



Michael DEMUTH ^(*), Veronique PINARD ^(*), Alain PIETRONIRO ^(**),
Brian LUCKMAN ^(*), Chris HOPKINSON ^(*),
Pablo DORNES ^(*) and Laura COMEAU ^(*)

Variazioni recenti e secolari delle risorse glaciali nelle Montagne Rocciose canadesi: il sistema del Fiume Nelson

Recent and past-century variations in the glacier resources of the Canadian Rocky Mountains: Nelson River system

Riassunto

Verso la metà del XX secolo, le catene “Park Range” e “Front Range” delle Montagne Rocciose Canadesi contenevano circa 1500 ghiacciai; le acque di ablazione di questi ghiacciai defluiscono nel sistema idrografico del Fiume Nelson che scorre verso Est e sfocia nella Baia di Hudson. Usando dati ottici da sensori satellitari, abbiamo determinato le variazioni dei ghiacciai nel tardo XX secolo, ponendole in relazione alle portate del fiume. I risultati rivelano una diminuzione significativa dei piccoli ghiacciai e forniscono le percentuali approssimate della fusione di ghiaccio rispetto all'estensione dei ghiacciai. Con riferimento ai risultati degli studi idrologici associati, ipotizziamo che gli effetti a lungo termine di questa contrazione glaciale siano stati quelli di ridurre il ruolo-tampone dell'acqua di fusione dei ghiacciai nei periodi in cui le altre sorgenti sono ridotte, considerazione questa significativa per molti settori che si basano sulla disponibilità di acqua nei versanti sottovento della zona a clima continentale. Per collocare la variazione recente nel contesto generale, abbiamo utilizzato fotografie aeree verticali storiche per caratterizzare il tasso di variazione dell'estensione glaciale, a partire dall'espressione climatica “*Neoglaciale*” per la regione in studio (dal 1850 circa). Le evidenze morfostratigrafiche e geobotaniche, nonché la storia dei bilanci di massa dei ghiacciai, ricostruiti e misurati, sono state utilizzate per illustrare la natura di queste variazioni. Complessivamente si è stabilito che la contrazione della copertura glaciale si sta evolvendo ad una velocità senza precedenti, non evidenziata per molti millenni. L'aumento generale della temperatura globale e la riduzione dell'alimentazione invernale dovuta allo spostamento persistente del regime oceano-atmosfera ha favorito la drastica contrazione dei ghiacciai, oggi particolarmente evidente.

Abstract

In the mid-20th Century, the Park and Front ranges of the Canadian Rocky Mountains contained approximately 1,500 individual glaciers whose melt water drains into the Nelson River system, which flows eastwards and empties into Hudson's Bay. Using contemporary optical data obtained from space-based imaging sensors, we determined late 20th Century glacier volume changes and related them to river flow volumes. The results reveal significant small-glacier diminution during this period, and provide approximate ice wastage contributions relative to glacier extent. With reference to the results of companion hydrological studies, we suggest that the long-term effect of this glacier contraction has been to reduce the buffering role of glacier-derived melt water during periods when other sources of runoff are in decline – a significant consideration for many water-reliant sectors in this leeward slope, continental region. To place the recent change in context we employed historical vertical aero-photography to characterize the rate of change in glacier extent since the climatic expression of the *Neoglaciale* maximum for the region (c. 1850 AD). Morpho-stratigraphic and geobotanical evidence, and reconstructed and observed glacier mass balance histories are used to further illustrate the nature of these changes. Taken together, it is determined that glacier cover contraction is evolving at an unprecedented pace towards a state not in evidence for several millennia. Both rising temperatures generally and a reduction in glacier nourishment in winter due to a persistent ocean-atmosphere regime shift has fuelled the drastic glacier contraction in evidence recently.

^(*) Glaciology Section – Geological Survey of Canada.

^(**) National Water Research Institute – Environment Canada.

^(*) Dendrogeomorphology Laboratory – University of Western Ontario, Canada.

^(*) Applied Geomatics Research Group – Nova Scotia Community College, Canada.

^(*) Centre for Hydrology – University of Saskatchewan, Canada.

Introduzione

L'estensione terrestre del Canada e il suo clima favoriscono la presenza di ghiacciai e di calotte glaciali per circa 200.000 km², di cui 50.000 km² nella Cordigliera occidentale e settentrionale (Ommanney, 2002a). Si può affermare che i ghiacciai, in particolare quelli delle Montagne Rocciose, facciano parte dell'immaginario canadese. In effetti, molti canadesi ricordano di aver visitato le *Alpi Canadesi* in gioventù, ritornando poi negli stessi luoghi, con le nuove generazioni, e osservando la contrazione drammatica dei ghiacciai.

La prima documentazione dei ghiacciai delle Montagne Rocciose risale al tardo XIX secolo e ai primi decenni del XX, quando i costruttori di ferrovie, aiutati da esploratori europei e americani e dalla popolazione immigrata da altri stati, attraversarono le Montagne Rocciose per collegare le praterie canadesi con le regioni occidentali interne della Columbia Britannica (la storia dettagliata è stata pubblicata da Ommanney, 1966; 2002a). Il Club Alpino Canadese (Wheeler, 1911; 1934), e la famiglia Vaux (ad es.: Vaux e Vaux Jr., 1899) hanno tra gli altri conservato i dati della posizione frontale e della quota dei ghiacciai, nonché la relativa documentazione fotografica; sono oggi riferimenti utili per i ricercatori e per il pubblico. Questi dati, relativamente informali ma assai validi, sono confluiti nella documentazione ufficiale delle autorità di gestione delle acque e delle fonti energetiche (*Dominion Water e Power Bureau*; risultati pubblicati ad es. da Collier, 1958 e da Ommanney, 1972a); hanno inoltre contribuito alla formulazione di programmi coordinati di osservazione scientifica, quali quelli dell'Anno Geofisico Internazionale (1957-58), del Decennio Idrologico Internazionale dell'UNESCO (1965-1974) e dell'attuale rete globale terrestre WMO-GCOS per l'osservazione dei ghiacciai, che contribuisce al Programma Idrologico Internazionale.

I grandi ghiacciai di sbocco e quelli montani, oggetto in passato, di misure da caposaldi di rilevamento e fotografici, attualmente costituiscono oggetto di grande interesse culturale e scientifico. La quarta relazione dell'IPCC sulle variazioni climatiche (2007), per quanto concerne le risorse dei ghiacciai e delle nevi montane afferma:

- L'evidenza osservata suggerisce, con notevole concordanza in tutti i continenti, che "è in atto un incremento di deflusso con picchi primaverili anticipati in molti fiumi alimentati dai ghiacciai e dalle nevi".
- La conoscenza di impatti futuri sulle fonti di acqua dolce e sulla loro amministrazione in tutti i continenti. "Si osserva che, nel corso del XXI secolo, le riserve d'acqua accumulate nei ghiacciai e nella copertura nevosa, sono in declino, riducendo la disponibilità di acqua in regioni servite da acqua di fusione proveniente dalle principali catene mon-

Introduction

Canada's landmass and climate supports glaciers and ice caps covering some 200,000 km², of which ~ 50,000 km² is located in the western and northern Cordillera (Ommanney, 2002a). It could be said that glaciers, in particular those of the Rocky Mountains, have become part of the Canadian psyche. Indeed, many Canadians today can recall visiting the *Canadian Alps* in their youth, and have since returned with new generations to witness the dramatic retreat of the glaciers that remain there.

The earliest documentation of glaciers in the Rocky Mountains occurred during the late 19th and early 20th Centuries when railwaymen, aided by western European and American explorers, and immigrant and First Nations peoples, were striking across the Rocky Mountains to link the Canadian prairie region with the western interior of British Columbia (a full and detailed history is provided by Ommanney 1996, 2002a). The Alpine Club of Canada (Wheeler 1911, 1934) and the Vaux family (e.g. Vaux and Vaux Jr. 1899) for example, maintained detailed frontal position, ice surface levelling and photographic documentation that stand to this day as useful references for contemporary researchers and the public alike. Insightful and valuable, these relatively informal observations eventually led to more formal documentation by water and power authorities (*Dominion Water and Power Bureau*; results published f. ex. by Collier, 1958, and Ommanney, 1972a) and co-ordinated enhanced observing/scientific programmes such as the International Geophysical Year (1957-58), UNESCO's International Hydrological Decade (1965-1974) and today's WMO-GCOS Global Terrestrial Network for Glaciers, which contributes to the International Hydrological Programme.

The great outlet and mountain glaciers that aided the occupation of survey and photographic positions used in past technical endeavours are now the subject of intense cultural and scientific interest. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (IPCC 2007) has stated the following as it concerns mountains and the glacier/snow resources they support:

- Observational evidence suggests with high confidence in all continents: "Increased run-off and earlier spring peak discharge in many glacier- and snow-fed rivers."
- Knowledge of future impacts on freshwater resources and their management, concerning all continents: "In the course of the (21th) century, water supplies stored in glaciers and snow cover are projected to decline, reducing water availability in regions supplied by meltwater from major mountain ranges, where more than one-sixth of the world population currently lives."

tuose, regioni nelle quali vive abitualmente oltre un sesto della popolazione mondiale”.

Per il Nord America, il Gruppo di Lavoro II dell'IPCC (capitolo 14: Field et al., 2007) identifica le variazioni climatiche quali contributo alla sfida della gestione delle risorse idriche. Per molte regioni del Canada la situazione è ulteriormente complicata da un consumo d'acqua già eccessivo (Mitchell e Shrubsole, 1994) e dal fatto che la gestione delle acque è stata basata sul “Mito dell'abbondanza” (Sprague, 2006). Per le Montagne Rocciose Canadesi, per le colline periferiche e per le praterie, tale mito è stato in parte promosso da immagini di ghiacciai numerosi ed estesi ancora alla metà del XX secolo (Sauchyn et al., in stampa). Inoltre, Demuth e Pietroniro (2003), Moore e Demuth (2001) e Stahl e Moore (2007) forniscono l'evidenza di tendenze negative del deflusso estivo dai bacini glacializzati della Cordigliera meridionale canadese, ove i ghiacciai hanno subito una notevole contrazione. Per queste regioni la fase di aumento dei deflussi prevista da IPCC può considerarsi già superata.

La copertura glaciale riduce la variabilità idrologica, specie in assenza di precipitazioni e di riserve di versante ridotte o in declino. Il periodo di massimo deflusso è prolungato; senza la copertura glaciale le condizioni tenderanno rapidamente a volgere verso deflussi minimi dopo la scomparsa della neve (Fountain e Tangborn, 1985; Flemming e Clarke, 2005). I ghiacciai garantiscono una regolazione a lungo termine della variabilità idrica, accumulando acqua durante gli episodi di clima freddo e umido e rilasciandola in quelli caldi e secchi (ad es., Meier, 1969; Moore, 1992; Braun e Escher-Vetter, 1996; Jansson et al., 2003).

Le conseguenze delle variazioni climatiche del XX secolo richiedono già ora un adattamento dei sistemi umani e naturali a una realtà che il clima instabile impone a proposito di risorse idriche (ad es. Whitefield et al., 2004). Vi è inoltre la necessità di definire le portate attuali e future di tali sistemi, nella misura in cui esse sono influenzate da variazioni climatiche significative dal punto di vista idrologico. Un recente convegno di specialisti delle risorse idriche e delle centrali idroelettriche canadesi (C-CAIRN, 2006) ha evidenziato che la variabilità idrologica è la sorgente più importante di rischio finanziario, “estremo se associato ad altri fattori quali, il danneggiamento delle infrastrutture di trasmissione, combinate con le fluttuazioni di mercato interne ed esterne”.

Considerando la variabilità e l'attuale velocità del cambiamento, i dati, contemporanei e storici, concernenti le fluttuazioni glaciali detengono un notevole valore, non solo per le ricostruzioni del clima, ma anche per sollecitare gli enti interessati alle risorse idriche e all'ambiente e per identificare i limiti di adattamento nei settori basati sull'acqua.

For North America, IPCC Working Group II (Chapter 14: Field et al., 2007) identify climate change as contributing to the challenge of managing water resources. For many regions of Canada this is further complicated by a water supply that is already over-allocated (Mitchell and Shrubsole, 1994), and that water management considerations have quite possibly been based on a “Myth of Abundance” (Sprague, 2006). For the Canadian Rocky Mountains and the adjacent foothills and western prairies this view of abundant water was at least in-part fostered by the iconic, vast and numerous glaciers in evidence as late as the early-mid 20th Century (Sauchyn et al., in press). Moreover, Demuth and Pietroniro (2003), Moore and Demuth (2001) and Stahl and Moore (2007) provide evidence of negative summer flow trends in the glacierized basins of Canada's southern Cordillera where glacier cover has markedly declined. For these regions the increased flow phase predicted by the IPCC may have already passed.

The presence of glacier cover reduces hydrological variability, particularly when precipitation may be absent and other terms describing the watershed reservoir are reduced or in decline. The period of maximum seasonal flow is extended, whereas without glacier cover, conditions would rapidly tend from freshet towards base flow conditions once the snow reservoir has been depleted (Fountain and Tangborn, 1985; Flemming and Clarke, 2005). Glaciers also provide longer-term controls on hydrological variability by storing water during cool and wet climate episodes, and releasing water when conditions are warm and dry (e.g., Meier, 1969; Moore, 1992; Braun and Escher-Vetter, 1996; Jansson et al., 2003).

The consequences of 20th century climate changes are already demanding the adaptation of human and natural systems downstream to the realities that a non-stationary climate imposes on water resources (e.g., Whitefield et al., 2004). Moreover, there is a need to define the current and future adaptive capacities of these systems as they are impacted by hydrologically significant climate changes. For example, a recent forum of Canadian water resource and hydro-power specialists (C-CAIRN, 2006) established from a hydro-power industry standpoint, that hydrological variability is the most important source of financial risk “exceeding that associated with all other factors such as damage to transmission infrastructure and internal/external market fluctuations combined”.

From the consideration of characterising variability and current rates of change, this suggests that both contemporary and historical information describing glacier fluctuations are a valuable asset; for not only tracking a changing climate, but also for fostering water and environmental stewardship, and to recognize adaptation limits in water-reliant sectors.

Questo studio descrive l'accertamento, mediante *remote sensing*, delle variazioni delle risorse glaciali nel sistema idrico del Fiume Nelson, nell'ultima parte del XX secolo. Le stime regionali della riduzione dei ghiacciai sono poste in relazione ai deflussi osservati nel periodo. Viene fornito il contesto *Neoglaciale* per meglio supportare la natura, il tasso di variabilità e l'impatto dei cambiamenti accertati. Si discutono anche i cambiamenti recenti con riguardo al verificarsi di spostamenti significativi, regionali e persistenti della circolazione atmosferica.

This paper provides a remote sensing assessment of changes in the glacier resources of the Nelson River system headwaters over the later part of the 20th century. Regionalized glacier wastage estimates are related to river flow volumes observed over the same period. A *Neoglacial* context is provided to more fully underpin the nature, rate and impacts of the detected changes. The recent change is also discussed with respect to the occurrence of persistent and regionally significant shifts in atmospheric circulation.



Figura 1 - La zona in esame è delimitata alla sua testata dallo spartiacque continentale che costituisce il confine tra gli Stati dell'Alberta e della Columbia Britannica. Sono indicate le fasce di precipitazione per la regione montuosa, per le adiacenti colline e praterie e per le pianure boreali, come risultano nell'asta principale del sistema del Fiume Nelson e dei fiumi Saskatchewan Nord e Sud.

