

# Glaciares y recursos hídricos en el valle alto del río Santa

Université Paris VII (Denis Diderot)  
Institut de Recherche pour le Développement (IRD)  
Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)



François Vignon, noviembre 2001-agosto 2002  
Tesis de DED (Diplôme d'Etudes Doctorales) de la Universidad  
Paris VII, ciencias naturales.  
Director: Ghislain de Marsily

## Gracias

Gracias a Pierre Ribstein, que a mi gran sorpresa entendió lo que le explicaba. Gracias a Bernard Pouyaud por acogerme en Lima y hacerme descubrir mucho, que sea en el marco de la práctica o no. A Willi Tamayo y Jesus Gomez que me han enseñado un montón de cosas, a Mancos Corazón y a Huaraz Querido. A Yves Arnaud por permitirme conocer el mundo encantador de la Maison de l'Eau.

Gracias por supuesto a todos los colegas del INRENA (un día ganaremos un fulbito) y de la MSE que me han soportado: Marco, Nelson, Pierre, Eric, Alain, Franck....

Gracias en fin a todos los amigos, Jenni y sus cafezazos, Gigi, la manada de locos del Cafe Andino, Philippe, Alcide y Francisca, Yovana y el siete raices, y a todos los que olvido y que me hicieron pasarla bien en Huaraz.

Gracias también a Bob Dylan y a la Mano Negra por haber acompañado muchas horas de oficina, gracias a la lluvia por caer, a los ríos por correr, y a mi poncho por protegerme.

Este estudio, realizado en la Unidad de Glaciología del INRENA Ancash en Huaraz y en la Maison des Sciences de l'Eau en Montpellier (Francia) en el marco de la cooperación del IRD francés con el SENAMHI, tiene como principal objetivo el estudio de la hidrología de la cuenca del río Santa en relación con el retroceso glaciar observado en la zona.

Quise dar una visión amplia de lo que se está trabajando a la hora, en ingeniería como en investigación, para facilitar la inserción de futuros practicantes, ingenieros, o investigadores, que se interesarían a problemáticas de la zona. Mucho se está haciendo, y queda mucho para hacer !

En lo que concierna la investigación, traté de ser el más preciso posible para facilitar las discusiones sobre las metodologías presentadas.

Esta práctica estuvo financiada por el ministerio de educación y investigación francés y el programa de investigación GREATICE del IRD.

## Resumen

En la cordillera de los Andes muchas cuencas están reguladas por áreas glaciares. Estas áreas almacenan agua en la temporada de lluvias para fundirla aportando a los ríos en temporada seca.

Sin embargo, se está observando últimamente un retroceso de los glaciares, consecuencia del calentamiento global que afecta el planeta, dando lugar a inquietudes sobre el futuro de los recursos hídricos.

En este estudio se examina el caso de la Cordillera Blanca y de la cuenca del río Santa, grande cuenca extensamente glaciada de la vertiente del pacífico de los Andes peruanos. Se trata de relacionar los caudales con la extensión glaciada, a fin de predecir lo que será la disponibilidad de agua cuando continúe el retroceso glaciado; y se analiza este retroceso por diversos métodos.

*Palabras clave:* Cordillera Blanca, Río Santa, glaciares andinos, hidrología de montaña, MNT Aster

## Résumé

Dans la Cordillère des Andes de nombreux bassins versants sont régulés par des glaciers. Ces glaciers stockent l'eau de précipitation en saison des pluies, pour la libérer par fusion apportant aux rivières en saison sèche.

Cependant, il semble que les aires glaciaires soient en phase de retrait, conséquence du réchauffement de la planète, ce qui inquiète quand à l'avenir des ressources en eau.

Dans cette étude on examine le cas de la Cordillère Blanche et du bassin du río Santa, grand bassin à forte couverture glaciada du versant pacifique des Andes péruviennes. On essaie de mettre en relation les débits avec la couverture glaciada, ce qui nous devrait permettre de prédire ce que seront les ressources en eau au fur et à mesure du retrait glaciada; et on analyse ce retrait par diverses méthodes.

*Mots clé :* Cordillère Blanche, río Santa, glaciers andins, hydrologie de montagne, MNT Aster

## Abstract

In the Andean Cordillera many hydrologic basins are regulated by glaciers. These glaciers retain the precipitation water in the rainy season to let it off by fusion into the rivers in the dry season.

However, a retreat of these glaciers is being observed, consequence of the global warming, which makes worry about the future of the water resources.

Here we present the case study of the Cordillera Blanca and the río Santa basin, in the western slopes of the peruvian Andes. We try to establish a relation between the debits and the glacier coverage, in order to be able to predict the evolution of the water resources linked with the glacier retreat; the glacier retreat is analyzed by different methods.

*Key words:* Cordillera Blanca, río Santa, andean glaciers, mountain hydrology, Aster DEM

# Indice

<i>Agradecimientos</i>	1
<i>Resumen</i>	3
<i>Indice</i>	4
<i>Indice de figuras</i>	6
<i>Introducción</i>	8
<b>Capítulo I: el contexto geográfico</b>	9
I.1. La cuenca del río Santa en la geografía del Perú	9
I.1.1. Introducción a la geografía del Perú	9
I.1.2. Particularidades de la cuenca del Santa	11
I.1.3. Introducción al clima en la cuenca del Santa	12
I.2. Descripción de los glaciares de la zona	16
I.2.1. Descripción morfológica	16
I.2.2. Régimen glaciar anual e interanual	17
I.2.3. Funcionamiento energético de un glaciar	19
<b>Capítulo II: Importancia de los glaciares en la hidrología de las subcuencas</b>	21
II.1. Disponibilidad de datos: la red hidro-pluviométrica	21
II.2. Análisis hidrológico	24
II.2.1. Definición de las variables estudiadas	24
II.2.2. Estimación de la precipitación por subcuenca	24
II.3. Resultados	28
II.3.1. Influencia de la cobertura glaciar sobre la lámina escurrida	28
II.3.2. Influencia de la cobertura glaciar sobre el déficit hídrico	29
II.3.3. Evolución temporal del recurso hídrico	30
II.4. Conclusiones y perspectivas	31
<b>Capítulo III: Retroceso de los glaciares</b>	33
III.1. Estudios fotográficos	34
III.1.1. Glaciar Arteson	34
III.1.2. Glaciar Shallap	35
III.1.3. Que más se podría ver con fotografías ?	36
III.2. Estudios topográficos	36
III.2.1. Artesonraju	37
III.2.2. Glaciar Yanamarey	37
III.2.3. Glaciar Uruash	38
III.2.4. Glaciar Shallap	38
III.3. Un balance hidrológico particular: el caso de la cuenca de Parón y Artesonraju	39

III.3.1. Disponibilidad de datos	40
III.3.2. Tratamiento hidrológico	41
III.3.3. Discusiones y perspectivas	44
III.4. Uso de imágenes satelitales	46
III.4.1. Medición de variaciones de frente y de superficie	47
III.4.2. Medición de variaciones de volúmenes	49
<i>Conclusiones generales</i>	57
<i>Referencias bibliográficas</i>	59

## Índice de figuras

I.1. Relieve y clima del Perú	10
I.2. Corte transversal del Perú a la altura de Chimbote	10
I.3. Ubicación de la cuenca del río Santa en el Perú	11
I.4. Caudal promedio del Santa en la estación de Puente Carretera	12
I.5. Precipitaciones en Huaraz y humedad relativa en Querococha	13
I.6. Proceso de formación de nubes en la Cordillera Blanca	13
I.7. Formación de nubes orográficas en las cordilleras Blanca y Negra	14
I.8. Temperaturas mensuales en algunas estaciones de la cuenca alta	15
I.9. Variación estacional de la radiación	15
I.10. Morfología de un glaciar típico de la Cordillera Blanca	16
I.11. Régimen glaciar anual en la Cordillera Blanca	17
I.12. Caudales normalizados de las cuencas de Parón y Querococha	18
I.13. Influencia de los glaciares en la variabilidad anual del caudal	18
I.14. Retroceso de los frentes de tres glaciares de la Cordillera Blanca	19
II.1. Ubicación de la red hidro-pluviométrica	22
II.2. Las estaciones de la red hidr-pluviométrica	23
II.3. Las zonas de precipitación en la cuenca del Santa	25
II.4. Dependencia de las precipitaciones a la altitud	26
II.5. Como estimar la precipitación en cada subcuenca	27
II.6. Influencia del porcentaje glaciar sobre la lámina escurrida	28
II.7. Influencia del porcentaje glaciar sobre el déficit hídrico	29
II.8. Evolución de los caudales específicos en algunas subcuencas	30
III.1. Evolución del área glaciar en la Cordillera Blanca	33
III.2. La evolución del glaciar Arteson vista con serie temporal de fotos	34
III.3. El glaciar Shallap en 1932 y 1998	35
III.4. Evolución del frente del glaciar Yanamarey desde 1948	37
III.5. Evolución del frente de Uruashraju desde 1948	38
III.6. Mapa de la cuenca de Parón	39
III.7. Disponibilidad de datos de caudales anuales en Parón y Artesoncocha	40
III.8. Disponibilidad de datos de caudales mensuales en Parón y Artesoncocha	41
III.9. Correlación entre los caudales de salida de Artesoncocha y los caudales de entrada de Parón	42
III.10. Correlación entre los caudales <i>de origen glaciar</i> de salida de Artesoncocha y los caudales de entrada de Parón	42
III.11. Imágenes SPOT de la Cordillera Blanca	47
III.12. El retroceso de Yanamarey y Uruashraju visto por satélites entres 1990 y 2001	47
III.13. Geometría de la toma de las imágenes Aster	49
III.14. El MNT de referencia (1962) y el MNT Aster (2001)	50
III.15. Substracción del MNT de referencia al MNT Aster	51
III.16. Las zonas escogidas para estudiar las pérdidas volúmicas de hielo en Shallap	52
III.17. Histogramas de las diferencias entre 1962 y 2001 en la lengua de Shallap y su zona de calibración	53
III.18. Estimaciones de las pérdidas volúmicas en las lenguas de Shallap, Uruashraju, Yanamarey, entre 1962 y 2001	54
III.19. Estudio de las pérdidas de volúmenes en la mina de Ticapampa	55

Serranitullam cä. Qaqacuna  
jananllachömi yachapis y  
weqëwanran llapan  
nunacunapis cawayan.  
¿IMATAQ ?

*Soy serranito. Vivo encima de las rocas,  
y la gente vive con mis lágrimas  
¿ QUIEN SOY ?*





## Introducción

Bien lo saben los campesinos del valle alto del Río Santa: los glaciares de la Cordillera Blanca, cuyas aguas de fusión alimentan las quebradas donde viven de una agricultura de subsistencia, son primordiales para sus cultivos. Más abajo, en el cañon del Pato, la central hidroeléctrica instalada que proporciona energía a las ciudades de Huaraz y Chimbote y a todo el Callejón de Huaylas, mantiene un caudal de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  en la Balsa a lo largo del año en gran parte gracias a las aguas glaciares. En el valle bajo, la relativa regularidad del caudal que llega a la costa permite el abastecimiento de grandes instalaciones de riego para la agricultura intensiva en una zona árida. Es mucha la gente que vive de las lágrimas de los glaciares....

La zona de estudio está caracterizada por su clima tropical con dos temporadas bien marcadas: la temporada de lluvias, durante el verano austral (octubre a abril) y la temporada seca durante el invierno austral, de mayo a septiembre. Durante la temporada de lluvias, las precipitaciones son bien superiores a la demanda de agua para la agricultura y la producción de energía hidroeléctrica, las lluvias diluvianas son responsables de inundaciones en las ciudades de valle, de la erosión de los suelos y de las carreteras trochas de los flancos de montaña. Por el contrario durante la temporada seca la demanda de agua no está satisfecha, los ríos y la vegetación se secan. En este marco, los glaciares actúan como reservas de agua, regulando los caudales a lo largo del año, almacenando agua en la temporada húmeda para liberarla en la temporada seca.

Pero estas preciosas reservas de agua están desapareciendo lentamente: parece que el retroceso de los glaciares, que se podía observar en la Cordillera Blanca desde la apogea de la pequeña edad de hielo, comenzó a acentuarse estos veinte últimos años, por consecuencia del calentamiento global que afecta el planeta, inquietando los campesinos, la central hidroeléctrica, y los proyectos de riego en la costa, que están pensando en construir represas de agua en lagunas de montaña.

En un contexto de expansión demográfica, es primordial anticipar lo que serán las disponibilidades de agua en el futuro. En este estudio hemos tratado de entender la evolución de los recursos hídricos en relación con el retroceso observado de los glaciares, para tratar de aportar elementos de respuesta. En el capítulo I se hace una breve introducción al contexto geográfico y climático de la cuenca del Santa, con un enfoque en la hidrología y los glaciares. En el capítulo II tratamos de correlacionar la importancia de la cobertura glaciar sobre los caudales de una cuenca, para después poder hacer predicciones en cuanto al recurso hídrico si es que es posible predecir el retroceso glaciar. En el capítulo III describimos algunos métodos utilizados para observar el retroceso de los glaciares, de la percepción remota al balance de masa.

# CAPITULO I

## EL CONTEXTO GEOGRAFICO

En este capítulo introductorio se presentan los aspectos físicos los más importantes de entender para entender la hidrología de la zona de estudio: la cuenca del Río Santa. Después de una breve introducción al clima de la zona, se presentarán los aspectos físicos de los glaciares típicos de los que se encuentran en la Cordillera Blanca y cuyos deshielos influyen en la hidrología, junto con los parámetros climáticos que más influyen en su régimen.

### **I.1. La cuenca del río Santa en la geografía del Perú.**

#### **I.1.1. Introducción a la geografía del Perú**

El Perú, país tropical de Sudamérica, se divide en tres zonas climáticas directamente correlacionadas con el relieve : la costa, la sierra y la selva (cf fig. I.1 y I.2).

*La costa* es una banda estrecha de tierra ubicada entre el océano pacífico y la cordillera de los Andes. Presenta un litoral de 2650 km, su ancho es de 50 a 100 km. Su superficie representa más o menos el 11% de la superficie del país.

Su relieve es moderado, se encuentran mayormente dunas y colinas que son los contrafuertes de la cordillera de los Andes.

Su clima es subtropical árido, con pocas precipitaciones.

*La sierra* es una barrera montañosa que cruza el país paralelamente al litoral. Ancha de mas o menos 120 km (al norte) a 300 km (al sur), culmina en el nevado Huascarán a 6768m de altura. Su superficie representa más o menos 26% de la superficie total del Perú.

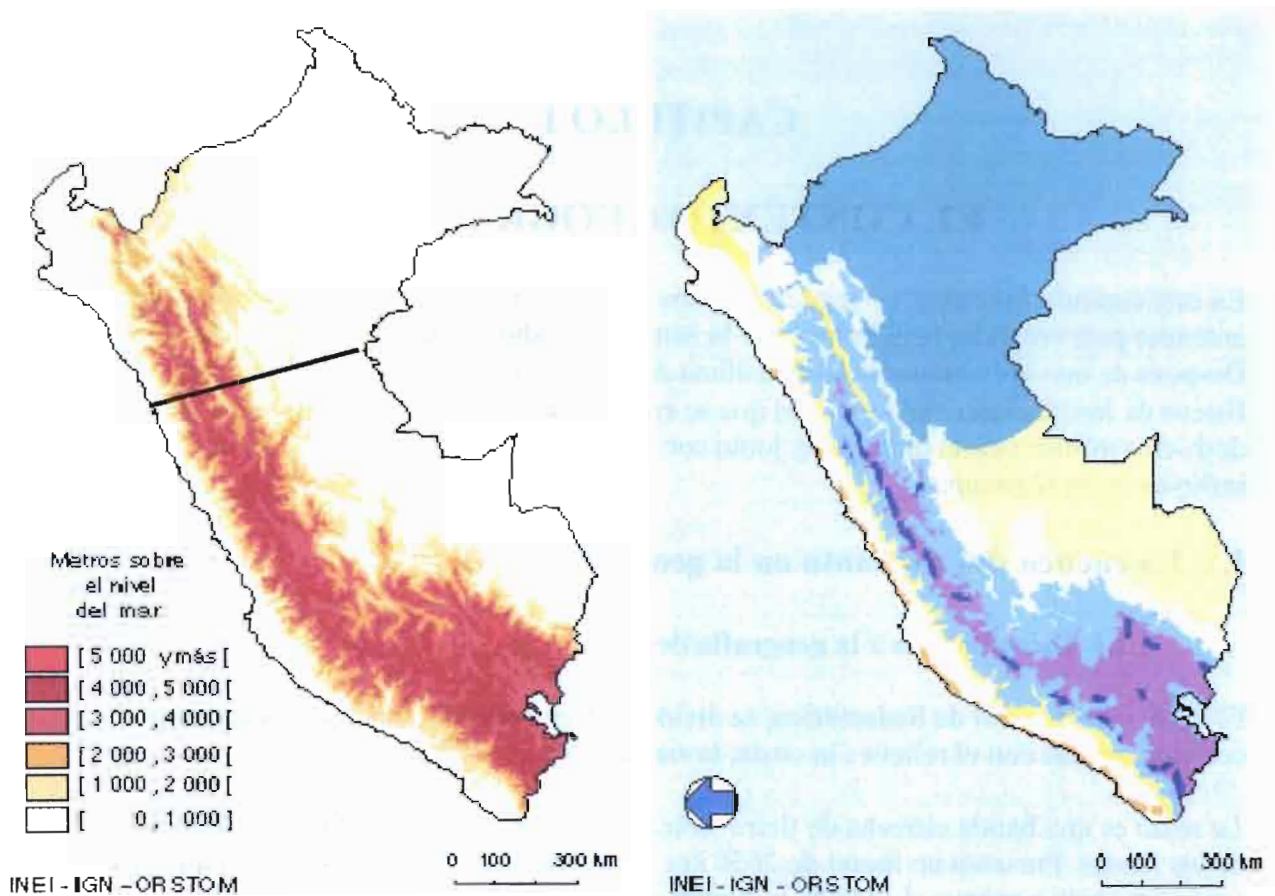
Su relieve es accidentado, con pendientes fuertes, quebradas profundas, nevados altos.

Su clima es de tipo subtropical de montaña, con dos estaciones bien marcadas: la época seca, de mayo a setiembre, y la época de lluvias de octubre a abril, donde ocurre casi toda la precipitación.

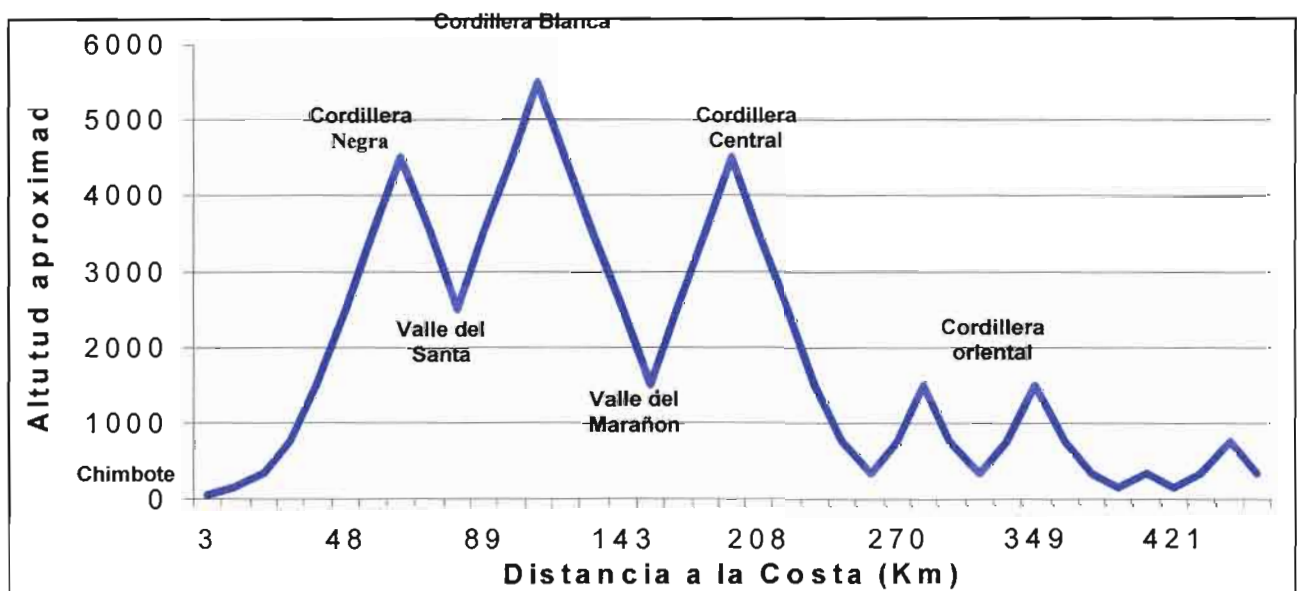
*La Selva*, al este de la cordillera, cubre una superficie de mas o menos 63% de la superficie total del país.

La Selva Alta comprende la parte baja de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, su relieve es bastante accidentado. La selva Baja, cubierta de vegetación tropical, presenta poco relieve.

Su clima es de tipo subtropical húmedo, con mucha precipitación todo el año.



**Fig 1.1.** Izquierda: el relieve del Perú. La cordillera delimita el país en tres zonas paralelas: la costa, al este, la sierra, y la selva, al oeste. Derecha: las principales zonas climáticas del Perú. Se nota una fuerte correlación con el relieve. En la costa se encuentra un clima desértico o semi desértico (anaranjado y amarillo), en la sierra un clima subtropical de montaña (azul claro y morado), y en la selva un clima tropical húmedo (verde y kaki) (Fuente INEI).

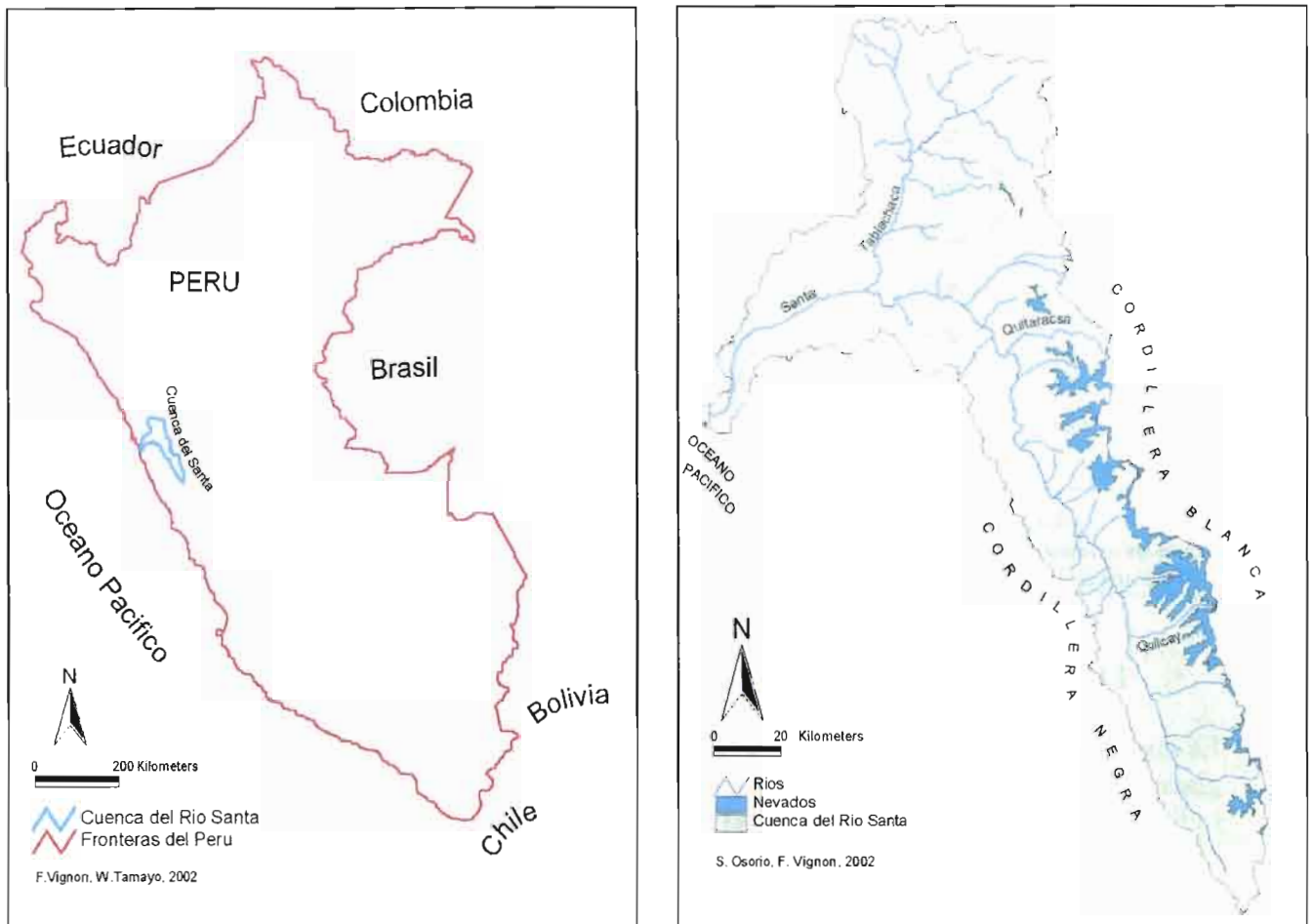


**Fig 1.2.** Corte transversal del Perú a la altura de Chimbote, perpendicularmente al litoral (Raja negra en la Fig. 1.1). El Río Santa corre entre las Cordilleras Negra y Blanca, que forman la Cordillera Occidental, que es la divisora de aguas entre el Pacífico y el Atlántico. Paralela al valle del Santa está el valle del Marañon, afluente del Amazonas, que desemboca en el Atlántico. Al este de la Cordillera Central está la Amazonia; al oeste de la Cordillera Occidental está la Costa.

