verifiche sul terreno.

Sono state classificate come relitte le forme caratterizzate da: a) morfologia complessivamente attenuata, con corpo appiattito e talvolta con strutture superficiali quali cavità chiuse e depressioni; b) fronte poco ripida; c) ingente copertura vegetale, spesso costituita da arbusti e alberi sparsi (Fig. 2); d) suoli evoluti in corrispondenza dell'affioramento di materiale fine. I massi sono caratterizzati da un elevato grado di alterazione, con spigoli arrotondati e superficie scabra per micro-

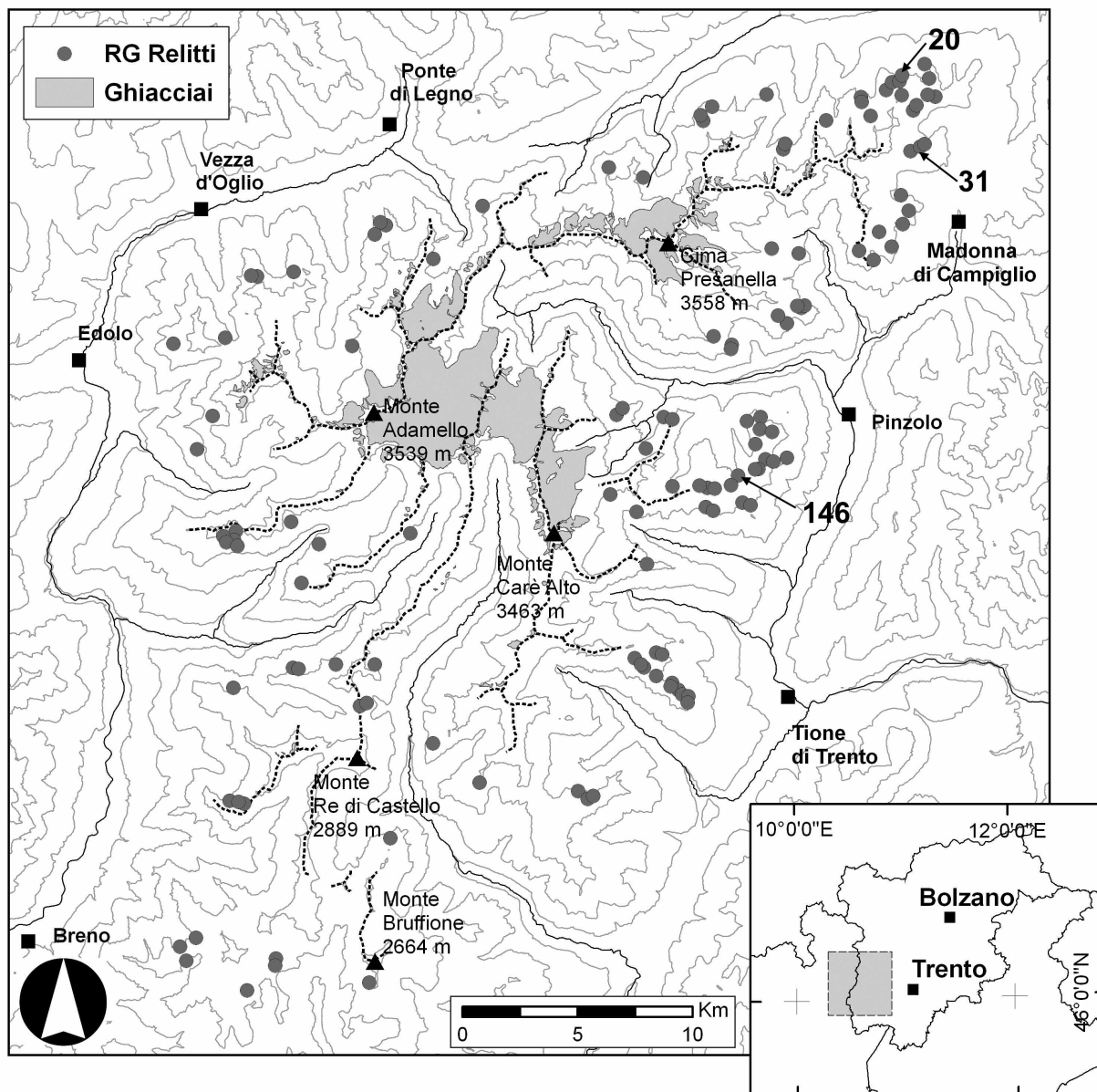


Fig. 1 - Inquadramento geografico del Gruppo Adamello Presanella e ubicazione dei rock glacier relitti. I numeri si riferiscono al Catasto dei rock glacier del Gruppo Adamello Presanella (BARONI *et al.*, 2004).

