

# Remote sensing e repeat photography per lo studio dei ghiacciai himalayani: esempi dal Nepal e dalla Cina

**Claudio Smiraglia** - Comitato Glaciologico Italiano

**Guglielmina Diolaiuti, Davide Fugazza, Roberto Sergio Azzoni** - Università Statale di Milano, Dipartimento di Scienze e Politiche per l'Ambiente

**Andrea Bollati** - Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze, Sez. di Scienze Geologiche

**Fabiano Ventura** - Associazione non profit Macromicro

1. Il versante Nord del Kangchenjunga (8586 m) e il suo ghiacciaio omonimo fra il 1899 (f. V. Sella - © Fondazione Sella Onlus) e il 2018 (foto F. Ventura - © Archivio F. Ventura). Dal confronto è ben evidente la perdita di spessore dell'intero ghiacciaio, stimabile in alcune zone in più di 200 m.

**Abstract - Remote sensing and repeat photography for the study of Himalayan glaciers: case-studies from Nepal and China.**

Asian mountain groups forming the Himalaya-Karakorum system represent one of the most important glaciated areas of the Earth outside the polar ice sheets. In the context of the project «On the trails of the glaciers», variations of three large glaciers in Nepal and China (Kangchenjunga, Rongbuk, Gyarag) were exami-

ned based on repeat photography, field surveys and the analysis of multitemporal satellite images. A significant reduction in glacier length (up to kilometres) and thickness (up to hundreds of meters) was observed compared to the Little Ice Age maxima. Glacier recession has continued over the past 30 years, showing a slight acceleration, with area losses between 3% and 4%, owing to an increase in mean annual temperatures and a decrease in solid precipitation.

## Introduzione

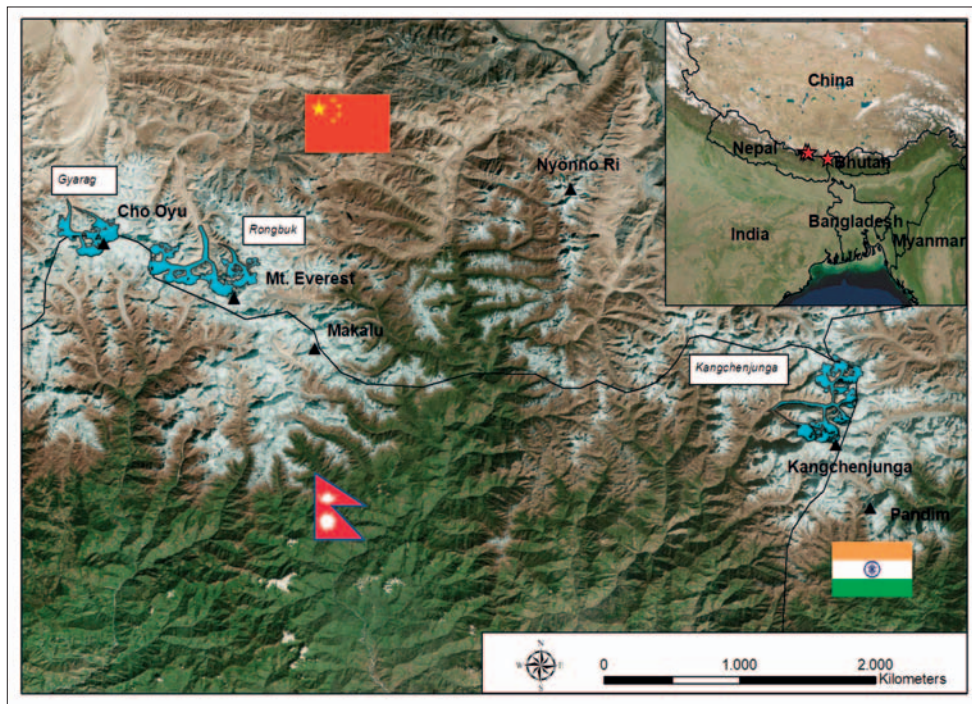
L'insieme delle catene montuose che si estendono per 2500 km dalla Provincia cinese dello Yunnan ad Est fino al Pakistan ad Ovest e che formano la regione denominata Himalaya-Karakorum (HK), costituisce una delle più importanti zone glacializzate della Terra al di fuori delle calotte polari (AZAM et al., 2018). I ghiacciai dell'Himalaya-Karakorum raccolgono una frazione importante delle riserve idriche del subconti-



1899



2018



2. Localizzazione dei ghiacciai oggetto di studio (elaborazione D. Fugazza).

nente indiano e con la loro evoluzione influenzano in modo sensibile le portate e il regime dei maggiori bacini fluviali, come quelli dell'Indo, del Gange e del Brahmaputra (IMMERZEEL *et al.*, 2010). Le acque di fusione di questi ghiacciai contribuiscono alla sopravvivenza di oltre 750 milioni di abitanti e all'economia dei paesi circostanti, fornendo acqua per irrigazione, per energia idroelettrica, per uso potabile e industriale (IMMERZEEL *et al.*, 2010; PRITCHARD, 2017). Le stime sull'estensione globale del glacialismo della regione HK variano **tra 36.845 e 50.750 km<sup>2</sup>**, indicando quindi una notevole incertezza nei dati complessivi areali e anche volumetrici (AZAM *et al.*, 2018; FREY *et al.*, 2014). Un'analisi delle variazioni di questi ghiacciai risulta quindi di notevole interesse anche pratico e applicativo, soprattutto nell'attuale fase di riscaldamento climatico che sta portando ad un'intensa riduzione areale e volumetrica delle masse glaciali su quasi tutto il nostro pianeta. I ghiacciai possono quindi rappresentare veri e propri indicatori del cambiamento climatico, soprattutto in regioni montuose remote dove le stazioni meteorologiche sono molto rare o anche inesistenti (BOLCH *et al.*, 2008). Le loro caratteristiche morfologiche, in particolare la **copertura detritica numerosissimi ghiacciai della regione**, fanno sì tuttavia

che si debba usare estrema cautela nel correlare il cambiamento climatico con la loro evoluzione (GARDELLE *et al.*, 2013). Nei decenni scorsi i ghiacciai in Himalaya hanno fatto registrare una **crescente perdita di area e di volume**, fenomeno però caratterizzato da una notevole eterogeneità nella distribuzione geografica (FUJITA & NUIMURA, 2011; BOLCH *et al.*, 2012; GARDELLE *et al.*, 2013). In molti casi si è osservato negli anni più recenti un incremento dei ritmi di riduzione areale (BOLCH *et al.*, 2012). Nonostante il crescente e diffuso interesse per lo studio dell'evoluzione dei ghiacciai dell'Himalaya, la loro estensione e localizzazione in aree remote fa sì che esistano ancora notevoli incertezze e lacune nei dati finora raccolti (LAMSAL *et al.*, 2017). L'utilizzo sempre più diffuso delle tecniche di *remote sensing*, che si affiancano o sostituiscono i rilievi di terreno, sta favorendo in misura sensibile il miglioramento delle stime di variazione areale di questi ghiacciai. Il presente lavoro vuole portare un contributo alla conoscenza di queste variazioni, presentando dati ed analisi riguardanti tre aree glaciali campione dell'Himalaya centrale in Nepal (zona del Kangchenjunga) e in Cina (zona dell'Everest e del Cho Oyu). In particolare si esamineranno le variazioni areali recenti derivanti da un'analisi multitemporale di **immagini**

**satellitari**, unite alle variazioni a scala temporale maggiore derivanti da **confronti fotografici** (*repeat photography*) realizzati con una missione dedicata nel 2018.

