

# Cartographie satellitaire des aléas naturels liés aux glaciers dans la Cordillera Blanca (Pérou), entre 1970 et 2000

Autor(en): **Silverio, W. / Jaquet, J-M.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société**

Band (Jahr): **56 (2003)**

Heft 1

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-740430>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Archs Sci. Genève	Vol. 56	Fasc. 1	pp. 39-58	Juillet 2003
-------------------	---------	---------	-----------	--------------

# CARTOGRAPHIE SATELLITAIRE DES ALÉAS NATURELS LIÉS AUX GLACIERS DANS LA CORDILLERA BLANCA (PÉROU), ENTRE 1970 ET 2000

BY

**W. SILVERIO<sup>1</sup> & J-M. JAQUET<sup>1</sup>**

Conférence du 5 décembre 2002 au Muséum d'Histoire naturelle

## ABSTRACT

### **Mapping by Remote Sensing of Glacier-induced Natural Hazards, Cordillera Blanca, Peru. -**

In high mountain areas, rugged topography is a potential source of natural hazards, such as avalanches and sudden draining of glacial lakes. In Peru's Cordillera Blanca, apart from the 1970 avalanche on Huascarán Norte western side, natural hazards have not yet been systematically mapped. This work attempts to fill the gap by setting up a cartographic base for the main catastrophic events, which occurred in the area between 1970 and 2000. Landsat MSS and TM imagery was analysed to map avalanches, and to follow the development of potentially dangerous lakes at the front of retreating glaciers.

**Key-words:** Natural hazards, remote sensing, cartography, glaciers, climate change.

## RESUMEN

**Cartografía satelital de eventos catastróficos en la Cordillera Blanca (Perú).** - En las regiones de alta montaña, la topografía muy accidentada es fuente potencial de amenazas, entre ellas, las avalanchas y el desborde de las lagunas glaciares. En la Cordillera Blanca, aparte de la avalancha de 1970, en la vertiente oeste del Nevado Huascarán Norte, ese tipo de fenómenos naturales no han sido cartografiados en detalle. En base de análisis de imágenes de los satélites Landsat 2 MSS y 5 TM, el presente trabajo establece una base cartográfica de los principales eventos catastróficos ocurridos en la zona entre 1970 y el 2000. Igualmente, éstas imágenes han permitido un seguimiento diacrónico de la evolución de 3 lagunas glaciares situadas en la parte norte del macizo.

## 1. INTRODUCTION

Dans la Cordillera Blanca, au cours des siècles, la présence de hauts sommets, de glaciers et lacs associés a produit de nombreux mouvements de masse, avec des conséquences dévastatrices pour les populations de la région. Ces phénomènes étant situés loin des villes, leur dangerosité est par conséquent difficile à percevoir depuis les centres urbains. Un suivi diachronique du développement des lacs et de la dynamique glaciaire s'avère donc indispensable, afin de minimiser les risques encourus par la population et les biens.

---

<sup>1</sup>Unité de Télédétection et SIG, Section des Sciences de la Terre, Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, CH - 1211 Genève 4.

e-mail: silveri9@etu.unige.ch ; jean-michel.jaquet@terre.unige.ch

Ce suivi peut être avantageusement mis en œuvre par l'interprétation d'images satellitaires au sein d'un Système d'Information Géographique (SILVERIO, 1999; SILVERIO, 2001). Après un historique des mouvements de masse les plus marquants ayant affecté la région, nous en présentons une cartographie, ainsi qu'un suivi du développement des lacs dans la partie nord de la Cordillera entre 1970 et 2000.

Nous espérons que ces cartes pourront servir aux autorités régionales, en vue d'une prise en compte des dangers naturels lors d'aménagements futurs.

## 2. Typologie des mouvements de masse

Selon EISBACHER & CLAGUE (1984), les mouvements de masse liés aux glaciers se répartissent en cinq grandes catégories résumées dans le tableau 1. Nous traiterons dans cet article les aléas de type 2, 4 et 5.

TABLEAU I. Typologie des mouvements de masse liés aux glaciers (d'après EISBACHER & CLAGUE, 1984). En gras: traité dans le texte

No	Cause	Effet (phénomène)	Localisation de la cause
1	Vidange soudaine due à la rupture du barrage de glace	Coulées d'eau et de débris	Lacs de barrage glaciaires
2	Rupture de barrage morainique provoquée par vague ou élévation du niveau lacustre	Coulées de débris (aluvión)	Lacs péri-glaciaires
3	Eclatement de poches sous- et intra-glaciaires.	Coulées de débris	Glaciers
4	Avalanches de glace	Coulées de débris	Glaciers suspendus (langue sur pente rocheuse lisse à > 30°)
5	Avalanche de roches et de glace sus-jacente	Coulées de débris	Glaciers suspendus sur roche fracturée

## 3. Principaux traits de la Cordillera Blanca

La Cordillera Blanca (CB) est localisée entre les coordonnées géographiques 08° 30' – 10° 10' S / 77° 00' – 78° 00' W, dans le département d'Ancash (Pérou), à 400 km au nord de Lima; ses dimensions sont d'environ 180 km de longueur et 30 km de largeur (fig. 1). En 1975, 3400 km<sup>2</sup> de son territoire ont été déclarés Parc National Huascarán (PNH).

Cette cordillère concentre plus de deux cents sommets dépassant 5000 m, parmi lesquels, 27 sont supérieurs à 6000 m d'altitude, dont Huascarán Sur 6768 m, point culminant du Pérou, également, de nombreux lacs et vallées glaciaires, 711 glaciers, qui selon HIDRANDINA (1988), en 1970, couvraient une superficie de 721 km<sup>2</sup>.

D'après ELECTROPERU (1974), le nombre de lacs répertoriés dans la Cordillera Blanca étaient de 251 en 1970, dont 176 déversaient leurs eaux dans le Pacifique et 75

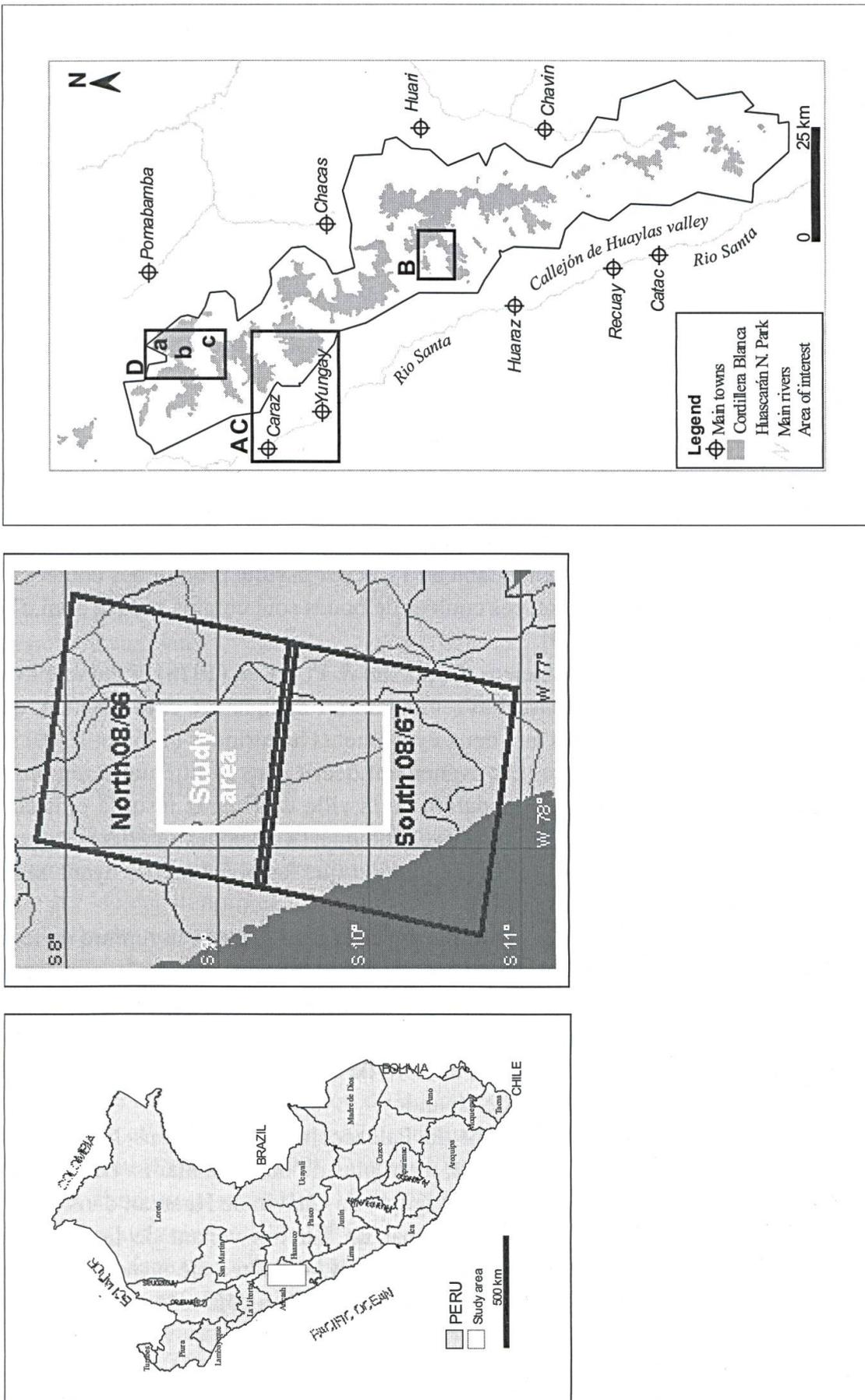


FIG. 1. Localisation de la zone d'étude; gauche: au niveau du Pérou; centre: couverture des images TM; droite: Cordillera Blanca et le Parc National Huascarán, les lettres A, B, C et D sur la carte correspondant aux diverses avalanches traitées et, a, b et c au développement de lacs

dans l'Atlantique. Trente-neuf des premiers et treize des deuxièmes avaient un volume supérieur à  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Le trait principal de cette zone est sa topographie accidentée, caractérisée par les versants très escarpés des montagnes et par la présence de vallées étroites et profondes, localement appelées «quebradas» (SILVERIO, 1999; SILVERIO, 2001). Les dénivelés entre les fonds de vallées et les sommets varient entre 2500 et 3200 m, sur moins de 5 km.

