

Enero - Abril 2016  
Año I, N° 1



# BOLETÍN INAIGEM

Instituto Nacional de Investigación en  
Glaciares y Ecosistemas de Montaña



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente

Instituto Nacional de  
Investigación de Glaciares  
y Ecosistemas de Montaña.

***Es una Publicación***

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña

***Responsable***

*Dirección de Información y Gestión del Conocimiento*

*Biblioteca y Publicaciones*

***Enero – Abril 2016***

***Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña***

***Presidente***

*Ing. Benjamín Morales Arnao*

***Coordinador General***

*Sr. Jorge Rojas Fernández*

***Directores***

*Ing. César Portocarrero Rodríguez*

*Ing. David Ocaña Vidal*

*Ing. Ricardo Villanueva Ramírez*

***Editor***

*Bib. Giber García Álamo*

***Revisores***

*Lic. Christine Giraud*

*Mag. Steven Wegner*

***Dirección***

*Jr. Juan Bautista Mejía N° 887 - Huaraz, Ancash, Perú*

*Teléfono: (043) 22-1766 / (043) 45-6234*

# SUMARIO

## EDITORIAL

### Agenda Institucional

- Eventos INAIGEM ..... 07
- Participación INAIGEM..... 11
- Convenios..... 14

### Investigaciones Retrospectivas

- Las lagunas y glaciares de la Cordillera Blanca y su control ..... 19  
Benjamín Morales Arnao
- Estudio de la evolución de la lengua glaciar del Pucahirca y de la laguna Safuna ..... 22  
Benjamín Morales Arnao
- La Cordillera Blanca: Apuntes geográficos ..... 30  
Hans Kinzl

### Artículos de Divulgación

- Glaciares, recursos hídricos y riesgos ..... 41  
César Portocarrero Rodríguez
- Los ríos rojos en la Cordillera de los Andes, alteración y acidificación de las aguas  
superficiales ..... 51  
Gabriel Martel Valverde
- Caracterización climática de la precipitación en la subcuenca del río Quillcay ..... 57  
Ivonne Sotelo Solórzano, Ricardo Durán Mamani y Alexander Santiago Martel



Sendero María Josefa (Llanganuco, Yungay, Perú). 2015.  
© Wilson García

En 1962, conversaba con el Dr. Hans Kinzl en su oficina de la Universidad de Innsbruck en Austria, sobre la necesidad de tener un organismo especializado en el Perú que se dedique a efectuar investigaciones glaciológicas, a estudiar y a resolver el delicado problema de los riesgos de origen glaciar por las avalanchas y aluviones de lagos glaciares.

Estábamos soñando en algo que después de 53 años se ha hecho realidad con la formación del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, creado el 13 de diciembre del año 2014, como una reafirmación del gobierno peruano en su compromiso ambiental, al final de la COP 20 llevada a cabo en Lima, Perú.

El 11 de diciembre del 2015, al conmemorarse un año de la formación del INAIGEM, inauguramos nuestra sede institucional provisional en la ciudad de Huaraz, y al día siguiente el 12 de diciembre inauguramos nuestro campamento de investigación de altura en la laguna de Llaca sobre la ciudad de Huaraz, bajo el imponente nevado del Ranrapalca de 6,200 m.s.n.m. Este campamento funciona como el albergue de la Casa de Guías de Montaña, quienes muy amablemente nos han permitido utilizar sus modernos y cómodos ambientes con una capacidad para cuarenta personas a 4,400 m.s.n.m.

Estas dos realizaciones, aunadas a la contratación de treinta profesionales especialistas en glaciares y ecosistemas de montaña, nos dan la confianza de enfrentar el apasionante reto de la investigación de las 19 cordilleras glaciares a nivel nacional, así como de efectuar y orientar la investigación de los ecosistemas de montaña y de su gran biodiversidad, que en especial se afina en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de capital importancia en estos momentos. Considerando además los acelerados cambios climáticos y las medidas de adaptación y previsión por los efectos de la elevación de las temperaturas, que no solo afectan a las reservas de agua de los glaciares, sino también aceleran los riesgos en los glaciares de montaña. A todo ello se suma el impacto en la biodiversidad, frágil ante estos efectos.

Por primera vez en la historia se junta un equipo integral y cohesionado de profesionales en el tema de glaciares y ecosistemas de montaña, que juntos han planificado e iniciado el reconocimiento de campo en la cuenca del Qillcayhuanca. En esta salida multidisciplinaria hemos verificado la enorme relación que tienen los glaciares con la diversidad biológica de los ecosistemas de montaña, con las características geológicas de los suelos, y la relación directa con la vida de las poblaciones de la cuenca. La convivencia de profesionales de diferentes ramas, directamente en el campo, frente al paisaje imponente de estos ecosistemas, con su vulnerabilidad y riesgos, han roto las 'cápsulas' que podrían haber existido como herencia pasada en cada uno de los investigadores.

De esta manera, hemos ya iniciado nuestras actividades de campo, monitoreando 3 cuencas de origen glaciar donde se han generado riesgos potenciales en glaciares y lagunas. Están ubicadas en la quebrada de Santa Cruz, al Norte de la Cordillera Blanca y sobre la ciudad de Huaraz, donde hemos asumido la conducción de las investigaciones y las medidas de prevención que se deben desarrollar, como la alerta temprana en la laguna de Palcacocha y la confección de los términos de referencia para la contratación de los estudios para el desagüe y construcción de las obras de previsión que se deben ejecutar en esta laguna considerada de gran riesgo para esta ciudad.

En estos primeros seis meses de actividades, estamos siendo ya acompañados por una entusiasta cooperación técnica nacional e internacional, con las cuales hemos firmado convenios de cooperación técnica, lo cual complementará y afianzará nuestras actividades en la investigación de los glaciares y ecosistemas de montaña.

En la ciudad de Huaraz, se construirá en un futuro cercano, la sede institucional de nuestro Instituto y el Museo de las Montañas Andinas. Estamos seguros que será el Museo más importante del mundo dedicado a las montañas tropicales y su problemática ambiental; así como, de los efectos que los cambios climáticos están produciendo en los glaciares tropicales y en la frágil biodiversidad de las cabeceras de cuencas hidrográficas.

Con el Smithsonian Institute de Washington hemos iniciado conversaciones para que nos visiten y orienten técnicamente en el diseño y arquitectura de este promisor Museo, que ya es motivo de Tesis de grado de estudiantes de Arquitectura de la UPC de Lima.

Desarrollando una acción preponderante, estamos iniciando una activa relación con la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo de la ciudad de Huaraz, para operar equipos especializados y capacitar a estudiantes de últimos años y propiciar tesis de grado.

El INAIGEM saluda a los pueblos de Montaña del Perú y ve con optimismo el gran reto que se le presenta en la investigación de los glaciares andinos y del gran campo de los ecosistemas de montaña.



Quebrada Cayesh, Cordillera Blanca, Huaraz, Ancash, Perú. 2015.  
©Flickr - Photo Sharing

# AGENDA INSTITUCIONAL



## Eventos INAIGEM

## Creación del INAIGEM

El Congreso de la República del Perú aprobó la Ley 30286, ley que crea el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, el 10 de diciembre de 2014; promulgada el 12 de diciembre y publicada en el diario oficial El Peruano el 13 de diciembre de 2014, entrando en vigencia al día siguiente de su publicación.

El dispositivo legal tiene por objeto la creación del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). El INAIGEM se crea para fomentar y expandir la investigación científica y tecnológica en los glaciares y ecosistemas de montaña; teniendo como domicilio legal y sede principal la ciudad de Huaraz, en el departamento de Ancash.

La mencionada ley establece que el INAIGEM, entre sus funciones, tiene que formular, proponer, ejecutar y monitorear la Política Nacional y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, generar y promover la investigación, y realizar cada cinco años el Inventario Nacional de Glaciares, Lagunas y Bofedales.

Señala su estructura orgánica, cuyo Consejo Directivo está conformado por representantes del Ministerio del Ambiente, del Ministerio de Agricultura y Riego, del Ministerio de Cultura, del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, de la Autoridad Nacional del Agua y de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria, siendo el encargado de proponer, aprobar y realizar el seguimiento de las acciones de la Política y el Plan Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, entre otras funciones.

El Presidente Ejecutivo, que conduce el funcionamiento institucional de la entidad, es quien preside el Consejo Directivo, propone la designación de los directores o jefes de los órganos de línea, propone los planes estratégicos y operativos, las políticas,

los objetivos y las metas del instituto en armonía con la política del Gobierno; asimismo, gestiona la implementación de estrategias del INAIGEM con los demás actores vinculados a la materia y demás atribuciones descritas en la ley.

Se establece que los recursos del INAIGEM lo conforman aquellos que asigne la ley anual de presupuesto del sector público, los provenientes de operaciones de endeudamiento o donaciones, las asignaciones, donaciones, legados, transferencias u otros aportes por cualquier título provenientes de personas jurídicas o naturales, los recursos propios que genere y los que las leyes señalen.

Finalmente, se establece que el INAIGEM, a través del Ministro del Ambiente, debe presentar cada año, al Congreso de la República, un informe sobre la situación de los glaciares y los ecosistemas de montañas en el Perú, como eje de los procesos del cambio climático en el país, así como las acciones adoptadas por esta entidad al respecto. (Fuente: Congreso de la República)

## CONGRESO DE LA REPÚBLICA

LEY N° 30286

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

POR CUANTO

EL CONGRESO DE LA REPÚBLICA  
Ha dado la Ley siguienteLEY QUE CREA EL INSTITUTO NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES  
Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑACAPÍTULO I  
CREACIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE  
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS  
DE MONTAÑA

## PRESENTACIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA - INAIGEM

### Presentación de las sedes

El 11 de junio de 2015 se realizó la presentación del INAIGEM en el auditorio de la Sociedad Geológica del Perú, con la asistencia de las autoridades del sector ambiental; destacando la presencia del Ministro, Dr. Manuel Pulgar-Vidal, quien manifestó que “El Perú ha saldado, con la creación de este instituto, una deuda con los ecosistemas de montaña. De esta forma, el Estado está mostrando una enorme responsabilidad ante la vulnerabilidad de los glaciares y montañas frente al cambio climático, un tema y problema que nos atañe a todos”.

De la misma forma, el Ing. Benjamín Morales Arnao, Presidente del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, presentó oficialmente al INAIGEM, destacando esta decisión histórica, señalando que “ha de repercutir decisivamente en el bienestar de los ciudadanos en las zonas de riesgo, garantizando, también, la provisión de agua en todo el Perú”.

Durante la presentación del Instituto, se efectuó una conferencia magistral “Glaciares, agua y gente: explorando los cambios climáticos en el Perú”, a cargo del Dr. Lonnie Thompson, profesor en Glaciología y Paleoclimatología de la Facultad de Ciencias de la Tierra, y científico investigador en el Centro de Investigación Polar Byrd, de la Universidad Estatal de Ohio – USA.



Alcalde del Distrito de Independencia, Huaraz; Ministro del Ambiente Dr. Manuel Pulgar-Vidal (Centro), Presidente Ejecutivo de INAIGEM, Ing. Benjamín Morales Arnao (Derecha).

Asimismo, el 14 de Julio de 2015 se llevó a cabo una ceremonia similar en el Centro Cultural de la

ciudad de Huaraz, con la asistencia del viceministro de Gestión Ambiental del MINAM, Dr. Mariano Castro; del primer vicepresidente del Congreso de la República, Sr. Modesto Julca; del embajador de la República de Suiza, Sr. Hans Ruedi Bortis; y autoridades de la región, municipios, entidades cooperantes y personalidades afines al INAIGEM.

En este evento, el Presidente Ejecutivo del INAIGEM dio a conocer la labor que cumple este instituto, cuya sede está ubicada en la ciudad de Huaraz.

De acuerdo con la Ley N° 30286-2014, el INAIGEM tiene como finalidad fomentar y expandir la



Rector de la UNASAM, autoridad sectorial, presidente INAIGEM, Vicepresidente del Congreso de la República, autoridades regional y local y representante de la Cooperación Suiza en la presentación del INAIGEM en la ciudad de Huaraz

investigación científica y tecnológica en el ámbito de los glaciares y ecosistemas de montaña, promoviendo su gestión sostenible en beneficio de las poblaciones que viven en, o se benefician de dichos ecosistemas.

Para ello, el INAIGEM generará información científica que respalde las actividades orientadas a mejorar la conservación y aprovechamiento sostenible de los recursos presentes en estos dos ámbitos, con una perspectiva transversal de adaptación al cambio climático.

Indudablemente, es un hito importante para la salvaguarda del medio ambiente y conservación de nuestros recursos naturales y recursos hídricos que asegurarán a las futuras generaciones de peruanos.

## PRIMER ANIVERSARIO DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA - INAIGEM

Entre el 11 y 12 de diciembre de 2015 se celebró el primer aniversario de la fundación del INAIGEM, con actividades académicas, administrativas y sociales.

El día 11 se realizaron conferencias magistrales a cargo del Presidente Ejecutivo del INAIGEM, Ing. Benjamín Morales Arnao, quien disertó sobre la situación actual y las proyecciones del Instituto. Luego los directores de línea tomaron la palabra, en el siguiente orden: el Ing. César Portocarrero expuso “Los glaciares y riesgos glaciares en el Perú”, el Ing. David Ocaña presentó la “Instalación de parcelas de investigación en Ecosistemas de Montaña”, y el Ing. Ricardo Villanueva disertó acerca de la “Información y gestión del conocimiento sobre glaciares y ecosistemas de montaña”.

A continuación, expusieron especialistas invitados como el consultor Ing. José Veliz Bernabé con “Riesgos por peligros naturales en la ciudad de Huaraz”, el Blgo. José Álvarez Alonzo (Director General de Biodiversidad - MINAM) con “Conservación y manejo de la biodiversidad”; además, el Ing. Roque Vargas Huamán, participó con la ponencia “Análisis de vulnerabilidad en la evaluación de riesgos en cuencas glaciares”. Para cerrar el evento, realizado en el Centro Cultural de Huaraz, se inauguró la exposición de fotografías y paneles del INAIGEM.

A las 4:00 p.m. se Inauguró el local del INAIGEM, ubicado en Jr. Juan Bautista Mejía N°. 887 - Huaraz, con invitados de honor que hicieron un recorrido por las instalaciones.



El Presidente Ejecutivo del INAIGEM iniciando la Jornada Académica por el Primer Aniversario



Acto inaugural del local INAIGEM a cargo del Director General de Biodiversidad del MINAM Sr. José Álvarez Alonso (derecha) y de la representante de la OEFA Sra. Mercedes Aguilar Ramos.

El 12 de diciembre, directivos y personal en pleno del INAIGEM fueron a la quebrada Llaca para celebrar el primer aniversario, con la firma del convenio interinstitucional entre el INAIGEM, la Casa de Guías de Montaña de Huaraz y el SERNANP; cuyo propósito es desarrollar investigaciones de glaciares y ecosistemas de montaña, y realizar capacitaciones a profesionales y técnicos en temas de nuestra competencia. Este acto protocolar se realizó en el dique de la mencionada laguna. Luego tuvo lugar una demostración de escalada en roca a cargo de los guías de montaña. La jornada culminó con un departir entre el personal del INAIGEM y los invitados.



Arriba; Guías de Montaña realizando una demostración. Abajo: Personal del INAIGEM e Invitados en celebración por el Primer Aniversario Institucional.

## EVENTOS ORGANIZADOS POR EL INAIGEM

El INAIGEM, como entidad de investigación en glaciares y ecosistemas de montaña, tiene entre sus funciones desarrollar programas educativos orientados a la capacitación, perfeccionamiento y especialización de investigadores, profesionales y técnicos en sus áreas de influencia, por lo cual -a través de sus órganos de línea- han organizado los siguientes eventos:

### Taller: Necesidades y Brechas de Información

Realizado en la Cámara de Comercio de Huaraz el 5 de enero del 2016, organizado por la Dirección de Información y Gestión del Conocimiento, cuyo objetivo fue recabar tipos de información y niveles de contenido que las diversas instituciones requieren en temas de glaciares y ecosistemas de montaña. Participaron instituciones como INDECI, SERNANP, ANA, CARE, Instituto de Montaña, Parque Nacional Huascarán, Duke Energy, Cáritas de Huaraz, EPS – Chavín, Gobierno Regional de Ancash, Facultad de Ciencias del Ambiente de la UNASAM, entre otras.



El Director de Información y Gestión del Conocimiento del INAIGEM Ing. Ricardo Villanueva iniciando el Taller.

### Taller para personal policial de medio ambiente

Se realizó en cuatro sesiones: los días 2, 23 y 25 de febrero, y el 9 de marzo del presente año. Los contenidos fueron impartidos por diversas instituciones que regulan la conservación del medio ambiente, como INAIGEM, ANA, SERNANP, OEFA y la Municipalidad

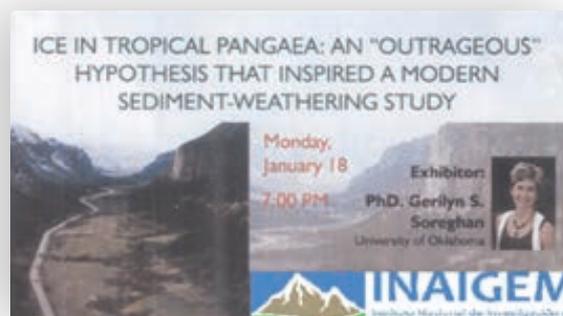
Provincial de Huaraz, cuyos especialistas disertaron sobre la protección y conservación del medio ambiente, el cambio climático y la gestión de riesgos.



