



SULLE TRACCE DEI GHIACCIAI

HIMALAYA 2018

A CURA DI

Claudio Smiraglia

Guglielmina Diolaiuti

Davide Fugazza

Roberto Sergio Azzoni

Università Statale di Milano

Fabiano Ventura - Macromicro

Andrea Bollati - Università Roma 3

INTRODUZIONE

Nel mese di maggio 2018 è stata effettuata nell'ambito del Progetto "Sulle Tracce dei Ghiacciai", coordinato da Fabiano Ventura-Macromicro, la quinta missione con obiettivo l'Himalaya (www.sulletraccedeighiacciai.com). Come nelle precedenti spedizioni, all'attività di ripetizione fotografica, che rappresenta il nucleo del progetto, si è affiancata un'attività di rilevamento scientifico condotta sul terreno dal prof. Andrea Bollati e mediante telerilevamento, condotta nell'ambito dell'Università Statale di Milano (Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio" e Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali), coordinata dai Proff. Claudio Smiraglia e Guglielmina Diolaiuti con la collaborazione dei Dott. Roberto Sergio Azzoni, Davide Fugazza, Davide Maragno. L'obiettivo, come nelle missioni precedenti, era quello di fornire un supporto quantitativo ai confronti derivanti dalle ripetizioni fotografiche, che, spettacolari e di grande impatto visivo, offrono informazioni di tipo qualitativo. Come nelle altre spedizioni, i dati emersi dai rilievi di terreno e dalle elaborazioni di immagini da satellite offrono un contributo valido all'impegnativo e attuale tema del regresso glaciale globale e delle sue relazioni con i cambiamenti climatici, anche per quanto riguarda le esigenze di divulgazione presso il grande pubblico. Questo nonostante il

limitato tempo disponibile per la raccolta di dati quantitativi, l'impossibilità pratica di ripetere le misure sul terreno, il ridotto numero di persone dedicate (nel caso specifico una). E' chiaro che questi dati devono trovare inserimento, approfondimento e verifica in quanto già prodotto nel contesto scientifico internazionale ed è quindi necessario un approfondito lavoro di analisi della bibliografia specifica già pubblicata e in particolare dei database internazionali.

LE ANALISI DI TELERILEVAMENTO

Tenendo conto delle aree visitate durante la spedizione e dei ghiacciai per i quali sono state effettuate le riprese fotografiche di confronto con immagini storiche, le elaborazioni di telerilevamento si sono concentrate su tre principali apparati glaciali: il Kangchenjunga in Nepal sul versante nord del Monte Kangchenjunga, il Rongbuk in Cina sul versante nord dell'Everest e il Gyarag o Gyabrag sul versante nord del Cho Oyu sempre in Cina. 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 Landsat 7 ETM+; in entrambi i casi la risoluzione è di 30 m per pixel per le bande spettrali nel campo del visibile e infrarosso. Le immagini Sentinel-2 relative al 2017 sono fornite dall'ESA (*European Space Agency*) al sito scihub.copernicus.eu e la risoluzione è di 10 m per pixel per le bande spettrali nel campo 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. Immagini autunnali-invernali 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://qlims.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 delineazione manuale dei perimetri è inferiore al 5%. A questo errore legato alla tipologia dei materiali utilizzati, si aggiunge il potenziale errore dovuto all'esperienza dell'operatore e a situazioni morfologiche particolari tipiche dei ghiacciai himalayani. Ci si riferisce alla frequente ed estesa copertura detritica delle lingue glaciali e alle vaste fasce di ghiaccio stagnante che rendono difficile l'esatta individuazione della fronte e che portano ad una sottostima dell'area glaciale intorno al 10%.

I DATI DI TERRENO

Per quanto riguarda i dati di terreno si sono tracciati nelle immagini anche i limiti delle fronti attive, parametro che, se ripetuto nel tempo, potrà fornire ulteriori informazioni utili sull'evoluzione di questi ghiacciai.

Durante la missione si sono compiute osservazioni sulla localizzazione ed evoluzione delle fronti, sulla presenza di laghi sopraglaciali e sulle caratteristiche del detrito sopraglaciale. In particolare si è delineata la geometria delle fronti e si sono fotografati e raccolti campioni rappresentativi della litologia del detrito. Quest'ultimo parametro appare di particolare importanza se si tiene conto della tipologia dei ghiacciai delle aree visitate. Si tratta infatti per la quasi totalità di "ghiacciai neri" (*debris covered glacier*), la cui lingua di ablazione è quasi completamente ricoperta di detrito. Come è noto, la copertura detritica superficiale modifica i ritmi di ablazione del ghiaccio sottostante rispetto al ghiaccio scoperto ("ablazione differenziale"). Questa modifica è funzione essenzialmente dello spessore, ma anche della granulometria, della litologia e dell'albedo del detrito (Nicholson et al., 2018).

Il rilevamento sul terreno delle fronti dei ghiacciai esaminati, dei percorsi effettuati per raggiungere i siti dei confronti fotografici e dell'ubicazione degli stessi, sono stati realizzati con il GPS portatile cartografico GPSMAP64st con ricevitore GPS e GLONASS e antenna *quad helix*.

RISULTATI

GHIACCIAIO KANGCHENJUNGA

Il Ghiacciaio Kangchenjunga è uno dei maggiori *debris covered glacier* 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 dello spessore e della granulometria del detrito, essa può ridurre o accelerare la fusione.



Fig. 1 - 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* (foto A. Bollati)

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. Una prima carta con la rappresentazione del ghiacciaio, venne realizzata nel 1899 dal geologo E. J. Garwood e pubblicata nel 1903.

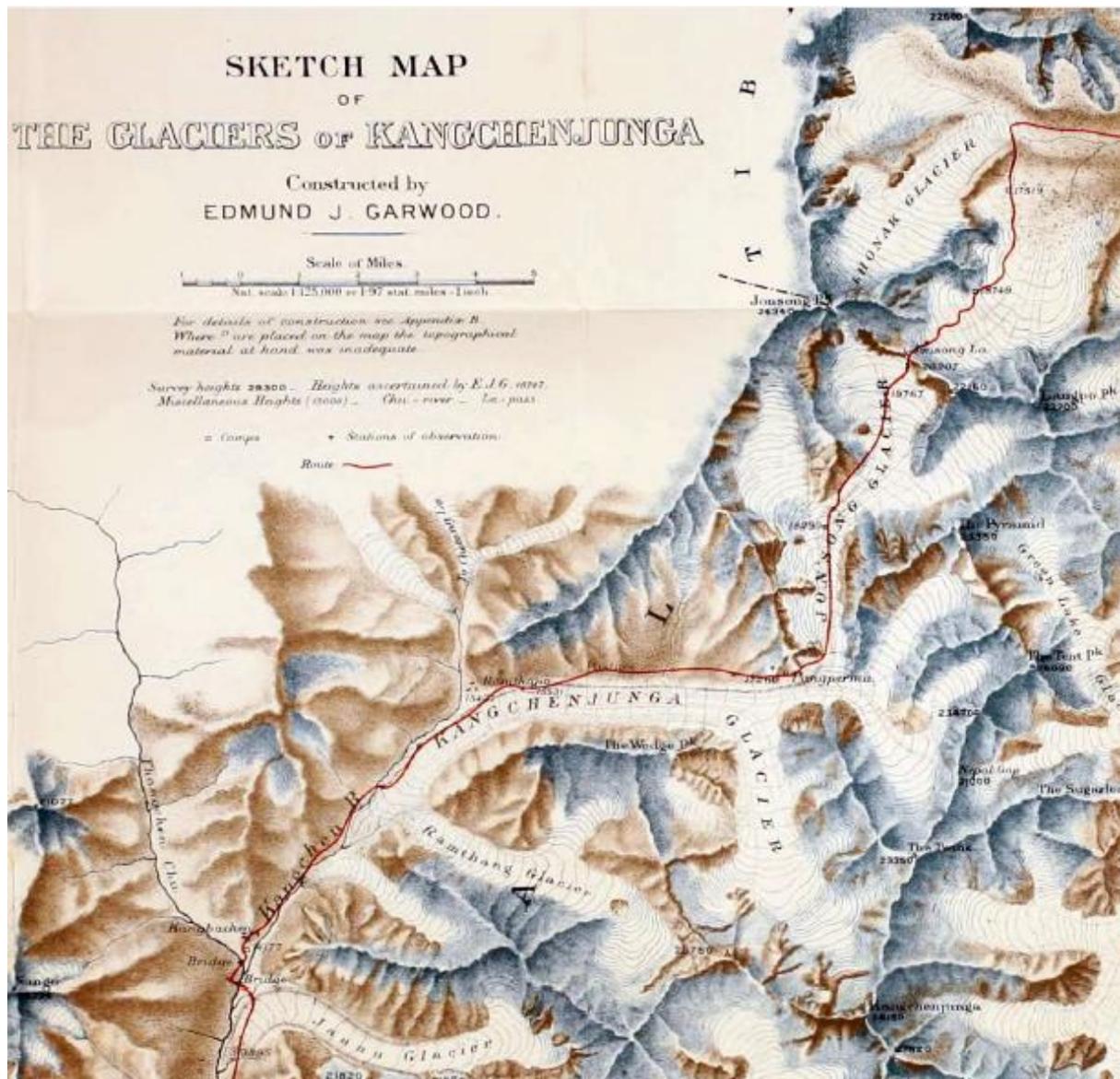


Fig. 2 - Stralcio della carta di E.J. Garwood, 1903

Recentemente sono stati prodotti lavori da parte di Basnett et al. (2013), Racoviteanu et al. (2015), Lamsal et al. (2017). Questi ultimi in particolare hanno approfondito elaborando immagini satellitari le variazioni del Ghiacciaio Kangchenjunga nel periodo 1975-2010. Oltre alle variazioni areali, gli autori hanno realizzato anche il bilancio di massa geodetico del ghiacciaio che è risultato lievemente negativo per il periodo di studio ($-0.18 \pm 0.17 \text{ m w.e. a}^{-1}$). Pelto (2015) ha evidenziato con il confronto di immagini Landsat 1991-2015 e Google Earth l'incremento numerico e areale dei laghi sopraglaciali.

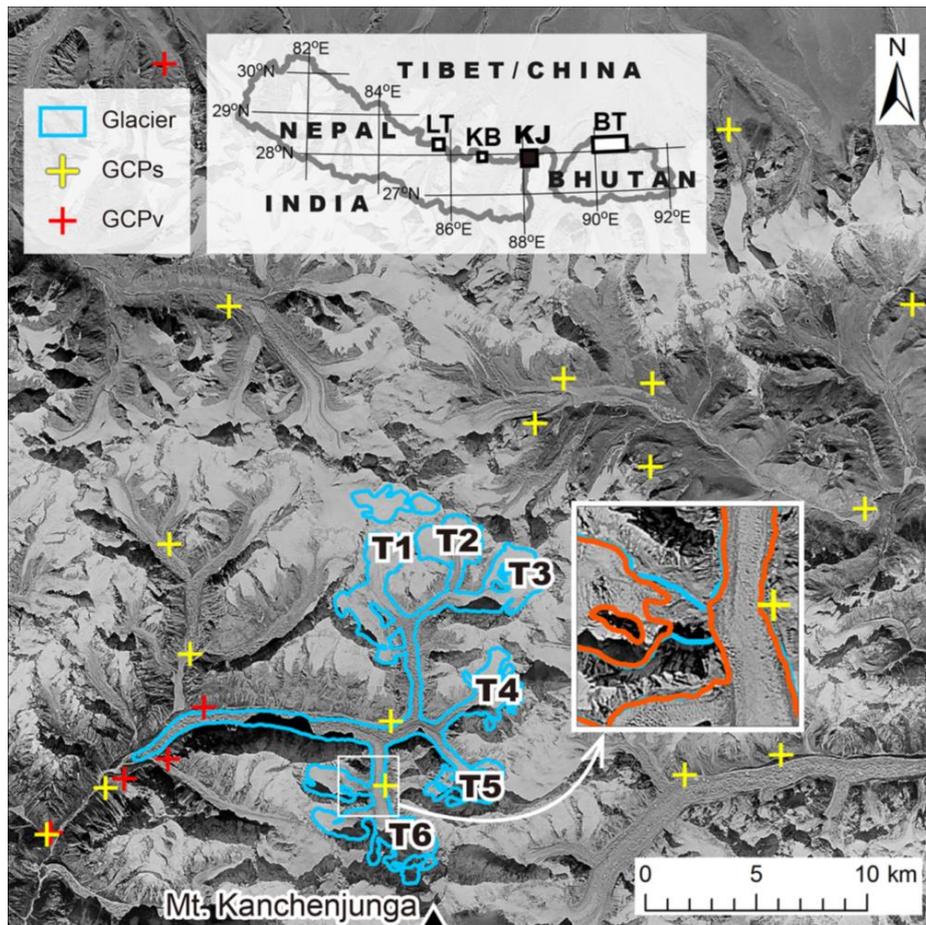


Fig. 3 - Il Ghiacciaio Kangchenjunga da Lamsal et al. (2017). Sono indicati i punti di controllo GPS e i maggiori sei tributari. Il pannello inserito mostra un esempio delle variazioni areali