Selon JAEGER (1979), la région présente un climat tempéré, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide ainsi que par une forte amplitude thermique journalière. La saison humide s'étale de novembre à avril, avec un maximum de précipitations entre janvier et mars; presque tous les jours, il pleut dans les vallées et il neige en altitude.

#### 4. Historique

Depuis fort longtemps, les glaciers de la Cordillera Blanca sont impliqués dans de nombreuses avalanches qui ont causé des dégâts matériels considérables et la perte de dizaines de milliers de vies humaines dans les vallées de Callejón de Huaylas et de Conchucos. Généralement, ce sont des chutes de glace qui ont causé la destruction des barrages glaciaire et morainiques (aléa 2, tableau 1), et par la suite produit des coulées de boues en aval des vallées. Localement, ces coulées de boues sont connus sous le nom d'aluviones (alluvions) [SILVERIO, 1999].

Parmi les événements les plus anciens, ERICKSEN & PLAFKER (1978) citent une avalanche dans le sommet Nord du Huascarán remontant à l'époque pré-colombienne, qui aurait eu des dimensions supérieures aux deux événements historiques (1962 et 1970) issus de ce sommet. Cependant, le premier événement décrit dans la littérature régionale date du 4 mars 1702, rapportant une inondation de la ville de Huaraz jusqu'à plusieurs mètres de hauteur (PNH, 1990). La même source indique 18 épisodes ultérieurs qui ont lieu jusqu'en 1989. Nous nous limiterons ici à ne citer que les phénomènes ayant causé le plus de pertes humaines et matérielles.

Le 6 janvier 1725, un séisme a produit une avalanche de glace et la rupture de lacs, ce qui a détruit Huaraz où s'est écroulé le temple des Pères franciscains, en faisant disparaître 1500 habitants et en ne laissant vivantes que 300 personnes (PNH, 1990). La source n'indique malheureusement pas de quels lacs il s'agissait. Selon LLIBOUTRY *et al.* (1977), à la même date, le village d'Ancash, au nord de Yungay fut détruit et 1500 à 2000 habitants tués par un aluvion provenant de Huandoy.

Le 13 décembre 1941 le débordement du Palcacocha, localisé dans la quebrada Cojup, a détruit un tiers de la ville de Huaraz, tuant plus de 6000 habitants (LLIBOUTRY *et al.*, 1977). Le 17 janvier 1945, le site archéologique de Chavin de Huantar, dans le versant est de la Cordillère Blanche, était détruit par un aluvion venant de la quebrada Huachecsa, dans la basse vallée de Huantsán (6395 m). L'aluvion a été provoqué par un éboulement rocheux massif sur le glacier sous-jacent, lui-même déjà recouvert de débris (LLIBOUTRY *et al.*, 1977).

Le 20 octobre 1950, c'est le tour de la Laguna Jancarurish. L'aluvion descendue de la quebrada Los Cedros a tué environ 500 personnes, bien que officiellement ont dénombré 200 (LLIBOUTRY *et al.*, 1977).

### Avalanche du 10 janvier 1962

Cette avalanche a lieu dans la face ouest du Huascarán Nord (6655 m). Selon MORALES (1966), l'événement s'est déclenché à 6300 m d'altitude et le volume des matériaux impliqués aurait été de  $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ ; la superficie de dépôt a atteint  $3.5 \times 10^6 \text{ m}^2$ , et la masse des débris s'est étalée avec une épaisseur moyenne de 2 m. Ses effets ont été dévastateurs: 4000 morts, la destruction de la ville de Ranrahirca et de nombreux villages, pertes de terres agricoles et de cultures, et de milliers de têtes de bétail (fig. 2). Les caractéristiques de ce phénomène sont résumés dans le tableau 2.

TABLEAU II. Caractéristiques des avalanches historiques dans le Huascarán Nord (adaptation d'après ERICKSEN & PLAFKER 1978; SILVERIO, 1999)

	Avalanche du 10 janvier 1962	Avalanche du 31 mai 1970
Surface couverte (km <sup>2</sup> )	6	31
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	> 13	50 - 100
Vitesse moyenne (km/h)	170	280
Nombre des morts	4 000	> 18 000

### Avalanches du 31 mai 1970

Le 31 mai 1970, un séisme de magnitude 7.7 sur l'échelle de Richter a secoué le département d'Ancash et déclenché deux avalanches dans le sommet Huascarán Norte, l'une sur le versant nord et l'autre sur le versant ouest (fig. 2).

Celle du nord, une avalanche de roche et de glace, a atteint le cône de déjection séparant les deux lacs de Llanganuco, enterrant sur son passage 15 alpinistes et créant un barrage dans le torrent (SILVERIO, 2001). D'après LLIBOUTRY (1970), en 5 jours, le niveau du lac supérieur est monté de 2 m, sa longueur passant de 850 à 1930 m. Pour éviter une débâcle, la Commission de Contrôle des lacs de la Cordillère Blanche (Ministère de l'Agriculture avec la collaboration de la Corporación Peruana del Santa, et du Ministère de l'Energie et Mines) a entrepris la construction d'une digue pour abaisser le lac à son ancien niveau (SILVERIO, 1999). D'après LLIBOUTRY (1970), l'événement du glacier nord avait des dimensions modestes: 1000 m de longueur, 780 m de largeur, une superficie de  $0.47 \text{ km}^2$  et un volume de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Dans la face ouest du Huascarán Norte, l'avalanche de roche et glace a pris des dimensions sans précédent. D'après ERICKSEN & PLAFKER (1978), une surface d'environ  $0.6 \text{ km}^2$  et d'une épaisseur de 60-120 m, située entre 5400 et 6500 m d'altitude, s'est écroulée sur le Glacier 511. L'avalanche en résultant s'est propagée à une vitesse moyenne de 280 km/h, impliquant un volume à  $50\text{-}100 \times 10^6 \text{ m}^3$ , dont environ  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$

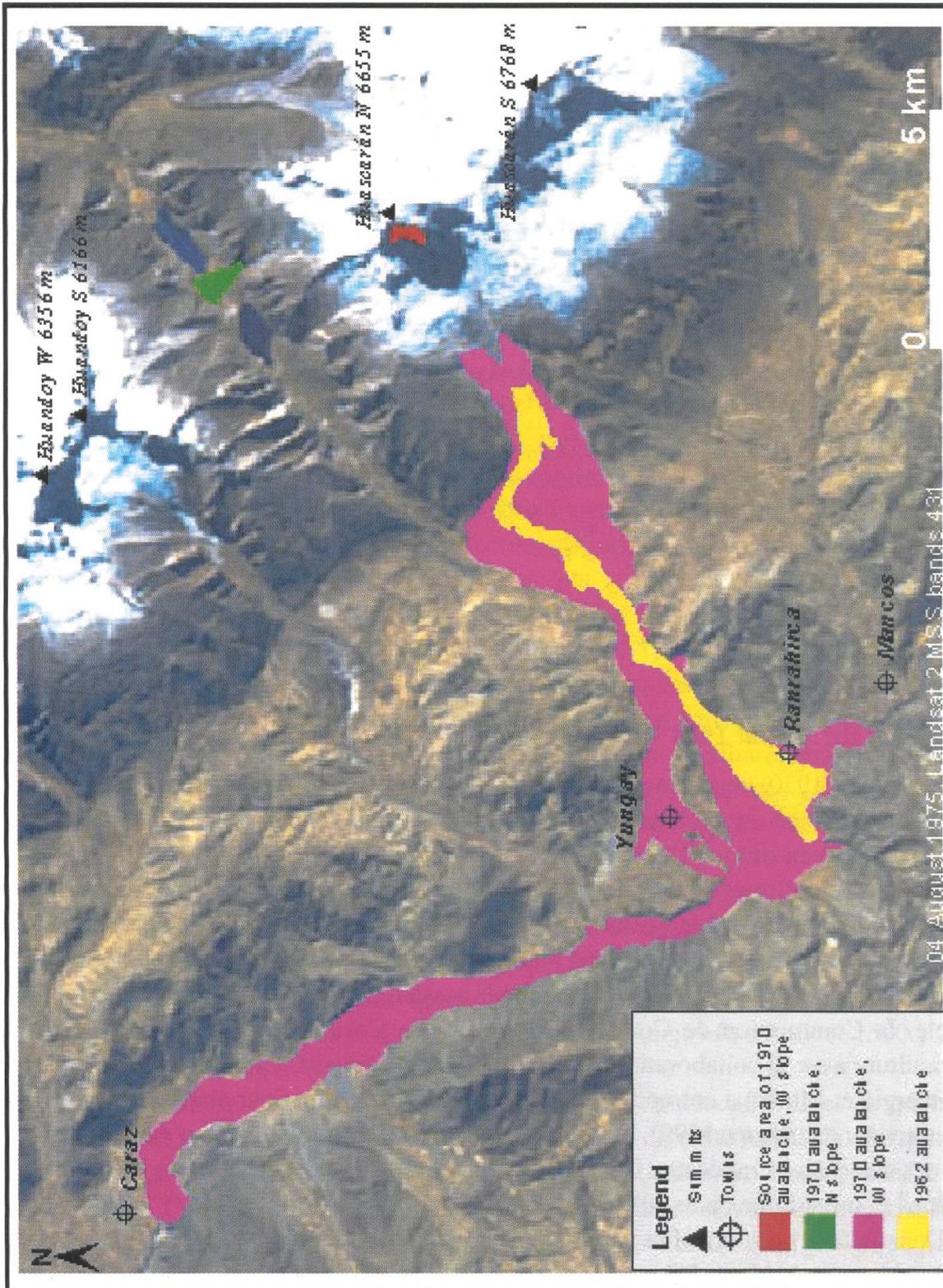


FIG. 2. Avalanches historiques dans le Huascarán Norte.

de débris composés de glace (fig. 2, tableau 2). Selon les mêmes auteurs, la superficie de dépôt a été estimée à 22.5 km<sup>2</sup>. Ces chiffres ne représentent probablement que la partie comprise entre Yungay et Ranrahirca. Or d'après ERICKSEN *et al.* (1970), l'avalanche a barré le Río Santa et formé un lac temporaire de 2 km de long. Ensuite s'est produit une débâcle, et les débris se sont écoulés jusqu'à Caraz, voire quelques kilomètres plus loin. D'après la carte du «Proyecto Especial de Titulación de Tierras» (PETT), Ministère de l'Agriculture du Pérou (1972), nous avons estimé une surface de dépôt de 31 km<sup>2</sup>.