Personal de la Policía Nacional de la Dirección de Turismo y Medio Ambiente participando del Taller en el INAIGEM

### Glaciación tropical en el Pangea Occidental

Conferencia dictada en la Biblioteca del INAIGEM por la Dra. Gerilyn S. Soreghan de la Universidad de Oklahoma, USA. Se llevó a cabo el 9 de enero del presente año.



### Estudio: Muestreo de Sedimentos de Origen Glaciar de las Subcuencas Parón (Lullán – Huaylas) y Llanganuco (Yungay)

Personal del INAIGEM integró el grupo de investigación liderado por la Dra. Gerilyn S. Soreghan de la Universidad de Oklahoma, USA, cuyo objetivo es relacionar las variaciones climáticas con el retroceso glaciar. Se llevó a cabo del 10 al 14 de enero del presente año.

## I Curso de Ciencia y Tecnología en las Cordilleras Tropicales

Llevado a cabo en el Centro de Investigación de Altura, en la Quebrada Llaca (Huaraz). Expusieron por el INAIGEM: el Ing. César Portocarrero y la Ing. Marlene Rosario; y por el CONCYTEC, la Sra. Tania Peña Baca, especialista en Ciencia y Tecnología Ambiental. El objetivo del curso fue “conocer los retos científicos y tecnológicos para la generación de conocimiento sobre las cordilleras tropicales, de modo que permita definir las prioridades de investigación científica”. Se llevó a cabo el 10 y 11 de marzo del presente año.



Personal del INAIGEM con los especialistas del CONCYTEC en el Centro de Investigación de Altura, en la Quebrada Llaca (Huaraz).

## Modelamiento de Flujo de Escombros (Aluviones)

Ponencia magistral a cargo del Ing. Julio Montenegro Gambini, docente de la Universidad Nacional de Ingeniería, con asistencia de especialistas, universitarios y público interesado. Se realizó el sábado 2 de abril de 2016.



## PARTICIPACIÓN DEL INAIGEM EN EVENTOS

### InterCLIMA 2015

Es el espacio anual de encuentro, intercambio y reporte para la gestión del cambio climático, liderado por el Ministerio del Ambiente. Esta versión se llevó a cabo en la ciudad del Cusco del 27 al 29 de octubre del 2015. Asistieron por el INAIGEM los ingenieros Marco Zapata Luyo y Ricardo Villanueva Ramírez.



Inauguración del Inter CLIMA 2015 (Cuzco)

### Curso: Instalación de Estaciones Meteorológicas de Alta Montaña

Realizado en la ciudad de Lima, en el local de SENAMHI, del 25 al 27 de noviembre de 2015, con técnicos de CARE y SENAMHI. Se capacitó al meteorólogo del INAIGEM, Sr. Ricardo Duran Mamani.

### Conferencia de las Partes: COP21

El Presidente Ejecutivo del INAIGEM, Ing. Benjamín Morales Arnao, participó en la reunión intergubernamental COP21, desarrollada en la ciudad de París (Francia), el 8 de diciembre de 2015. En este evento estuvieron representantes de 195 países miembros de las Naciones Unidas, así como representantes de la Unión Europea, agencias de cooperación, organizaciones indígenas, sociedad civil, observadores, entre otros. Como resultado se consensuó el “Acuerdo Climático Global”. El

documento, de 32 páginas, contiene las bases que definirán los siguientes pasos que el mundo dará en conjunto para hacer frente al fenómeno conocido como Cambio Climático, el cual ya se hace presente con el aumento de temperatura, la irregularidad en las estaciones, y la intensificación de riesgos de desastres, entre otros.



El Presidente Ejecutivo del INAIGEM como parte de la delegación peruana a la COP 21, en París (Francia)

### Stand del INAIGEM en la Feria Informativa y de Sensibilización ante el Fenómeno El Niño

Ante la inminencia de la llegada del Fenómeno del Niño al Perú, INDECI organizó una Feria Informativa el 10 de diciembre de 2015, en la Plazuela de Belén, Huaraz.

### Evento: Gestión Financiera Pública y Privada a Nivel de Gobierno Regional y Local en el Marco de Adaptación al Cambio Climático y Gestión de Riesgos de Desastres

Evento realizado en el Hotel La Joya (Huaraz), el 9 de enero de 2016. Participaron por el INAIGEM el Ing. Humberto Cuentas Checa del Área de Glaciares y la Ing. Marlene Rosario, de Ecosistemas de Montaña. El evento fue organizado por CARE.

### Donación bibliográfica del MINAM a la Biblioteca del INAIGEM

El pasado 20 de enero, el Ministerio del Ambiente, a través de su Biblioteca Ambiental (BIAM), realizó la donación de una importante colección bibliográfica ambiental a la Biblioteca del INAIGEM. La donación

constó de 100 publicaciones que incluían información editada por el MINAM, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP) y otras instituciones dedicadas al tema ambiental.



Viceministro de Gestión Ambiental, Mariano Castro Sánchez-Moreno, haciendo entrega de una importante colección bibliográfica para la Biblioteca del INAIGEM, al Director de Información y Gestión del Conocimiento Ing. Ricardo Villanueva, al Ing. César Portocarrero y al Ing. Julio Ocaña.

El Viceministro de Gestión Ambiental, Mariano Castro Sánchez-Moreno, fue el responsable de hacer la entrega al Director de Gestión del Conocimiento, Ricardo Villanueva. El evento, realizado en las instalaciones de la Biblioteca del MINAM, contó también con la presencia del Responsable de Biblioteca y Publicaciones, Sr. Giber García, así como de las siguientes autoridades del INAIGEM: César Portocarrero, Director de Investigación en Glaciares, y David Ocaña, Director de Ecosistemas de Montaña. (Fuente: Portal MINAM).

### Inauguración del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación del IGP

El 28 de enero del presente año, el Ing. Ricardo Villanueva del INAIGEM estuvo presente en la inauguración del Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación del Instituto Geofísico del Perú, con sede en Huancayo. Éste es un moderno laboratorio que tiene la finalidad de estudiar los procesos físicos asociados a la formación de nubes y precipitaciones, y de esta manera validar modelos atmosféricos que serán usados para la estimación del Cambio Climático.



El Director de Información y Gestión del Conocimiento del INAIGEM en la inauguración del laboratorio en Huancayo

### Ponencia: Cambio de cobertura vegetal, uso de suelo, erosión y sedimentos y su impacto en la infraestructura civil y energética en cuencas hidrográficas

Ponencia a cargo de la especialista en temas de ecosistemas Sra. Veerle Vanacker de la Universidad de Louvain (Bélgica), capacitación organizada por CARE con la participación del Ing. Gabriel Martel Valverde. Se llevó a cabo el 6 de febrero de 2016.

### Visita técnica para conocer la tecnología drone del Centro Internacional de la Papa

El 23 de febrero del año en curso, los Ingenieros del INAIGEM, Ricardo Villanueva y Helder Mallqui, visitaron el Centro Internacional de la Papa, en Lima, con el objetivo de profundizar conocimientos técnicos sobre tecnología de los drones y su aplicación en investigaciones de glaciares y ecosistemas de montaña.

### Reunión Técnica de Bibliotecas del Sector Ambiental

Con el objetivo de conformar la Red de Bibliotecas del Sector Ambiental, el 8 de marzo del presente año, en el local del MINAM, se desarrolló una reunión técnica de los encargados de las diversas bibliotecas de los órganos adscritos al Sector, obteniendo información sobre la realidad y perspectivas de estas unidades de información. La participación del Bibliotecólogo del INAIGEM, Giber García Álamo fue importante para precisar temas técnicos y organizacionales de la futura Red.



Personal de las Bibliotecas del Sector Ambiental luego de las exposiciones para determinar el estado situacional de las Bibliotecas

### IV Congreso Mundial de Reservas de Biosfera

Organizado por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) y el Programa sobre el Hombre y la Biosfera de la UNESCO, se llevó a cabo en la ciudad de Lima el IV Congreso Mundial de Reservas de Biosfera. El Congreso abordó diferentes temáticas relacionadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y de la Agenda de Desarrollo post 2015, como la educación para el desarrollo sostenible, la viabilidad económica de sistemas de protección de la naturaleza, las migraciones humanas y la protección de los recursos naturales, entre otras. Se llevó a cabo del 14 al 17 de marzo de 2016. Asistió por el INAIGEM la Ing. Marlene Rosario, de Ecosistemas de Montaña.



Ministro del Ambiente Ing. Manuel Pulgar Vidal tomando la palabra en la inauguración del Evento

### Conferencia: Buenas Prácticas en Recuperación de Áreas Degradadas

El 15 de marzo, en las oficinas del SERFOR, el Dr. Julio Alegre, consultor FAO, ofreció esta magistral conferencia, con la participación de muchos especialistas, entre los que se encontraba el Ing. Jaime Rosales Pereda del INAIGEM.

## Jornada de Acercamiento a la Población: Stand informativo del INAIGEM

El 19 de marzo del presente año, la Fiscalía Provincial de Huaraz llevó a cabo, en el Colegio Nacional de La Libertad, una jornada de acercamiento a la comunidad con la participación de diversas instituciones públicas y privadas. El INAIGEM estuvo presente con charlas y demostraciones.



Especialistas del INAIGEM en la Jornada de Acercamiento a la Población.

## Asamblea General de Miembros del Comité de Gestión del Parque Nacional Huascarán

Los ingenieros David Ocaña y Marlene Rosario representaron al INAIGEM ante esta Asamblea, realizada el 31 de marzo de 2016, en el SENASA (Huaraz). El evento fue organizado por el Parque Nacional Huascarán.

## CONVENIOS INTERINSTITUCIONALES ESTABLECIDOS

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, para cumplir con sus objetivos, ha suscrito convenios con las siguientes instituciones:

### Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo - UNASAM

Para la operatividad de 16 estaciones meteorológicas, equipos de teledirección y monitoreo ambiental distribuidas en el Departamento de Ancash, así como para emitir información meteorológica y los respectivos pronósticos, a través de los medios de difusión pública. Convenio firmado el 15 de Julio de 2015.



Rector de la UNASAM Ing. Julio Poterico Huamayalli y el Presidente Ejecutivo del INAIGEM Ing. Benjamín Morales Arnao, en la firma del Convenio Marco

### Centro Internacional de la Papa - CIP

Para desarrollar investigaciones específicas sobre la preservación y mejora genética de tubérculos de alta montaña y otros. La Directora General del CIP, Bárbara H. Wells y el Presidente Ejecutivo del INAIGEM, Ing. Benjamín Morales Arnao firmaron el acuerdo en la ciudad de Lima el 7 de diciembre del 2015.



### Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SERNANP

Para contribuir en investigaciones sobre ecosistemas que alteren las áreas protegidas a nivel nacional. El convenio fue suscrito por el Ing. Nonally Pedro Gamboa Moquillaza del SERNANP, el 11 de Diciembre de 2015.



El Presidente Ejecutivo del INAIGEM Ing. Benjamín Morales Arnao y el Ing. Nonally Pedro Gamboa Moquillaza, del SERNANP firman el Convenio Marco.



### Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI

Con el objeto de fortalecer los procesos de preparación, respuesta y rehabilitación a emergencias de desastres por glaciares y ecosistemas de montaña, con la información científica generada por el INAIGEM. Convenio firmado el 29 de Diciembre de 2015.



El Presidente Ejecutivo del INAIGEM Ing. Benjamín Morales Arnao y el General de División (R) Alfredo E. Murgueytio Espinoza, Jefe del INDECI en la firma del Convenio Marco

### Asociación de Guías de Montaña del Perú – AGMP y el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado – SERNANP

Para utilizar el campamento de formación de Guías de Montaña como Centro de Investigación de Altura a 4500 msnm, con la finalidad de coadyuvar a la capacitación y formación de profesionales, estudiantes y otros de instituciones públicas, privadas y organizaciones de base, en materia de investigación en glaciares, lagunas y ecosistemas de montaña. Por la AGMP firmó su Presidente Rafael Saturnino Figueroa Chávez, el 11 de Diciembre de 2015.

## CONVENIOS INTERINSTITUCIONALES EN PROCESO

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) está realizando coordinaciones orientadas a suscribir convenios con las siguientes instituciones:

### Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

Para establecer los acuerdos y mecanismos necesarios para la gestión de la información ambiental institucional, específicamente en los aspectos de fomento de la investigación y la prevención de riesgos y desastres de origen natural y antrópico de manera integrada, consensuada y basada en información válida y en tiempo real.



### Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI

Para establecer los acuerdos y mecanismos necesarios para la gestión de la información ambiental institucional, específicamente en los aspectos hidrometeorológicos y de alerta temprana para la prevención y gestión de riesgos ambientales; fortaleciendo la toma de decisiones frente a los riesgos de desastres climáticos y de origen antrópico y de manera integrada, consensuada y basada en información válida y en tiempo real.



### Instituto Geofísico del Perú – IGP

Para establecer los acuerdos y mecanismos necesarios para la gestión de la información ambiental, específicamente en los aspectos de fomento de la

investigación y la prevención de riesgos y desastres de origen natural y antrópico con el fin de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones.



### ELECTROPERU

Para la formulación de los estudios y la investigación aplicada en el tema de los glaciares de montaña para la gestión de la sostenibilidad de las zonas de amortiguamiento que aseguren la calidad y cantidad del recurso hídrico para el uso de la generación de energía. Así mismo, para realizar estudios y monitoreo de glaciares de montaña, con el fin de prevenir y tomar las medidas necesarias para disminuir los riesgos y la vulnerabilidad de los ámbitos comunes de trabajo.



### Mancomunidad Municipal WARAQ

Para establecer mecanismos de cooperación a través de una alianza estratégica para la investigación, formulación, implementación y/o ejecución de planes, programas, proyectos y actividades relacionadas con los objetivos de las dos instituciones suscribientes.



The image features a background of thin, light gray diagonal lines. A solid blue horizontal band is positioned in the center, containing the text 'INVESTIGACIONES RETROSPECTIVAS' in white, uppercase, sans-serif font.

# INVESTIGACIONES RETROSPECTIVAS

## PRIMERAS INVESTIGACIONES GLACIOLÓGICAS EN EL PERÚ

*Por Benjamín Morales Arnao*

*Tenemos a la vista el Boletín Oficial del Instituto Nacional de Glaciología, la Institución creada por Resolución Suprema N° 434 del 17 de mayo del año 1967.*

*Revisando el contenido de los artículos de este Boletín, encontramos que éstas describen los primeros estudios de glaciología que se efectuaron en Latinoamérica hace más de 49 años, en el glaciar de Pukahirca y en la laguna de Safuna.*

*El recuento de las investigaciones realizadas nos muestra estudios pioneros y avanzados sobre la fusión del glaciar Pukahirca, de perforaciones rotativas en la lengua glaciar, de levantamientos geofísicos, batimetrías y levantamiento fotogramétrico de la Cordillera Blanca, formación de lagunas y buceos de profundidad en la laguna de Parón.*

*Considerando de gran interés y actualidad estas investigaciones, volveremos a reeditar alguno de estos artículos, como el extracto del libro “Cordillera Blanca” de Hanz Kinzl. Todos ellos han de aportar a las investigaciones venideras en las áreas de glaciares y ecosistemas de montaña.*

## LAS LAGUNAS Y GLACIARES DE LA CORDILLERA BLANCA Y SU CONTROL

Benjamín Morales Arnao

### Abstract

*At 15 km north of nevado Champará, we have the mountain group of Rosko, 10 km long. This group has identical formation that of the Cordillera Blanca. By this reason it is discuted that the Cordillera Blanca doesn't has only 180 km long but it would has 205 km. From Conococha till Rosko group.*

*Excluding of 30 small lakes of the Rosko group in the Cordillera Blanca massive there are 261 lakes, with dams of moraine material, of rocks or of rock-fall cones.*

*In the last years there has been produced 5 avalanches with destructives means. It is described the story of the studies in the lakes and the possibility of control. In the same way they are presented the institutions that conduct studies of the lakes and glaciers, and the different studies of relations between them.*

### LAGUNAS DE LA CORDILLERA BLANCA Y SUS PROBLEMAS CONEXOS

Clásicamente, a la Cordillera Blanca se le considera de una extensión de 180 km, que corre paralelamente al río Santa, desde la laguna de Conococha en el Sur hasta el nevado Champará en el Norte. Pienso que en realidad la Cordillera Blanca debería terminar a 15 km al Norte del Champará en el grupo de nevados Rosko. Este grupo Rosko tiene glaciares que drenan sus aguas sobre lagunas de las cuencas de Chuquicara y Mantas, afluentes del río Santa. El grupo Rosko tiene 10 km de longitud, guarda la misma orientación geográfica y tiene igual conformación geológica que el macizo de la Cordillera Blanca.

En esta enorme superficie, fuera del grupo Rosko que encierra 30 lagunas, la Cordillera Blanca tiene 261 lagunas originadas por los deshielos de los numerosos glaciares de las partes altas. De entre ellas, 188 están en la cuenca del Santa y las 73 restantes en la cuenca del Marañón.