### I.1.2 Particularidades de la cuenca del Santa

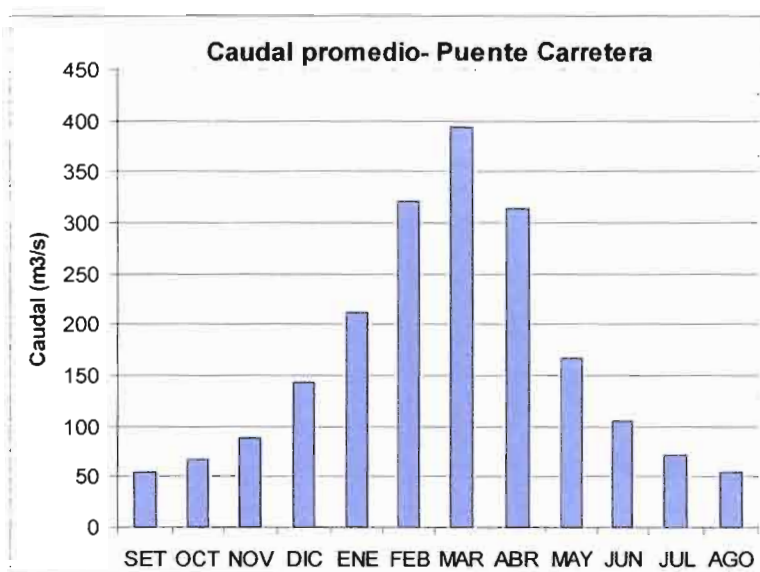
La cuenca del Santa, con una superficie de 11 910 km<sup>2</sup>, es la más extensa de la vertiente occidental de la cordillera en el Perú (cf fig. I.3).

Lo particular de la cuenca es su importante cobertura glaciar: los glaciares de la Cordillera Blanca, cuyos deshielos llegan al Santa por su margen derecha, cubrían aproximadamente 631 km<sup>2</sup>, o sea 5.3 % de la superficie de la cuenca en el 1968 (fecha en que se ha hecho la clasificación de campo para los mapas al 100 000e del IGN que cubren la zona) (cf fig.I.3).



**Fig I.3.** Izquierda: Ubicación de la cuenca del Río Santa en el Perú. Su forma extraña se debe a que en la cuenca alta, el Santa corre entre dos cordilleras, la Cordillera Negra al oeste y la Cordillera Blanca al este. A la salida del Cañon del Pato, que marca la delimitación entre cuenca alta y cuenca baja, el río Santa da la vuelta al oeste y atraviesa perpendicularmente la banda de costa árida, para desembocar finalmente en el Pacífico en la altura de la ciudad de Chimbote. Derecha: la cuenca del Río Santa, áreas nevadas y ríos. Las áreas nevadas están delimitadas en base a los mapas al 100 000 del IGN, publicadas en el año 1970. La clasificación de campo es de 1967-68. Se nota la abundancia de glaciares en la Cordillera Blanca y su ausencia en la Cordillera Negra. Esto se debe a que la Cordillera Blanca, en temporada de lluvias, recibe intensa precipitación orográfica por condensación de las nubes que se forman encima de la Amazonía. Se nota también que los afluentes más importantes del Santa le llegan por su margen derecha, o sea la de la húmeda y glaciарizada Cordillera Blanca.

La fusión de los glaciares en la época seca permite al río Santa mantener un caudal relativamente estable a lo largo del año, lo que es apreciable para la agricultura (intensiva en el valle bajo con los grandes proyectos de riego CHAVIMOCHIC y CHINECAS en la costa árida, extensiva en la cuenca alta) y la producción de energía eléctrica (con la central hidroeléctrica del Cañon del Pato, de una capacidad de 150 MW). En la fig.I.4 se presenta el caudal del Santa en su desembocadura cerca de Chimbote



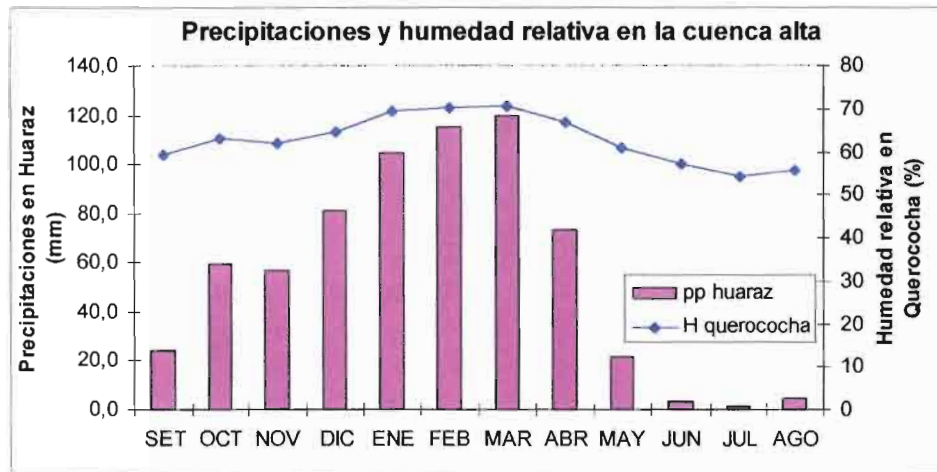
*Fig I.4. Caudal promedio del Santa en la estación de Puente Carretera, en la desembocadura del Río Santa (promedio interanual 1931-1999). Los 50 m³/s que llegan al mar en época de estiaje se deben por gran parte a la fusión de los glaciares de la cuenca alta. Se nota la graduación en año hidrológico, de setiembre (inicio de la temporada de lluvias en la cuenca alta) a agosto.*

### **I.1.3. Introducción al clima en la cuenca del Santa.**

Es importante entender como funciona el clima en la cuenca del Santa, ya que los glaciares reaccionan directamente a factores climáticos como las precipitaciones, la radiación, la temperatura, y la humedad relativa.

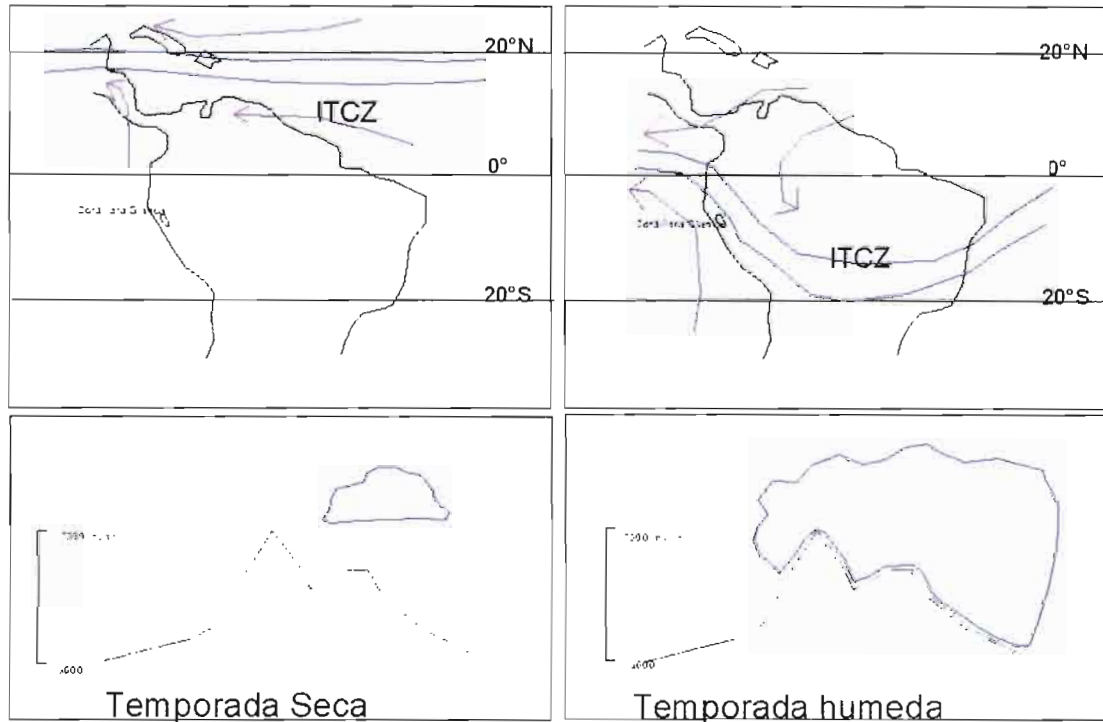
#### *Precipitaciones y humedad relativa*

La zona de la Cordillera Blanca está caracterizada por dos temporadas bien marcadas: la temporada seca, de mayo a septiembre, donde la precipitación es casi nula, y la temporada de lluvias, de octubre a abril: en Huaraz (corazón del valle del Santa), en los cuatro meses más lluviosos del año (diciembre-marzo) cae más del 60% de la precipitación, mientras que en los tres meses más secos (junio-agosto) cae menos de 0.2% (cf fig. I.5)

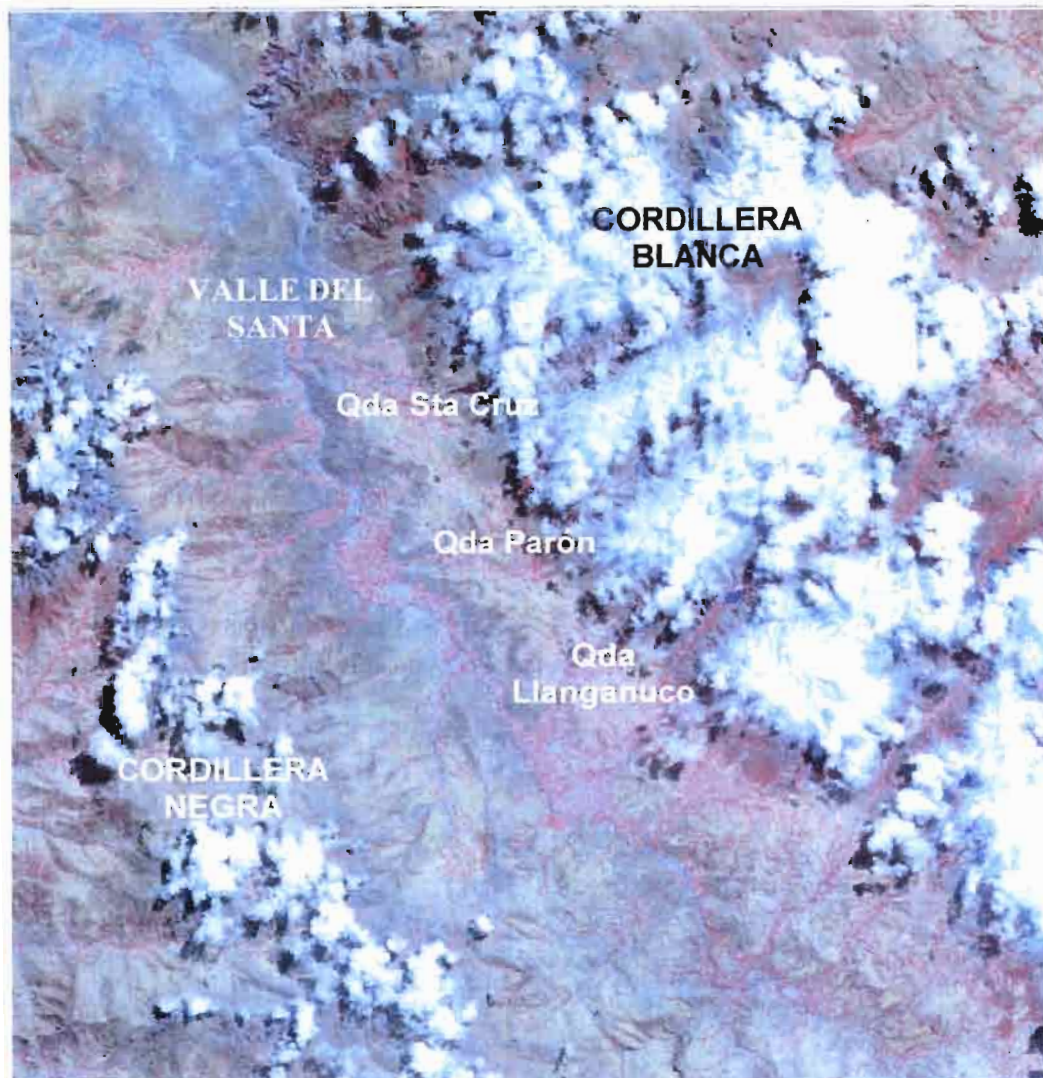


**Fig I.5.** Precipitaciones en Huaraz ( $9^{\circ}29'34''S$ ,  $77^{\circ}30'49''W$ , 3050 masnm, promedio interanual 1953-2000), junto con la humedad relativa en Querococha ( $9^{\circ}43'35''S$ ,  $77^{\circ}19'57''W$ , 4037 msnm, promedio interanual 1965-2002). Se nota un incremento regular de las precipitaciones de noviembre a marzo, mientras que la transición a la temporada seca es muy abrupta. Los cambios en la humedad relativa siguen los de la precipitación.

Las precipitaciones de época de lluvia parece que son mayormente de origen orográfica, resultando de la condensación de las nubes de la zona intertropical de convergencia (ITCZ, por el inglés Inter Tropical Convergence Zone (zona de convergencia de los aliseos cargados con humedad)) en las cumbres altas de la Cordillera Blanca, como está ilustrado en la fig. I.6 y I.7:



**Fig I.6.** Formación de nubes en la Cordillera Blanca. En temporada seca (julio), los vientos (flechas) concentran la humedad (ITCZ) muy al norte, no hay precipitación en las latitudes de la Cordillera Blanca. En temporada húmeda (enero) los vientos traen la ITCZ a la espalda de la Cordillera Blanca, y hay condensación de la humedad en las cumbres, formándose nubes orográficas que traen la precipitación (Adaptado de [Kaser2002a]).

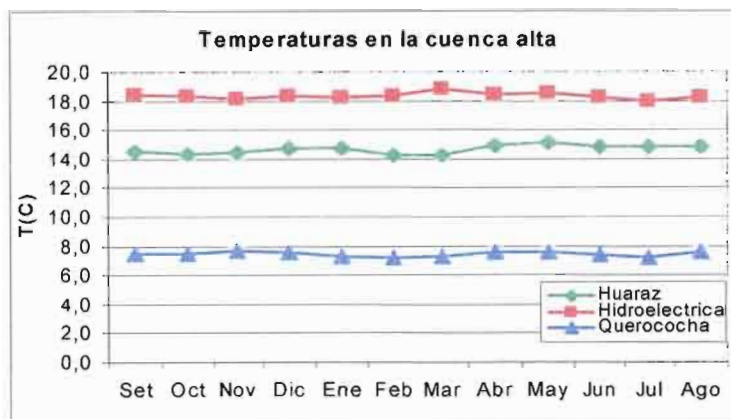


*Fig 1.7. Formación de nubes orográficas en las Cordilleras Blanca y Negra. (Composición Coloreada Aster, 3R2G1B). Se ve cómo las nubes están encima de las cumbres más altas cuando las quebradas están despejadas.*

En cuanto a la humedad relativa, se entiende que sigue más o menos la estacionalidad de las precipitaciones, ya que está relacionada con la presencia de las nubes de la ITCZ que llegan a la Cordillera Blanca en época de lluvias.

### *Temperaturas*

Las temperaturas no presentan la estacionalidad de las precipitaciones, esto se debe a que, en las zonas de bajas latitudes, la inclinación de los rayos del sol varía poco a lo largo del año. Lo que sí es notable es la dependencia de la temperatura con la altitud: se estima en la zona un gradiente de  $-0.065\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{m}$  [Kaser2001](cf fig. 1.8).



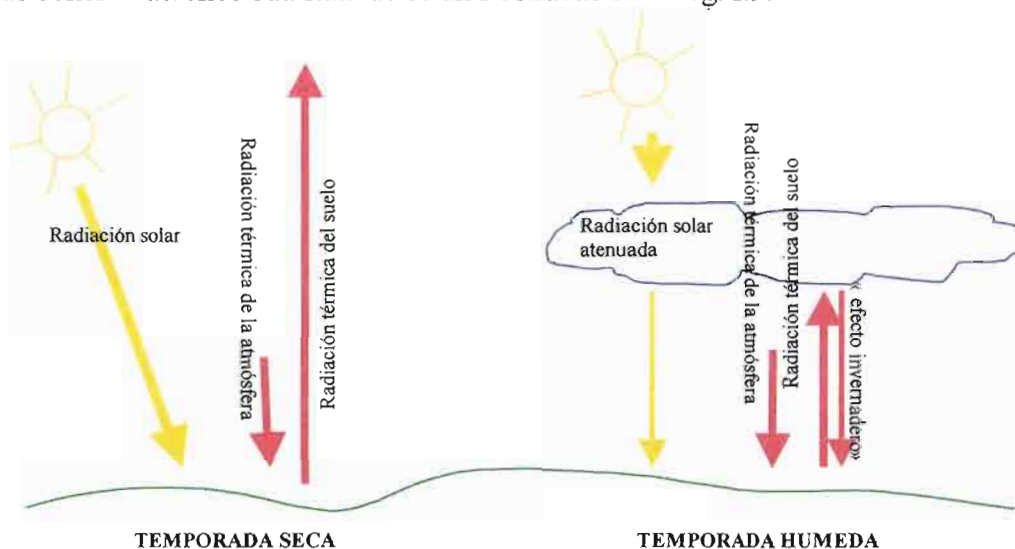
**Fig I. 8.** Temperaturas mensuales en algunas estaciones de la cuenca alta: Querococha ( $9^{\circ}43'35''S$ ,  $77^{\circ}19'57''W$ , 4037 msnm, promedio interanual 1965-2002), en la puna de la cuenca alta; Huaraz ( $9^{\circ}29'34''S$ ,  $77^{\circ}30'49''W$ , 3050 msnm, promedio interanual 1978-1999), en el medio de la cuenca alta, y Estación hidroeléctrica ( $8^{\circ}42'18''S$ ,  $77^{\circ}50'49''W$ , 1386 msnm, promedio interanual 1981-1999), en la salida del Cañon del Pato en el límite entre cuenca alta y cuenca baja.

### Radiación

No se dispone a la hora de registros de radiación en la cuenca del Río Santa, apenas datos poco confiables de tiempo de insolación en Querococha, pero son datos poco confiables. Sin embargo se entiende que la radiación está correlacionada con la nebulosidad, o sea tiene una estacionalidad correlacionada con la de las precipitaciones:

- La radiación solar está atenuada por las nubes, pero las nubes están presentes en el verano austral, o sea cuando los días son más largos y que la incidencia del sol es más directa, efectos que compensan en cierta medida su atenuación.
- La radiación de origen térmica no sufre grandes variaciones a lo largo del año, ya que las temperaturas del aire como del suelo varían poco. Sin embargo, en época de nubes, hay como un efecto invernadero que refleja la radiación del suelo, amplificando la cantidad de radiación de onda larga que llega al suelo.

Estas consideraciones cualitativas están ilustradas en la fig. I.9.



**Fig I.9.** Variación estacional de la radiación: mientras que la radiación solar está atenuada en temporada húmeda por la presencia de nubes, la radiación de origen térmica que llega al suelo aumenta por causa de un “efecto invernadero” de reflexión en las nubes de la radiación térmica emitida por el suelo.

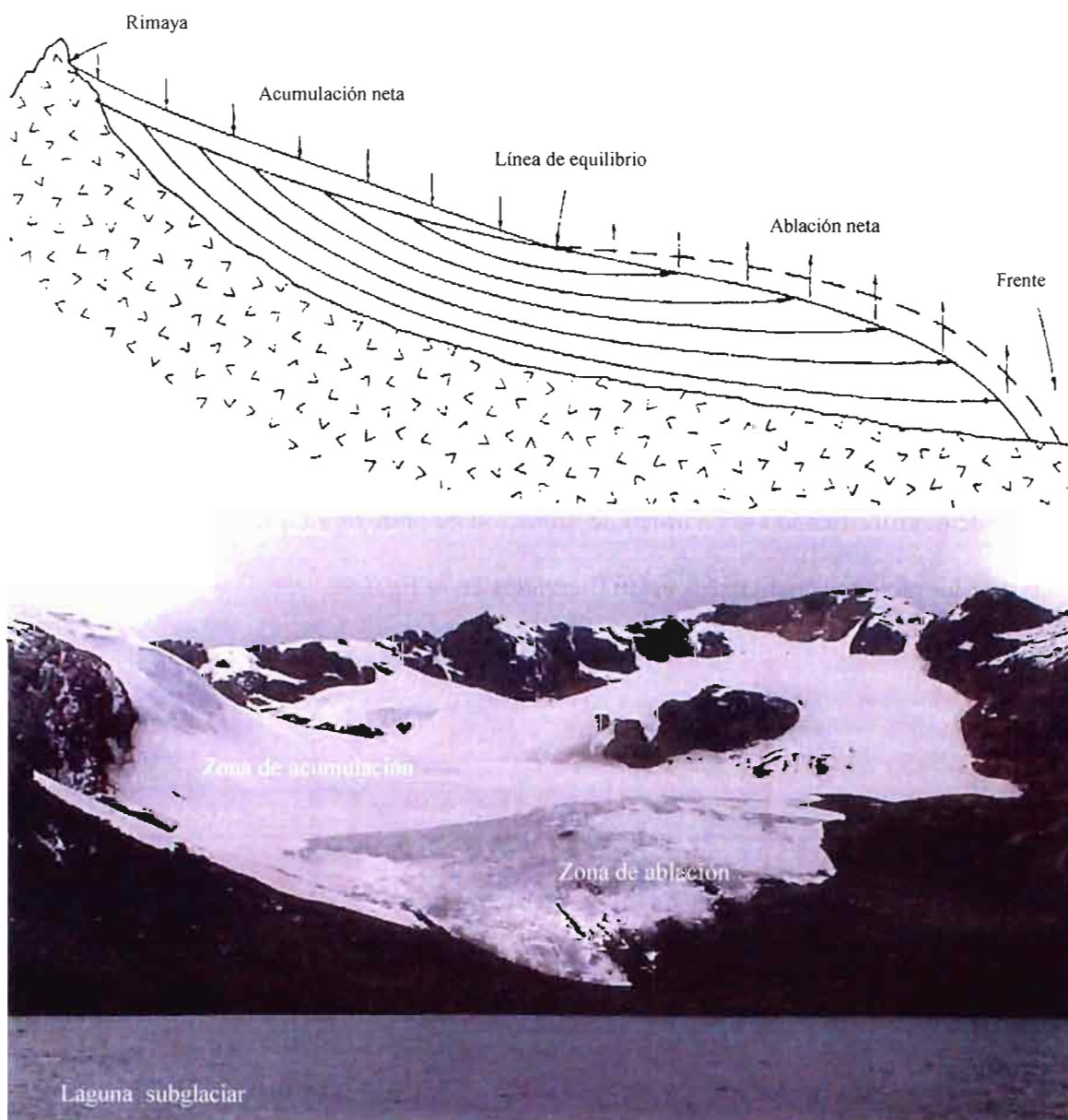


## I.2. Descripción de los glaciares de la zona

### I.2.1. Descripción morfológica

Los glaciares que se encuentran en la Cordillera Blanca son de tipo glaciares de montaña o pequeños glaciares de valle.