Geographical setting of the Adamello Presanella Group and location of the relict rock glaciers. Numbers refer to the rock glacier inventory of the Adamello Presanella Group (BARONI *et al.*, 2004).

morfoselezione. Non sembra costituire una caratteristica diagnostica valida per la distinzione dei *rock glacier* relitti il grado di colonizzazione dei massi da parte dei licheni crostosi, che può essere molto cospicua anche sui depositi attivi. Un'ingente copertura lichenica, ad esempio, è stata osservata su due *rock glacier* attivi sottoposti a ripetuti monitoraggi topografici che hanno mostrato tassi di spostamento orizzontale fino ad alcuni decimetri all'anno (SEPPI *et al.*, 2006).

Un tipico *rock glacier* relitto esistente nell'area studiata è presentato in Figura 3. Il settore centrale è caratterizzato da una topografia accidentata e concava, che mostra chiaramente la perdita di volume a seguito della fusione del ghiaccio interno. La superficie è inoltre caratterizzata dalla presenza di numerose cavità chiuse

dovute al collasso della massa detritica per fenomeni riconducibili al termocarsismo.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Nel Gruppo Adamello Presanella sono stati censiti in totale 216 *rock glacier*, 128 dei quali (59%) sono stati classificati come relitti (BARONI *et al.*, 2004; SEPPI, 2006). La percentuale di forme relitte è maggiore rispetto a quanto rilevato nelle Alpi Svizzere Occidentali (regione Bagnes-Hérémence), dove 109 forme su un campione totale di 239 (pari al 46%), sono relitte (LAMBIEL & REYNARD, 2001). In tutte le Alpi svizzere, su un campione di 741 *rock glacier*, 285 (pari al 38%) sono relitti (FRAUEN-

FELDER & KÄÄB, 2000). Nelle Alpi Austriache Orientali, al contrario, un campione di 1451 *rock glacier* è costituito da 1169 forme relitte, pari all'81% del totale (KRÄINER & MOSTLER, 2000). Per un confronto con l'intero versante alpino italiano ci si deve riferire al Catasto dei *rock glacier* delle Alpi Italiane (GUGLIELMIN & SMIRAGLIA, 1997). Dei 1594 *rock glacier* conteggiati in tale catasto, il 59% è stato classificato come inattivo e il 19% come attivo. I rimanenti sono stati considerati ad attività incerta (18%) o complessi (4%). In questo catasto sono stati adottati differenti criteri di classificazione delle forme, che sono state distinte in attive, inattive, ad attività incerta e complesse. Confrontando le caratteristiche diagnostiche utilizzate per classificare le forme inattive nel catasto di tutte le Alpi (copertura vegetale continua costituita da formazioni erbacee, arbustive e arboree, profilo longitudinale concavo, presenza di cavità chiuse, scarpata frontale poco ripida) con quelle adottate nel catasto del Gruppo Adamello Presanella, è possibile far corrispondere le forme inattive del primo con quelle classificate come relitte nel presente lavoro.

La superficie media dei *rock glacier* relitti del Gruppo Adamello Presanella è pari a 4,1 ha, la lunghezza media è di poco superiore a 290 m e la larghezza media è di circa 180 m. Si tratta prevalentemente di forme di tipo *tongue shaped* (89% del totale) e sono ubicati per lo più su versante (71% del totale). Molte forme relitte hanno la fronte più in basso del limite superiore della vegetazione arborea (Fig. 2), diversamente dai *rock glacier* attivi/inattivi, che sono ubicati in prevalenza nella fascia altimetrica della prateria alpina. Le forme relitte non mostrano relazioni con ghiacciai, glacio-nevati, nevai semipermanenti, ma alcune di esse sono in relazione con depositi glaciali presenti più a monte.

I 128 *rock glacier* relitti si collocano ad una quota media di poco superiore a 2100 m, con un intervallo di variazione compreso tra 1830 e 2560 m (Fig. 4). Il *rock glacier* relitto situato a più bassa quota ha la fronte a circa 1700 m s.l.m. I *rock glacier* attivi/inattivi sono collocati ad una quota media di circa 2550 m e sono compresi tra una quota minima di 2170 m e una massima di poco superiore ai 2900 m. Le forme relitte sono maggiormente rappresentate tra 2100 e 2200 m di quota ($n = 34$), ma risultano numerose anche tra 1900 e 2100 m e tra 2200 e 2300 m. Sono progressivamente meno rappresentate nelle fasce altimetriche superiori a 2300 m s.l.m. Le forme attive/inattive sono rappresentate prevalentemente nella fascia altimetrica compresa tra 2500 e 2600 m di quota, ma un considerevole numero di forme è presente anche nelle fasce altimetriche immediatamente superiori e inferiori. La fascia di sovrapp-