Entre 1938 a 1951 se produjeron cinco aluviones de efectos destructivos, ellos han causado la devastación de terrenos de pastoreo, de zonas cultivadas, de vías de comunicación, de obras diversas de gran valor económico y por último, de pueblos y pérdida de miles de vidas en el valle del Santa.

El problema de la formación de las lagunas glaciares, de sus efectos destructivos y del control que se tiene de ellas, es un fenómeno netamente

peruano, es decir que, a pesar de haber áreas glaciares en las diferentes latitudes de la tierra, solo en nuestro país tenemos el delicado problema de las lagunas glaciares a esta escala.

El conocimiento de las áreas glaciares, de sus lagunas y de la peligrosidad que ellas guardan se inicia en buena cuenta solo después del 13 de diciembre de 1941, fecha en que se produjo la mayor catástrofe en la historia de la humanidad producida por efectos de las masas de hielo y de las aguas de fusión de los glaciares. A las 6 am de ese día fatal, las lagunas glaciares superpuestas de Palcacocha y Cojup se vaciaron sobre la ciudad de Huaraz, destruyéndola en gran parte y causando la muerte de unas 5,000 personas en Huaraz y el valle inferior del Santa.

Entre los años 1932 y 1940, una expedición austro-germánica, dirigida por el Profesor Dr. Hans Kinzl, efectúa una serie de interesantes estudios geográficos y cartográficos en toda la Cordillera Blanca y en el Valle del Santa. Como producto de estos trabajos, editan el año 1950 un hermoso libro "Cordillera Blanca", publicada en alemán, inglés y español con 119 incomparables fotografías de diversos aspectos del valle del Santa. Son de especial importancia los ejemplares mapas fotogramétricos de toda la zona a escalas 1: 200,000 y 1: 100,000.

Recién después de la catástrofe de Huaraz en diciembre de 1941, el Gobierno Peruano crea

una entidad oficial dependiente del Ministerio de Fomento. Esta nueva entidad, con un personal adecuado y un presupuesto que la respalda, inicia el catastro sistemático de las lagunas y glaciares

de la Cordillera Blanca. Al mismo tiempo, inician el vaciado de las lagunas consideradas peligrosas por tener diques morrénicos de fuerte pendiente, lenguas glaciares terminales en contacto con el espejo de

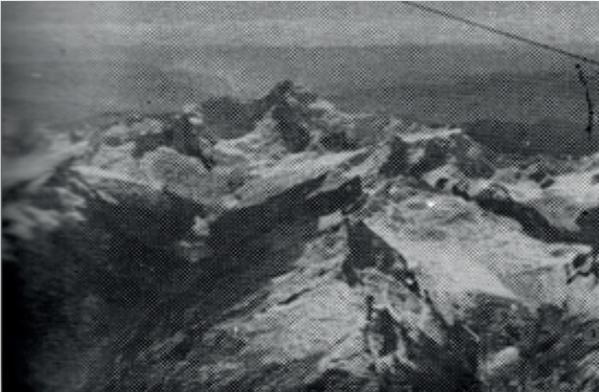


Foto 1. Vista aérea de la laguna glaciar de Rajucolta al pie oeste del Nevado Huantsán. Tiene dique morrenico y contacto glaciar.



Foto 2. Laguna glaciar rodeada de paredes de hielo, cubiertas de detritus morrenicos. Un bloque de hielo desprendido de la lengua glaciar junto al bote de sondaje.



Foto 3. Conductos de descarga cubiertos y dique reconstituido.

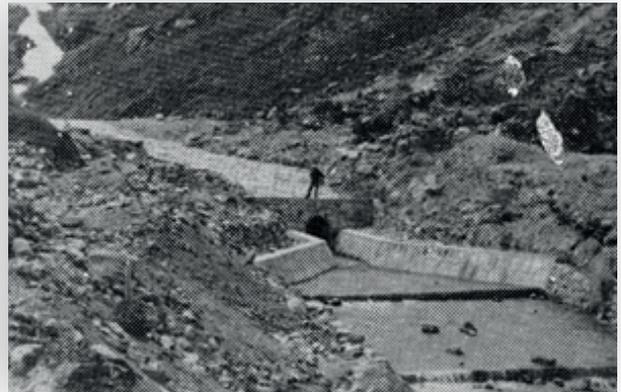


Foto 4. Detalle de la construcción de un conducto cubierto.

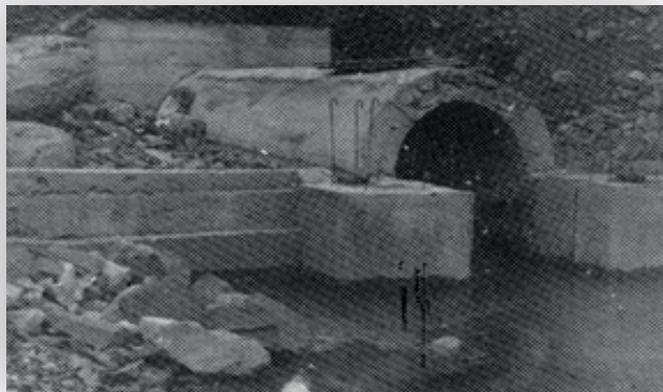


Foto 5. Detalle de la construcción de un conducto cubierto.

agua, taludes morrénicos de fuerte pendiente o bien glaciares colgados que podrían producir avalanchas catastróficas sobre las lagunas (fotos 1 y 2). El vaciado y posterior control es efectuado por medio de adecuados cortes en sus diques morrénicos hasta el

el espejo de agua y luego el desagüe medido, no mayor de 20 cm/día, hasta un nivel predeterminado, para luego construir conductos cubiertos (foto 3) que evacuen sin mayor problema el agua de las lagunas y garanticen la no elevación de su nivel.

Estos conductos cubiertos terminan en rápidas enlozadas que evitan así la erosión (foto 4).

Estos trabajos civiles de seguridad, han sido perfeccionados con los años, sobre todo en la solidez y mayor sección del conducto cubierto de descarga; siendo usual en la fecha construir conductos de descarga de 1.80 m de alto por 1.20 m de ancho (foto 5).

En enero de 1966, la Corporación Peruana del Santa, empresa paraestatal de electricidad y desarrollo del valle del Santa, crea el Departamento de Estudios Glaciológicos. Desde esa fecha hasta el presente, se inician las investigaciones glaciológicas y de geología glaciar en la Cordillera Blanca, con el fin de tener un conocimiento más real de la dinámica de las masas de hielo y de los efectos que ellas puedan producir. Con tal propósito la C.P.S. ha efectuado por primera vez en el país:

- a) Estudios Geofísicos en los glaciares de Parón y Pucahirca así como en las morrenas del dique de Parón y Safuna.
- b) Perforaciones rotativas en el glaciar del Pucahirca.
- c) Perforaciones rotativas en las morrenas del dique de la laguna de Safuna y Parón.
- d) Perforaciones térmicas en los glaciares de Pucahirca (norte de la C.B.) y Uruashraju (sur de la C.B.).
- e) Estudios de ablación de los glaciares de Pucahirca y Uruashraju.
- f) Control topográfico del movimiento de los glaciares de Pucahirca y Uruashraju así como de las morrenas del dique de Safuna.
- g) Batimetría con Eco-Sonda de más de 12 lagunas glaciares.
- h) Levantamiento fotogramétrico a escala 1: 25,000 de toda la Cordillera Blanca efectuada por el SAN.
- i) Control de descarga de la laguna de Safuna y Parón.
- j) Instalación de un observatorio meteorológico de 2do orden en la cuenca glaciar de Safuna.
- k) Reconocimiento de carácter Geológico-Glaciológico en 20 cuencas glaciares, con fines de represamiento y seguridad.
- l) Reconocimientos regionales en avión y helicóptero de las lagunas glaciares.

La Corporación Peruana del Santa en el año 1967 contrató a la firma consultora francesa Coyne et Belier, para que asesore en los problemas técnicos de seguridad y desagüe de las lagunas Parón y Safuna. Forma parte del plantel consultor el Dr. Prof. Luis Lliboutri, glaciólogo ampliamente conocido en el

ámbito internacional.

Desde 1969 a la fecha, se está trabajando en estrecha colaboración con la Comisión de las Lagunas de la C.B., a la cual se le proporciona los estudios y asesoría necesaria para los diversos problemas de seguridad de lagunas. A la fecha, la comisión de lagunas está efectuando trabajos de seguridad en las lagunas de Safuna en íntima colaboración con el C.P.S.

En mayo de 1967 el Gobierno central con muy buen criterio y por gestiones del Senador Dr. Carlos Alberto Izaguirre creó el Instituto Nacional de Glaciología. Los fines de este Instituto son los de promover la investigación glaciológica en la Cordillera Blanca y demás Cordilleras peruanas, con fines de seguridad, en previsión de futuras catástrofes de origen glaciar y de aprovechamientos industrial; es decir de efectuar investigaciones de las reservas de hielo como potencial hídrico para el aprovechamiento de agua en la producción de energía eléctrica e irrigación. Asimismo, ofrecer anualmente cursillos y prácticas de campo para postgraduados, estudiantes universitarios y técnicos en la materia. Con las posibilidades económicas que nos permitan, estamos efectuando algunos estudios en colaboración con la C.P.S., sosteniendo además a algunos estudiantes universitarios de prácticas.

Desgraciadamente, a pesar de haberse confeccionado presupuestos apropiados para que cumpla sus fines, el Gobierno le ha asignado sumas ínfimas con las que no puede auspiciar investigaciones serias. Esperamos que en el futuro se dé mayor importancia a esta rama de investigaciones y se le dote de un presupuesto funcional que permita el descubrimiento del rol que desempeñan nuestras masas de hielo en nuestro extenso territorio patrio.

En el año 1964, participamos en la reunión intergubernamental del Decenio Hidrológico Internacional, celebrada en la UNESCO (París). En esa fecha se acordó realizar investigaciones hidrológicas a escala mundial durante 10 años a partir de 1965. El gobierno del Perú interviene en este Decenio Hidrológico, habiéndose constituido un Comité Peruano del D.H. I. Dentro del Comité Peruano, una de las comisiones formadas es la de Glaciología, y como Institución responsable de los estudios está el Instituto Nacional de Glaciología, a ocuparse de todos los estudios que se efectúen sobre los diversos aspectos de la Glaciología y sus ciencias afines. Los estudios glaciohidrológicos de la C.P.S. y otras entidades, serán entregados al Instituto de Glaciología para la presentación al Comité Peruano del Decenio Hidrológico Internacional, a fin de que éste a su vez los presente a la UNESCO, en París.

## ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA LENGUA GLACIAR DEL PUCAHIRCA Y DE LA LAGUNA SAFUNA

Benjamín Morales Arnao

### Resumen

*Teniendo en cuenta que, por influencias de las condiciones meteorológicas reinantes en los últimos años, se están produciendo cambios notables en las masas glaciares de nuestras cordilleras nevadas, presentamos un estudio comparativo de algunas de las consecuencias que afectan al cambio de los campos de hielo, cual es la formación de la laguna de Safuna Alta, las alteraciones que se producen en ella y la reducción del volumen del ventisquero del Pucahirca Norte, situado en una quebrada transversal del valle del Santa inferior, 77° 37' W y 8° 50' Sur.*

*Se ha llegado a realizar esta investigación sobre la base del examen de las fotografías aéreas tomadas los años 1948-1950, 1962-1963 y 1966; del estudio de las fotos tomadas desde helicóptero en los años 1964 y 1967 y en fin apoyándose en las inspecciones terrestres efectuadas en los años 1951, 1966 hasta el presente por ingenieros de la Corporación Peruana del Santa, Oficina Control de Lagunas Cordillera Blanca y miembros de la firma consultora francesa Coyne et Bellier.*

*Se presenta además un resumen de los estudios efectuados entre 1967 al presente en la laguna de Safuna y alrededores, así como de la obra de seguridad que se está efectuando en el presente.*

### INTRODUCCIÓN

No se tiene conocimiento en parte alguna de los Andes Peruanos, de un ejemplo de ablación tan acelerada de una lengua glaciaria y de un crecimiento a ritmo tan violento de una laguna glaciaria como en el caso de la lengua glaciaria del Pucahirca Norte y de la laguna de Safuna Baja. Foto 1.

La Corporación Peruana del Santa, teniendo en cuenta el peligro que significa esta laguna en crecimiento para las obras hidroeléctricas del Cañón del Pato y para el valle inferior del Santa, ha decidido efectuar los trabajos de seguridad pertinentes en colaboración con la Comisión de Lagunas de la C.B. y con la asesoría de la firma consultora Coyne et Bellier. Para este efecto, el cuerpo técnico de Ingenieros de la C.P.S. y de la Comisión de Lagunas ha efectuado

una serie de estudios de gran valor científico, ya que todos ellos han sido realizados por primera vez en territorio peruano. Como consecuencia de estos estudios, los consultores franceses han propuesto hacer como primera obra de seguridad, un túnel a nivel de agua, que impida el aumento de cota de esta laguna. En el momento, esta obra está en pleno proceso de ejecución a través de la morrena frontal del dique de Safuna Alta, con un avance a la fecha de 80 m sobre un total de 115 m lineales.

Pensamos que este túnel a nivel no será suficiente para conjurar el peligro de Safuna Alta y que serán necesarias obras adicionales sobre todo en el margen izquierdo de su dique.

## ESTUDIO COMPARATIVO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CUENCA GLACIAR DEL PUCAHIRCA NORTE

A través del estudio que se hace de las fotografías aéreas tomadas entre 1950 y 1967 y de las inspecciones terrestres efectuadas hasta el presente, hemos llegado al siguiente resultado:

### 1) Laguna de Safuna Baja N° 29

Esta es una laguna que tiene 16 hectáreas de superficie, con una profundidad de 17 metros y un volumen de 1 ½ millones de m<sup>3</sup>. Por el estudio efectuado, vemos que el nivel de esta laguna ha aumentado algo, lo cual queda demostrado observando un pequeño espolón morrénico que se introduce dentro de la laguna en los años de 1950 a 1963, en el año de 1966 está más sumergido dentro del agua. Esto nos indica un aumento del nivel de agua, producido ya sea porque esta laguna está recibiendo ligeramente un mayor volumen de agua de la que ella desagua o que el volumen de agua que desaloja se ha reducido últimamente. El desagüe de esta laguna se efectúa por filtración, saliendo los ojos de agua a unos 700 m. de Safuna Baja. Al parecer el dique morrénico que cierra a esta laguna no ha sufrido alteraciones notables en su morfología y constitución. Por la naturaleza de su dique, esta laguna considerada individualmente, es catalogada como segura; a ella desagua sus aguas la laguna de Safuna Alta, considerada sí de peligro.

### 2) Lengua Glaciar de Pucahirca Norte y Laguna de Safuna Alta (29a).

Por el estudio de las diferentes fotografías aéreas y de las inspecciones del campo, se puede seguir paso a paso los cambios operados en ellos.

En el año 1950 (foto 2) nos encontramos con una lengua glaciar de pendiente moderada que baja del nevado Pucahirca, la cual en su tramo medio e inferior está cubierta por considerable cantidad de detritos que disimulan la existencia de hielo. Desde el punto de vista morfológico se observa una topografía típicamente karstica, con grandes oquedades y una que otra lagunilla sin mayor importancia.

Este glaciar está limitado por un importante arco morrénico que la cierra, presenta un talud interior de regular pendiente y talud exterior con casi 45° de inclinación en cual termina dentro de la laguna Safuna Baja. Este inmenso talud morrénico desde su coronación hasta el espejo de agua del lago inferior tiene una diferencia de altura de más de 150 m.

En la fotografía del año 1963, (foto 3) encontramos los siguientes cambios en la masa y glaciar del Pucahirca:

- a) Un considerable volumen de hielo de la margen derecha de este glaciar ha desaparecido por la fusión de sus masas, habiendo sido reemplazado este espacio por una laguna que en menos de trece años ha adquirido muy regulares dimensiones (300 m de largo por 200 m de ancho). Se nota que esta laguna está limitada casi en todos sus frentes por elevadas paredes de hielo sucio.
- b) La inclinación de las paredes interiores del arco morrénico se ha acentuado por asentamientos en la masa glaciar y por el reemplazamiento de agua por el hielo en el flanco derecho de esta cubeta glaciar.

En la misión de junio de 1966 (foto 4), se tiene notables cambios en cuanto a forma y dimensiones alcanzadas tanto por la lengua glaciar como por la laguna en plena etapa de evolución, pudiendo precisarse los siguientes rasgos:

- a) Lengua Glaciar del Pucahirca Norte: El frente glaciar ya no llega hasta la morrena frontal como en la foto de 1963. Ahora el glaciar termina abruptamente con elevados.
- b) escarpes de hielo sobre una laguna de muy regulares dimensiones en un ancho de 300 m. Solo el flanco izquierdo de esta lengua glaciar en forma casi continua llega hasta la morrena frontal que sirve como dique a la laguna en crecimiento. Entre el frente glaciar propio y su prolongación del flanco izquierdo se ha formado una pequeña bahía de forma circular, cerrada por 2 puntas de la masa glaciar.
- c) **Laguna 29<sup>a</sup>**: En el lapso de solo 3 años esta laguna ha aumentado notablemente sus dimensiones y volumen a lo largo y ancho de todos sus frentes. La modesta laguna del año 63, se ha convertido ahora en una amenazadora laguna de casi 500 m de largo por cerca de 300 m de ancho y 80 m de profundidad.
- d) A todo lo largo del flanco izquierdo en esta cubeta glaciar, se nota una gran masa de hielo que está rodeada en sus tres flancos por el agua, lo cual indica que ésta será atacada velozmente por la fusión y desaparecerá en un término de pocos años.