**Metodologie**

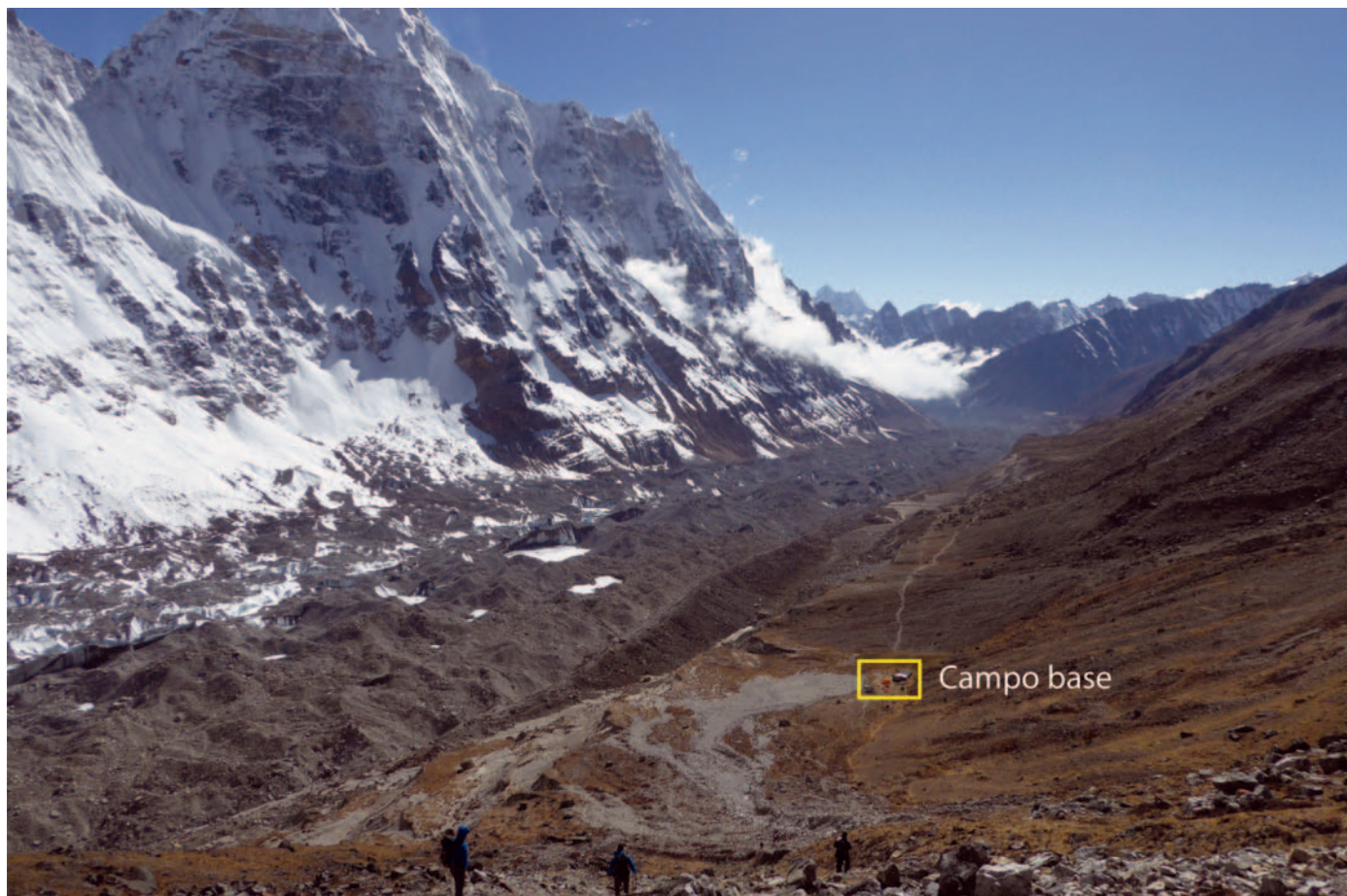
Le elaborazioni di telerilevamento si sono concentrate su tre principali apparati glaciali oggetto di confronti fotografici e rilievi di terreno: il Kangchenjunga in Nepal sul versante Nord del Monte Kangchenjunga (Fig. 1), il Rongbuk in Cina sul versante Nord dell'Everest, e il Gyarag o Gyabrag sul versante Nord del Cho Oyu, sempre in Cina (carta generale in Fig. 2). Poiché l'obiettivo era quello di individuare eventuali modificazioni geometriche recenti degli apparati glaciali, e quindi il loro allineamento o meno con le tendenze in atto in altri settori del glacialismo montano terrestre, si sono scelte tre sequenze temporalmente piuttosto ravvicinate, che potessero evidenziare quanto sopra indicato. Basandosi sulla disponibilità del materiale, si sono utilizzate immagini LANDSAT 1989-1991 e 2000 e SENTINEL-2 2017. Le immagini LANDSAT sono fornite dallo USGS (*United States Geological Survey*) al sito *earthexplorer.usgs.gov*. I dati 1989-1991 sono stati acquisiti dal satellite LANDSAT 5 TM, quelli 2000 dal satellite

Ghiacciai himalayani coperti da detrito (*debris covered glaciers*) che in funzione del suo spessore può attenuare la fusione e il regresso, comunque in recente accelerazione.

Evoluzione analizzata con immagini satellitari e campagne fotografiche (progetto «Sulle tracce dei ghiacciai»).

Dal 1990 circa al 2017, perso il 3,4% della superficie al ghiacciaio Kangchenjunga, il 3,5% al Rongbuk (Everest) e il 3,9% al Gyabrag (Cho Oyu).





3. Il Ghiacciaio Kangchenjunga visto dai pressi del campo base, sito a 5135 m. Si osservi la copertura detritica completa della lingua e la classica morfologia a glacier karst (f. A. Bollati, 2018).

LANDSAT 7 ETM+; in entrambi i casi la risoluzione è di 30 m per pixel per le bande spettrali nei campi del visibile e infrarosso. Le immagini SENTINEL-2 relative al 2017 sono fornite dall'ESA (European Space Agency) al sito [scihub.copernicus.eu](http://scihub.copernicus.eu) e la risoluzione è di 10 m per pixel per le bande spettrali nei campi del visibile e NIR (near infrared o vicino infrarosso) e 20 m per le bande dell'infrarosso SWIR (shortwave infrared). In tutti i casi sono stati scaricati i dati relativi alle bande spettrali del rosso, verde, blu, NIR e SWIR. I periodi di acquisizione delle immagini vanno da ottobre a gennaio, dal momento che in questa zona dell'Himalaya **il regime di accumulo prevalente è estivo (precipitazioni monsoniche)**. Immagini autunnali-invernali, nonostante le temperature più basse, garantiscono quindi una minore presenza di neve e di copertura nuvolosa, essenziali per un corretto riconoscimento dei corpi glaciali. Per ogni immagine, i dati delle singole bande sono stati riuniti in un unico raster, alternando una visualizzazione a colori reali (utilizzando le bande rosso, verde, blu) ad una a falsi colori (SWIR, NIR, rosso) in un

software GIS per l'elaborazione dati per un riconoscimento accurato dei ghiacciai e delle loro morfologie. Prima di questa operazione, i dati Landsat-7 hanno subito un'operazione di *pansharpening* per ricampionare le bande spettrali del visibile e infrarosso ad una risoluzione di 15 m usando la banda pancromatica; i dati SWIR di Sentinel-2 sono stati ricampionati ad una risoluzione di 10 m comune alle altre bande. I perimetri dei ghiacciai sono stati delineati manualmente in ambiente GIS per ogni periodo di riferimento utilizzando le immagini satellitari come base. Per l'individuazione dei singoli apparati glaciali si è fatto riferimento al database GLIMS - *Global Land Ice Measurements from Space* <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>. Per ogni perimetro glaciale è stata infine calcolata l'area. Secondo diversi studi (PAUL *et al.*, 2003; ANDREASSEN *et al.*, 2008), l'errore nella delimitazione manuale dei perimetri è inferiore al 5%. A questo errore, legato alla tipologia degli strumenti utilizzati, si aggiunge il potenziale errore dovuto all'esperienza dell'operatore e a situazioni morfologiche particolari tipiche dei ghiacciai himala-

yani. La frequente ed estesa copertura detritica delle lingue glaciali e le vaste fasce di ghiaccio stagnante possono infatti aggiungere ulteriore incertezza alla stima dell'area glaciale (PAUL *et al.*, 2004).

#### **I confronti fotografici (repeat photography): tecniche e strumenti**

Per quanto riguarda la metodologia della *repeat photography*, applicata nell'ambito del progetto «Sulle tracce dei ghiacciai», sono previste le seguenti fasi.

Prima di ogni spedizione viene eseguito un lungo lavoro di ricerca del materiale storico presso diversi archivi a livello internazionale al fine di selezionare le fotografie di maggiore interesse relative alle aree geografiche oggetto della spedizione. Durante il lavoro di selezione degli autori storici e delle loro fotografie, eseguito in modalità progressiva e in collaborazione con il comitato scientifico, viene data la priorità alle immagini di cui è reperibile il negativo o la lastra originale al fine di poter disporre di tali immagini alla più alta risoluzione possibile. Dopo aver collezionato la selezione delle immagini di

Tab. 1. Riepilogo delle aree dei ghiacciai Kangchenjunga e Ramthang: perdita del 3,4% della superficie complessiva dal 1991 al 2017.

Ghiacciaio	Area 1991 (km <sup>2</sup> )	Area 2000 (km <sup>2</sup> )	Area 2017 (km <sup>2</sup> )
Kangchenjunga	82,04	81,59	79,01
Ramthang	12,58	12,56	12,42
<b>Totale</b>	<b>94,62</b>	<b>94,15</b>	<b>91,43</b>

4. Il Ghiacciaio Kangchenjunga. I colori indicano il perimetro nei diversi anni, come da legenda. Viene distinto il corpo principale del ghiacciaio dal Ghiacciaio Ramthang, già confluyente in sinistra idrografica (elaborazione immagini da satellite e analisi dati di D. Fugazza e R. S. Azzoni; dati di terreno sul limite della fronte attiva di A. Bollati).