Figure 1 - The study area delimited at its headwaters by the continental divide forming the boundary between Alberta and British Columbia. Precipitation zones for the montane cordillera, the adjacent foothills and prairie and boreal plains are indicated, as are the main stems of the Nelson River system- the North and South-Saskatchewan Rivers.

La regione di studio

Il bacino imbrifero montano del sistema del Fiume Nelson si colloca lungo le pendici orientali delle Montagne Rocciose Canadesi. I settori più elevati confinano con lo spartiacque continentale Nord-americano. I due maggiori bacini fluviali sono quelli del Saskatchewan Nord e del Saskatchewan Sud (NSRB e SSRB), con le aste principali che defluiscono verso Est e verso Nord, attraverso le colline e le praterie delle pianure boreali. Entrambi sfociano nella baia di Hudson (figura 1).

L'altitudine del bacino montano varia da 1200 m (Banff) a circa 3490 m. Dal punto di vista geologico il substrato è prevalentemente sedimentario, di età paleozoica, con sedimenti piegati e fagliati, che danno origine a un'estesa rete di ripiani ospitanti grandi masse glaciali e numerosi ghiacciai montani. In molti casi, dalle calotte glaciali defluiscono ghiacciai vallivi di sbocco. Noto nella zona è la presenza di laghi di origine glaciale (figura 2), nonché di edifici morenici storici e di sovraescavazioni vallive (quando i ghiacciai scorrono su ripide soglie rocciose). Esse hanno dato luogo a laghi proglaciali e a sequenze di laghi a "rosario", portati alla luce dal recesso post massimo Neoglaciale (1850 ca., Luckman, 2000).

Il clima della regione è dominato da una circolazione occidentale che ha origine nell'Oceano Pacifico. Le masse d'aria risalgono i sistemi montuosi costieri marittimi apportando considerevoli quantità di umidità, ma con riduzione graduale verso l'interno della Cordigliera, dando così luogo a significative zone di scarse precipitazioni. L'aria sale ancora sulle catene interne e sulle Montagne Rocciose, favorendo un clima continentale interno umido, con transizione ad un'altra regione di scarse precipitazioni quando l'aria supera lo spartiacque continentale e ricade sui pendii orientali delle Montagne Rocciose. La regione è anche soggetta al passaggio di masse d'aria dai sistemi orientali. Queste condizioni di risalita dai pendii sono abituali in primavera, con il frequente risultato di grandi accumuli nevosi, quando masse d'aria associate all'attività ciclonica, percorrendo il Sud e l'Est della regione, vengono esaltate dall'effetto orografico, con risultante divergenza di alto livello (Stewart *et al.* 1995, Moran *et al.* 2007). In particolare, questi eventi possono integrare decisamente lo spessore nevoso, che è spesso soggetto a fenomeni di riduzione nel corso del medio-inverno in condizioni di Föhn/Chinook. Mentre le precipitazioni annuali alle alte quote possono variare da 800 a 1500 mm, i pendii orientali presentano generalmente un clima continentale, con inverni freddi e relativamente secchi ed estati calde e secche (temp. media annuale a Banff $\sim +3^\circ\text{C}$). Irruzioni periodiche di masse d'aria secche continentali (alta pressione) determinano episodi di tempo invernale molto freddo ($\sim -35^\circ\text{C}$) e periodi estivi assai caldi ($\sim +35^\circ\text{C}$) e secchi.

Study region

The Nelson River system has its mountain headwaters in the eastern slopes of the Canadian Rocky Mountains. The upper reaches are bounded by the North American continental divide. Its major river basins are the North and South-Saskatchewan River Basins (NSRB and SSRB), with main stems flowing eastward and northward through the foothills and the prairie and boreal plains to eventually empty into Hudson's Bay (figure 1).

The headwater regions range in elevation from 1,200 m a.s.l. (Banff) to $\sim 3,490$ m. The geology consists largely of folded and faulted Palaeozoic sedimentary bedrock, giving rise to an extensive network of benches that support several large icefields and numerous mountain glaciers. In several instances, the icefields nourish outlet valley glaciers. Also notable in the region are numerous paraglacial lakes (Figure 2), as well as a history of end-moraine building and downstream over-deepening (as ice flows over steep bedrock barriers); that have created numerous proglacial lakes and paternoster lake sequences revealed by a general recession of glaciers in the region since the Neoglacial maximum (c. 1850, Luckman, 2000).

The climate for the region is dominated by a westerly flow originating from the Pacific Ocean. Air masses ascend Canada's maritime Coast Mountains and precipitate out large amounts of moisture, tapering gradually as they move further inland and drop into the montane cordillera causing a pronounced rainshadow. The air ascends once again over the Interior Ranges and the Rocky Mountains promoting a moist interior continental climate, which transitions into another rainshadow region as the air passes over the continental divide and drops into the Rocky Mountain eastern slopes. The region is also subject to air masses from easterly systems. These *upslope* conditions are common in spring, often resulting in heavy accumulations of snow as air masses associated with cyclonic activity tracking to the south and east of the region are subject to orographic enhancement and resulting upper-level divergence (Stewart *et al.* 1995, Moran *et al.* 2007). Notably, these events can significantly supplement the mountain snowpack, which is often subject to the depleting effects of mid-winter Föhn/Chinook conditions. While annual precipitation in the higher elevations can range between 800 and 1,500 mm, the eastern slopes generally exhibit a continental climate that produces cold, relatively dry winters and warm, dry summers (Banff average annual temperature $\sim +3^\circ\text{C}$). Periodic inundation by dry, high-pressure, continental air masses can result in extended episodes of very cold weather in winter ($\sim -35^\circ\text{C}$) and periods in summers that are hot ($\sim +35^\circ\text{C}$) and dry.

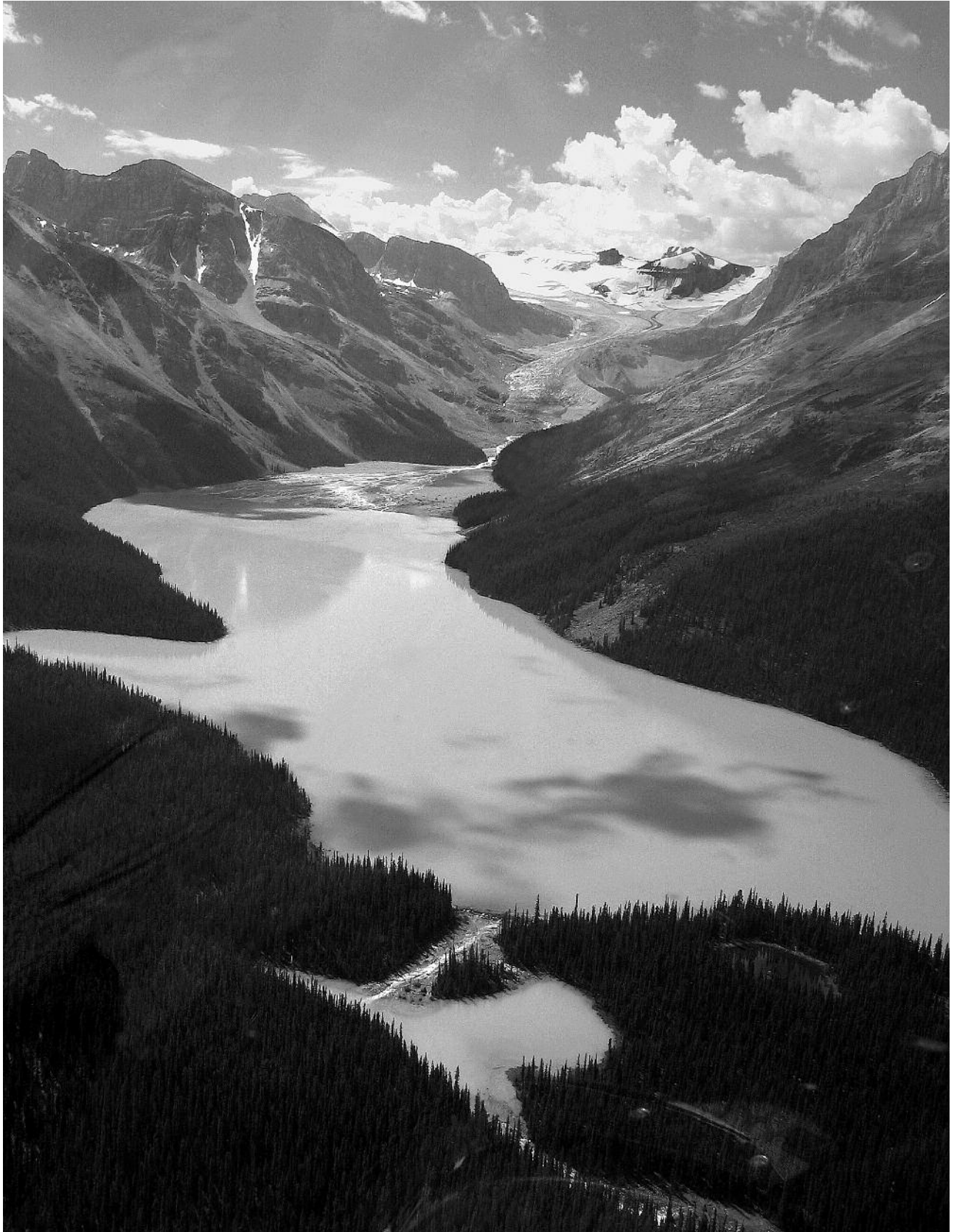


Figura 2 - Lo spartiacque continentale alla testata del Ghiacciaio Peyto, la fronte del ghiacciaio, le morene laterali, la piana proglaciale e la zona periglaciale del Lago Peyto caratterizzano l'aspetto morfo-glaciale nel bacino imbrifero del sistema del Fiume Nelson. (B. Medioli, agosto 2006).

Figure 2 - The continental divide at the head of Peyto Glacier, the current terminus of the glacier, lateral moraines, out-wash plain and the paraglacial Peyto Lake typifies the glacio-geomorphic setting in the mountain headwaters of the Nelson River system. (B. Medioli, August 2006).

La figura 3 illustra gli spartiacque dei bacini imbriferi NSRB e SSRB, la copertura glaciale, i principali corsi d'acqua e i versanti (ombreggiati) nonché le stazioni idrometriche incluse nell'analisi dei deflussi. Per la metà del XX secolo il *Glacier Atlas of Canada* (Environment Canada-NHRI 1989) elenca 1560 ghiacciai (compresi circa 250 "rock glacier" e morene a nucleo di ghiaccio, vedi Østrem e Arnold, 1970), localizzati in 36 bacini⁽¹⁾. Si tratta essenzialmente di ghiacciai montani, alcune calotte glaciali e di ghiacciai di sbocco; il settore settentrionale (NSRB) è relativamente più ricco del settore meridionale (SSRB). I versanti dei fiumi Bow e Red Deer ospitano la maggioranza dei ghiacciai del SSRB. Le caratteristiche di bacino sono riassunte in tabella 1.

Figure 3 illustrates the NSRB and SSRB headwater boundaries, glacier cover, major river courses, and the watersheds (shaded) and river gauging stations considered in the analysis of flow volumes. For the mid-20th century the *Glacier Atlas of Canada* (Environment Canada-NHRI 1989) depicts 1560 glaciers (including ~ 250 rock glaciers/ice-cored moraines, see Østrem and Arnold, 1970) lying in 36 distinct drainage areas⁽¹⁾. They consist primarily of mountain glaciers and several prominent icefields and outlet glaciers, with the NSRB being relatively glacier rich compared to the SSRB. The Bow River and Red Deer River watersheds contain the majority of the glaciers in the SSRB. The basin characteristics are summarized in Table 1.

Tabella 1 - Aree costituenti il bacino imbrifero delle Montagne Rocciose, sistema del Fiume Nelson, la cui copertura glaciale risulta significativa (non sono inclusi i bacini imbriferi Brazeau o Oldman, vedi figura 3).

Table 1 - The contributing areas for the Rocky Mountain watersheds of the Nelson River System containing significant glacier cover (does not include the Brazeau or Oldman watersheds, see Figure 3).

Sistema del Fiume Nelson / Nelson River System	Area (km ²)
Bacino del Fiume North Saskatchewan / North Saskatchewan River Basin	
<i>Mistaya River</i> presso / near Sask. Crossing	249
<i>N. Sask. River</i> al / at Whirlpool Point	1920
<i>N. Sask. River</i> a monte di / above Bighorn Plant	3890
Bacino del Fiume Sud Saskatchewan / South Saskatchewan River Basin	
<i>Red Deer River</i> a monte di / above Burnt Timber Ck.	2246
<i>Bow River</i> a monte di / above Lake Louise	422
<i>Bow River</i> a monte di / above Banff	2210
<i>Bow River</i> a monte di / above Ghost Reservoir	6550

Metodi e lavori precedenti

Descrizione dei ghiacciai

L'identificazione e la catalogazione dei ghiacciai sono stati eseguiti con riferimento al *Glacier Atlas of Canada* che descrive la copertura glaciale al 1950 ca., a scala 1:500.000 (Environment Canada-NHRI, 1989). Le variazioni dei ghiacciai e delle loro superfici nel XX secolo sono state valutate interpretando e confrontando fotografie aeree (verticali) del 1951-52 e immagini satellitari 1975-76, 1991 e 1998 (Landsat MSS e TM imagery). I margini dei ghiacciai sono stati delineati tramite digitalizzazione manuale su schermo, completata da classificazione automatica tramite GIS (Demuth e Pietroniro, 2003; Pietroniro et al. in stampa; e tecniche analoghe descritte da DeBeer e Sharp, 2007; Käab et al., 2002; Rampini et al., 2002; Riggs et al., 1994; Sidjak e Wheate, 1999). Nello stabilire l'idoneità a rivelare i cambiamenti variando la risoluzione del sensore, si è preso in considerazione il lavoro di Paul et al. 2002.

Methods and previous work

Glacier delineation

Glacier identification and cataloguing was aided by referring to the *Glacier Atlas of Canada* depicting glacier cover valid for c. 1950 at a scale of 1:500k (Environment Canada-NHRI, 1989). Recent 20th century changes in glacier extent and surface area were estimated by interpreting and comparing remotely sensed imagery acquired in 1951/52 (vertical aero-photography), 1975/6, '91 and '98 (Landsat MSS and TM imagery). Glacier margins were delineated using manual on-screen digitization aided by automatic classification using a GIS (see Demuth and Pietroniro, 2003; Pietroniro et al. in-press, and similar techniques described by DeBeer and Sharp, 2007; Käab et al., 2002; Rampini et al., 2002; Riggs et al., 1994; Sidjak and Wheate 1999). The work of Paul et al. 2002 was considered when assessing the capability of detecting change with varying sensor resolution.