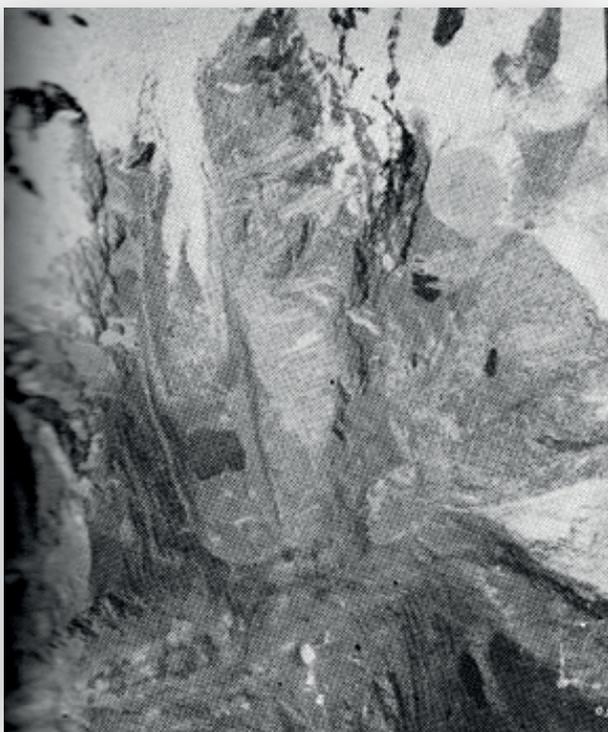


Foto 1. Tomada por el SAN el 7/8/50. Se notan los siguientes: a) Se distingue dos morrenas cerradas por sus respectivos frentes. b) El estadio inferior ha cerrado dentro de sus morrenas una laguna (Safuna Baja N 29) de 16 hectáreas de superficie y 17 metros de profundidad con 1 millón y medio de m<sup>3</sup>. c) Dentro del arco morrénico superior, está limitada la laguna glaciar terminal del nevado Pucahirca. d) Esta lengua glaciar presenta una superficie bastante convulsionada, con una serie de oquedades, puntas y una que otra insignificante lagunilla.



Foto 2. Del IGM tomada el 23/6/63. Esta foto comparada con la de 1950, nos muestra los siguientes rasgos: a) La laguna Safuna Baja N°29 no ha sufrido ningún cambio. b) La lengua glaciar del Pucahirca ha sufrido notables cambios. Una parte bastante considerable del glaciar del flanco derecho se ha derretido habiéndose formado una laguna de unos 300x200 m (Safuna Alta 29 a) la cual está limitada en todos sus frentes por elevadas paredes de hielo sucio. c) La inclinación del talud interior que encierra a este glaciar cubierto, está aumentando por efecto del asentamiento de las masas de hielo y por la formación de esta laguna.



Foto 3. Del SAN tomada el 23/6/66. Comparando esta fotografía con las anteriores, vemos que se han producido notables cambios: a) La laguna de Safuna Baja (29) ha aumentado su nivel, lo cual está demostrado por la desaparición bajo las aguas de una pequeña punta que se notaba en 1950 y 1962.

- e) Los taludes morrénicos interiores van emergiendo cada vez más su pendiente.
- f) Se puede observar con mayor detalle que esta laguna desagua sobre la Baja, en mayor volumen sobre su margen derecha a través del dique morrénico y por algunas filtraciones.

Como resultado de estos estudios en las fotografías aéreas, se concluyó en la peligrosidad de esta laguna sujeta a un reconocimiento terrestre. Esta inspección se realizó en setiembre 1966 y corroboró plenamente la peligrosidad de Safuna Alta para la seguridad de la Central del Cañón del Pato y del valle inferior del Santa.

Como resultado de estas conclusiones se decidió contratar a la firma consultora francesa Coyne et Belier, que trajo dentro de su plantel consultor al Prof. Dr. Luis Llibourtri, conocido glaciólogo internacional.

De esta manera, a partir de 1967 se inició una serie de estudios de precisión efectuados por profesionales peruanos, para conocer en detalle el comportamiento del glaciar de Pucahirca, de la laguna de Safuna Alta y de su dique morrénico. (Foto 5).

## RESUMEN DE LAS INVESTIGACIONES EN LA CUENCA DE SAFUNA

### 1) Batimetría

Se han efectuado tres batimetrías; una en 1967, otra en 1968 y la última en marzo de 1969. La primera batimetría fue efectuada con el cordel y el escandallo; las 2 últimas con Eco-Sonda, del tipo usado por los pesqueros en el mar. Esta Eco-Sonda demostró ser muy apropiada para esta clase de trabajos de altitud. Los levantamientos batimétricos nos dieron una profundidad máxima de 80 m con un volumen de 5´000,000 de m<sup>3</sup>.

Además de estas batimetrías completas de toda la laguna, también se han efectuado controles batimétricos parciales en el caso del examen de las formas de la pared de hielo dentro del agua en los contactos de las lagunas con el glaciar del Pucahirca, donde se orientaba la Eco-Sonda en determinados ángulos, a partir de la horizontal para así tener todo el perfil de la pared de hielo. Este examen fue muy satisfactorio ya que en todos los casos nos mostró la forma de las paredes de hielo dentro del agua, que en general resultó casi vertical. Además, se hicieron controles parciales de la zona de entrada del túnel a nivel.

Entre las batimetrías efectuadas en 1968 y 1969 se han encontrado interesantes diferencias. En el lugar donde en 1968 tenía la laguna una profundidad máxima de 80 m, en el mismo punto se tiene cerca de 30 m de profundidad; y donde en 1968 solo había 30 m, en 1969 se encontró cerca de 80 m de profundidad. Esto muestra que mientras en un sitio se ha profundizado por desprendimientos del fondo de masas de hielo, en otros sitios ha habido relleno o empujes.

### 2) Trabajos Topográficos

Las brigadas han desarrollado un trabajo sumamente activo, estas han sido compartidas entre los topógrafos de la Comisión de Lagunas y los de la C.P.S. Entre los trabajos que han desarrollado y desarrollan, se tiene:

- a) Levantamiento topográfico de la cuenca de Safuna, hasta la parte intermedia de la lengua glaciar – Escala 1:5,000 y 1:2,000.

- b) Levantamiento en detalle de partes de la morrena frontal para la galería de control, Escala 1:500.
- c) Levantamiento en detalle de partes de la morrena frontal, para la galería de control, Escala 1:500.
- d) Control bimensual de movimiento de la lengua a partir de 12 estacas de ablación y control del movimiento de las morrenas del dique.

### 3) Sondajes Geofísicos

Los sondajes geofísicos estuvieron a cargo del Ing. José Arce H., quien efectuó estos trabajos por los métodos sísmicos en sus técnicas de refracción y reflexión y el de resistibilidad eléctrica.

Para el sondaje efectuado en la lengua glaciar, se obtuvo una profundidad cercana a los 150 m, ésta casi ha chequeado con la perforación rotativa en esta misma zona, que alcanzó una profundidad de 154 m, pudiendo estar la roca base entre los 160 y 170 m.

Los sondajes sísmicos sobre las morrenas, tanto del dique de Safuna Alta como de Safuna Baja nos han permitido delinear aproximadamente el perfil del lecho rocoso. Se ha encontrado sobre la coronación del dique de Safuna Alta una potencia de material morrénico superior a los 200 m.

### 4) Perforaciones

Se han efectuado tres tipos de perforaciones en el área: a) Perforaciones rotativas a cargo de la compañía contratista del Ing. O. Jacobs. b) Perforaciones térmicas a cargo del personal especializado de la C.P.S. y c) Perforaciones Mecánicas a mano a cargo del personal especializado de la C.P.S.

#### A) Perforaciones rotativas

Con el propósito de determinar la profundidad del lecho de roca y de conocer el espesor del glaciar se ha efectuado una perforación rotativa sobre el glaciar del Pucahirca con gran éxito, habiéndose terminado la perforación en solo 72 horas, alcanzando una profundidad de 505' (pies), o sea 154 m.

En el dique morrénico se iniciaron 6 perforaciones rotativas con el fin de investigar la naturaleza del dique de la laguna de Safuna Alta y de conocer la profundidad del lecho de roca, desgraciadamente, estas perforaciones han cumplido su cometido solo en parte, ya que no se pudo cumplir con el programa propuesto en casi ninguna de ellas por las grandes dificultades técnicas encontradas durante el curso de la perforación.

**B) Se han efectuado 12 perforaciones térmicas**

En el glaciar del Pucahirca (foto 6) con el fin de colocar en ellas las estacas de ablación y de efectuar en éstos el control del movimiento glaciar. En 18 horas se efectuó una perforación acumulada de 113.80 m con una perforación de 9.50 m efectuada en solo 16 minutos.

**C) Perforaciones rotativas a mano**

En la maestranza de la C.P.S. se construyeron dos juegos de tuberías para perforadoras en hielo a mano, con las cuales se ha estado efectuando perforaciones ocasionales para reemplazar a las estacas desaparecidas o rotas que habían sido colocadas en los huecos hechos con la perforadora térmica.

**5) Estudios de Ablación**

Con el propósito de efectuar un estudio del balance de masas del glaciar de Pucahirca, es decir, de conocer el volumen de hielo que se derrite y el que se acumula por año, hemos iniciado en abril de 1968 el estudio de la ablación de la lengua glaciar. Por el momento todavía no efectuamos el estudio de la acumulación, por lo tanto solamente nos concretamos a la ablación o pérdida anual de hielo en este glaciar. Se efectúa un control semanal de 11 estacas de ablación, habiendo obtenido hasta el 23 de abril de 9'477,562 m<sup>3</sup> de hielo. Este volumen multiplicado por la densidad de hielo en este glaciar que es 0.88 nos da un equivalente en agua de 8'350,252 m<sup>3</sup>, que el glaciar en esta parte evacúa en 12 meses.

Hay que remarcar que este volumen de agua es evacuado solo en 1.4 km de la parte

final de la lengua glaciar. En el futuro, con estudios más completos, daremos datos más detallados sobre el balance de masas.

Se ha encontrado una gradiente de ablación de más de 2 m de hielo por cada 100 m de diferencia de nivel en esta lengua glaciar.

**6) Control de la descarga de Safuna Alta y de las variaciones del Espejo de Agua**

Con el propósito de conocer el régimen de descarga de la laguna de Safuna Alta, se han construido 4 vertederos que reúnen más del 97% de las aguas de filtración visibles de la laguna de Safuna Alta. En estos vertederos se controlan los aforos en forma diaria entre 11 am y 12 m. Estos vertederos nos servirán también para controlar los estudios de ablación que estamos realizando, ya que el agua que sale de aquí es en gran parte el producto de la ablación del glaciar del Pucahirca, más el hielo que se derrite al contacto con el espejo de agua en casi la mitad del perímetro de la laguna y por supuesto más las aguas de precipitación en la época de descargas (Foto 7).

A la fecha se ha observado que el control nos da el siguiente resultado:

- Descarga mínima en época de sequía igual a 262 litros/seg. octubre
- Descarga máxima en época de lluvias igual a 458 litros/seg. 20 enero
- Descarga normal en época de sequía igual a 280 litros/seg.
- Descarga normal en época de lluvia igual 315 litros/seg.

Haciendo un cálculo bastante aproximado con las descargas durante un año, se tiene una descarga total de 10'000,000 m<sup>3</sup>.

**7) Miras**

Tanto en la laguna Safuna Alta como en Safuna Baja, se han colocado miras de control para ver las variaciones que tiene el espejo de agua de la laguna de acuerdo a la temporada de lluvias y de sequía. En Safuna Alta, se ha tenido una altura mínima de 4,303.20 al 21/10/67 y una máxima de 4,305.05 el 12/9/67.

En Safuna Baja se ha tenido una altura mínima de 4,187 en agosto de 1967 y una

altura máxima de 4,189, con un promedio de 4,187.60.

#### 8) Control de Temperaturas

Tanto en la laguna Safuna Alta como en las aguas que salen por filtraciones se ha efectuado un control de temperaturas que nos da el siguiente resultado:

En el perfil termométrico efectuado en Safuna Alta desde cero metros hasta una profundidad de un metro del lecho de la laguna se tiene una temperatura constante de más 1.1°C.

En las filtraciones se ha tomado el control de temperaturas en 3 diferentes lugares. La filtración de la parte alta del margen derecho, tiene una temperatura constante que varía de 1.2 a 1.4°C. Solo si se congela o se calienta la superficie de la laguna, se tiene 0.7 y 1.5°C.

La filtración de la margen izquierda alta, tiene una temperatura constante durante el 90% del año, con 0.3 a 0.5°C. Solamente con movimientos del hielo, la temperatura baja a 0°C.

La tercera filtración de la parte izquierda inferior tiene un promedio de 0.7°C con movimiento del hielo, varía su temperatura, además está muy afectada por lluvias que aumentan su gasto.

La temperatura mínima en la laguna de Safuna Baja es de 4°C y un máximo de 18°C con un promedio de 9°C.

#### 9) Meteorología

Con el propósito de conocer el régimen climático de esta zona para los estudios del balance de masas se ha instalado en el mes de diciembre de 1968 una estación meteorológica de 2do orden, en la cuenca glaciar de Safuna, a una altitud de 4,380 m s.n.m. (Foto 8).

Se están efectuando observaciones de temperaturas, precipitación, evaporación y vientos de acuerdo a las disposiciones internacionales usuales. A la fecha la máxima temperatura encontrada fue de +24°C y la mínima de -9°C con una precipitación acumulada de 1,300mm en 1 año, evaporación de 2.76 mm/día en enero y 1.94 en febrero de 1969. Antes de diciembre, hasta hace un año se estuvo llevando registros no tan exactos,

solo se podía dar valor a la precipitación, ya que el otro dato que se tomaba era la temperatura a la intemperie.

#### OBRAS DE SEGURIDAD

La compañía consultora francesa Coyne et Belier, ha proyectado como obra provisional de seguridad, un túnel al nivel del espejo de agua, para que impida que la laguna aumente de cota, con el consiguiente peligro de las presiones de la masa de agua contra el dique morrénico.

Esta obra provisional de seguridad está siendo construida por la Comisión de Lagunas, con la inspectoría de la CPS y la asesoría de los franceses.

Las especificaciones técnicas de este túnel son las siguientes:

- a) Túnel construido a través del dique morrénico de la laguna de Safuna Alta.
- b) Longitud total proyectada 115 m por derrumbes en la entrada y salida, podría quedar 100 m.
- c) Pendiente del túnel 3% a 5%.
- d) Para la construcción se ponen cerchas metálicas cada 50 cm por la naturaleza morrénica del material.
- e) El túnel será de concreto en toda su longitud y sección.
- f) Las dimensiones del túnel son:  
Altura total: 2.40 m.  
Ancho en la base: 1.55 m.  
Arco con radio de 0.95 m en su cabecera.
- g) Al final del túnel en la parte exterior del talud se construirán las rápidas de concreto convenientes y a la entrada unas aletas reforzadas y una rejilla metálica que impida la entrada de bloques de hielo. A la fecha se tiene un avance de 80 m, se prevé su terminación para dentro de unos tres meses.

Esta obra es una solución temporal para el problema de Safuna Alta, es necesario prestar atención a la margen izquierda de la laguna, donde el borde libre está disminuyendo cada vez más teniendo a la fecha menos de 20 m, con un talud interior casi vertical, lo cual produce continuas caídas del material morrénico. El ancho del dique a nivel del agua en este sitio es del orden de los 50 m, por lo que es necesario reforzar esta parte y darle al talud interior un perfil de reposo adecuado.