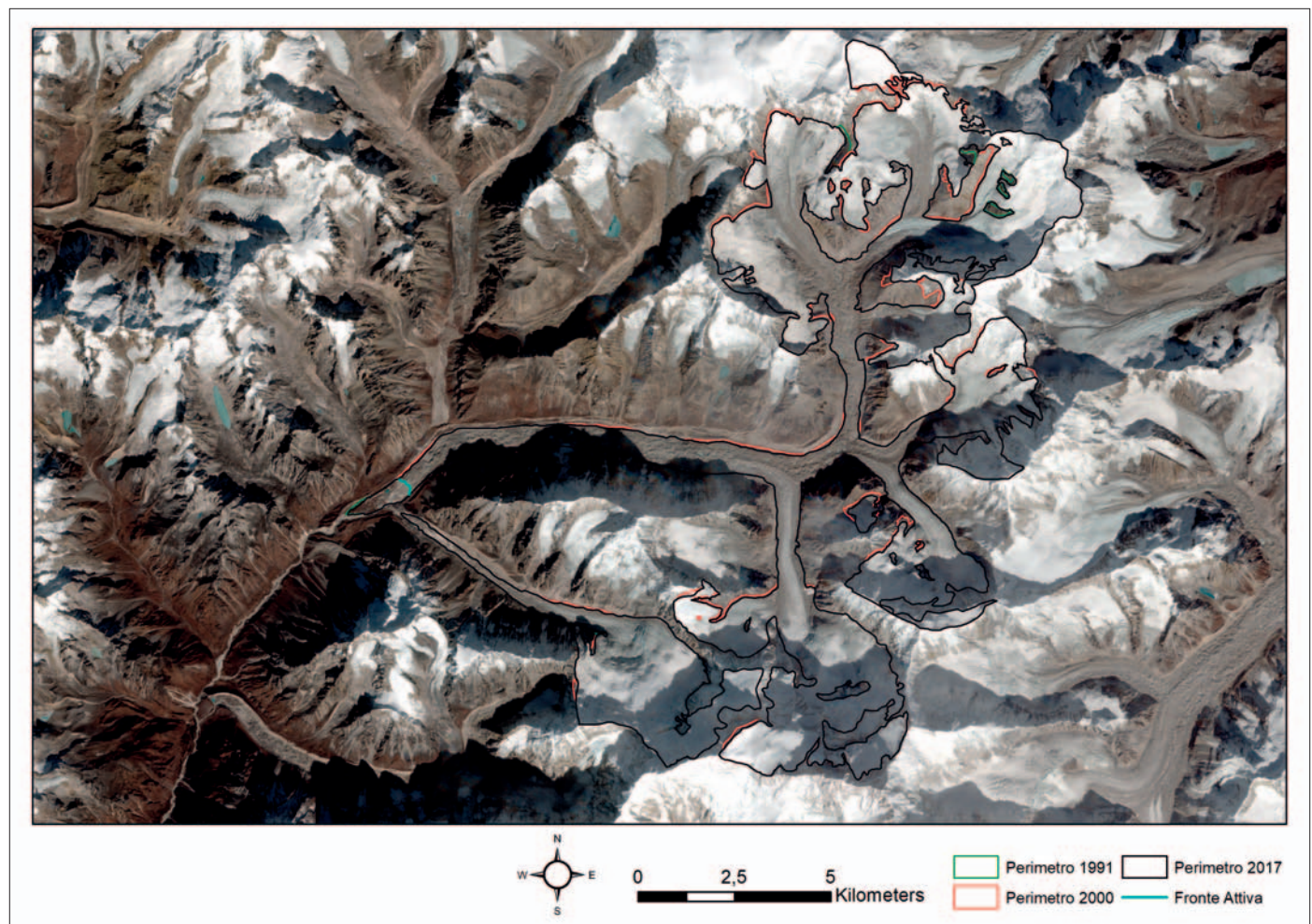
maggiore interesse si procede alla localizzazione dei luoghi di ripresa per quanto possibile grazie all'ausilio di modelli tridimensionali del terreno (DEM) ove disponibili e il posizionamento di tali ipotetici punti su Google Earth Pro. Durante le spedizioni sul campo, per la produzione delle fotografie moderne, vengono utilizzati apparecchi fotografici di grande formato a pellicola (Linhof Master Technika 3000 - Pellicola Fujichrome Velvia 50 new su formato 4'x5' e 6x9 cm) al fine di poter garantire sia un'alta qualità in termini di risoluzione sia una distorsione introdotta dalla lente sulla pellicola simile a quella ottenuta sulle fotografie storiche, così da ottenere due immagini perfettamente sovrapponibili. Sul campo si procede poi al ritrovamento del punto fotografico storico grazie al confronto

delle immagini antiche con il paesaggio circostante allineando le creste delle montagne sovrapposte su più piani fino al ritrovamento della stessa inquadratura. Tutti i punti fotografici vengono georeferenziati. Dopo ogni spedizione viene eseguito un lungo lavoro di scansione e restauro digitale dei negativi originali storici e di scansione e post produzione delle diapositive moderne grazie ad un team tecnico creativo specializzato. Successivamente si procede alla sovrapposizione dei file in dissolvenza al fine di eseguire la perfetta collimazione punto punto delle due immagini e al taglio per l'ottenimento di due file distinti che andranno a comporre il confronto fotografico finale. Per maggiori informazioni: [www.sulletraccedeighiacciai.com](http://www.sulletraccedeighiacciai.com). Durante la missione, oltre ai confronti fotografici, si sono

compiute osservazioni sulla localizzazione ed evoluzione delle fronti, sulla presenza di laghi sopragliaciali e sulle caratteristiche del detrito superficiale. In particolare si è delineata la geometria delle fronti, i cui limiti sono stati poi tracciati sulle immagini da satellite. Il rilevamento sul terreno delle fronti dei ghiacciai esaminati è stato realizzato con il GPS portatile cartografico GPSMAP64st con ricevitore GPS e GLONASS e antenna quad helix.

**L'evoluzione dei ghiacciai oggetto di studio**

**Ghiacciaio Kangchenjunga**  
Il Ghiacciaio Kangchenjunga (Fig. 1) è uno dei maggiori *debris covered glaciers* dell'Himalaya nepalese orientale, posto sul versante settentrionale del Monte Kangchenjunga, la terza montagna più elevata della Terra (8586 m), ed è caratterizzato quindi da una vasta copertura detritica della lingua di ablazione. Questa copertura rende più complessa e variabile la risposta di questo tipo di ghiacciaio ai cambiamenti climatici, poiché, in funzione soprattutto



5. (in alto)  
Fronte attiva  
del Ghiacciaio  
Kangchenjunga (f. A. Bollati,  
2018).



6. (al centro)  
Settore a monte della fronte attiva misurata e della confluenza con la valle del Ghiacciaio Ramthang. Si osservano la completa copertura detritica a glacier karst, le morene laterali non inerbite della PEG e quelle vegetate delle fasi precedenti dell'Olocene (f. A. Bollati, 2018).



7 a-b. Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Kangchenjunga in un confronto fra le foto di Vittorio Sella, 1899 (© Fondazione Sella) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). A fine Ottocento appare già la netta distinzione fra la parte attiva, molto turgida, e quella stagnante più depressa. Ben visibili anche le morene della PEG e dell'Olocene. Le foto illustrano la confluenza tra la valle del Ghiacciaio Kangchenjunga e quella del Ghiacciaio Ramthang, che oltre cento anni fa confluiva nel primo (come si evince anche dalla carta di E. Garwood del 1899). Appare evidente anche la riduzione di spessore della fronte attiva avvenuta nel periodo indicato.

dello spessore e della granulometria del detrito, essa può ridurre (copertura completa di spessore pluricentrico con clasti grossolani) o accelerare la fusione (granulometria fine con detriti sparsi) (NICHOLSON *et al.*, 2018).

In altre regioni dell'Himalaya, come quella del Khumbu, i ghiacciai e le loro variazioni sono state ampiamente studiate, grazie anche alla vicinanza dell'Everest che comporta una logistica e un accesso più facili ai ghiacciai della zona, come il Ghiacciaio Khumbu. La regione del Kangchenjunga è stata invece meno studiata dal punto di vista glaciologico. Recentemente sono stati prodotti lavori da parte di BASNETT *et al.* (2013), RACOVITEANU *et al.* (2015), LAMSAL *et al.* (2017).

Ulteriori dati e informazioni nel database GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*, <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>).

Come già indicato, si è proceduto ad un'analisi multitemporale delle aree del Ghiacciaio Kangchenjunga elaborando tre immagini: LANDSAT 1991, LANDSAT 2000, SENTINEL-2 2017 (Fig. 4). Anche per il Ghiacciaio

8 a-b. La zona mediana del Ghiacciaio Kangchenjunga nel 1930 (f. Wieland © Alpine Club London) e nel 2018 (f. F. Ventura © Archivio F. Ventura): evidente la perdita di spessore.

Ramthang, già primo tributario del versante sinistro idrografico e attualmente separato, si è calcolata la variazione areale. Il resto del ghiacciaio è stato considerato come apparato unitario. Come si osserva in Tab. 1, l'area complessiva è passata da 94,62 km<sup>2</sup> nel 1991 a 91,43 km<sup>2</sup> nel 2017 con una riduzione di 3,19 km<sup>2</sup> (-3,37%), corri-

spondenti a una perdita media annua di 0,12 km<sup>2</sup> (-0,13% all'anno). Le riduzioni areali (che sono passate da 0,05 km<sup>2</sup> annui nel periodo 1991-2000 a 0,16 km<sup>2</sup> annui nel periodo 2000-2017), derivano da lievi restringimenti delle lingue glaciali e da affioramenti di rocce soprattutto nei bacini collettori e indicano una **lieve accelerazione del regresso**. Se si calco-

la la variazione per il solo Kangchenjunga, senza quindi il Ramthang, si ottiene una riduzione percentuale del 3,69%, mentre per il solo Ramthang la riduzione è dell'1,27%. Per il Kangchenjunga si osserva una lieve accelerazione della riduzione areale fra i due periodi considerati: si passa infatti da -0,05 km<sup>2</sup>/anno (-0,06%) nel periodo 1991-2000 a -0,15