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

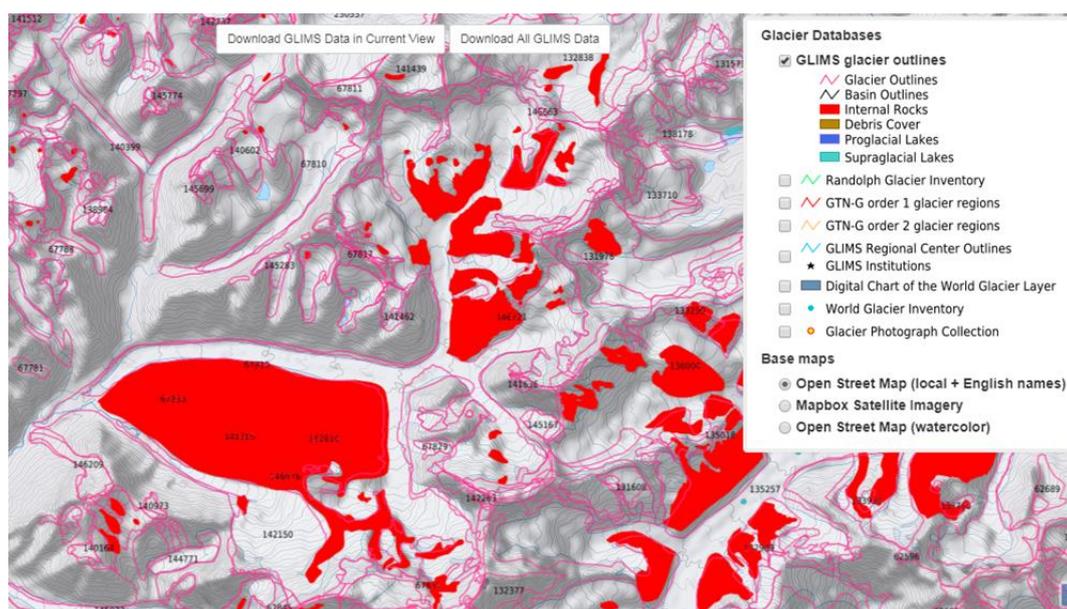


Fig. 4 - Il Ghiacciaio Kangchenjunga nel database GLIMS. In rosso sono indicate le aree rocciose interne ai ghiacciai

Come già indicato, si è proceduto ad un'analisi multitemporale delle aree del Ghiacciaio Kangchenjunga elaborando tre immagini: LANDSAT 1989-1991, LANDSAT 2000, SENTINEL-2 2017. Anche per il Ghiacciaio 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.

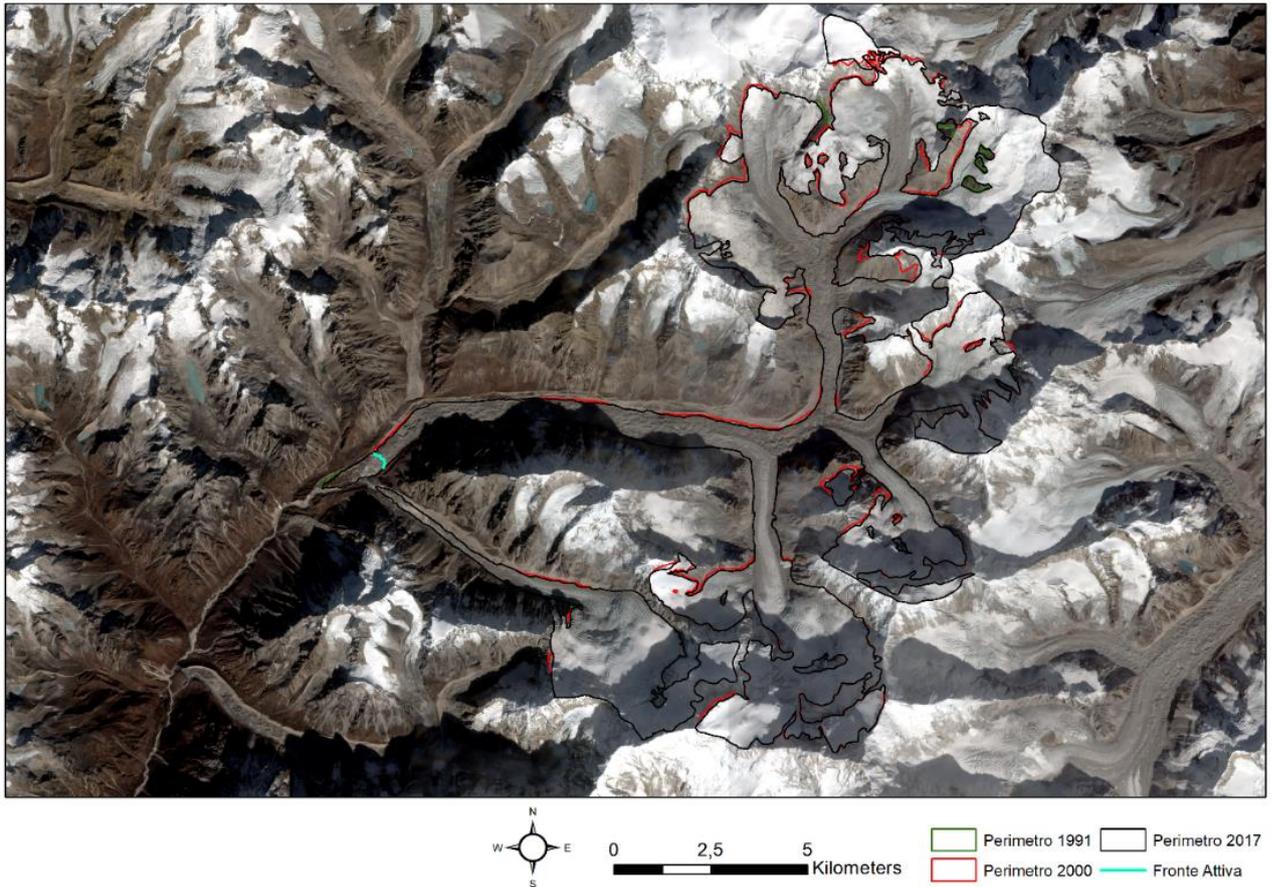


Fig. 5 - Il Ghiacciaio Kangchenjunga. I diversi colori indicano i diversi perimetri come da legenda. Viene distinto il corpo principale del ghiacciaio dal Ghiacciaio Ramthang, già confluyente in sinistra idrografica (elaborazione immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza e R.S. Azzoni; limite fronte attiva dati di terreno di A. Bollati)

In tabella sono riportate le aree:

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

Come si osserva dalla tabella, l'area complessiva è passata da 94,62 km² nel 1991 a 91,43 km² nel 2017 con una riduzione di 3,19 km² (-3,37%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,12 km² (-0,13% all'anno). Le riduzioni areali (che sono

passate da 0,05 km² annui nel periodo 1991-2000 a 0,16 km² annui nel periodo 2000-2017), derivano da lievi restringimenti delle lingue glaciali e da affioramenti di rocce soprattutto nei bacini collettori e indicano comunque un'accelerazione del regresso. Se si calcola 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 un'accelerazione della riduzione fra i due periodi considerati: si passa infatti da -0,05 km²/anno (-0,06%) per il periodo 1991-2000 a -0,15 km²/anno (-5,44%) per il periodo 2000-2017. Per il Ramthang la riduzione media annua è ridottissima e, tenendo conto del margine di errore, praticamente nulla a livello di percentuale, anche se in lieve incremento fra i due periodi (dallo -0,02% per il primo periodo a -1,43% nel secondo periodo).

Sul terreno mediante GPS si è tracciato il limite della fronte ritenuta attiva a quota 4600 m, ben evidenziata da un netto gradino morfologico. Si sono inoltre fotografati e raccolti numerosi campioni di clasti rappresentativi delle diverse litologie presenti sulla copertura detritica superficiale.



Fig. 6 - Fronte attiva del Ghiacciaio Kangchenjunga (foto A. Bollati, 2018)



Fig. 7 - Fronte attiva del Ghiacciaio Kangchenjunga (foto A. Bollati, 2018)



Fig. 8 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Kangchenjunga con il limite della fronte attiva (dati GPS di terreno di A. Bollati su immagine Google Earth)

L'osservazione delle immagini da satellite, unita ai rilievi di terreno, ha poi permesso di individuare i limiti dell'espansione della Piccola Età Glaciale (PEG) (*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 ridosso (e talora in sovrapposizione) delle morene dell'Olocene Superiore (*LH-Late Holocene*), che presentano però una diversa geometria; 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.



Fig. 9 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Kangchenjunga in un confronto fra le foto di Vittorio Sella, 1899 e Fabiano Ventura, 2018. 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 in fig. 2). Appare evidente anche la riduzione di spessore della fronte attiva avvenuta nel periodo indicato. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletraccedei ghiacciai.com

1899 Vittorio Sella - © Fondazione Sella

2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura



Fig. 10 – Settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Kangchenjunga. E' indicato con la linea rossa il limite della fronte attiva misurata. Con il tratteggio giallo è evidenziata la zona a *glacier karst* riportata nella fig. 11; in azzurro la località di Lhonak.



Fig. 11- Settore a monte della fronte attiva misurata e della confluenza con la valle del Ghiacciaio Ramthang. Si osservano la copertura completa detritica a *glacier karst* e le morene laterali non inerbite della PEG e vegetate dell'Olocene (foto A. Bollati, 2018).



Fig. 12 - Settore a monte della località di Lhonak (si veda localizzazione in fig. 10). In evidenza il detrito superficiale, depressioni e *ice cliffs* (foto A. Bollati, 2018).

Pur tenendo in considerazione il margine di errore insito in queste elaborazioni e l'entità delle variazioni 1991-2017, che sono comunque molto ridotte, 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 differenti 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 dell'intera regione del Kangchenjunga-Sikkim la perdita areale media annua viene stimata dello 0,23% dal 1962 al 2006 (Racoviteanu et al., 2015). Gli stessi autori

valutano che le aree glaciali libere da detrito abbiano perso nel periodo indicato il 34% della superficie, mentre le aree coperte da detrito hanno perso il 22%. Per quanto riguarda il solo Ghiacciaio Kangchenjunga, secondo Lamsal et al., 2017, la superficie sarebbe rimasta praticamente invariata dal 1975 al 2010, passando da 60,5 km² a 59,1 km² (-1,4 km², corrispondente al 2,3%). A questo proposito si osservi come i dati 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 caso della presente relazione si sono rifatti ai limiti indicati da GLIMS.



Fig. 13 – Confronto della zona mediana del Ghiacciaio Kangchenjunga fra il 1930 (foto Wieland) e il 2018 (foto A. Ventura). Dal confronto è ben evidente la perdita di spessore avvenuta in poco meno di 100 anni. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai"

www.sulletraccedei ghiacciai.com

1930 Wieland - © Alpin Club London

2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura

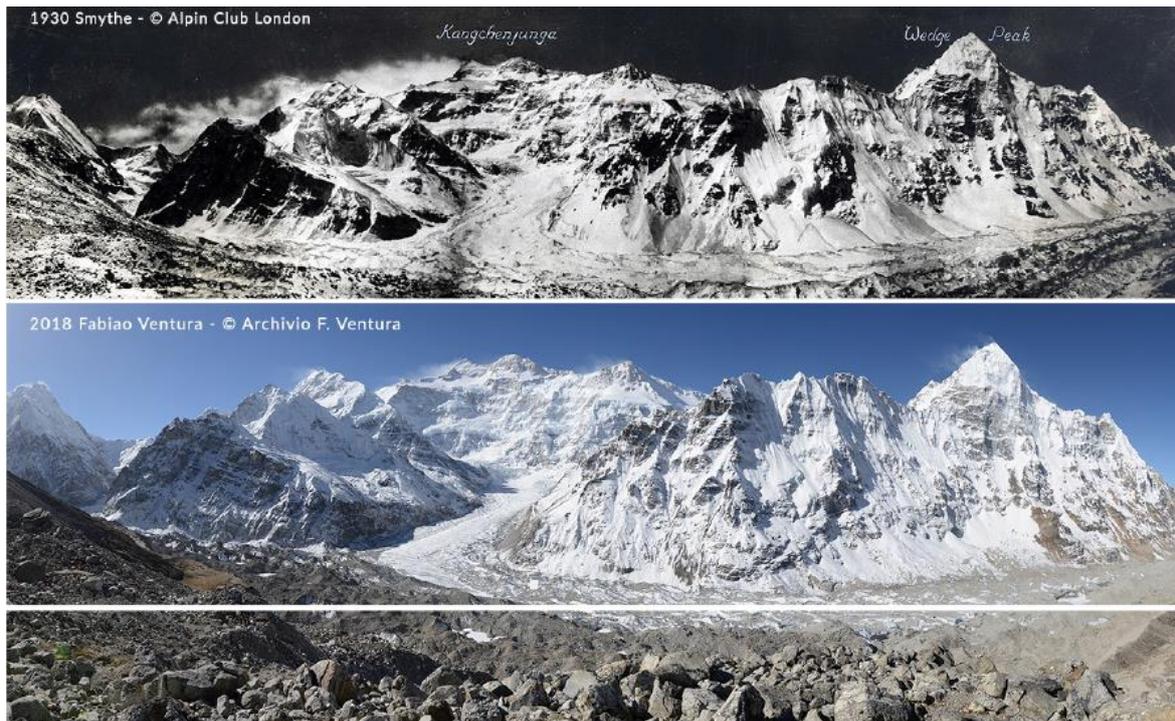


Fig. 14 - Il versante nord del Kangchenjunga (8586 m) e il suo ghiacciaio omonimo fra il 1930 e il 2018. Dal confronto è ben evidente la perdita di spessore dell'intero ghiacciaio stimabile in alcune zone più 200 metri. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletracedeigliacciai.com