Hay que tener en cuenta que día a día la superficie



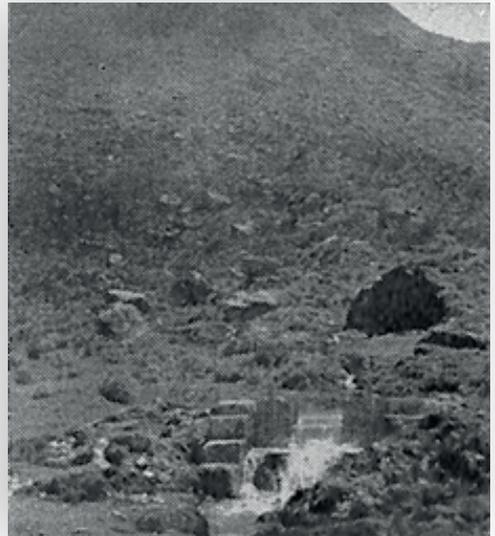
Laguna de Safuna Alta con inclinación taludes morrénicos y contacto glaciar



Vista panorámica de las lagunas de Safuna y de la lengua glaciar Pucahirca Norte



Observatorio Meteorológico de segundo orden en la cuenca glaciar de Safuna

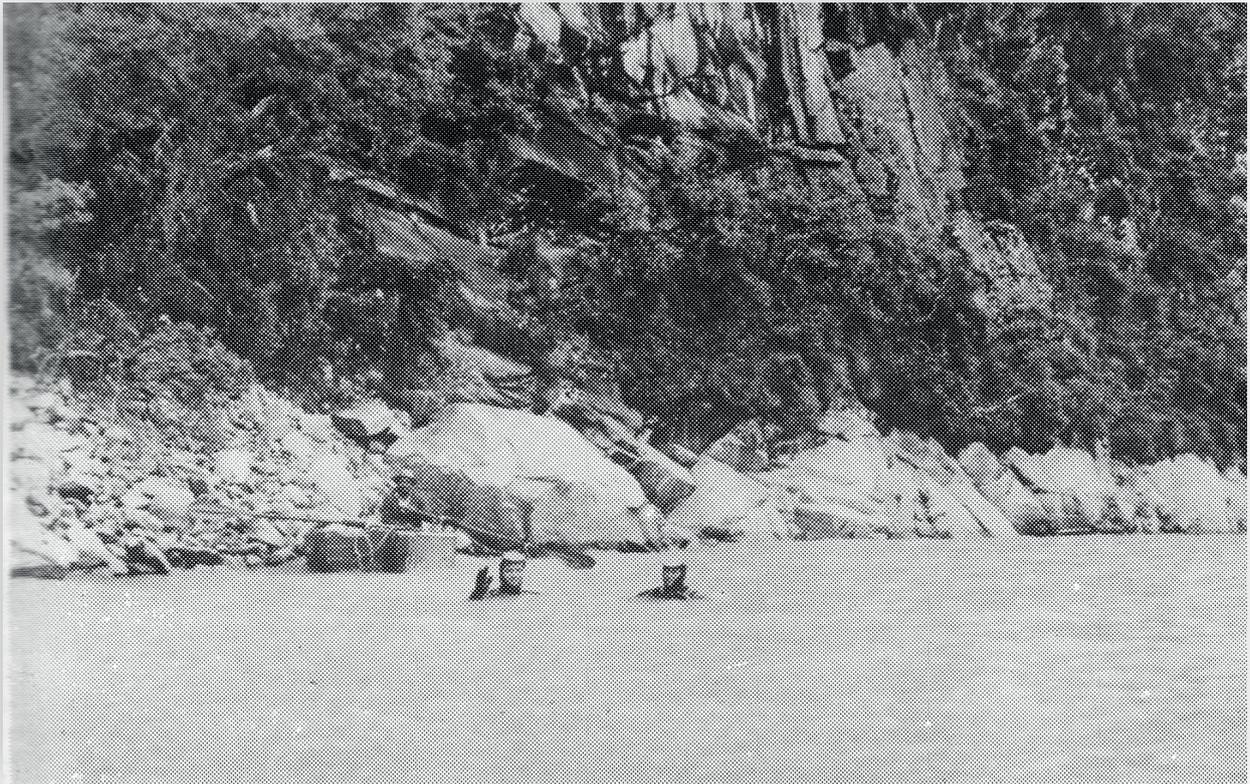


Uno de los vertederos que controlan la descarga de Safuna Alta

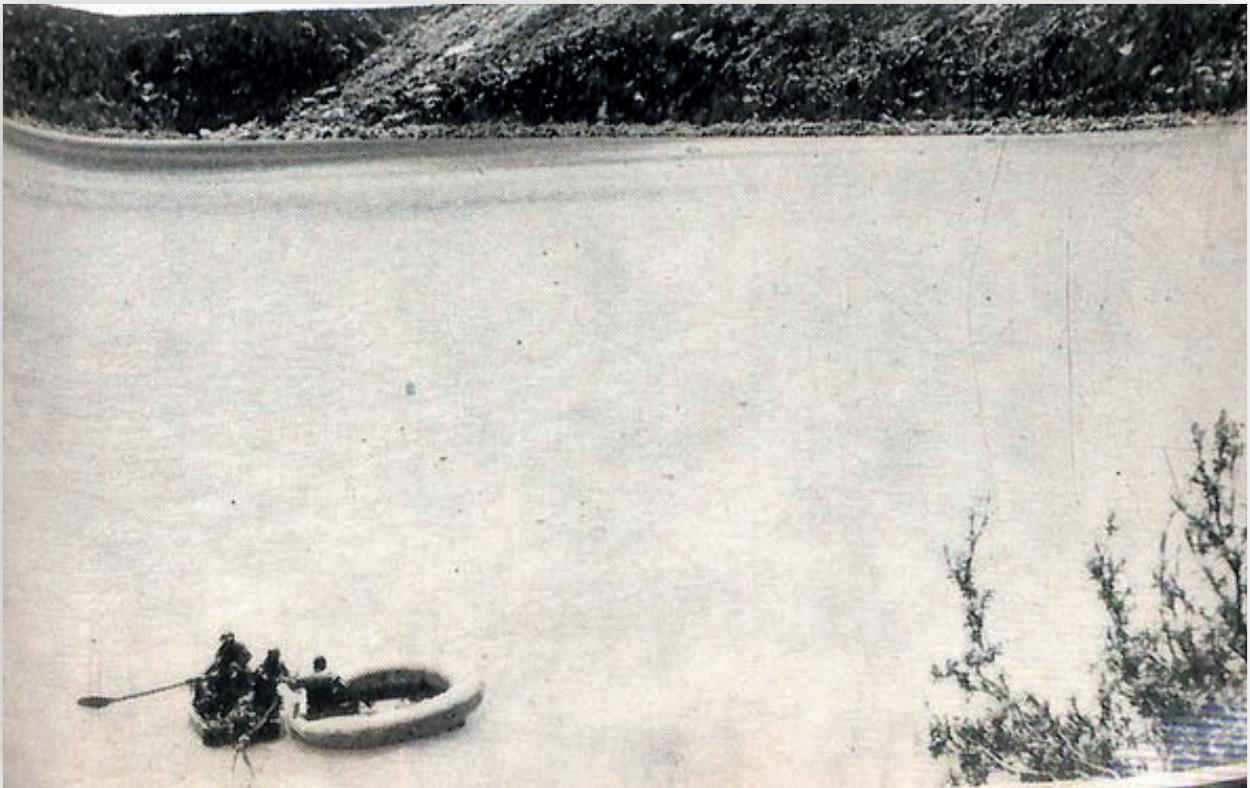


Perforaciones térmicas en el glaciar del Pucahirca con las estacas de ablación

de Safuna Alta va aumentando, especialmente por la desaparición paulatina del glaciar de la margen izquierda, que dentro de poco tiempo desaparecerá completamente. Asimismo, la laguna aumenta hacia el fondo por el desprendimiento de grandes bloques de hielo de frente glaciar del Pucahirca Norte.



Hombres rana en la laguna Parón, estableciendo el record mundial de buceo a gran altitud. Bajaron 57 metros a 4200 m de altura



Botes auxiliares para el buceo en Parón

## LA CORDILLERA BLANCA: Apuntes Geográficos

Hanz Kinzl

### INTRODUCCIÓN

*Hacer fotografías de una comarca y publicarla después no es difícil hoy en día, en el siglo del arte fotográfico. Pero caracterizar un paisaje no valiéndose más que de un número limitado de vistas ya es cosa distinta. Tal experimento dará el mejor resultado si se trata de un paisaje con elementos típicos, que se nos presente como una cosa aparte, plena de rasgos únicos. En sobremanera esto es el caso en la Cordillera Blanca del Perú. Esta cordillera tiene límites muy señalados y se destaca de sus alrededores de manera tan precisa, como solo puede observarse en cordilleras tropicales.*

*Las 120 fotografías publicadas en esta obra han sido tomadas en las tres expediciones alpinísticas y científicas que el Alpenverein (Sociedad Alpina) ha delegado a los Andes en los años 1932, 1936 y 1939. Algunas de estas imágenes ya figuran en esporádicas publicaciones anteriores que comentaban estas expediciones, pero en gran parte son nuevas. Han sido escogidas sobre todo del punto de vista de un valor documental. Tanto en los cuadros que representan escenas del pueblo, como en las imágenes de los glaciares, se ha hecho resaltar lo que es típico andino, de manera que se ha dado preferencia, por ejemplo, a la fotografía de una muchacha de pastores indios, en lugar de mostrar a una joven vestida a la moda que viva en alguna ciudad y descienda de padres blancos.*

*La mayor parte del libro es dedicada a mostrar aquel mundo frío pero lleno de luz que rige en alturas de más de 4000 metros. Nosotros sabemos muy bien que el Perú cuenta con comarcas atractivas también en sus regiones bajas, pero habrá otros que lo conocerán mejor. Que nuestros amigos peruanos nos perdonen si nosotros no las mencionamos.*

*El texto introductor tiene el objeto de comentar lo mostrado en los cuadros y de coordinarlo de manera que, también por las palabras, el lector pueda hacerse una idea verídica de lo que es la Cordillera Blanca. Más efectivo aún para este fin será indudablemente el mapa de 1:200,000 que añadimos, establecido por la Sociedad Alpina. Este mapa presenta a la Cordillera Blanca por primera vez en una sola hoja y ha sido dibujado por la mano maestra del cartógrafo del Alpenverein Federico Ebster. Para la región de la Cordillera Blanca y para el valle del Santa sirvieron de base los mapas de 1:100,000 que se habían levantado en las tres expediciones del Alpenverein y que ya fueron publicados. Lo relativo a las pendientes oeste de la Cordillera Negra ha sido extraído del mapa peruano de 1:200,000.*

*Imágenes, textos y mapas -y un poquito de fantasía- esto le bastará al lector para hacerse una idea precisa de lo que es la Cordillera Blanca, tan precisa como es posible sin que la haya visto.*

### EXPLORACIÓN

La Cordillera Blanca es la más alta de las cordilleras tropicales, la que tiene más glaciares y seguramente la más hermosa. Las cordilleras nevadas de África y Nueva Guinea ni siquiera se le

aproximan en altura. Las cordilleras del Himalaya están más allá del Trópico de Cáncer. En los mismos Andes Sudamericanos la Cordillera Blanca es única en su índole. Aunque el Aconcagua, el único pico de

7,000 m que tiene el Nuevo Mundo, sea más alto, la Cordillera Blanca tiene más glaciares. Las cordilleras patagónicas, por otra parte, tienen más glaciares, pero no alcanzan la altura de la Cordillera Blanca.

Además: no hay cordillera de 6,000 metros de altura y cubierta de glaciares a cuyo pie se llegue con tanta facilidad y comodidad como a la Cordillera Blanca.

Otra cosa más: esta cordillera puede vanagloriarse de haber sido la primera en América del Sur a la que se acercaron europeos. Poco después de la conquista de Cajamarca por Francisco Pizarro en el año 1532, su hermano Hernando pasó con sus guerreros al pie de la cordillera antes de dirigirse a la costa para avanzar a lo largo de ésta hacia el sur. En una comunicación de ese tiempo está escrito "El interior del país es muy frío y le sobran aguas y nieve, pero la costa es muy calurosa y llueve tan poco que la humedad no bastaría para hacer madurar los sembrados si las aguas que vienen de la cordillera no mojaran el suelo, que así producen cereales y frutos en abundancia." Ningún geógrafo actual podría caracterizar mejor el contraste peculiar de los paisajes.

## GEOLOGÍA

La Cordillera Blanca se extiende en sentido recto y es de una longitud de 180 kilómetros. En dirección norte-norte-oeste hacia sur-sur-este se prolonga, más o menos paralela a la costa, del 8,5° hasta un poco más de allá de los 10° grados latitud sur. A pesar de la poca distancia que la separa del Océano Pacífico, se encuentra en ella la divisoria de las aguas del continente. Los ríos y arroyos que nacen en su vertiente este corren hacia el Océano Atlántico. En el Perú hay muchas cordilleras parecidas, pero que no tienen entre sí la relación que tienen, por ejemplo, las diferentes cadenas alpinas, es por lo tanto un trabajo de poco provecho el clasificar en unidades a las cordilleras que atraviesan el país. Los Andes peruanos son en realidad en toda su extensión una meseta de unos 4000 metros de altitud, surcada por hondos valles. En algunos trechos, las cordilleras nevadas se elevan hasta 2000 metros y más por encima de ésta, y eso en todos los sitios en que rocas plutónicas penetraron en la corteza exterior de la tierra. Generalmente estas rocas son de una linda granodiorita clara. En efecto, en todos los picos cubiertos de glaciares en el norte del Perú se encuentra granodiorita. Si no consiste la cumbre entera de granodiorita por lo menos hay

Esta observación acerca del interior frío y nevado del Perú no es solamente la primera, sino por desventura también la única noticia escrita que durante siglos se ha tenido de la Cordillera Blanca. Aparte del libro importante que A. Raimondi ha escrito acerca del departamento de Ancash (1873), pero que apenas habla de los picos y glaciares del país, la exploración de la Cordillera Blanca es asunto de nuestro siglo. Del punto de vista turístico, hay que mencionar sobre todo al inglés C. R. Enock y a la norteamericana A. S. Peck, los que, cada uno por su lado, trataron de subir a los altos picos, pero, habiendo estado deficientemente equipados, no lograron su propósito a pesar de su valor. La primera exploración científica es el mérito de tres alemanes: del geólogo G. Steinmann, del geógrafo W. Sievers y del botánico A. Weberbauer. Sus publicaciones han contribuido a mejorar mucho los conocimientos geográficos de la Cordillera Blanca. Pero el progreso decisivo en cuanto a cartografía e imágenes lo han logrado las tres expediciones de la Sociedad Alpina. De golpe, la Cordillera Blanca se ha vuelto famosa y conocida y esto no solamente en los círculos científicos y no solo en el Perú y en los países americanos, sino también en Europa.

un zócalo formado de esta roca. Por dos razones la Cordillera Blanca merece su nombre: por sus altos nevados y por la granodiorita de que se componen casi todos sus picos de seis mil metros.

De la granodiorita se destacan con precisión las rocas sedimentarias que la rodean. La pizarra negra de la época cretácica existe en abundancia en muchas partes. Se la ve plagada y cuanto más cerca de las altísimas crestas, tanto más comprimida está. Comparada con los Alpes, la estructura de la Cordillera Blanca es, en general, muy simple. Sin embargo, hay mucho de enigmático en su formación. Por ejemplo, en la región norte todas las grandes quebradas nacen en el este del eje de la granodiorita y pasan a través de las cadenas más altas en sentido oeste, de modo que la dirección actual de los ríos no corresponde a la estructura interior de la cordillera.

El valle del Santa tiene también carácter singular. Se encuentra en el oeste de la Cordillera Blanca y es, en el Perú, el único valle longitudinal de importancia que se abre camino hacia el Océano Pacífico. En esta región, las otras quebradas al oeste de los Andes conducen directamente a la costa, sin que por lo tanto- todos sus

ríos alcancen el mar. Antes el valle longitudinal del río Santa era más largo que ahora, porque iba más hacia el sur. Pero su curso superior ha sido sangrado por un desagüe posterior en sentido transversal y desviado hacia la costa. Son estas circunstancias muy parecidas las del valle del Engadín superior (Suiza).

Al oeste, el valle del Santa está bordeado por la Cordillera Negra. Como ya lo dice su nombre, esta cadena carece de glaciares. Sin embargo, su parte norte llega a más de 5000 metros de altura y cuenta con buena cantidad de picos escarpados.