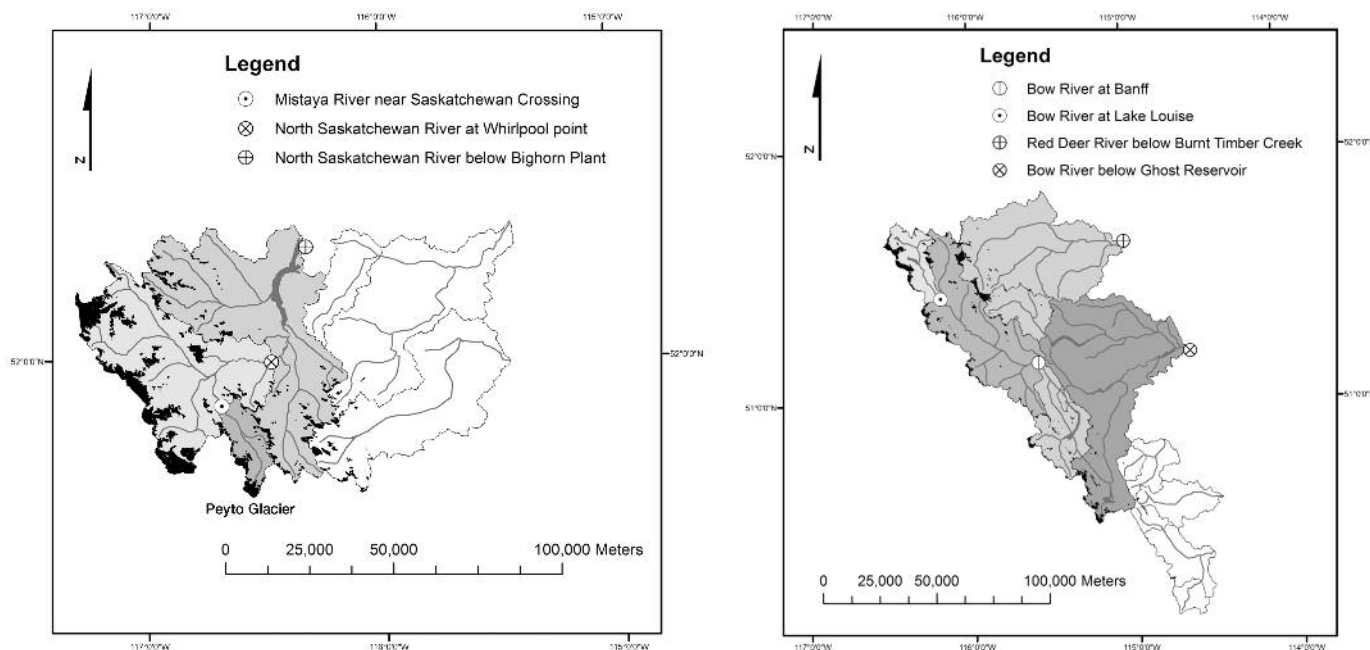


Figura 3 - Bacino idrico dei fiumi North (a) e South (b) Saskatchewan. Si illustrano: la copertura glaciale (scala 1:50.000), le principali zone di drenaggio e l'andamento dei fiumi. Le zone ombreggiate corrispondono ai settori più glacializzati della tabella 1.

Figure 3 - North (a) and South (b) Saskatchewan River Basin headwaters, illustrating glacier cover (1:50k scale), major drainage areas and river courses. Shaded areas correspond to the major glacierized watersheds summarized in Table 1.

Le misure areali di ogni ghiacciaio sono state tabulate per bacino idrico e per epoca, secondo le modalità previste dal GIS. Si è preso nota delle situazioni nelle quali la frammentazione ha portato alla creazione di ghiacciai “distinti”, mettendo allo scoperto gli spartiacque topografici. Per i ghiacciai suddivisi si sono sommate le singole aree sub-polygonali; il risultato è usato per determinare la variazione areale.

Stima delle variazioni volumetriche

La variazione volumetrica dei ghiacciai è stata stimata usando una tecnica di regionalizzazione, basata sul rapporto empirico area-volume (ad es. Chen e Ohmura, 1990; Bahr et al., 1997). Lo studio di Bahr et al. dell'andamento del rapporto teorico di geometria, inclinazione, bilancio energetico e bilancio di massa dei ghiacciai, ha stabilito che vi è una relazione tra area (A) e volume (V) del ghiacciaio: dove γ è un coefficiente adimensionale di rapporto e c è la costante dimensionale di detto rapporto. Nella determinazione di valori empirici di γ e c Bahr et al. hanno separato i volumi osservati da quelli stimati (usando valori di spessore teorici basati sulla inclinazione superficiale e le condizioni dello sforzo di taglio basale del ghiacciaio. Per 144 ghiacciai (escluse le calotte glaciali e i grandi *inlandis*) localizzati in Europa, Nord America, Asia centrale e Artico, i risultati di Bahr et al. hanno confermato il precedente lavoro empirico di Chen e Ohmura (1990) su una serie più limitata di 63 ghiacciai montani: $\gamma = 1,357$; $c = 28,5$ (area in 10^6 m² e volume in 10^6 m³). In studi comparativi, usando la variazione diretta di volume e area, si è notato che l'errore nella

Area measurements for each glacier were tabulated for each watershed and epoch from the GIS polygon attributes. It was noted where fragmentation led to the creation of distinct “glaciers” by the exposure of topographical divides. For glaciers that had fragmented, the individual sub polygon areas were summed and this value used to determine area change.

Glacier volume change estimation

The volumetric change was estimated using a regionalization technique based on empirical area-volume scaling (e.g., Chen and Ohmura, 1990; Bahr et al. 1997). Bahr et al.'s study of the theoretical scaling behaviour of glacier geometry, slope, force balance and mass balance found that there is a power law relationship between glacier area (A) and volume (V): where γ is a dimensionless scaling coefficient and c is a dimensional scaling constant. In determining empirical values for γ and c Bahr et al. separated observed volumes from those that were estimated (using theoretical ice thicknesses based on surface slope and a limiting basal shear stress condition). For 144 glaciers (other than ice caps and ice sheets) located in Europe, North America, central Asia and the Arctic, Bahr et al.'s results complimented earlier empirical work by Chen and Ohmura (1990) on a more limited data set of 63 mountain glaciers: $\gamma = 1.357$; $c = 28.5$ (area in 10^6 m² and volume in 10^6 m³). It has been noted in comparative studies using direct volume and area change data that the error in the predicted volume changes for individual glaciers can be large (Granshaw

variazione di volume prevista per singoli ghiacciai, può essere grande (Granshaw e Fountain, 2006; Menounos, comunicazione personale). Il rapporto $A-V$, applicato a un insieme grande, dovrebbe fornire un errore minore, dato che l'errore associato all'equazione di regressione, per la legge esponenziale di Bahr et al., è distribuito a caso. Per questo studio l'insieme delle variazioni di volume dei ghiacciai è valutato per il periodo di registrazione continua alle stazioni idrometriche della regione (1975/76-1998).

Situazione del deflusso fluviale

Gli studi che esaminano i contributi della riduzione dei ghiacciai al deflusso dei fiumi sono basati su variazioni areali e di spessore dei ghiacciai estrapolate a livello regionale o su variazioni dei bilanci di massa (Henoeh 1971, NSRB, sulla sezione del fiume Saskatchewan 1948-66; Young 1991, NSRB, per il bacino imbrifero del fiume Mistaya 1966-89). Le estrapolazioni regionali della riduzione dei ghiacciai, in un contesto di riserve d'acqua basato su ghiacciai, per i quali si dispone di bilanci di massa accurati può essere fuorviante, poiché in certe regioni questi ghiacciai tendono ad essere di dimensioni maggiori rispetto alla mediana della popolazione (ad es., Granshaw e Fountain, 2006; Arendt et al., 2006). In uno studio di Hopkinson e Young (1998) sulla riduzione dei ghiacciai e sulle caratteristiche di accumulo (idrico), nel bacino imbrifero del Fiume Bow sopra Banff (1951-93), è stato applicato il metodo del rapporto $A-V$ sopra citato per un singolo sotto-bacino imbrifero. Gli Autori hanno eseguito l'estrapolazione per un intero insieme di ghiacciai. In questo studio si calcola la variazione di volume per l'intero insieme, con successiva tabulazione per i ghiacciai entro il bacino imbrifero della figura 3. A nostro avviso è preferibile considerare l'intero insieme, dove l'effetto di clima e condizioni geologiche sulla sensibilità dei ghiacciai può presentare forti gradienti e precludere l'ipotesi che il contributo proporzionale di un'area rispetto ad un'altra sia rimasta costante nel periodo considerato. Abbiamo utilizzato dati di archivio per il deflusso dei fiumi (Environment Canada-WSC, 2005) alle stazioni idrometriche illustrate in fig. 3, per determinare i volumi totali di deflusso 1975/76-1998. Informazioni complete che descrivono le fonti dei dati, le procedure di elaborazione delle immagini, i metodi di estrazione dei dati e le considerazioni degli errori, si trovano in: http://pathways.geosemantica.net/WSHome.aspx?ws=NGP_SECG&locale=en-CA

and Fountain, 2006; Menounos, personal communication). The $A-V$ scaling law applied to large ensembles however, should result in an appreciably smaller error since the error associated with the regression equation for Bahr et al.'s power law is randomly distributed. For this study, ensemble glacier volume changes are estimated for the period of continuous river gauging record for the region (1975/76-1998).

Relevance to river flow

Previous studies examining glacier wastage contributions to streamflow in the region were based on area-change and regionally extrapolated ice thickness or mass balance changes (Henoeh 1971, NSRB above Saskatchewan River Crossing 1948-66; Young 1991, NSRB Mistaya River watershed 1966-89). Making regional extrapolations of glacier wastage in a water resources context based on well-studied reference mass balance glaciers may be misleading since these glaciers tend in some regions to be larger than the population median (e.g., Granshaw and Fountain, 2006; Arendt et al., 2006). An instructive study by Hopkinson and Young (1998) of the glacier wastage and storage characteristics evident in the Bow River watershed above Banff (1951-93) applied the aforementioned $A-V$ scaling method for a single sub-watershed contributing area. They then extrapolated over the entire watershed based on the proportion of glacier cover in the remaining area. In this study ice volume change for the entire ensemble of glaciers is computed and then tabulated for the glaciers within the watersheds delineated in Figure 3. We suggest that considering the entire ensemble is preferable where the geological and climate controls on glacier sensitivity may exhibit large gradients and preclude the assumption that the proportional contribution of one area relative to another remains constant over the long time intervals considered. We used archived records of river flow (Environment Canada-WSC, 2005) for the gauging stations depicted in Figure 3 to determine total flow volumes for 1975/76-1998. Full information describing the data sources, image processing procedures, data extraction methods and error considerations can be found at: http://pathways.geosemantica.net/WSHome.aspx?ws=NGP_SECG&locale=en-CA

Tabella 2 - Riassunto delle misure areali dei ghiacciai e della variazione areale frazionata (FAC) 1975/76-1998 per ogni bacino fluviale e classe dimensionale. È indicato il numero dei ghiacciai non inclusi nel 1998.

Table 2 - Summary of glacier area measurements and fractional area change (FAC) 1975/76-1998 for each river basin and size class. The number of glaciers that were undetected in 1998 is noted.

Bacino del Fiume Saskatchewan Nord (escluso Brazeau) / North Saskatchewan River Basin (less Brazeau)						
Classe areale / Area class (km ²)	1975		1998		FAC (%)	
	Numero/ Count	Area (km ²)	Numero / Count	Area (km ²)	%	1 σ
0*			147*			
0.0<0.01	8	0.06	68	0.39	-84	32
0.01<0.1	159	8.02	180	7.28	-83	28
0.1<1	267	89.0	163	51.4	-58	33
1<10	44	117	34	88.1	-29	22
10 <100	8	179	5	158	-7.9	4.7
Total	484	393 \pm 30	450	306 \pm 20	-22	
Bacino del Fiume Saskatchewan Sud (escluso Oldman) / South Saskatchewan River Basin (less Oldman)						
Classe areale / Area class (km ²)	1976	1998	FAC (%)		%	1 σ
	Numero/ Count	Area (km ²)	Numero / Count	Area (km ²)		
0*			181*			
0<0.01	11	0.08	57	0.36	-96	13
0.01<0.1	179	8.87	132	4.76	-90	21
0.1<1	153	43.3	84	26.7	-67	30
1<10	26	86.2	18	56.6	-26	13
10 <100	0					
Total	369	138 \pm 20	291	88.4 \pm 10	-36	

* non individuato / not detected

Risultati ed analisi

Variazioni areali dei ghiacciai, 1975/76-1998

Tra il 1975 ed il 1998 la copertura glaciale del settore NSRB è diminuita di 87 ± 17 km² (22 %) e di 50 ± 12 km² (36 %) nel periodo 1976-1998, per il settore SSRB. In tab. 2 è riassunta la proporzione dell'area complessiva coperta da ghiacciai e la popolazione di ghiacciai per ogni classe dimensionale.

Le distribuzioni cumulative ipergeometriche di frequenza dimensionale per il 1975/76 e il 1998 iniziano a mostrare differenze significative per i ghiacciai con area $< \sim 1$ -2 km² (vedi dati di supporto). I ghiacciai più piccoli di questa classe rappresentano ~ 90 e 95 % della popolazione per i settori NSRB e SSRB rispettivamente. Tuttavia, questi ghiacciai rappresentano (1975/76) ~ 25 e 40 % di tutta la superficie glaciale, rispettivamente nei settori NSRB e SSRB. Nel 1998 queste percentuali erano ridotte a ~ 20 e 35 %.

I dati che descrivono le riduzioni areali per l'insieme totale del bacino imbrifero sono influenzati dai numerosi ghiacciai non più rivelati nel 1998.

La frammentazione osservata risulta evidente nel fatto che le differenze di conteggio complessivo non sono uguali al numero dei ghiacciai non inclusi.

Results and analysis

Glacier area changes, 1975/76-1998

Between 1975 and 1998 glacier cover in the NSRB decreased by 87 ± 17 km² (22 %); and 50 ± 12 km² (36 %) between 1976 and 1998 for the SSRB. The proportion of the total glacier covered area and glacier population for each size class is summarized in Table 2.

Cumulative hyper-geometric size-frequency distributions for 1975/76 and 1998 begin to exhibit significant differences for glaciers $< \sim 1$ -2 km² (see supporting data). Glaciers smaller than this represent ~ 90 % and 95 % of the glacier population for the NSRB and SSRB respectively. These glaciers however, only represented (in 1975/76) ~ 25 % and 40 % of the total glacier area in the NSRB and SSRB respectively. By 1998 these proportions were reduced to ~ 20 and 35 %.

The data describing the overall basin ensemble area reductions are influenced by the numerous glaciers that were not detected in 1998.

Fragmentation was observed and evident in that the ensemble count differences are not equal to the number of undetected glaciers.

The fractional area change (FAC) has a strong asso-

La variazione areale frazionata (FAC) è in stretta associazione con la classe areale; le classi dei ghiacciai più piccoli presentano valori di FAC maggiori. La superficie media (1975/76) e il valore medio della FAC per ogni classe di ghiacciai risulta in genere ben definita; tuttavia, i ghiacciai con area superficiale inferiore a 1 km² mostrano una variabilità della FAC che supera le differenze tra le varie classi inferiori (vedi i valori 1 sigma in tabella 2 e i dati di supporto).

Nonostante l'errore significativo nella stima dell'area dei ghiacciai in questa classe dimensionale, vi è tuttavia l'indicazione che la situazione topografico-geomorfologica di un singolo ghiacciaio possa esercitare un effetto significativo sul clima locale e sulla risposta del ghiacciaio, superiore a quello che potrebbe essere intuito dalla sola dimensione. Per esempio i ghiacciai collocati in modo da ricevere abbondante neve dal trasporto eolico e/o da valanghe, possono essere relativamente immuni dagli effetti della variabilità del clima in genere (Kuhn, 1993).

Un'ulteriore considerazione riguarda i ghiacciai piccoli: se collocati in terreno favorevole, questi possono comportarsi come *glacier réservoir* (Lliboutry, non pubblicato), che fluiscono lentamente in relazione alla tensione di taglio basale, di modo che ogni variazione dei margini è il risultato diretto di una variazione di massa dell'anno corrispondente (Haeberli et al., 1989). Tali variazioni non potrebbero essere rivelate con un approccio orientato sull'area, nonostante vi sia chiaramente una riduzione di spessore.