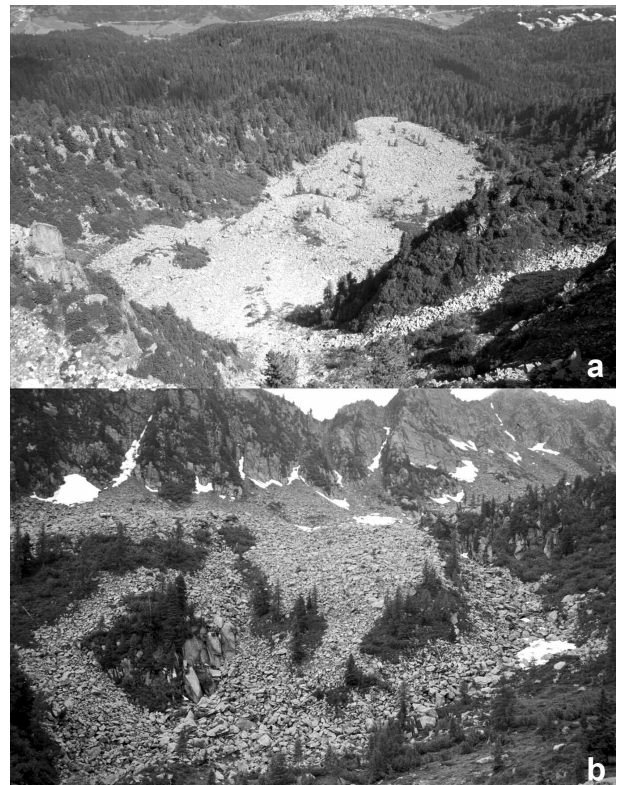


Fig. 2 - Esempi di due *rock glacier* relitti presenti nell'area studiata (a: n 20 di Fig. 1; b: n 31 di Fig. 1). La fronte supera l'attuale limite degli alberi.

Examples of two relict *rock glacier* in the study area (a: n 20 in Fig. 1; b: n 31 in Fig. 1). Their front is located below the local tree line.

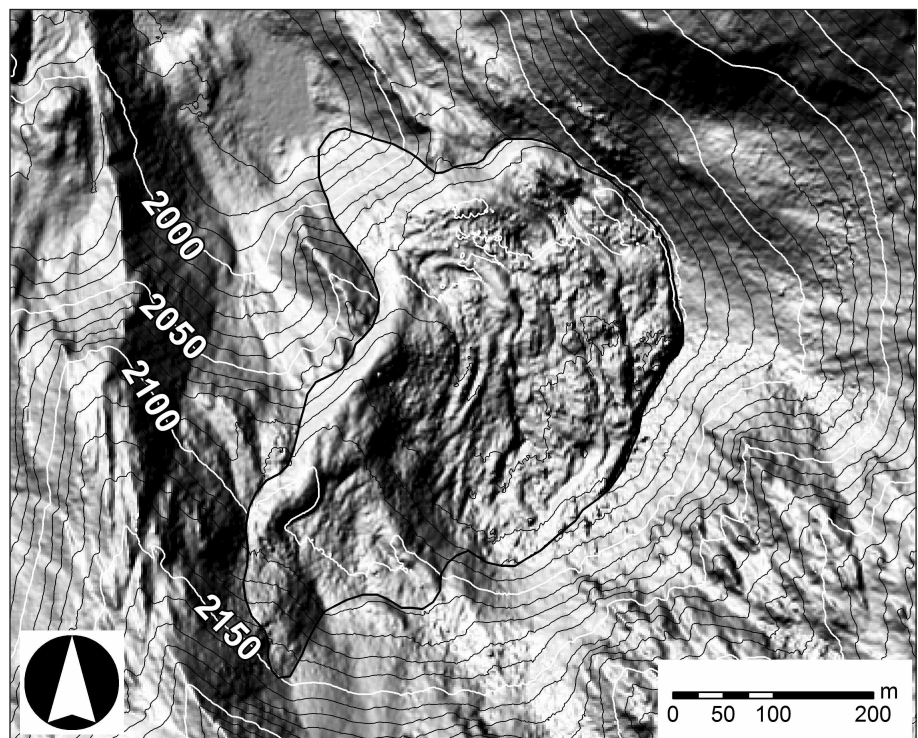


Fig. 3 - Topografia superficiale di un tipico *rock glacier* relitto dell'area di studio (n 146 di Fig. 1). La forma mostra numerose cavità dovute a processi di tipo termokarsico. (Elaborazione basata su un modello digitale del terreno fornito dalla Provincia Autonoma di Trento).

Surface topography of a typical relict *rock glacier* of the study area (n 146 in Fig. 1). The landform shows numerous thermokarst-like hollows.