En el glaciar se distinguen dos zonas (cf fig. I.10): en la parte alta, la zona de acumulación, donde a lo largo del año hidrológico el balance neto de masa (aporte-desgaste) es positivo, y la zona de ablación donde este balance es negativo. Las dos zonas están separadas por una línea llamada línea de equilibrio.



*Fig I.10. Arriba: Esquema simple de un glaciar típico de la zona estudiada. Abajo: vista del glaciar Yanamarey en la Cordillera Blanca. Se distinguen bien las zonas de acumulación (nieve limpia, en la parte alta) y de ablación (hielo sucio en la parte baja). Abajo se ha formado una laguna con los deshielos del glaciar, lo que también es típico de lo que se encuentra en la Cordillera Blanca.*

### *La línea de equilibrio*

La línea de equilibrio se define como la línea en el glaciar donde la acumulación compensa exactamente la ablación a lo largo del año (zona de balance nulo). Su altitud reacciona a las condiciones climáticas del año, en particular a la temperatura en las zonas tropicales. En la Cordillera Blanca, está aproximadamente a los 5000 m.s.n.m, o sea un poco más abajo del isoterma 0°C [Kaser1996b][Kaser2001]. En un glaciar, la línea de equilibrio no sigue una curva de nivel, sino que cambia de altura en el glaciar por causa de factores topográficos (montañas que rodean en glaciar) que modifican las condiciones microclimáticas.

### *El frente del glaciar*

El frente del glaciar se ubica donde el flujo hacia abajo del glaciar (determinado por parámetros físicos como la pendiente del lecho y el AAR<sup>1</sup>) está contrarrestado por la ablación (determinada por factores climáticos). En consecuencia la dinámica de los frentes glaciares puede ser muy diferente de un glaciar a otro, a pesar de que están en situaciones climáticas comparables.

Es importante entender que las variaciones de posición del frente glaciar se hacen respondiendo a las situaciones climáticas, pero con un tiempo de respuesta que depende del tamaño del glaciar (más extenso el glaciar, más grande el tiempo de respuesta), del orden de unos años en los pequeños glaciares de la zona; mientras que las variaciones de altitud de la línea de equilibrio son respuestas inmediatas al clima.

### *El balance de masa*

El balance de masa es una medición directa de las ganancias o pérdidas del glaciar, generalmente expresada en milímetros equivalentes de agua. El balance es una cantidad importante de medir ya que está relacionado directamente con el tema del recurso hídrico. Como la línea de equilibrio, el balance depende de las condiciones climáticas del año.

## **I.2.2. Régimen glaciar anual y interanual**

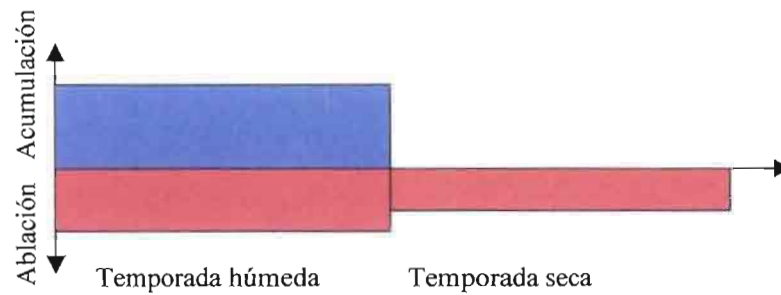
### *Régimen anual*

La acumulación ocurre solamente en temporada de lluvias, de setiembre a abril más o menos. En cambio, la ablación ocurre todo el año.

La ablación puede ocurrir de dos formas: fusión del hielo en agua, o sublimación del hielo directamente en vapor. La sublimación es un proceso que consume ocho veces más energía que la fusión para transformar la misma cantidad de hielo. Se entiende que en la temporada seca cuando la sublimación está favorecida por una humedad relativa más baja, mucha de la energía que llega al glaciar se desgasta en sublimación y la ablación neta es menor que en temporada húmeda, donde se estima una sublimación débil (cf. fig I.11). Falta todavía cuantificar este fenómeno.

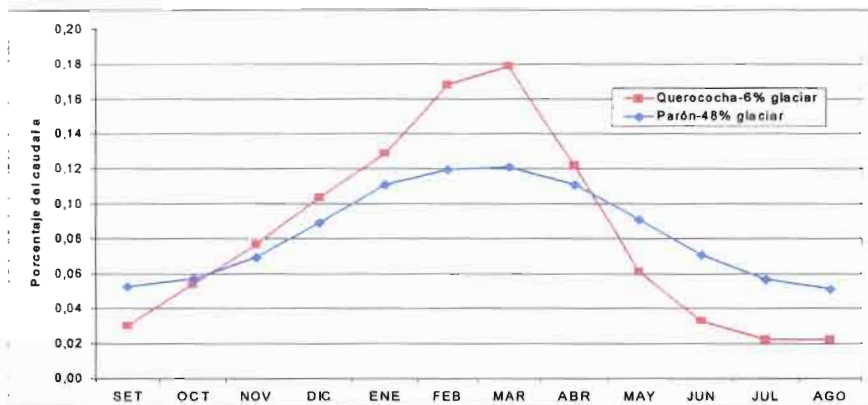
---

<sup>1</sup> se define el AAR, por Accumulation Area Ratio, como la superficie de la zona de acumulación sobre la superficie total del glaciar

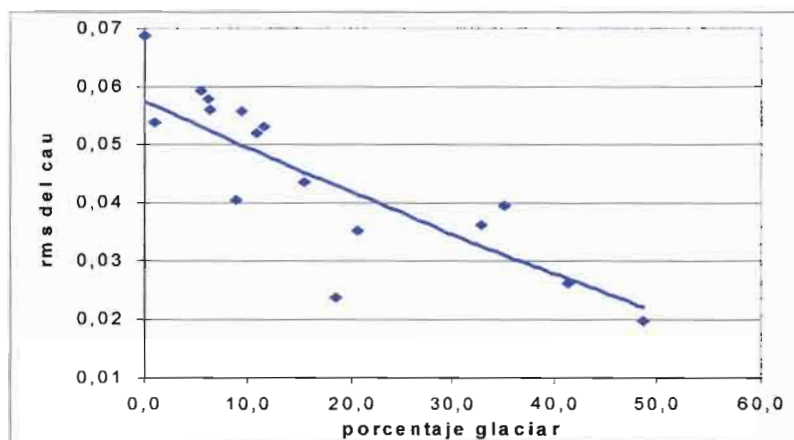


**Fig I.11.** Régimen glaciar anual en la Cordillera Blanca [Kaser2002a]. En la temporada húmeda ocurre el casi 100% de la acumulación. También es en la temporada húmeda que hay más ablación, ya que la fusión está privilegiada con respecto a la sublimación (humedad relativa elevada). En la temporada seca no hay acumulación, y hay menos ablación porque hay más sublimación (humedad relativa baja), que consume ocho veces más energía para transformar la misma cantidad de hielo.

Entender el régimen glaciar es importante para entender el régimen hidrológico de las cuencas con importante cobertura glaciar: en temporada seca, las aguas de fusión del glaciar soportan el caudal de estiaje lo que disminuye la variabilidad del caudal a escala anual (cf fig. I.12 y I.13).



**Fig I.12.** Caudales mensuales (promedios interanuales) de salida de la subcuenca<sup>1</sup> de Parón (48% de cobertura glaciar) y de Querococha<sup>1</sup> (6% de cobertura glaciar), en porcentaje del total anual. Las variaciones relativas son menos importantes en la cuenca con fuerte cobertura glaciar (Parón), con un caudal mínimo en época seca mantenido gracias a la ablación del glaciar.



**Fig.I.13.** Influencia de los glaciares en la variabilidad anual del caudal de salida de la cuenca: se ha representado, en función del porcentaje de cobertura glaciar de las subcuencas del Santa (cf fig. II.1 para la ubicación de las subcuencas), el valor RMS de los caudales mensuales normalizados por el caudal del año (promedio interanual). Se ve que en las cuencas con más superficie glaciar, el valor RMS es inferior, lo que corresponde a una estabilización del caudal por las aguas de fusión glaciar.

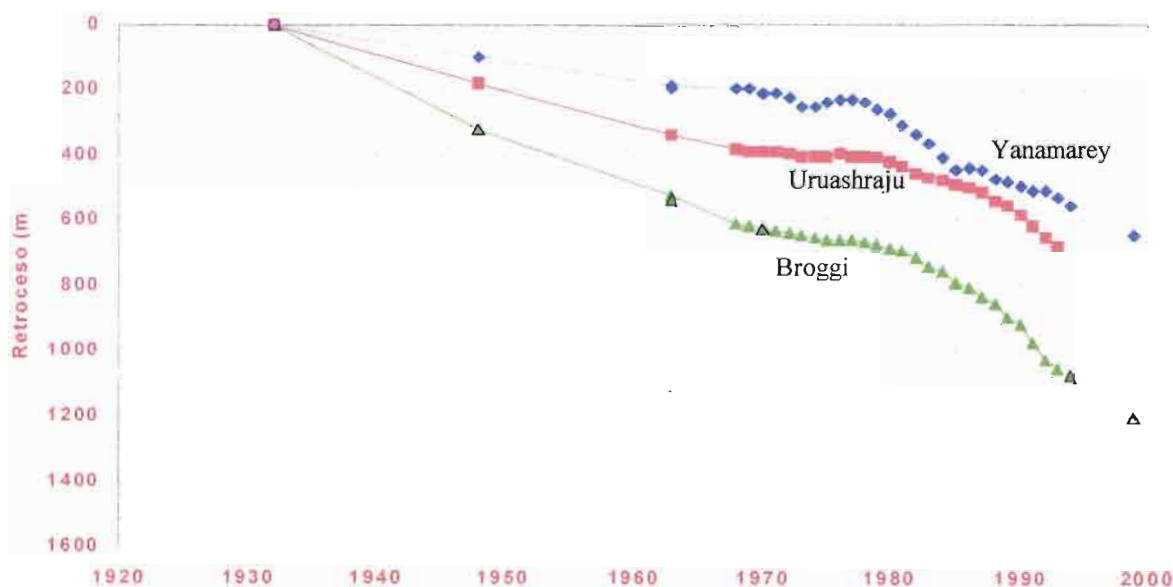
<sup>1</sup> Subcuencas de la cuenca del Río Santa

### Régimen interanual

Los glaciares responden al clima, y su respuesta se mide en el balance de masa (ganancia o pérdida de hielo). El comportamiento (balance) del glaciar, a escala interanual, es una imagen de las variaciones del clima en su entorno.

Todavía no se aprecia muy bien la influencia de cada uno de los parámetros climáticos (precipitación, humedad, temperatura, radiación) que determinan el comportamiento del glaciar, por falta de datos de balances glaciares por un periodo largo en la Cordillera Blanca.

Lo que sí se puede observar en los glaciares estudiados de la Cordillera Blanca es que están en un periodo de retroceso (cf fig.I.14), lo que es una consecuencia del calentamiento del planeta. (se estima que la temperatura promedio ha aumentado de 0.6 grados en estos 100 últimos años).



**Fig. I.14.** Retroceso de los frentes de tres glaciares de la Cordillera Blanca (Yanamarey, Uruashraju, y Broggi) estimados por fotografías (1932 y 1947, Kinzl) y por levantamientos topográficos de terreno (desde 1967). Parece que el retroceso ha aumentado en estos 20 últimos años. Puede ser consecuencia del calentamiento global que afecta el planeta, pero también del método de medición que ha cambiado<sup>1</sup>.

### I.2.3 Funcionamiento energético de un glaciar

El funcionamiento energético de los glaciares tropicales constituye un campo de investigación activo: entenderlo nos permitiría relacionar directamente los balances glaciares con las variaciones del clima. En la tesis de J.E Sicart [Sicart2002] se hace un buen resumen de los trabajos que se hacen hoy en día.

<sup>1</sup> Dos técnicas para evaluar el retroceso han sido utilizadas : una consiste en medir directamente el punto más bajo de la lengua del glaciar, la otra consiste dividir el área que ha perdido el glaciar de un año para el otro por el ancho promedio de la lengua.



## CAPITULO II

### IMPORTANCIA DE LOS GLACIARES EN LA HIDROLOGIA DE LAS SUBCUENCAS

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, los glaciares de la Cordillera Blanca sostienen y regulan los caudales de los afluentes del Río Santa. Sin embargo, los estudios para tratar de cuantificar esta influencia son escasos en la zona.

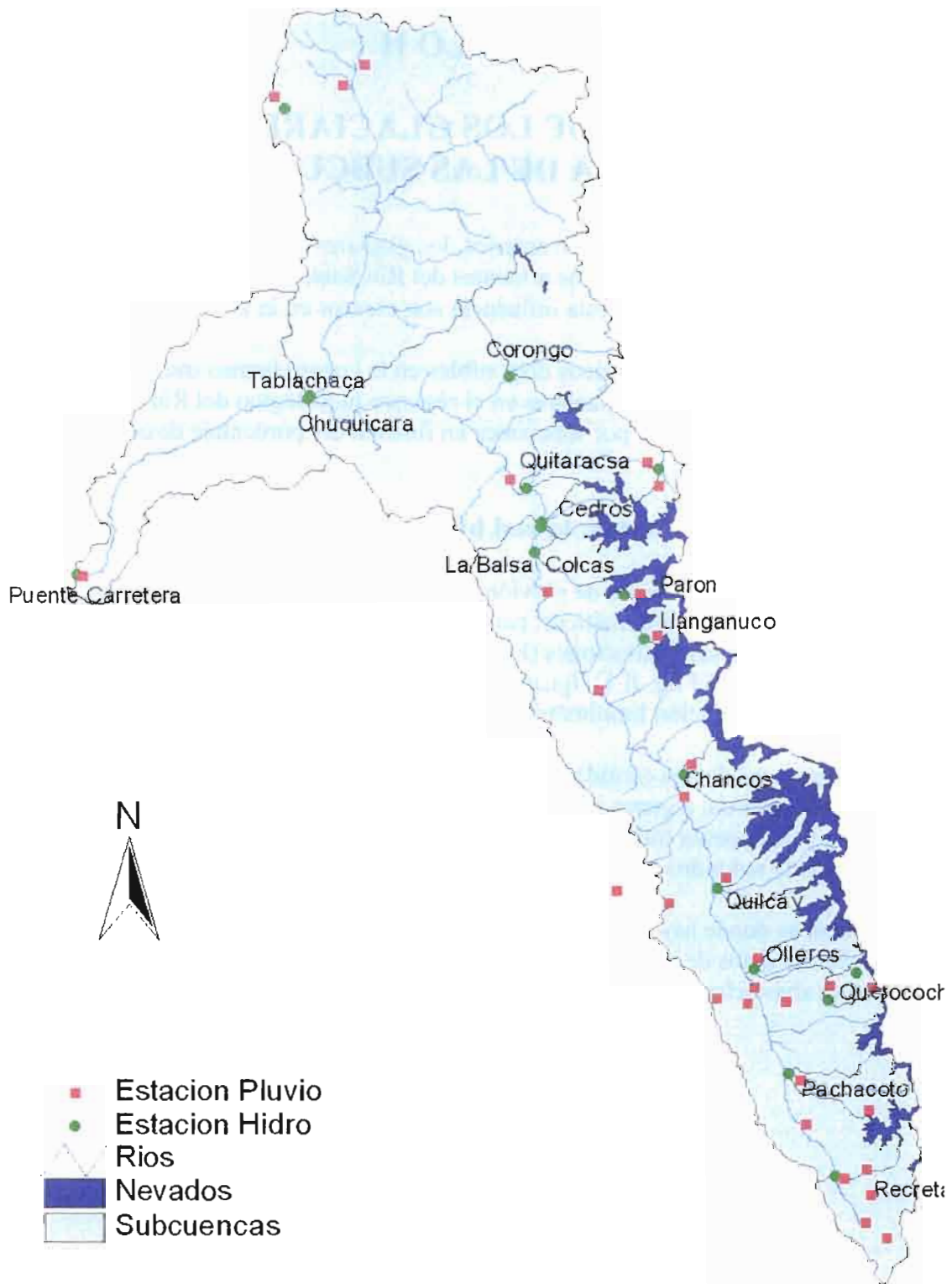
A partir de datos hidro-pluviométricos disponibles en la cuenca hemos tratado de cuantificar la importancia de los glaciares en el régimen hidrológico del Río Santa, haciendo un análisis subcuenca por subcuenca en función del porcentaje de cobertura glaciar de cada subcuenca.

#### **II.1. Disponibilidad de datos: la red hidro-pluviométrica**

En la zona de estudio disponemos de pluviómetros de varios tipos (diarios, totalizadores, pluviógrafos, automáticos, con distintos diámetros....) , instalados y monitoreados por diversas instituciones (Inrena, Egenor, Senamhi, IRD...), inegalmente repartidos en la cuenca (cf fig. II.1). Igual sucede con los limnigrafos (lamentemos por ejemplo no tener información limnimétrica en la Cordillera Negra).

Disponemos entonces de una cantidad de datos importante (fig. II.2) pero a veces no muy confiables. Además, algunas instalaciones están siendo abandonadas y/o mal monitoreadas, y se necesita trabajar en el mantenimiento, el mejoramiento y la ampliación de esta red hidro-pluviométrica.

En las subcuencas donde hay disponibilidad de información limnimétrica, y a pesar de la falta a veces de datos de pluviometría, se ha podido estudiar la influencia de los glaciares en el abastecimiento y la regulación de los caudales de los afluentes del Santa.



**Fig II.1.** Ubicación de la red hidro-pluviométrica. Se ve una buena cobertura de pluviómetros y limnigrafos en la cuenca alta (de La Balsa para arriba). Se han representado las más importantes subcuencas de la cuenca del Santa utilizadas en el estudio.

<i>Hidro</i>	LAT	LONG	ALT	Situacion	inicio	fin
HUACAMARCANGA	8:06:00	78:18:00	4000	AfNorte	1971	1995
MANTA	8:36:31	77:53:03	1920	AfNorte	1968	1997
CHUQUICARA	8:38:51	78:13:55	532	AfNorte	1982	1997
HUILLCA	8:47:29	77:36:29	3970	AfCBnorte		
QUITARACSA	8:47:52	77:51:08	1480	AfCBnorte	1953	1999
LOS CEDROS	8:52:18	77:49:43	1878	AfCBcentro	1953	2001
COLCAS	8:55:24	77:50:33	2048	AfCBcentro	1954	1997
PARON	8:59:48	77:41:15	4100	AfCBcentro	1954	2002
LLANGANUCO	9:04:43	77:39:05	3916	AfCBcentro	1953	1996
CHANCOS	9:19:15	77:34:47	2872	AfCBcentro	1953	1998
QUILLCAY	9:31:24	77:31:39	3091	AfCBcentro	1970	1998
ARTESONCOCHA	8:58:37	77:38:40	4300	Af2CBcentro	1996	2002
CHACRARAJU	8:58:55	77:38:25	4300	Af2CBcentro		
OLLEROS	9:40:01	77:27:49	3456	AfCBsur	1970	1997
QUEROCOCHA	9:43:35	77:19:57	4037	AfCBsur	1953	1998
PACHACOTO	9:50:55	77:24:01	3700	AfCBsur	1953	1998
URUASHRAJU	9:35:53	77:19:34	4610	Af2CBsur		
YANAMAREY	9:39:36	77:16:38	4600	Af2CBsur	2001	2002
CONDORCERRO	8:39:30	78:15:43	477	Santa Norte	1957	1997
PUENTE CARRETA	8:58:12	78:37:48	18	Santa Norte	1933	1997
MIRAFLORES	9:29:46	77:32:29	2994	Santa medio	1987	
LA BALSA	8:52:39	77:49:38	1861	Santa medio	1954	2001
RECRETA	10:02:27	77:19:33	4018	Santa alto	1953	1995
CONOCOCHA	10:07:09	77:17:00	4068	Santa alto		

<i>Pluvio</i>	LAT	LONG	ALT	Situacion	inicio	fin
CACHICADAN	8:06:00	78:09:00	2892	Norte	1964	1998
HUANCAMARCANGA	8:06:00	78:18:00	4000	Norte	1971	1998
MOLLEPATA	8:10:48	77:58:12	3758	Norte	1963	1998
HUILLCA	8:46:46	77:36:41	3950	CBnorte	1977	1999
SAFUNA	8:50:00	77:37:00	4400	CBnorte	1969	1975
PARON	9:00:32	77:41:15	4185	CBcentro	1949	2001
LLANGANUCO	9:04:43	77:39:05	3918	CBcentro	1953	2000
QUEROCOCHA	9:43:46	77:19:57	4087	CBsur	1965	2001
CAHUISH	9:41:05	77:15:17	4550	CBsur	1953	1999
SHACAYPAMPA	9:45:13	77:23:46	3820	CBsur	1953	2000
PACHACOTO	9:51:12	77:24:04	3786	CBsur	1953	2000
HIDROELECTRICA	8:48:12	77:50:49	1386	SantaMedio	1945	2001
CARAZ	9:02:43	77:48:25	2286	SantaMedio	1946	1996
YUNGAY	9:09:09	77:44:28	2557	SantaMedio	1953	2000
CHANCOS	9:19:10	77:34:30	2895	SantaMedio	1953	1999
ANTA	9:21:00	77:36:00	2748	SantaMedio	1971	2000
HUARAZ	9:29:34	77:30:49	3050	SantaMedio	1971	2000
RECUAY	9:43:12	77:27:00	3394	SantaMedio	1966	1998
TICAPAMPA	9:45:09	77:26:32	3480	SantaMedio	1948	1993
MILPO	9:52:48	77:13:48	4400	SantaAlto	1963	1998
COLLOTA	9:57:02	77:19:33	3910	SantaAlto	1953	2000
YANACOCHA	10:02:27	77:12:27	4450	SantaAlto	1953	2000
RECRETA	10:02:27	77:17:00	4020	SantaAlto	1953	2000
PUNTA-MOJON	10:05:00	77:12:21	4390	SantaAlto	1953	2000
CONOCOCHA	10:08:00	77:17:00	4150	SantaAlto	1957	1968
LAMPAS-ALTO	10:09:27	77:13:32	4100	SantaAlto	1971	1998
PUNTA CALLAN	9:32:39	77:37:20	4225	CNsur	1982	1999
CHACCHAN	9:33:00	77:46:12	2285	CNsur	1964	1998
LAGUNA UTUTO	9:40:48	77:30:00	4200	CNsur	1981	1998
QUIRUNCANCHA	9:43:54	77:29:47	4010	CNsur	1953	1999
HUANCAPETI	9:45:00	77:31:48	4420	CNsur	1953	1999

Fig II.2. Las estaciones de la red hidro-pluviométrica. Arriba: estaciones hidrológicas, abajo: estaciones pluviométricas. Se han clasificado por zona (cf sección II.2.2). Af = afluente directo del Santa, Af2 = afluente secundario del Santa, CB = Cordillera Blanca, CN = Cordillera Negra. De cada estación hemos indicado la latitud, longitud, altitud, y el intervalo de tiempo para el cual se tienen datos.