De tous les événements qui ont eu lieu dans la Cordillera Blanca, cette avalanche de 1970 a été la plus dévastatrice pour la région. Elle a fait disparaître la ville de Yungay avec ses 18'000 habitants, détruit Ranrahirca et de nombreux villages. Pour les dégâts matériels, on ne connaît pas de chiffres exacts. Cependant, GIESECKE *et al.* (1970) estiment qu'avec l'ensemble des événements (séisme et avalanche), le département d'Ancash aurait subi des pertes matérielles d'environ 500'000'000 \$ US. Les mêmes auteurs estiment que les événements conjugués ont causé 70'000 morts, 150'000 blessés et laissé 800'000 sans abri.

## 5. Images et méthodes

Les images Landsat utilisées pour cet inventaire des principaux événements sont reportées dans le tableau 3.

TABLEAU III. Images satellitaires et leur utilisation cartographique

Type	Date	Résolution (m) Path / Row	Pour cartographier	Composite (bandes)
Landsat 2 MSS	4 août 1975	60 8/66	Avalanche de 1970, versant N du Huascarán Nord (Q. Llanganuco)	4,2,1
Landsat 5 TM	31 mai 1987	28.50 8/66 et 8/67	Avalanche de 1982 (Q. Ishinca)	7,4,2
Landsat 5 TM	11 août 1996	30 8/66 et 8/67	Avalanche de 1995 (Quebrada Llanganuco)	7,4,2
Landsat 7 ETM+	26 mai 2000	30 8/66 et 8/67	Avalanche de 1997 (Quebrada Santa Cruz)	7,4,2

Ces images ont également servi pour un suivi multi-temporel du développement des lacs (lagunas: en castillan; cochas: en quechua; lagunita: petit lac) dans la partie nord de la CB: lagunas Safuna Alta, Arhuaycocha et 3 lagunitas dans la Quebrada Artizon (Quebrada Santa Cruz).

Après la correction géométrique et géoréférence des images, nous avons procédé à l'identification et la délimitation des événements mentionnés ci-dessus, par une simple digitalisation sur les composites. Les limites des avalanches de 1962 et 1970, dans le versant ouest du Huascarán Norte, ont été adaptées à partir des travaux de SILVERIO (1999).

## 6. Inventaire des principaux événements entre 1970 et 2000

### 6.1. Cartographie des avalanches

#### Avalanche de glace dans le versant nord du Huascarán Norte (31 mai 1970)

Selon LLIBOUTRY (1970), le glacier s'étale entre 4700 et 5800 m d'altitude et est dominé par une paroi rocheuse de 700 m. Il y a eu des chutes de roche et de glace depuis le sommet, mais il semble que c'est la partie basse du glacier, reposant sur des roches moutonnées bien inclinées, qui s'est écroulée. Ce même auteur estime l'épaisseur moyenne des dépôts à 10 m, leur superficie à 0.47 km<sup>2</sup> et leur volume à 5x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. D'après les traces, visibles en 1975, nous avons estimé une superficie de dépôt de 0.35 km<sup>2</sup> (fig. 2). Si nous prenons en compte l'épaisseur citée par cet auteur, le volume des débris était d'environ 3.5x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Cette différence de chiffres peut être expliquée par le type de documents analysés. En 1970, les estimations ont été faites à partir des photos aériennes, et probablement en considérant comme un tout les zones d'arrachement, de trajet et de dépôt. En l'absence d'informations concernant l'état de cette zone avant l'avalanche, nous nous sommes limités à ne cartographier que la zone de dépôt. En outre, vu la topographie (pentes raides), nous estimons que les débris ne sont pas ou peu restés stockés entre les zones d'arrachement et de dépôt ultime. Par contre, à son passage, l'avalanche a dû entraîner des matériaux morainiques meubles. D'après LLIBOUTRY (1970), l'avalanche était formée de glace avec beaucoup de terre et de petites pierres.

#### Avalanche dans la face sud-ouest de Tocllaraju (31 août 1982)

Cette avalanche de glace (aléa 2, tableau 1) s'est produite sur la paroi sud-ouest du Nevado Tocllaraju (6034 m). A son impact, il y a eu une rupture du barrage morainique de la laguna Pacliash (fig. 3), situé au fond de la vallée Ishinca. On n'a pas déploré de pertes humaines, mais seulement quelques dégâts matériels dans les sentiers, les petits ponts et le pont routier Huaraz-Caraz. On ne connaît pas les dimensions exactes des dépôts; leur superficie, visible en 1987, dans la partie supérieure de la Quebrada Ishinca, était de 0.21 km<sup>2</sup>. Cependant, en aval de la vallée, jusqu'au Rio Santa, les effets s'étendaient sur une longueur de 20 km.

#### C) Avalanche dans le glacier sud du Huandoy Sur, quebrada Llanganuco (janvier et décembre 1995)

D'après la MUNICIPALIDAD DE YUNGAY (1997), le 11 janvier 1995 a eu lieu la première avalanche, mélange de boue et de fragments de roches, dans le glacier sud du Nevado Huandoy Sur. Elle a atteint le secteur compris entre les deux Lagunas de Llanganuco (Chinancocha: laguna inférieure; Orconcocha: laguna supérieure), en coupant la route Yungay-Yanama sur 300 m (fig. 4). En décembre de la même année, le phénomène s'est répété. Dans les deux cas, il s'agissait d'une avalanche de matériaux morainiques et de glace, qui s'était déclenchée entre 4600-4800 m d'altitude. Etant donné que durant les

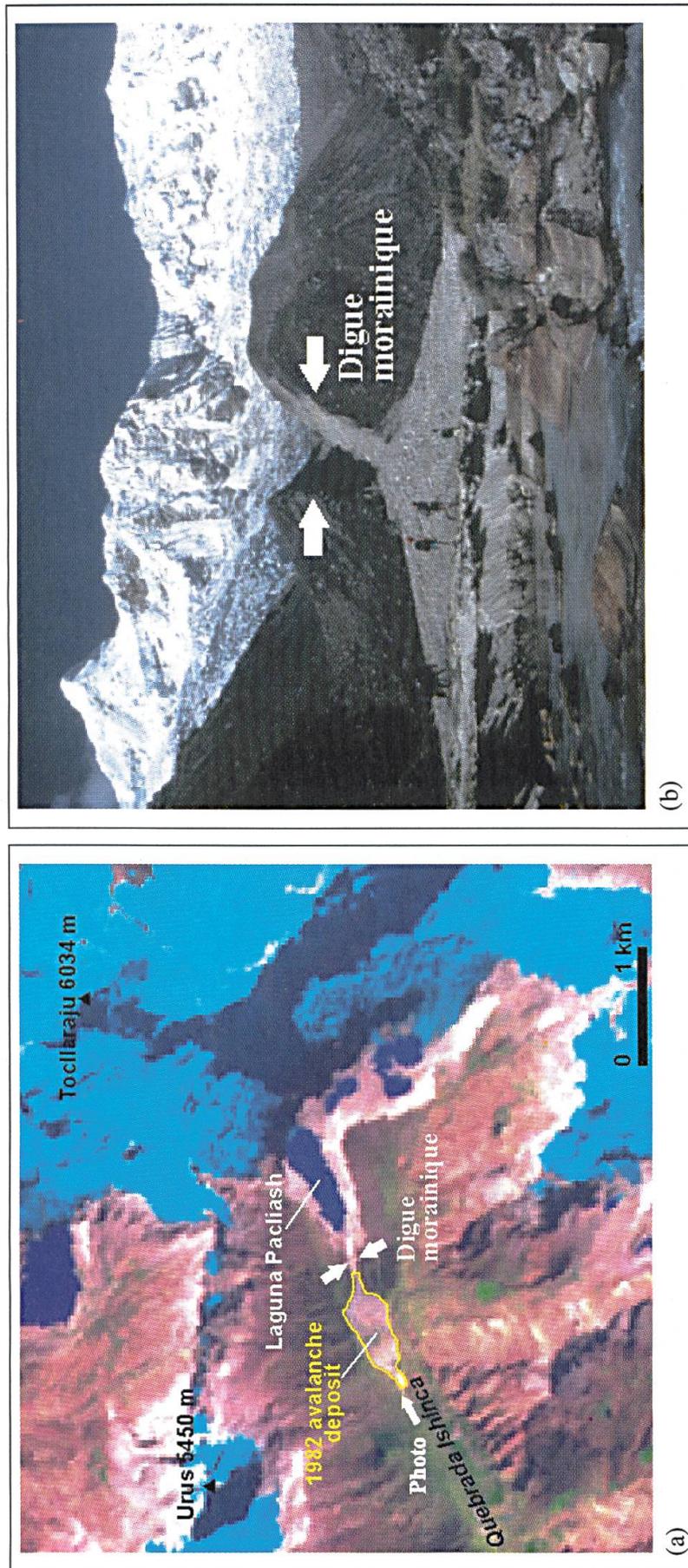


FIG. 3. Traces de l'avalanche de 1982, quebrada Ishinca. a: en jaune, une partie de la zone de dépôt (Landsat TM, du 31 mai 1987, bandes 7,4,2). b: au fond et à gauche le Tocllaraju 6043 m; au second plan, la digue morainique de laguna Pacliash (photo: P. WAGNON, 1992).

deux événements, la direction de l'avalanche a changé, la route a été coupée sur un tronçon d'environ 450 m (SILVERIO, 1999).