1930 Smythe - © Alpin Club London
 2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura

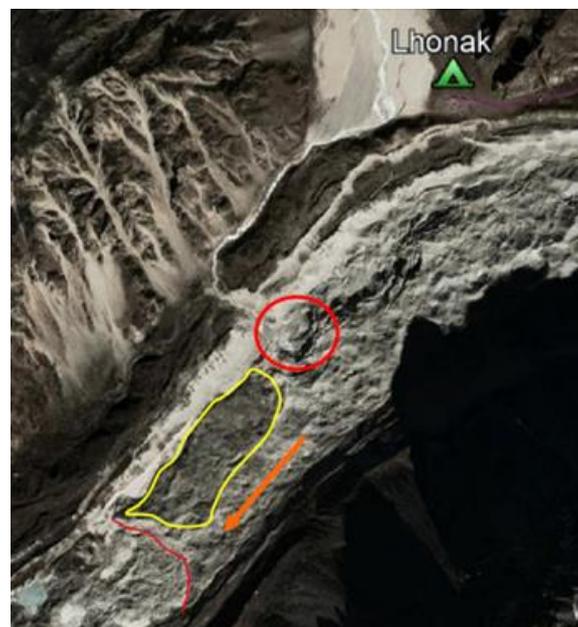


Fig. 15 - Nell'immagine, tratta da Google Earth, il cerchio rosso indica la fronte semicircolare con falesia di ghiaccio (fig. 16) e numerosi crepacci concentrici a mezzaluna, situata sul settore destro del ghiacciaio a monte della fronte misurata (linea rossa). La freccia arancione indica la porzione del ghiacciaio probabilmente attiva, mentre il settore compreso nella linea gialla con presenza di vegetazione sulla superficie è probabilmente inattivo (elaborazione di A. Bollati).



Fig. 16 - Fronte semicircolare con falesia di ghiaccio (a monte della fronte misurata; si veda la localizzazione in fig. 15). 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 (foto A. Bollati, 2018)



Fig. 17 – Un'altra veduta della fronte con falesia di ghiaccio della fig. 16. Sulla destra della fronte sono visibili aree lievemente vegetate che indicano un'evoluzione più lenta. Si osservino gli imponenti dissesti sul versante interno delle morene laterali della PEG e oloceniche, favoriti dal rapido abbassamento del livello del ghiacciaio (foto A. Bollati, 2018)



Fig 18 – Settore a monte della fronte. L'intensa degradazione in atto è evidenziata dall'articolata morfologia che vede pinnacoli di ghiaccio in primo piano (residui di crollo rimodellati anche dalla sublimazione in forma di *penitentes*) e falesie in secondo piano. L'operatore nel cerchio giallo può fornire la scala dimensionale (foto A. Bollati, 2018)

Osservazioni sono state dedicate anche ai laghi sopragliaciali la cui presenza e la cui evoluzione sono indicatori importanti delle condizioni dei ghiacciai. L'incremento della loro diffusione è infatti un chiaro indice del prevalere della fusione, e quindi della perdita di massa, rispetto al flusso glaciale, e quindi all'accumulo di massa. Come già osservato da Pelto, 2015, confrontando immagini Landsat 1991-2015, negli ultimi decenni il numero dei laghi sopragliaciali è sensibilmente aumentato. Il fenomeno è ben evidenziato dal confronto delle immagini Google Earth 2006-2018 (figg. 19 e 20).

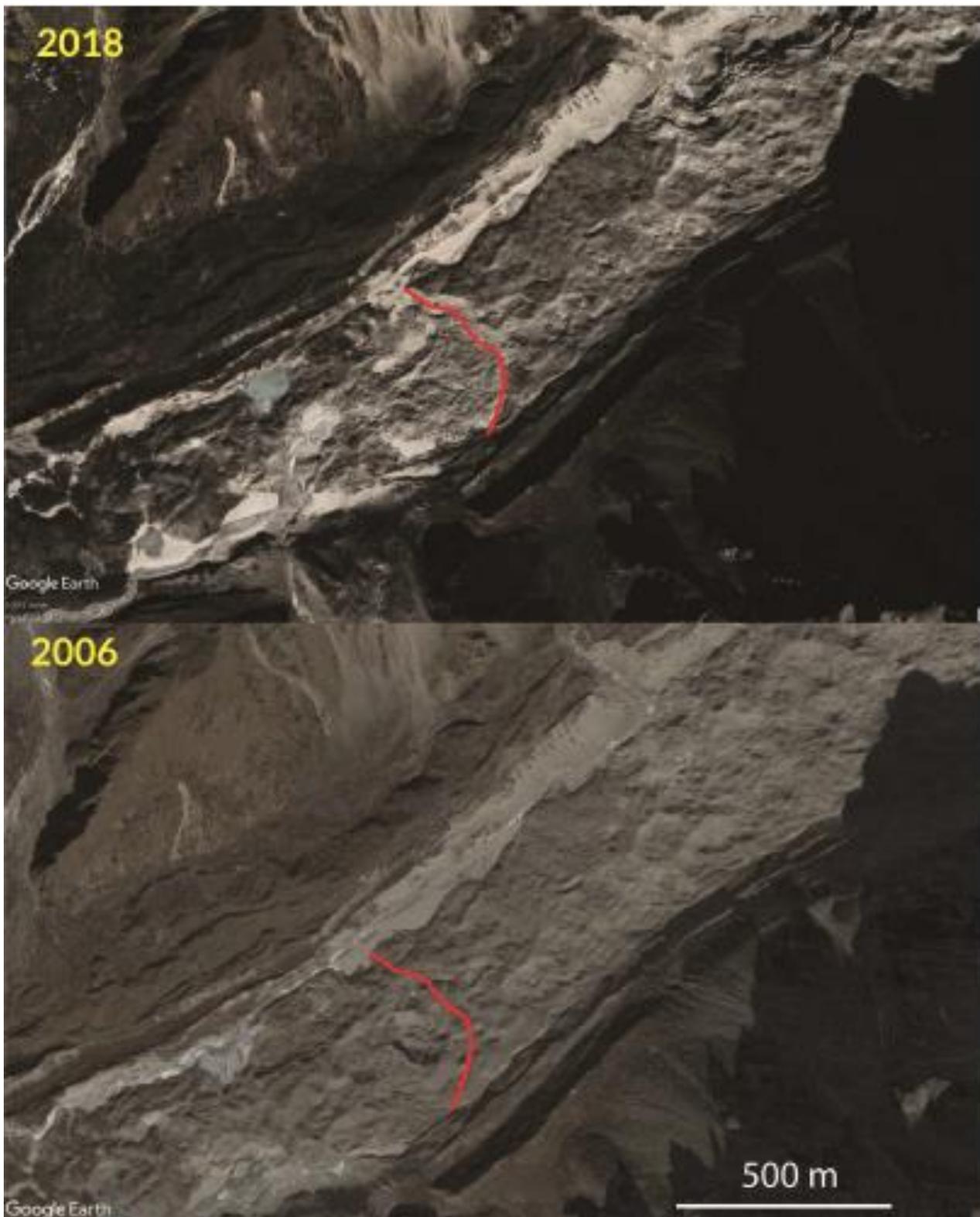


Fig. 19 – L'evoluzione del settore inferiore del ghiacciaio in corrispondenza della fronte misurata nel confronto fra immagini Google Earth 2006-2018. Si osservino la maggiore dissezione e frammentazione avvenute soprattutto nel settore a valle della fronte con l'incremento numerico e areali dei laghi sopragliaciali.

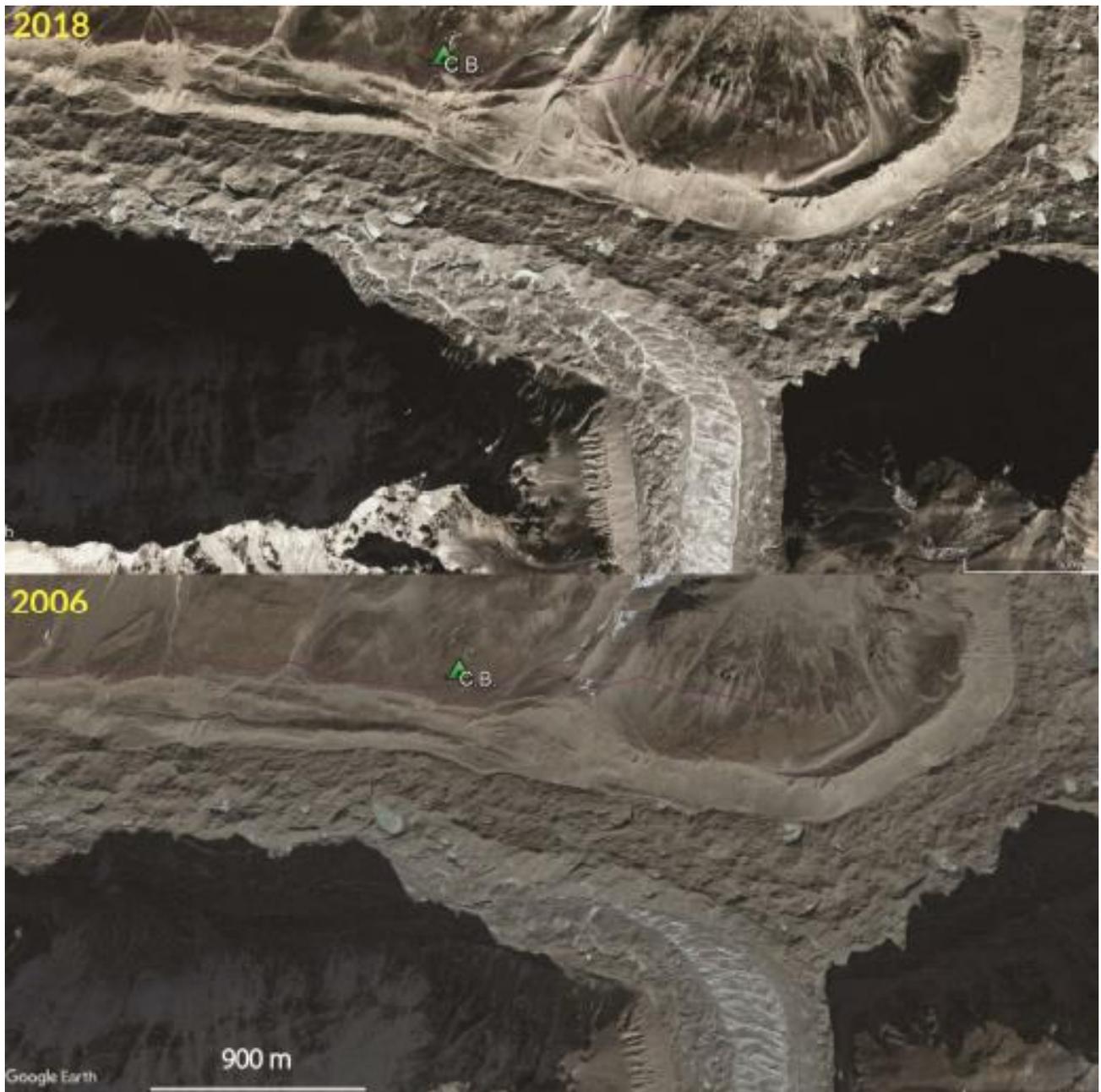


Fig. 19 – L'evoluzione 2006-2018 del settore del ghiacciaio in corrispondenza della prima confluenza in sinistra idrografica. E' indicato anche il Campo Base (CB). Si osservino l'accentuazione e la maggiore incisività del reticolo idrografico superficiale e l'incremento dei laghi sopragliaciali, che hanno trasformato la superficie del ghiacciaio in un vero e proprio *glacier karst*, il tutto accompagnato dall'aumento dei dissesti sulle morene laterali (da Google Earth).

Litologia del detrito superficiale

Vengono qui di seguito presentate le immagini dei più diffusi litotipi individuati in affioramento e sulla copertura detritica del Ghiacciaio Kangchenjunga, in particolare lungo il versante in destra orografica e sulla superficie del settore inferiore del ghiacciaio (tutte le foto sono di A. Bollati, 2018). I litotipi prevalenti sono costituiti da gneiss, gneiss occhiadini e leucograniti (come si può osservare anche dallo stralcio della carta geologica dell'area di Mosca et al., 2012).