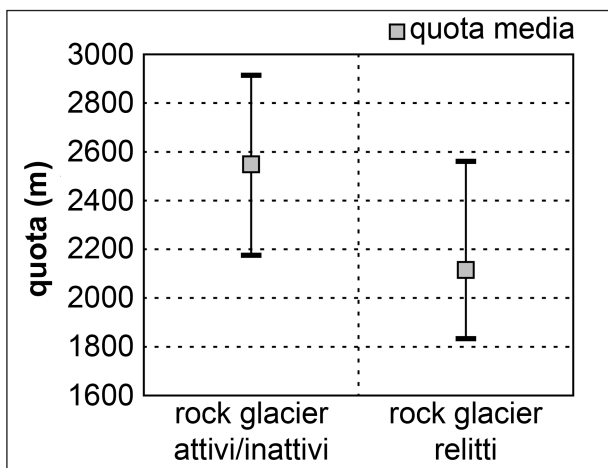


Fig. 4 - Intervallo di quota dei rock glacier attivi/inattivi e relitti.
Altitudinal range of active/inactive and relict rock glaciers.

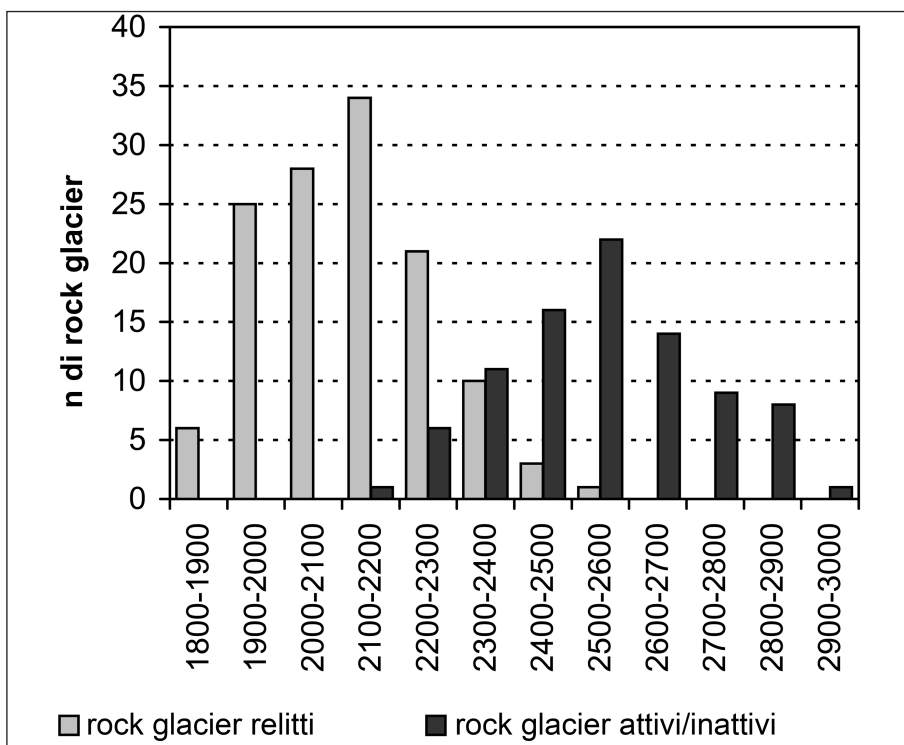


Fig. 5 - Numero di rock glacier attivi/inattivi e relitti suddivisi per fasce altimetriche.
Number of active/inactive and relict rock glacier in the different altitudinal belts.

Tab. 1 - Differenza di quota media della fronte dei rock glacier attivi/inattivi e relitti in funzione dell'esposizione.

Difference in average elevation of the front of active/inactive and relict rock glaciers in relation to the exposure.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
RG attivi/inattivi (quota media della fronte in m)	2569	2429	2588	2554	2584	2422	2433	2420
Numero di rock glacier	2	8	13	14	7	9	16	19
RG relitti (quota media della fronte in m)	1933	2051	2087	2041	2063	2089	2038	2007
Numero di rock glacier	1	26	29	11	13	15	23	10
Differenza di quota (m)	636	378	501	513	521	333	395	413

posizione tra forme attive/inattive e forme relitte è compresa tra 2100 e 2600 m di quota (Fig. 5).

In Tabella 1 sono mostrate le quote minime raggiunte dai rock glacier attivi/inattivi e relitti in rapporto all'esposizione del versante. Considerando globalmente le forme censite, la quota minima di quelle relitte si colloca circa 430 m più basso di quelle attive/inattive, con rilevanti differenze a seconda dell'esposizione del versante (Tab. 1). La differenza di quota è di poco più di 470 m per le forme collocate sui versanti meridionali (S, SE e SW) e di circa 450 m per quelle situate sui versanti settentrionali (N, NE e NW).