Per quanto concerne il bilancio, l'insieme delle nostre osservazioni confermano quelle di Granshaw e Fountain (2006) nel loro lavoro su circa 320 ghiacciai del complesso del *North Cascade National Park* (Washington, USA); e confermano anche l'affermazione che i piccoli ghiacciai, con rapporto area/volume maggiore rispetto a quello dei più grandi, si ritirano più rapidamente. DeBeer e Sharp (2007) hanno analizzato la variazione 1951/52-2001/02 evidenziata da un campione di 59⁽²⁾ ghiacciai situati sui versanti orientali delle Montagne Rocciose Meridionali (coincidenti con una piccola percentuale della regione qui in esame). Nel loro studio, la relazione classe areale-FAC suggerisce per i piccoli ghiacciai cambiamenti meno rapidi rispetto ai più grandi. Ciò può riflettere la circostanza che i piccoli ghiacciai, predominanti nella zona (e nel loro campione) hanno raggiunto una soglia tale da porli sotto il prevalente controllo di fattori locali.

L'esame dei fattori topografici influenti non costituisce parte del nostro studio. Ugualmente, osserviamo nel nostro campione, a livello di bacino imbrifero, che i numerosi piccoli ghiacciai siti a quote elevate e poco influenzati dagli effetti della radiazione solare hanno subito un cambiamento relativamente modesto; ciò, a dispetto di una collocazione sul lato sottovento dello spartiacque continentale. DeBeer e

ciation with area class, with smaller glacier classes exhibiting larger FACs. The mean area (1975/76) and mean FAC for each class is generally well defined, however glaciers less than 1 km² exhibit FAC variability that overwhelms the differences between the smaller classes (see 1 sigma values in Table 2 and supporting data).

Notwithstanding the significant error in estimating the area of glaciers in these size classes, this suggests that the geological setting for an individual glacier may exert significant control on local climate and the glacier response; exceeding that due to what might be intuitive from size alone. For example, glaciers situated such that they receive reliable nourishment from wind drift and/or avalanching snow may be relatively immune to the effects of climate variability in general (Kuhn, 1993).

An additional consideration is that small glaciers, if suitably situated in the terrain, may behave like *glacier réservoirs* (Lliboutry, unpublished) which flow slowly under low basal shear stresses such that any margin variations are the direct result of mass change in the corresponding year (Haeberli et al., 1989). Such variations would not be detected using an area-wise approach, though clearly thickness change is occurring.

On balance, our ensemble observations support those by Granshaw and Fountain (2006) in their assessment of ~ 320 glaciers in the *North Cascade National Park* Complex (Washington, USA); and the assertion that smaller glaciers, having a larger area-to-volume ratio than larger glaciers, should shrink faster. DeBeer and Sharp (2007) analysed the 1951/52-2001/02 change exhibited by a sample of 59⁽²⁾ glaciers located in the southern Rocky Mountain eastern slopes (coincident with a small portion of the present study region). The size class-FAC relationship exhibited in their data suggests that smaller glaciers are changing less rapidly than are the larger ones. This may reflect the circumstance that the smaller glaciers that dominate the population for the region (and their sample) have attained a size/situation threshold such that they are overwhelmingly controlled by local factors.

While an examination of the topographic controls on the observed variability is not part of the present assessment, we note anecdotally in our own basin-wide sample that numerous small glaciers perched at relatively high elevations and situated such that they are less susceptible to the effects of solar radiation, have undergone relatively little change; this despite being situated well leeward of the continental divide.

DeBeer and Sharp also note that the large glaciers in their sample may also tend to occupy a greater elevation interval, with the larger detected changes being the result of relatively more area having once extended to lower elevations.

This is all together reasonable, and it suggests to us that analyses of detected area-wise changes over an

Sharp notano inoltre che, nel loro campione, i grandi apparati occupano un intervallo altitudinale più esteso, mentre le variazioni rilevate sono il risultato di una superficie un tempo estesa a quote inferiori.

Nel complesso ciò appare ragionevole e suggerisce che l'analisi delle variazioni areali su un intervallo definito dalla disponibilità dei dati di rilevamento deve considerare i tempi di risposta del volume (ad es., un ghiacciaio rispondente a una situazione climatico-idrologica precedente che ne favoriva l'avanzata e che, contemporaneamente, vede una riduzione complessiva del suo volume).

Variazioni in volume dei ghiacciai correlata al deflusso dei corsi d'acqua

L'importanza della riduzione dei ghiacciai nel sistema idrico del Fiume Nelson è correlata alle esigenze locali e regionali di deflusso dei corsi d'acqua, in una regione a scarse precipitazioni.

In tabella 3 sono tabulate le stime della riduzione in volume dei ghiacciai corrispondenti alle variazioni areali per i maggiori bacini imbriferi dei settori NSRB e SSRB.

Per illustrare la percentuale relativa di questa variazione di volume dei ghiacciai rispetto al deflusso dei corsi d'acqua, sono stati determinati i volumi annuali e quelli di deflusso luglio-settembre (L-A-S) (1975/76-1998) per ognuna delle sette stazioni idrometriche elencate in tabella 4 (per la localizzazione vedi fig. 3). Sono state sommate le variazioni di volume dei ghiacciai (esprese in equivalente d'acqua, assumendo per il ghiaccio una densità di 0,9) per ognuno dei bacini imbriferi a monte delle stazioni idrometriche, tabulando un semplice rapporto di volume. Il confronto con i valori di L-A-S è importante, poiché in questi mesi avviene la maggior perdita di massa dei ghiacciai.

Il contrasto tra il settore NSRB ricco di ghiacciai e il settore SSRB, con pochi ghiacciai, è evidente nella percentuale di copertura glaciale a monte di ciascuna stazione idrometrica (tabella 4).

I rapporti volumetrici annuali per il settore SSRB variano da 2,8-3,7 %, passando a 5,4-13,5 % per il periodo L-A-S. Il rapporto di volume per il Bow River al Lake Louise (13,5) è più tipico dei valori L-A-S presenti per il settore superiore NSRB, dove la percentuale di copertura glaciale e le distribuzioni di frequenza dimensionale sono simili (ad es. 12,5 % per il Fiume Mistaya presso la sezione Saskatchewan Sud e 11,5 % per il Saskatchewan Nord al punto Whirlpool).

La gestione di grandi bacini di accumulo (Abraham Lake), combinata con la presenza della centrale idroelettrica di Bighorn, impedisce di calcolare il valore L-A-S, dato che durante questo periodo il flusso dell'acqua viene ridotto per riempire il serbatoio prima dell'inverno. Un regime di flusso regolato viene rivelato da molti impianti di accumulo nei bacini imbriferi a valle di Banff. Dato che questi impianti sono piccoli, il

intervallo definito by the availability of change detection data, need also consider the glacier volume response times for the sample; i.e. a glacier still responding to a previous hydrologically significant climate variation that is promoting advance of its margins may be coincident with overall glacier volume reductions due to thinning.

Glacier volume changes in relation to streamflow

The significance of glacier wastage in the Nelson River system is related to local and regional requirements for streamflow in this rainshadow region.

The glacier volume change estimates corresponding to the area-wise changes for the major contributing watersheds of the NSRB and SSRB are tabulated in Table 3.

To illustrate the relative proportion of this glacier volume change to streamflow, the annual and July-September (J-A-S) streamflow volumes (1975/76-1998) were determined for each of the seven hydrometric stations noted in Table 4 (see locations in Figure 3). The glacier volume changes (expressed as water equivalent by assuming a specific gravity of 0.9) for each of the watersheds above the hydrometric stations were summed and a simple volume ratio tabulated. Comparison to the J-A-S period is relevant since this is when the majority of the mass wastage occurs.

The contrast between the glacier rich NSRB and the relatively glacier poor SSRB is evident in the percentage glacier cover above each gauge (Table 4). The annual volume ratios for the SSRB range from 2.8 - 3.7 %, increasing to 5.4 - 13.5 % for the J-A-S period.

The volume ratio for the Bow River at Lake Louise (13.5) is more typical of the J-A-S values exhibited in upper NSRB where the percentage glacier cover and glacier size-frequency distributions are similar (e.g., 12.5 % for the Mistaya River near Sask. Crossing and 11.5 % for the North Sask. River at Whirlpool Point).

Operation of the large storage facility (Abraham Lake) in association with the Bighorn hydro-electric generating station precludes calculating a J-A-S value since it is during this period when water is generally held back to fill the reservoir prior to winter. A regulated flow regime is also manifested by several headponding facilities located in the contributing watersheds below Banff. While these facilities are small, the J-A-S volume ratio value for Bow River below Ghost Reservoir should be regarded with some caution.

It is recognised that glacier-fed rivers provide important eco-system services, particularly in headwaters regions (e.g., flow and water temperature regulation, source of disturbance, see f. ex. Petts et al.,

rapporto di volume L-A-S per il Bow River a valle del lago Ghost Reservoir, deve essere considerato con precauzione.

È noto che i fiumi alimentati da acque di fusione glaciale forniscono un apporto importante agli ecosistemi, specialmente in regioni montuose ricche d'acqua (ad es. regolazione del flusso e della temperatura dell'acqua, sorgenti di disturbo; Petts et al., 2006). Tuttavia, forti richieste di deflusso si verificano spesso a valle, dove l'effetto della contrazione dei ghiacciai diviene meno significativo (per i settori NSRB e SSRB vedi ad es. Pietroniro et al., in stampa).

La popolazione dei settori NSRB e SSRB è di circa 3 milioni di persone, la maggior parte residente a distanze considerevoli dalle Montagne Rocciose. È tuttavia interessante determinare l'equivalenza di queste risorse idriche in termini, ad esempio, di utilizzi pro capite⁽³⁾.

La riduzione di volume del ghiaccio nel settore NSRB, espressa in media annuale, è pari all'impiego d'acqua di circa 1,5 milioni di abitanti. Con riferimento alla produzione di energia idroelettrica (valori di punta, Trans-Alta Utilities), l'isolamento della risorsa glaciale dalla maggior parte della popolazione e dai centri industriali, diviene impercettibile nel contesto della *trasmissione* di questa potenza, generata in relativa prossimità delle risorse glaciali.

È chiaro quindi che il concetto di ghiacciaio come risorsa idrica è più complesso di quanto suggeriscano di per sé il dato dimensionale e la prossimità della richiesta di acqua corrente.

Passiamo ora alla discussione sulle variazioni a lungo termine di questa risorsa idrica e alle variazioni climatiche che l'hanno influenzata, sottolineando la drastica contrazione dei ghiacciai nei settori NSRB e SSRB nell'ultima parte del XX secolo.

2006). The greatest requirements for streamflow however, often occur further downstream where the influence of glacier wastage becomes progressively less significant (for the NSRB and SSRB see f. ex. Pietroniro et al. in-press).

Some 3 million people live in the NSRB and SSRB, the great majority an appreciable distance from the Rocky Mountains. Never-the-less it is instructive to determine the equivalence of this water resource in terms of, for example, per capita residential water use⁽³⁾.

The ice volume wastage estimated for the NSRB expressed as an annual average is equivalent to the annual water use of ~ 1.5 million people. With reference to the aforementioned generation of hydro-electric power (peaking demands, Trans-Alta Utilities), the isolation of the glacier resource *by river mile* from most population and industrial centres becomes mute in the context of the *transmission* of that power – power which is generated in relative proximity to the glacier resource.

It is clear from our brief analysis that the notion of glaciers as a water resource is more complex than suggested by glacier size and proximity to streamflow requirements alone.

We now provide some discussion on the longer term variation of this resource and the climate regime shifts that have influenced this variation, thereby placing in context the drastic contraction of the glaciers in the NSRB and SSRB during the later part of the 20th century.

Tabella 3 - Stima delle variazioni di volume dei ghiacciai per i bacini imbriferi di testata più vasti nel sistema del Fiume Nelson (Montagne Rocciose).**Table 3** - Estimated glacier volume changes for the major contributing watersheds of the Nelson River System Rocky Mountain headwaters.

Bacino del Fiume Saskatchewan Nord / North Saskatchewan River Basin (1975-1998)	
Bacini contribuenti / Contributing watershed	Variazioni volume ghiaccio / Ice volume change (km ³)
North Saskatchewan River-Superiore / Upper	-2.484
Peyto Creek	-0.190
Silverhorn Creek	-0.008
Mistaya River	-0.201
Lower Mistaya	-0.031
North Saskatchewan River-Centrale / Central	-0.237
North Saskatchewan River-Inferiore / Lower	-0.014
Siffleur River	-0.381
Cline River	-0.371
White Rabbit Creek	-0.094
North Ram River	-0.077
Clearwater River	-0.210
Totale	-4.298 ± 1.1
Bacino del Fiume Saskatchewan Sud / South Saskatchewan River Basin (1976-1998)	
Bacini contribuenti / Contributing watershed	Variazioni volume ghiaccio / Ice volume change (km ³)
Red Deer River	-0.628
Bow River to Lake Louise	-0.565
Pipestone River	-0.204
Bow River & Brewster Creek	-0.061
Baker Creek	-0.020
Spray River	-0.108
Kananaskis River	-0.313
Lake Minnewanka	-0.027
Ghost River	-0.001
Elbow River	-0.003
Highwood River	-0.033
Totale	-1.962 ± 0.55

Tabella 4 - Variazione regionale dei volumi di ghiaccio in rapporto al volume totale dei deflussi (1975/76-1998) alle stazioni idrometriche nei bacini imbriferi delle Montagne Rocciose, per il sistema idrico del fiume Nelson (vedi figura 3).**Table 4** - Regionalized ice volume change relative to total flow volume (1975/76-1998) measured at streamflow gauges in the Rocky Mountain watersheds of the Nelson River System (see Fig. 3).

Stazione idrometrica / Gauging station	Regime di deflusso / Flow regime	Copertura glaciale / Glacier cover (%)		Rapporto ghiacciaio: deflussi / Glacier : flow volume ratio (%)	
		1975/6	1998	L-A-S / J-A-S	Annuale / Annual
<i>Mistaya River</i> al / near Sask. Crossing	Naturale / natural	13.4	10.7	12.5	7.4
<i>N. Sask River</i> al / at Whirlpool Point	Naturale / natural	16.3	13.7	11.5	7.1
<i>N. Sask River</i> sotto / below Bighorn Plant	Regolato / regulated	9.60	7.55	*	6.1
<i>Red Deer River</i> sotto / below Burnt Timber Ck.	Naturale / natural	1.31	0.89	8.4	3.7
<i>Bow River</i> al / at Lake Louise	Naturale / natural	12.5	9.07	13.5	n/a (5)
<i>Bow River</i> a / at Banff	Naturale / natural	3.36	2.20	6.2	2.8
<i>Bow River</i> sotto / below Ghost Reservoir	Regolato / regulated	1.65	1.03	5.4	n/a

* trattenuto per il riempimento del serbatoio / hold back due to reservoir filling

Discussione

Storia Neoglaciale

La documentazione sulle morene della regione (Luckmann, 2000) e i dati ottenuti dalle caratteristiche geomorfologiche considerate durante la preparazione del Catasto Canadese dei Ghiacciai (ad es. Ommanney et al., 1970) hanno consentito a Demuth e Pietroniro (2003) di delimitare in modo affidabile, su mosaici di ortofoto (1951/52), l'estensione dei ghiacciai allo stadio massimo della Piccola Età Glaciale (1850 ca.). Ciò è stato effettuato per vari bacini imbriferi del NSRB (grazie anche ai rilievi del 1951/52 e degli anni '90), per illustrare le variazioni recenti e del secolo scorso (figura 4).