A l'aide d'une carte topographique au 1: 100 000, SILVERIO (1999) a avancé quelques estimations sur la surface de dépôt ( $17 \times 10^4 \text{ m}^2$ ) et le volume moyen ( $12.75 \times 10^4 \text{ m}^3$ ), l'épaisseur variant entre 0.5 et 1 m. D'après sa délimitation sur les images Landsat TM de 1996, la superficie de dépôt serait de  $8.3 \times 10^4 \text{ m}^2$ , pour un volume moyen de débris de  $6.23 \times 10^4 \text{ m}^3$  (fig. 4).

#### **D) Vidange d'une petite laguna dans la quebrada Artizon (5 mai 1997)**

Le jour et le mois sont approximatifs car ils varient selon les témoignages des habitants de la vallée de Santa Cruz. Il est probable que la rupture du barrage morainique de la «lagunita» 1 (fig. 5) a été causée par l'impact d'une chute de glace, depuis le glacier nord du Nevado Paria (5600 m) (figs 6 et 7). D'après les images Landsat 7 ETM+ du 26 mai 2000, la superficie affectée par cet événement est d'environ  $1.16 \times 10^6 \text{ m}^2$ , la zone de dépôt n'étant que de l'ordre de  $0.91 \times 10^6 \text{ m}^2$ . En 1999, l'épaisseur du dépôt variait entre 0.20 et 0.50 m, ce qui indique un volume moyen d'environ  $0.32 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

### **6.2. Retrait glaciaire et développement des lagunas**

En 1977 déjà, LLIBOUTRY *et al.* signalaient que le retrait des glaciers depuis 1927 dans la Cordillera Blanca créait des lacs dangereux au front de nombreux glaciers. Suite à l'aluvion de Huaraz (1941), les autorités péruviennes avaient pris conscience des dangers potentiels que constituaient les lacs de la Cordillera Blanca.

Dès les années 50, le niveau de certains lacs proches de cette ville a été volontairement abaissé. Dans la décennie suivante, les travaux d'endiguement se sont poursuivis pour diminuer le volume des lacs considérés comme dangereux. A l'époque, la laguna Safuna Alta faisait partie de ce groupe. Par contre, Arhuaycocha n'existait pas encore et les lagunitas (quebrada Artizon) étaient répertoriées comme étant deux lacs minuscules, donc sans danger (fig. 5).

Les lacs Safuna Alta, Arhuaycocha et les lagunitas sont localisés tout au nord de la Cordillera Blanca (figs 1 et 5). En l'absence de données de terrain sur la profondeur des lacs, l'analyse diachronique de leur développement, entre 1975 et 2000, se fera en termes de superficie et périmètre.

#### **a) Laguna Safuna Alta (quebrada Tayapampa)**

La laguna Safuna Alta est localisée à 4400 m d'altitude, dans une petite vallée tributaire de la Q. Tapayapampa; elle surplombe la laguna Safuna Baja qui se trouve à 4247 m d'altitude (fig. 5). D'après LLIBOUTRY *et al.* (1977), le lac s'est formé en 1950. Son développement s'est poursuivi avec le retrait du glacier de Safuna (fig. 8). Les mêmes auteurs citent, pour 1974, un volume de  $4.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Pour la même année, Electroperú cite un volume de  $5.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

En 1975, Safuna Alta couvrait une surface de 7.4 ha et avait un périmètre de 1242 m; en 1987, 14.6 ha et 1760 m; en 1996, 32.8 ha et 2468 m; et en 2000, 37.8 ha et 2796 m (fig. 9).

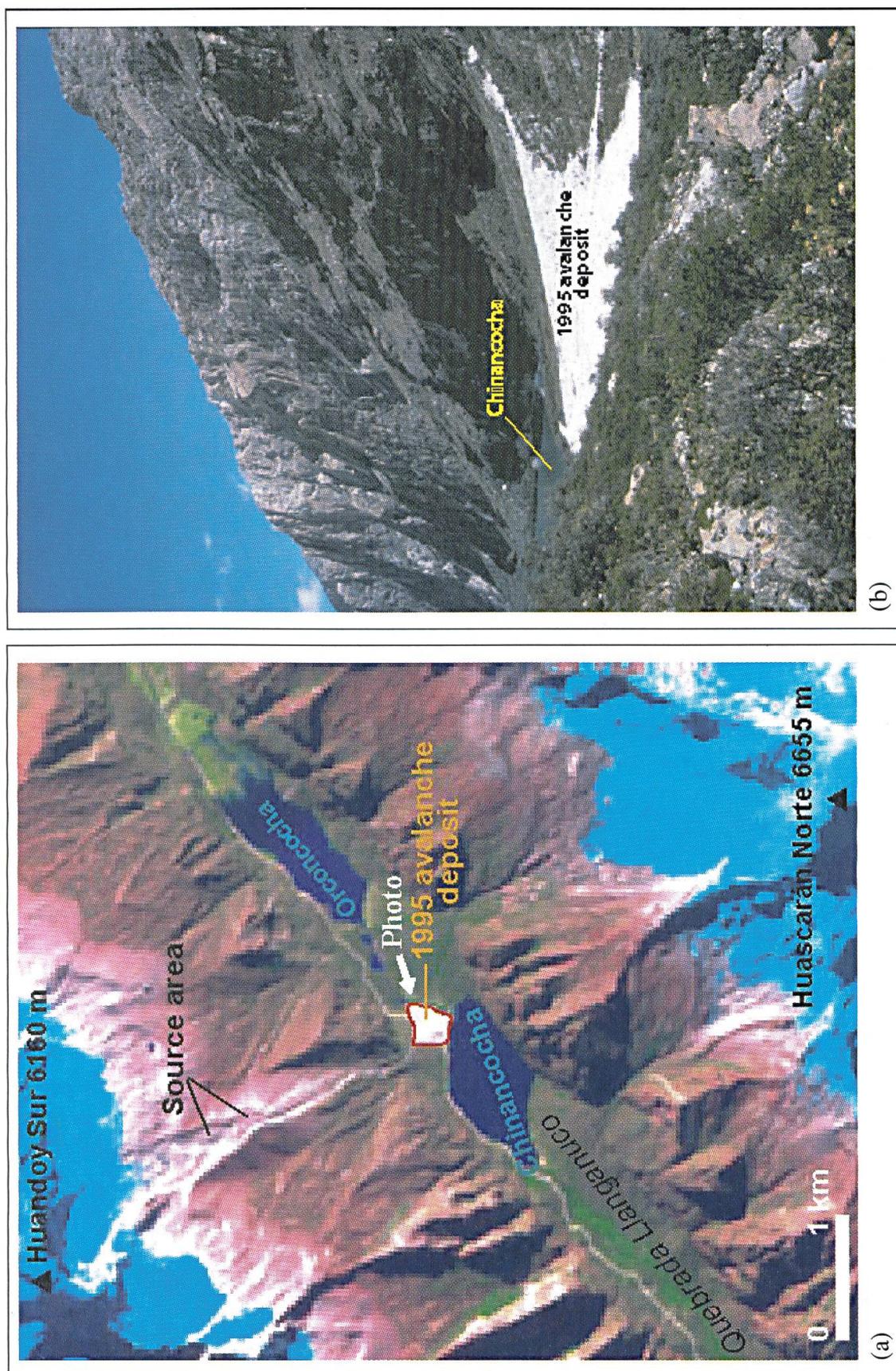


FIG. 4. Avalanche de 1995, quebrada Llanganuco. a: situation générale (TM du 11 août 1996, composite 7,4,2). b: zone de dépôt (photo: W. SILVERIO, 1999).