## **CLIMA Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS**

Las condiciones extraordinarias de la Cordillera Blanca no resultan solamente de la altura considerable de sus picos, sino del hecho de que está en una región puramente tropical, de modo que se sube de una zona a otra con más rapidez que en cualquier otra parte. Para acercarse a sus picos no es menester, como en muchas cordilleras de Asia, el recorrer vastas mesetas desiertas en marchas largas y fatigantes. En dos días se puede alcanzar las nieves de las Cordillera Blanca, saliendo desde Lima. En esta región, las condiciones del tráfico se asemejan a las de los Alpes; sin embargo, hay una gran diferencia entre Andes y Alpes y el descuidarse de ella podría resultar funesto, pues la Cordillera Blanca tiene 2000 m más de altura que las más altas cumbres de los Alpes del oeste, por lo que se hace sentir mucho la falta de oxígeno. Ya serán pocos los turistas que sean capaces de vencer, tras las otras penurias de la ascensión, las dificultades que causa la escasez de oxígeno. Lo que el turista acostumbrado a los Alpes tiene que considerar también, es lo corto que es el día tropical, que no dura más de 12 horas. También el crepúsculo es mucho más corto que en Europa. Las condiciones meteorológicas son sumamente importantes en las altas cordilleras; de éstas depende toda actividad humana, como también toda la impresión que hace la comarca. La sierra peruana no tiene más de dos estaciones en el año, determinadas por la temporada de las lluvias. La temperatura varía también según la estación, pero no es ésta la circunstancia que determina la denominación de las estaciones del año. La temporada de la sequía coincide con la del invierno del hemisferio sur; sin embargo, se la denomina verano. Por otra parte, se llama invierno lo que en el hemisferio sur debería ser el verano. Esto resulta tanto más complicado por el hecho de que en la costa peruana el nombre de las estaciones corresponde a las del hemisferio sur, de manera que se sale una mañana de invierno de la costa y se llega

en la misma tarde en el pleno verano de la sierra. La temporada de las lluvias comienza en octubre y dura hasta abril. Los meses más lluviosos son los de enero hasta marzo. Durante este tiempo, la cordillera está casi siempre sumergida en densas nubes, a menudo hay tempestades. Nieva en las alturas, pero la nieve se derrite pronto. En las quebradas llueve mucho. El buen tiempo principia en mayo, que es la única temporada adecuada para ascensiones en la cordillera. Un cielo diáfano cubre el valle del Santa y muy a menudo en la cordillera misma se goza de un tiempo espléndido durante muchos días seguidos. Aunque el buen tiempo en la cordillera Blanca es casi siempre variable, predomina una cierta regularidad, cosa característica en los climas tropicales. El día despunta con claridad diáfana. Los picos cubiertos de nieve perpetua brillan en los primeros rayos del sol. El sol asciende con rapidez y calienta el aire que la noche había refrescado considerablemente. Durante las horas de la mañana el aire se desliza lentamente en una corriente casi imperceptible valle abajo. A las diez, la atmósfera ya está bien entibiada, en las quebradas bajas hasta hace calor. Los pobladores ya hace rato que se han sacado sus abrigos, más aún, ya comienzan a esquivar el sol, cuyos primeros rayos habían esperado ansiosamente pocas horas antes. Un viejo proverbio peruano dice: "solo los gringos y los burros caminan en el sol". A mediodía pesaría el calor si no fuera por el viento valle arriba, que poco antes suele empezar, arrancando por empujones primero y haciéndose poco a poco más fuerte y continuo. El viento hace bajar la temperatura de medio día y el movimiento mismo del aire tiene efecto refrescante. En los valles bajos, el viento tiene la desventaja de levantar torbellinos de polvo y hasta granos de arena, lo que resulta bastante molesto. Al mismo tiempo, a eso de mediodía, los picos y las cumbres se rodean de las típicas nubes blancas del mediodía, que son un estorbo para la topografía y la fotografía. No conviene tampoco fotografiar a medio día en las regiones bajas, pues los rayos del sol caen perpendicularmente y el paisaje carece de toda sombra. En la tardecita los picos generalmente vuelven a salir de las nubes. En los últimos rayos del sol, los glaciares aparecen de un color rojo encendido. Anochece con rapidez. Los pobladores comienzan a tiritar de frío y se ponen un abrigo encima de otro. El viento en dirección valle arriba se vuelve más leve, hace pausas y acaba por dejar de soplar. Un cielo despejado, cubierto de estrellas y entre ellas la Cruz del Sur, corona el paisaje nocturno. El cono claro de la luz zodiacal señala el sitio en el oeste, donde el sol

se ha puesto. Al este, donde se extienden las infinitas selvas vírgenes de la región del Amazonas, el cielo relampaguea toda la noche. Así pasa el día tropical en el valle del Santa, bañado por el sol y protegido de las corrientes del aire del este por la Cordillera Blanca. Es ese viento este que le trae a menudo el mal tiempo a la Cordillera. La tormenta se desencadena en las alturas, llueve y graniza y a veces nieva. Al día siguiente uno se despierta en un paisaje todo invernal, cubierto de nieve. Pero a mediodía la capa de nieve ha vuelto a desaparecer, sin casi humedecer el suelo, tanta es la evaporación en ese aire seco de las alturas.

Cuanto más al oeste se encuentra un pico, tanto más se puede contar con buen tiempo para una escalada, tanto mejores serán las condiciones de la nieve y tanto menor el peligro de avalanchas de quiebra de cornisas. En general, se puede decir que en la Cordillera Blanca el brusco cambio del tiempo suele ser menos funesto para los expedicionarios que en otras partes, porque es más fácil llegar pronto a regiones bajas y menos frías. Pero en ningún caso es realmente fácil alcanzar sus picos más elevados. Alpinistas muy capaces y muy bien equipados serán los únicos que podrían arriesgar acercarse a sus altísimas cumbres. Pero justamente por eso, esos picos relucientes son meta digna para la juventud alpinista de todo el mundo. Mejor que con muchas palabras se comprenderá esto mirando el pico del Nevado Alpamayo, bañado por los últimos rayos del sol.

## LOS GLACIARES

La Cordillera Blanca es una cadena angosta y escarpada, pero debido a su altura, está más cubierta de glaciares que cualquier otra cordillera tropical. Su límite de las nieves perpetuas está a eso de 5000 m de altitud, sin embargo los picos sobresalen de 1500 m y más. La diferencia de altura entre el límite de las nieves perpetuas y las cumbres es pues mayor que en los Alpes Orientales y se aproxima al de los Alpes Occidentales. No obstante hay diferencia considerable en cuanto al tamaño y forma de los glaciares. En la Cordillera Blanca, los glaciares se adhieren directamente a las crestas y murallas de roca. No existen allí esas grandes y poco profundas cuencas llenas de nieve perpetua como en los Alpes. Sin embargo, no se ha desarrollado tampoco esa especie de glaciares de valle de dimensión considerable, como los hay en los Alpes. Generalmente los glaciares no sobrepasan los 4 km de largo. A esto también contribuye lo abrupto de la cordillera. Solamente el glaciar al norte del Huascarán llega a los 6 km. Los caudales de hielo recorren poca

distancia para llegar, probablemente también en poco tiempo, más abajo del límite de la nieve perpetua y allí se derriten con rapidez. Estancamientos de masas de hielo, que en los Alpes alcanzan el espesor de 750 m no son posibles en la Cordillera Blanca. En ésta los glaciares no son más que una delgada capa de hielo encima del suelo rocoso. Son muy agrietados y se quiebran fácilmente en lugares escarpados. Hasta las lenguas de los glaciares poco inclinados presentan grandes dificultades a los que los quieren escalar; los más escarpados son generalmente impracticables.

Estas son las diferencias entre los glaciares Alpinos y las de la Cordillera Blanca que resultan de la formación del terreno, pero hay otras relacionadas con el clima. Hay que tomar en cuenta la altitud y la latitud geográfica. Algo característico de la Cordillera Blanca son las enormes cornisas que se agolpan en el lado oeste de las crestas y cumbres como consecuencia del viento este. En el Nevado Alpamayo parecen rollos enormes, el Nevado de Copa tiene el aspecto de una gigantesca cebolla. En donde estén, son traicioneros y peligrosos. La segunda característica es la nieve en forma de plumaje. Se la puede observar sobre todo en las murallas rocosas más altas y más escarpadas. Estructura y disposición de estas formaciones en la nieve no hacen pensar en los rastros de avalanchas en dirección hacia abajo, sino mucho más en corrientes de aire que recorren las corrientes abruptas del oeste en dirección hacia arriba.

No es casualidad, por cierto, que la nieve, que parece plumas de ave, se encuentre sobre todo en el sotavento de las crestas que actúan de divisoria de aguas y que son las más expuestas al ímpetu del viento este, y no en las cumbres de la inmediación del valle del Santa. Ambos fenómenos, cornisas y nieve plumosa, se encuentran en los mismos tipos. Dos particularidades de los glaciares de los Andes tropicales están relacionadas con la potente irradiación del sol. Una es el escaso espesor de los estratos de la nieve que generalmente no sobrepasan un decímetro. Probablemente este hecho depende del tiempo que haga. Suele también nevar en verano, pero la capa de nieve enseguida empieza a derretirse bajo la influencia de los rayos del sol. Durante este proceso cae la noche y la nieve se hiela. Por eso, la próxima capa de nieve estará separada de la anterior por un estrato de hielo. En las regiones de nieve eterna de los Alpes se notan más los estratos anuales de gran espesor. Las importantes diferencias de temperatura además ocasionan siempre en las superficies de los glaciares tropicales una alteración continua entre

derretimiento y congelamiento. Esta es la razón por la cual se forman las grandes cortinas de estalactitas de hielo en las grietas y en los bordes de hielo. En los lugares bajos, la superficie de los glaciares se disuelve en picachos de hielo. El polvo fino (cryoconita) forma tubos de derretimiento hasta una profundidad de veinte centímetros. La superficie del glaciar está parcialmente agujereada como un panal. Naturalmente también hay hongos glaciares que, debido a la posición del sol, están inclinados hacia el norte.

Aunque haya que tomar en cuenta las diferencias entre los glaciares Alpinos y los de los Andes tropicales, no hay que olvidar las muchas semejanzas. Por una parte, la cordillera Blanca cuenta con glaciares anchos y llanos, por otra parte, los hay que tienen lenguas muy pronunciadas. El glaciar más arriba de la Tuctupampa hace recordar las cordilleras de Karakorum, por sobreponerse al glaciar principal un glaciar lateral escarpado, que se hace llevar un trecho por el glaciar principal, antes de derretirse.

No obstante, la cantidad de rocalla que arrastra los glaciares difiere mucho en la Cordillera Blanca. Los glaciares más llanos casi carecen de morena, mientras que los que nacen de las cumbres más altas y llegan hasta las regiones bajas llevan muchísima rocalla. Hay casos en los que se forman verdaderas lenguas de glaciar cubiertas de bloques y resulta difícil reconocer si debajo de los escombros queda aún hielo. En esos casos, las lenguas se extienden por encima de su propia rocalla, así que el extremo del glaciar parece un bastión que se eleva por el fondo de las quebradas.

## LAS LAGUNAS

Justamente son los glaciares que más rocalla tienen los que han originado la formación de estancamientos de agua al interior de los muros de sus morenas, siendo una consecuencia del retroceso actual de los glaciares que en los últimos años ha llamado mucho la atención.

Hace 80 años ya mencionó A. Raimondi que en muchos casos se formaban pequeñas lagunas al extremo de los glaciares. En 1932, muchos de éstos ya habían alcanzado tamaño considerable. Este nuevo adorno de las partes altas habría podido alegrar, si no fuera por el peligro que estas lagunas presentan, no solamente para las quebradas sino también para los valles principales al pie de la cordillera que están densamente poblados. En 1932, una de las más bonitas de estas lagunas de la cordillera de Huayhuash estalló

y se desbordó causando diversas devastaciones. En 1938, lo mismo se produjo en la quebrada de Ulta. Estos acontecimientos no dejaban de ser inquietantes y nosotros comenzamos a prevenir a la gente entendida de esta región. Por lo tanto, nadie hubiera podido prever que poco después, el 13 de diciembre de 1941, acontecería la terrible catástrofe que originó la muerte de varios miles de los pobladores de Huarás y la destrucción de un tercio de esta ciudad. Fue ese el mayor estrago que en nuestro tiempo ha originado un glaciar y uno de los más graves de esta índole en toda la historia humana.

Ahora estas aguas represadas por las morenas se hacen desaguar artificialmente como medida preventiva contra un posible desborde repentino, sin consideración alguna con la hermosura que prestan al paisaje. Pero siempre continúan apareciendo nuevos represamientos. Nosotros mismos habíamos tenido oportunidad de observar cómo crecían las lagunas entre los años 1932 y 1940. El crecimiento no había sido exagerado. La única laguna nueva que apareció en aquel tiempo era la que se había formado al pie del Artesonraju en el fondo de la Q. Parrón, ¡Cuán grande fue nuestro asombro al ver las fotografías hechas por la expedición suiza de 1948 a los Andes y las fotografías aéreas tomadas desde el avión por peruanos en el mismo año! En lugares donde años antes se veía el extremo de una lengua de glaciar cubierta de bloques, se veía ahora extenderse un represamiento considerable. Por cierto, en nuestros tiempos varios glaciares ya mostraban indicios de que se desplomarían, como acumulación de agua derretida en las grietas, etc. El mejor ejemplo lo presenta el glaciar en el fondo de la quebrada de Alpamayo, cuya fotografía tomada por nosotros en 1936 muestra justamente el comienzo de la formación de una laguna; en el día de hoy, la morena terminal, que es bastante débil, encierra una grandísima cantidad de agua que probablemente por el momento presenta el mayor peligro de esta índole para el valle principal.

Las condiciones son mejores en el caso de las lagunas glaciares más antiguas en la vertiente norte del Champará y en la Rajukocha, más arriba de Colcas. Aquí apenas hay peligro de desborde, además los lagos en las cuencas rocosas de más abajo, seguramente se encargarían de atajar y recoger las crecientes.

La laguna Parrón también es uno de los represamientos originados por glaciares y es la

joya del paisaje de la Cordillera Blanca. Un gran glaciar cubierto de bloques en la vertiente norte del Huandoy bloquea la quebrada y ha hecho acumular las aguas de esta laguna de 3,5 km que llena toda la parte media de la quebrada. Apenas se logra pasar al costado de murallas rocosas para alcanzar el fondo de la quebrada. En sus aguas verdosas y azuladas se reflejan gran cantidad de glaciares; media docena de picos bizarros de más de 6000 m de altura la rodean. Es un paisaje de alta montaña insuperable. Por cierto que la laguna Parrón merece ser conocida y famosa en todo el Perú. Nadie se acuerda ya que nosotros, hace veinte años, que la fotografiamos y levantamos información sobre ella, por primera vez.

Otras lagunas, por ejemplo, las de la quebrada Yanganuco, se han formado indirectamente por la influencia de los glaciares recientes. En estos casos, el extremo del glaciar mismo no baja hasta la quebrada principal, pero los arroyos provenientes de sus aguas derretidas han amontonado en su suelo grandísimos conos de deyección que hacen efecto de dique.

También la laguna Querokocha, más arriba de Ticapampa, ha sido formada por conos de deyección, aunque aquí no hubo colaboración de ningún glaciar.

Lo que tienen de común todas las lagunas provenientes de glaciares, es su poca edad, pues probablemente datan del gran avance glaciar a eso de 1600. La mayor parte de esas lagunas no existirán mucho tiempo. Es diferente en los casos en que llenan cuencas rocosas o cuencas formadas por los extremos de glaciares en los tiempos del período glaciar. La Atunkocha más arriba de Colcas y la Auquiskocha al sur de la quebrada de Ulta son las más extensas y más hermosas de estas lagunas, además la Laguna Ventanilla y las lagunas vecinas merecen ser mencionadas.

Estas causan placer sin reserva alguna, pues sus umbrales de sólida roca con relieves redondeados son completamente seguros, y lo continuarán siendo, aunque las lagunas glaciares de más arriba se revienten un día. Es debido a su posición en una quebrada alta y corta que carece de arroyo rocalloso que no han sido aún colmadas en todo este período postglacial. Sobre todo la Atunkocha es una perla de primer orden, por una parte a causa de sus alrededores soberbios, por otra parte por la distancia que se abarca con la mirada desde su altura hacia el valle del Santa y la Cordillera Negra. Además, esta región es rica en vestigios de la antigua población nativa. El que allí arriba ha estado,

de todos modos conoce de cerca el carácter de la Cordillera Blanca. La única desventaja de este sitio es la gran altitud, puesto que hay que recorrer 2000 m. de altura pura desde Colcas. Dado el caso, es posible recorrer ese trecho a caballo, aunque por caminos bastante estrechos.

No habiendo un afluente de importancia, la laguna de Goñockocha ha podido mantenerse en el nacimiento del valle del Santa. Esta también pertenece a las lagunas de la época glaciar, porque su dique consiste en un cono de deyección en forma de abanico, depositado por un antiguo río glaciar de la quebrada Tuco. ¡Pero qué diferente es ese paisaje! La laguna poco profunda está al borde de una extensa pampa. Aunque al este los picos se elevan a más de 1500 metros de su nivel del agua, como están muy lejos, no impresionan tanto. Las nubes entran del este por los anchos espacios entre los picos sin encontrar obstáculo que las detenga y hasta en la temporada seca suelen oscurecer ese paisaje solitario, mientras que al norte, en el valle del Santa, brilla el sol.

### LAS QUEBRADAS

Las muchas lagunas no son los únicos testigos que prueban que la Cordillera Blanca ha estado mucho más cubierta de glaciares en la época glaciar que ahora. En ese tiempo sus vertientes estaban cubiertas de hielo hasta las regiones muy bajas. Los rastros de los antiguos lechos glaciales son bien visibles en el limado suelo rocoso y en sus altas morenas. Todas las altas quebradas estaban llenas de poderosos caudales de hielo. Mejor se reconoce el efecto de la época glaciar si se compara las quebradas en aquel tiempo cubiertas de hielo con las del noroeste, donde los trechos exteriores quedaban sin glaciar. Un ejemplo magnífico presenta la garganta del Cañón de Pato de 1000 metros de profundidad, que abarca la ancha parte central del valle del Santa. En este sitio el río Santa ha penetrado, en un tiempo remoto de su historia, en la roca granodiorita. Mientras que en los blandos estratos más al sur no le causó grandes dificultades al río el hacerse un valle ancho, la perforación de la granodiorita adquirió la forma de un cañón profundo cuyo fondo deja justo el sitio para el río rugiente y espumoso que se lanza en desenfundada carrera hacia abajo. Es una proeza técnica admirable que fue posible hacer pasar por allí una carretera. Al principio se ha querido hacer pasar hasta un ferrocarril. Pero no se ha llegado más que hasta Huallanca, en el extremo inferior del Cañón de Pato. Ya el trecho que se ha

podido ejecutar más abajo presenta tantas dificultades que es una maravilla digna de ser vista.