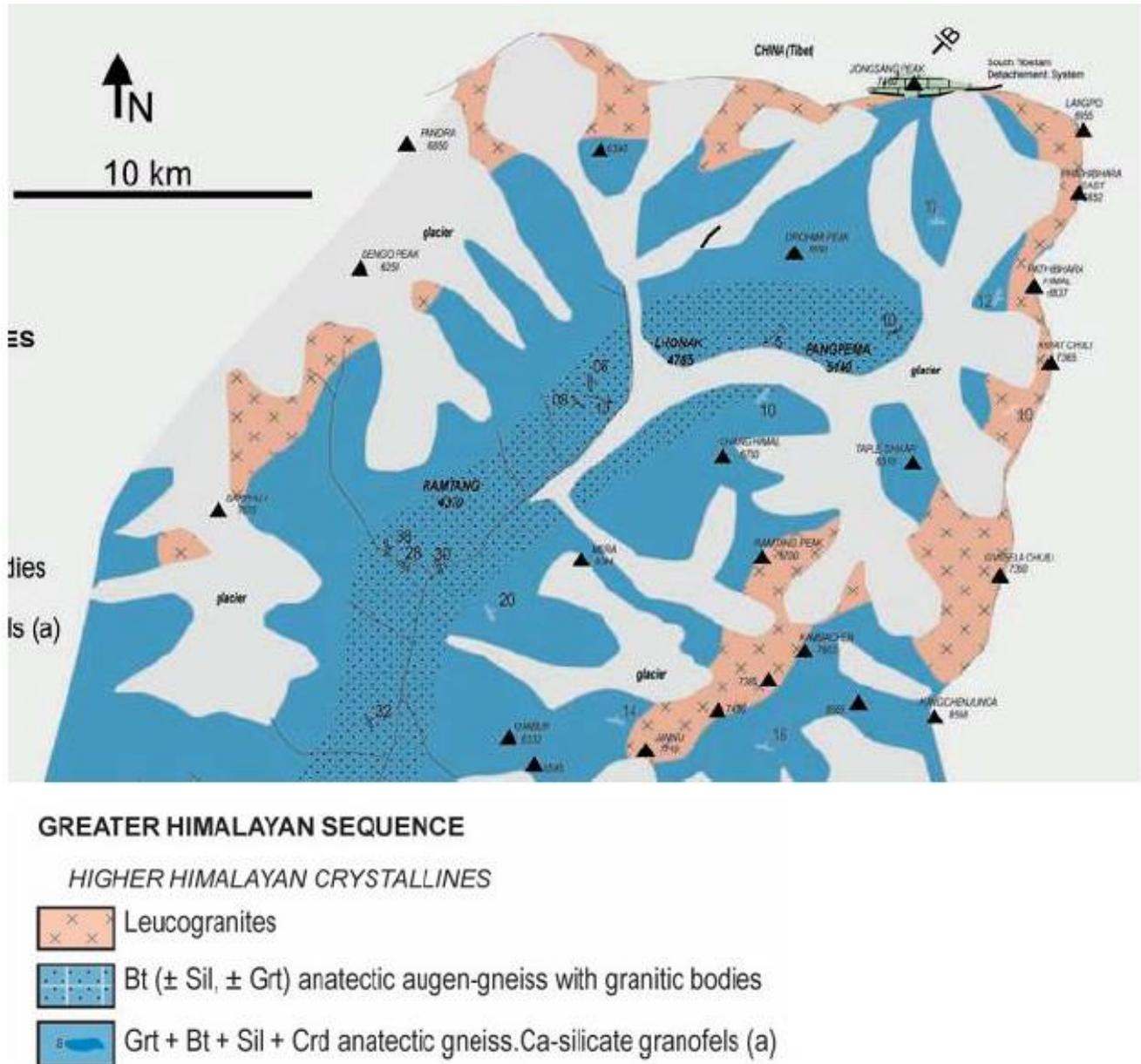


Fig. 21 – Stralcio della carta “Structural and metamorphic features of the Main Central Thrust Zone and its contiguous domains in the eastern Nepalese Himalaya”. Da Mosca et al., 2012.



Fig. 22 – Gneiss occhiadino



Fig. 23 - Gneiss



Fig. 24 – Leucogranito



Fig. 25 – Gneiss con intrusioni pegmatitiche



Fig. 26 – Gneiss con intrusioni pegmatitiche

GHIACCIAIO RONGBUK (EVEREST)

A differenza del Kangchenjunga, il Ghiacciaio Rongbuk, situato sul versante nord dell'Everest (Cina), è stato oggetto negli ultimi decenni di molti studi intensivi. Questi vanno da perforazioni e analisi chimiche del ghiaccio (Hou et al., 2003), 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), agli effetti della copertura detritica (Nie et al., 2010), a misure e modellistica di temperatura del ghiaccio e di velocità (Zhang et al., 2013), a bilanci di massa geodetici (Ye et al., 2015; King et al., 2017), alla pericolosità dei laghi sopragliaciali, 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 da quelli con fronte che si arresta su terra.

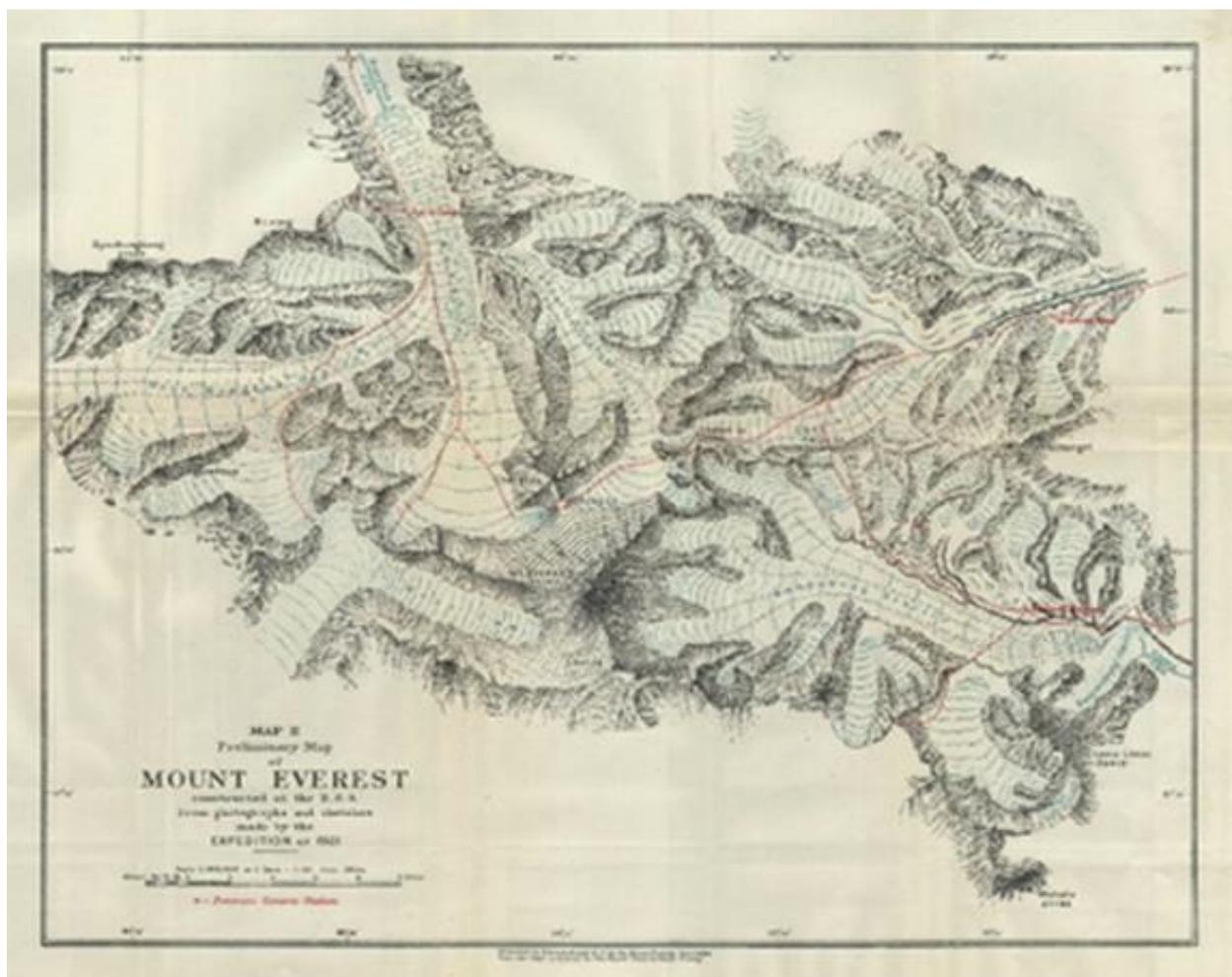


Fig. 27 - I ghiacciai del versante settentrionale dell'Everest nella carta di C.K. Howard-Bury, 1921

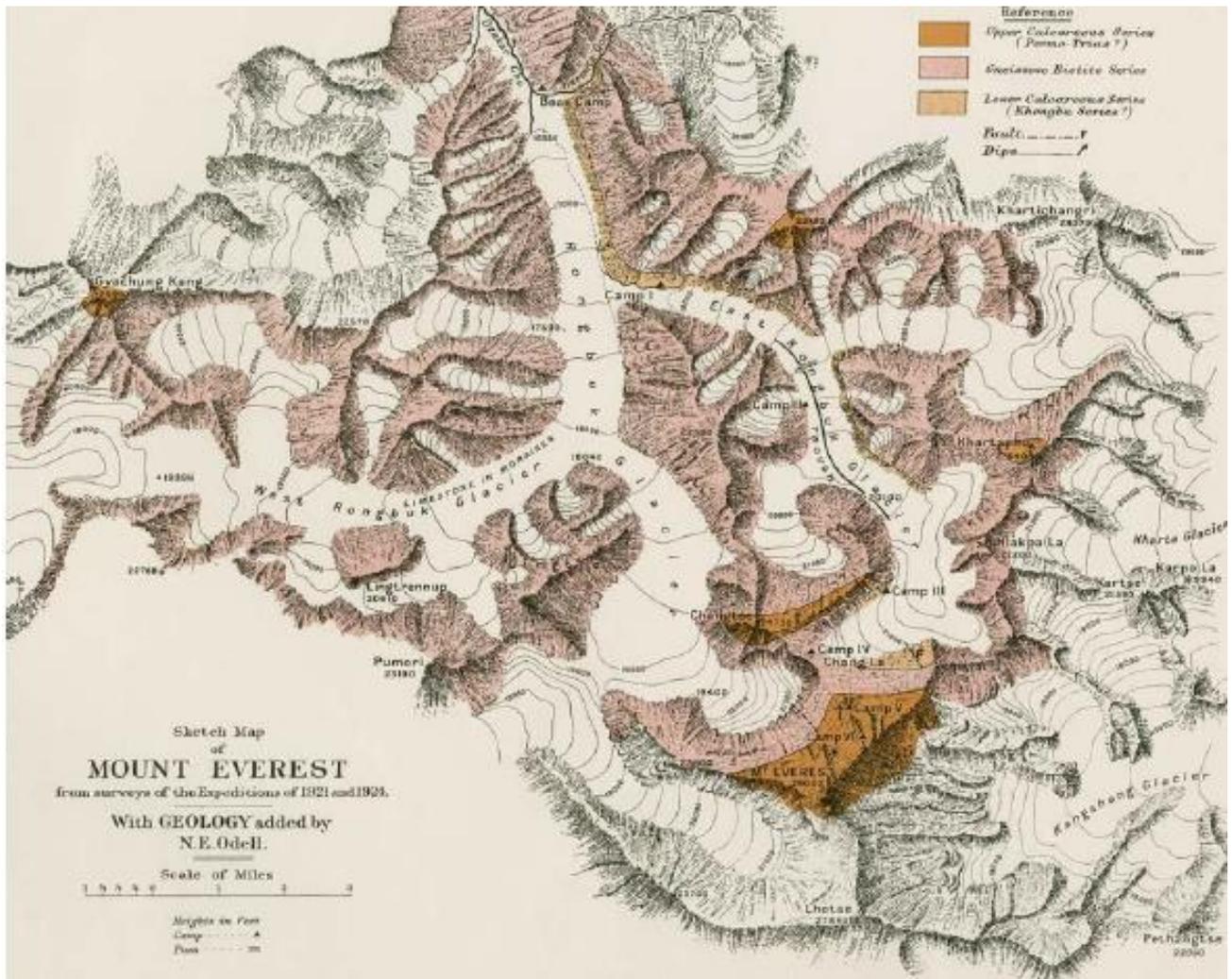


Fig. 28 - Il Ghiacciaio Rongbuk nella Carta del Monte Everest realizzata in base ai rilievi delle spedizioni del 1921 e 1924 e con notazioni geologiche di N.E. Odell. La carta venne pubblicata nel 1925 dalla London Royal Geographical Society. Come nella carta della fig. 27, si osserva che il Rongbuk Orientale era ancora confluyente nel ghiacciaio principale; lo stesso per alcune confluenze minori sul versante sinistro idrografico.

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. Si è inoltre presa in considerazione la variazione areale del lago sopragliaciale del Rombuk.