La figura 4 mostra la riduzione dei ghiacciai nel bacino imbrifero del Fiume Mistaya, da un punto di vista di una struttura spaziale "pezzata", con una rappresentazione tipo perimetro-area. Dalla traiettoria generale perimetro-area è chiaro che il ghiacciaio più grande nel campione evolve a ritmi inferiori rispetto al ghiacciaio più piccolo (quest'ultimo era quello ancora rivelabile nel periodo finale; ad es. negli anni '90 molti ghiacciai non erano più rivelabili). I ghiacciai più piccoli mostrano inoltre un tasso di riduzione accelerato.

Discussion

Neoglacial history

The moraine history documented for the region (Luckman, 2000) and archived records of geomorphological features noted during the development of the Canadian Glacier Inventory (e.g., Ommanney et al., 1970) enabled Demuth and Pietroniro (2003) to confidently delimit on ortho-photo mosaics (1951/52) the glacier extents at the maximum stage of the Little Ice Age (~ 1850). This was done for several watersheds in the NSRB (complimented by glacier delineations from 1951/52 and the 1990s) to illustrate recent and past-century changes (figure 4).

Figure 4 attempts to represent the diminution of glaciers in the Mistaya River watershed from a patchy spatial structure point of view, employing a perimeter-area representation. It is clear from the general perimeter-area trajectory that the largest glacier in the sample is changing at a slower rate than the smallest (the smallest glacier selected was that which was still detectable at the final epoch; i.e. by the 1990s numerous glaciers were undetectable). Moreover, the smaller glaciers show an accelerated rate of diminution.

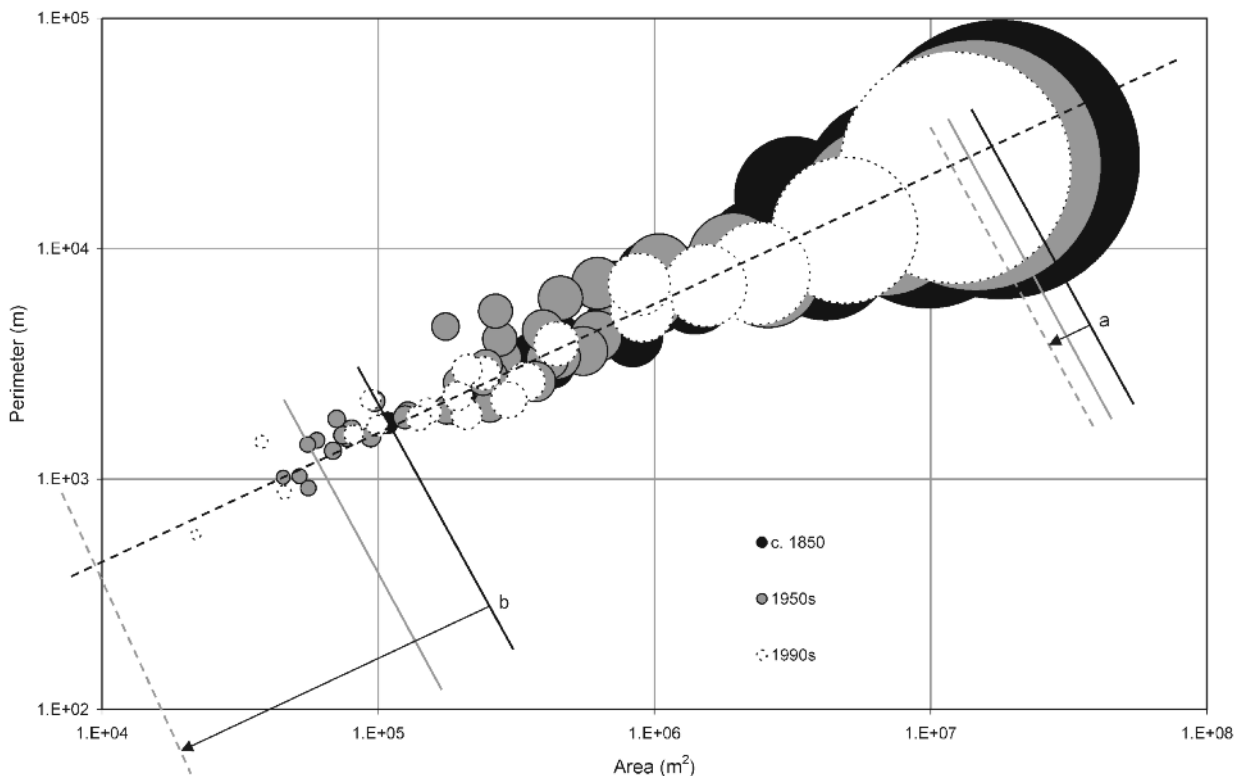


Figura 4 - Esempio di ritiro di un ghiacciaio dal massimo Neoglaciale nel bacino imbrifero del sistema del Fiume Nelson e del Fiume Mistaya. La copertura glaciale è rappresentata come funzione log perimetro/log area. È indicata la variazione per tre epoche, con linee fiduciali che illustrano il tasso di cambiamento per il ghiacciaio più grande (a) e per il ghiacciaio più piccolo (b) nel bacino imbrifero (da Demuth e Pietroniro, 2003).

Figure 4 - Example of glacier contraction since the *Neoglacial* maximum in the Nelson River system headwaters, Mistaya River watershed. Glacier cover is expressed as a log perimeter – log area function. The variation is shown for 3 epochs, with the fiducial lines illustrating the rate of change for the largest (a) and smallest (b) glacier in the catchment (after Demuth and Pietroniro, 2003).

Ricordando la natura delle distribuzioni cumulative ipergeometriche della frequenza dimensionale, ipotizziamo che i ghiacciai inferiori a 1-2 km² inizino ad essere sottoposti ad un effetto *perimetro-area* divenendo gradualmente suscettibili di avvezione di energia dalla zona circostante. È oggetto di ricerca recente eseguita nel bacino imbrifero se ciò debba essere posto in relazione principalmente alla dimensione del ghiacciaio o se si tratti effettivamente di un problema di apporto catabatico (comunicazione personale di Munro). Le nostre osservazioni suggeriscono che la sensibilità dei ghiacciai a variazioni (climatiche) idrologiche aumenta al diminuire della loro dimensione; notiamo anche che i tempi di risposta del volume per tutti i ghiacciai del campione sono decisamente brevi.

La risposta dei ghiacciai regionali alla variazione del clima è ben illustrata nei lavori di Luckman (2000) e Watson e Luckman (2005). A partire da un insieme di dati dendrocronologici e lichenometrici su, rispettivamente, 48 e 18 siti glaciali, Luckman ha formulato lo schema generale di formazione delle morene dal 1650 circa (figura 5). La data della morena più antica corrisponde alla massima estensione di ogni ghiacciaio durante il Neoglaciale; viene inoltre indicato il numero di morene che corrispondono a espansioni ripetute meno estese.

Recalling the nature of the cumulative hyper-geometric size-frequency distributions, we suggest that glaciers smaller than 1-2 km² begin to be overwhelmed by a *perimeter-area* effect and become increasingly susceptible to energy advection from areas exterior to them. Whether this is related primarily to glacier size or whether it is really a matter of down-glacier wind fetch is the subject of current research being conducted in the watershed (Munro personal communication). To the extent that our observations suggest that glacier sensitivity to hydrologically significant climate changes increases with decreasing glacier size, we also note that the volume response times for all of the glaciers in the sample are significantly shorter than the time intervals between the epochs.

The response of the regions' glaciers to climate forcing is well illustrated by the work of Luckman (2000) and Watson and Luckman (2005). From an ensemble of dendrochronology and lichenometry data at 48 and 18 glacier sites respectively, Luckman establishes the general pattern of moraine building events since c. 1650 (figure 5). In figure 5 the date of the oldest moraine is also the date of the maximum extent of each glacier during the Neoglacial, while the number of moraines corresponding to less extensive re-advances are also shown.

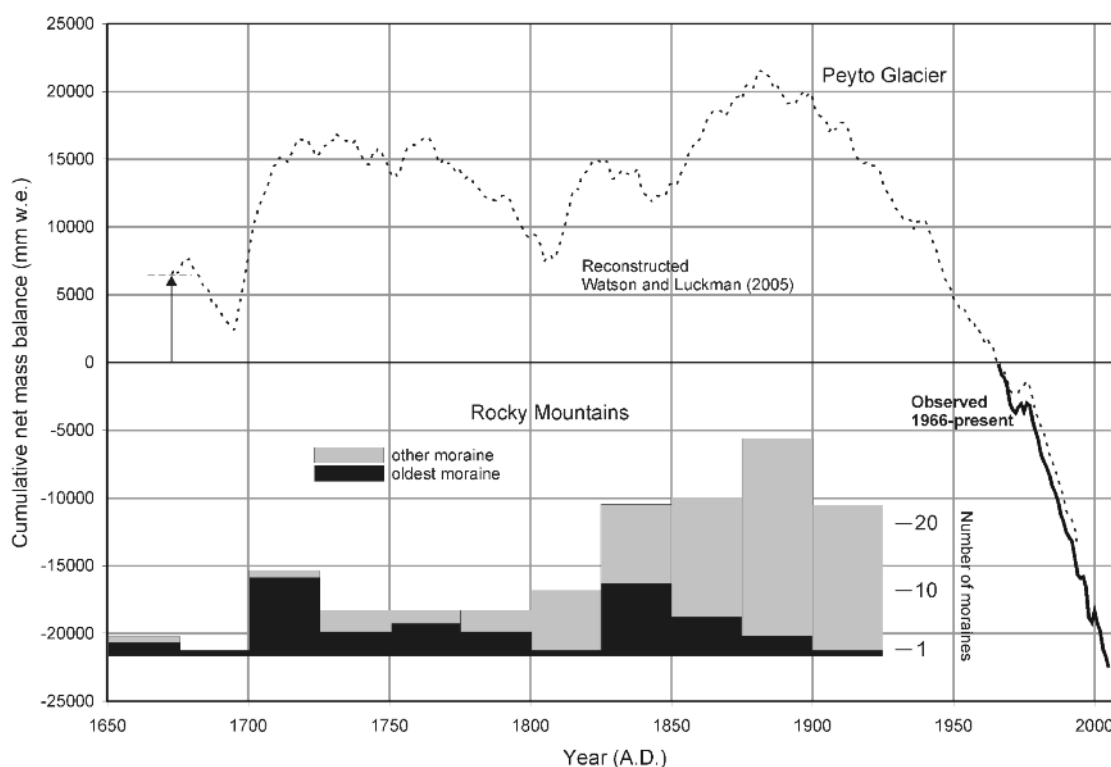


Figura 5 - Registrazione del numero di morene Neoglaciali nelle Montagne Rocciose canadesi (da Luckman, 2000; Watson e Luckman, 2005) in relazione al bilancio di massa netto del Ghiacciaio Peyto, espresso come valore cumulato totale; spostato in basso, per meglio illustrare la corrispondenza con le serie di bilanci netti cumulati osservati a partire dal 1966.

Figure 5 - *Neoglacial* moraine record for the Canadian Rocky Mountains (after Luckman, 2000; Watson and Luckman, 2005) in relation to the reconstructed net mass balance for Peyto Glacier; expressed as a cumulative total and shifted to better illustrate the correspondence with the observed cumulative net balance series starting in 1966.

Il bilancio di massa netto del Ghiacciaio Peyto (localizzazione in fig. 3a) è rappresentato come una serie cumulativa e messo in relazione con i dati delle morene (dettagli in Watson e Luckman 2005). Sono anche riportati i dati osservati (da Demuth e Keller, 2006), con i dati ricostruiti, spostati come indicato, per corrispondere alla situazione di riferimento delle serie dei bilanci di massa.

È chiaro che i due episodi significativi della formazione di morene (prima parte XVIII e XIX secolo) corrispondono con i due intervalli persistenti di bilancio di massa positivo, evidenti nella ricostruzione per il Ghiacciaio Peyto. Maggiori intervalli di formazione di morene (quelli che limitano a valle l'estensione del ghiacciaio) sono associati o seguono i cambiamenti da bilancio di massa positivo a negativo. Intervalli più brevi di bilancio di massa positivi sono associati con le morene di metà '700 e del XIX secolo.

Si pensa che il massimo Neoglaciale per la regione in studio sia stato raggiunto alla metà del XIX secolo (Luckman et al., 1993; Luckman, 2000). L'evidenza derivante da numerosi terreni proglaciali, suggerisce che si sono formate piccole morene da avanzate intermedie verso la fine del XIX secolo e nei primi anni del XX secolo. Dappertutto, durante il XX secolo, le fronti dei ghiacciai nella maggior parte dei siti sono state in fase di ritiro, salvo espansioni degli anni '70 e '80 in talune località. Ciò che appare più consistente nella ricostruzione dei dati di bilancio di massa, è il decremento drammatico dal decennio 1880-90 (figura 5). Inoltre questo declino corrisponde con i dati della sintesi di Demuth e Keller (2006), usando le variazioni di volume stimate da Wallace (1995) per il periodo 1896-1966, e da Glenday (1991) per il 1966-1989; il Ghiacciaio Peyto ha perso il 70% del volume dalla prima fotografia documentata del ghiacciaio (1896) (Figura 6). Il massimo Neoglaciale del Ghiacciaio Peyto sembra si sia avuto tra 1836 e 1841, in base ad alberi piegati o sradicati dal ghiacciaio (Luckman, 2006). Un'altra evidenza geobotanica suggerisce che il ghiacciaio è passato su superfici a vegetazione matura almeno 4 volte durante gli ultimi 3000 anni (fig. 6). Lungo una sezione longitudinale parziale del Ghiacciaio Peyto si vedono chiaramente la drammatica riduzione superficiale e il ritiro della fronte rispetto alla massima espansione Neoglaciale (fig. 6). Questo dato, unitamente al rilevamento radar da aereo (Demuth e Hopkinson, 2006) evidenzia un'accelerazione verso uno stadio terminale, mai notato per vari millenni (Luckman, 2006). Che cosa ha alimentato i drammatici cambiamenti dell'ultimo secolo, e recenti, del Ghiacciaio Peyto e dei ghiacciai della regione? I bilanci di massa di Watson e Luckman (2005) risultano utili, dato che essi considerano tanto il bilancio invernale che estivo.

The reconstructed net mass balance for Peyto Glacier (location in figure 3a) is represented as a cumulative series and shown in relationship to the moraine record (details in Watson and Luckman 2005). The observed record is also shown (after Demuth and Keller 2006), with the reconstructed record shifted as indicated to correspond with the datum of the observed mass balance series.

It is clear that the 2 significant moraine-building episodes (early 18th century and mid 19th century) correspond with the two persistent intervals of positive mass balance evident in the Peyto Glacier reconstruction. Major moraine-building intervals (those marking the down-valley limits of glaciers) are associated with, or follow, the change from positive to negative mass balance. Shorter intervals of positive mass balance are associated with mid-18th and late 19th century moraines.