También son cañones impracticables en los que terminan las dos quebradas más al norte de la Cordillera Blanca, la quebrada de Cedros y la de Quitaracsa, al desembocar en el valle del Santa. Los glaciares de la época glacial no han llegado hasta ahí, de modo que han quedado las cortaduras agudas que habían formado los ríos. Las dos quebradas son bastante espaciosas al fondo, pero hay que penetrar en ellas como si fuera por la ventana, porque no hay manera de alcanzarlas sino del costado, y atravesando pasos difíciles.

Más al sur falta esa especie de cañones porque los glaciares de la época glacial los ensancharon en forma de U. No obstante, no hay que sobreestimar la influencia del hielo, pues éste se limitó a trabajar el fondo de la quebrada y las vertientes inferiores. Pero esos despeñaderos, a veces casi perpendiculares, se han formado más bien por quebraduras en la granodiorita. Un ejemplo característico para un valle en forma de U es la quebrada. Yanganuco, pero varias otras se le parecen hasta el punto de que se las puede confundir. En la época glacial, los glaciares no llenaban los grandes valles que no pertenecían a la Cordillera Blanca. Solamente los ríos los han surcado. El más imponente es el río Marañón, que se ha surcado un valle de 2000 metros en la meseta al este de la Cordillera Blanca. Es preciso tener muy buenos caballos para atravesarlo en un día. Angostas terrazas acompañan el río en las que se han plantado cañaverales, platanales y naranjales en los sitios que se pueden regar.

El valle del Santa nunca ha estado enteramente cubierto de hielo. Sin embargo, abundan los rastros de los hielos de la época glacial, que se han deslizado Cordillera abajo hasta el río principal. Además de los antiguos muros de morenas, los soberbios bloques erráticos de granodiorita, que a veces tienen el tamaño de toda una casa, son los mejores testigos de la antigua presencia de glaciares. Su cantidad disminuye poco a poco ahora, porque se los usa como cantera. También las terrazas de barro y rocalla a lo largo del río Santa son, en gran parte, sedimentos de los arroyos de la época glacial. Estas terrazas cubren largos trechos y generalmente están artificialmente regadas y bien cultivadas. En todo caso, el valle del Santa ha sufrido bastantes alteraciones en la época glacial, aunque ya haya existido antes de ésta teniendo más o menos la forma y profundidad presente. No es justo

lo que muchos creen, que una vez un gran lago haya llenado la cuenca. Sin embargo, hay algo de verdadero en eso. Justo a la entrada del Cañón del Pato, donde aún hoy los picos cubiertos de hielo se aproximan al valle del Santa más que en cualquier otra parte, el hielo del Nevado Santa Cruz se adelantaba hasta la entrada del cañón en la época glacial, bloqueaba la corriente del río, estancando las aguas hasta que se volvieron una laguna.

Las condiciones vigentes en aquella época en el valle principal eran muy parecidas a las que rigen actualmente, un piso más arriba, en la quebrada de Parrón. Aún hoy se puede divisar el antiguo nivel de la laguna, observando la arena fina en estratos bien pronunciados, lo que se ve especialmente bien en Molinopampa. Las arenas finas se conservaron tan bien en esta región por ser muy seca esta quebrada angosta y profunda. Este hecho es de interés especial tratándose de alturas de 1800 m, pues es éste uno de los puntos más bajos que hayan alcanzado jamás los glaciares de la época glacial en las regiones tropicales. ¡Quién sabe si alguno de los muchos viajeros que pasan con automóvil por esta región se dará cuenta de que está viendo uno de los fenómenos más curiosos y extraños de la naturaleza! Es una lástima que no haya mucha gente que pueda leer la historia tan accidentada de la superficie de la tierra. La mayor parte tiene la costumbre de tomar la estructura y las formas del paisaje por cosa dada, sin reflexionar sobre las razones.

## LA FLORA

El mundo orgánico despierta mucho más interés. En los valles densamente poblados a ambos costados de la Cordillera Blanca, las plantas cultivadas han suplantado a gran parte de la flora original. En las regiones bajas de las llanuras predominan maíz y trigo. La caña de azúcar llega a una altura un poco más allá de Mancos. Allí arriba, a los 2500 m, que es el límite más alto de cultivo, necesita 3 años para madurar, es decir por lo menos el doble de lo que precisa en la región de la costa. Además, hay que regarla bien. Lo mismo pasa con la alfalfa, cuya importancia aumenta con el desarrollo de la ganadería. En los sitios altos, la agricultura presenta otro aspecto. Predomina la cebada y la papa. El suelo es pobre y pedregoso y no da más que escasas cosechas. Después hay que dejarlo varios años sin cultivar. La agricultura llega hasta el máximo de 4000 metros de altura.

No contando las recientes plantaciones de coníferas cerca de Copa, más arriba de Carhuás,

se puede decir que faltan verdaderos bosques en el valle del Santa. El perfume de resina que exhalan las coníferas era hasta ahora cosa desconocida en esos parajes. Entre los árboles que hay, el que más llama la atención es uno extranjero: el eucalipto de Australia. Hileras de esta especie bordean todos los senderos y lindes. Grandes poblaciones, como por ejemplo Huarás, vistas desde lejos, parecen estar rodeados de bosques de eucalipto, árbol que crece rápidamente y suministra leña y madera de construcción muy fuerte, aunque sea agrietada.

Hasta las alturas adonde alcanza la agricultura, llegan también las cabuyas (agave americana) y las opuncias. Estas y las retamas amarillas son las plantas características del valle del Santa. Pero en lo alto de las quebradas, la flora es mucho más original. Al subir, se camina primero a lo largo de arroyos espumosos, bordeados de alisos, más arriba los bosquecitos ralos de queñua (*polylepis*) recubren los terrenos sembrados de grandes bloques, que los muchos derrumbes de roca con el tiempo han arrancado a los despeñaderos. El color rojizo de la corteza de la queñua, que se desprende como papel de los troncos nudosos, va muy bien con el verde profundo de sus hojas. Abunda también el quisuar (*buddleia*), con sus hojas plateadas, especialmente en la región de la granodiorita. En las quebradas al borde de la Cordillera Blanca, las murallas perpendiculares atajan la vegetación arbolífera, por lo tanto, hay sitios en el fondo del valle en donde los árboles llegan hasta las antiguas morenas de los glaciares. Las quebradas accesibles con facilidad ya han perdido buena parte de sus árboles, debido al exagerado consumo de leña y de carbón. En las quebradas del sudoeste ya no hay árboles, aunque los nombres de los sitios señalen que debe haber habido muchos. Actualmente, la quebrada de Aquilpo es una de las más ricas en bosques.

La planta más extraordinaria y que puede calificarse al mismo tiempo de símbolo de todos los Andes tropicales es la gigantesca Puya Raimondi. Es una reliquia que en el norte del Perú no se encuentra más que en tres lugares de la Cordillera Blanca y en unos cuantos de la Cordillera Negra, siempre en el lado soleado de las quebradas y en sitios donde hay mucho cuarzo. En el primer tiempo de su existencia esta planta no es más que un gigantesco copete de hojas largas y delgadas que tienen espinas en los extremos. Después de algunos años sale de este copete un asta enorme, cubierta de flores, que se alza hasta 8 y 10 metros de altura. Los fondos de las quebradas son a menudo pantanosos y están cubiertos de distichias, plantas

de pantano traicioneras, por cierto. Con caballos y mulas es peligroso y a veces imposible atravesar esos pantanos. Aunque las plantas cubran el pantano con una colcha resistente, en los espacios entre éstas es fácil hundirse. Sobre todo de noche, puede uno encontrarse en situaciones desagradables. Entre el ralo pasto espinoso que crece en los suelos secos, se ven en muchos sitios las manchas blancas de la opuntia floccosa, que parecen almohadillas. En las quebradas del oeste los lupinos y las calceolarias ocupan grandes superficies. Las lupinas suelen llegar a tener metros de altura. ¡Qué placer era montar la carpa en medio de este jardín florido después de los duros días pasados en las alturas frías y ventosas! Un perfume riquísimo exhalan los lupinos de color celeste. Más de una vez, el viento ascendente llevaba el perfume hasta las mismas cumbres, donde estábamos para triangular. Gran placer nos causaba también el aspecto de las flores aterciopeladas del *culcitium canescens*, que nos hacía recordar el “edelweiss” de nuestras tierras. Pero más que todo amábamos la genciana de color colorado vivo, planta que como muchas otras de los Andes peruanos, tiene su nombre del botánico de mérito A. Weberbauer.

La mayor variación en plantas se encuentra en las quebradas del norte de la Cordillera Blanca. Las del sur no tienen tanta vegetación, pues ya pertenecen a la ancha puna fría, que también comprende el valle del Santa superior.

### LA FAUNA

Todo visitante de las altas quebradas de la Cordillera Blanca podrá gozar, con facilidad y poca fatiga, de la flora multicolor de la comarca. Pero para observar la fauna del país es menester un poco más de tiempo y alguna paciencia. Por ventura, las autoridades han prohibido la caza libre. Sin esto, ya no quedarían muchos de los grandes animales. Los viejísimos fusiles de baqueta, con que algunos pastores indianos les gusta ir aún de caza clandestina, no causan mucho daño. El animal que más a menudo se mostrará al viajero es el cóndor. Con razón se le califica el rey de los Andes, pues con sus alas abarca 3 metros, y no contando los avestruces, es el ave más grande del mundo. En busca de carroña se hace llevar por el viento en torno de los picos y despeñaderos durante horas y horas; y si tiene mucha hambre, es capaz de atacar hasta a los terneros que pacen, como nosotros pudimos observarlo un día desde muy cerca. Era una lucha emocionante y si no hubiera sido por la intervención del pastor el ternero no se habría salvado.

Entre la fauna que puede cazarse merece mencionarse el venado o taruga bastante abundante en algunas quebradas. En los lugares remotos hay gran número de éstos hasta en los bordes de los glaciares. No son raras tampoco las vizcachas que se esconden entre los bloques rocallosos. El animal más lindo de esta región por cierto es la vicuña, tan esbelta y cubierta de finísima lana. Pero no son su mundo favorito las angostas quebradas de la Cordillera Blanca, sino las pampas y terrazas al sudoeste. Si no gozasen de inmunidad por la ley, hace rato que estarían exterminadas. Pero sería una lástima perder esos animales tan simpáticos.

Un habitante peligroso, aunque tímido, es el puma. Este león sudamericano esquiva al hombre en lugar de atacarlo. Pero si se le ataca y se le hiere por cierto que se vuelve terrible. Sólo el que sabe disparar muy bien podrá arriesgarse a cazarlo. Generalmente se lo mata de manera poco honrosa, con carnada envenenada. Sin embargo, parece que abunda aún mucho en la Cordillera Blanca, aunque más en las quebradas del este. Sus víctimas favoritas son cerdos y perros, que a menudo los va a buscar en las mismísimas poblaciones. Pero también ocasiona grandes daños a los rebaños de ovejas. En una de las quebradas más remotas se nos convidó un día a un festín de asado porque el puma había matado más ovejas de las que había podido devorar.

Esto nos hacía recordar que el cuadro apacible que presentan los rebaños paciendo, es tan sólo apacible en apariencia y por lo tanto la vida allí no es comparable a la vida en los pastos altos de los Alpes. A los animales mismos sí que se les puede comparar, pues en la Cordillera Blanca como en los Alpes se crían solamente vacunos y ovejas. Antes se criaban también llamas para usarlas para el transporte de mineral en las minas en las alturas, pero ahora ya no se acostumbra criar este animal doméstico antaño tan importante para los indios. Para muchos, aún, la llama constituye un complemento indispensable en el paisaje de la puna peruana, ello han de sentir su ausencia. Por eso también la mencionan casi todos los autores de libros de viajes, sin que por eso sea justo todo lo que cuentan. Hay quien dice que a las llamas acostumbran ponerles cintas multicolores en

los cuernos, como si fueran parientes de los vacunos y no de los camellos.

Otro habla del queso de llama, del que dice que le ha gustado mucho, sin tomar en cuenta que los indios, desde siempre, acostumbraban a criar esos animales únicamente por su carne y su lana. El comer mantequilla, queso y leche les era cosa desconocida como a los chinos y a los japoneses. Tampoco se ha montado jamás en este animal, como la fantasía de los narradores lo inventa, porque es demasiado débil y no es capaz de llevar bultos de más de 35 kilos, y además es muy lento.

A los vacunos que pacen en los altos pastos de la Cordillera Blanca casi no se los cuida o vigila [pág. 129]. Pertenecen a las razas criollas que no son nada exigentes y para las que basta el pasto duro y escaso.

Últimamente, en el Perú se han hecho grandes esfuerzos para fomentar la cría de vacunos y la producción de leche, no tan solo en la costa, sino también en las regiones altas. Sobre todo se han importado animales de razas escogidas, como por ejemplo los vacunos Brown Swiss. Para esas vacas no basta el pasto de las alturas. Se les da alfalfa principalmente. Por consiguiente, se prefiere los valles bajos para el ganado vacuno y los pastos altos quedan para las ovejas.

Las chozas de los pastores son simples casitas de piedra, cubiertas de paja de puna. A menudo se ven tablados a su lado, en donde se acostumbra colgar la carne y otras provisiones para protegerlas contra los perros siempre hambrientos. Siempre hay gran cantidad de perros en las chozas, para proteger los rebaños de los zorros, como dicen; generalmente no molestan a los turistas; sin embargo, conviene tener unas cuantas piedras a mano en caso que no baste el agacharse por ellas para que los perros huyan.

No hay mucha esperanza de encontrar algo comestible en esas chozas, fuera de un poco de leche y queso. Los pastores tienen que ir ellos mismos al valle a buscar los víveres; muchos tienen allí algún terreno cultivado. Pero son generalmente gente muy cumplida cuando dejan de recatarse del extranjero. Un puñado de hojas de coca o un poquito de sal prestarán buen servicio a ese efecto.

# ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN



## GLACIARES, RECURSOS HÍDRICOS Y RIESGOS

César Portocarrero Rodríguez

### Resumen

*La problemática de los glaciares y lagunas peligrosas de origen glaciar se ha presentado en casi todas las zonas montañosas del mundo, especialmente en los períodos interglaciares, es decir, entre enfriamiento y enfriamiento. Uno de los calentamientos denominado Máximo u Óptimo Climático del Holoceno ocurrió aproximadamente hace 6 mil años, otro de menor magnitud ocurrió entre los años 800 y 1250. Actualmente, estamos viviendo un período de calentamiento de origen tanto natural como por efecto de las actividades humanas. En todos estos períodos de la historia climática del planeta, durante el proceso de recesión o retroceso de los glaciares se han formado lagunas que, en muchos casos, se han desbordado con consecuencias catastróficas. En el Perú no hemos estado alejados de esta realidad y secularmente se han sufrido eventos similares a los citados líneas arriba, y como muestra de ello tenemos el subsuelo aluviónico de varias poblaciones del Callejón de Huaylas y de la Zona de Conchucos. Este tipo de subsuelo se caracteriza por poseer mucha bolonería de roca subredondeada, especialmente granodiorítica, que ha sido transportada por los flujos de escombros o aluviones. Ejemplos de este tipo de subsuelo los encontramos en el barrio del Centenario de Huaraz, entre las localidades de Acopampa y Carhuaz y en el subsuelo de casi toda la ciudad de Caraz.*

*Para contrarrestar esta amenaza, el técnico peruano ha sabido plantear soluciones orientadas a disminuir el nivel de peligrosidad. Estas tareas comenzaron en la década de los años 1940 y continuaron hasta la fecha, en una continua lucha del hombre contra la naturaleza, cada vez con mejor tecnología y mejores procedimientos de estudio, análisis y ejecución de medidas estructurales y en todo caso, comenzando por la disminución del volumen de las lagunas peligrosas.*

*El presente artículo describe brevemente una parte de lo que se ha venido realizando en las montañas nevadas del Perú, mostrando los ejemplos que han sido ejecutados en diversos lugares, especialmente en la Cordillera Blanca.*

### Palabras claves

Glaciología / Glaciares / Aluvión / Callejón de Huaylas / Calentamiento / Desglaciación / Morrenas / Bolonería

### INTRODUCCIÓN

Los glaciares en el Perú al igual que en muchas partes del mundo se han desarrollado de acuerdo a las condiciones climáticas. Es decir, en las épocas de enfriamiento, que son períodos de larga duración que se estima abarcan entre 50,000 a 80,000 años (cada uno), es cuando baja la temperatura en el clima de la Tierra y hay abundante precipitación de nieve que se congela originando una expansión de los hielos, tanto continentales como polares. En

cambio, en los períodos interglaciares, como en el que actualmente estamos viviendo, que suelen durar entre 10 y 15 mil años, los hielos se derriten permanentemente. A esta variación cíclica del clima de la Tierra se ha agregado en este momento la acción del hombre, que se ha convertido en un factor del calentamiento global.