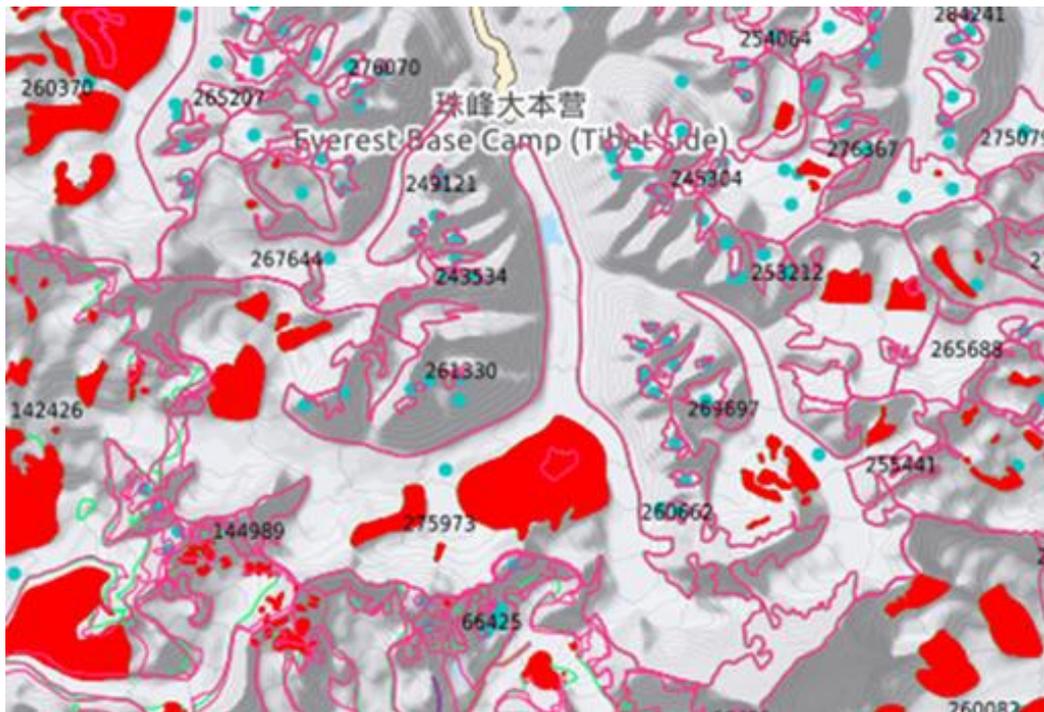


Fig. 29 - Il Ghiacciaio Rongbuk nel database GLIMS. In rosso sono indicate le aree rocciose interne ai ghiacciai

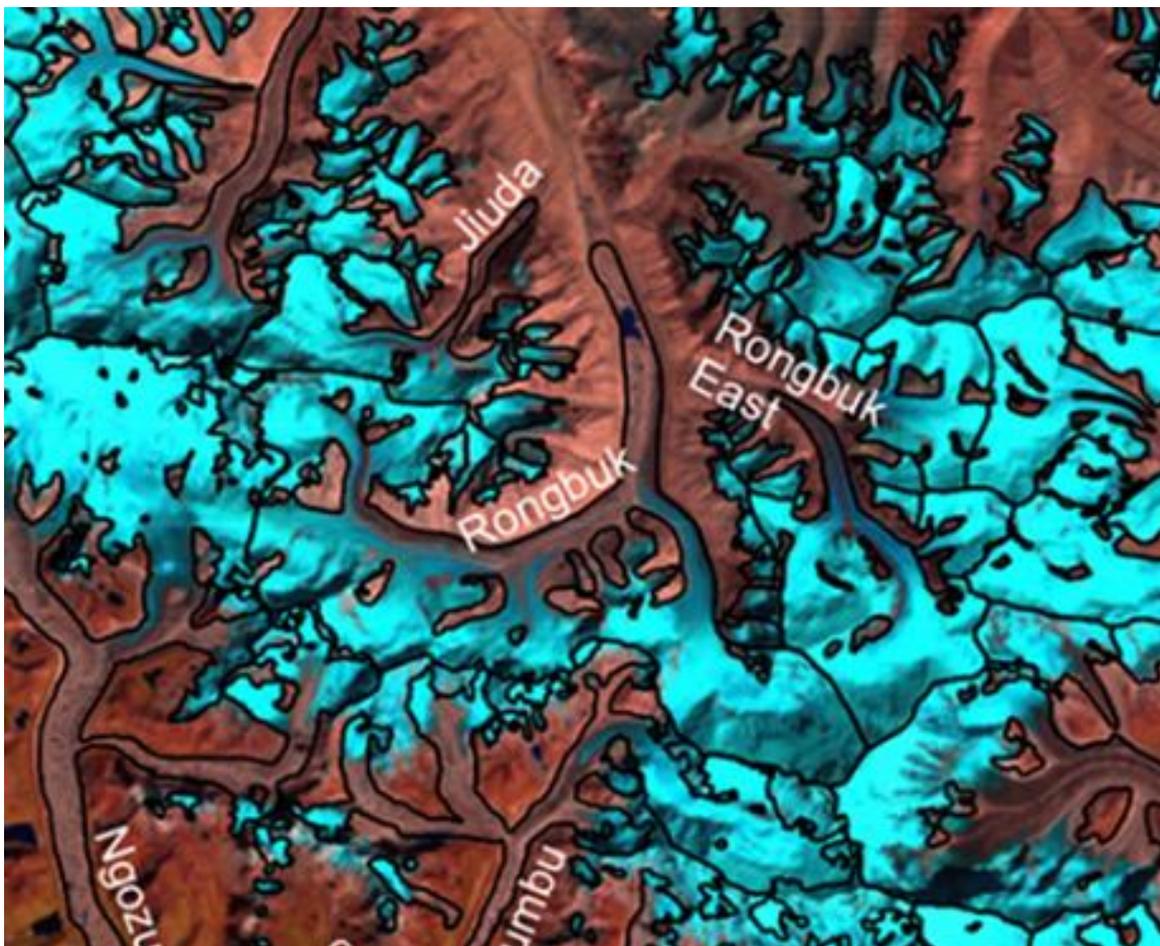


Fig. 30 - Il Ghiacciaio Rongbuk. Stralcio dalla carta di King et al., 2017.

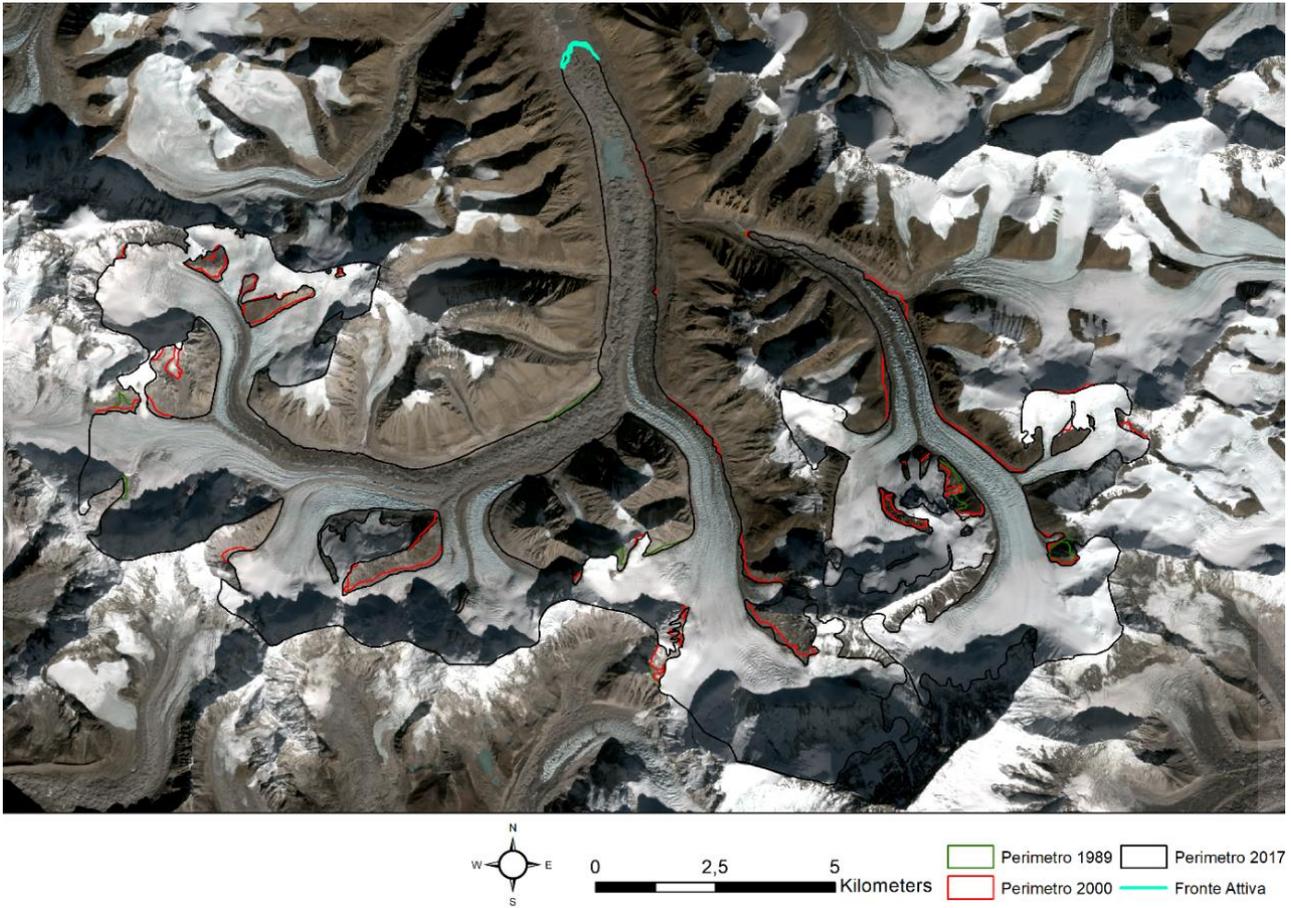


Fig. 31 - Il Ghiacciaio Rongbuk e il Ghiacciaio Rongbuk Orientale. I diversi colori indicano i diversi perimetri come da legenda (elaborazione immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza e R.S. Azzoni; limite fronte attiva dati di terreno di A. Bollati)



Fig. 32 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk con il limite della fronte attiva (da Google Earth; dati GPS di terreno di A. Bollati). Si osservi il fittissimo *pond network*.

Come si osserva dalla tabella sottoriportata, l'area complessiva è passata da 102,78 km² nel 1989 a 99,17 km² nel 2017 con una riduzione di 3,61 km² (-3,51%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,13 km² (-0,13% all'anno). Anche per il settore del Rongbuk le riduzioni areali (che sono passate da 0,05 km² annui nel periodo 1989-2000 a 0,18 km² annui nel periodo 2000-2017), derivano da 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 km² nel 1989 a 72,13 km² nel 2017 con una riduzione di 2,41 km² (-3,23%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,09 km² (-0,12% all'anno), mentre il Rongbuk Orientale nell'intero periodo ha fatto registrare una riduzione di 1,2 km² (-4,25%). Anche per il Rongbuk si osserva una lieve accelerazione della riduzione fra i due periodi considerati: si passa infatti da -0,02 km²/anno (-0,03%) per il periodo 1989-2000 a -0,13 km²/anno (-0,17%) per il periodo 2000-2017. Per il Rongbuk Orientale la riduzione media annua è ridottissima (-0,04 km²) e, tenendo conto del margine di errore, praticamente nulla a livello di percentuale, anche se in lieve incremento fra i due periodi (dallo -0,07% per il primo periodo a -0,18% nel secondo periodo).

In tabella sono riportate le aree:

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

I confronti con i risultati di altri lavori, come già osservato, non sono facili, a causa dei diversi metodi di analisi e dei diversi 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, per l'intero campione dei ghiacciai considerati (-0,12 % annui). E' un dato molto simile a quello ottenuto da Bolch et al., 2008, per i ghiacciai del versante nepalese fra il 1962 e il 2005.

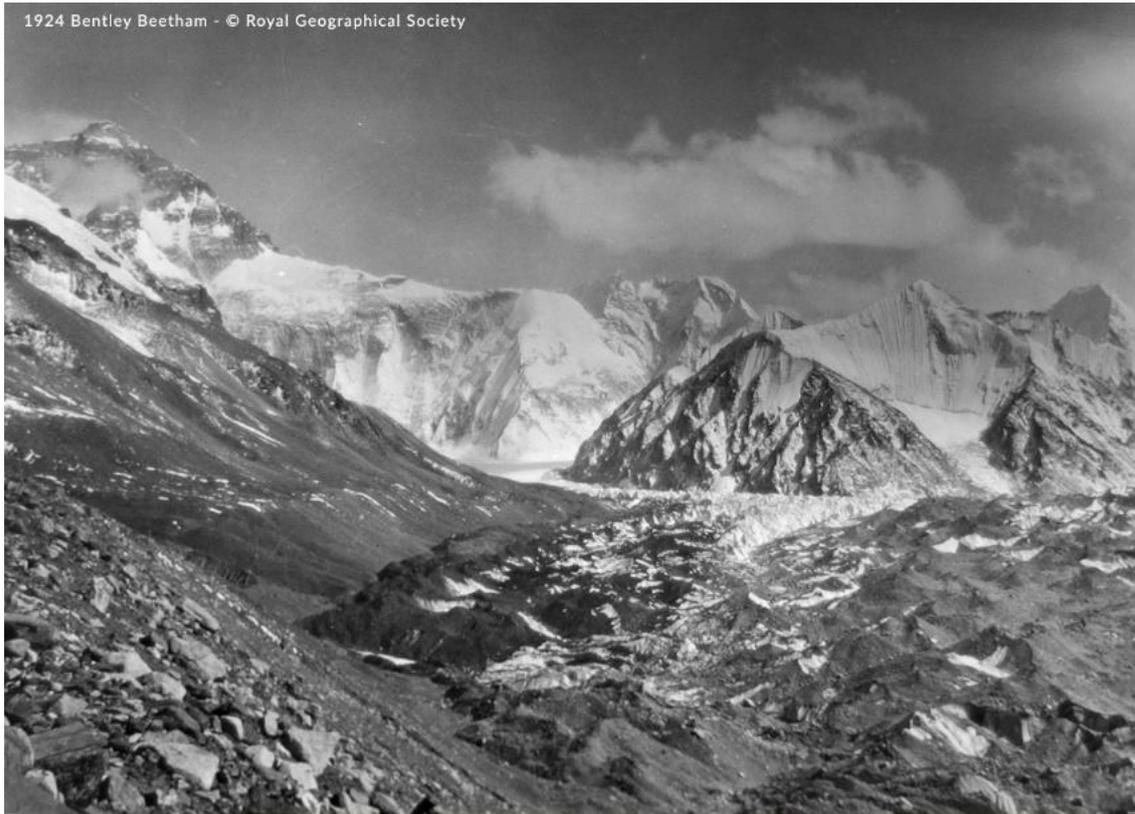


Fig. 33 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk in un confronto fra la foto di B. Beetham del 1924 e Fabiano Ventura, 2018. E' evidente la riduzione di spessore del ghiacciaio, come indicato anche dalla chiara *trim line* che segna la base del grande *nunatak* in centro alle immagini. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletraccedeighiacciai.com