## II.2. Análisis hidrológico

Disponemos de varias subcuencas de estudio (cf fig. II.1) que difieren entre sí, entre otros factores menos importantes para el estudio del comportamiento hidrológico, por la precipitación y la cobertura glaciaria. Vamos a estudiar la influencia de la cobertura glaciaria sobre los caudales de salida de esas subcuencas.

### II.2.1. Definición de las variables estudiadas

Para poder comparar subcuencas de diferentes tamaños, trabajaremos con variables normalizadas por el área para el estudio de los caudales de salida. Así veremos la influencia de la cobertura glaciaria sobre:

- la *Lámina Escurrida* ( $Le$ , que es el volumen  $V_s$  de agua que sale de la cuenca por su cierre en un tiempo determinado, dividido por el área  $A$  de la cuenca):

$$Le = V_s / A$$

- lo que da lo mismo, el *Caudal Específico* ( $Q_{es}$ , que es el caudal  $Q$  de salida de la cuenca dividido por el área  $A$  de la cuenca):

$$Q_{es} = Q / A$$

- el *Déficit Hídrico* ( $DH$ , que es la precipitación  $P$  menos la lámina escurrida  $Le$ ). El déficit hídrico representa entonces la cantidad de agua que de cierta manera “queda” en la cuenca, o sea en lagunas, o sea en el suelo, o sea en glaciares, o sea en la vegetación; o que se evapora sin llegar al cierre de la cuenca). Un déficit hídrico negativo indica que hay una fuente de agua en la cuenca (laguna, glaciaria o napa freática...):

$$DH = P - Le$$

### II.2.2. Estimación de la precipitación por subcuenca

#### *Problemática*

Mientras que los caudales de salida de cada subcuenca son fáciles de evaluar (por medición directa en el terreno), el factor precipitación ( $P$ ) no lo es tanto. En efecto a veces solamente se dispone de un pluviómetro en una subcuenca, cuando hay una variabilidad espacial de la precipitación (variación de la lluvia con la altitud, influencia local de la topografía...) dentro de la subcuenca. A veces incluso no se dispone de ningún pluviómetro y hay que aproximar la precipitación por interpolación de la precipitación en quebradas vecinas.

#### *Zonificación de la precipitación*

Por eso se ha hecho una zonificación de las precipitaciones en la cuenca del Santa en seis zonas bien determinadas (cf fig. II.2 y II.3); en cada una de esas zonas la precipitación tiene el mismo comportamiento (cantidad, variación temporal):

*Zona Norte* : Corresponde a la zona montañosa pero no glaciada al norte de la Cordillera Blanca (zona de Cachicadan).

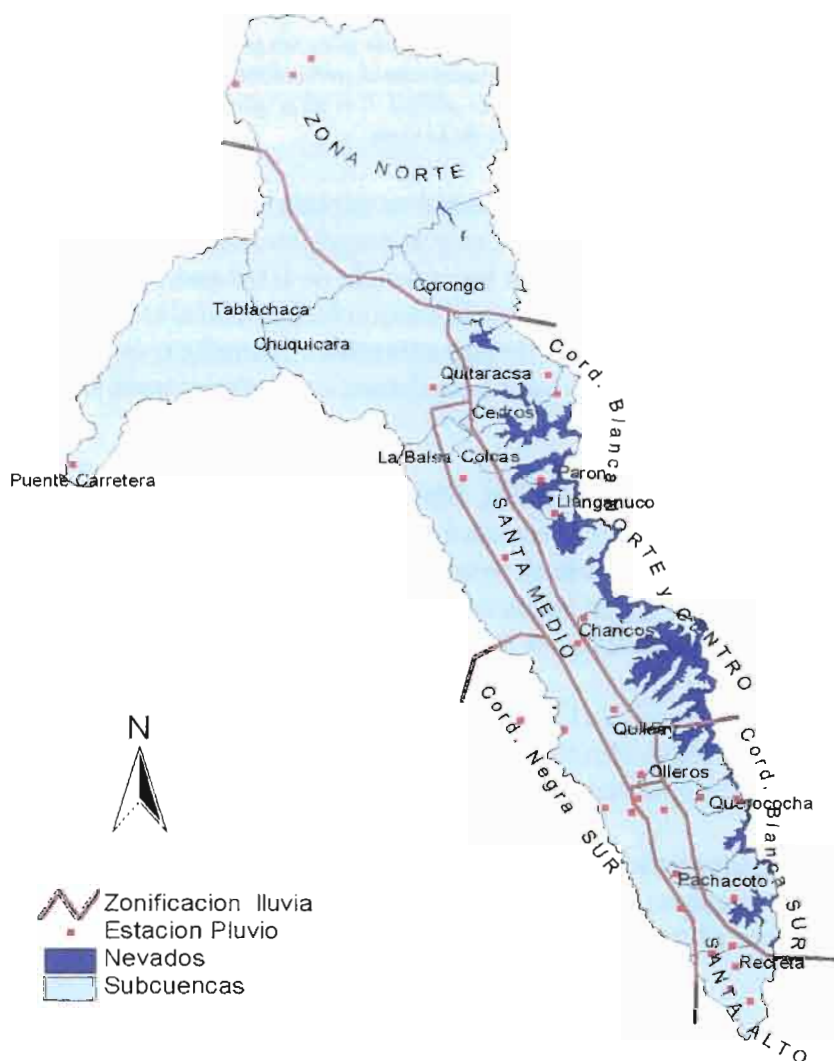
*Zona Cordillera Blanca Norte y Centro*: Corresponde al Norte y centro de la Cordillera Blanca: cumbres altas quebradas profundas (de Quebrada Honda a Safuna).

*Zona Cordillera Blanca Sur*: Corresponde al sur de la Cordillera Blanca, donde las cumbres y los pasos son más bajos (de Pachacoto a Olleros).

*Zona Santa Medio*: Corresponde al fondo del valle del Santa, a orillas del Río. El valle es relativamente estrecho. (de Recuay al Cañon del Pato).

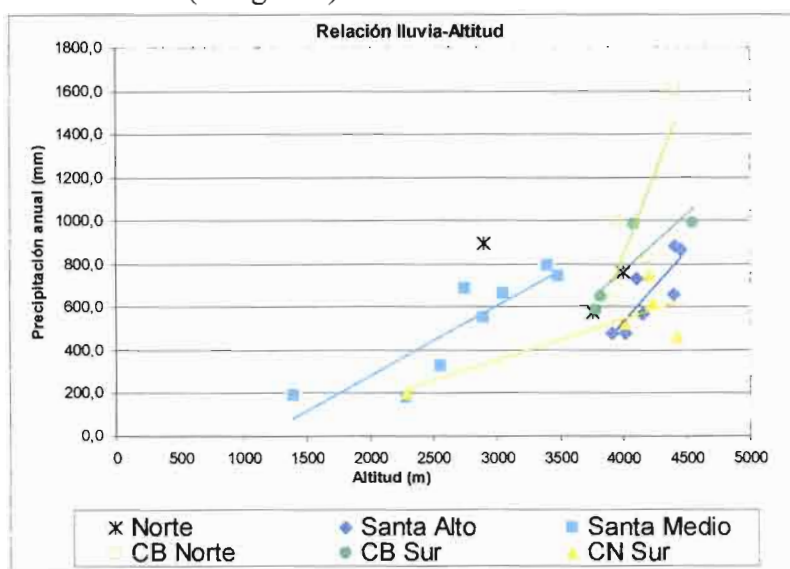
*Zona Santa Alto*: Corresponde al valle alto del Santa, a orillas del río. El valle es ancho con pampas húmedas y un paisaje de altiplano (de la pampa de Lampas a Recuay).

*Zona Cordillera Negra Sur*: la Cordillera Negra de Huancapeti a Punta Callan.



**Fig II.3.** Las zonas de precipitación en la cuenca del Santa. Se ha hecho la zonificación en base a las características de los regímenes de lluvia en cada zona. Estas zonas son consecuencia directa de la geografía física: se distinguen la Cordillera Blanca húmeda y glaciada (CB norte, centro y sur), el fondo del valle (Santa medio y alto), y la Cordillera Negra seca sin glaciares (CN Sur).

En cada una de las zonas especificadas se ha hecho un estudio de la dependencia de la precipitación con la altitud (cf fig. II.4)



**Fig II.4.** Dependencia de las precipitaciones a la altitud. Se nota sin poder cuantificarlo bien que la precipitación aumenta con la altitud. Cuando se estudia esta dependencia zona por zona, se nota todavía que dentro de cada zona sigue esta influencia de la altitud, con un gradiente precipitación/altitud que depende de la zona.

La dependencia de la precipitación con la altitud se explica entendiendo que la precipitación en la zona es mayormente de origen orográfica: hay condensación de la humedad proveniente de la Amazonía por ascendencia de las masas de aire que llegan a la Cordillera Blanca y llegan al punto de rocío encontrándose con aire más frío. Más alta la Cordillera, más alto suben las masas de aire amazónico húmedo, más frío es el aire con el cual se encuentran, y más se produce condensación (formación de nubes) y precipitación (cf fig.I.7).

El punto de rocío, y de ahí la condensación, depende también de la humedad relativa del aire con el cual se encuentra el aire amazónico: si se encuentra con aire ya húmedo, como el aire que hay encima del valle en la tarde por la evaporación de la mañana, la condensación es más factible que si se encuentra con el aire seco de la madrugada, eso explicaría porque usualmente llueve por las tardes en la zona.

Se observa que en la parte sur de la Cordillera Blanca, donde la línea de cresta es más baja que en el norte, está lloviendo menos que en el norte a altitudes comparables (línea de cresta más baja implica condensación menor).

También se observa aparentemente un gradiente precipitación / altitud más fuerte en la Cordillera Blanca norte que en la Cordillera Blanca sur; y más débil en la zona de Santa medio (norte) que Santa alto (sur). Eso merecería verificación y una tentativa de explicación.

El gradiente precipitación / altitud es más débil en la Cordillera Negra que en la Cordillera Blanca: eso puede ser porque en la Cordillera Negra parte de la precipitación es de origen oceánica mientras que la influencia oceánica es muy débil en la Cordillera Blanca.

### Estimación de la precipitación por cuenca: metodología

En un primer estudio para estimar la precipitación global en cada subcuenca, solamente se ha tenido en cuenta la zona de la subcuenca, pero no la influencia de la altitud: la precipitación estimada en una subcuenca determinada es un promedio ponderado de las precipitaciones medidas en pluviómetros ubicados en subcuencas vecinas de la misma zona. Por ejemplo, la precipitación estimada en la cuenca de Parón es un promedio entre las precipitaciones medidas en los pluviómetros de Parón, Llanganuco, y Safuna.

En la fig. II.5 se muestran los coeficientes de ponderación atribuidos a cada pluviómetro para la estimación de la precipitación en cada subcuenca.

	Cahuish	Chancos	Collota	Conococha	Hidroeléctrica	Huaraz	Lampas Alto	Llanganuco	Milpo	Mollepata	Pachacoto	Paron	Punta Moron	Querococha	Recreta	Safuna	Shacaypampa	Yanacocha	Precipitación anual estimada	
RECRETA			1	1			1						1		1				1	629
MIRAFLORES	1		1	1		3	1		1		1		1	1	1					696
LA Balsa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	717
QUITARACSA								1				1				1				1023
LOS CEDROS					1							1				1				876
COLCAS					1			1				1				1				815
ARTESONCOCHA												1				1				1218
LLANGANUCO								2				2				1				907
CHANCOS	1	1						1				1		1						798
QUILLCAY	1					2		1				1		1						795
OLLEROS	2													1			1			902
QUEROCOCHA	2													1						987
PACHACOTO									2		1									783
PARON								1				1				1				1023
Promedio medido	989	552	478	566	192	665	730	633	883	574	584	834	658	984	479	1602	645	866		

**Fig. II.5.** Como estimar la precipitación en cada subcuenca: la precipitación estimada en una subcuenca (última columna) es un promedio ponderado de las precipitaciones anuales (año hidrológico) medidas en pluviómetros situados en subcuencas vecinas de la misma zona. El coeficiente de ponderación depende de la confiabilidad de los datos, y de la representatividad de la estación pluviométrica en la cuenca. Así por ejemplo la precipitación estimada en la subcuenca de Querococha es combinación lineal de las precipitaciones medidas en los pluviómetros de Cahuish y Querococha  

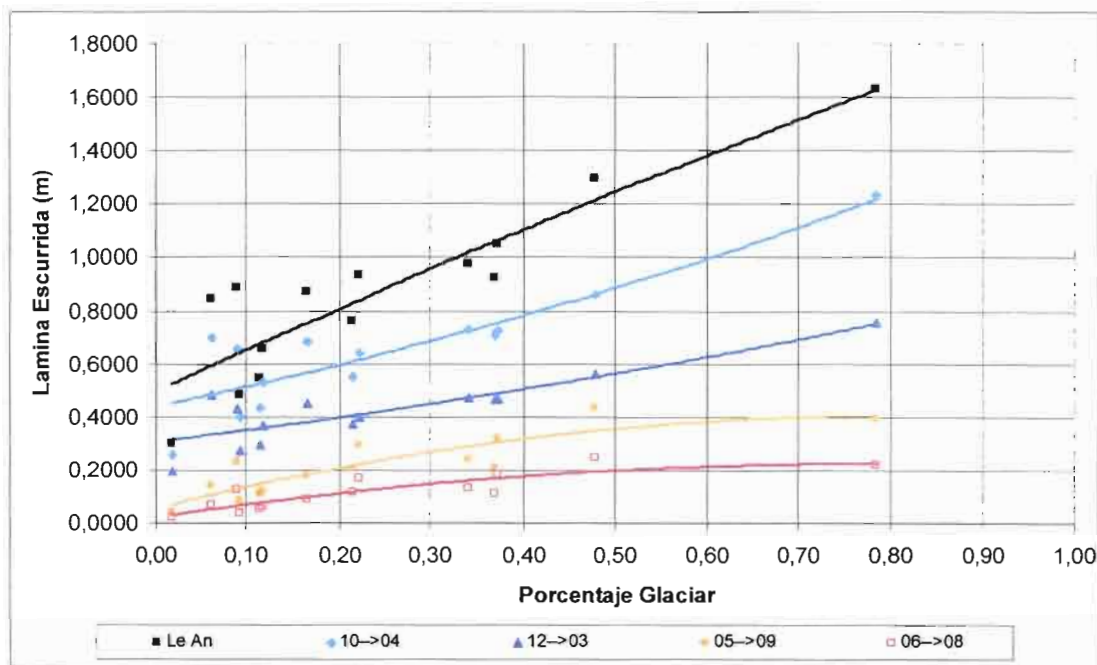
$$(PP(Querococha) = (2 * P(Cahuish) + 1 * P(Querococha)) / 3)$$

Este es un método muy impreciso para estimar la precipitación. Sin embargo, ya tenemos una primera estimación de la lluvia en cada subcuenca, que nos permite exhibir algunos resultados prometedores.

## II.3. Resultados

### II.3.1. Influencia de la cobertura glaciara sobre la lámina escurrida

Se entiende que más importante la cobertura glaciara dentro de una cuenca, más importante el agua de origen glaciara que contribuye al caudal, relativamente al agua de lluvia; especialmente en temporada seca. Esto está ilustrado en la fig.II.6.



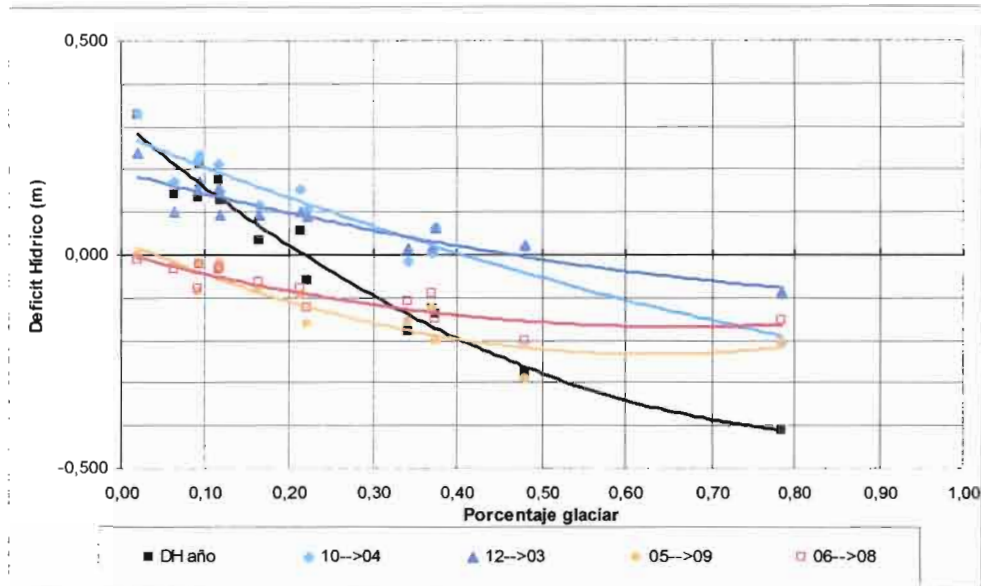
*Fig.II.6. Influencia del porcentaje glaciara sobre la lámina escurrida. Se ha representado la lámina escurrida en todo el año hidrológico (Le An), la de la temporada de lluvias (10-04), la del corazón de la temporada de lluvias (12-03), la de la temporada seca (05-09) y la del corazón de la temporada seca (06-08), en función del porcentaje glaciara.*

Este gráfico es interesante ya que da una primera estimación directa de la dependencia de los recursos hídricos con la cobertura glaciara: directamente en estas curvas se puede leer lo que será la evolución de los recursos hídricos en función de la evolución de la cobertura glaciara. Por ejemplo, si el glaciar Artesonraju pierde la mitad de su superficie, la cobertura glaciara de la cuenca de Arteson pasará de 78 % a 39 % y la lámina escurrida correspondiente de 1700 mm a 1100 mm, o sea una bajada del caudal anual de más o menos 40 %.

Sin embargo estos resultados son incompletos ya que este gráfico no tiene en cuenta la precipitación, que obviamente influye sobre el caudal.

### II.3.2. Influencia de la cobertura glaciaria sobre el déficit hídrico

Si los glaciares están en un proceso de acumulación, se espera que más importante la cobertura glaciaria, más alto quedara el déficit hídrico ( $DH = P - Le$ ), por la retención de precipitación en el glaciar; y que si el glaciar está en un proceso de ablación el déficit hídrico podrá llegar a ser negativo por la liberación de agua glaciaria por deshielo. Esto se verifica en la fig.II.7.



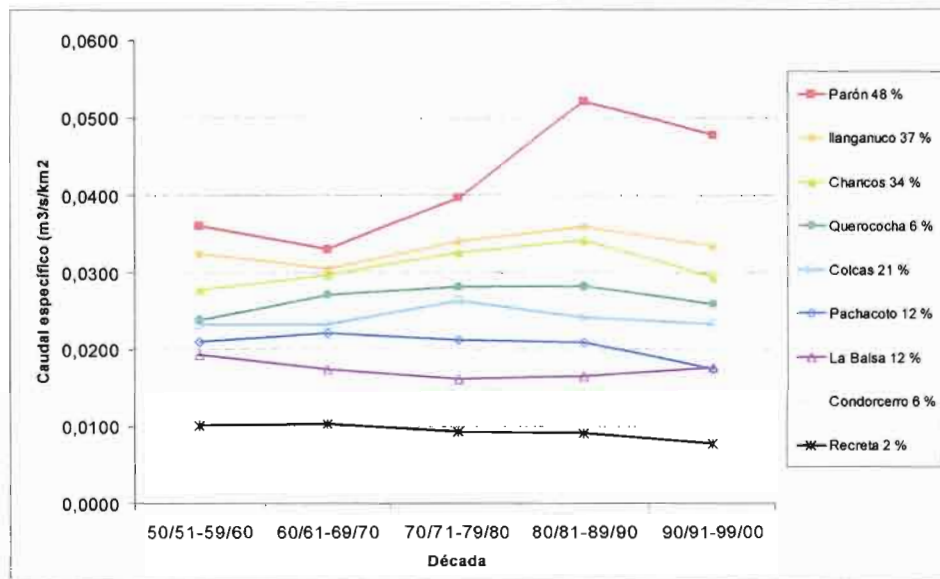
*Fig.II.7. Influencia del porcentaje glaciario sobre el déficit hídrico. Se ha representado el déficit hídrico en todo el año hidrológico (DH año), el de la temporada de lluvias (10-04), el del corazón de la temporada de lluvias (12-03), el de la temporada seca (05-09) y el del corazón de la temporada seca (06-08), en función del porcentaje glaciario.*

Se nota la fuerte dependencia del déficit hídrico a la cobertura glaciaria: el déficit hídrico anual (año hidrológico) llega a ser negativo en las subcuencas con más de 20 % de cobertura glaciaria. Como previsto, en todas las cuencas con glaciares el déficit hídrico es negativo en época seca: el agua que escurre proviene de los deshielos de los glaciares (no hay precipitación en época seca); pero incluso en la temporada húmeda el déficit hídrico llega a ser negativo en la subcuenca con mayor cobertura glaciaria (subcuenca de Artesoncocha), lo que indica que el proceso de ablación sigue fuerte en la época de lluvias.

Este gráfico es interesante, al igual que el de la lámina escurrida en función del porcentaje glaciario, ya que permite predecir la evolución de los recursos hídricos en función de la evolución de la cobertura glaciaria, teniendo en cuenta la precipitación al nivel local.

### II.3.3. Evolución temporal del recurso hídrico

Como se ha visto anteriormente, el recurso hídrico depende estrechamente de la cobertura glaciar en la Cordillera Blanca. Entonces es legítimo pensar observar en la evolución temporal del recurso hídrico la imagen de la evolución temporal de la cobertura glaciar. Así, a igual precipitación, un incremento de los caudales puede interpretarse como la imagen de una aceleración del proceso de deshielo. La evolución del recurso hídrico en el medio siglo pasado en algunas subcuencas del Río Santa está representada en la fig.II.8.



**Fig.II.8.** Evolución de los caudales específicos en algunas subcuencas más o menos glaciadas. Para más claridad se ha representado el promedio por década.

Se verifica que el caudal específico aumenta con el porcentaje glaciar de la cuenca, como se había visto anteriormente. En cuanto a la evolución temporal de los caudales, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Parece que en las cuencas más glaciadas, la tendencia de este medio siglo está a la aumentación de los caudales (caso de Parón, Llanganuco, y Chancos); mientras que en las cuencas menos glaciadas la tendencia está a la estabilidad o la disminución. Esto sería una consecuencia de la aceleración del proceso de deshielo de los glaciares. Pero hay que tomar esta observación con cuidado: en efecto, otras cuencas bien glaciadas como Olleros (16 % glaciar, no representado aquí), o Colcas (21 % glaciar), no muestran este incremento.
- La última década está a la reducción de los caudales. Esto está en contradicción con las mediciones de retroceso de lenguas glaciares, que no muestran ninguna deceleración en el proceso de deshielo (cf fig.I.14).
- La reducción de los caudales en La Balsa que está considerada por algunos como la prueba que el recurso hídrico de origen glaciar se está agotando se tiene que considerar con cuidado: las variaciones del caudal en La Balsa dependen de todo lo que pasa en la cuenca alta, entre otros de la ampliación de las áreas cultivadas y de los sistemas de riego.

En conclusión, no parece que haya nada bien significativo que sobresalga del análisis de la evolución temporal de los caudales. Lo interesante ahora sería tratar de poner en relación estos datos de caudales con datos de balances glaciares.