Il grafico di distribuzione dei rock glacier in funzione della quota della fronte e dell'esposizione mostra come la maggior parte di essi (sia attivi/inattivi che relitti) sia collocato su versanti esposti a NW, NE, E e W, mentre sono relativamente scarse le forme esposte a N e a S (Fig. 6). Questa distribuzione riflette principalmente l'orientamento dei maggiori assi vallivi del gruppo montuoso studiato, disposti in direzione nord-sud.

Numerose indagini effettuate nelle Alpi hanno messo in evidenza che i rock glacier attivi/inattivi hanno al massimo un'età di alcune migliaia di anni e si sarebbero formati nelle fasi più fredde e secche dell'Olocene. Datazioni ¹⁴C di forme attive effettuate nelle Alpi italiane hanno fornito età massime di circa 5000 anni BP (DRAMIS et al., 2003). I rock glacier relitti, invece, risalirebbero ai principali stadi del Tardoglaciale. In particolare, numerosi Autori hanno attribuito alle più antiche forme relitte di molte aree alpine un'età corrispondente alle fasi tardoglaciali di *Older Dryas* (Daun Auct., VAN HUSEN 1997), mentre le forme relitte più recenti sono state attribuite alla fase del *Younger Dryas* (Egesen Auct., VAN HUSEN, 1997) (KERSCHNER, 1980; KERSCHNER, 1985; SAILER & KERSCHNER, 1999; FRAUENFELDER & KÄÄB, 2000; FRAUENFELDER et al., 2001; LAMBIEL & REYNARD, 2001).

Confrontando la distribuzione dei rock glacier relitti del Gruppo Adamello Presanella con i limiti raggiunti dai ghiacciai nei principali stadi tardoglaciali forniti da CASTIGLIONI (1961), si può osservare che la maggior parte di essi (87 su 128) si trova nelle aree occupate dai ghiacciai nello stadio di Gschnitz e quindi si sarebbero sviluppati successivamente a questa fase del Tardoglaciale. Soltanto 10 rock glacier sono situati nelle aree occupate dai ghiacciai

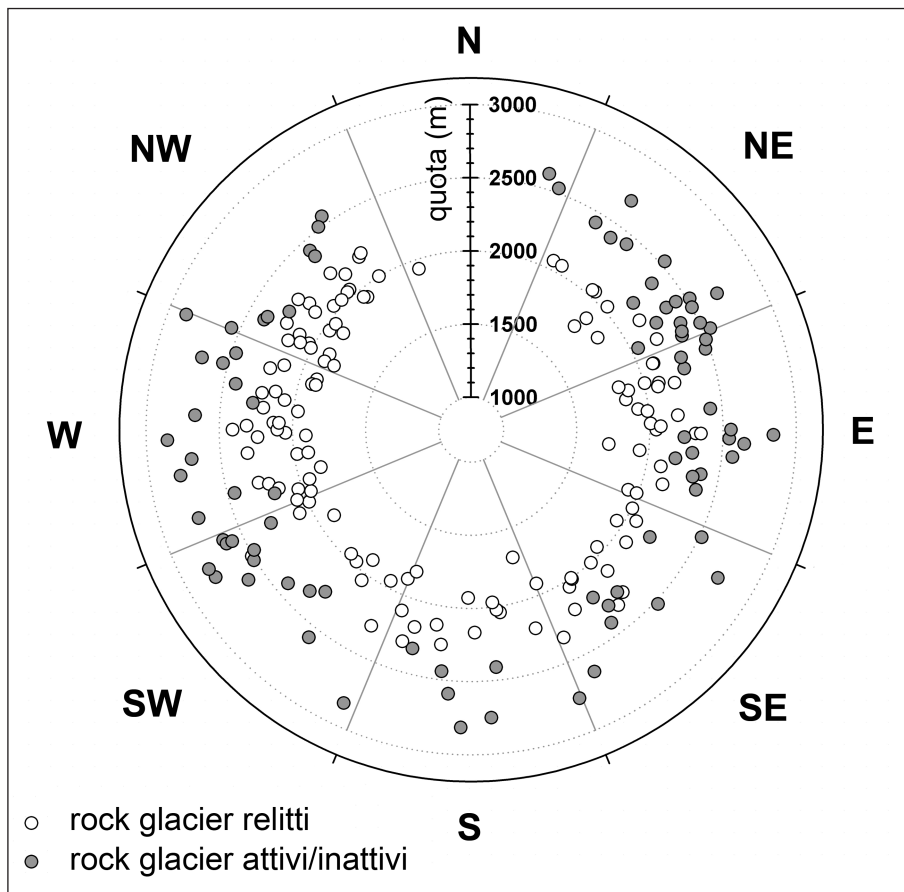


Fig. 6 - Distribuzione dei rock glacier attivi/inattivi e relitti in funzione dell'esposizione e della quota della fronte.