The Neoglacial maximum for the region is generally thought to have been attained in the mid-19th century (Luckman et al., 1993; Luckman, 2000). Evidence from numerous glacier forelands suggest that several smaller re-advance moraines were formed short distances up-valley of the maximum stage in the late 19th and early 20th centuries. Overall, during the 20th century, glacier fronts at most sites have been receding except for a minor re-advance at some sites in the 1970s and 1980s. What is most conspicuous in the reconstructed mass balance record is the dramatic cumulative decrease since the 1880s (Figure 5). Moreover, this decline corresponds with the synopsis by Demuth and Keller (2006), using volume changes estimated by Wallace (1995) for 1896-1966, and Glenday (1991) for 1966-1989, that Peyto Glacier had lost 70 % of its volume since the first documented photograph of the glacier was taken in 1896 (Figure 6). The Neoglacial maximum at Peyto Glacier appears to have been expressed between 1836 and 1841; based on trees tilted or killed by the glacier (details in Luckman, 2006). Other geo-botanical evidence suggests that the glacier has overridden mature forested surfaces at least 4 times during the last 3000 years (Figure 6). With the snout of Peyto Glacier shown in profile along a mid-span longitudinal transect, the dramatic surface down-wasting and retreat of the terminus in relation to the Neoglacial maximum stage are clear (Figure 6). This and recent airborne laser altimeter surveys by Demuth and Hopkinson (2006) suggest acceleration towards a reduced stage not in evidence for several millennia (Luckman, 2006). So what has fuelled the past-Century and recent dramatic changes of Peyto Glacier and, by reasonable extension, the glaciers of the region? The mass balance reconstruction of Watson and Luckman (2005) is instructive since they considered both the winter and summer mass balance.

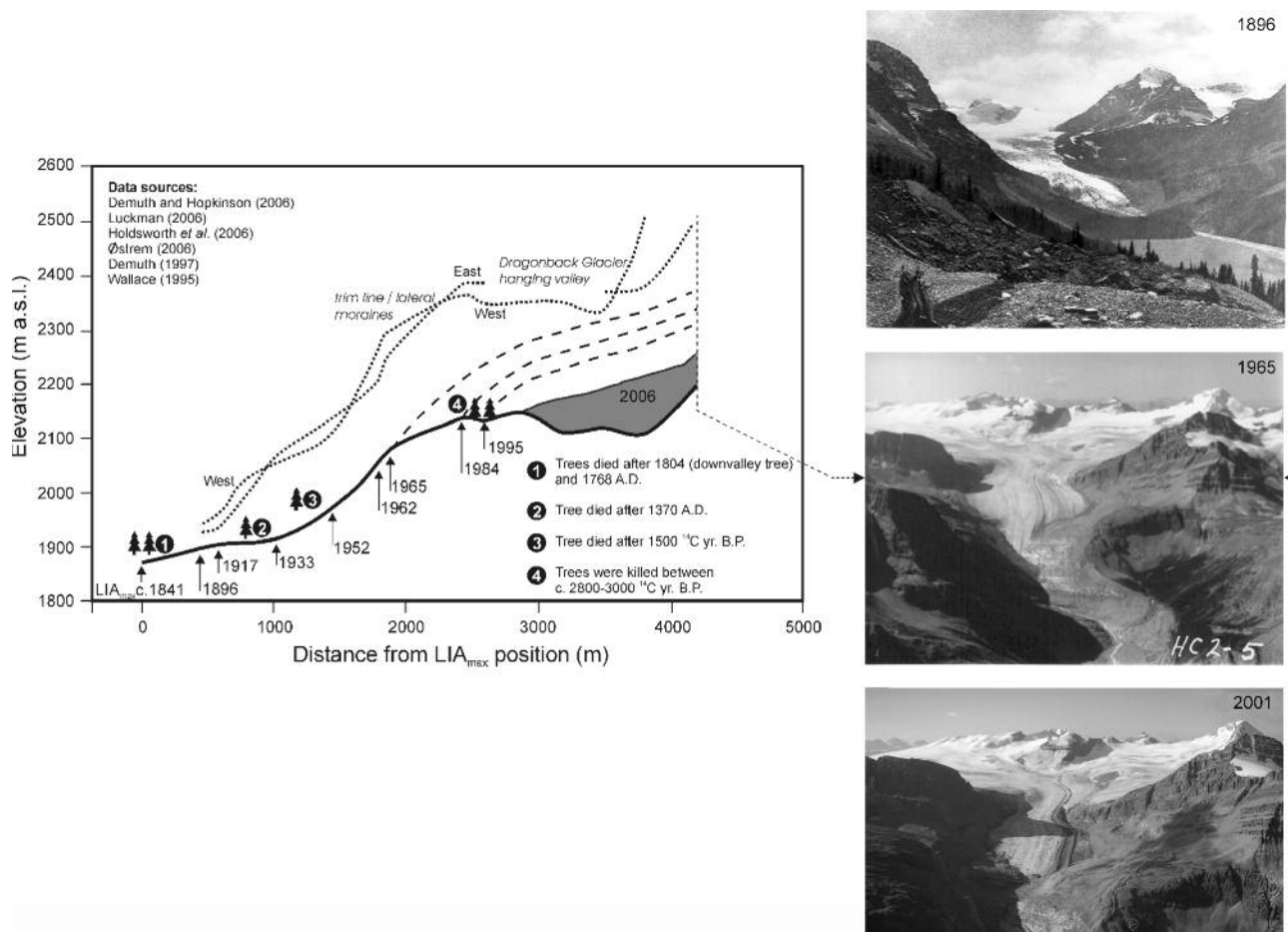


Figura 6 - Fronte del ghiacciaio Peyto, mostrata in profilo lungo una sezione longitudinale, che illustra la perdita superficiale e le posizioni della lingua, in relazione alla massima espansione Neoglaciale (adattato di Luckman, 2006). L'evidenza geobotanica suggerisce che il ghiacciaio ha sorpassato superfici con vegetazione matura almeno 4 volte negli ultimi 3000 anni. Le foto oblique indicano i traguardi, le morene laterali e la contrazione del ghiacciaio: 1896 (W. D. Wilcox, con il permesso del Whyte Museum delle Montagne Rocciose Canadesi (lastra NA 66-561); 1965, W.E.S. Henoch; 2001, M.N. Demuth.

Figure 6 - The snout of the Peyto Glacier shown in profile along a mid-span longitudinal transect illustrating surface wasting and terminus positions in relation to the *Neoglacial* maximum stage (adapted from Luckman 2006). The geo-botanical evidence suggests that the glacier has overridden mature forested surfaces at least 4 times during the last 3000 years. Oblique photos illustrate trimlines, lateral moraines and contraction: 1896, W.D. Wilcox, with permission Whyte Museum of the Canadian Rockies (plate NA 66-561); 1965, W.E.S. Henoch; 2001, M.N. Demuth.

Nella misura in cui i bilanci di massa invernali ed estivi sono rappresentativi delle precipitazioni e della temperatura, la dimostrazione che essi sono in correlazione per tutto il periodo di ricostruzione con un bilancio di massa netto quasi uguale (0,75 e 0,8 rispettivamente, $p < 0.05$), fornisce una prospettiva. Vi sono tuttavia periodi, nei bilanci stagionali, nei quali l'alimentazione o la fusione del ghiacciaio dominano o rafforzano la risposta del bilancio netto (Demuth e Keller, 2006). Circa il 90 % del deflusso fluviale delle regioni NSRB e SSRB ha origine nelle Montagne Rocciose (SSRB, 2007), per lo più in forma di neve stagionale. Dato che questa è la stessa neve che alimenta i ghiacciai delle Montagne Rocciose, concentreremo la discussione sull'effetto delle variazioni climatiche invernali regionali.

To the degree that winter and summer balances are representative of precipitation and heat flux respectively, their demonstration that the seasonal balances correlate over the entire reconstruction period with the net mass balance about equally (0.75 and 0.8 respectively, $p < 0.05$) provides one perspective. There are however intervals in the reconstructed and observed seasonal balance record where glacier nourishment or glacier melting either dominate or reinforce the net balance response (Demuth and Keller, 2006). Approximately 90 % of the streamflow for the NSRB and SSRB originates in the Rocky Mountains (SSRB, 2007), mostly in the form of seasonal snow. Since it is this same snow that nourishes the Rocky Mountain glaciers, we will concentrate the Discussion on the influences of variations in the region's winter climatology.

La climatologia invernale del XX secolo

Una ricerca della variabilità su scala sinottica del bilancio di massa dei ghiacciai nel Nord America occidentale, fatta da Walters e Meier (1989), ha rivelato che gli anni di bilancio di massa positivi dei ghiacciai nell'Alaska tendono a coincidere con gli anni di bilanci di massa negativi nella Cordigliera meridionale. Walters e Meier (1989) hanno citato una modulazione dello schema di circolazione nel Nord-America pacifico - un sistema di catene e di valli che influenzano il flusso locale di aria carica di umidità attraverso la Cordigliera - ed in particolare l'effetto di deflessione del centro di bassa pressione delle Aleutine sul sistema atmosferico che reca la neve. Questo lavoro ha esaminato molti studi che documentano gli spostamenti del regime oceano-atmosfera e il loro effetto sulla variabilità spaziale e temporale della copertura nevosa e del bilancio di massa dei ghiacciai (ad es., McCabe e Fountain, 1995; Brown e Goodison, 1996; Moore e McKendry, 1996; Hodge et al., 1998; Bitz e Battisti, 1999; Moore e Demuth, 2001). Demuth e Keller (2006) hanno applicato molto di questo lavoro nel contesto del Ghiacciaio Peyto e degli spostamenti di frequenza degli schemi di circolazione atmosferica che portano la neve e che influenzano le Montagne Rocciose.

Anzitutto questi spostamenti di regime sono in relazione con le anomalie di temperatura superficiale delle acque dell'Oceano Pacifico, ad esempio, per l'Oscillazione Pacifica Decadale (PDO; Zhang et al., 1997; Mantua et al., 1997) e la sua relazione con il PNA. Il PDO mostra una persistenza di circa 20-30 anni. La cosiddetta "fase calda" del PDO sembra condizionare il flusso meridionale di aria più secca invernale nella Cordigliera. In corrispondenza lo schema del PNA è intensificato con la posizione e la forza del basso delle Aleutine, che favorisce flussi sud-occidentali anormalmente caldi sul Nord-Est del Pacifico. In generale i percorsi delle perturbazioni sono spostati verso N, togliendo quindi umidità alla Cordigliera meridionale e alle Prairies occidentali (Moore e Demuth, 2001; Demuth e Keller, 2006). Presentiamo l'indice PDO (1901-2000, inverno = nov-mar) accanto al bilancio di massa invernale per il Ghiacciaio Peyto, ricostruito e osservato per il XX secolo (fig. 7). Tale bilancio è illustrato usando valori interannuali (medi) e scostamenti cumulativi normalizzati dal valore medio dei dati (in basso), che mettono in rilievo l'evidenza temporale e significativa dei maggiori scostamenti dalla media. Gli scostamenti di regime evidenti nel bilancio di massa invernale hanno luogo in corrispondenza con gli scostamenti di regime PDO, specialmente del 1947 e 1976. È evidente che tali scostamenti corrispondono a periodi, corti o prolungati, con bilanci di massa negativi (figura 5)⁽⁴⁾. Con riferimento alla biforcazione N-S dei bilanci di massa, notata da Walters e Meier (1989), la fig. 8 mostra il bilancio invernale di alcuni ghiacciai

20th century winter climatology

An investigation of the synoptic-scale variability of glacier mass balance in western North America by Walters and Meier (1989) revealed that years of positive glacier mass balance in Alaska tended to coincide with negative mass balance years in the southern Cordillera. Walters and Meier cited a modulation of the Pacific North America (PNA) circulation pattern - a system of ridges and troughs influencing the zonal flow of moisture-laden air across the Cordillera - and in particular, the steering effect of the Aleutian low pressure centre upon snow-bearing weather systems. This work spawned numerous studies documenting ocean-atmosphere regime shifts and their influence on the spatial and temporal variability of snowcover and glacier mass balance (e.g., McCabe and Fountain, 1995; Brown and Goodison, 1996; Moore and McKendry, 1996; Hodge et al. 1998; Bitz and Battisti, 1999; Moore and Demuth, 2001). Demuth and Keller (2006) cast much of this work into the context of Peyto Glacier and shifts in the frequency of snow-bearing atmospheric circulation patterns influencing the Rocky Mountains.

Principally, these regime shifts are related to Pacific Ocean SST (Sea Surface Temperature) anomalies as defined, for example, by the Pacific Decadal Oscillation (PDO; Zhang et al., 1997; Mantua et al., 1997) and its relationship with the PNA. The PDO exhibits a persistence of some 20-30 years. The so-called *warm phase* of the PDO appears to manifest the Meridional flow of dryer air into the Cordillera in winter. Correspondingly, the PNA pattern is intensified with the position and strength of the Aleutian low promoting anomalously warm southwesterly flows over the northeastern Pacific. In general, storm tracks are biased northward, thereby starving the southern Cordillera and western Prairies of moisture (e.g., Moore and Demuth, 2001; Demuth and Keller, 2006). The PDO index (1901-2000, winter = November-March) is presented along side the 20th Century reconstructed and observed winter mass balance for Peyto Glacier (figure 7). The winter balance is depicted using inter-annual values (middle), and normalized *cumulative* departures from the record mean (bottom) that enhance recognition of the timing and significance of major shifts in the mean. Obvious regime shifts in the winter balance occur in association with the well-documented PDO regime shifts, particularly 1947 and 1976. Notably, the timing of these regime shifts corresponds with both short and more persistent periods of continuously negative net balances (Figure 5)⁽⁴⁾. Referring back to the North-South mass balance bifurcation noted by Walters and Meier (1989), Figure 8 depicts the winter mass balance for the reference mass balance glaciers of the southern and northern Cordillera, also expressed as normalized

della Cordigliera meridionale, espressi come scostamenti normalizzati dalle medie individuali. La coerenza spaziale e temporale dello spostamento di regime del 1976 è sorprendente e riflette l'ampia variazione regionale dell'apporto di umidità invernale.

Sintesi della discussione

Nell'insieme, appaiono evidenti due fatti. In primo luogo: la ricostruzione di Watson e Luckman appare utile per il nostro lavoro di descrizione dello stato e dell'evoluzione delle risorse glaciali sui pendii orientali delle Montagne Rocciose.

cumulative departures from the individual record means. The spatial and temporal coherence about the 1976 regime shift is striking and reflects the broad regional variation of moisture delivery in winter.

Discussion summary

Taken together, two things are evident. First, the Watson and Luckman reconstruction appears to be useful in our effort to describe the state and evolution of the glacier resources of the Rocky Mountain eastern slopes.