## **II.4. Conclusiones y perspectivas**

Se ha llegado a cuantificar la influencia de las aguas glaciares sobre los caudales específicos de las subcuencas del río Santa, confirmando la idea cualitativa que teníamos del fenómeno: en las cuencas glaciadas se observa un déficit hídrico más importante a lo largo del año, pero especialmente en la temporada seca (mayo-septiembre) donde hay poca precipitación, esto se debe en parte a las aguas de fusión de los glaciares ubicados en las cabeceras de las cuencas.

Sin embargo, el estudio de las variaciones interanuales de los caudales específicos no parece mostrar resultados bien significativos.

Hay varias pistas para tratar de mejorar este estudio: la primera es de tener en cuenta la variación de la precipitación con la altitud, utilizando los gradientes locales observados Precipitación/Altitud y las curvas hipsométricas de las subcuencas, para mejorar nuestra estimación de la precipitación. Pero el más importante avance que se podría hacer sería el mantenimiento y la ampliación de la red hidro-pluviométrica que a pesar de su necesidad para hacer buenos estudios hidrológicos está siendo abandonada poco a poco.

Un aspecto interesante que no se ha desarrollado en este capítulo es el origen de la precipitación y su dependencia con la altitud. Actualmente se están haciendo estudios isotópicos de la precipitación para determinar su origen (más oceánica o más amazónica). Sería interesante tratar de relacionar la precipitación con la altitud de la línea de cresta a la altura de cada pluviómetro de la Cordillera Blanca.

También sería de gran ayuda entrar los datos hidro-pluviométricos en un Sistema de Información Geográfica, para organizar la cantidad enorme de información disponible, y tener una visión espacial rápida de los fenómenos, en particular de la variabilidad espacial de la precipitación.

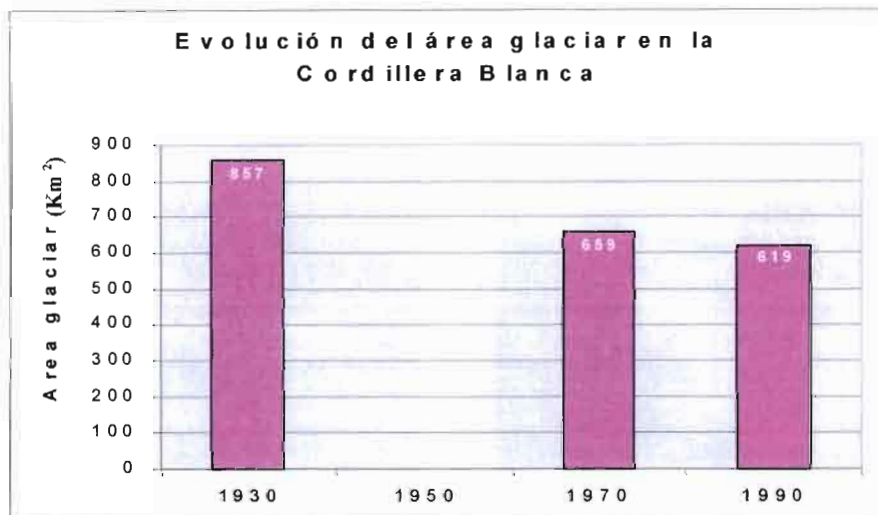




## CAPITULO III

### RETROCESO DE LOS GLACIARES

Los glaciares de la Cordillera Blanca están retrocediendo desde el fin de la pequeña edad de hielo, lo que corresponde, en la Cordillera Blanca, a mediados del siglo XIX. Pero parece que este retroceso se ha acentuado este siglo, y particularmente estos 20 últimos años, debido al calentamiento global que afecta el planeta (fig.III.1 y I.14.)



*Fig III.1. Estimaciones del área glaciar en la Cordillera Blanca en los años 1930 (857 km<sup>2</sup> (Kinzl, en base a estudios de terreno)), 1970 (659 km (Ames, en base a estudios de terreno y fotos aéreas)), y 1990 (619 km<sup>2</sup> (Georges, en base a imágenes satelitales)).*

Tener una idea de la evolución de la superficie de hielo en la cuenca del río Santa nos permitirá hacer previsiones en cuanto a la evolución del recurso hídrico, y tomar las decisiones adecuadas (construcción de represas) para que no disminuya la disponibilidad de agua en el valle.

El retroceso de los glaciares ha sido ya bastante estudiado, originalmente porque los glaciares, en su retroceso, dejan lagunas formadas por sus aguas de fusión (fig.I.10), cuyo dique esta formado por las morrenas frontales de la pequeña edad de hielo, material frágil que en caso de ruptura libera grandes cantidades de agua, causando aluviones devastadores [Ames1998][Ames1995][Portocarrero1995][Lliboutry1977].

Sin embargo los estudios de retroceso de los glaciares en relación con la evolución del recurso hídrico son escasos en la zona, a pesar de la importancia tremenda de las aguas de deshielo en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Aquí presentamos diferentes métodos para estimar el retroceso glaciar en el pasado en la zona, en la ausencia de datos de balances de masa: estudios fotográficos o topográficos para observar la evolución del frente del glaciar; y dos proposiciones de nuevos métodos, uno hidrológico para estimar el balance de un glaciar (Artesonraju) desde 1952, y uno utilizando la percepción remota para ver las pérdidas volúmicas de los glaciares de la zona Cordillera Blanca Sur entre 1962 y 2001.

### III.1. Estudios fotográficos

A partir de archivos fotográficos disponibles en la UGRH<sup>1</sup> se han podido visualizar los retrocesos de algunos frentes glaciares desde más de medio siglo.

#### III.1.1. Glaciar Arteson

En este glaciar (fig. III.2) se tienen fotografías del glaciar desde 1932 gracias a las expediciones del Alpenverein (Kinzl) en la zona. Hoy en día está monitoreado mensualmente.



*1947 : El glaciar cubre gran parte del acantilado hoy en día desnudo, y cae hasta tocar la laguna subglaciar Artesoncocha en formación*



*1967 : De la parte en el acantilado solamente quedan dos neves alimentados por las caídas de hielo del frente colgante. Todavía hay contacto con la laguna.*



*1984 : Se notan pocos cambios desde el 1967, solo una ligera disminución de la superficie de los neves. Parece que el glaciar está en un estado de equilibrio*



*1999 : Los neves han desaparecido, no hay más contacto con la laguna, que se ha desarrollado bastante, y el espesor del frente colgante ha disminuido.*

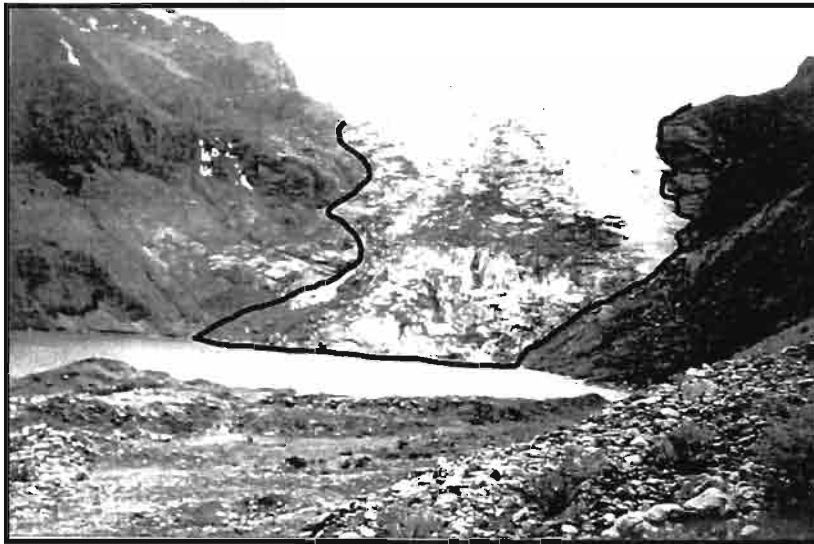
**Fig.III.2.** La evolución del frente del glaciar Arteson, vista con una serie temporal de fotos.

<sup>1</sup> UGRH: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos: unidad del INRENA (Instituto Nacional de Recursos NATurales situada en Huaraz y encargada del monitoreo de glaciares y lagunas.

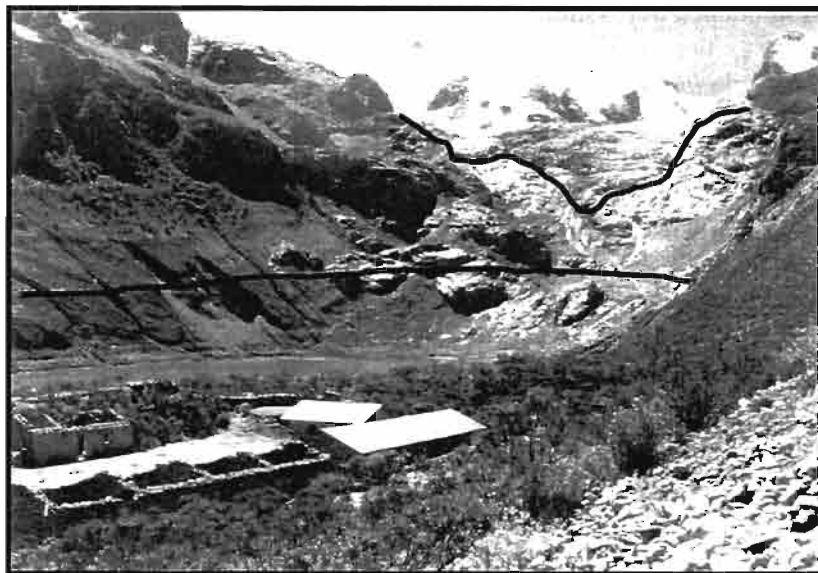
Estas fotos presentan la ventaja de estar tomadas con puntos de vista no muy alejados y con ángulos de vista similares, y pueden ser comparadas fácilmente. Los cambios en el frente no son espectaculares ya que el frente es colgante, y no puede avanzar por causa del acantilado que le limita, tampoco retrocede mucho porque parece que su posición de equilibrio estaría más baja que el borde del acantilado. Lo que sí se puede observar hoy día son variaciones en el espesor del frente.

### III.1.2. Glaciar Shallap

Este glaciar ha sido fotografiado por Kinzl en el 1932 y su toma ha sido reproducida por Byers en el 1998 [Byers1998]. Así, a pesar de que recién en marzo del 2002 se inició el monitoreo de este glaciar, ya se tiene una idea de la evolución de su frente desde el 1932 (fig.III.3).



1932 (Kinzl) : El glaciar Shallap y su lengua muy agrietada en contacto con la laguna.



1998 (Byers) : El Glaciar Shallap.

Fig.III.3. El glaciar Shallap en 1932 y 1998.

No se nota un retroceso impresionante desde 1932, esto se debe a que, como en Artesonraju, la lengua está muy empujada. Lo que sí se nota es la bajada de nivel de la laguna, cuyo nivel ha estado bajado artificialmente por seguridad (se ha dibujado en la segunda foto el nivel natural de la laguna).

### **III.1.3. Que más se podría ver con fotografías ?**

#### *Otros glaciares*

No se han presentado fotos de los otros glaciares monitoreados por la UGRH, a pesar de la disponibilidad de fotos desde los años 1980 para los glaciares de Uruash, Yanamarey, Pastoruri, Broggi. En efecto, las tomas no han sido sacadas de manera reproducible (posición y ángulo de vista diferentes) y no se pueden comparar bien.

#### *Observaciones a escala diaria*

Se tienen que mencionar intentos hechos por Kaser en dos glaciares de la Cordillera Blanca: Rurichinchey (cuenca del Marañon), y Mullaca (cuenca del Santa) donde se han instalado cámaras digitales programadas para sacar una foto del glaciar cada día a la misma hora. Esta escala de tiempo permite ver claramente el flujo hacia abajo de la masa de hielo.

#### *Observaciones a escala mensual*

Sacar fotos de la lengua del glaciar, a intervalos regulares de tiempo (típicamente cada mes, en las visitas de rutina), permite tener rápidamente una idea cualitativa de como evoluciona el glaciar (posición del frente, de la línea de nieve, formación de grietas....) lo que mejora nuestro entendimiento de su comportamiento estacional (útil para los estudios de balance energético). Esto ya se hace por el IRD en Ecuador. Desafortunadamente, este estudio simple todavía no se hace en los glaciares monitoreados en la cuenca del Santa.

#### *Observaciones a escala anual*

Sacar una foto del frente del glaciar, cada año en la misma época (por ejemplo en septiembre, al terminar la temporada seca), nos daría rápidamente una idea cualitativa del retroceso del glaciar a escala anual.

## **III.2. Estudios topográficos**

Idealmente una vez al año (al comenzar la temporada seca, eg. en abril-mayo), se hacen levantamientos topográficos de los frentes de los glaciares estudiados, midiendo así con precisión la ganancia o pérdida de superficie del glaciar en su lengua terminal de un año al otro.

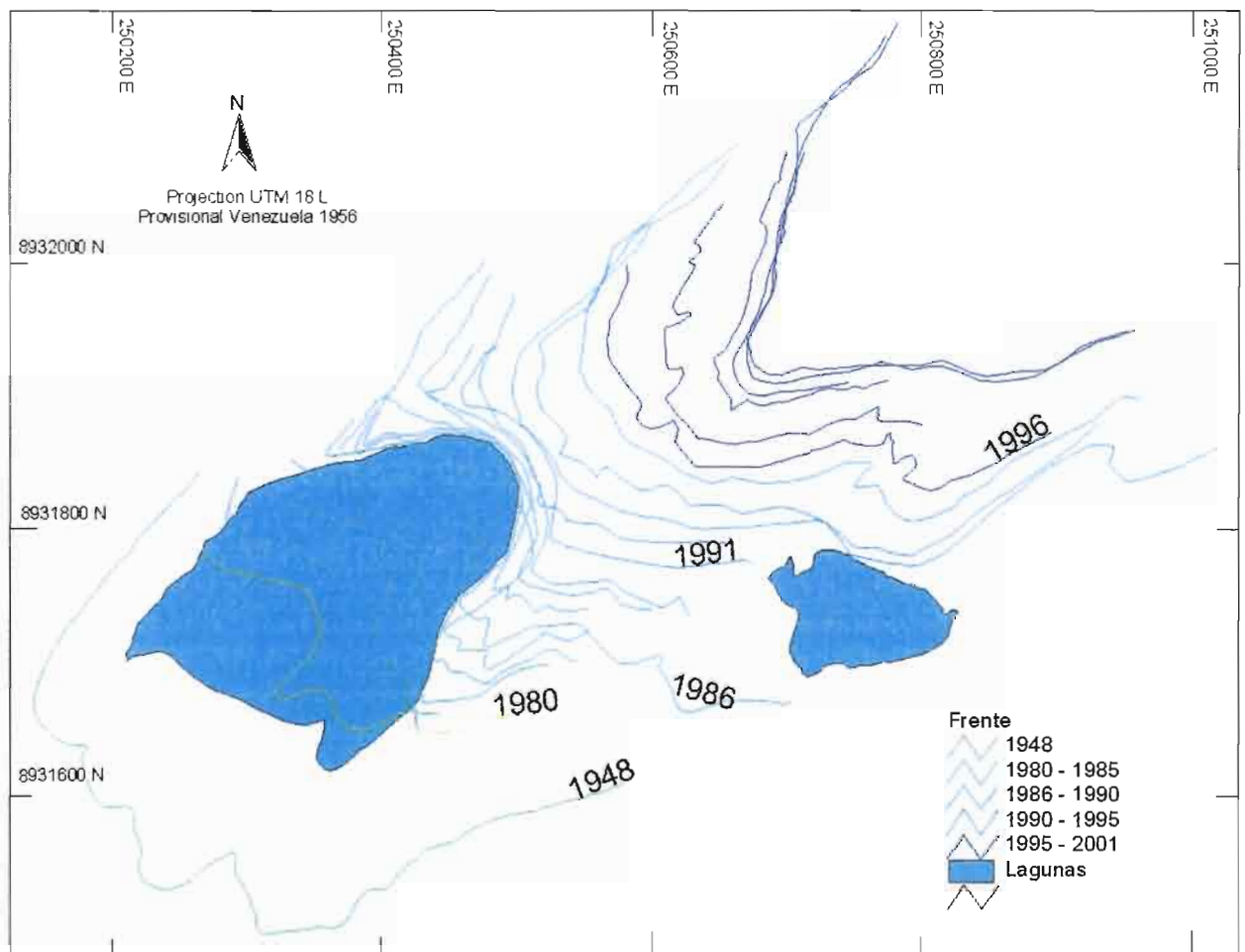
A pesar de que esta información es valiosa para tener una idea cualitativa del comportamiento del glaciar, no sirve para hacer un balance del glaciar ya que no se pueden estimar los volúmenes ganados o perdidos.

### III.2.1 Artesonraju

La lengua glaciaria de Artesonraju es una lengua colgante (cf fig.III.2). No puede avanzar sin caerse en Artesoncocha, tampoco retrocede detrás de su posición actual porque parece que su posición de equilibrio, en la ausencia del acantilado que la separa de su laguna subglaciar, estaría más abajo. En consecuencia no se mueve, manteniéndose al borde del acantilado y no se hacen estudios topográficos. Lo que sí se puede observar son cambios en el espesor de la lengua.

### III.2.2. Glaciar Yanamarey

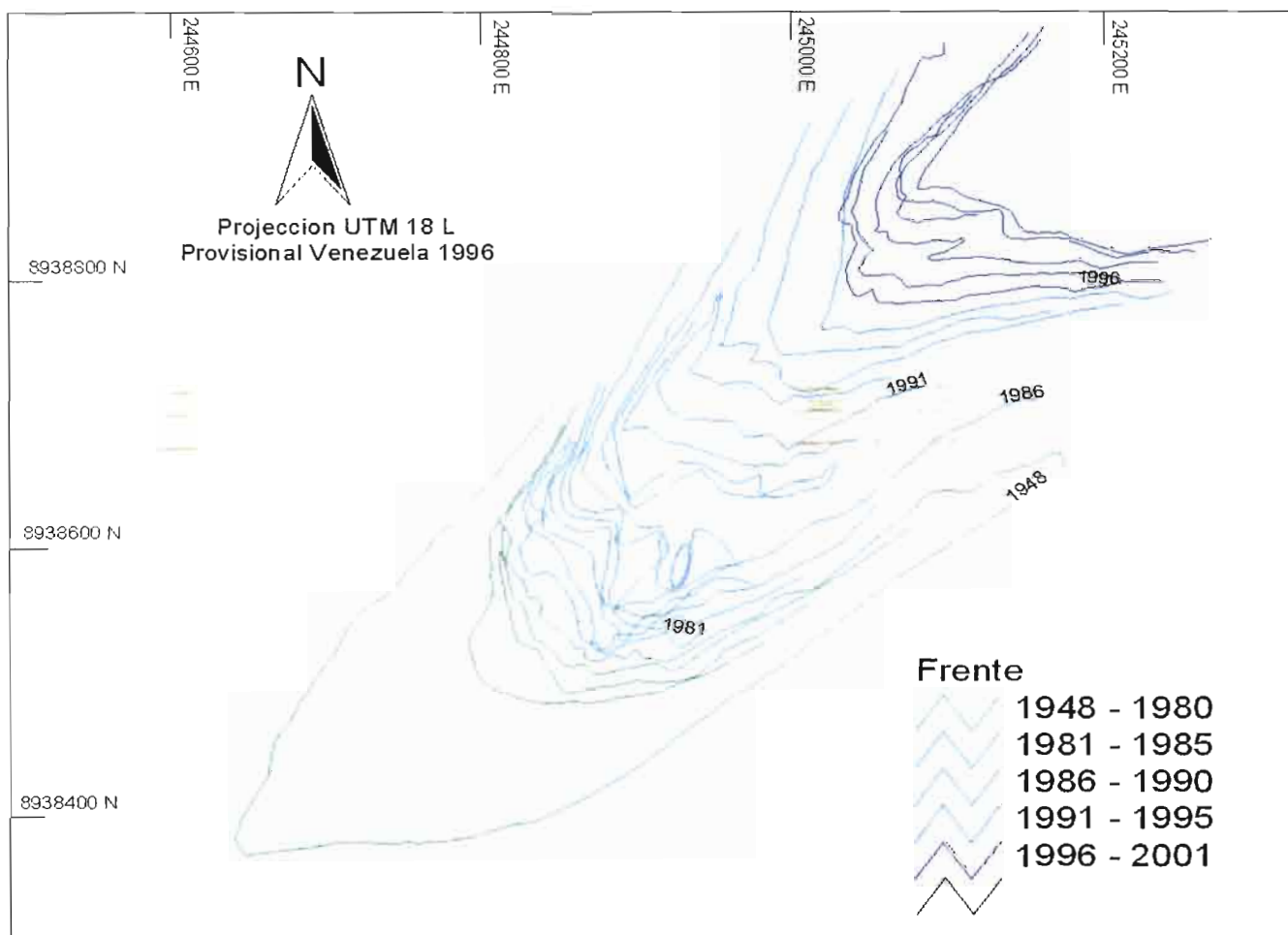
Este pequeño glaciar ha sido por su facilidad de acceso uno de los primeros estudiados por la UGRH. Los levantamientos topográficos de su frente desde 1948 están representados en la fig.III.4.



**Fig III.4.** Evolución del frente del glaciar Yanamarey ( $09^{\circ}36'26''S$ ,  $77^{\circ}16'20''$ ) desde 1948. Se nota un retroceso de más de 500 metros en estos 50 últimos años, con la formación progresiva de tres lagunas subglaciares (la más pequeña no está representada aquí, ver también la fig.III.12)

### III.2.3. Glaciar Uruash

Este glaciar muy similar al de Yanamarey tiene también facilidad de acceso y una buena serie de estudios topográficos de su frente es disponible. Los levantamientos topográficos de su frente desde 1948 están representados en la fig.III.5.



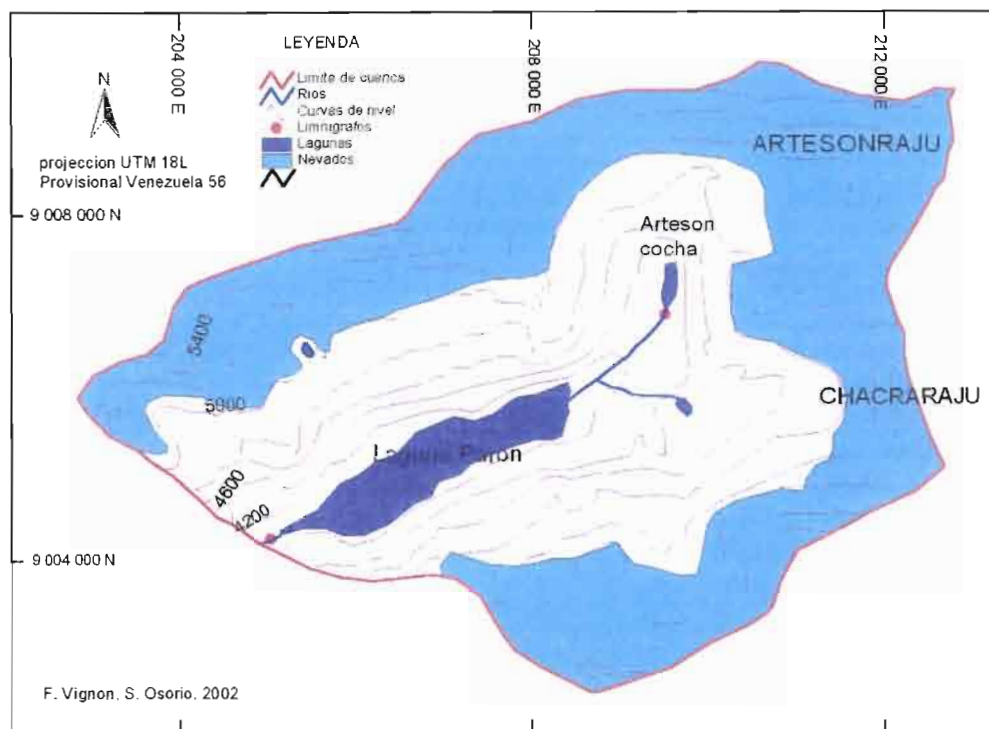
*Fig III.5. Evolución del frente de Uruashraju ( $09^{\circ}35'20''S$ ,  $77^{\circ}18'91''O$ ) desde 1948. Se nota un retroceso del orden de 500 metros en estos 50 últimos años, con la formación progresiva de dos lagunas subglaciares (no representadas aquí).*

### III.2.4 Glaciar Shallap

No se dispone a la hora de estudios topográficos del frente de Shallap, ya que el monitoreo del glaciar se ha comenzado recién en marzo del 2002 y que el único estudio topográfico que ha sido hecho no esta procesado todavía.