1924 B. Beetham- © Royal Geographical Society

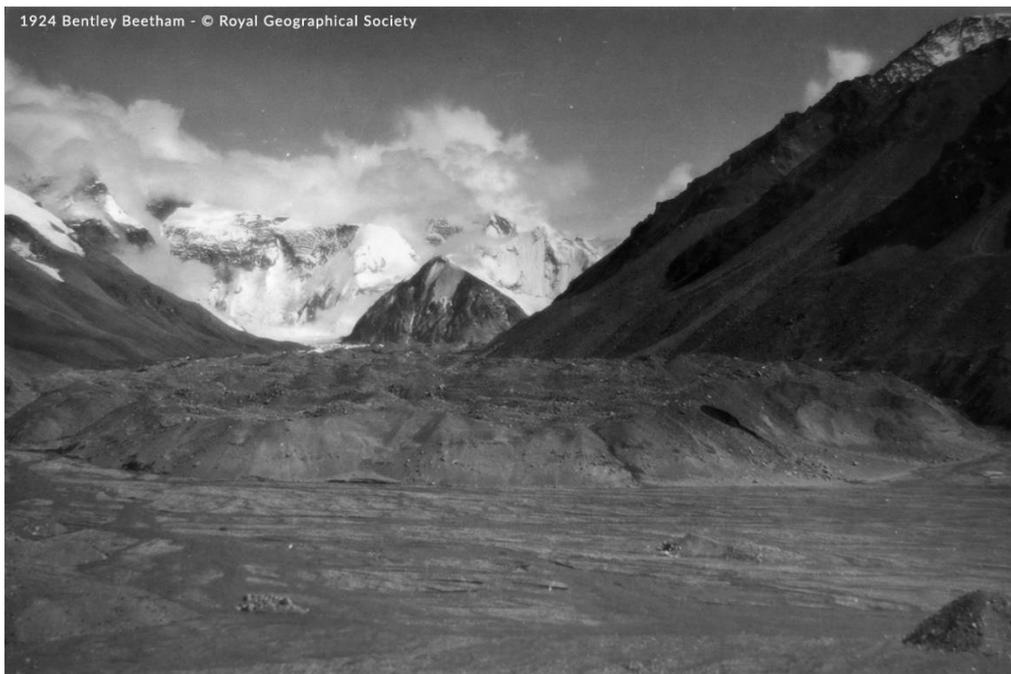
2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura



Fig. 34 – La confluenza tra il Ghiacciaio Rongbuk (Centrale) e la colata occidentale in un confronto fra la foto di C. J. Morris del 1922 e Fabiano Ventura, 2018. E' 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. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletraccedeighiacciai.com

1922 C.J. Morris © Royal Geographical Society

2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura



1924 Bentley Beetham - © Royal Geographical Society



2018 Fabiano Ventura - © Archive F. Ventura

Fig. 35 - La fronte del Ghiacciaio Rongbuk con la piana proglaciale in un confronto fra la foto di B. Beetham del 1924 e Fabiano Ventura, 2018. E' evidente la riduzione di spessore della fronte che non ha però modificato in misura significativa la propria posizione. Si osservi nella foto 2018 la presenza del grande campo base. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletraccedei ghiacciai.com

1924 B. Beetham- © Royal Geographical Society

2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura

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 sopragliaciali, 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. E' una vasta conca sopragliaciale che caratterizza il settore inferiore della lingua *debris covered*, la cui superficie raggiunge attualmente quasi il mezzo chilometro quadrato.

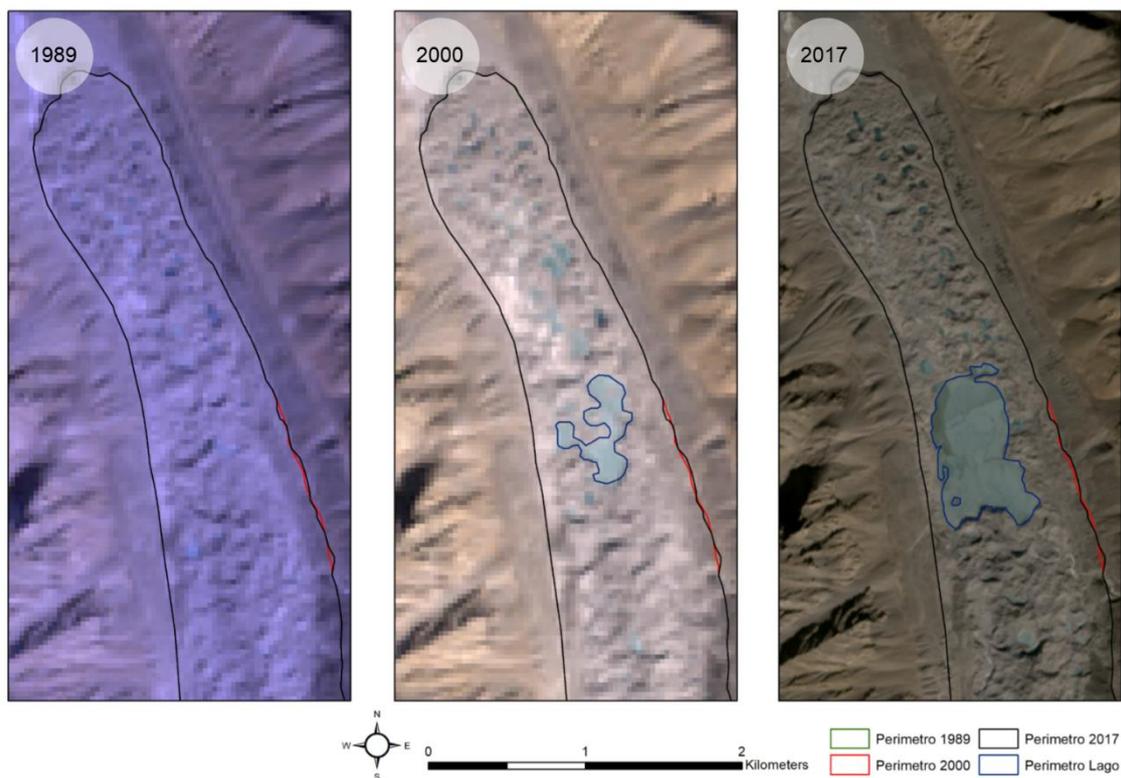


Fig. 36 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk con l'omonimo lago sopragliaciale. I diversi colori indicano i diversi perimetri come da legenda (elaborazione immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza)

Come si osserva dal confronto delle immagini da satellite (fig. 36), alla fine degli Anni Ottanta non vi è presenza di alcuna vasta conca lacustre, anche se sulla lingua glaciale si osservano le classiche morfologie della fase iniziale dello stadio di maturità del *glacier karst* che caratterizza i *debris covered glacier* (ghiaccio stagnante, con detritici, *backwasting*, con numerosissime piccole cavità colme di acqua di fusione (*glacial sinkholes* e *supraglacial melt ponds*)). Anche i confronti fra immagini da terra (fig. 40) 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 sopragliaciale

plurilobato con una superficie di 0,15 km². Nel 2017 il lago è ampiamente individuato, ha una superficie di 0,44 km² e occupa due terzi della larghezza della lingua glaciale. Questi risultati integrano e aggiornano lo studio di Chenn et al., 2014, che per il 1992, 2000 e 2008 forniscono i seguenti dati: 0,03 km²; 0,08 km²; 0,25 km². Entrambe le serie di dati evidenziano un incremento della superficie del lago dello stesso ordine di grandezza nel primo periodo (0,01 km² all'anno per il 1989-2000 e per il 1992-2000) con un'accelerazione nel periodo successivo (0,03 km² per il 2000-2017 e 0,02 per il 2000-2008). Di fatto il fenomeno sta accelerando e si può sicuramente essere d'accordo con Chenn 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.



Fig. 37 - 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*.

2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura - www.sulletraccedeighiacciai.com



Fig. 38 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk, con l'omonimo lago sopragliaciale, visti da monte verso valle. Ben visibili a monte del lago le falesie di ghiaccio e sui bordi le morene laterali dell'Olocene Superiore e della PEG (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 39 - Il Lago Rongbuk. Sul versante occidentale sono ben visibili le *trim line* della PEG (grigio chiaro) e dell'Olocene Superiore (grigio più scuro) (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 40 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk in un confronto fra la foto di E.O. Wheeler del 1921 e Fabiano Ventura, 2018. A inizio Novecento il lago sopra glaciale non è visibile, il settore inferiore della lingua presenta un livello superficiale più elevato seppure molto articolato e irregolare. Ben visibili le morene laterali dell'Olocene Superiore e della PEG. Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" www.sulletraccedeighiacciai.com
 1921 E. O. Wheeler- © Royal Geographical Society
 2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura



Fig. 41 – Il lago sopra glaciale che sovrasta il campo base situato poco più a valle, ai piedi della fronte interamente coperta di detrito (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 42 – Un'altra immagine del lago sopraglaciale che sovrasta il campo base (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 43 - La fronte interamente detritica del Ghiacciaio Rongbuk (a destra) alla cui base è posto il campo. Dietro il campo è visibile l'imponente morena laterale destra della PEG (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 44 – Il settore inferiore del Ghiacciaio Rongbuk visto da una quota di 5780 m. Ben visibile la piana proglaciale antistante la fronte percorsa dai meandri del torrente subglaciale. In evidenza le morene, in sinistra orografica, riferibile alla PEG e all'Olocene Superiore. 2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura - www.sulletraccedeighiacciai.com

Litologia del detrito

Sul terreno, osservando il detrito lungo il versante in destra orografica del Ghiacciaio Rongbuk (Centrale) e sulla fronte del ghiacciaio, i litotipi sono riferibili alla “Formazione Rongbuk” (prevalentemente scisti e gneiss, con intrusioni leucogranitiche e pegmatitiche) affioranti estesamente alla base dei versanti che ospitano i ghiacciai Rongbuk centrale e occidentale (n sinistra orografica), e alla “Formazione del Colle Nord” (prevalentemente filladi, scisti), affioranti estesamente alla base dei versanti dove scorre il Rongbuk centrale (in destra orografica) e orientale, come si può osservare anche dallo stralcio della carta geologica dell’area (fig. 45, Searle et al., 2003) (tutte le foto sono di A. Bollati, 2018).

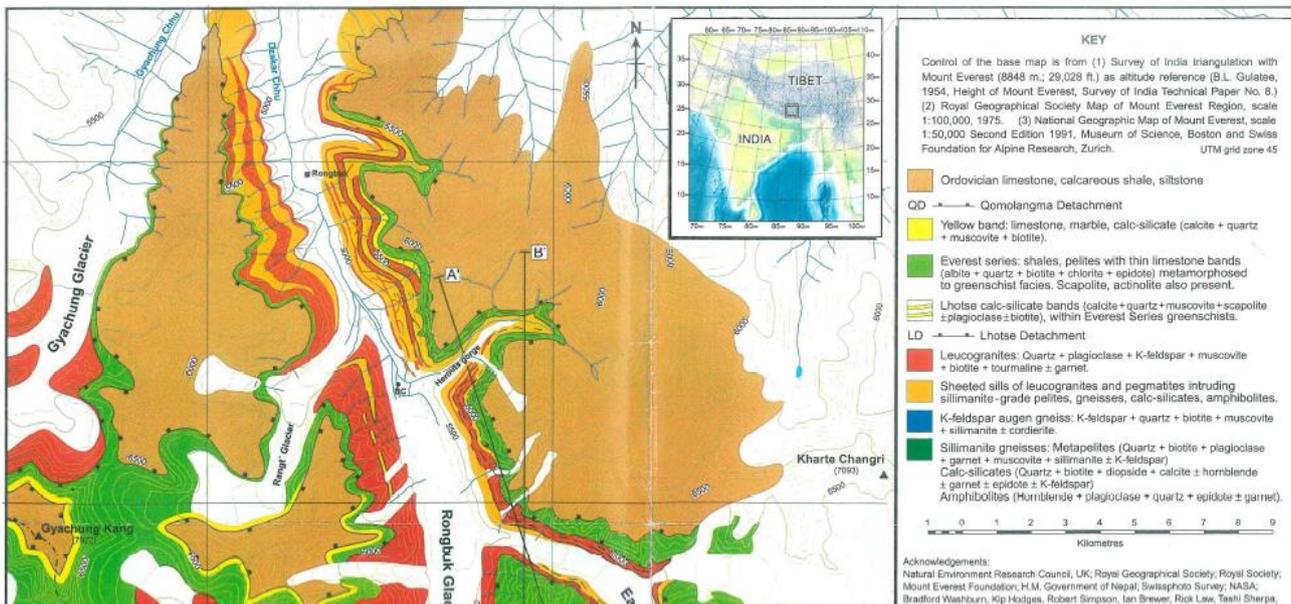


Fig. 45 – Stralcio della carta geologica del Monte Everest (da Searle et al., 2003).