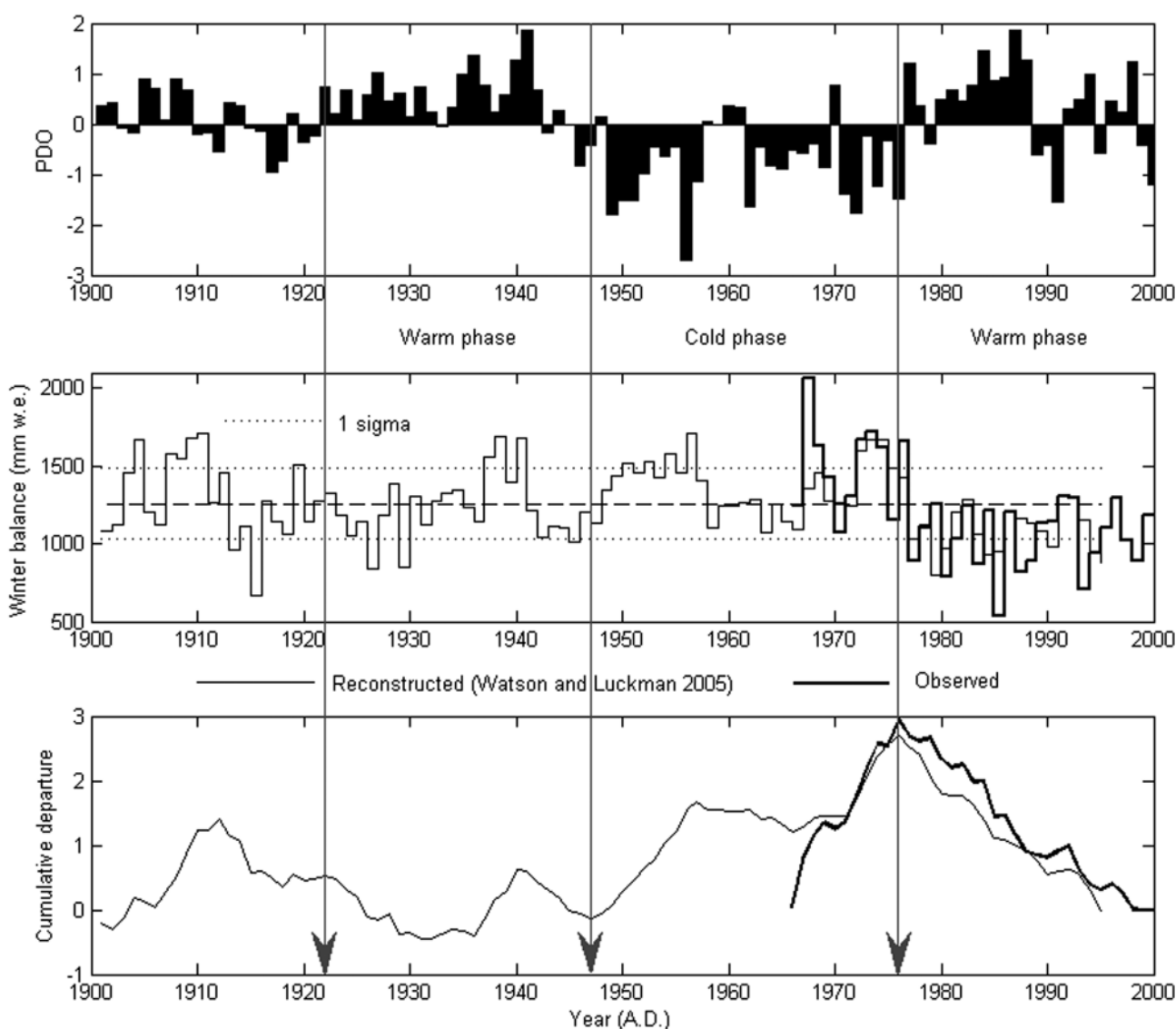


Figura 7 - Le variazioni di regime evidenti nell'inverno (Novembre-Marzo), le anomalie di temperatura della superficie oceanica (Oscillazione Pacifica Decadale, da Mantua et al., 1997) nonché il bilancio di massa invernale del XX secolo, ricostruito ed osservato per il ghiacciaio Peyto (espresso come scostamento cumulativo normalizzato dalla media).

Figure 7 - The regime shifts evident in winter (Nov-Mar) SST anomalies (Pacific Decadal Oscillation, after Mantua et al. 1997) and the 20th century reconstructed and observed winter mass balance for Peyto Glacier (also expressed as a cumulative normalized departure from its mean).

In secondo luogo, l'alimentazione dei ghiacciai ha un ruolo importante nella regione in esame, le cui risposte clima-ghiacciaio sono ritenute dominate dalle condizioni estive. Una persistente alimentazione sotto la media dal 1976, ha rafforzato l'impatto dell'innalzamento delle temperature minime e massime estive, evidenziato nelle decadi recenti (Luckman et al. 1998; Munro, comunicazione personale). In particolare, queste condizioni climatiche sembra che abbiano contribuito alla riduzione drastica della copertura glaciale per il periodo 1975-1998 documentato in questo studio. Pensiamo che il drammatico assottigliamento ora documentato con le tecniche del *remote sensing* (ad es. Hopkinson e Demuth, 2006), riferite alla cartografia disponibile ed alla morfostratigrafia (figura 6), sia il risultato: 1) dell'incremento della velocità di fusione nel XX secolo e, 2) dell'effetto di riduzione del flusso di massa nelle zone di accumulo (attualmente divenuto evidente dai tempi di risposta del volume dei ghiacciai della regione). Questi fattori incidenti si estendono alle osservazioni della minore copertura di nevato (Moore e Demuth, 2001), nonché alla riduzione significativa dell'albedo di onde corte sulle zone glacializzate, fattore questo misurato dallo spazio (ad es., AVHRR e MODIS, dati non pubblicati di Trichtchenko e Demuth). Insieme, questi fattori modificano la variabilità dell'accumulo nel tempo e la regolazione del deflusso dovuta dalla presenza di ghiacciai, e contribuiscono ad evidenziare il ciclo idrologico della regione in esame.

Second, glacier nourishment plays an important role in the study region, whose glacier-climate responses are generally thought to be dominated by summer conditions. Persistent below average glacier nourishment since 1976 has reinforced the impact of rising summer minimum and maximum air temperatures in evidence over the recent decades (Luckman et al., 1998; Munro personal communication). Notably, these climate conditions appear to have contributed to the drastic ice cover diminution for the 1975 - 1998 period documented in this study. We suggest that the dramatic thinning now being documented with remote sensing techniques (e.g., Hopkinson and Demuth, 2006) referenced to available legacy mapping and morpho-stratigraphy (Figure 6) is the result of: i) increasing late 20th Century melt rates; ii) the effect of decreasing mass flux from the regions' accumulation areas (now becoming apparent within the volume response times of the regions' glaciers). The impacts extend to observations of declining firn pack (Moore and Demuth, 2001) as well as significant reductions in shortwave albedo over glacierized regions as measured from space (e.g., AVHRR and MODIS, unpublished data Trichtchenko and Demuth). These factors all combine to modify the time variant storage and flow regulation afforded by the presence of glaciers, and contributes to an enhancement of the hydrological cycle for the study region.

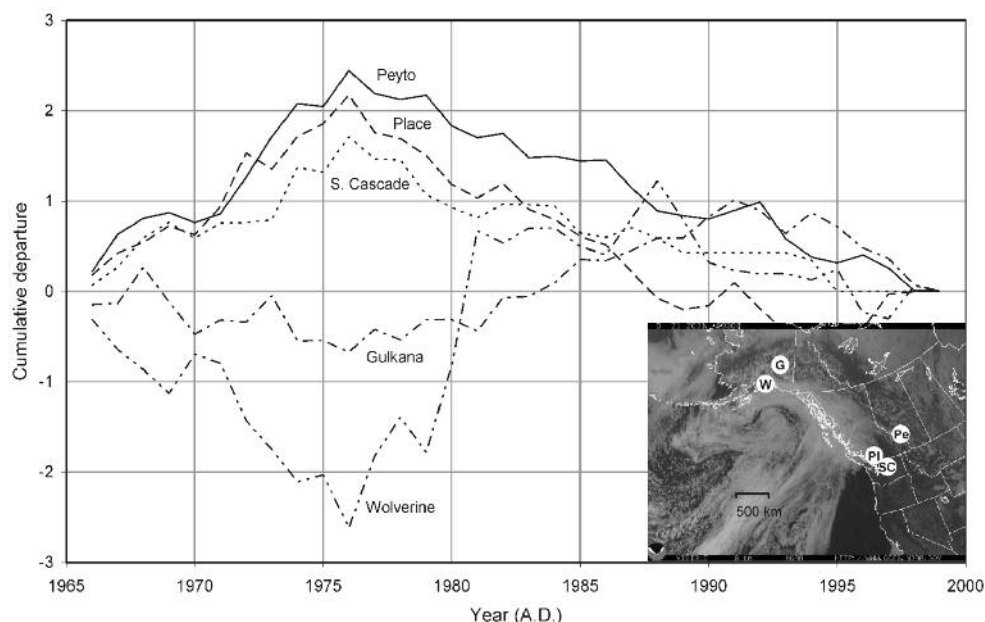


Figura 8 - Biforcazione regionale dei bilanci di massa invernali (espressi come scostamento cumulativo normalizzato dalla loro media) per i ghiacciai-tipo per lo studio del bilancio di massa nella Cordigliera Sud e Nord; si osserva corrispondenza con lo spostamento dell'Oscillazione Decadale Pacifica del 1976 (da Demuth e Keller, 2006, con dati supplementari per i ghiacciai dell'Alaska e del Washington, forniti dal USGS, Water Resources Division, R.M. Krimmell, D. Trabant e R. March).

Figure 8 - The regional bifurcation of winter mass balances (expressed as a cumulative normalized departures from their means) for the benchmark mass balance glaciers in the southern and northern cordillera; showing coherence about the 1976 Pacific Decadal Oscillation regime shift (after Demuth and Keller 2006, with additional data for glaciers in Alaska and Washington State from USGS-Water Resources Division, R.M. Krimmell, D. Trabant and R. March).

Conclusioni

La situazione globale circa le variazioni dei ghiacciai è dominata dalla riduzione degli stessi e dall'effetto derivante sul livello dei mari. Su scala regionale questo influenza le risorse locali di acqua dolce. Nei bacini imbriferi delle Montagne Rocciose, relativi al sistema del fiume Nelson, la riduzione dei piccoli ghiacciai sembra essere la caratteristica saliente dall'inizio dell'osservazione dei ghiacciai, nello scorso secolo e mezzo.

In conclusione, abbiamo evidenziato che la riduzione dei ghiacciai comporta un incremento a breve termine dei deflussi fluviali, determinato da tassi di fusione molto elevati, fino al raggiungimento delle condizioni di deflussi ridotti, dovuto al minor contributo della zona di fusione (fenomeno già osservato in molte parti della Cordigliera meridionale).

Abbiamo dimostrato che, le variazioni dei ghiacciai sui versanti orientali delle Montagne Rocciose, sono caratterizzate non soltanto della sensibilità di risposta dei ghiacciai alle variazioni climatiche, inversamente proporzionali alla dimensione dei ghiacciai; ma che vi è inoltre una dipendenza stagionale dalle condizioni invernali ed estive. In entrambi i casi si riconosce che i fattori topografici e la dinamica dei ghiacciai, possono comportare una variabilità significativa locale e regionale.

Abbiamo illustrato l'importanza dei ghiacciai come risorsa regionale d'acqua e come una moderata entità di cambiamento ambientale per le regioni con scarse precipitazioni, associate alle necessità di vari settori che utilizzano l'acqua, eserciti una pressione sulla disponibilità della risorsa. Quanto argomentato sulle conseguenze a lungo termine degli spostamenti del regime oceano-atmosfera, dovrebbe cancellare la nozione di gestione delle risorse idriche dal punto di vista della stazionarietà di clima e idrologia. Per meglio definire i limiti di adattamento alle variazioni climatiche, sarà importante stabilire l'andamento delle riserve glaciali residue, in una regione sotto l'effetto delle modifiche climatiche prevedibili. I risultati dello studio suggeriscono che almeno una parte degli sforzi deve includere l'accertamento delle variazioni di massa dei ghiacciai in siti di riferimento, ben distribuiti entro la gamma della dimensione e della situazione dei ghiacciai.

Conclusions

Global concerns about glacier variations are dominated by glacier diminution and its impact on sea level. Regionally, this affects local fresh water resources. In the Rocky Mountain headwaters of the Nelson River system, small glacier diminution appears to be a well marked feature of the past century and a half of ice observation.

As a review, we refer to evidence that glacier diminution imparts short-term augmentation of stream flow brought about by high specific melt rates, but the effect of long-term reduction on contributing melt area must eventually dominate, thus leading to reduced stream flow – an effect already seen in many parts of the southern Cordillera.

We have demonstrated that glacier variations in the Rocky Mountain eastern slopes are not only characterized by the extent that glacier sensitivity to climate warming increases with decreasing glacier size, but are also seasonally related to both winter and summer conditions. It is recognized in both instances however, that topographic controls and glacier dynamics can exert significant local and regional variability.

We have illustrated the value of glaciers as a regional water resource, and as a sobering measure of environmental change for a rain-shadow region where the needs of numerous water-reliant sectors exert a stress on water availability. Our discussion and illustration of the far-reaching consequences of ocean-atmosphere regime shifts should give pause to the notion of managing waters resources from the point of view of stationary climate and hydrology. To better define climate change adaptation limits, it will be important to assess the trajectory of the remaining glacier resources in the region under the influence of projected changes in the climate. The results of the study suggest that at least part of the effort must involve the assessment of glacier mass change at reference sites well distributed across the range of known glacier size and situation.

Note

⁽¹⁾ Aggiornamenti e informazioni in Ommanney 1972b, 2002b.

⁽²⁾ 59 dei circa 200 ghiacciai presenti nel *Glacier Atlas of Canada* presenti entro i limiti latitudinali della regione di studio alla metà del XX secolo.

⁽³⁾ ~ 340 l/giorno.

<http://www.polisproject.org/polis2/PDFs/FlushingFuture.pdf> and Municipal Water Pricing 1991-1999. Environment Canada, Environmental Economics Branch (report disponibile al sito <http://www.ec.gc.ca/erad/>).

⁽⁴⁾ Bitz e Battisti (1999) descrivono un'alta variabilità dovuta alla fluttuazione inter-annuale dell'Oscillazione Meridionale.

⁽⁵⁾ Le stazioni idrometriche non funzionarono per un anno intero, durante una parte significativa del periodo 1975/6-1998.

Notes

⁽¹⁾ Updated and corrected information found originally in Ommanney 1972b, 2002b.

⁽²⁾ 59 of the ~ 200 that are noted in the *Glacier Atlas of Canada* to have existed within the latitude limits of their study region in the mid 20th Century.

⁽³⁾ ~ 340 l/day.

<http://www.polisproject.org/polis2/PDFs/FlushingFuture.pdf> and Municipal Water Pricing 1991-1999. Environment Canada, Environmental Economics Branch (report available at <http://www.ec.gc.ca/erad/>)

⁽⁴⁾ Bitz and Battisti (1999) describe other variability due to the inter-annual fluctuation of the Southern Oscillation.

⁽⁵⁾ Gauges were not operated for the entire year during a significant portion of the 1975/6-1998 time interval.

Ringraziamenti

È un piacere ringraziare Naomi Short e Jessika Töyra per lo sviluppo della banca dati e il supporto geomatico. L'elaborazione "beta" dei dati satellitari Landsat MSS è stata eseguita dal Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resource Canada. Emma Watson ha gentilmente fornito i bilanci di massa ricostruiti per il Ghiacciaio Peyton. Parte di questo lavoro è stato finanziato con fondi MND e AP dal supporto del Canadian Government Climate Change Action Fund per il Prairie Adaptation Research Collaborative, and Government of Alberta – Climate Change Resources Users Group, Alberta Environment.

Acknowledgements

It is a pleasure to thank Naomi Short and Jessika Töyra for database development and geomatics support. Beta processing of Landsat MSS data was performed by Canada Centre for Remote Sensing, Natural Resource Canada. Emma Watson kindly provided reconstructed mass balance data for Peyto Glacier. The work was in-part funded by grants to MND and AP by the Canadian Government Climate Change Action Fund support to the Prairie Adaptation Research Collaborative, and the Government of Alberta – Climate Change Resources Users Group, Alberta Environment.

Italian translation: Alvaro Mazza and Andrea Almasio

Corresponding author address: Michael Demuth, Glaciology Section – Northern Canada Division, Geological Survey of Canada, Natural Resources Canada, 601 Booth Street, Ottawa, Canada.