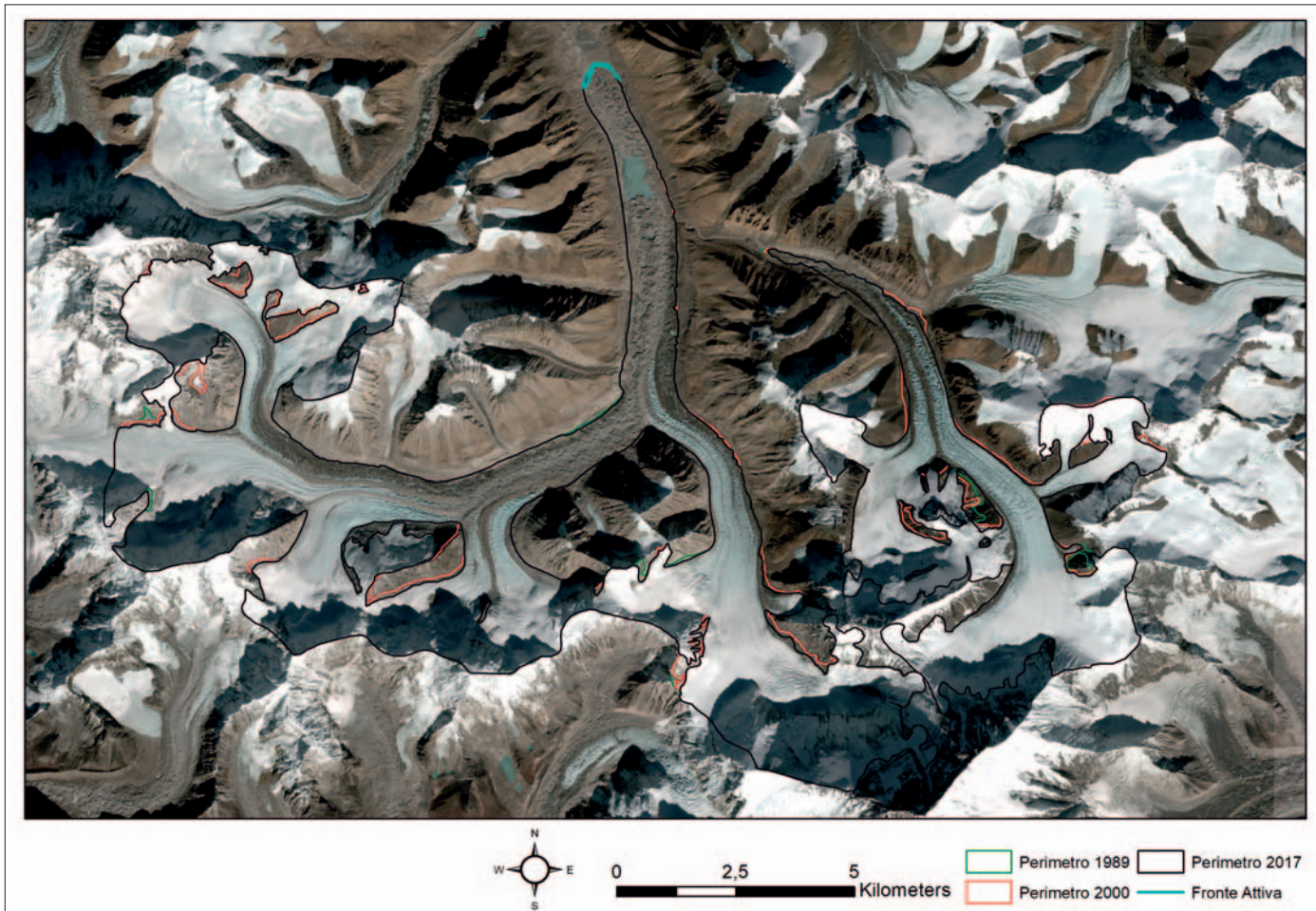
9. Ghiacciaio Kangchenjunga. Fronte semicircolare con falesia di ghiaccio (a monte della fronte misurata). Le tipiche morfologie da collasso (nodi di crepacci arcuati e radiali, falesie con crolli in atto, abbondanza di piccoli laghi circolari in coalescenza) indicano un'accelerazione dei fenomeni di regresso della fronte con probabile futura separazione di questo settore del ghiacciaio rispetto a quello inferiore, e formazione di una nuova fronte attiva più a monte (f. A. Bollati, 2018).



km<sup>2</sup>/anno (-5,44%) nel periodo 2000-2017. Sul terreno mediante GPS si è tracciato il limite della fronte ritenuta attiva a 4600 m, ben evidenziata da un netto gradino morfologico e riportata anche sull'immagine da satellite. L'analisi delle immagini satellitari, unita ai rilievi di terreno, ha permesso di individuare i li-

miti dell'espansione della Piccola Età Glaciale (PEG, o LIA, *Little Ice Age*), che ha lasciato imponenti morene laterali e latero-frontali ed è databile in Himalaya fra il 1300 e il 1600 (ROWAN, 2017). Va aggiunto che queste morene sono collocate a rido (e talora in sovrapposizione) delle morene dell'Olocene Superiore (LH, *Late Holocene*),

che presentano però una diversa geometria; queste ultime sono infatti meno elevate e hanno una maggiore distribuzione laterale. Tenendo conto di queste osservazioni, il regresso della lingua del Kangchenjunga dalla PEG si può stimare in **circa 1 km alla fronte stagnante e in circa 3 km alla fronte attiva**. Pur tenendo in considerazione



10. Il Ghiacciaio Rongbuk e il Ghiacciaio Rongbuk Orientale. I colori indicano i perimetri nei diversi anni, come da legenda (elaborazione immagini da satellite e analisi dati di D. Fugazza e R. S. Azzoni; dati di terreno sul limite della fronte attiva di A. Bollati).

11 a-b. Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk in un confronto fra la foto di B. Beetham del 1924 (© Royal Geographical Society) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). È evidente la riduzione di spessore del ghiacciaio, come indicato anche dalla chiara trimline che segna la base del grande nunatak in centro alle immagini.



l'entità molto ridotta delle variazioni 1991-2017, i risultati mostrano la tendenza ad una riduzione areale nel periodo recente considerato. Il confronto con i risultati di altri lavori non

è agevole, tenendo conto delle immagini satellitari e delle metodologie utilizzate, che sono spesso differenti, così come diversi sono gli intervalli di tempo esaminati. A ciò va aggiunta,

per questo tipo di ghiacciai, la difficoltà di individuare il perimetro esatto nel settore inferiore ricoperto da detrito, dove il ghiaccio è spesso fossile e stagnante. Ad esempio, a livello



12 a-b. La confluenza tra il Ghiacciaio Rongbuk (Centrale) e la colata occidentale in un confronto fra le foto di C. J. Morris del 1922 (© Royal Geographical Society) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). Evidente la riduzione di spessore del ghiacciaio, indicato anche dalla trim line alla base del Guangming Peak, il cui ghiacciaio nel 1922 confluiva nella lingua principale.

dell'intera regione del Kangchenjunga-Sikkim la perdita areale media annua viene stimata dello 0,23% dal 1962 al 2006 (RACOVITEANU *et al.*, 2015). Per quanto riguarda il solo Ghiac-

ciaio Kangchenjunga, secondo LAMSAL *et al.*, 2017, la superficie dal 1975 al 2010 è passata da 60,5 km<sup>2</sup> a 59,1 km<sup>2</sup> (-1,4 km<sup>2</sup>, corrispondente al 2,3%). A questo proposito si osservi come i

dati areali di LAMSAL *et al.*, 2017, siano sensibilmente inferiori a quelli riportati in tabella; ciò è dovuto ad una diversa delimitazione dei bacini collettori, che nel presente lavoro si sono rifatti ai limiti indicati da GLIMS.

#### **Ghiacciaio Rongbuk (Everest)**

A differenza del Kangchenjunga, il Ghiacciaio Rongbuk, situato sul versante Nord dell'Everest (Cina), la montagna più alta della Terra (8848 m), è stato oggetto negli ultimi decenni di molti studi intensivi. Questi vanno da perforazioni e analisi chimiche del ghiaccio, alla meteorologia glaciale (SONG *et al.*, 2007), al Quaternario e alla geomorfologia (OWEN *et al.*, 2009; PECCI *et al.*, 2010), alla microbiologia (ZHANG *et al.*, 2010), all'idrologia (LIU *et al.*, 2010), a misure e modellistica di temperatura del ghiaccio e di velocità (ZHANG *et al.*, 2013), a bilanci di massa derivanti da diverse metodologie (YE *et al.*, 2015; KING *et al.*, 2017), alla pericolosità dei laghi sopraglaciali, certamente uno dei temi di ricerca più interessanti anche dal punto di vista applicativo (NIE *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2014). Recentemente KING *et al.* (2018) hanno evidenziato la diversa evoluzione in questa regione dei ghiacciai con fronte che entra in un lago rispetto alle fronti che si arrestano su terra. Nel primo caso l'ablazione, dovuta soprattutto alla formazione di iceberg (*calving*), è amplificata dalla profondità dell'acqua e dalla sua temperatura, nonché dai suoi movimenti; nel secondo caso l'ablazione è soprattutto dovuta ai fattori atmosferici, in particolare alla temperatura dell'aria. Anche per questo ghiacciaio si è proceduto all'analisi delle tre serie di immagini satellitari già citate. Per la sua delimitazione si è fatto riferimento alla cartografia GLIMS e a KING *et al.* (2017). Oltre al Rongbuk in senso stretto (o Rongbuk Centrale), si sono elaborati anche i perimetri del Rongbuk Orientale (Fig. 10). Si è inoltre presa in considerazione la variazione areale del lago sopraglaciale del Rongbuk.