Fig. 46 – Filladi



Fig. 47 – Gneiss



Fig. 48 - Scisti con intrusioni di leucograniti.



Fig. 49 - Leucogranito a granati.

GHIACCIAIO GYABRAG o GYARAG (CHO OYU)

Anche il Ghiacciaio Gyarag o Gyabrag (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. Anche le sue lingue, in particolare quella del Gyarag 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. In questo lavoro viene evidenziata una riduzione di spessore di oltre 3 m nella zona non coperta da detrito fra 5300 e 5400 m di altezza. Sul Gyabrag sono state realizzate anche analisi chimiche del manto nevoso (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 Gyabrag in senso stretto, sono stati elaborati anche i perimetri del Gyabrag Orientale.

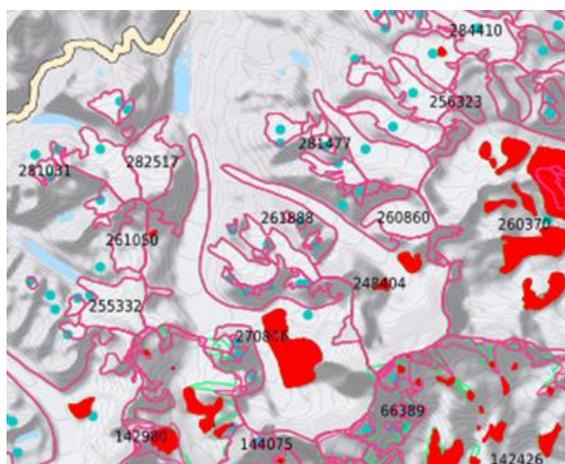


Fig. 50 - Il Ghiacciaio Gyabrag nel database GLIMS. In rosso sono indicate le aree rocciose interne ai ghiacciai

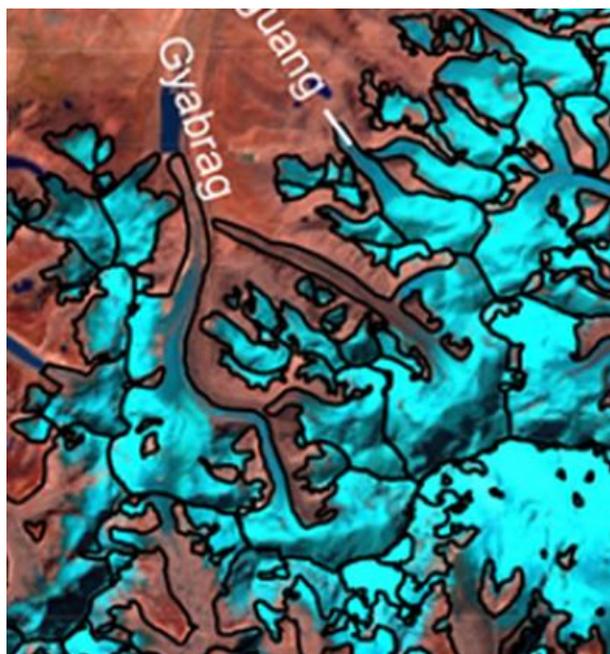


Fig. 51 - Il Ghiacciaio Gyabrag. Stralcio dalla carta di King et al., 2017

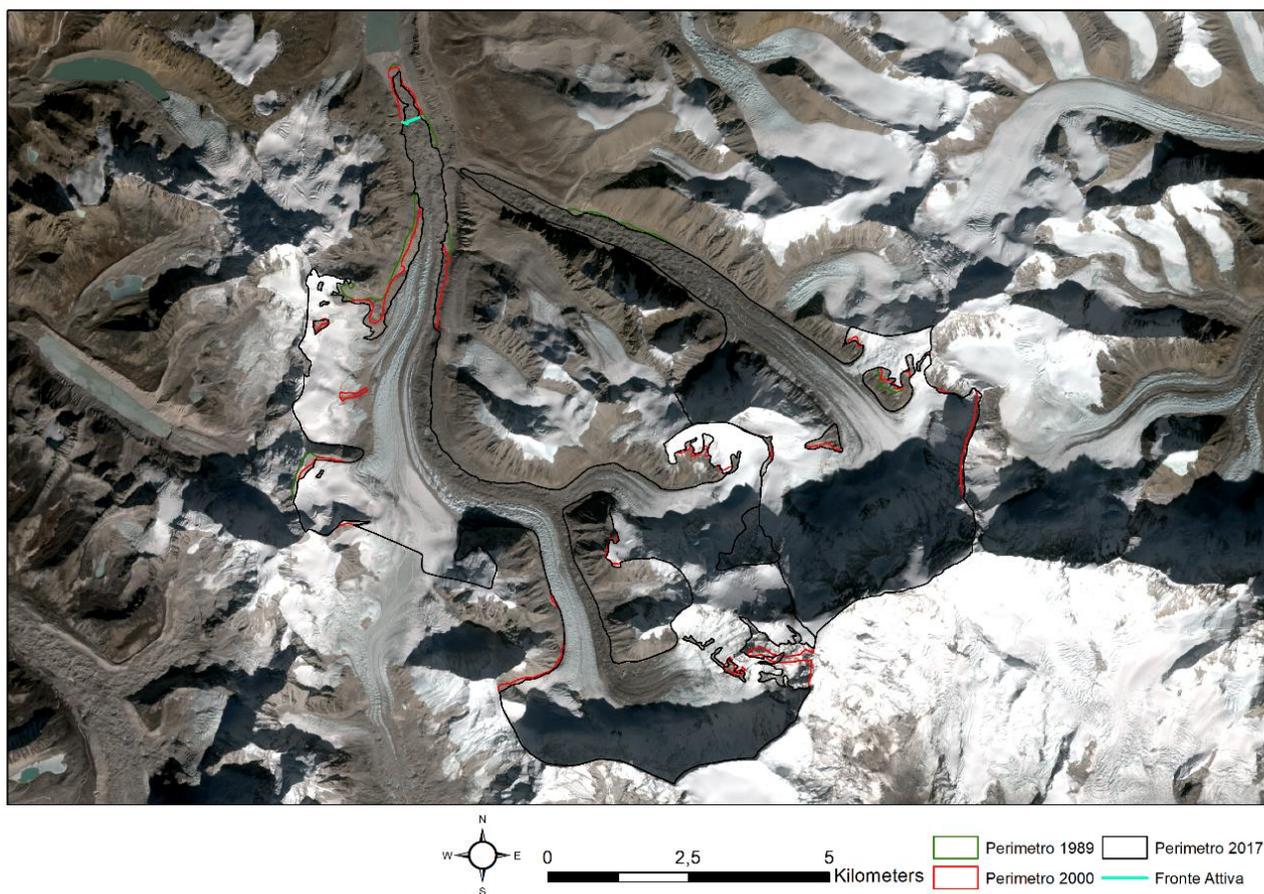


Fig. 52 - Il Ghiacciaio Gyabrag, attualmente suddiviso nelle due colate Gyabrag e Gyabrag Orientale. I diversi colori indicano i diversi perimetri come da legenda (elaborazione immagini da satellite e analisi dati D. Fugazza e R.S. Azzoni; limite fronte attiva dati di terreno di A. Bollati)

Il Ghiacciaio Gyabrag 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. 53).



Fig. 53 - Il Ghiacciaio Gyabrag in un confronto fra le foto del 1921 (1921 E. O. Wheeler- © Royal Geographical Society) e del 2018 (2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura) che mostra un imponente abbassamento del livello del ghiacciaio (foto Archivio F. Ventura).
Confronto fotografico realizzato nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai"
www.sulletraccedeighiacciai.com

Per quanto riguarda le variazioni recenti, come si osserva dalla tabella sottoriportata, l'area complessiva è passata da 54,43 km² nel 1989 a 52,32 km² nel 2017 con una

riduzione di 2,11 km² (-3,88%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,08 km² (-0,15% all'anno). Anche per il settore del Gyabrag le riduzioni areali (che sono passate da 0,05 km² annui nel periodo 1989-2000 a 0,09 km² 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 complessiva è passata da 34,43 km² nel 1989 a 32,48 km² nel 2017 con una riduzione di 1,95 km² (-5,66%), corrispondenti a una perdita media annua di 0,07 km² (-0,20% all'anno), mentre il Gyabrag Orientale nell'intero periodo ha fatto registrare una riduzione di 0,16 km² (-0,80%). Anche per il Gyabrag si osserva una lieve accelerazione della riduzione fra i due periodi considerati: si passa infatti da -0,04 km²/anno (-0,12%) per il periodo 1989-2000 a -0,09 km²/anno (-0,26%) per il periodo 2000-2017. Per il Gyabrag Orientale la riduzione media annua è ridottissima e, tenendo conto del margine di errore, praticamente nulla a livello di percentuale.

In tabella sono riportate le aree:

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

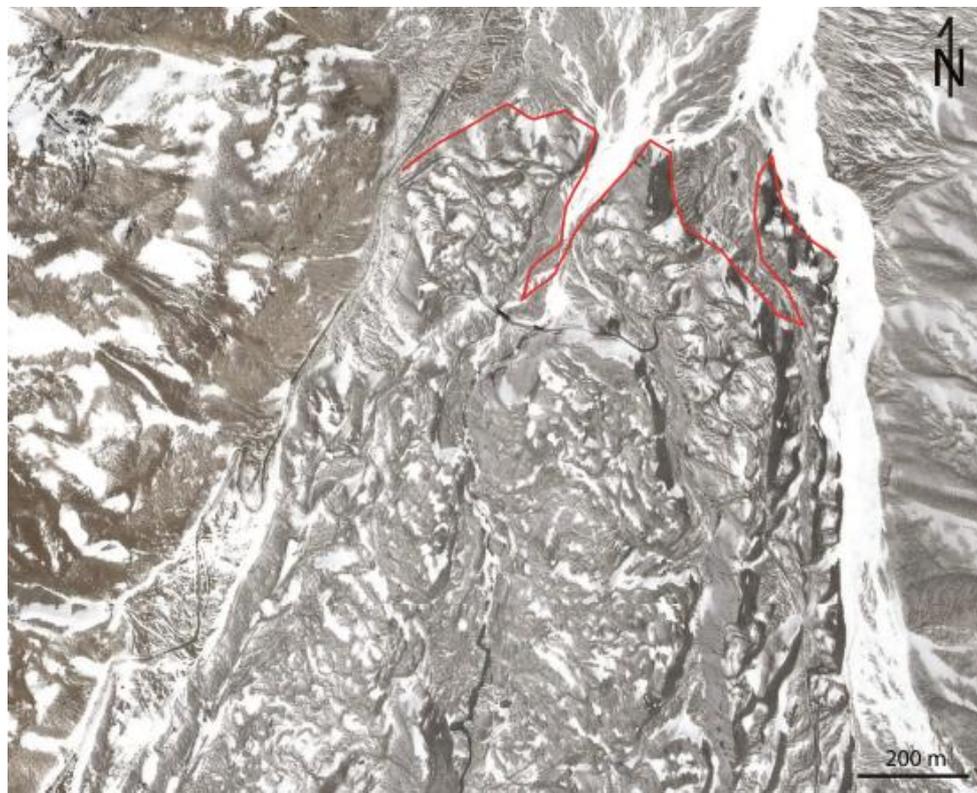


Fig. 54 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag con il limite della fronte inattiva, a quota circa 5000 m (da Google Earth con dati GPS di terreno di A. Bollati)



Fig. 55 - La fronte della lingua inattiva del Ghiacciaio Gyabrag (foto di A. Bollati, 2018).

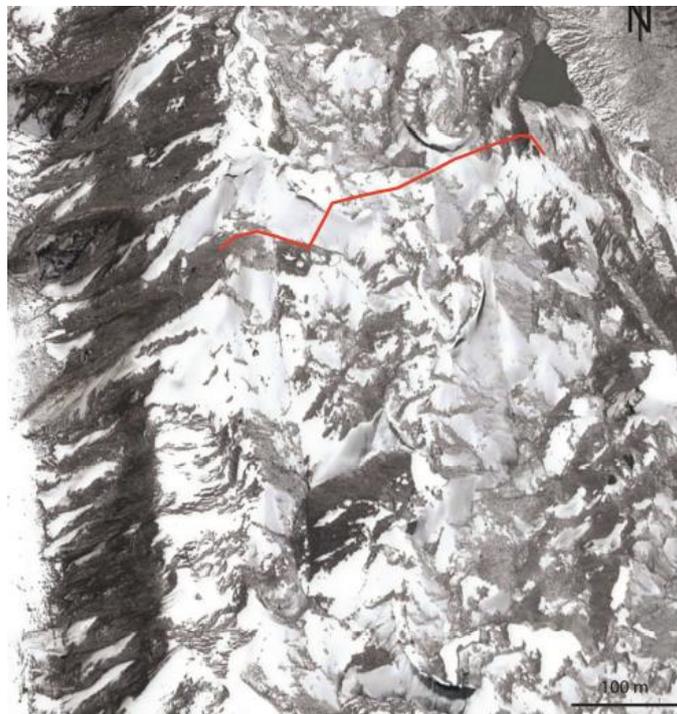


Fig. 56 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag con il limite della fronte attiva, posta a 5130 m circa (da Google Earth con dati GPS di terreno di A. Bollati).