Distribution of active/inactive and relict rock glaciers relative to the exposure and the altitude of the front.

nello stadio di Daun e quindi si sarebbero sviluppati in una fase più recente dei precedenti. Dallo stesso confronto, inoltre, emerge come 31 *rock glacier* sono collocati esternamente ai limiti raggiunti dai ghiacciai nello stadio di Gschnitz e non è quindi possibile, per essi, definire una approssimativa età minima a partire dalla quale si sono sviluppati.

Per i *rock glacier* relitti dell'area studiata non si dispone, allo stato attuale, di datazioni assolute che possano definirne in modo preciso l'età.

Secondo il modello della criosfera alpina proposto da HAEBERLI (1985), che si basa su dati raccolti nelle Alpi Centrali e prende in considerazione la temperatura media annua dell'aria e la quantità di precipitazioni medie annue, il limite inferiore del *permafrost* discontinuo dovrebbe coincidere, a scala regionale, con la quota dell'isoterma media annua di $-1/-2^{\circ}\text{C}$. Questo modello può consentire di effettuare una stima di massima della diffusione del *permafrost* in una regione alpina, ma va utilizzato con le dovute precauzioni, in quanto è noto che, a scala locale, altri fattori oltre la temperatura media annua e le precipitazioni determinano la presenza e la conservazione del *permafrost*. Fra questi, i più importanti sono la radiazione solare diretta, l'ammontare delle precipitazioni nevose, la distribuzione della neve al suolo e la sua durata nel corso dell'anno. Come già evidenziato in precedenza, nel caso dei

depositi detritici ha un ruolo fondamentale la granulometria del materiale di copertura. Tali fattori possono determinare temperature medie annue del suolo sensibilmente inferiori a quelle dell'aria (HUMMUM, 1997; HARRIS & PEDERSEN, 1998).

Sulla base della distribuzione dei *rock glacier* attivi/inattivi, ipotizzando che essi siano ancora in equilibrio con l'attuale ambiente morfoclimatico, nel Gruppo Adamello Presanella il *permafrost* dovrebbe attualmente essere presente ad una quota superiore a 2500 m s.l.m. e raggiungerebbe quote sensibilmente inferiori sui versanti esposti a NW (2420 m s.l.m.) e a NE (2430 m s.l.m.). La scarsità di forme attive/inattive rivolte a N non consente di ottenere una stima significativa della quota del limite inferiore del *permafrost* sui versanti con questa esposizione.

La distribuzione delle forme relitte indica un antico limite inferiore del *permafrost* collocato circa 430 m più in basso rispetto al limite attuale. Escludendo i versanti esposti a N, dove il numero di *rock glacier* presenti è scarso, la differenza di quota del limite inferiore del *permafrost* definito dalla distribuzione delle forme attive/inattive e relitte varia tra 400 m circa per i versanti settentrionali (considerando solo le forme esposte a NW e NE) e 460 m circa per i versanti meridionali (considerando le forme esposte a S, SE e SW). Di tale entità sarebbe stata quindi la risalita del limite inferiore del *permafrost* discontinuo, assumendo, analogamente a quanto verificato in altri settori delle Alpi, che la fase di inattivazione dei *rock glacier* attualmente relitti si sia verificata tra il Tardoglaciale e l'inizio dell'Olocene.

Utilizzando il gradiente termico calcolato per il Gruppo Adamello Presanella, pari a $0,59^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (BARONI *et al.*, 2004), è possibile stimare la variazione di temperatura media annua che corrisponde alla differenza riscontrata fra la quota media della fronte delle forme attive/inattive e quelle relitte. Applicando il gradiente e assumendo che esso non sia cambiato nel tempo, la differenza di quota corrisponderebbe a una differenza di temperatura media annua pari a circa $2,5^{\circ}\text{C}$. Tale differenza scende a $2,4^{\circ}\text{C}$ sui versanti esposti a settentrione e sale a $2,7^{\circ}\text{C}$ su quelli esposti a meridione. Questi dati consentono di avere una stima approssimativa della variazione di temperatura media annua fra il Tardoglaciale (durante il quale i *rock glacier* attualmente relitti erano probabilmente attivi) ed il presente.

La variazione di temperatura ottenuta dalla differenza di quota delle fronti dei *rock glacier* concorda con l'attribuzione cronologica delle forme relitte alle ultime

fasi tardoglaciali. MAISCH (1982) indica infatti una diminuzione di circa $2^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ tra la Piccola Età Glaciale (PEG) e le minime temperature delle fasi stadiali di Daun ed Egesen che, associate ad una variazione di $0,7^{\circ}\text{C}$ (stimata tra la PEG ed oggi per un innalzamento del limite delle nevi di circa 120 m) porta ad un valore di temperatura di $2,7^{\circ}\text{C}$.