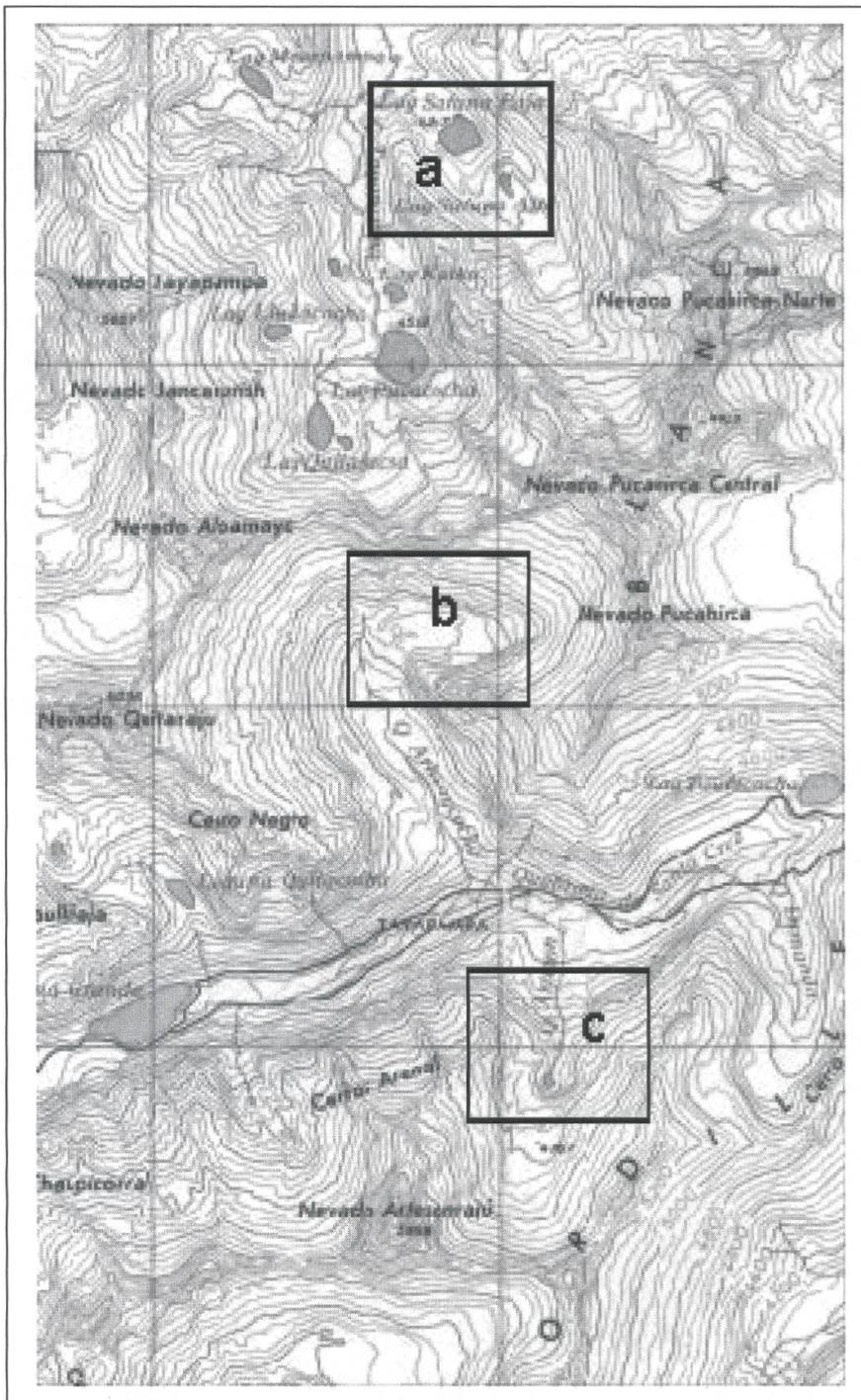


FIG. 5. Localisation des lagunas Safuna Alta (a), Arhuaycocha (b) et las lagunitas 1, 2 et 3 (c). Fond de carte extrait de la carte topographique nationale au 1: 100 000, feuille 18h, (IGN, 1993).

### b) Laguna Arhuaycocha (quebrada Ayhuaycocha / quebrada Santa Cruz)

Le lac Arhuaycocha est localisé à 4450 m d'altitude, entre le cirque glaciaire des Nevados Alpamayo (5947 m), Pucallanca Sur 6010 et Rinrijirca (5810 m), au fond d'une petite vallée du même nom, qui est tributaire de la Quebrada Santa Cruz (figure 5). Sur la carte «Mapa Índice de Lagunas de la Cordillera Blanca» (ELECTROPERU, 1974), ce lac n'apparaît pas encore.

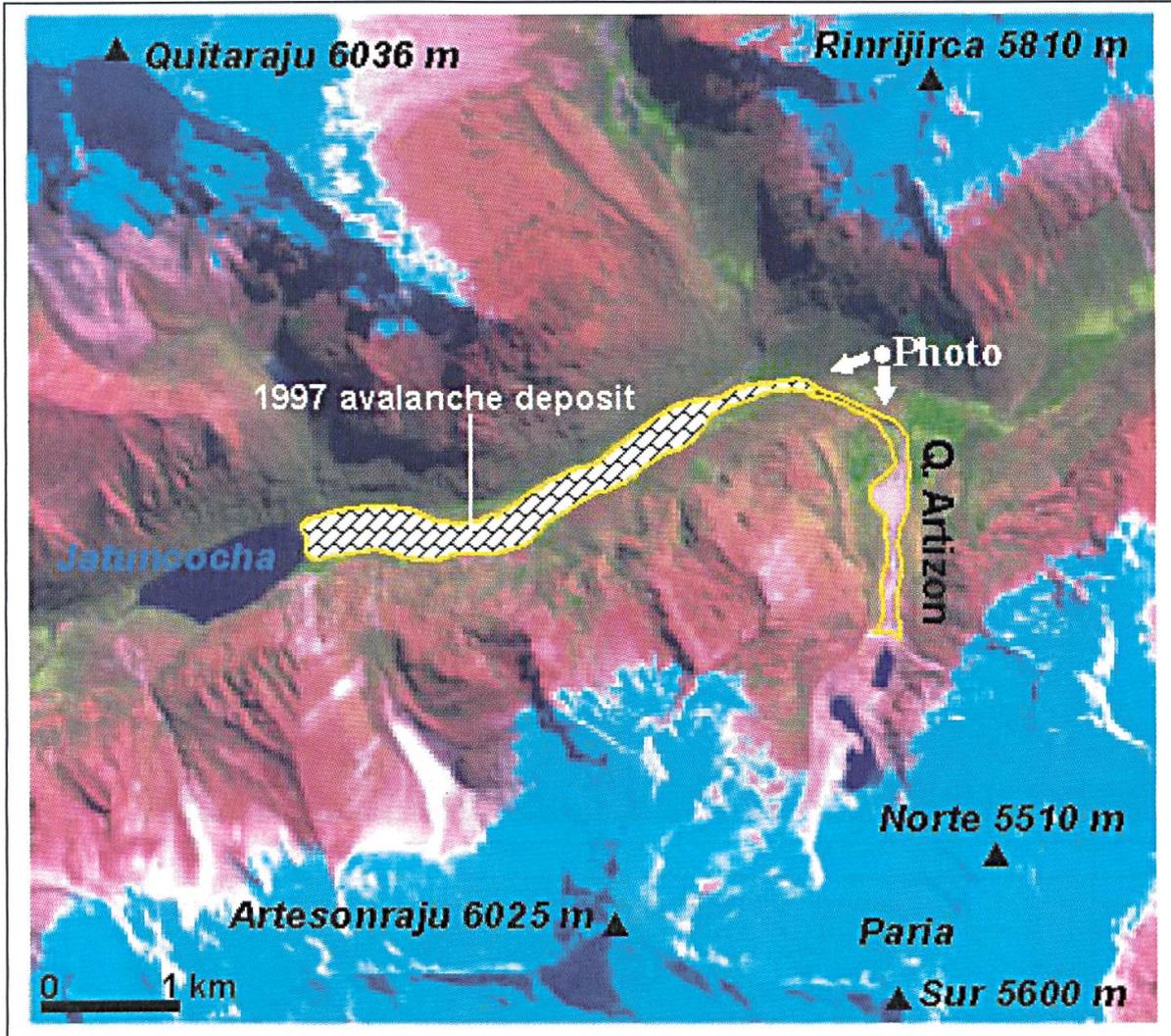


FIG. 6. Avalanche 1997 dans la quebrada Artizon (image de fond : ETM+, du 26.05.00, bandes 7,4,2).

En 1975, Arhuaycocha couvrait une superficie d'environ 2 ha et avait un périmètre de 534 m; en 1987, on note que ce lac s'était rétréci (flèche, figure 10), en passant à une superficie de 0.4 ha et un périmètre 250 m. En même temps, deux autres lacs apparaissent, un plus grand couvrant une aire de 2.7 ha et un périmètre de 674 m, et un autre plus petit, avec une surface de 0.1 ha et un périmètre de 151 m (fig. 10).

En 1996, Arhuaycocha continuait à se développer et était composé de trois lacs : un «majeur» couvrant une aire de 22.5 ha et un périmètre de 2121 m; un «moyen» de 1.2 ha et un périmètre de 579 m; et un «petit» avec une superficie de 0.4 ha et un périmètre de 246 m. En 2000, Arhuaycocha s'était accrue encore; elle occupait une aire de 33.6 ha et son périmètre était de 2337 m (fig. 10).