Come si osserva dalla Tab. 2, l'area complessiva è passata da 102,78 km<sup>2</sup> nel 1989 a 99,17 km<sup>2</sup> nel 2017 con una riduzione di 3,61 km<sup>2</sup> (-3,51%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,13 km<sup>2</sup> (-0,13%

13 a-b.  
 La fronte del Ghiacciaio Rongbuk con la piana proglaciale in un confronto fra le foto di B. Beetham del 1924 (© Royal Geographical Society) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). È evidente la riduzione di spessore della fronte che non ha però modificato in misura significativa la propria posizione. Si osservi nella foto del 2018 la presenza del grande campo base.

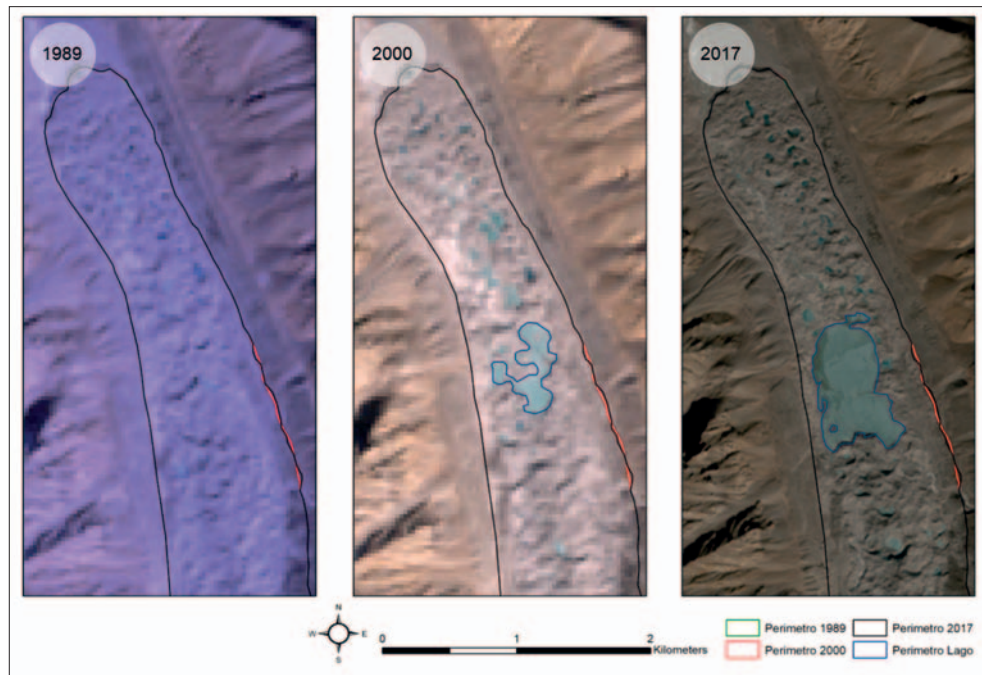


Tab. 2.  
 Riepilogo delle aree dei ghiacciai Rongbuk e Rongbuk Orientale: perdita del 3,5% della superficie complessiva dal 1989 al 2017.

all'anno). Anche per il settore principale del Rongbuk le riduzioni areali (che sono passate da 0,05 km<sup>2</sup> annui nel periodo 1989-2000 a 0,18 km<sup>2</sup> annui nel 2000-2017), derivano da

Ghiacciaio	Area 1989 (km <sup>2</sup> )	Area 2000 (km <sup>2</sup> )	Area 2017 (km <sup>2</sup> )
Rongbuk	74,54	74,32	72,13
Rongbuk Orientale	28,24	27,95	27,04
<b>Totale</b>	<b>102,78</b>	<b>102,27</b>	<b>99,17</b>

lievi restringimenti delle lingue glaciali e da ampliamenti di affioramenti rocciosi nei bacini collettori. Se si calcola la variazione per il solo Rongbuk, senza quindi il Rongbuk Orientale, l'area complessiva è passata da 74,54 km<sup>2</sup> nel 1989 a 72,13 km<sup>2</sup> nel 2017 con una riduzione di 2,41 km<sup>2</sup> (-3,23%), corrispondenti a una perdita media



annua di 0,09 km<sup>2</sup> (-0,12% all'anno), mentre il Rongbuk Orientale nell'intero periodo ha fatto registrare una riduzione di 1,2 km<sup>2</sup> (-4,25%). Anche per il Rongbuk si osserva una lieve accelerazione della riduzione fra i due periodi considerati: si passa infatti da -0,02 km<sup>2</sup>/anno (-0,03%) per il periodo 1989-2000 a -0,13 km<sup>2</sup>/anno (-0,17%) per il periodo 2000-2017.

I confronti con i risultati di altri lavori, come già osservato, non sono facili, a causa dei diversi metodi di analisi e periodi considerati. Si può osservare che le riduzioni areali medie annue della zona studiata e dei due singoli ghiacciai, non si discostano molto, come ordine di grandezza, pur riguardando un periodo più lungo, dal valore ottenuto da KING *et al.* (2017),

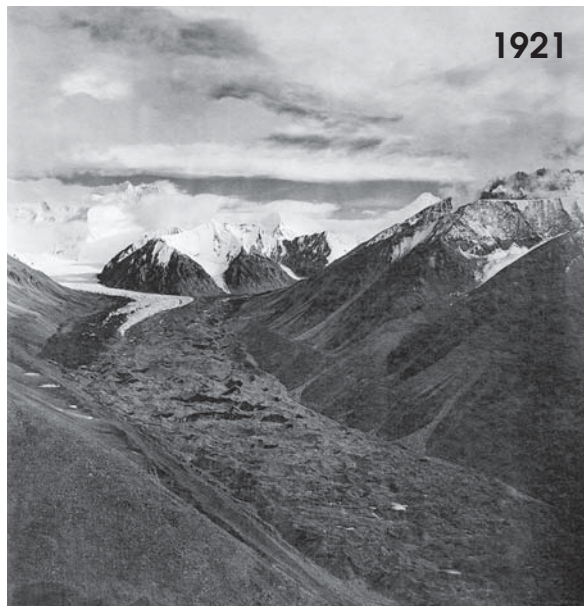
14. (sopra) Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk con l'omonimo lago sopragliaciale. I colori indicano i perimetri nei diversi anni, come da legenda (elab. immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza).

15. (al centro) Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk e il Campo Base, visti da valle verso monte. Ben visibili le morene laterali dell'Olocene Superiore e della PEG, il Lago Rongbuk e i numerosi laghi sopragliaciali minori che creano un classico glacier karst (f. 2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura).

16. (in basso) Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk, con l'omonimo lago sopragliaciale, visti da monte a valle. Ben visibili a monte del lago le falesie di ghiaccio e, sui bordi, le morene laterali dell'Olocene Superiore e della PEG (f. A. Bollati, 2018).



17 a-b. (in alto)  
 Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk in un confronto fra le foto di E.O. Wheeler del 1921 (© Royal Geographical Society) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). A inizio Novecento il lago sopraglaciale non è ancora presente, e il settore inferiore della lingua mostra un livello superficiale più elevato, seppure molto articolato e irregolare. Ben visibili le morene laterali dell'Olocene Superiore e della PEG. La fotografia moderna, solo in questo unico caso, non è stata realizzata esattamente dalla stessa posizione della fotografia storica, date le particolari difficoltà tecniche di terreno per il suo raggiungimento.



per l'intero campione dei ghiacciai considerati nella regione dell'Everest (-0,12 % annui). È un dato molto simile a quello ottenuto da BOLCH *et al.*, 2008, per i ghiacciai del versante nepalese fra il 1962 e il 2005. Per quanto riguarda le morene della PEG e la possibile delimitazione dell'estensione del ghiacciaio, recenti ricerche (ROWAN, 2017) hanno antedatato le evidenze geomorfologiche attribuite a questa fase; queste sono comunque presenti attorno alla fronte attuale e, pur mancando di datazioni assolute specifiche, vengono genericamente attribuite a 500 anni BP. Tenendo conto dell'interesse applicativo delle variazioni dei **laghi sopraglaciali**, in particolare di quello del Rongbuk (si pensi ai GLOF - *Glacier Lake Outburst Flood*), e dell'importanza della loro formazione nella dinamica delle masse glaciali, si è valutata attraverso le immagini da satellite l'evoluzione del Lago del Rongbuk. È

una vasta conca sopraglaciale che caratterizza il settore inferiore della lingua *debris covered*, la cui superficie raggiunge attualmente quasi il mezzo chilometro quadrato. Come si osserva dal confronto delle immagini da satellite (Fig. 14), alla fine degli Anni Ottanta