La variazione di temperatura riscontrata nel gruppo Adamello Presanella è paragonabile a quella di altre aree alpine. Nelle Alpi austriache occidentali, ad esempio, la quota della fronte dei *rock glacier* era più bassa di circa 400 m rispetto all'attuale nelle ultime fasi del *Younger Dryas* (Egesen III), suggerendo una temperatura media annua più bassa di circa 3°C rispetto al presente (SAILER & KERSCHNER, 1999). Nelle Alpi Svizzere, sulla base della distribuzione dei *rock glacier* relitti, è stato stimato un abbassamento della quota minima del *permafrost* di 500-600 m durante il *Younger Dryas*, corrispondente a una temperatura media annua inferiore di almeno 3°C rispetto all'attuale (FRAUENFELDER *et al.*, 2001). In BELLONI *et al.* (1993), viene messo in evidenza come nelle Alpi italiane la differenza fra la quota media della fronte dei *rock glacier* attivi e quelli inattivi (che per i diversi criteri di classificazione possono essere raffrontati con i *rock glacier* relitti del presente lavoro) sia di 395 m, corrispondente ad una differenza di temperatura media annua di circa $2,4^{\circ}\text{C}$ (gradiente adottato: $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). I dati ottenuti da BELLONI *et al.* (1993) sono quindi in accordo con quelli del presente studio, pur tenendo in considerazione i differenti criteri di classificazione delle forme e i diversi metodi applicati per trattare i dati climatici.

4. CONCLUSIONI

L'uso dei *rock glacier* come indicatori della presenza di *permafrost* negli ambienti alpini può fornire una prima stima della sua distribuzione, sia attuale (forme attive/inattive) che antica (forme relitte). La compilazione di un inventario completo dei *rock glacier* del Gruppo Adamello Presanella ha consentito di stimare una quota del limite inferiore del *permafrost* discontinuo che attualmente si colloca a circa 2500 m s.l.m. Le forme relitte suggeriscono un antico limite collocato circa 430 m più in basso, ad indicare condizioni climatico-ambientali considerevolmente diverse rispetto alle attuali. È possibile infatti stimare una differenza di temperatura media annua di $2,4/2,7^{\circ}\text{C}$ tra il presente e il periodo nel quale i *rock glacier* attualmente relitti sarebbero entrati nella fase di inattivazione. Tale periodo è di difficile definizione in assenza di datazioni assolute delle forme relitte, ma dovrebbe coincidere con gli ultimi stadi del Tardoglaciale, in analogia con quanto osservato in altre aree delle Alpi. Questo dato è supportato anche dal confronto tra la distribuzione delle forme relitte e le superfici dei ghiacciai durante gli stadi di Gschnitz e Daun, dedotte dalla geometria dei depositi glaciali e riportate in CASTIGLIONI (1961).

RINGRAZIAMENTI

Lavoro eseguito con fondi di Ateneo dell'Università di Padova (ex 60% 2008 e 2009, ricerca dal titolo

“L'ambiente glaciale e periglaciale delle Alpi orientali”) e PRIN 2008 (ricerca dal titolo “La degradazione della criosfera nelle Alpi centro orientali”) responsabile A. Carton. Lavoro parzialmente realizzato nell'ambito del progetto europeo *Alpine Space* “PermaNET” (*Permafrost Long Term Monitoring Network*).

BIBLIOGRAFIA

- BARONI C., CARTON A. & SEPPI R. (2004) - *Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps)* - *Permafrost and Periglacial Processes*, **15**, pp. 243-259.
- BARSCH D. (1996) - *Rockglaciers: indicators for the present and former geocology in high mountain environments* - Springer, Berlin, 331 pp.
- BELLONI S., CARTON A., DRAMIS F. & SMIRAGLIA C. (1993) - *Distribution of permafrost, glaciers and rock glaciers in the Italian mountains and correlations with climate: an attempt to synthesize* - In: *Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost*, Beijing, China, vol. 1, pp. 36-41.
- CASTIGLIONI G.B. (1961) - *I depositi morenici del Gruppo Adamello-Presanella con particolare riguardo agli stadi glaciali postwürmiani* - *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, **23**, 129 pp.
- CERIANI M. & CARELLI M. (2000) - *Carta delle precipitazioni medie, massime e minime annue del territorio alpino della Regione Lombardia* - Direzione Generale Territorio e Urbanistica Regione Lombardia.
- DRAMIS F., GIRAUDI C. & GUGLIELMIN M. (2003) - *Rock glacier distribution and paleoclimate in Italy* - In: *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zürich, Switzerland, vol. 1, pp. 199-294.
- FRAUENFELDER R. & KÄÄB A. (2000) - *Towards a palaeoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps* - *Annals of Glaciology*, **31**, pp. 281-286.
- FRAUENFELDER R., HAEBERLI W., HOELZLE M. & MAISCH M. (2001) - *Using relict rockglaciers in GIS-based modelling to reconstruct Younger Dryas permafrost distribution patterns in the Err-Julier area, Swiss Alps* - *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, **55**, pp. 195-202.
- GUGLIELMIN M. & SMIRAGLIA C. (eds). (1997) - *Catasto dei rock glaciers delle Alpi italiane* - *Archivio del Comitato Glaciologico Italiano*, **3**, 103 pp.
- GUGLIELMIN M., CAMUSSO M., POLESSELLO S. & VALSECCHI S. (2004) - *An old relict glacier body preserved in permafrost environment: the foscagno rock glacier ice core (Upper Valtellina, Italian Central Alps)* - *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **36**, pp. 108-116.
- HAEBERLI W. (1985) - *Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers* - *Mitteilung der VAW/ETH*, **77**, 119 pp.
- HAEBERLI W. (2000) - *Modern research perspective relating to permafrost creep and Rock Glaciers: a discussion* - *Permafrost and Periglacial Processes*, **11**, pp. 290-293.
- HARRIS S.A. & PEDERSEN D.E. (1998) - *Thermal regimes beneath coarse blocky materials* - *Permafrost and*