### III.3. Un balance hidrológico particular: el caso de la cuenca de Parón y el glaciar Arteson

La subcuenca de Parón está presentada en la fig.III.6. Con una superficie de 44.3 km<sup>2</sup>, de los cuales 21.6 km<sup>2</sup> o sea el 49% están cubiertos por glaciares<sup>1</sup>, su régimen hidrológico está fuertemente influenciado por los glaciares Arteson y Chacra.



**Fig III.6.** Mapa de la cuenca de Parón. El glaciar Arteson (6.2 Km<sup>2</sup>) se deshiela en Artesoncocha, y el glaciar Chacra (4.2 Km<sup>2</sup>) en Chacracocha, ambas lagunas vierten sus aguas en la laguna Parón. En 1952 se ha instalado un limnógrafo en la salida de Parón y en 1996 uno en la salida de Artesoncocha.

En esta sección se presentan los primeros pasos para tratar de reconstituir el balance del glaciar Arteson a partir de los caudales de salida de la laguna Parón desde 1953.

Se va a seguir un procesamiento en tres pasos:

- 1) Estimación de los caudales entrantes en la laguna Parón a partir de los caudales medidos de salida (desde 1953, fecha de instalación de un limnógrafo en la salida de Parón),
- 2) Correlación de los caudales entrantes en la laguna Parón con los caudales de salida de Artesoncocha (desde 1996, fecha de instalación de un limnógrafo en la salida de Artesoncocha),
- 3) Reconstitución del balance hidrológico del glaciar Arteson desde 1953 deduciendo los caudales de salida de Artesoncocha desde 1953 de los de Parón, utilizando la curva de correlación obtenida en 2).

<sup>1</sup> Cierre de la cuenca a la salida del túnel de desagüe de la laguna. Superficie y cobertura glaciar estimadas en base a las clasificaciones de campo del IGN en el 1968.



### III.3.1. Disponibilidad de datos

Es necesario hacer una pequeña historia de los estudios hechos en la laguna Parón para ver cual es la disponibilidad de datos:

**1953:** Se empieza a estudiar la laguna Parón, primero por el riesgo de desagüe por ruptura de su dique natural formado por el glaciar rocoso de Jatunraju que representa, segundo como posible zona de embalse para regular las aguas que llegan a la bocatoma de la central hidroeléctrica del Cañon del Pato. Desde esta fecha se tienen datos de caudales de salida de la laguna.

**1982:** Se comienzan los trabajos de desagüe (por seguridad) de la laguna a través de un túnel que pasa por las paredes rocosas de la laguna. Se baja el nivel de aproximadamente 15 metros.

**1988:** Terminados los trabajos de desagüe, se instala el sistema de regulación de las salidas del agua con compuerta, descargándose agua en la época seca para sostener el caudal de 50 m<sup>3</sup> / s necesario en la Balsa, bocatoma de la central hidroeléctrica del Cañon del Pato; la compuerta sigue cerrada en los meses de suficiente lluvia.





**1996:** Se instala un limnógrafo a la salida de la laguna Artesoncocha, que mide los caudales instantáneos de salida de esta laguna.

Se entiende que solamente se podrá tratar de correlacionar caudales de salida “artificiales” de la laguna Parón (salidas limitadas para el almacenamiento de agua en época de lluvias, descargas irregulares en época seca) con los caudales de salida naturales de Artesoncocha.

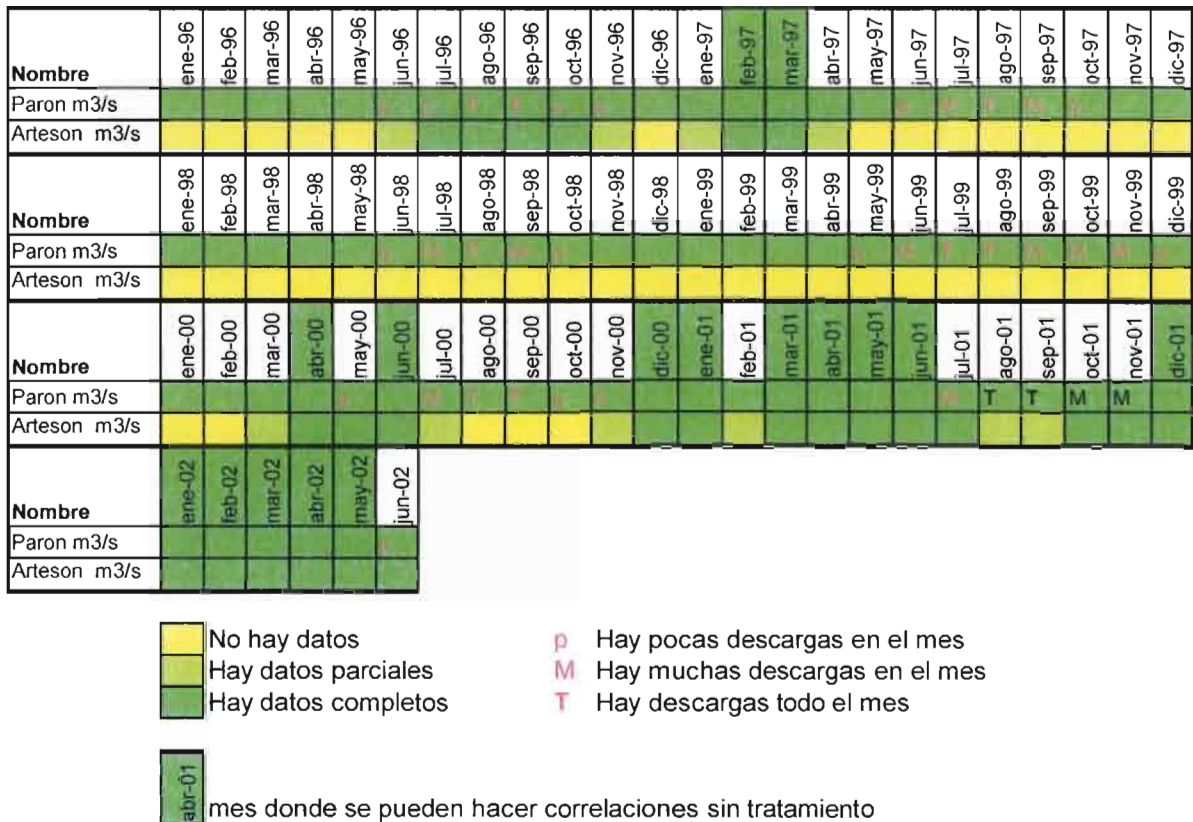
La disponibilidad de datos de caudales, anuales y mensuales desde el 1996, está resumida en las siguientes tablas (fig.III.7 y III.68).

NOMBRE	1952-53	1953-54	1954-55	1955-56	1956-57	1957-58	1958-59	1959-60	1960-61	1961-62	1962-63	1963-64	1964-65	1965-66	1966-67	1967-68	1968-69	1969-70	1970-71	1971-72	1972-73	1973-74	1974-75	1975-76	1976-77
Parón																									
Artesoncocha																									
NOMBRE	1977-78	1978-79	1979-80	1980-81	1981-82	1982-83	1983-84	1984-85	1985-86	1986-87	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91	1991-92	1992-93	1993-94	1994-95	1995-96	1996-97	1997-98	1998-99	1999-00	2000-01	2001-02
Parón																									
Artesoncocha																									

	No hay datos		Caudales de salida "artificiales"
	Hay datos parciales		
	Hay datos completos		

**Fig III.7.** Disponibilidad de datos anuales de caudales de salida de las lagunas Parón y Arteson, en años hidrológicos (setiembre-agosto) . Solamente hay recubrimiento (parcial) desde el 1996, cuando los caudales de salida de Parón son artificiales.



**Fig III.8.** Disponibilidad de datos mensuales de caudales de salida de las lagunas Parón y Arteson desde la instalación del limnógrafo en Artesoncocha en el 1996. Solamente en algunos meses de época de lluvias, cuando no hay descargas de la laguna Parón y que el limnógrafo de Artesoncocha funciona, se pueden hacer correlaciones entre los caudales de salida de las dos lagunas.

### III.3.2. Tratamiento hidrológico

*Caudales de entrada en Parón a partir de los caudales de salida. Correlación con los caudales de salida de Artesoncocha*

En un primer paso se trata, a partir de los datos de volúmenes mensuales de salida de la laguna Parón, y de estimaciones de precipitación y evaporación mensual en el espejo de la laguna, de estimar los volúmenes mensuales de entrada :

$$V_e = V_s - (P-E)$$

Donde:

- $V_e$  es el volumen mensual de entrada en la laguna Parón;
- $V_s$  es el volumen promedio mensual de salida de la laguna Parón, estimado a partir de variaciones de volúmenes útiles:

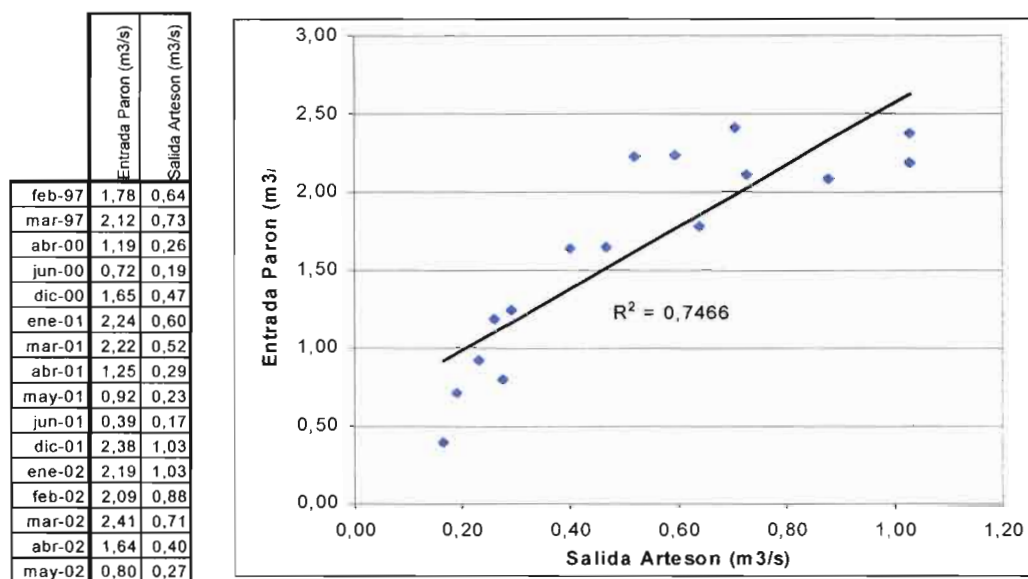
$$V_{Sparón}(m) = V_u(m+1) - V_u(m)$$

Donde  $V_u(m)$  es el volumen útil de la laguna el primer día del mes,  $V_u(m)$  es el volumen útil de la laguna el primer día del mes siguiente.

- $P$  es la precipitación mensual medida en el pluviómetro de Parón, multiplicada por el área promedio del espejo de la laguna en el mes (aporte directo al espejo de la laguna);

-  $E$  es la evaporación mensual medida en la estación de Querococha (no se hacen mediciones de evaporación en Parón), multiplicada por el área promedio del espejo de la laguna en el mes (evaporación directa del espejo de la laguna).

De variaciones de volúmenes mensuales, pasamos a caudales promedios mensuales. Los caudales promedios mensuales entrantes en Parón obtenidos se pueden “brutalmente” comparar con los caudales promedios mensuales de salida de Artesoncocha, en los meses donde no hay descargas de Parón y hay datos completos en Artesoncocha (cf fig.III.9).



**Fig III.9.** Correlaciones entre los caudales estimados de entrada de Parón, y de salida de Artesoncocha (promedios mensuales en los meses donde no hay descargas en Parón y hay datos completos en Artesoncocha). Se ve que si no se tiene en cuenta el aporte a la laguna por el escurrimiento del agua en toda la cuenca, la correlación no es muy buena ( $R^2=0.75$ ).

*Caudales de origen glaciar de entrada en Parón a partir de los caudales de salida. Correlación con los caudales de origen glaciar de salida de Artesoncocha*

En un segundo paso, para afinar las correlaciones, vamos a tener en cuenta el escurrimiento de la precipitación en toda la cuenca, para discriminar los aportes de origen glaciar de los que tienen su origen en las precipitaciones.

Ponemos:

$$V_e = V_e(g) + V_e(p)$$

Donde

- $V_e$  es el volumen mensual de entrada en Parón,
- $V_e(g)$  es el volumen mensual de origen glaciar de entrada en Parón
- $V_e(p)$  es el volumen mensual de entrada en Parón que tiene su origen en las precipitaciones:

$$V_e(p) = P \times A_{ng} \times K$$

Donde  $P$  es la precipitación mensual medida en la estación de Parón,  $A_{ng}$  es el área no glaciada de la cuenca de Parón (23.5 km<sup>2</sup>),  $K$  es el coeficiente de escurrimiento de la cuenca.

Con un formalismo equivalente pondremos para los volúmenes mensuales de salida de Artesoncocha:

$$V'_s = V'_s(g) + V'_s(p)$$

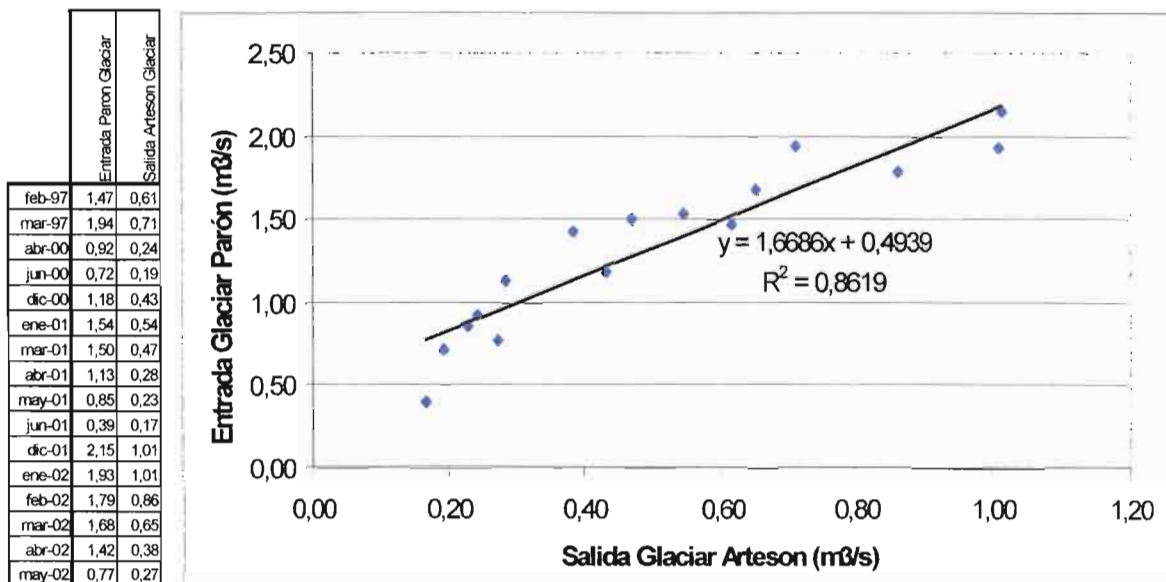
Donde

- $V'_s$  es el volumen mensual de salida de Artesoncocha,
- $V'_s(g)$  es el volumen mensual de origen glaciar de salida de Artesoncocha
- $V'_s(p)$  es el volumen mensual de salida de Artesoncocha que tiene su origen en las precipitaciones:

$$V'_s(p) = P \times A'_{ng} \times K$$

Donde  $P$  es la precipitación mensual medida en la estación de Parón,  $A'_{ng}$  es el área no glaciada de la cuenca de Artesoncocha (1.7 km<sup>2</sup>),  $K$  es el coeficiente de escurrimiento de la cuenca. El coeficiente de escurrimiento está elegido empíricamente como el con el cual los volúmenes glaciares estimados de entrada en Parón y de salida de Artesoncocha tienen la mejor correlación. Su valor final (0,35) es aceptable.

Así se pueden evaluar los volúmenes mensuales, y de ahí los caudales medios mensuales, *directamente de origen glaciar*, que respectivamente salen de Artesoncocha y entran a la laguna Parón (fig.III.10). Es importante notar que la laguna Parón recibe aportes glaciares del glaciar Artesonraju (6.9 Km<sup>2</sup>) que se deshela en la laguna Artesoncocha, pero también del glaciar Chacaraju (4.2 Km<sup>2</sup>) y otros glaciares más pequeños, que no necesariamente funcionan como Artesonraju, lo que afecta las correlaciones.



**Fig III.10.** Correlaciones entre los caudales de origen glaciar de entrada en Parón, y de salida de Artesoncocha (promedios mensuales en los meses donde no hay descargas en Parón y hay datos completos en Artesoncocha). A pesar de variaciones inducidas por los aportes glaciares de los otros glaciares de la subcuenca que aportan a la laguna Parón y que no funcionan necesariamente como el Artesonraju, la correlación es bastante buena ( $R^2=0.86$ ).

### Reconstitución del balance de Artesonraju desde el 1953

Ya tenemos la relación que nos permite estimar los caudales de salida de Artesoncocha desde el 1953. Falta todavía relacionar este caudal de salida con los balances del glaciar Arteson (no se disponen de balances de Arteson en un año hidrológico completo hasta ahora).

### III.3.3. Discusiones y perspectivas

El método y los cálculos llevados a cabo hasta ahora, aunque llegan a demostrar una correlación evidente entre la salida de Artesoncocha y la entrada de Parón, pueden sufrir muchas críticas:

- La estimación de la precipitación en *toda la cuenca* se hace confiando en un sólo pluviómetro, el que se encuentra al borde de la laguna Parón. Sin embargo se sabe que la precipitación depende de la altitud y de otros factores como factores topográficos (cf fig.II.4). Se está ahora trabajando en mejorar la estimación de la precipitación utilizando también los datos de los pluviómetros instalados al borde del glaciar Arteson, y la curva hipsométrica de la cuenca de Parón, para tener en cuenta la variación de la precipitación con la altitud.
- Dado que solamente se puede trabajar en meses donde no hay descargas de la laguna Parón, i.e. en los meses de época de lluvias, en la curva de correlaciones solamente tenemos pocos datos relativos a meses secos (cf tabla de las fig.III.9. y III.10). Se ha intentado trabajar los caudales de salida “artificiales” para transformarlos en caudales “naturales”, pero sin resultados.
- Los caudales de salida de la laguna Artesoncocha hasta ahora están calculados gracias a una relación teórica que relaciona la altura del espejo de agua de la

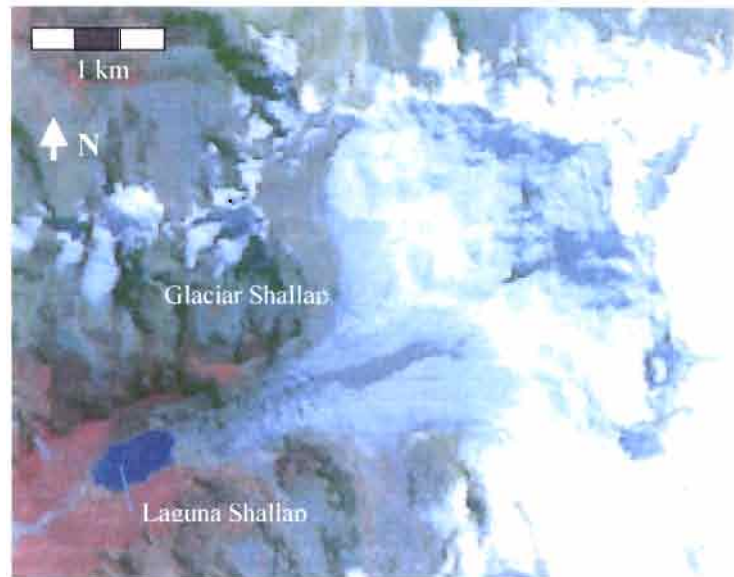
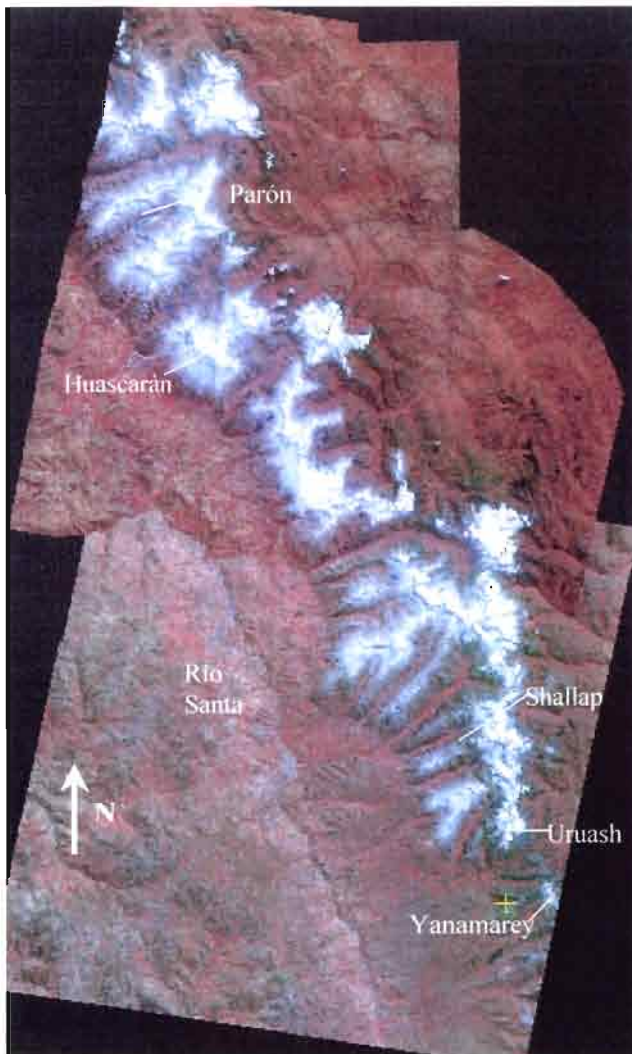
laguna Artesoncocha con el caudal que pasa por el vertedero instalado; recién se está terminando la calibración del vertedero para verificar esta relación teórica.

A pesar de todo, los resultados son prometedores y se espera obtener una buena estimación del balance del glaciar Artesoncocha desde el 1953, que se va a poder comparar con las fotos históricas de retroceso (cf fig.III.2), para verificar el orden de magnitud del retroceso calculado.

En la Cordillera Blanca, la zona de Querococha con el glaciar de Yanamarey también se presta a este tipo de estudio: hay datos de salida de Querococha desde el 1953 hasta el 1998, y recién en el 2001 se ha instalado un limnígrafo en la salida de la laguna subglaciar de Yanamarey. La desventaja es que el porcentaje glaciar es más pequeño, así que las correlaciones entre los caudales de salida de las lagunas serán menos evidentes; la ventaja es que los caudales de salida de Querococha son naturales.

### III.4. Uso de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son una herramienta prometedora para el estudio de los glaciares a larga escala. Con dos imágenes SPOT ya tenemos una cobertura de toda la Cordillera Blanca (una imagen SPOT cubre 60\*60 km, cf fig.III.11), y permite ubicar todos los glaciares de la zona y su extensión espacial en un momento dado.