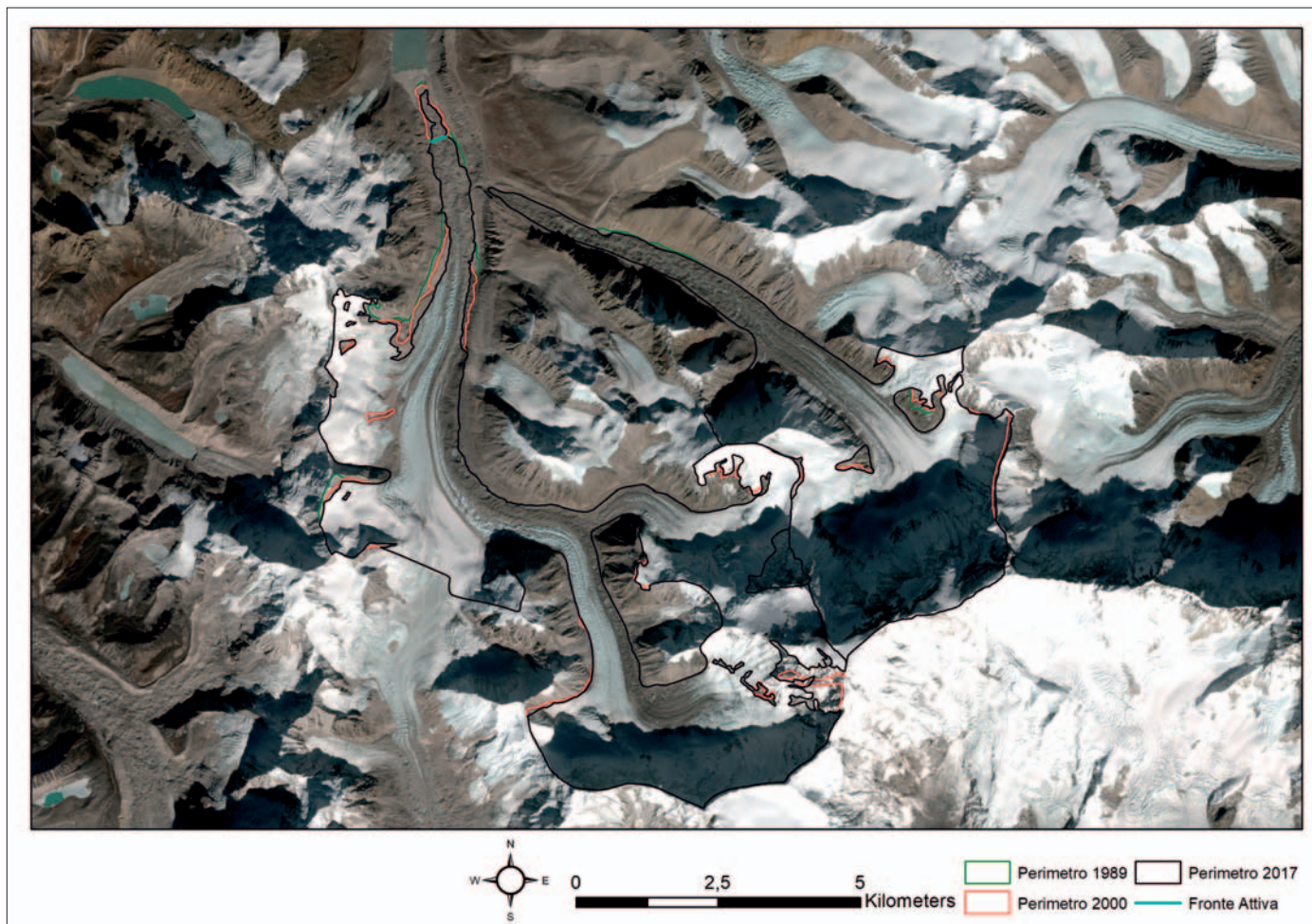
non vi era presenza di alcuna vasta conca lacustre, anche se sulla lingua glaciale si osservavano le classiche morfologie della fase iniziale dello stadio di maturità del *glacier karst* che caratterizza i *debris covered glacier* (ghiaccio stagnante, coni detritici, *backwasting*), con nu-



18. (al centro)  
 Ghiacciaio Rongbuk: il lago sopraglaciale che sovrasta il campo base, ai piedi della fronte coperta di detrito (f. A. Bollati, 2018).

19. (in basso)  
 La fronte detritica del Ghiacciaio Rongbuk (a destra) alla cui base è posto il campo. Dietro, è visibile l'imponente morena laterale destra PEG (f. Bollati, 2018).





20. Il Ghiacciaio Gyarag, attualmente suddiviso nelle due colate Gyarag e Gyarag Orientale. I colori indicano i perimetri nei diversi anni, come da legenda (elaborazione immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza e R.S. Azzoni; dati di terreno sul limite della fronte attiva di A. Bollati).

merosissime piccole cavità colme di acqua di fusione (*glacial sinkholes* e *supraglacial melt ponds*). Anche i confronti fra immagini da terra (Fig. 17) mostrano la lingua negli Anni Venti del secolo scorso senza conca lacustre. L'immagine da satellite del 2000 mostra un incremento areale delle cavità con una già evidente coalescenza (*pond network*), che dà origine a un lago sopraglaciaie plurilobato con una superficie di 0,15 km<sup>2</sup>. Nel 2017 il lago è ampiamente individuato, ha una superficie di 0,44 km<sup>2</sup> e occupa due terzi della larghezza della lingua glaciale. Questi risultati integrano e aggiornano lo studio di CHEN *et al.*, 2014, che per il 1992, 2000 e 2008 fornisce i seguenti dati: 0,03 km<sup>2</sup>; 0,08 km<sup>2</sup>; 0,25 km<sup>2</sup>. Entrambe le serie di dati evidenziano un incremento della superficie del lago dello stesso ordine di grandezza nel primo periodo (0,01 km<sup>2</sup> all'anno per il 1989-2000 e per il 1992-2000) con un'accelerazione nel periodo successivo (0,03 km<sup>2</sup>/anno per il 2000-2017 e 0,02 per il 2000-2008). Di fatto il fenomeno sta accelerando e si può sicuramente es-

sere d'accordo con CHEN *et al.*, 2014 che il Lago del Rongbuk possa essere definito **uno dei laghi potenzialmente più pericolosi** del prossimo futuro per quanto riguarda i GLOF. Ne risulta quindi l'esigenza di un monitoraggio costante, sia sul terreno sia con *remote sensing* come supporto per le comunità locali.

#### Ghiacciaio Gyabrag o Gyarag (Cho Oyu)

Anche il Ghiacciaio Gyabrag o Gyarag (conosciuto anche come Ghiacciaio Kyetrak) si trova sul versante cinese dell'Himalaya alla base di un'altra cima superiore agli 8000 m, il Cho Oyu (8201 m). Anche le sue lingue, in particolare quella del Gyabrag Orientale, sono quasi completamente ricoperte di detrito. A differenza del Rongbuk, le ricerche scientifiche sulla sua evoluzione recente sono sicuramente meno numerose. Il ghiacciaio rientra nella regione dell'Everest in senso lato, le cui variazioni glaciali fra il 2000 e il 2015 sono state analizzate da KING *et al.* (2017). Sul Gyarag sono state realizzate anche analisi chimiche del manto ne-

voso (BALERNA *et al.*, 2003) e misure di temperatura con perforazioni a 10 m di profondità che hanno evidenziato la presenza di ghiaccio freddo (LIU *et al.*, 2009). Anche per questo ghiacciaio si è proceduto all'analisi delle tre serie di immagini satellitari già citate. Per la sua delimitazione si è fatto riferimento alla cartografia GLIMS e a KING *et al.* (2017). Oltre al Gyarag in senso stretto, sono stati elaborati anche i perimetri del Gyarag Orientale (Fig. 20).

Il Ghiacciaio Gyarag ha fatto sicuramente registrare una **importante riduzione di spessore** nel corso del XX secolo, come dimostra il confronto fra le foto degli Anni Venti e quelle del 2018 (Fig. 21).

Per quanto riguarda le variazioni recenti, come si osserva in Tab. 3, l'area complessiva è passata da 54,43 km<sup>2</sup> nel 1989 a 52,32 km<sup>2</sup> nel 2017 con una riduzione di 2,11 km<sup>2</sup> (-3,88%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,08 km<sup>2</sup> (-0,15% all'anno). Anche per il settore principale del Gyabrag le riduzioni areali (che sono passate da 0,05 km<sup>2</sup> annui nel

periodo 1989-2000 a  $0,09 \text{ km}^2$  annui nel periodo 2000-2017), derivano da lievi restringimenti delle lingue glaciali e da lievi ampliamenti degli affioramenti rocciosi nei bacini collettori. Se si calcola la variazione del ghiacciaio principale, senza quindi il

Gyabrag Orientale, l'area è passata da  $34,43 \text{ km}^2$  nel 1989 a  $32,48 \text{ km}^2$  nel 2017 con una riduzione di  $1,95 \text{ km}^2$  (-5,66%), corrispondenti a una perdita media annua di  $0,07 \text{ km}^2$  (-0,20% all'anno), mentre il Gyabrag Orientale nell'intero periodo

ha fatto registrare una riduzione di  $0,16 \text{ km}^2$  (-0,80%). Anche per il Gyabrag si osserva una lieve accelerazione della riduzione fra i due periodi considerati: si passa infatti da  $-0,04 \text{ km}^2/\text{anno}$  (-0,12%) per il periodo 1989-2000 a  $-0,09 \text{ km}^2/\text{anno}$  (-0,26%)



21 a-b. Il Ghiacciaio Gyabrag in un confronto fra le foto del 1921 (E. O. Wheeler - © Royal Geographical Society) e del 2018 (Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura), che mostra un imponente abbassamento della superficie del ghiacciaio.



22. (sopra)  
In primo piano, oltre la strada, la fronte della lingua inattiva del Ghiacciaio Gyabrag. Sullo sfondo, la possente mole del Jobo Rabzang 6666 m (f. A. Bollati, 2018).

Tab. 3.  
Riepilogo delle aree dei ghiacciai Gyabrag e Gyabrag Orientale: perdita del 3,9% della superficie complessiva dal 1989 al 2017.