E.mail: Mike.Demuth@NRCan.GC.CA.

Bibliografia / References

- Arendt A., Echelmeyer K., Harrison W., Lingle C., Zirnheld S., Valentine V., Ritchie B. and Druckenmiller M. (2006) - *Updated estimates of glacier volume changes in the western Chugach Mountains, Alaska, and a comparison of regional extrapolation methods*. J. Geophysical Res., 111, F03019.
- Bahr D., Meier M. and Peckman S. (1997) - *The physical basis of glacier volume-area scaling*. J. Geophysical Res., 102 (B9), 20, pp. 355-362.
- Bitz C.M. and Battisti D.S. (1999) - *Inter annual to decadal variability in climate and the glacier mass balance in Washington, Western Canada, and Alaska*. J. Climate, 12, pp. 3181-96.
- Braun L.N. and Escher-Vetter H. (1996) - *Glacial discharge as affected by climate change*. International Symposium Interpaevent 1996, Garmisch-Partenkirchen. Tagungspublikation, 1, pp. 65-74.
- Brown R.D. and Goodison B.E. (1996) - *Interannual variability in reconstructed Canadian snow cover, 1915-1992*. J. Climate, 9, pp. 299-318.
- C-CIARN (2006) - *Canadian Climate Impacts and Adaptation Research Network forum on Water Resources, Hydropower and Climate Change*. Winnipeg, Canada. <http://www.c-ciarn.mcgill.ca/completed.html>
- Chen J. and Ohmura A. (1990) - *Estimation of alpine glacier water resources and their change since the 1870s*. IAHS Publication, 193, pp. 127-135.
- Collier E.P. (1958) - *Glacier variation and trends in runoff in the Canadian Cordillera*. IAHS Publication, 46, pp. 344-357.
- DeBeer C.M. and Sharp M. (2007) - *Recent changes in glacier area and volume within the southern Canadian Cordillera*. Ann. Glaciol., 46, pp. 215-221.
- Demuth M.N. and Hopkinson C. (2006) - *Glacier surface elevation data derived from Airborne Laser Terrain Mapper surveys over the reference monitoring glaciers of the Canadian Glacier-Climate Observing System - Western and Northern Cordillera, August 2006*. Spatially Referenced Dataset, Geological Survey of Canada and the Canadian Consortium for Lidar Environmental Applications Research.
- Demuth M.N. and Keller R. (2006) - *An assessment of the mass balance of Peyto Glacier (1966-1995) and its relation to recent and past century climatic variability*. In: *Peyto Glacier: One Century of Science*, Demuth M.N., Munro D.S. and Young G.J. (Eds). National Hydrology Research Institute Science Report, 8, pp. 83-132.
- Demuth M.N., Munro D.S. and Young G.J. (Editors) (2006) - *Peyto Glacier: One Century of Science*. National Hydrology Research Institute Science Report 8, (Cat No. En 36-513/8E; ISSN: 0843-9052; ISBN: 0-660-17683-1).
- Demuth M.N. and Pietroniro A. (2003) - *The impact of climate change on the glaciers of the Canadian Rocky Mountain eastern slopes and implications for water resource adaptation in the Canadian prairies – Phase I, North Saskatchewan River Basin headwaters*. CCAF - Prairie Adaptation Research Collaborative, Study Report Project P55, plus Technical Appendices.
- Environment Canada-NHRI (1989) - *Map sheets IWB 1135, 1131, 1132, 1133, 1134*. In: "Glacier Atlas of Canada", limited edition. C.S.L. Ommanney Ed. National Hydrology Research Institute, Scientific Information Division (<http://atlas.gc.ca/site/english/maps/archives/glacier>)
- Environment Canada-WSC (2005) - *Canadian hydrometric data: HYDAT CD-ROM*. (http://www.wsc.ec.gc.ca/products/main_e.cfm?cname=products_e.cfm)
- Field C.B., Mortsch L.D., Brklacich M., Forbes D.L., Kovacs P., Patz J.A., Running S.W. and Scott M.J. (2007) - *North America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J. and Hanson C.E., (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 617-652 (<http://www.ipcc-wg2.org/index.html>).
- Flemming S.W. and Clarke G.K.C. (2005) - *Attenuation of high-frequency interannual streamflow variability by watershed glacial cover*. ASCE J. of Hydraulic Eng. 131(7), pp. 615-618.
- Fountain A. and Tangborn W.V. (1985) - *The effect of glaciers on streamflow variations*. Water Resources Res., 21(4), pp. 579-586.
- Glenday P. (1991) - *Determination of morphologic and volumetric change, Peyto Glacier, Alberta, 1966-1989*. M.Sc. Masters Thesis, Wilfrid Laurier University.
- Granshaw F.D. and Fountain A.G. (2006) - *Glacier change (1958-1998) in the North Cascades National Park Complex, Washington, USA*.
- Haerberli W., Muller P., Alean P. and Bosch H. (1989) - *Glacier changes following the Little Ice Age – a survey of the international data basis and its perspectives*. Oerlemans J. (Ed.), Proc. Symp. Glacier Fluctuations and Climatic Change, pp. 77-101.
- Hench W.E.S. (1971) - *Estimate of glacier's secular (1948-1966) volumetric change and its contribution to the discharge in the upper North-Saskatchewan River Basin*. J. Hydrology, 12, pp. 145-160.
- Hodge S.M., Trabant D.C., Krimmel R.M., Heinrichs T.A., March R.S. and Josberger E.G. (1998) - *Climate variations and changes in mass of three glaciers in western North America*. J. Climate, 11(2), pp. 161-179.
- Hopkinson C. and Demuth M.N. (2006) - *Using airborne lidar to assess the influence of glacier downwasting on water resources in the Canadian Rocky Mountains*. Can. J. Rem. Sens., 32(2), pp. 212-222.
- Hopkinson C. and Young G.J. (1998) - *The effect of glacier wastage on the flow of the Bow River at Banff, Alberta, 1951-1993*. Hydrol. Process., 12(1), pp. 745-762.
- IPCC (2007) - *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., van der

- Linden P.J. and Hanson C.E. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 7-22.
- Jansson P., Hock R. and Schneider T. (2003) - *The concept of glacier water storage - a review*. J. Hydrology, 282, pp. 116-129.
- Kääb A., Maisch P.F., Kellenberger M., Haeberli W. (2002) - *The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I Methods*. Ann. Glaciol., 34, pp. 355-361.
- Kuhn M. (1993) - *Possible future contributions to sea level change from small glaciers*. In: *Climate and Sea Level Change: Observations, Projections and Implications*, Warrick R.A., Barrow E.M. and T.M.L. (Eds.), Cambridge University Press, pp. 134-143.
- Luckman B.H., Holdsworth G. and Osborn G.D. (1993) - *Neoglacial glacier fluctuation in the Canadian Rockies*. Quaternary Res., 39, pp. 144-153.
- Luckman B.H. (2000) - *The Little Ice Age in the Canadian Rockies*. Geomorphology, 32, pp. 357-384.
- Luckman B.H. (2006) - *The Neoglacial History of Peyto Glacier*. In: *Peyto Glacier: One Century of Science*, Demuth M.N., Munro D.S. and Young G.J. Eds., National Hydrology Research Institute Science Report, 8, pp. 25-57.
- Luckman B.H., McCarthy D.P., Watson E., St. George R.S., Kavanagh T.A., Robinson B.J. and Colenutt M.E. (1998) - *Field Investigations in the Canadian Rockies in 1997*. Report to Parks Canada and the British Columbia Parks Service.
- Mantua N.J., Hare S.R., Zhang Y., Wallace J.M. and Francis R.C. (1997) - *A Pacific interdecadal climate oscillation with impact on salmon production*. Bulletin of the American Meteorological Society, 78, pp. 1-11.
- McCabe Jr. G.J. and Fountain A.G. (1995) - *Relation between atmospheric circulation and changes in South Cascade Glacier, Washington*. Arctic and Alpine Res., 27, pp. 226-233.
- Meier M.F. (1969) - *Glaciers and water supply*. J. American Water Works Association, 61(1), pp. 8-12.
- Mitchell B. and Shrubsole D. (1994) - *Canadian Water Management: Visions for Sustainability*. Canadian Water Resources Association.
- Moore R.D. (1992) - *The influence of glacier cover on the variability of annual runoff, Coast Mountains, British Columbia, Canada*. Can. Water Resources J., 17, pp. 101-109.
- Moore R.D. and McKendry I.G. (1996) - *Spring snowpack anomaly patterns and winter climatic variability, British Columbia, Canada*. Water Resources Res., 32, pp. 623-632.
- Moore R.D. and Demuth M.N. (2001) - *Mass balance and streamflow variability at Place Glacier, Canada, in relation to recent climate fluctuations*. Hydrol. Process., 15(3), pp. 473-486.
- Moran T.A., Marshall S., Evans E.C. and Sinclair K.E. (2007) - *Altitudinal gradients of stable isotopes in lee-slope precipitation in the Canadian Rocky Mountains*. Arctic, Antarctic and Alpine Res., 39(3), pp. 455-467.
- Ommanney C.S.L. (1972a) - *Glacier surveys by District personnel of the Water Survey of Canada: 2 Peyto Glacier*. Glacier Inventory Note No.7. Inland Waters Branch, Department of the Environment, Ottawa, Canada.
- Ommanney C.S.L. (1972b) - *Glacier inventory*. In: *Guidebook to the International Symposia on the Role of Ice and Snow in Hydrology*, Banff, Canada. Canadian National Committee for the International Hydrological Decade, pp. 84-87.
- Ommanney C.S.L. (1996) - *100 years of glacier observations in Canada (1890-1990)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 18, pp. 321-330.
- Ommanney C.S.L. (2002a) - *History of glacier investigations in Canada*. In: "Satellite Image Atlas of Glaciers of the World. Volume J, Glaciers of North America-Glaciers of Canada", Williams Jr. R.S. and Ferrigno J.G. (Eds.), U.S. Geological Survey Professional Paper 1386, pp. J27-J82.
- Ommanney C.S.L. (2002b) - *Glaciers of the Canadian Rockies*. In: *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, Volume J, Glaciers of North America-Glaciers of Canada, Williams Jr. R.S. and Ferrigno J.G. (Eds.), U.S. Geological Survey Professional Paper 1386: pp. J199-J189.
- Ommanney C.S.L., Clarkson J. and Strome M.M. (1970) - *Information booklet for the inventory of Canadian glaciers*. Glacier Inventory Note No.4. Inland Waters Branch, Department of Energy Mines and Resources, Ottawa, Canada.
- Østrem G. (2006) - *History of scientific studies at Peyto Glacier*. In: "Peyto Glacier: One Century of Science". Demuth M.N., Munro D.S. and Young G.J. (Eds.), National Hydrology Research Institute Science Report, 8, pp. 1-23.
- Østrem G. and Arnold K.C. (1970) - *Ice-cored moraines in southern British Columbia and Alberta, Canada*. Geogr. Ann., 52A(2), pp. 120-128.
- Paul F., Huggel C., Kääb A., Kellenberger T. and Maisch M. (2002) - *Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets*. Proc. EARSel-LISSIG Workshop, 2, pp. 15-21
- Petts G., Gurnell A. and Milner A. (2006) - *Eco-hydrology: New opportunities for research on glacier fed rivers*. In: *Peyto Glacier: One Century of Science*, Demuth M.N., Munro D.S. and Young G.J. (Eds.), National Hydrology Research Institute Science Report, 8, pp. 255-75.
- Pietroniro A., Demuth M.N., Dornes P., Töyra J., Kouwen N., Bingeman A., Hopkinson C., Burn D. and Brua R. (in-press) - *Streamflow shifts resulting from past and future glacier fluctuations in the eastern flowing basins of the Rocky Mountains*. For the Climate Change Resources Users Group, Government of Alberta and Alberta Environment. National Water Research Institute.
- Rampini A., Brivio P.A., Rota-Nodari F. and Binaghi E. (2002) - *Mapping alpine glacier changes from space*. Proc. IGARSS 4, 2, pp. 199-201.
- Riggs G.A., Hall D.K. and Salomonson V.V. (1994) - *A snow index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Proc. IGARSS 4, 1, pp. 942-944.
- Sauchyn D., Demuth M.N. and Pietroniro A. (in-press) - *Upland watershed management and global change - Canada's Rocky Mountains*

- and western plains. In: *Rosenberg Water Policy Fora*, Volume 1, *Managing Upland Watersheds In An Era Of Global Climate Change*, Vaux H. Series Editor, Garrido A. and Dinar A. Volume Eds. Routledge Publishers.
- Sidjak R.W. and Wheate R.D. (1999) - *Glacier mapping of the Illecillewaet Icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data*. *Intl. J. Rem Sens.*, 20(2), pp. 273-284.
- Sprague J.B. (2006) - *Great wet north? Canada's myth of water abundance (Chapter 2)*. In: Karen Bakker (Ed.), "Eau Canada: The Future of Canada's Water". UBC Press, Vancouver.
- SSRB 2007 - *Climate Change and Water - South Saskatchewan River Basin Final Technical Report*. Martz L., Bruneau J. and J.T. Rolfe (Eds.), "Climate Change Impacts and Adaptation Program".
- Stahl K. and Moore R.D. (2006) - *Influence of watershed glacier coverage on summer streamflow in British Columbia, Canada*. *Water Resources Res.*, 42, W06201.
- Stewart R.E., Bachand D., Dunkley R.R., Giles A.C., Lawson B., Legal L., Miller S.T., Murphy B.P., Parker M.N., Paruk B.J., and Yau M.K. (1995) - *Winter storms over Canada*. *Atmosphere-Ocean*, 33(2), pp. 233-247.
- Trans - Alta Utilities - <http://www.transalta.com/transalta/webcms.nsf/AllDoc/A5FAA9C26A2E1153872571A80002E8BC?OpenDocument>
- Vaux G. and Vaux W.S. Jr., (1899) - *Some observations on the Illecillewaet and Asulkan Glaciers of British Columbia*. Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Proceedings, pp. 560-563.
- Wallace A.L. (1995) - *The volumetric change of the Peyto Glacier, Alberta, Canada 1896-1966*. Unpublished Masters Thesis, Wilfrid Laurier University, Canada.
- Walters R.A. and Meier M.F. (1989) - *Variability of glacier mass balances in western North America*. *Geophysical Monographs*, 55, pp. 365-374.
- Watson E. and Luckman B.H. (2005) - *Tree-ring based mass-balance estimates for the past 300 years at Peyto Glacier, Alberta, Canada*. *Quaternary Res.*, 62, pp. 9-18.
- Wheeler A.O. (1911) - *Motion of the Yoho Glacier*. *Can. Alpine J.*, 3, pp. 123-126.
- Wheeler A.O. (1934) - *Records of glacier observations in the Canadian Cordillera*. *Can. Alpine J.*, 22, pp. 172-187.
- Whitfield P.H., Pilon P.J., Burn D.H., Arora V., Lins H.F., Ouarda T., Sellars C.D. and Spence C. (2004) - *Climate Variability and Change - Rivers and Streams (Chapter 11)*. In: *Threats to Water Availability in Canada*. National Water Research Institute, Scientific Assessment Report Series 3.
- Young, G.J. (1991) - *Hydrological interactions in the Mistaya basin, Alberta, Canada*. Snow, Hydrology and Forest in High Alpine Areas (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991). IAHS Publication, 205, pp. 237-244.
- Zhang Y., Wallace J.M. and Battisti D.S. (1997) - *ENSO-like interdecadal variability: 1900-93*. *J. Climate*, 10, 1, 004-020.,