**Fig.III.11.** Izquierda: Mosaico SPOT de la cordillera Blanca, julio 2000. Composición RGB bandas 3,2,1. Se han ubicado los principales sitios de estudio: quebrada Parón, quebrada Shallap, Glaciares Urushraju y Yanamarey, y el nevado Huascarán. Derecha: zoom en la zona del glaciar Shallap. Se aprecia muy bien la morfología macroscópica del glaciar (distintas lenguas, glaciar cubierto en el medio, grietas transversales en la parte baja muy empinada...)

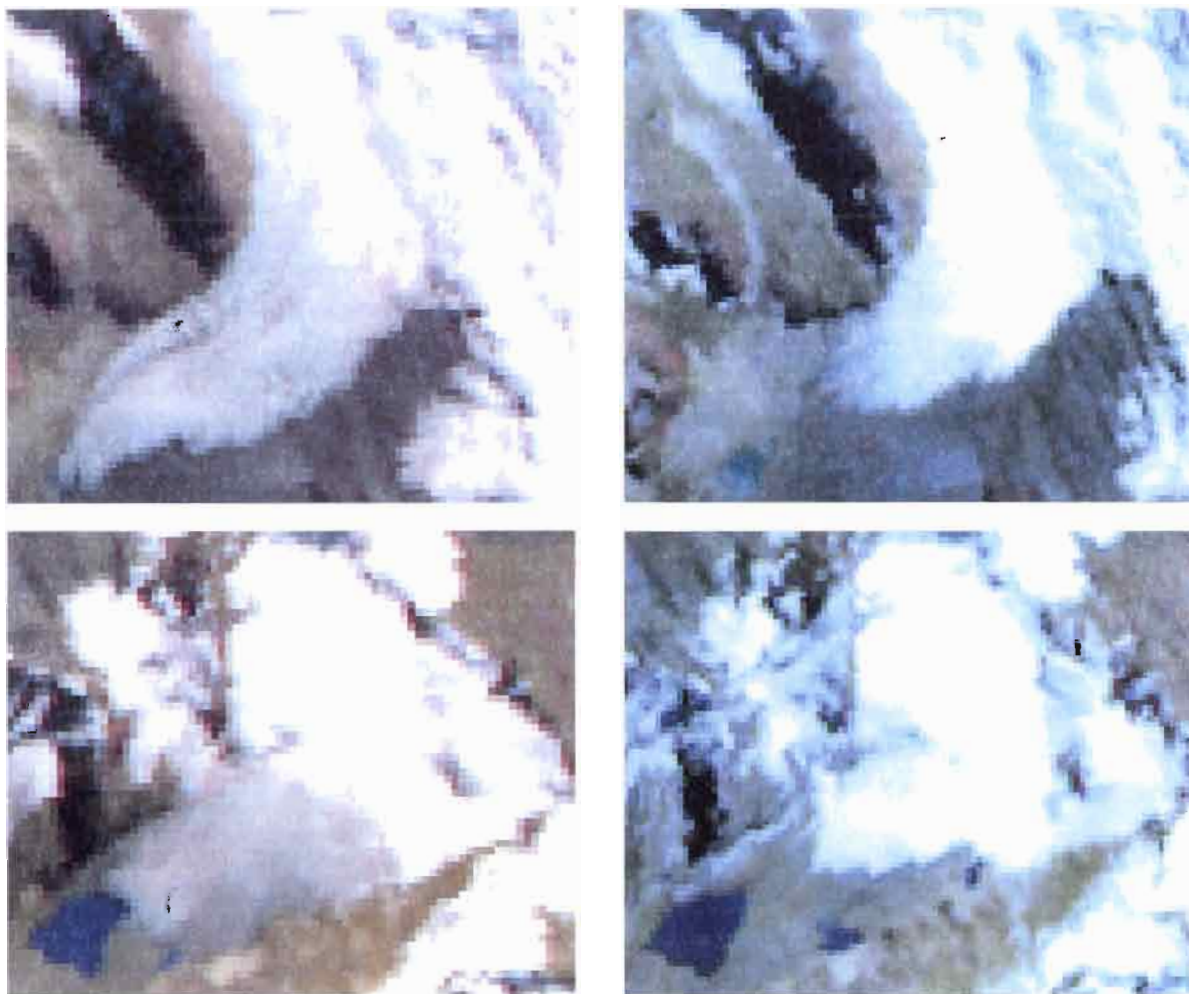
Pero hasta el día hay limitaciones en las aplicaciones de imágenes satelitales:

- La resolución de las imágenes disponibles (20\*20 m para SPOT, 30\*30 m para LANDSAT TM, 15\*15 m para ASTER) es todavía insuficiente para medir variaciones de frentes glaciares del orden de los 10 metros por año.
- Un glaciar rocoso o cubierto aparece en una imagen como zona rocosa, y no como hielo, lo que conduce a errores en sus delimitaciones precisas si no se tiene un conocimiento de campo.
- Es difícil discriminar, en una imagen, un glaciar permanente de una cobertura de nieve estacional. También se necesita un conocimiento de campo para no equivocarse en los límites de los glaciares.

### III.4.1. Medición de variaciones de frente y de superficie

La resolución de los sensores ASTER y SPOT (respectivamente 15 y 20 metros en las bandas VNIR (visible y infrarrojo cercano)) no nos permite ver el retroceso de los frentes de pequeños glaciares como los de la cordillera Blanca año por año, pero sí con intervalos de tiempo más grandes (eg. 5 años), cuando ocurren retrocesos de una escala espacial superior al tamaño del pixel.

Por ejemplo, en la fig.III.10 se muestran imágenes SPOT y Aster de los frentes glaciares de Uruash y Yanamarey, tomadas con 11 años de intervalo (julio de 1990 para la imagen SPOT, julio de 2001 para la imagen ASTER).



*Fig.III.12. El retroceso de dos glaciares (arriba: Uruash; abajo: Yanamarey), entre 1990 (izquierda, composición coloreada SPOT (3R2G1B), pixel de 20\*20 m) y 2001 (composición coloreada ASTER (3R2G1B), pixel 15\*15 m). El tamaño del pixel da la escala. Se nota en yanamarey la formación de dos lagunas subglaciares (la más pequeña está todavía en contacto con el glaciar).*

A partir de estas imágenes se puede estimar entre 1990 y 2001 un retroceso del orden de 220 m para el frente de Yanamarey (las mediciones topográficas de terreno dan más o menos 200 m de retroceso), correspondiendo a una pérdida de  $0.14 \text{ km}^2$  ( $\pm 20\%$ ) en la superficie de su lengua; y un retroceso del orden de 360 m para el frente de Uruashraju (la mediciones topográficas dan 300 m), correspondiendo a una pérdida de  $0.16 \text{ km}^2$  ( $\pm 30 \%$ ) en la superficie de su lengua principal.



El error en la estimación del retroceso longitudinal del frente viene de que no se sabe bien que punto de la lengua se tiene que considerar como punto de referencia, es un error dependiente del observador que es proporcional al ancho de la lengua.

El error en la estimación de la superficie glaciar depende más de la apreciación del observador que de la discretización de la imagen, y es proporcional al perímetro del área considerada (los errores ocurren en la delimitación precisa del perímetro). El error relativo entonces es del orden del ratio perímetro/área que multiplica el error longitudinal que se hace en el trazado del perímetro ( $\approx 1$  pixel, o sea 20 metros). Es proporcional a  $1/\sqrt{A}$ , donde A es el área estimada: más grande el glaciar, menor el error relativo. En pequeños glaciares como Uruash y Yanamarey, el error sigue grande. Lo que explica el error más grande en Uruash es la dificultad de estimar el hielo perdido en los costados de la lengua.

### *Conclusiones y perspectivas*

A partir de imágenes satelitales de SPOT (1990) y ASTER (2001) disponibles en el internet, se pueden fácil y rápidamente cuantificar las pérdidas en superficie de glaciares de la Cordillera Blanca del orden de  $0.1 \text{ km}^2$ . Los errores son del orden de 20% en los pequeños glaciares de Uruashraju y Yanamarey. Se espera que el error baje cuando aumente la superficie glaciar. Los resultados cuadran con los de levantamientos topográficos de terreno (cf figs.III.3, III.4 y I.14).

La ventaja de las imágenes satelitales es que proporcionan una visión a gran escala: con una imagen y una computadora uno puede evaluar la evolución de todos los glaciares de la Cordillera Blanca, ahorrándose un trabajo de terreno tremendo. El material disponible bajado de internet (incluyendo imágenes Landsat de 1990, 1996, 2000; imágenes Aster de 2000 y 2001), permitiría:

- seguir la evolución de la cobertura glaciar en la Cordillera Blanca con tres puntos en los diez últimos años y relacionarla con la evolución del recurso hídrico; seguir el retroceso glaciar por glaciar y ayudar a actualizar el inventario de glaciares y lagunas de la Cordillera Blanca;
- analizar cuales son los factores que influyen en el retroceso de los frentes glaciares: comparando el retroceso de glaciares con condiciones distintas (diferencias en el AAR (Accumulation Area Ratio), pendiente, orientación, altitud, situación (Zona Norte, centro o sur de la Cordillera Blanca), parámetros climáticos, uno tiene un terreno de experimento muy amplio para verificar sur teorías sobre el funcionamiento de un glaciar;
- Intentar relacionar directamente el retroceso glaciar con la evolución del recurso hídrico, a la escala de toda la cuenca, dando una visión temporal a lo que se ha estudiado en el capítulo II (relación cobertura glaciar-recurso hídrico).
- En un otro orden de ideas, se ha observado que en la imágenes Aster se notan bien las huellas (morrenas y otras) de las áreas glaciares del último máximo glaciar (fin de la pequeña edad de hielo,  $\approx 1850$ ). Sería interesante intentar delimitar el avance glaciar de esa época.

En el futuro, la disponibilidad de imágenes a más alta resolución (IKONOS, 4m de resolución en el modo multiespectral), permitiría un seguimiento más preciso y se podría mapear los frentes glaciares más seguido con precisión satisfactoria. Pero cuesta caro.

### III.4.2. Medición de variaciones de volúmenes

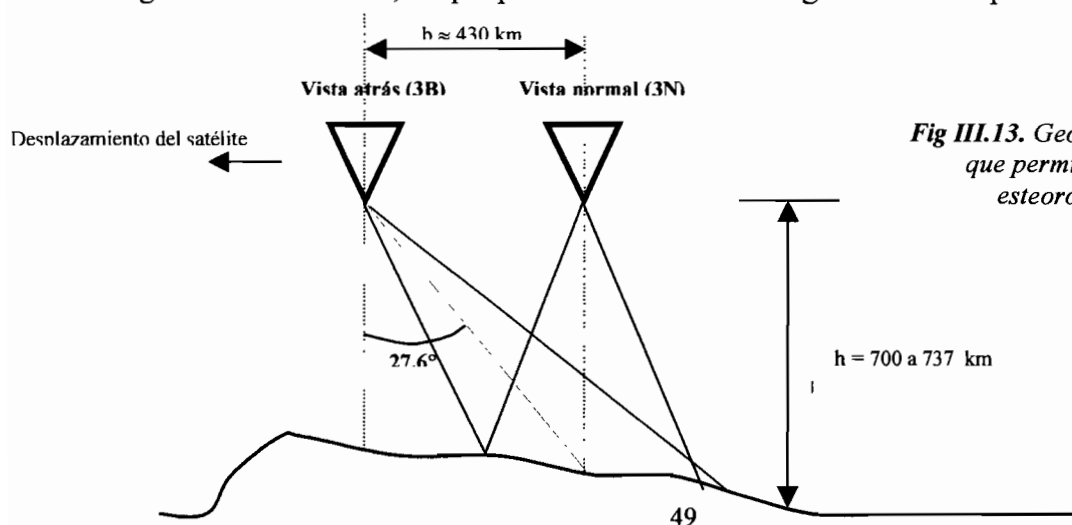
Hasta la fecha no se han efectuado en la Cordillera Blanca intentos para calcular la pérdida de volúmenes de hielo que representa el retroceso glaciar. Ante la ausencia de mediciones de profundidad de hielo (excepto una vez en el glaciar de Safuna en el 1960 por la Unidad de Glaciología, por perforación del hielo hasta el lecho rocoso, un método muy pesado, y en algunos sitios como el glaciar Artesonraju (glaciar colgante) donde la topografía impide el retroceso del frente del glaciar pero sí permite una estimación visual del espesor de la lengua), solamente se han podido hacer estimaciones muy gruesas y poco confiables. La adquisición reciente por la UGRH de un radar al suelo debería en el futuro permitir, paralelamente al control sistemático de las balizas de ablación, un control sistemático del espesor del hielo en las lenguas glaciares y en las zonas accesibles de los nevados.

Aquí proponemos un método para estimar rápidamente, a larga escala (toda la Cordillera Blanca), y sin necesidades de mediciones de terreno, por comparaciones entre un modelo numérico de terreno (MNT) obtenido por fotos aéreas y levantamientos topográficos en el 1962 y un MNT obtenido a partir de un par de imágenes estereoscópicas del satélite ASTER tomadas en el 2001, las pérdidas de volúmenes glaciares entre estas fechas.

#### *Obtención de los MNTs*

El MNT de referencia (1962) está obtenido por digitalización de los mapas al 100 000e del IGN peruano, hecho en base a fotos aéreas y levantamientos topográficos en el año 1962. Tiene una precisión de 10 metros en altitud. Nos ha sido proporcionado por el Alpenverein.

El MNT Aster (2001) se construye gracias a la visión estereoscópica del satélite (fig. III.13): el satélite ASTER dispone en su banda 3 (infrarrojo cercano, 0.78-0.86  $\mu\text{m}$ , pixel 15\*15 m) de la posibilidad de tomar una misma escena con dos ángulos diferentes (vista normal en banda 3N (Normal), vista atrás en banda 3B (Backwards), con 56 segundos de intervalo, lo que permite formar una imagen estereoscópica de la zona

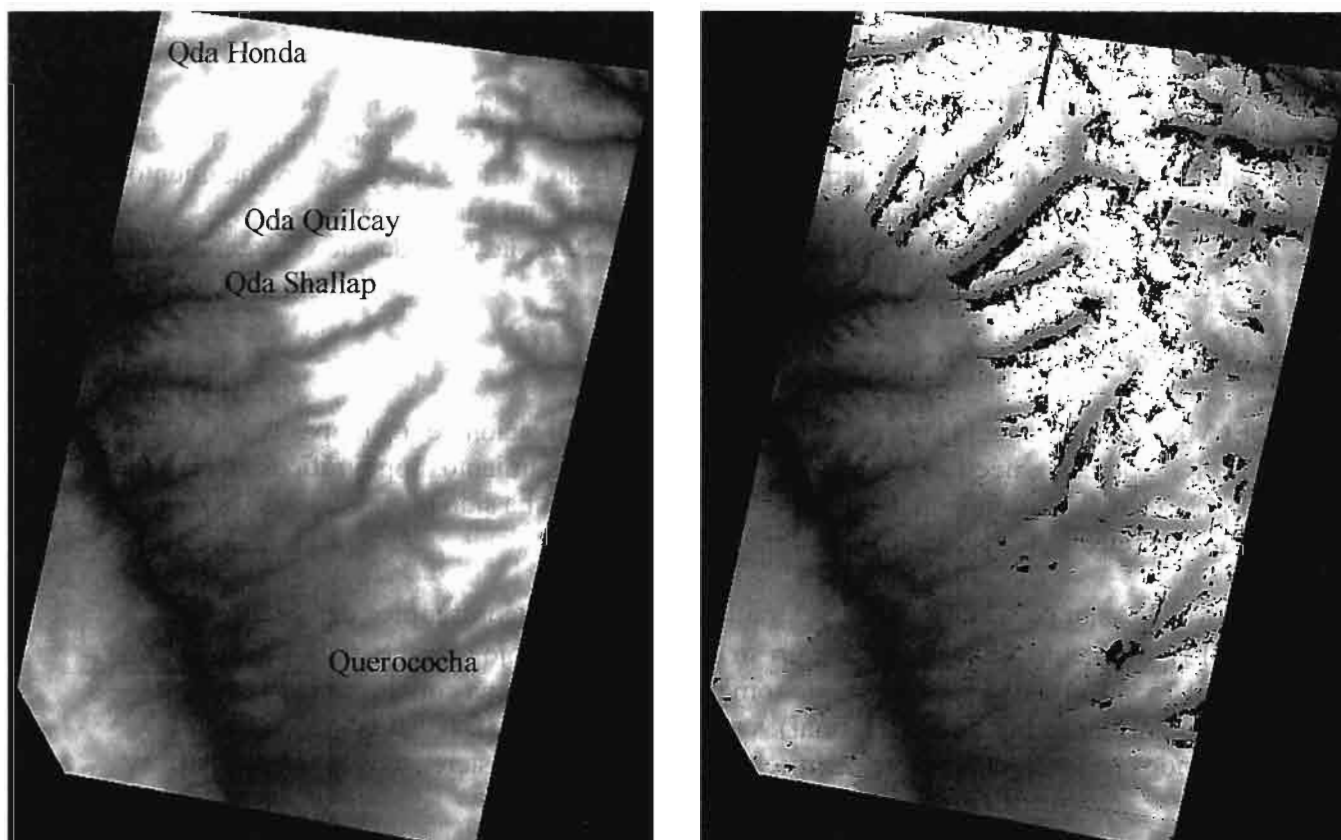


**Fig III.13.** Geometría de las tomas ASTER que permiten una reconstrucción estereoscópica del relieve.

enfocada.

El MNT Aster ha sido calculado sobreponiendo y ortogeoreferenciando las bandas 3N y 3B de una toma ASTER de julio del 2001, usando 26 puntos de control al suelo (Ground Control Points, GCPs), cuyas coordenadas están sacadas directamente del MNT de referencia. Solamente una pequeña zona de las imágenes procesadas tiene recubrimiento con el MNT de referencia, así que nuestro MNT cubre una zona limitada (correspondiendo al sur de la Cordillera Blanca, de la zona de Querococha a la Quebrada Honda, cf fig.3.14)

El error promedio entre el modelo calculado y los puntos de control, o sea el bias de la imagen es de  $-3\text{m}$ . La precisión en altitud (RMS de las diferencias modelo-puntos de control) es de 22 metros, y el error máximo es de 58 metros lo que puede ser considerado como bueno en una zona tan accidentada, teniendo también en cuenta la mala repartición de los GCPs. 93 % de la superficie de la imagen pudo ser calculada (no se puede calcular el modelo de terreno en zonas muy empinadas (acantilados como el borde de algunas quebradas que dan la espalda a la vista atrás del satélite) y en los espejos de las lagunas).



*Fig III.14. Izquierda: El MNT de referencia (1962), con una precisión de 10 metros en altitud. Derecha: el MNT Aster (2001), con una precisión absoluta del orden de 20 metros en altitud. Las zonas más claras corresponden a las altitudes más altas. La manchas negras en el MNT Aster corresponden a zonas donde el modelo no se ha podido calcular (lagunas o paredes empinadas que dan la espalda a la vista "backwards" del satélite).*

### *Comparación global entre el MNT Aster y el MNT de referencia*

Se espera observar entre estos dos MNTs, correspondiendo a la situación topográfica en el 1962 y en el 2001 respectivamente, diferencias de altitudes en los glaciares, consecuencia del retroceso de sus lenguas.

Con más de 20 metros de error absoluto en altitud, mal se puede esperar cuantificar cambios de alturas por deshielo de las superficies glaciares que se esperan de este mismo orden de magnitud con una precisión de menos de 100 %. Sin embargo, trabajando al nivel local, la precisión puede ser mejorada.

En la fig.III.15 se presenta la substracción del MNT de referencia (1962) al MNT Aster (2001) (*Aster-Referencia*). Esperemos observar valores negativos en las lenguas glaciares que han sufrido un adelgazamiento.



*Fig.III.15. Substracción del MNT de referencia (1962) al MNT Aster (2001). Las zonas más oscuras corresponden a diferencias negativas, las más claras a diferencias positivas. Las zonas negras corresponden a zonas de topografía difícil (paredes de quebradas empinadas, lagunas) que no han podido ser calculadas en la elaboración del MNT Aster. Los rectángulos son las zonas donde hemos estudiado las diferencias de más cerca: de oeste a este y de norte a sur: la mina de Ticapampa, los glaciares de Shallap, Uruash, Yanamarey.*

La diferencia entre los dos MNTs presenta un promedio de 0.7 m y un RMS de 31 m. Estas cifras esconden el detalle espacial: parece que hay un gradiente espacial

en la diferencia, habiendo diferencias positivas en el norte del valle y negativas en el sur (gradiente de color de blanco a gris oscuro en la fig.III.15), lo que eleva la RMS. Esto puede estar debido a imprecisiones el MNT Aster y/o el de referencia. Así, aunque parece que no hay bias global en la diferencia, hay un bias local (surestimación de la diferencia en el norte, subestimación en el sur).

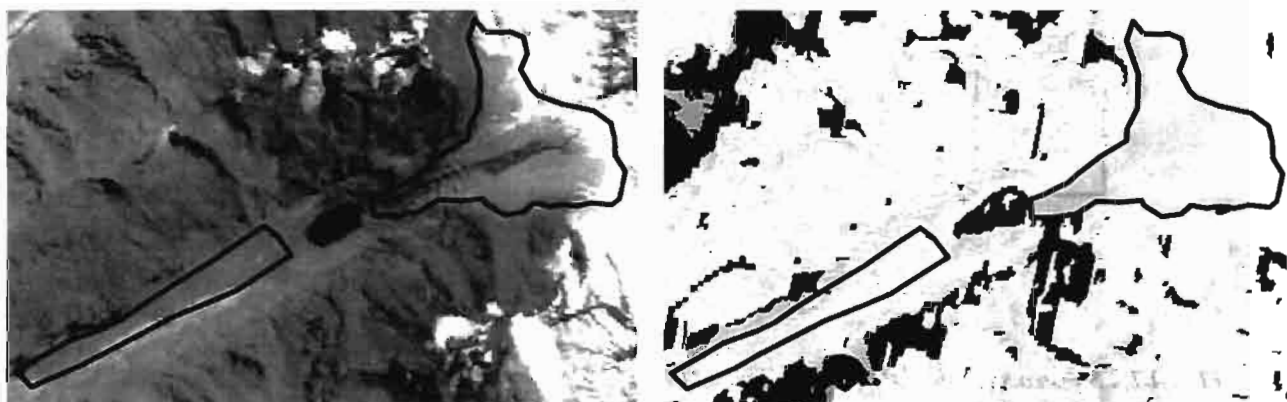
En el estudio de cada zona, para acceder a diferencias absolutas de nivel, habrá que estimar el bias local en una porción “test” de terreno, cerca de la zona estudiada, de la cual se sabe que no ha habido movimiento entre 1962 y 2001. Estas porciones “test” se elegirán preferiblemente en los fondos de valle poco empinados, donde sabemos calcular los MNTs con más precisión.

### *Zona del glaciar Shallap*

De los tres glaciares escogidos (Shallap, Uruashraju, Yanamarey), este es el que da los mejores resultados, por las siguientes razones:

- la lengua glaciar es grande y la zona de ablación fácil de delimitar,
- el glaciar en su retroceso desde el 1962 no ha dejado ninguna nueva laguna subglaciar en la cual el MNT no se puede calcular,
- el MNT en la zona donde se ubica el glaciar (centro de la imagen) es bien confiable.