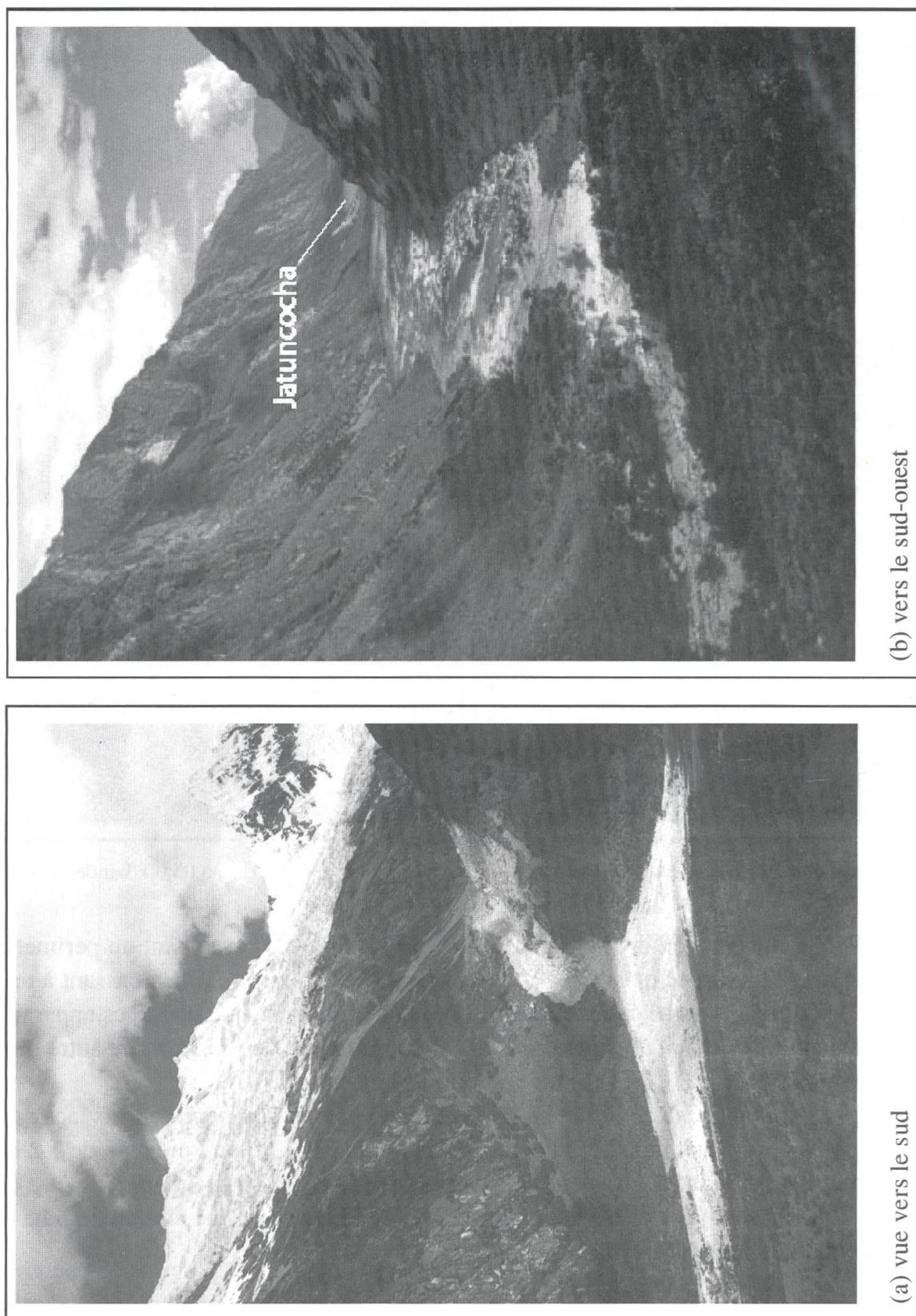


FIG. 7. Avalanche 1997 dans la quebrada Artizon. a: zone de départ. b: zone de dépôt (photos: W. SILVERIO, 1999).

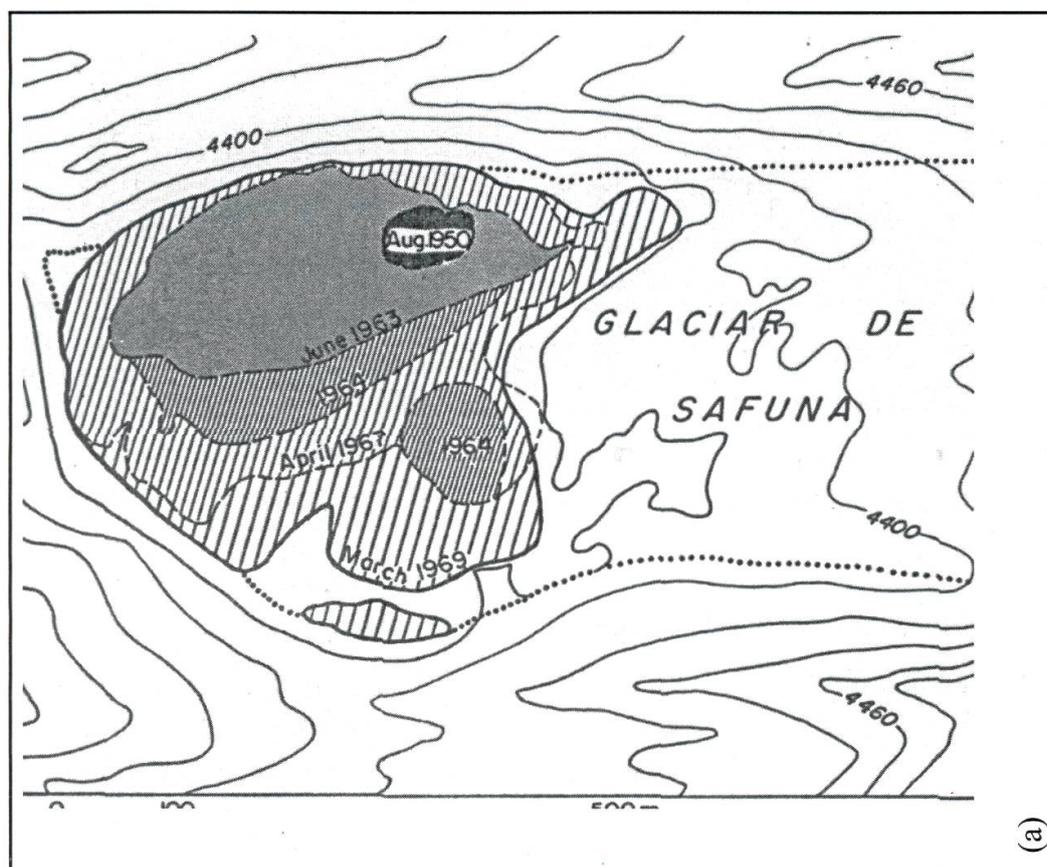
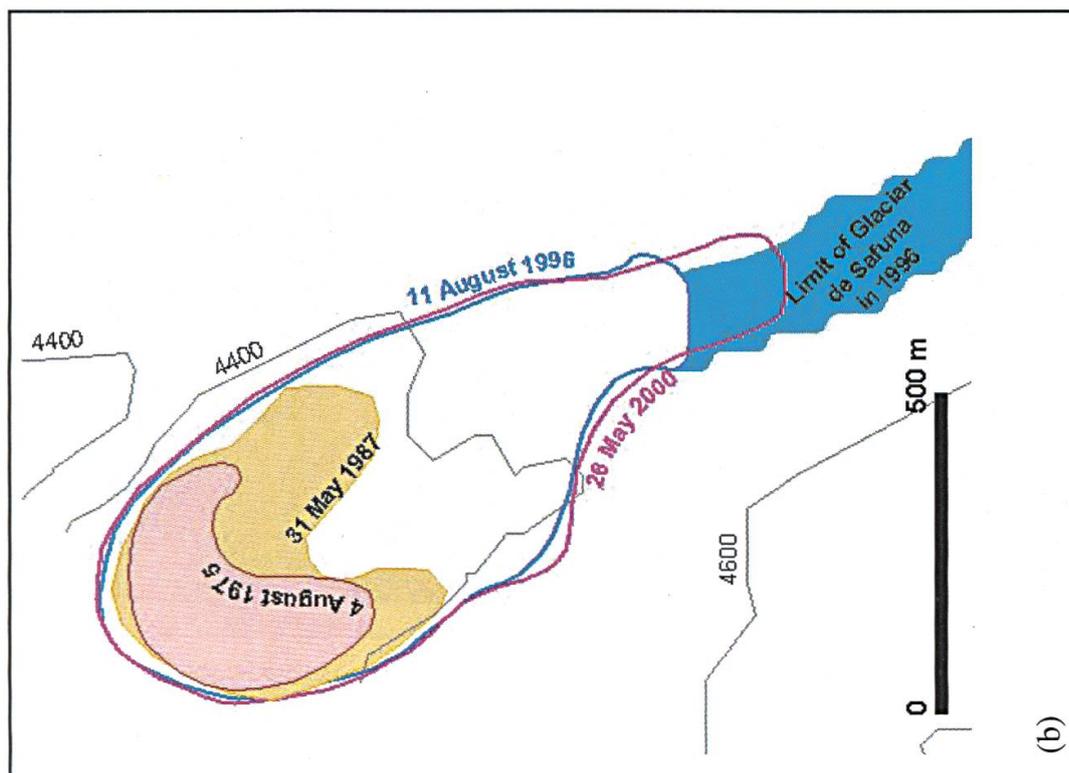


FIG. 8. Développement de Safuna Alta. a: entre 1950 et 1969 (source: LLIBOUTRY *et al.*, 1977). b: entre 1975 et 2000. Échelles approximatifs.