23. La fronte attiva, a 5130 m circa (f. A. Bollati, 2018).

Ghiacciaio	Area 1989 (km <sup>2</sup> )	Area 2000 (km <sup>2</sup> )	Area 2017 (km <sup>2</sup> )
Gyabrag	34,43	33,98	32,48
Gyabrag Orientale	20,00	19,87	19,84
<b>Totale</b>	<b>54,43</b>	<b>53,85</b>	<b>52,32</b>

per il periodo 2000-2017. La particolare morfologia della lingua del Gyabrag ha suggerito di tracciare le sezioni sul terreno con GPS sia della fronte della porzione inattiva (Fig. 22), situata a valle (a circa 5000 m) del grande lago proglaciale sito a circa 5100 m di quota, sia della fronte probabilmente attiva posta a monte del lago, a 5130 m circa (Figg. 20-23). Il settore inferiore, sicuramente stagnante, è caratterizzato dalla tipica morfologia della fase terminale dell'evoluzione dei *debris covered glaciers*: alternanza di coni e depressioni con totale copertura detritica e con ridotta energia di rilievo, limitate evidenze di idrologia superficiale, modesta presenza di cavità tipo *pond*, limitate evi-

denze di ghiaccio affiorante (Fig. 24). Il settore superiore è individuabile verso valle da una serie di grandi *ice cliff*, tipicamente arcuate con dislivello superiore ai 10 m e con ghiaccio in netta evidenza da cui fuoriesce il torrente subglaciale; a parte questi affioramenti la copertura detritica è ancora quasi completa ed è incisa da una gigantesca *bédière* che serpeggia con grandi meandri per oltre 4 km. Più a monte la copertura detritica tende a rarefarsi e a concentrarsi nelle due morene superficiali, la più lunga derivante dal *nunatak* che separa il corpo principale del ghiacciaio (con i due bacini alimentatori orientali) dal settore occidentale (Fig. 25). Per quanto riguarda il grande lago, va osservato che

questo non era presente nelle foto degli Anni Venti, dove la lingua appariva ancora ben rigonfia e scarsamente ricoperta da detrito (Fig. 26). La fronte probabilmente attiva è quindi arretrata di almeno 5 km durante il XX secolo, sebbene lembi di ghiaccio fossile e stagnante siano probabilmente presenti anche a valle del lago (Fig. 27).

### Conclusioni

I confronti fotografici e l'elaborazione dei dati tratti dalle immagini da satellite e di terreno indicano che è in atto una **indiscutibile fase di regresso** dei ghiacciai nelle tre aree considerate. Il confronto fra le immagini storiche dei primi decenni del XX secolo (e anche la cartografia storica) con quelle attuali mostrano non solo e non tanto arretramenti delle fronti, ma soprattutto **riduzioni di spessore** con trasformazioni morfologiche di ampia portata che hanno modificato in modo sostanziale il paesaggio di queste zone. In particolare si osserva la formazione di grandi laghi sopragliaciali che hanno attivato intensi processi di retroazione, provocando veri e propri collassi dei settori inferiori delle lingue (creando potenziali situazioni di pericolosità per le popolazioni). A ciò si è accompagnato il regresso delle fronti ancora attive e alimentate dal flusso glaciale (solitamente evidenziate da falesie di ghiaccio). Nei settori più a valle si osserva la formazione di vaste zone di ghiaccio stagnante «morto» o «fossile», completamente ricoperto di detriti, e di grandi laghi proglaciali. Dalle osservazioni sul terreno delle evidenze geomorfologiche (in particolare dalla distribuzione delle morene laterali) si evidenziano per i tre ghiacciai esaminati sensibili riduzioni di





24. Il settore inferiore del Ghiacciaio Gyabrag, stagnante, compreso tra la fronte attiva e il grande lago (f. A. Bollati, 2018).

25. Il settore superiore del medesimo ghiacciaio, con il passo Nangpa La sullo sfondo. Si osservi il rarefarsi verso monte del detrito superficiale che si concentra nelle lunghe morene sopraglaciali longitudinali (f. A. Bollati,

lunghezza, anche chilometriche, e di spessore (anche di centinaia di metri) rispetto al massimo della Piccola Età Glaciale.

Dai confronti fotografici e cartografici si segnalano a partire dai primi decenni del XX secolo separazioni di colate confluenti (Ramthang dal Kangchenjunga, Rongbuk Orientale dal Rongbuk, Gyabrag Orientale dal Gyabrag) e formazione di grandi laghi sopraglaciali (Rongbuk) e proglaciali (Gyabrag). È un regresso sicuramente attivo e intenso nel XX secolo che continua, come evidenziato dalle elaborazioni delle immagini satellitari, anche nei decenni più recenti.

Dall'analisi delle immagini satellitari emergono due dati di fatto che caratterizzano un periodo di quasi un trentennio (1989-1991; 2000; 2017):

1) una riduzione areale la cui dimensione, piuttosto limitata, è alquanto simile per le tre aree considerate (fra il 3 e il 4%), nonostante le differenze geografiche e climatiche, ed è in linea con altri lavori già citati;

2) una lieve accelerazione della riduzione areale fra i due periodi considerati.

Di fatto i risultati ottenuti confermano quanto emerso dagli studi precedenti, cioè una riduzione areale e volumetrica negli ultimi decenni con una lieve accelerazione di questo fenomeno negli ultimi anni (si vedano fra gli altri REN *et al.*, 2006; BOLCH *et al.*, 2008; SALERNO *et al.*, 2008; RACOVITEANU *et al.*, 2015; BRAHMBHATT *et al.*, 2014; KRAAIJENBRINK *et al.*, 2017; DEHECQ *et al.*, 2019). Il regresso glaciale di queste regioni, in particolare per il periodo 2000-2013, può essere attribuito a un incremento delle temperature medie annue (+0,04 °C/anno) e a una riduzione delle precipitazioni (-9,3 mm/anno) durante il monsone, soprattutto sul versante nepalese dell'Everest (SALERNO *et al.*, 2015). Anche dall'analisi di REN *et al.* (2017) risulta che per l'intera regione dell'Hindukush-Karakorum-Himalaya (HKH) durante il periodo 1901-2014 la temperatura media annua ha subito un significativo incremento (0,10 °C

per decennio). Altre ricerche mostrano un incremento annuo delle temperature in Himalaya di 0,057 °C fra il 1971 e il 1994 (SHRESTA *et al.*, 1999), una riduzione delle precipitazioni monsoniche totali nell'India settentrionale fra il 1950 e il 1999 compresa fra il 9 e l'11% (BOLLASINA *et al.*, 2011) e una minore percentuale di precipitazioni in forma nevosa nell'Himalaya nord-occidentale fra il 1996 e il 2005 (BHUTIYANA *et al.*, 2010). Per quanto riguarda la possibile evoluzione futura, anche se il riscaldamento globale venisse contenuto a 1,5 °C, obiettivo in ogni caso auspicabile, nell'intera regione dell'HKH le temperature entro la fine del XXI secolo potrebbero superare di 0,3 °C questa soglia (KRISHNA *et al.*, 2019). In tal caso la riduzione volumetrica e areale dei ghiacciai subirà un'accelerazione con sensibili conseguenze sull'idrologia glaciale (distribuzione temporale ed entità delle acque di fusione ed espansione dei laghi glaciali, fenomeno quest'ultimo che incrementerà la probabilità di eventi di rischio per le popolazioni locali). Si assisterebbe inoltre ad una sensibile risalita del limite delle nevi (o meglio della «Linea di Equilibrio», ELA - *Equilibrium Line Altitude*) con la completa estinzione dei ghiacciai di bassa quota senza copertura detritica, e a notevoli perdite dei ghiacciai con bacini di accumulo ad alta quota (BOLCH *et al.*, 2019).

#### Nota

Tutti i confronti fotografici e i dati sono stati raccolti ed elaborati nell'ambito del progetto «Sulle tracce dei ghiacciai» (<http://sulletraccedeghiacciai.com>), in particolare durante la quinta spedizione «Himalaya 2018».

Per le fotografie storiche si ringraziano la Fondazione Sella di Biella, l'Alpine Club di Londra e la Royal Geographical Society di Londra.

#### Bibliografia

ANDREASSEN L. M., PAUL F., KÄÄB A., HAUSBERG J. E., 2008 - *Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s*. The Cryosphere, 2, 131-145.  
AZAM M.F., WAGNON P., BERTHIER E., VINCENT C., FUJITA K., KARGEL J.S., 2018 - *Review of the status*



26 a-b. Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag nel 1921 (f. E. O. Wheeler - © Royal Geographical Society) e nel 2018 (f. F. Ventura - © Archivio F. Ventura). Il grande lago proglaciale non era presente all'inizio del XX secolo. Generale riduzione di spessore glaciale e ampliamento della copertura detritica.

and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *Journal of Glaciology*, 64, 61-74.

BALERNA A., BERNIERI E., PECCI M., POLESSELLO S., SMIRAGLIA C., VALSECCHI S., 2003 - *Chemical and radio-chemical composition of fresh snow samples from northern slopes of Himalayas (Cho Oyu range, Tibet)*. *Atmospheric Environment*, 37, 1573-1581.

BASNETT S., KULKARNI A.V., BOLCH T., 2013 - *The influence of debris cover and glacial lakes on the recession of glaciers in Sikkim Himalaya, India*. *Journal of Glaciology*, 59, 218, 1035-1046.

BOLCH T., BUCHROITHNER M., PIECZONKA T., KUNERT A., 2008 - *Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data*. *J. of Glaciol.*, 54, 187, 592-600.

BOLCH T., KULKARNI A., KÄÄB A., HUGGEL C., PAUL F., COGLEY J. G., FREY H., KARGEL J. S., FUJITA K., SCHEEL M., BAJRACHARYA S., STOFFEL M., 2012 - *The State and Fate of Himalayan Glaciers*, *Science*, 336, 310-314.