- Periglacial Processes, **9**, 107-120.
- HUMLUM O. (1997) - *Active layer thermal regime at three rock glaciers in Greenland* – Permafrost and Periglacial Processes, **11**, pp. 189-206.
- IMHOF M., PIERREHUMBERT G., HAEBERLI W. & KIENHOLZ H. (2000) - *Permafrost investigation in the Schilthorn Massif, Bernese Alps, Switzerland* – Permafrost and Periglacial Processes, **11**, pp. 189-206.
- JULIUSSEN H. & HUMLUM O. (2008) - *Thermal regime of openwork block fields on the Mountains Elgåhøna and Sølen, Central-eastern Norway* – Permafrost and Periglacial Processes, **19**, pp. 1-18.
- KERSCHNER H. (1980) - *Outline of the climate during the Egesen advance (Younger Dryas, 11000-10000 BP) in the Central Alps of the Western Tyrol, Austria* – Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **16**, pp. 229-240.
- KERSCHNER H. (1985) - *Quantitative palaeoclimatic inferences from lateglacial snowline, timberline and rock glaciers data, Tyrolean Alps, Austria* – Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, **21**, pp. 363-369.
- KRAINER K. & MOSTLER W. (2000) - *Reichenkar Rock Glacier: a glacier derived debris-ice system in the Western Stubai Alps, Austria* – Permafrost and Periglacial Processes, **11**, pp. 267-275.
- LAMBIEL C. & REYNARD E. (2001) - *Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps)* – Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, **55**, pp. 219-223.
- MAISCH M. (1982) - *Zur gletscher und klimageschichte des alpinen spätglazials* – Geographica Helvetica, **2**, pp. 93-104.
- POTTER N. Jr, STEIG E.J., CLARK D.H., SPEECE M.A., CLARK G.M. & UPDIKE A.B. (1998) - *Galena Creek rock glacier revisited-new observations on an old controversy* – Geografiska Annaler, **80A**, pp. 251-265.
- RIBOLINI A., CHELLI A., GUGLIELMIN M. & PAPPALARDO M. (2007) - *Relationships between glacier and rock glacier in the Maritime Alps, Schiantala Valley, Italy* – Quaternary Research, **68**, pp. 353-363.
- SAILER R. & KERSCHNER H. (1999) - *Equilibrium-line altitudes and rock glaciers during the Younger Dryas cooling event, Ferwall Group, Western Tyrol, Austria* – Annals of Glaciology, **28**, pp. 141-145.
- SCHWARB M., DALY C., FREI C. & SCHÄR C. (2001) - *Mean annual precipitation throughout the European Alps 1971-1990* – In: Hydrological Atlas of Switzerland. Landeshydrologie, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, tavola 2.6.
- SEPPI R. (2006) - *I rock glaciers delle Alpi Centrali come indicatori ambientali (Gruppo Adamello-Presanella e settore orientale del Gruppo Ortles-Cevedale)* – Tesi di Dottorato, Università di Pavia, 199 pp.
- SEPPI R., BARONI C., CARTON A & BASSI L. (2006) – *Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel Gruppo Adamello-Presanella* – Studi Trentini di Scienze Naturali Acta Geologica, **81**, pp. 75-85.
- STEIG E.J., FITZPATRICK J.J., POTTER N. & CLARK D.H. (1998) - *The geochemical record in rock glaciers* – Geografiska Annaler, **80A**, pp. 277-286.
- VAN HUSEN D. (1997) - *LGM and Late Glacial fluctuations in the Eastern Alps* – Quaternary International, **38/39**, pp. 109-118.

Ms. ricevuto il 17 giugno 2009
 Testo definitivo ricevuto il 31 luglio 2009

Ms. received: June 17, 2009
 Final text received: July 31, 2009