Fig. 57 - La fronte attiva, posta a 5130 m circa (foto di A. Bollati, 2018).

La particolare morfologia della lingua del Gyabrag ha suggerito di tracciare le sezioni sul terreno con GPS sia della fronte della porzione inattiva (figg. 54 e 55), 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 circa quota 5130 m a monte del lago (figg. 56 e 57).

Il settore inferiore, sicuramente stagnante, è caratterizzato dalla tipica morfologia della fase terminale dell'evoluzione dei *debris covered glacier*: alternanza di coni e depressioni con totale copertura detritica e con ridotta energia di rilievo, limitate evidenze di idrologia superficiale, limitata presenza di cavità tipo *pond*, limitate evidenze di ghiaccio affiorante.



Fig. 58 - Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag. E' ben distinguibile la parte più bassa stagnante della lingua dalla parte più a monte con evidenti falesie di ghiaccio (2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura).



Fig. 59 - Il settore inferiore, stagnante, compreso tra la fronte attiva e il grande lago (foto di A. Bollati, 2018).

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 (fig. 60); 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 (fig. 61).



Fig. 60 - L'*ice cliff* da cui nasce il torrente subglaciale (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 61 – Il settore medio-inferiore del Ghiacciaio Gyabrag; a tratteggio la fronte attiva misurata (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 62 – Il settore superiore del Ghiacciaio Gyabrag, con sullo sfondo il passo denominato *Nangpa La*. Si osservi il rarefarsi del detrito superficiale che si concentra nelle lunghe morene sopragliaciali longitudinali (foto di A. Bollati, 2018).

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. 62). Per quanto riguarda il grande lago, va osservato che questo non è ancora presente nelle foto degli Anni Venti, dove la lingua appare ancora ben rigonfia e scarsamente ricoperta da detrito (fig. 63). La fronte probabilmente attiva è quindi arretrata di almeno 5 km durante il XX secolo, anche se lembi di ghiaccio fossile e stagnante sono probabilmente presenti anche a valle del lago (figg. 65-66).

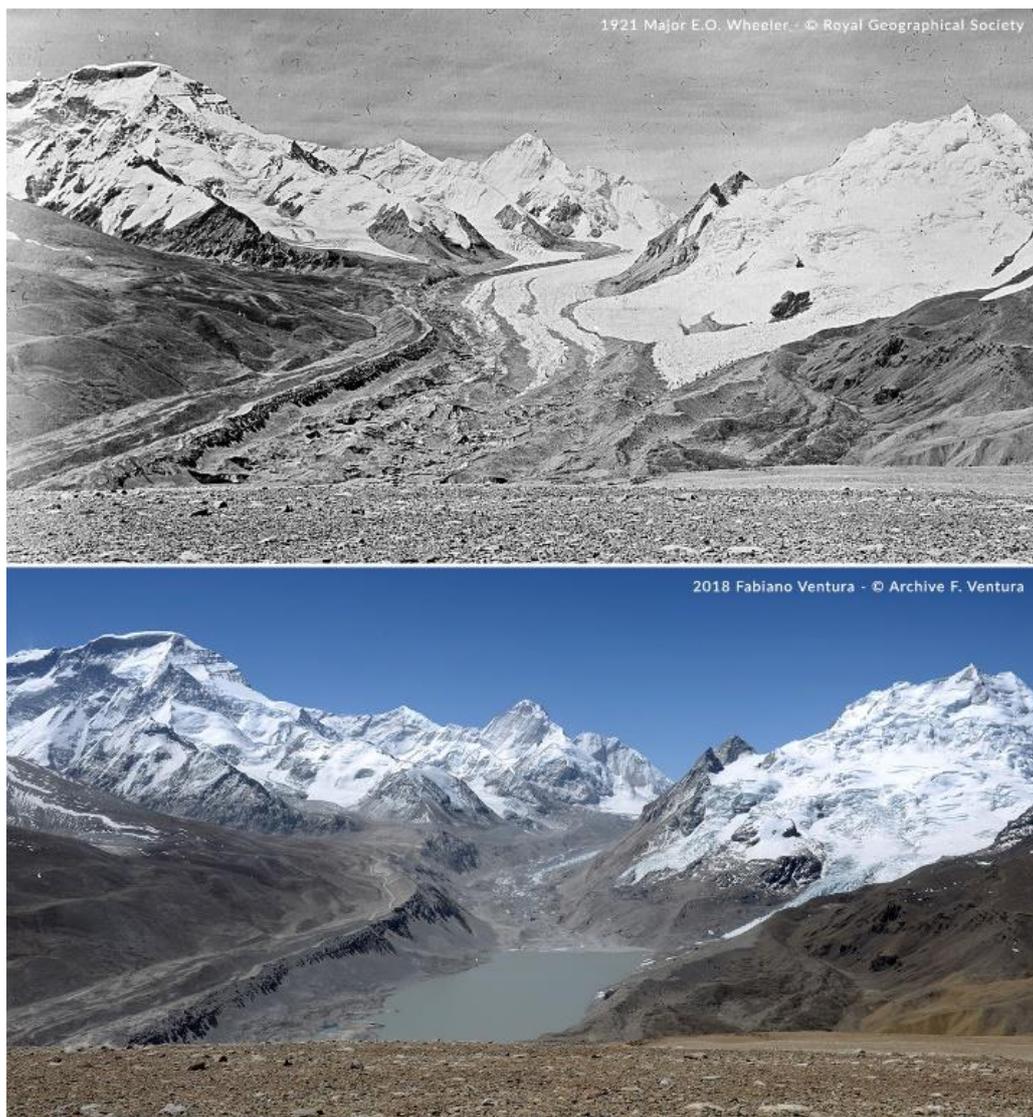


Fig. 63 – Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag in un confronto fra le foto del 1921 (1921 E. O. Wheeler- © Royal Geographical Society) e del 2018 (2018 Fabiano Ventura - © Archivio F. Ventura). Come si vede, il grande lago proglaciale non era presente all’inizio del XX secolo. Si osservi la riduzione generale di spessore del ghiacciaio e l’ampliamento della copertura detritica (foto Archivio F. Ventura). Confronto fotografico realizzato nell’ambito del progetto “Sulle tracce dei ghiacciai” www.sulletraccedeighiacciai.com



Fig. 64 - Il lago del Ghiacciaio Gyabrag, lungo oltre due chilometri e largo circa 650 m (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 65 - 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 (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 66 – Morfologie sopraglaciali (*pond* che si alternano a coni di ghiacciaio) nel settore inferiore del Ghiacciaio Gyabrag a valle del grande lago (foto di A. Bollati, 2018).

Litologia del detrito

L'osservazione del detrito morenico (*till*) tra la fronte inattiva del Ghiacciaio Gyabrag e la fronte attiva suggerisce che i litotipi prevalenti siano riferibili alla "Formazione Rongbuk" (comprendente scisti e gneiss, con intrusioni leucogranitiche e pegmatitiche)(fig. 69), affiorante alla base dei versanti che ospitano il ghiacciaio; meno rappresentati sembrano i litotipi della "Formazione del Colle Nord" (per lo più filladi, scisti).



Fig. 67- Il detrito morenico (*till*) a valle della fronte attiva misurata, con morfologie da ghiaccio “morto”; verso monte sono visibili le falesie di ghiaccio (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 68 - Il detrito morenico (*till*) a valle della fronte attiva misurata; sullo sfondo le grandi morene laterali interessate da fenomeni di dissesto con solchi di erosione sul versante e coni di accumulo alla base (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 69 - Dettaglio del detrito morenico (*till*) costituito prevalentemente da blocchi spigolosi leucogranitici, a valle della fronte attiva misurata (foto di A. Bollati, 2018)



Fig. 70 – Morfologie degli accumuli detritici del versante in destra orografica della valle del Ghiacciaio Gyabrag, nei pressi della sponda di monte del lago. Sulla sinistra si osserva l'accumulo di clasti grossolani di uno dei coni detritici depositati alla base delle morene. In primo piano i sedimenti fini lacustri con evidenti stratificazioni. Si noti come i clasti di maggiore granulometria alla base del versante abbiano formato minuscoli "funghi" con il gambo di neve compatta e la parte sommitale di roccia, offrendo un classico esempio di ablazione differenziale (foto di A. Bollati, 2018).

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 aree. 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 inoltre 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. È un regresso sicuramente attivo nel XX secolo che continua, come evidenziato dalle elaborazioni delle immagini satellitari, anche nei decenni più recenti. Va in ogni caso ribadita la difficoltà per questo tipo di ghiacciai (*debris covered glacier*) non solo di delineare esattamente il loro perimetro, ma soprattutto di individuare la loro fronte. Il settore inferiore è infatti normalmente caratterizzato da ghiaccio fossile e dalla mancanza di trasferimento di massa dai bacini collettori, il che rende poco preciso il calcolo dell'area. Dall'analisi delle immagini satellitari emergono tuttavia due dati di fatto che caratterizzano un periodo di quasi un trentennio (1989-1991; 2000; 2017): 1) una riduzione areale la cui dimensione è alquanto simile per le tre aree considerate (fra il 3 e il 4%), nonostante le differenze geografiche e climatiche; 2) un'accelerazione della riduzione areale fra i due periodi considerati. Per avere un termine di confronto si possono ricordare le variazioni recenti dei due maggiori ghiacciai italiani, quello dell'Adamello e quello dei Forni, che nel periodo 1982-2016 per il primo e 1991-2016 per il secondo hanno fatto registrare riduzioni areali percentuali rispettivamente del 24,82 e del 19,1%. Si tratta chiaramente di ambiti molto differenti non solo geografici e climatici, ma anche morfologici (si pensi agli effetti della copertura detritica sull'entità dell'ablazione), che tuttavia rispondono alla ben nota legge generale della relazione inversa fra superficie iniziale dei ghiacciai e percentuale della variazione, evidenziata fra gli altri da Paul et al. (2004) e da Smiraglia et al. (2015).

Di fatto i risultati ottenuti nell'ambito della Spedizione Himalaya 2018 confermano quanto emerso dagli studi precedenti, cioè una riduzione areale e volumetrica negli ultimi decenni con un'accelerazione di questo fenomeno negli ultimi anni (si vedano fra gli altri ad esempio Ren et al., 2006; Bolch et al., 2008; Salerno et al., 2008;

Racoviteanu et al., 2015; Brahmabhatt 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 durante il periodo 1901-2014 la temperatura media annua ha subito un significativo incremento (0,10°C per decennio).

BIBLIOGRAFIA

- BALERNA A., BERNIERI E., PECCI M., POLESELLO S., SMIRAGLIA C. & VALSECCHI S. (2003) – *Chemical and radio-chemical composition of fresh snow samples from northern slope of Himalayas (Cho Oyu range, Tibet)*. *Atmospheric Environment*, 37, 1573-1581.
- BASNETT S., KULKARNI & 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*. *Journal of Glaciology*, 54, 187, 592–600.
- 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.
- 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.
- GARWOOD E.J. (1903) – *The Geology, Structure and Physical Features of Sikkim*. In: "Round Kangchenjunga". Freshfield, Arnold, London, 275-299.
- GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) - (<http://glims.colorado.edu/glacierdata/>).
- 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.
- KRAAIJENBRINK 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.

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 Sciences*, 7, 146–156.

MOSCA P., GROppo C. & ROLFO F. (2012) - *Structural and metamorphic features of the Main Central Thrust Zone and its contiguous domains in the eastern Nepalese Himalaya*. *Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition*, ISSN 1441-8142, 41 (2).

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, 3719–3734.

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. & KAAB A. (2004) - *Combining satellite multispectral 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.

PELTO M. (2015) – *Kangchenjunga Glacier, Nepal volume losses*. [/blogs.agu.org/fromaglaciarsperspective/2015/12/23/kanchenjunga-glacier-nepal-volume-losses/](https://blogs.agu.org/fromaglaciarsperspective/2015/12/23/kanchenjunga-glacier-nepal-volume-losses/)

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., BRUCCOLERI G., TARTARI G. & SMIRAGLIA C. (2008) - *Glacier surface-area changes in Sagarmatha National Park, Nepal, in the second half of the 20th 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.

SEARLE M.P., SIMPSON R.L., LAW R.D., PARRISH R.R. & WATERS D.J. (2003) - *The structural geometry, metamorphic and magmatic evolution of the Everest massif, High Himalaya of Nepal–South Tibet*. *Journal of the Geological Society*, 160, 345–366.

SMIRAGLIA C., AZZONI R.S., D'AGATA C., MARAGNO D., FUGAZZA D. & DIOLAIUTI G. (2015) - *The evolution of the Italian glaciers from the previous data base to the New Italian Inventory. Preliminary considerations and results*. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 38, 79-87.

SONG Y., ZHU T., CAI X., LIN W. & KANG L. (2017) - *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 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.