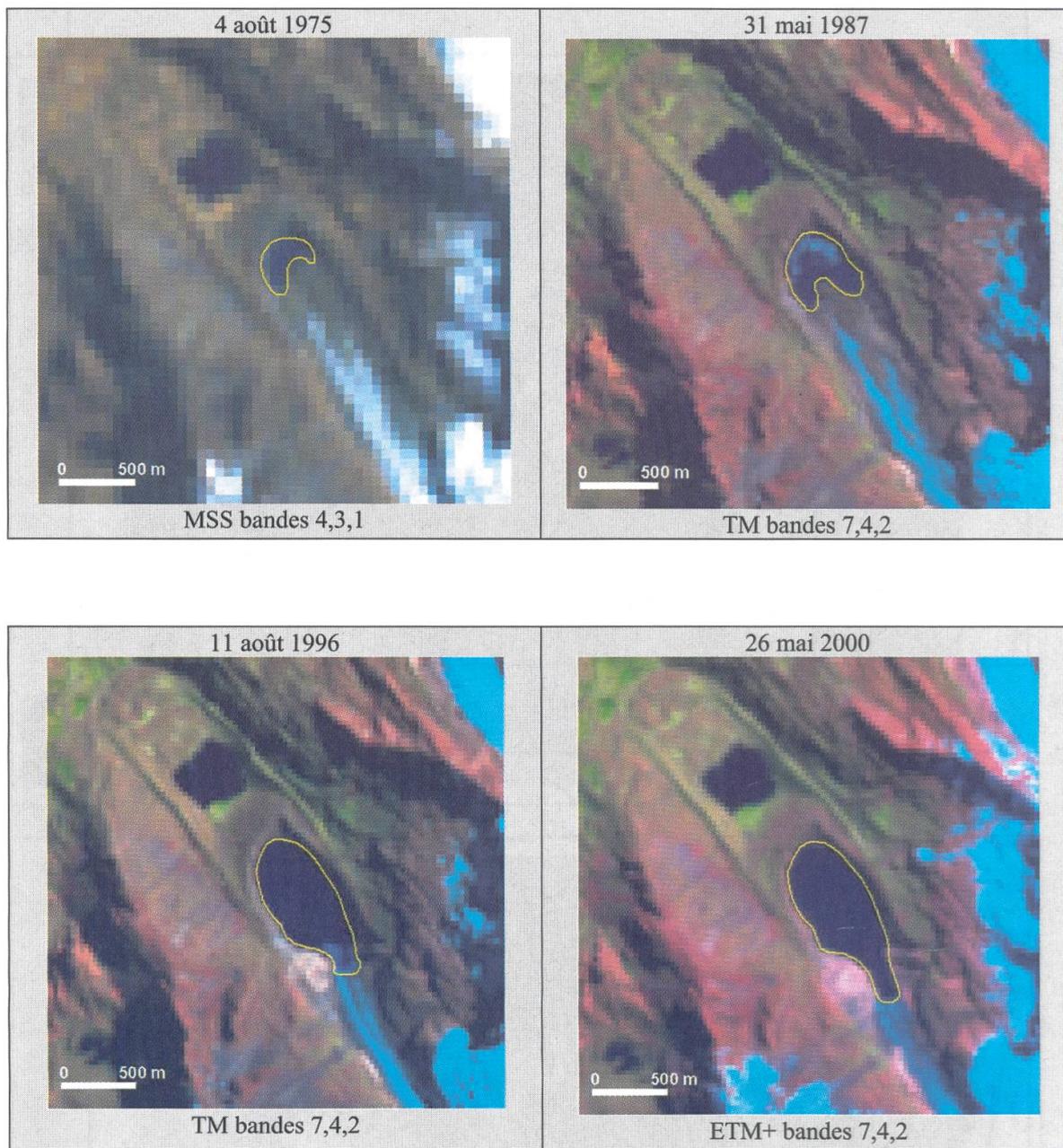


FIG. 9. Images du développement de laguna Safuna Alta entre 1975 et 2000. Laguna Safuna Baja (au NW) est restée constante.

### c) Les «lagunitas» (quebrada Artizon)

Les lagunitas sont localisés au pied du cirque glaciaire des Nevados Artesonraju (6025 m) et Paria (5600 m), dans la quebrada Artizon, qui est tributaire de la quebrada Santa Cruz (fig. 5). Selon la carte «Mapa Índice de Lagunas de la Cordillera Blanca» (Electroperú, 1974), ces lacs sont répertoriés comme étant «2 lagunitas» (deux petit lacs).

L'image de 1975 montre la présence de trois petits lacs: 1, 2 et 3, situés, respectivement, à 4545 m, 4577 m et 4655 m d'altitude. En 1987, ces lagunitas se sont consolidées, surtout le petit lac 3 qui, le plus petit en 1975, est devenu le plus grand du groupe.

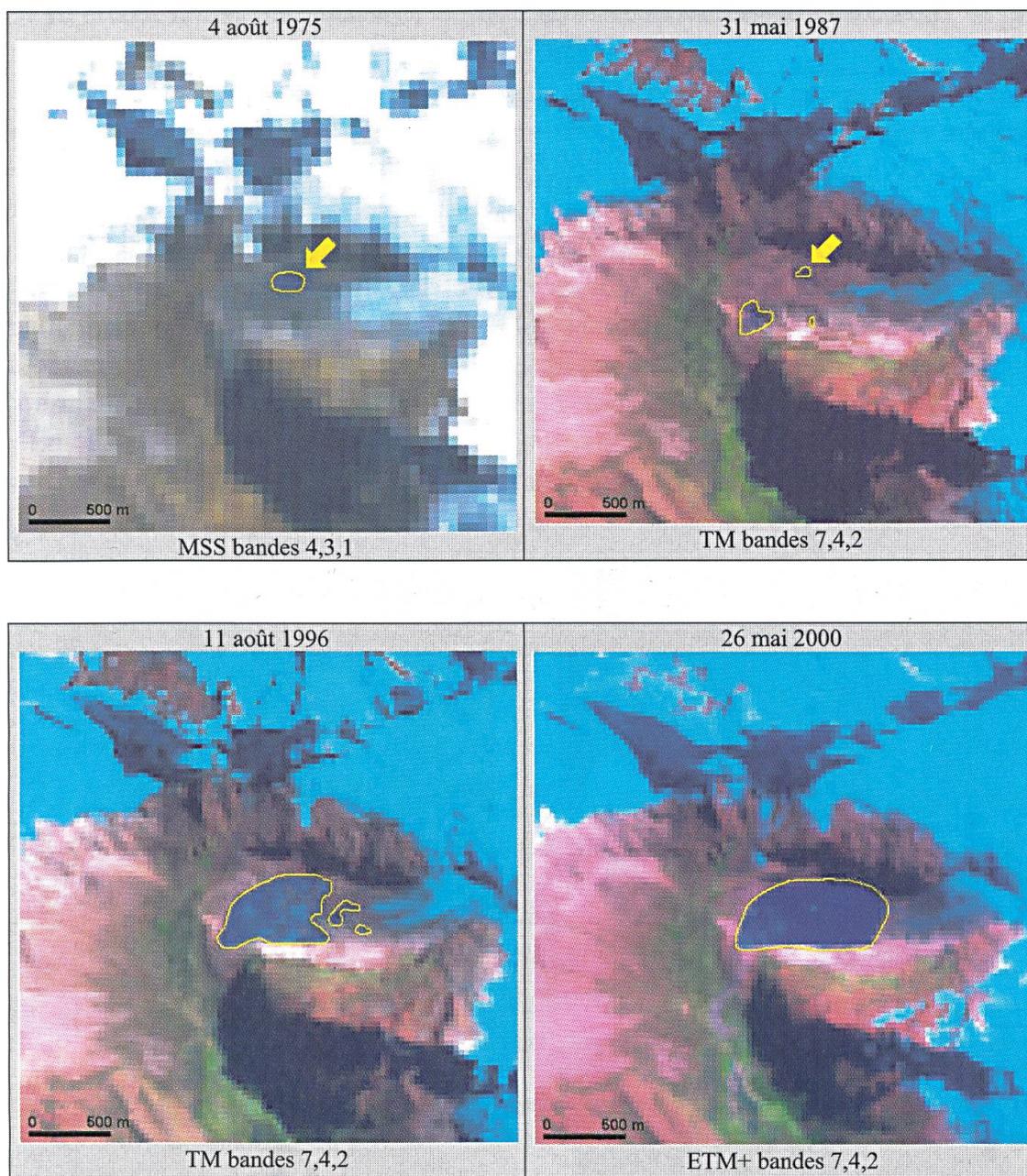


FIG. 10. Images du développement de laguna Arhuaycocha entre 1975 et 2000.

Durant la période 1987-1996, les lagunitas 1 et 2 ont gardé presque les mêmes dimensions, tandis que la 3 a continué son développement. Entre 1997 et 2000, les lagunas 2 et 3 ont continué à croître. La laguna 1, quant à elle, s'est vidée, probablement lors de l'impact d'une chute de glace ayant rompu sa digue morainique, provoquant une avalanche (tableau 4, figs 6 et 11).

## 6. Conclusion

La Cordillera Blanca est constituée de lacs glaciaires, de glaciers, dans certains cas suspendus, et de hauts sommets enneigés. La présence de ces éléments, parfois conjugués avec les séismes, ont provoqué des phénomènes tels que rupture de lacs de barrage

TABLEAU 4. Dimensions du développement des lagunitas, entre 1975 et 2000.  
(S: superficie; P: périmètre)

	4 août 1975	31 mai 1987	11 août 1996	26 mai 2000
Lagunita 1	S°: 1.1 ha P°: 402 m	S°: 1.6 ha P°: 510 m	S°: 1.4 ha P°: 480 m	Vidange en 1997
Lagunita 2	S°: 2.1 ha P°: 560 m	S°: 1.7 ha P°: 504 m	S°: 1.7 ha P°: 504 m	S°: 3.2 ha P°: 762 m
Lagunita 3	S°: 0.8 ha P°: 378 m	S°: 5.2 ha P°: 923 m	S°: 9.7 ha P°: 1683 m	S°: 13 ha P°: 2068 m