BOLCH T. (Coordinating Lead Authors) et al., 2019 - *Status and Change of the Cryosphere in the Extended Hindu Kush Himalaya Region*. In: Wester P., Mishra A., Mukherji A., Shrestha A. B. (eds): «The Hindu Kush Himalaya Assessment- Mountains, Climate Change, Sustainability and People», Springer Nature Switzerland AG, Cham, 208-255.

BOLLASINA M. A., MING Y., RAMASWAMY V., 2011 - *Anthropogenic Aerosols and the Weakening of the South Asian Summer Monsoon*. *Science*, 334, 502-505.

BRAHMBHATT R., NAINWAL H.C.,

KULKARNI A.V., 2014 - *Impact of accumulation area ratio on glacial change: A few examples of Jammu and Kashmir*. *Journal of Geomatics*, 8 (1), 61-65.

BHUTTYANA M. R., KALE V. S., PAWAR N. J., 2010 - *Climate change and the precipitation variations in the northwestern Himalaya: 1866-2006*. *Int. Journal Climat.*, 30, 535-548.

CHEN W., DOKO T., LIU C., ICHINOSE T., FUKUI H., FENG Q., GOU P., 2014 - *Changes in Rongbuk Lake and Imja Lake in the Everest region of Himalaya*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-2, 259-266.

DEHECQ A., GOURMELEN N., BRUN F., GOLDBERG D., BERTHIER E., VINCENT C., WAGNON P., TROUVÉ E., 2019 - *Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia*. *Nature Geoscience*, 12, 22-27.

FREY H., MACHGUTH H., HUSS M., HUGGEL C., BAJRACHARYA S., BOLCH T., KULKARNI A., LINSBAUER A., SALZMANN N., STOFFEL M., 2014 - *Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods*. *The Cryosphere*, 8(6), 2313-2333.

FUJITA K., NUIMURA T., 2011 - *Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (34), 14011-14014.

GARDELLE J., BERTHIER E., ARNAUD Y., KÄÄB A., 2013 - *Region-wide glacier mass balances over the Pamir Karakoram-Himalaya during 1999-2011*. *The Cryosphere*, 7, 1263-1286.

GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) - (<http://glims.colorado.edu/glacierdata/>).

IMMERZEEL W.W., VAN BEEK L.P., BIERKENS M.F., 2010 - *Climate change will affect the Asian water towers*. *Science*, 328, 1382-1385.

KING O., QUINCEY D.J., CARRIVICK J.L., ROWAN A.V., 2017 - *Spatial variability in mass loss of glaciers in the Everest region, central Himalayas, between 2000 and 2015*. *The Cryosphere*, 11, 407-426.

KING O., DEHECQ A., QUINCEY D., 2018 - *Contrasting geometric and dynamic evolution of lake and land-terminating glaciers in the central Himalaya*. *Global and Planetary Change*, 167, 46-60.

KRAALJENBRINK P. D. A., BIERKENS M. F. P., LUTZ A.F., IMMERZEEL

- W.W., 2017 - *Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers*. *Nature*, 549, 257-260.
- KRISHNA R. (Coordinating Lead Authors) et al., 2019 - *Unraveling Climate Change in the Hindu Kush Himalaya: Rapid Warming in the Mountains and Increasing Extremes*. In: Wester P., Mishra A., Mukherji A., Shrestha A. B. (eds): «The Hindu Kush Himalaya Assessment-Mountains, Climate Change, Sustainability and People», Springer Nature Switzerland AG, Cham, 57-95.
- LAMSAL D., FUJITA K., SAKAI A., 2017 - *Surface lowering of the debris-covered area of Kanchenjunga Glacier in the eastern Nepal Himalaya since 1975, as revealed by Hexagon KH-9 and ALOS satellite observations*. *The Cryosphere*, 6, 221-227.
- LIU Y., HOU S., WANG Y., SONG L., 2009 - *Distribution of Borehole Temperature at Four High-altitude Alpine Glaciers in Central Asia*. *Journal Mountain Sciences*, 7, 146-156.
- LIU W., REN J., QIN X., LIU J., LIU Q., CUI X., WANG Y., 2010 - *Hydrological Characteristics of the Rongbuk Glacier Catchment in Mt. Qomolangma Region in the Central Himalayas, China*. *Journal Mountain Sc.*, 7, 146-156.
- MISHRA A. (Coordinating Lead Authors) et al., 2019 - *Adaptation to Climate Change in the Hindu Kush Himalaya: Stronger Action Urgently Needed*. In: Wester P., Mishra A., Mukherji A., Shrestha A. B. (eds): «The Hindu Kush Himalaya Assessment-Mountains, Climate Change, Sustainability and People», Springer Nature Switzerland AG, Cham, 455-490.
- NICHOLSON L., MCCARTHY M., PRITCHARD H.D., WILLIS I., 2018 - *Supraglacial debris thickness variability: impact on ablation and relation to terrain properties*. *The Cryosphere*, 12, 719-734.
- NIE Y., LIU Q., LIU S., 2013 - *Glacial Lake Expansion in the Central Himalayas by Landsat Images, 1990-2010*. *PLOS ONE*, 8, 12, 1-8.
- OWEN L., ROBINSON R., BENN D.I., FINKEL R.C., DAVIS N.K., YI C., PUTKONEN J., LI D., MURRAY A.S., 2009 - *Quaternary glaciation of Mount Everest*. *Quaternary Science Reviews*, 28, 1412-1433.
- PAUL F., HUGGEL C., KÄÄB A., KELLENBERGER T.W., 2003 - *Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution datasets*. *EARSeL eProceedings*, 2, 15-21.
- PAUL F., HUGGEL C., KÄÄB A., 2004 - *Combining satellite multi-spectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers*. *Remote Sensing of Environment*, 89, 510-518.
- PECCI M., PIGNOTTI S., SMIRAGLIA C., MORTARA G., 2010 - *Geomorphology of the central and frontal Rongbuk Glacier area (Mt. Everest, Tibet)*. *Geografia Fisica Dinamica Quaternaria*, 33, 79-92.
- PRITCHARD H.D., 2017 - *Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought*. *Nature*, 545, 169-174.
- RACOVITEANU A.E., ARNAUD Y., WILLIAMS M.W., MANLEY W.F., 2015 - *Spatial patterns in glacier characteristics and area changes from 1962 to 2006 in the Kanchenjunga-Sikkim area, eastern Himalaya*. *The Cryosphere*, 9, 505-523.
- REN J., JING Z., PU J., QIN X., 2006 - *Glacier variations and climate change in the central Himalaya over the past few decades*. *Annals of Glaciology*, 43(1), 218-222.
- REN Y.Y., REN G.Y., SUN X.B., SHRESTHA A.B., YOU Q.L., ZHAN Y.J., RAJBHANDARIG R., ZHANG

- P.F., WEN K.M., 2017 - *Observed changes in surface air temperature and precipitation in the Hindu Kush Himalayan region over the last 100-plus years*. *Advances in Climate Change Research*, 8, 148-156.
- ROWAN A.V., 2017 - *The 'Little Ice Age' in the Himalaya: A review of glacier advance driven by Northern Hemisphere temperature change*. *The Holocene*, 27(2), 292-308.
- SALERNO F., BURASCHI E., BRUCOLERI G., TARTARI G., SMIRAGLIA C., 2008 - *Glacier surface-area changes in Sagarmatha National Park, Nepal, in the second half of the 20<sup>th</sup> century, by comparison of historical maps*. *Journal of Glaciology*, 54 (187), 738-752.
- SALERNO F., GUYENNON N., THAKURI S., VIVIANO G., ROMANO E., VUILLERMOZ E., CRISTOFANELLI P., STOCCHI P., AGRILLO G., MA Y., TARTARI G., 2015 - *Weak precipitation, warm winters and springs impact glaciers of south slopes of Mt. Everest (central Himalaya) in the last 2 decades (1994-2013)*. *The Cryosphere*, 9, 1229-1247.
- SHRESTHA A. B., WAKE C. P., MAYEWSKI P. A., DIBB, J. E., 1999 - *Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: An analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971-94*. *Journal Climate*, 12, 2775-2786.
- SONG Y., ZHU T., CAI X., LIN W., KANG L., 2007 - *Glacier winds in the Rongbuk Valley, north of Mount Everest: Meteorological modeling with remote sensing data*. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-10.
- YE Q., BOLCH T., NARUSE R., WANG Y., ZONG J., WANG G Z., ZHAO R., YANG D., KANG S., 2015 - *Glacier mass changes in Rongbuk catchment on Mt. Qomolangma from 1974 to 2006 based on topographic maps and ALOS PRISM data*. *Journal of Hydrology*, 530, 273-280.
- ZHANG S., YANG G., WANG Y., WANG Y., HOU S., 2010 - *Abundance and community of snow bacteria from three glaciers in the Tibetan Plateau*. *Journal of Environmental Sciences*, 22(9), 1418-1424.
- ZHANG T., XIAO C., COLGAN W., QIN X., DU W., SUN W., LIU Y., DING M., 2013 - *Observed and modelled ice temperature and velocity along the main flowline of East Rongbuk Glacier, Qomolangma (Mount Everest), Himalaya*. *Journal of Glaciology*, 59, 215, 438-448.

27. Il Ghiacciaio Gyabrag a valle del grande lago, visto da monte verso valle. Il settore inferiore è ormai totalmente privo di alimentazione ed è costituito da lembi di ghiaccio fossile ricoperti da detrito (f. A. Bollati, 2018).