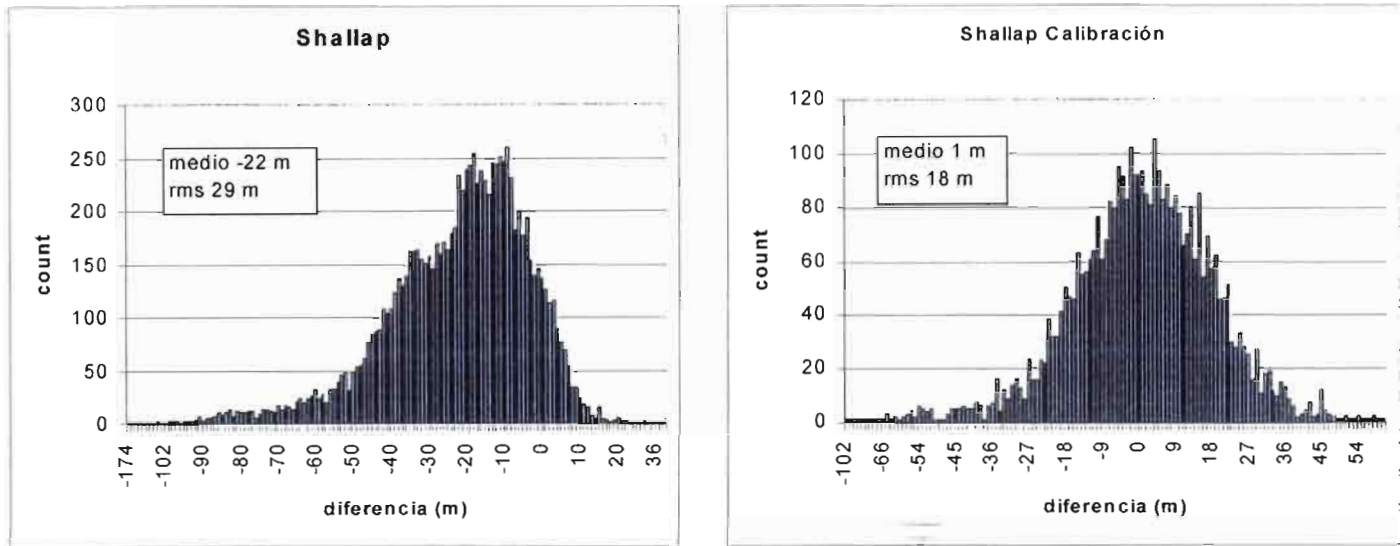
En los glaciares, se harán las estimaciones de las pérdidas de volúmenes es la zona de ablación aparente del balance 1962-2001 (comprendida entre la posición del frente glaciar en 1962 y la línea de equilibrio aparente del balance 1968-2001). En Shallap no se tiene conocimiento de la posición del frente glaciar en 1962, pero se sabe (fotos de Kinzl, cf fig.III.3) que no está muy lejos del frente actual. La línea de equilibrio aparente del balance 1968-2001 se ve en la substracción como la línea donde las diferencias de elevación entre 1968 y 2001, negativas en la lengua, pasan a ser positivas (fig.III.16). La zona de calibración es una zona de pampa húmeda de fondo de quebrada, relativamente llana (cf fig.III.16).



**Fig.III.16.** Las zonas escogidas para estudiar las pérdidas volúmicas de hielo en el glaciar Shallap: se ha indicado la zona del glaciar estudiada, y la zona de calibración local del MNT. (Izquierda: banda 3, SPOT; derecha: diferencia entre los MNTs). Las zonas grises corresponden a diferencias negativas de altitud entre 1962 y 2001, las zonas negras son zonas donde el MNT Aster no se ha podido calcular (se nota la laguna Shallap y las paredes de las quebradas).

Se hacen los histogramas de las diferencias pixel por pixel en la zona de la lengua de Shallap y la zona de calibración del fondo de la quebrada (fig.III.17): el promedio

del histograma de la zona de calibración no dará el bias local del MNT Aster relativamente al de referencia, substrayendo este promedio al promedio del histograma de la lengua del glaciar tendremos el promedio de pérdida en altitud en la lengua de Shallap.



**Fig.III.17.** Histogramas de las diferencias de altitud entre 1962 y 2001, en las zonas de la lengua de Shallap y la zona de calibración en la quebrada (cf fig.III.16.).

El histograma de la zona de calibración presenta una forma gaussiana centrada cerca de 0 (promedio del histograma: 1 m); y los errores locales en altitud combinadas de los dos MNTS se estiman a 18 metros (RMS de la diferencia).

El histograma de la lengua de Shallap tiene una forma asimétrica pero el bloque del histograma está visiblemente en los valores negativos, lo que confirma una pérdida de altitud entre 1962 y 2001). Su valor promedio es de  $-22$  m, con un RMS de 19 metros (la RMS de la zona de la lengua es menos significativa que la de la zona de calibración ya que la pérdida de altitud de un punto depende de su posición en la lengua). Teniendo en cuenta el error local de 1 m en el MNT, estimamos que la lengua de Shallap ha sufrido  $-22 - 1 = -23$  m de cambio de altitud en promedio.

Estas cifras nos permiten hacer una estimación muy grosera del volumen  $V$  de hielo perdido por le lengua de Shallap entre 1962 y 2001: sea  $A$  el área de la zona considerada en la lengua,  $h$  la diferencia de altitud promedio estimada en en esta zona, tenemos:

$$V = A * h$$

Con  $A = 2.25 \text{ km}^2$ ,  $h = -23$  m,

$$V = -52.10^6 \text{ m}^3$$

Lo que representa un equivalente en agua de  $52 / 0.9 = 58.10^6 \text{ m}^3$  perdidos en 40 años, o sea una pérdida diaria del orden de  $4000 \text{ m}^3 / \text{día}$ , equivalente a un caudal de  $50 \text{ l} / \text{s}$ !

El error en la estimación de las cambios volúmicos tiene varias causas:

- Error en la estimación de los cambios de altitud debido a la imprecisión de los MNTs . Básicamente, este error esta medido por la RMS de la diferencia entre los MNTs en la zona de calibración (aquí 18 metros). Este error es irreducible.
- Error en la delimitación de la zona de ablación 1962-2001. Este error se podría minimizar utilizando los trabajos de terreno del IGN en 1962 para delimitar bien la línea de frente en esta fecha. El error relativo es proporcional al perímetro de la zona estudiada multiplicado por el error longitudinal en la estimación de la lengua, dividido por el área de la zona estudiada. Aquí se estima en 50%.

Como estas fuentes de error son independientes, no se suman y el error relativo estimado es de 50%.

### *Glaciares Uruash y Yanamarey*

Siguiendo la misma metodología que en Shallap se hicieron estimaciones de pérdidas de volúmenes en los glaciares Uruashraju y Yanamarey. Sus lenguas glaciares siendo más pequeñas, los resultados son más imprecisos. Además, a lo contrario de lo que sucede en Shallap, estos dos glaciares de valle han dejado en su retroceso lagunas subglaciares que no existían en el 1962, y en las cuales no se ha podido calcular el modelo de terreno Aster del 2001, así que se ha tenido que interpolar las variaciones volumicas. La ventaja era que se disponía de levantamientos topográficos del 1962 para la delimitación de las lenguas (cf fig.III.4 y III.5). Igual que para Shallap, las zonas de estudio se han escogido entre el frente glaciar de 1962 y la línea de equilibrio aparente de balance de masa de todo el período 1962-2001 y las zonas de calibración en pampas llanas cerca del glaciar estudiado. Los resultados se presentan en la tabla de la fig.III.18.

	Shallap	Yanamarey	Uruashraju
Area zona de estudio (km <sup>2</sup> )	2,25	0,58	0,70
Promedio de las diferencias (m)	-22	-65	-37
rms de las diferencias (m)	19	25	26
Area zona de calibración (km <sup>2</sup> )	0,85	2,07	1,60
Promedio de las diferencias (m)	1	-9	-8
rms de las diferencias (m)	18	16	14
Cambio promedio de altitud en la lengua	-23	-56	-28
Volúmen de hielo correspondiente (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	52	32	20
Precisión relativa estimada	50%	50%	50%

**Fig.III.18.** Estimaciones de las pérdidas volúmicas en las lenguas de los glaciares de Shallap, Yanamarey, y Uruashraju, entre 1968 y 2001. La precisión relativa indicada es de 50% para cada uno de los glaciares, pero es difícil de evaluar y es solamente una indicación.

### *Conclusiones y perspectivas.*

Comparando un modelo de terreno Aster construido en 2001 con una precisión en altitud del orden de 20 metros, y un modelo de referencia construido a partir de levantamientos topográficos de terreno en el 1962, con una precisión de 10 metros, se pueden detectar cambios de volúmenes en las lenguas glaciares que han retrocedido entre estas dos fechas.

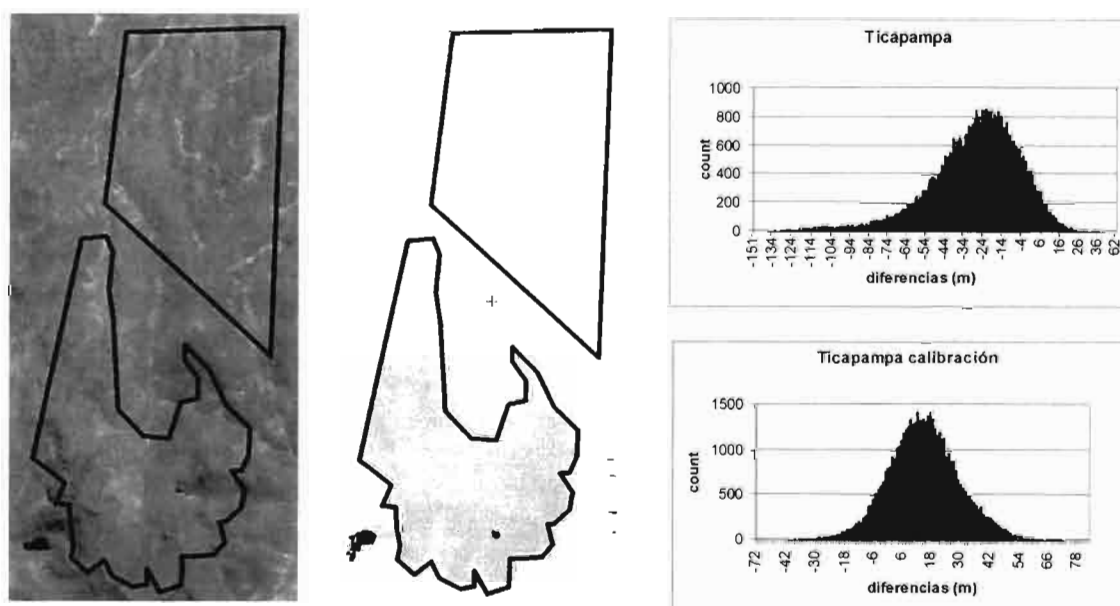
Se ha estimado el retroceso en solamente tres glaciares “test” pero podríamos sistematizar el estudio a todos los glaciares de la zona cubierta por los MNTs

La imprecisión de nuestros modelos (20 metros de precisión para detectar cambios del mismo orden de magnitud) nos impide cuantificar precisamente las pérdidas volúmicas observadas, pero nos dan una estimación grosera con 50 % de error relativo.

El error absoluto en la estimación de los volúmenes depende de la calidad de los MNTs y de la precisión de las delimitaciones de las zonas de ablación en los glaciares. La zona montañosa con relieve muy accidentado (dificultad de calcular un MNT) y glaciares pequeños (dificultad de delimitar las zonas de ablación) que es la Cordillera Blanca es una doblemente difícil prueba para testar nuestra metodología.

Así, el método, utilizado en zonas menos accidentadas y con glaciares más grandes, donde también se observa una evolución, podría llegar a dar resultados cuantificables. Para qué no probar en Alaska ?

El método también se puede aplicar a otros fenómenos que implican cambios de altitud en el terreno. En el tratamiento de la imagen que se ha hecho, se ha observado en la diferencia de los MNTs una zona oscura en forma de nube en la Cordillera Negra a la altura de Recuay. Se piensa que es la mina de Ticapampa, y las diferencias negativas de altitud observadas se deben a la extracción de material de la mina entre 1962 y 2001. Es interesante mencionar esta observación, porque implica cambios de altitud más netos (se observa la forma de la mina !(cf fig.III.20. centro) y más grandes, lo que nos da una idea suplementaria de la precisión del método.



*Fig.III.19. Estudio de las pérdidas de volúmenes en la mina de Ticapampa. Izquierda: ubicación de las zonas de estudio y de calibración en la imagen Spot. Centro: diferencia de los MNTs 1962 y 2001. Derecha: histograma de las diferencias en las zonas de estudio y de calibración.*



La metodología utilizada es la misma que para las lenguas glaciares. En la diferencia de los MNTs se ha delimitado la zona de la mina (zona gris que corresponde a diferencias negativas) y una zona de calibración local (al norte de la mina). Se hace el histograma de cada zona (derecha). El histograma de calibración está centrado en 15 m, con una RMS de 15 m; la de la mina en -28 m con RMS de 24 m. Se estima entonces una bajada de nivel promedio en la mina de 43 metros, correspondiendo a una pérdida volúmica de 427 millones de metros cúbicos. Lamentemos que la extensión limitada de las imágenes Aster no nos permitan calcular el MNT sobre toda la extensión de la mina..

## Conclusiones generales

La zona de estudio está caracterizada por su importante cobertura glaciar, lo que hace de la cuenca del río Santa una cuenca “modelo” para el estudio de la influencia de los glaciares sobre el régimen hidrológico.

Haciendo un estudio hidrológico comparativo de las subcuencas del río Santa en las cuales se tiene información limnimétrica y pluviométrica, se ha llegado a algunos alcances en la caracterización del régimen hidrológico de cuencas glaciares (capítulo II). Se ha confirmado y cuantificado la importancia de los glaciares en los caudales específicos y los déficits hídricos: en las cuencas más glaciadas se observa más déficit a lo largo del año, pero especialmente en la temporada seca (mayo-septiembre) donde hay poca precipitación, esto se debe en parte a las aguas de fusión de los glaciares ubicados en las cabeceras de las cuencas.

No se ha podido observar una relación neta entre la evolución temporal de los caudales específicos y la disminución de las áreas glaciares que se observa en la zona.

Este estudio se podría mejorar todavía mejorando las estimaciones de las precipitaciones, teniendo en cuenta la variación de la precipitación con la altitud.

Sin embargo, la mala calidad o la falta de información nos impide ir mucho más lejos, y hay que pensar en mantener y ampliar la red hidro-pluviométrica actualmente instalada en la zona.

En el futuro, queremos relacionar la evolución de los recursos hídricos con el retroceso de los glaciares, por eso hemos tratado de proponer nuevos métodos para la estimación de sus retrocesos y balance a larga escala. Los nuevos métodos podrían ser verificados por comparación con fotografías históricas y mediciones topográficas de los frentes glaciares:

Hemos presentado en la cuenca de la laguna Parón un método de balance hidrológico “interpolado” para, a partir de datos de caudales de salida de la laguna Parón desde 1952 calibrados con los de Artesoncocha desde 1996, estimar el balance del glaciar Arteson desde cincuenta años. Los resultados hasta ahora son prometedores, mostrando una buena correlación entre los caudales de Parón y los de Artesoncocha (que todavía se podría mejorar teniendo en cuenta la variación de la precipitación con la altitud en el modelo de la subcuenca), falta todavía relacionar los caudales de salida de Artesoncocha con el balance de Artesonraju.

Hemos probado también un método para estimar por satélites los volúmenes glaciares perdidos en la zona desde 1962. El método nos permite observar las pérdidas pero no cuantificarlas bien, ya que tenemos un error de 50% todavía, pero en zonas glaciares en retroceso con glaciares más grandes y topografía menos difícil (Alaska), podría llegar a dar resultados cuantitativos.

Paralelamente, hemos comprobado la factibilidad de usar la percepción remota Landsat, Aster y Spot para cuantificar las pérdidas de superficies glaciares a la escala de una decena de años en los pequeños glaciares de la zona. Incluso se podrían mapear los límites glaciares del último máximo avance glaciar (1850), que dejó huellas visibles por satélites.



## Referencias bibliográficas

### Capítulo I

*Balances de masa y reacción del glaciar al clima*

**Hastenrath S, Ames A (1995)**, Diagnosing the balance of Yanamarey Glacier in the Cordillera Blanca of Peru, *Journal of geophysical research*, 100 (D3), 5105-5112.

**Kaser G, Ames A, Zamora M (1990)**, Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Perú. *Annals of glaciology*, 14, 136-140.

**Kaser G (1995)**, Some notes on the behaviour of tropical glaciers, *Bulletin de l'IFEA*, 24 (3), 671-681

**Kaser G, Hastenrath S, Ames A (1996b)**, Mass Balance profiles on tropical glaciers, *Gletscherk. Glazialgeol*, 32, 75-81

**Kaser G (2001)**, Glacier-climate interactions at low latitudes, *Journal of glaciology*, 47 (157), 195-204

**Kaser G, Osmaston H (2002a)**, Tropical glaciers, *International hydrology series* (205pp)

**Kaser G, Fountain A (2002b)**, A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers, with particular attention to low latitudes characteristics, *A contribution from the International Commission on Snow and Ice (ICSI) to the UNESCO HKH-Friend program*, pp 1-53

**Kuhn M (1979)**, Climate and Glaciers, *Sea Level, Ice, and climatic changes* (proceedings of the Camberra symposium, december 1979)

**Paterson W (1993)**, The physics of glaciers, *Pergamon Press, Oxford-New York-Seul-Tokyo*, 385 pp

**Ribstein P, Francou B, Rigaudiere P, Saravia R (1995)**, Variabilidad climática y modelización hidrológica del glaciar Zongo, Bolivia, *Bulletin de l'IFEA*, 24 (3), 639-649

**Sicart J.E (2002)**, Contribution a l'étude des flux d'énergie, du bilan de masse et du débit de fonte d'un glaciar tropical : le Zongo, Bolivie. *These de doctorat de l'université Paris VI*, 333pp

**Wagnon P (1999)**, Analyse du bilan d'énergie d'un glaciar tropical, application a la relation glaciar-climat, *These de doctorat de l'université Grenoble I*, 199pp

**Wagnon P, Ribstein P, Francou B, Sicart J.E (2001)**, Anomalous heat and mass budget of glaciar Zongo, Bolivia, during the 1997/98 El Niño Year, *Journal of Glaciology*, 47 (156), 21-28

**Wagnon P, Ribstein P, Francou B, Pouyaud B (1999)**, Annual cycle of energy balance of Zongo Glaciar, Cordillera Real, Bolivia, *Journal of geophysical research*, 104 (D4), 3907-3923

## Capítulo II

*Influencia de los glaciares sobre el recurso hídrico*

**Tamayo W (1996)**, Influencia de los glaciares en el comportamiento hidrológico de cuencas de alta montaña, estudio de casos en Perú y Bolivia, *Tesis de ingeniero civil de la universidad de Ancash*

**Portocarrero C (1995)**, Retroceso de los glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos, *Bulletin de l'IFEA*, 24 (3), 697-706

## Capítulo III

*El retroceso glaciar y el peligro asociado*

**Ames A (1998)**, A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34,1-36

**Ames A, Francou B (1995)**, Cordillera Blanca, Glaciares en la historia, *Bulletin de l'Institut Francais d'études andines*, 24 (1), 37-64

**Byers A (1998)**, Landscape change detection by the repeated photography technique, *Informe del Instituto de Montaña (TMI), Huaraz*

**Hidrandina S.A (1988)**, Inventario de glaciares del Perú.

**Kaser G, Georges C, Ames A (1996a)**, Modern glacier fluctuations in the Huascarán-Choquipalqui massif in the Cordillera Blanca, Perú. *Z. Gletscherk. Glazialgeol.*, 32, 91-99,

**Kaser G, Osmaston H (2002a)**, Tropical glaciers, *International hydrology series* (205pp),

**Lliboutry L, Morales Arnao B, Pautro A, Schedeiner B (1977)**, Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru, Part I, *Journal of glaciology*, 19 (79), 255-273

## *Los glaciares vistos por satélites*

**Morales Arnao B (1998)**, Glaciers of Peru, *United States Geological Survey*, pp 151-179

**Klein A (1997)**, Modern and late pleistocene glacial studies in the Central Andes of Peru and Bolivia: application of satellite remote sensing and digital terrain analysis, *PhD of Cornell University*

## *Modelos de terreno Aster y sus aplicaciones al estudio de glaciares*

**Kaab A, Huggel C, Paul F, Kieffer H, Wessels R, Baup R (submitted)**, Glacier monitoring from Aster imagery: accuracy and applications

**Toutin T (2001a)**, Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data (Review article), *Int. J. Remote sensing*, 22 (6), 1097-1125

**Toutin T, Cheng P (2001b)**, DEM generation from Aster Stereo Data, *Earth Observation magazine*, 10 (6), 10-13

**Toutin T (2001c)**, DEM generation from new VIR sensors: IKONOS, ASTER and Landsat-7, *GARSS 2001, Sydney*

**Toutin T (2002)**, 3D topographic mapping with Aster stereo data in Rugged topography, *IEEE-TGARS*, 40 (9)

**Zangelmi F (2002)**, Potentiel des images Aster pour l'étude du glacier Zongo, *Memoire de D.U de cartographie de l'universite Montpellier III*

## **Sitios Internet**

[www.mpl.ird.fr/hydrologie/greatice/index.htm](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/greatice/index.htm) La unidad de investigación GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales, Indicateurs Climatiques et Environnement)

[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe) Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología (Lima)

[www.inei.gob.pe](http://www.inei.gob.pe) Instituto Nacional de Estadística y Informática (Lima)

[www.inrena.gob.pe](http://www.inrena.gob.pe) Instituto Nacional de recursos Naturales

[www.cnes.fr](http://www.cnes.fr) Centre National d'Etudes Spatiales : informaciones sobre el satélite SPOT.

[www.ccrs.nrcan.gc.ca](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca) Canada Center for Remote Sensing

[www.glc.f.umiacs.umd.edu](http://www.glc.f.umiacs.umd.edu) Global Land Cover Facility, university of Maryland: Acceso a imágenes Landsat

## Resumen

En la cordillera de los Andes muchas cuencas están reguladas por áreas glaciares. Estas áreas almacenan agua en la temporada de lluvias para fundirla aportando a los ríos en temporada seca.

Sin embargo, se está observando últimamente un retroceso de los glaciares, consecuencia del calentamiento global que afecta el planeta, dando lugar a inquietudes sobre el futuro de los recursos hídricos.

En este estudio se examina el caso de la Cordillera Blanca y de la cuenca del río Santa, grande cuenca extensamente glaciada de la vertiente del pacífico de los Andes peruanos. Se trata de relacionar los caudales con la extensión glaciada, a fin de predecir lo que será la disponibilidad de agua cuando continúe el retroceso glaciado; y se analiza este retroceso por diversos métodos.

*Palabras clave:* Cordillera Blanca, Río Santa, glaciares andinos, hidrología de montaña, MNT Aster

## Résumé

Dans la Cordillère des Andes de nombreux bassins versants sont régulés par des glaciers. Ces glaciers stockent l'eau de précipitation en saison des pluies, pour la libérer par fusion apportant aux rivières en saison sèche.

Cependant, il semble que les aires glaciaires soient en phase de retrait, conséquence du réchauffement de la planète, ce qui inquiète quand à l'avenir des ressources en eau.

Dans cette étude on examine le cas de la Cordillère Blanche et du bassin du río Santa, grand bassin à forte couverture glaciaire du versant pacifique des Andes péruviennes. On essaie de mettre en relation les débits avec la couverture glaciaire, ce qui nous devrait permettre de prédire ce que seront les ressources en eau au fur et à mesure du retrait glaciaire; et on analyse ce retrait par diverses méthodes.

*Mots clé :* Cordillère Blanche, río Santa, glaciers andins, hydrologie de montagne, MNT Aster

## Abstract

In the Andean Cordillera many hydrologic basins are regulated by glaciers. These glaciers retain the precipitation water in the rainy season to let it off by fusion into the rivers in the dry season.

However, a retreat of these glaciers is being observed, consequence of the global warming, which makes worry about the future of the water resources.

Here we present the case study of the Cordillera Blanca and the río Santa basin, in the western slopes of the peruvian Andes. We try to establish a relation between the debits and the glacier coverage, in order to be able to predict the evolution of the water resources linked with the glacier retreat; the glacier retreat is analyzed by different methods.

*Key words:* Cordillera Blanca, río Santa, andean glaciers, mountain hydrology, Aster DEM