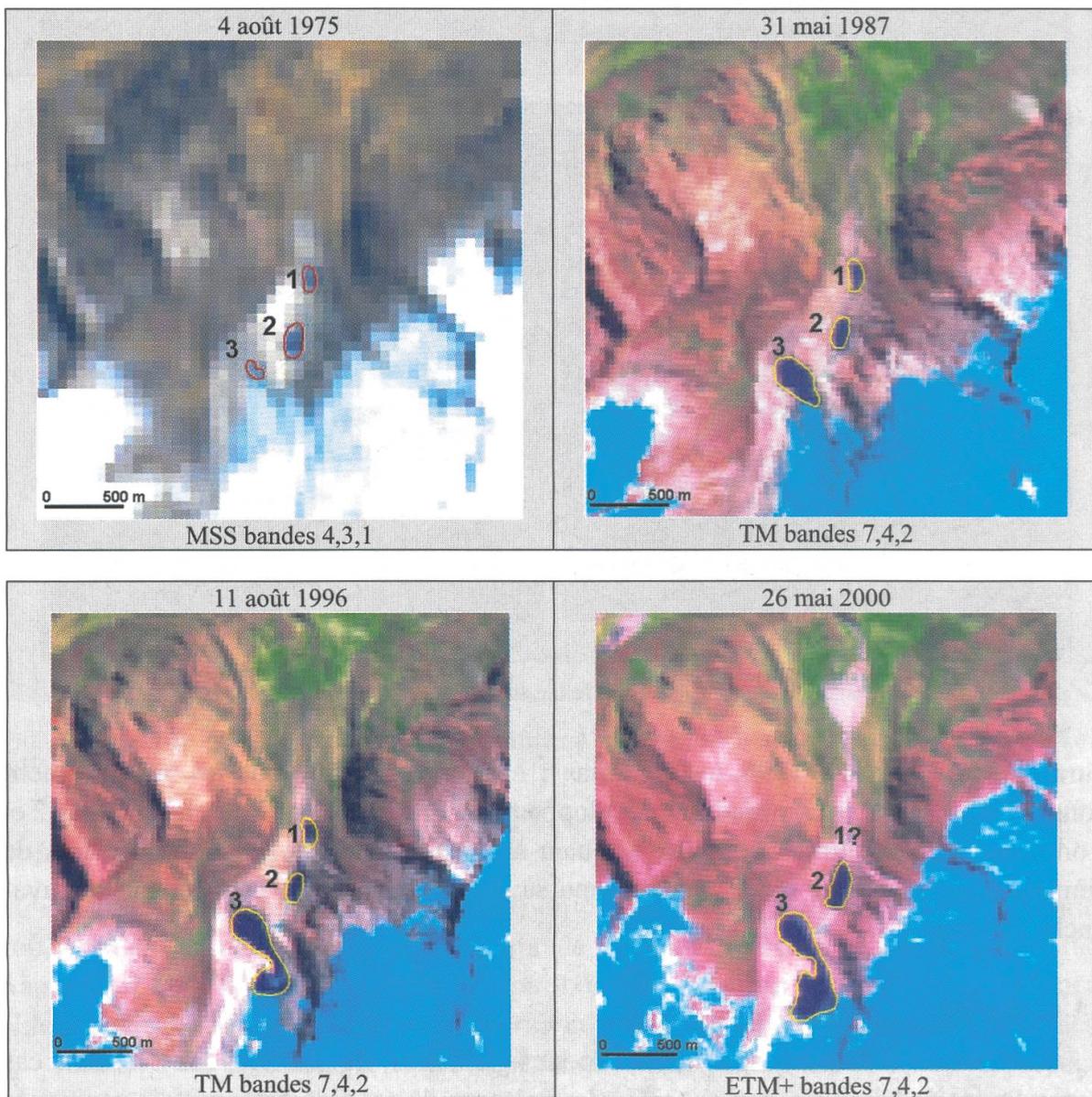


FIG. 11. Développement des lagunitas entre 1975 et 2000.

glaciaire et morainique, avalanches de glace, avalanches de glace et de roches, et glissements de matériaux meubles (surtout de moraines).

Ces phénomènes se sont produits dans des zones peu ou pas accessibles, les rendant difficiles à détecter et surtout contrôler. Dans de telles situations, les images satellitaires s'avèrent d'une grande utilité, voire constituent l'unique moyen pour évaluer et mieux comprendre les dangers potentiels liés aux éléments.

Les images satellitaires utilisées dans ce travail ont servi à compléter la cartographie de l'avalanche de 1970 (versant nord du Huascarán Norte), ainsi qu'à répertorier d'autres événements qui ont eu lieu entre 1980 et 2000. Malgré l'insuffisance des vérifications de terrain, l'interprétation simple d'images satellitaires peut servir comme base pour la prise de conscience des autorités locales et régionales lors de futurs aménagements.

En ce qui concerne le développement des lagunas dans la Cordillera Blanca, nous n'avons examiné que trois lacs localisés dans la partie nord du massif. Les autres zones n'ont pas été explorées, mais l'on peut supposer que les mêmes types de phénomènes s'y sont produits. Dans le contexte des changements climatiques à venir, il est vraisemblable que les lacs glaciaires de la Cordillera Blanca vont croître en surface, augmentant notablement les aléas liés aux ruptures de barrages morainiques. Leur suivi cartographique en devient une tâche prioritaire.

## RÉSUMÉ

Dans les régions de haute montagne, la topographie très accidentée est une source potentielle d'aléas, parmi lesquels les avalanches et les vidanges soudaines de lacs glaciaires. Dans la Cordillera Blanca, à part l'avalanche de 1970, dans le versant ouest de Huascarán Norte, les aléas naturels n'ont pas encore été cartographiés en détail.

Ce travail établit une base cartographique des principaux événements catastrophiques qui ont eu lieu dans la zone entre 1970 et 2000, sur la base d'une analyse d'images Landsat 2 MSS et 5 TM. En outre, les images ont permis de faire un suivi diachronique de l'évolution de 3 lacs glaciaires dans la partie nord du massif.

**Mots-clés:** Dangers naturels, télédétection, cartographie, glaciers, changements climatiques

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à Mark A. Ernste (GRID/Sioux Falls) et P. Peduzzi (GRID Genève) pour leur aide dans la fourniture des données. Nous sommes aussi très reconnaissants à la SPHN pour sa contribution aux frais d'impression de cet article, et pour l'attribution d'une bourse du Fonds Augustin Lombard à l'un des auteurs (W. S.).

## BIBLIOGRAPHIE

EISBACHER, G. H. & J. J. CLAGUE. 1984. Destructive mass movements in high mountain: Hazard and management. Geological Survey of Canada, papier 84-16, p. 1-68.

- ERICKSEN, G. E. & G. PLAFKER. 1978. Nevados Huascarán avalanches. *Rockslides and Avalanches*, vol. 1, p. 277-314.
- ERICKSEN, G., G. PLAFKER & J. FERNANDEZ. 1970. Informe preliminar de los eventos geológicos asociados con el terremoto ocurrido el 31 de mayo de 1970. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología 1969-1970*, année XIX, n° 9, Lima, p. 31-48.
- GIESECKE, A., M. CASAVARDE, L. OCOLA, D. HUACO & E. DEZA. 1970. Proyecto de Investigación Básica Física de Sólido Terrestre e Ingeniería Sismo-resistente en la Zona del Perú, Afectada por el Sismo del 31 de Mayo de 1970. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología 1969-1970*, année XIX, n° 9, Lima, p. 51-57.
- HIDRANDINA S. A., Unit of Glaciology and Hydrology Huaraz, 1988. *Glacier Inventory of Peru*. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC), Lima, 105 p.
- JAEGER, N. 1979. *Les Andes du Pérou, Au cœur de la Cordillère Blanche*. Denoël, Paris, 172 p.
- LLIBOUTRY, L. 1970. Informe preliminar sobre los fenómenos glaciológicos que acompañaron el terremoto y sobre los peligros presentes. *Revista Peruana de Andinismo y Glaciología 1969-1970*, année XIX, n° 9, Lima, p. 20-26.
- LLIBOUTRY, L., B. MORALES, A. PAUTRE & B. SCHNEIDER. 1977. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Perú. I. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of glaciology*, vol. 18, n° 78-80, p. 239-254.
- MORALES, B. 1966. The Huascarán avalanche in the Santa Valley, in Perú. *International Association of Scientific Hydrology, Publication n° 69*, p. 304-315.
- MUNICIPALIDAD DE LA PROVINCIA DE YUNGAY, 1997. Corte de bloques de hielo y morrenas, zona Huandoy sur - Laguna Llanganuco Baja. Memoria descriptiva, Yungay, document officiel.
- PARQUE NACIONAL HUASCARAN (PNH) 1990. Plan Maestro, Generalidades y diagnóstico. Parque Nacional Huascarán, document interne, 162 p.
- SILVERIO, W. 1999. Essai d'évaluation des instabilités de pente par un système d'information géographique et leur interprétation dans la région de Huascarán (département d'Ancash, Pérou). Mémoire du Certificat de Spécialisation en Analyse et Gestion des Risques Géologiques, Centre d'Etudes des Risques Géologiques, Sciences de la Terre, Université de Genève, 65 p.
- SILVERIO, W. 2001. Elaboration d'un SIG pour la gestion d'une zone protégée de haute montagne: application au Parc National Huascarán, Pérou. Mémoire du Certificat de Spécialisation en Géomatique, UNIGE, 111 p.

### Cartes consultées

- ELECTROPERÚ, 1974. Mapa Índice de Lagunas de la Cordillera Blanca, au 1:100 000, Glaciología y Seguridad de Lagunas, Huaraz. Carte réalisée à partir de l'interprétation des photos aériennes de 1962.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN), 1993. Carte topographique nationale, au 1:100 000. Feuilles: 18h (Corongo), 18i (Pomabamba), 19h (Carhuaz), 19i (Huari), 20h (Huaraz), 20i (Recuay), 21h (Huayllapampa), 21i (Chiquián). Édition IGN, Lima, Pérou. (Cartes réalisées, à partir de l'interprétation de photos aériennes de 1962 et 1963; première édition: 1970).
- INSTITUTO GEOLÓGICO MUNERO Y METALÚGICO (INGEMMET). Carte géologique nationale, au 1:100 000 (version digitale). Feuilles: 18h (Corongo), 18i (Pomabamba), 19h (Carhuaz) et 19i (Huari) [1995]; feuilles 20h (Huaraz), 20i (Recuay), 21h (Huayllapampa) et 21i (Chiquián) [1996].
- PROYECTO ESPECIAL DE TITULACIÓN DE TIERRAS (PETT) y CATASTRO RURAL, DIRECCIÓN DE CATASTRO RURAL, MINISTERIO DE AGRICULTURA, 1972. Carte topographique au 1:25 000. Feuilles I-NO, I-NE, I-SE, I-SO, IV-NE et IV-SE, correspondantes de la feuille 19H (Carhuaz) de la carte topographique nationale. Cartes réalisées à partir de l'interprétation de photos aériennes de 1962, 1963 et 1970.