En nuestro país tenemos 19 tramos de la Cordillera de los Andes que tienen glaciares,

recibiendo la denominación de cordilleras nevadas. Las 19 cordilleras son las siguientes:

- Cordillera Blanca
- Cordillera Vilcanota
- Cordillera Vilcabamba
- Cordillera Huallanca
- Cordillera Huanzo
- Cordillera Apolobamba
- Cordillera Carabaya
- Cordillera Raura
- Cordillera Huagoruncho
- Cordillera La Viuda
- Cordillera La Raya
- Cordillera Huayhuash
- Cordillera Central
- Cordillera Chila
- Cordillera Ampato
- Cordillera Volcánica
- Cordillera Urubamba
- Cordillera Chonta
- Cordillera Central

La Cordillera Blanca es la de mayor extensión. En 1970 abarcaba un área de 723 km<sup>2</sup>, habiéndose reducido en estas últimas décadas a 455 km<sup>2</sup> aproximadamente. Este adorno maravilloso que ha dado la naturaleza al habitante de la sierra del departamento de Ancash, constituye el majestuoso paisaje que adorna el valle del río Santa, desde sus orígenes en la laguna Aguascocha hasta su límite septentrional en el área del nevado Champará.

Desde tiempos muy antiguos esta cordillera majestuosa de los Andes peruanos ha llamado la atención de propios y extraños, convirtiendo a cada uno de sus parajes en el deleite de los amantes de la montaña de todos los rincones del globo, no solamente para tomar fotografías de cada uno de sus detalles, sino también para afrontar los desafíos de sus picos. Sin embargo, tal como ahora conocemos con mayor precisión, los hielos adheridos a las montañas no son más que una consecuencia del clima. La variabilidad de las formas y volúmenes de las masas glaciares ha sido definido por los diferentes cambios climáticos del planeta. En forma escueta, actualmente se conoce con cierta precisión en base a las investigaciones glaciológicas realizadas, que en los últimos 650,000 a 680,000 años han ocurrido

siete procesos de enfriamiento en los cuales se han desarrollado y extinguido en forma intermitente las masas glaciares tanto en zonas montañosas como en diversas zonas continentales del planeta. El último pico del enfriamiento en promedio se estima que fue hace 18,000 años y la época interglaciar hasta hace 12,000 años aproximadamente, y es a partir de esa época que los hielos de nuestras cordilleras comienzan a contraerse o retroceder, lo que se denomina comúnmente como proceso de derretimiento paulatino, por las condiciones de mayor temperatura y menor precipitación de nieve.

Antes de hablar de la formación de las mismas lagunas, debemos mencionar que las masas de hielo acumuladas durante cientos y miles de años se han movilizadas pendiente abajo obedeciendo a la gravedad y venciendo la fricción o rozamiento de las superficies o taludes de nuestras montañas, y al mismo tiempo, empujando todo el material que encontraron a su paso, ejerciendo el trabajo semejante a un tractor o máquina buldozer y formando las denominadas morrenas o material residuo de la erosión glacial, las cuales evidentemente tienen una estructura totalmente heterogénea, dado que el glaciar fue empujando todo material que encontraba a su paso sin distinción alguna.

Es por ello que estas morrenas están constituidas por materiales finos como arcillas, limos, arenas finas, por materiales gruesos como gravas, arenas gruesas y material de mayor dimensión como trozos de roca de muy diferentes dimensiones. Este material heterogéneo denominado morrena, cuando se halla a los lados de la masa de hielo se denomina morrena lateral, y cuando se encuentra en la parte delantera de la masa de hielo se denomina morrena terminal o frontal.

Todo este material al final ha constituido el componente de los diques naturales que, a su vez, han conformado los vasos de las lagunas que en gran número existen en nuestras cordilleras. En algunos casos, cuando los materiales en su mayoría han sido finos, constituyen excelentes cubetas para almacenamiento de agua y en otros casos, cuando los materiales constitutivos de estas morrenas han sido materiales arenosos mezclados con finos de baja cohesión, han formado diques débiles, los cuales, bajo el influjo de los procesos erosivos del agua -en algunos casos- han originado desbordes violentos de las lagunas, con las consecuencias catastróficas que la historia nos ha dado a conocer secularmente. La ocurrencia de estos eventos es tan profusa y ha

ocurrido en tantos lugares que forma parte de la historia de los pueblos que se han desarrollado en los abanicos de la desembocadura de los ríos cuyos caudales proceden de los deshielos de las masas glaciares de las montañas nevadas.

Durante el retroceso o proceso de deshielo, el área y espacio ocupado por los glaciares ha dado lugar a la formación de lagunas de muy variadas dimensiones, por cierto, en terrenos de morfología muy variada tanto en forma, como en pendientes, lo cual a la postre ha constituido uno de los factores de peligrosidad luego de transcurrido un cierto tiempo de evolución.

Este documento no constituye ni pretende ser un archivo minucioso de lo acontecido con las sociedades que han vivido en las cuencas glaciares, sino simplemente mostrar cómo el hombre andino ha sabido crear los métodos y procedimientos para contrarrestar las acechanzas de la naturaleza dentro de su propósito instintivo de sobrevivencia propia y de su descendencia.

## PLANIFICACIÓN Y ACCIONES PARA MITIGAR RIESGOS DE ORIGEN GLACIAR

El Perú es un país de los denominados en desarrollo, que al igual que otros en el mismo proceso, no ha prestado el suficiente apoyo al conocimiento de la realidad desde diferentes puntos de vista, tales como el geográfico, climatológico, de la vida animal, de las especies vegetales, etc., y más bien, el trabajo que han realizado esforzados e inteligentes pioneros en cada una de las actividades del desarrollo, de la conservación y preservación de nuestros recursos, ha sido simplemente por aspectos coyunturales.

Lamentablemente, no tenemos un esfuerzo común de planificar nuestro desarrollo con la debida anticipación, con el debido conocimiento básico tomado desde las mismas fuentes mediante un meticuloso y sistemático proceso articulado e interinstitucional de recolección y procesamiento de la información en diferentes especialidades. Cada institución trabaja por su lado, por su propio interés, si es que lo tiene, de acuerdo a planes en algunos casos superpuestos de duplicidad de acciones, y obviamente efectuando un dispendio de recursos que en un país como el nuestro son tan difíciles de conseguir.

Se conoce de esfuerzos titánicos de trabajar por el bien común, tal como la instalación de la red hidrometeorológica de la cuenca del Río Santa que fue ideada, proyectada y ejecutada por el muy estimado Ing. Luis Ghilino. Esta red fue mantenida por las instituciones que manejaban la Hidroeléctrica Cañón

del Pato mientras pertenecía al Estado Peruano, sin embargo, cuando se privatizó esta central hidroeléctrica, los nuevos dueños abandonaron esta red hidrometeorológica, ocasionando por lo tanto un perjuicio inconmensurable para el desarrollo de todos los usuarios de las aguas del río Santa, tanto para el departamento de Ancash como de La Libertad. En algún momento, el gobierno peruano deberá tomar su papel tutelar y sancionar debidamente a la empresa dueña del Cañón del Pato por semejante perjuicio.

La dinámica social también ha invadido los predios de la naturaleza de tal manera que las preocupaciones antiguas relacionadas a la caída de masas glaciares y posible desborde de las lagunas ahora se han convertido también en la urgencia de efectuar una adecuada gestión del agua. El cambio climático está afectando principalmente al recurso hídrico, es decir, a la disponibilidad de agua que tenemos en el planeta.

Las catástrofes ocurridas debido a devastadores aluviones de hielo, rocas y lodo en la Cordillera Blanca y en otras cordilleras de nuestro país, han hecho pensar en la necesidad de fomentar los estudios detallados de evaluación de riesgos a fin de tener un conocimiento pleno y metódico de las condiciones naturales de las áreas montañosas, de tal manera que se pueda evitar la repetición del desastre y poner a salvo no solamente la vida de los pobladores sino los medios de vida de la población en general.

Con tal objeto se creó una oficina encargada de evaluar las condiciones de estabilidad de las lagunas de origen glaciar en la Cordillera Blanca y luego en las otras cordilleras del país. En principio, la tarea principal fue la de ejecutar un inventario de lagunas para identificar aquellas que reúnen condiciones de peligrosidad para adoptar las adecuadas medidas preventivas. Se consideró que solamente una entidad técnicamente organizada podría encargarse de una labor científica de tanta responsabilidad e importancia.

A partir de la década de 1930, la Cordillera Blanca y sus glaciares han sido objeto de muchos estudios por parte de nacionales y extranjeros, todos ellos orientados a observar y evaluar la distribución y seguridad de las numerosas lagunas cordilleranas. Cabe destacar que éstos fueron trabajos dispersos y sin la necesaria unidad de conjunto y de criterio indispensables para que sirvan de base a una labor metódica.

Los estudios en las zonas glaciares, como es evidente en estos tiempos, debe orientarse a diferentes objetivos, quizás todos ellos relacionados con la

gestión del riesgo de desastres y por lo tanto, en el caso de la Cordillera Blanca, desde la investigación de las lagunas peligrosas, que fue el objetivo primario, paulatinamente también, se han dirigido hacia la investigación de la física glaciaria, orientándolos luego hacia la dinámica y variación de volumen y masa glaciaria, que es el tema actual dadas las implicancias del cambio climático en nuestro planeta.

Recientemente, la necesidad actual planteada por el crecimiento poblacional, el consiguiente incremento de la demanda por los recursos naturales y sus derivados, obliga a efectuar estudios más detallados de los efectos hidrológicos producidos por los cambios en las masas glaciares y la influencia que tendrá la variación de masas glaciares en la disponibilidad de agua en el futuro. Por lo tanto, el estudio en las áreas glaciares se orienta a mitigar las amenazas de avalanchas y desbordes de lagunas, por un lado, y analizar la disponibilidad hídrica por cuenca, subcuenca y microcuenca.

En este documento, nos orientaremos principalmente a los estudios, proyectos y obras de seguridad en las lagunas peligrosas tanto de la Cordillera Blanca como en otras cordilleras peruanas, con una tecnología creada y desarrollada en nuestro país. De esta manera, se ha logrado disminuir la amenaza representada por los volúmenes significativos de muchas lagunas mediante las obras de seguridad efectuadas en 35 lagunas de la Cordillera Blanca. Estas obras han desempeñado, como es evidente, una función de prevención, cuya efectividad en muchas lagunas ha sido comprobada por ejemplo por el evento ocurrido en la Laguna 513 del 11 de abril de 2010, oportunidad en la que el borde libre de 20 metros evitó un desborde de características catastróficas hacia la cuenca del río Chucchún, que atraviesa la localidad de Acopampa, principalmente, y en el sector sur de la ciudad de Carhuaz.

## LA CORDILLERA BLANCA Y EL CALLEJÓN DE HUAYLAS

La Cordillera Blanca y el Callejón de Huaylas se orientan de SSE a NNO, entre dos cadenas de montañas: al este, la Cordillera Blanca (la cordillera nevada más alta y con mayor cantidad de glaciares del trópico terrestre) y al oeste, la Cordillera Negra. La Cordillera Blanca, denominada así por poseer todavía masas de hielo en sus cumbres, tiene como estructura principal la roca granodiorítica, juntamente con pizarras, areniscas y lutitas que forman el corazón de este macizo de roca plutónica. La Cordillera Negra,

a su vez, está constituida en su mayor parte por rocas eruptivas.

El valle del Callejón de Huaylas está parcialmente cubierto con materiales fluvioglaciares, glaciares o aluviales muy disectados con afloramientos de rocas volcánicas.

Antes de la ocurrencia de la intrusión del batolito granodiorítico de la Cordillera Blanca, se estima que la morfología de este valle correspondía a fines del terciario y sobre todo al cuaternario, cuando formaba un valle de muy poca pendiente y baja altura hace unos 7 millones de años. Cuando se produjo la intrusión del batolito en la Cordillera Blanca, el valle se elevó a más de 2000 metros, al mismo tiempo que ocurrió un cizallamiento en el flanco oeste, lo cual se halla combinado con numerosas fallas transversales.

El proceso de levantamiento del batolito produjo una erosión más rápida e intensa, formando cañones y quebradas laterales. Las sucesivas glaciaciones dieron un toque importante a la geomorfología de la región.



Panorámica de la Cordillera Blanca

Actualmente, se conoce que en los últimos 680,000 años se han producido siete procesos de glaciación, habiendo tenido su pico de mayor enfriamiento en promedio en la última gran glaciación ocurrida hace 18,000 años. El último pequeño enfriamiento ocurrió entre los años 1350 a 1850, denominado como la “Pequeña Edad de Hielo”, cuyas huellas se perciben claramente en las pequeñas morrenas cerca a los glaciares de la Cordillera Blanca. Este evento climático a decir de los expertos, cambió la historia de Europa.

En las partes altas se pueden distinguir abundantes ejemplos de actividad glaciaria tales como circos glaciares, quebradas en forma de U, arcos morrénicos y, naturalmente, lagunas. En las partes bajas, se observa una gran heterogeneidad de depósitos

detríticos, junto a formas irregulares del proceso volcánico que Infrayace ha determinado como una morfología muy especial en las riberas del río Santa, con ondulaciones suaves cortadas por abruptos farallones de erosión que se pueden confundir con huellas de deslizamientos. Por lo tanto, además de la estabilidad de la propia roca que depende de su mecánica, cabe estudiar las condiciones que vinculan el glaciar con la roca base.

## RUPTURA Y AVALANCHAS DE LOS GLACIARES

Estos son los tipos de eventos que han propiciado la mayor parte de catástrofes en diversos lugares de la Cordillera Blanca, y, por lo tanto, su estudio y su evaluación son de suma importancia. El conocimiento de los motivos reales que ocasionan la caída de masas glaciares nos puede dar un indicio inicial para tomar las medidas preventivas del caso. Se considera que las condiciones climáticas del planeta pueden hacer variar las causas del deslizamiento, ruptura y consiguiente movimiento de un glaciar, lo cual proporciona un motivo de investigación realmente fascinante.

Cuando leemos las conclusiones de los eventos desde los años 60 y los comparamos con lo que viene aconteciendo actualmente, nos damos cuenta de que la ciencia, en este caso, también tiene que actuar con conocimientos actualizados. En esa década, los glaciares se estudiaban más desde el punto de vista de su estructura física y los procesos que originaban su transformación; actualmente, se enfocan más a los cambios de volumen y masa ante los impactos del cambio climático. Por lo tanto, el análisis temporal de la variabilidad volumétrica de los glaciares mediante el uso de imágenes satelitales, mediciones topográficas, comparaciones fotográficas y otros procedimientos de evaluación constituyen en este momento los métodos para establecer la variación en volumen de los glaciares, siendo el objetivo principal determinar la influencia de la disminución de las masas glaciares en la disponibilidad hídrica para diferentes actividades.

**Si consideramos el caso de los glaciares fríos**, cuyas temperaturas son inferiores al punto de fusión del hielo, con lo cual los glaciares se hallan bien adheridos a la roca base, de acuerdo al Dr. Louis Liboutry, primero se producen las rupturas por cohesión en el hielo antes de la ruptura por adherencia al contacto.

**Si consideramos el caso de los glaciares templados**, en los cuales las temperaturas son

más o menos iguales al punto de fusión del hielo, solo interviene la fuerza de fricción del hielo sobre la superficie de la roca.

En el caso de un sismo, se ve que la fuerza tangencial puede sobrepasar teóricamente la resistencia del contacto. En realidad, a medida que aumenta la velocidad del desplazamiento, del deslizamiento, puede ocurrir lo siguiente:

- a) Aparece una cavitación, donde las fuerzas de fricción disminuyen y la velocidad aumenta. Este fenómeno puede acelerarse hasta provocar la caída del hielo.
- b) No hay cavitación, donde las fuerzas de fricción aumentan al igual que la velocidad y se establece de este modo un equilibrio dinámico. En el caso de un sismo, la amplitud y la duración del movimiento generalmente no permiten que se produzca el fenómeno de cavitación.

Por otro lado, se considera que la presencia de agua de fusión entre el hielo y la roca base disminuye la resistencia del contacto o adherencia entre el hielo y la roca, lo que podría ser también el origen del movimiento, es decir, del deslizamiento.

También conviene señalar que la presencia del agua de fusión, así como las fuerzas originadas por un sismo, son factores que favorecen la caída o deslizamiento de un glaciar ya desequilibrado, por una de las siguientes razones:

- a) El cambio en las condiciones térmicas.- El cambio de la temperatura afecta el comportamiento de un glaciar. Los avances bruscos de los glaciares alcanzando inclusive velocidades de 35 m por día se deben a una elevación de la temperatura del contacto entre roca-hielo. En el caso de un glaciar de valle se traduce en una aceleración violenta, mientras que en el caso de un glaciar colgante se traduce en una caída.
- b) Las ondas de crecida.- El equilibrio de un glaciar también depende, entre otras causas, de la acumulación y la ablación. Ante un exceso de acumulación, se puede traducir en una onda de crecida, lo cual originaría un cambio en las condiciones geométricas (espesor, pendiente, etc.) y las condiciones físicas del glaciar. El súbito aumento del espesor de un glaciar puede romper el equilibrio ocasionando un deslizamiento muy fuerte.

Ante esta situación, se recomendaba instalar un sistema de previsión con los siguientes objetivos:

- a) Determinar las temperaturas en el hielo en diferentes alturas y seguir su evolución con el tiempo.
- b) Vigilancia del régimen de los glaciares para conocer la aparición de las ondas de crecida.

Desafortunadamente, estos procedimientos resultaron ineficaces. Por lo tanto, si bien no es posible prever o predecir la ocurrencia de estos fenómenos catastróficos, sí es posible la prevención mediante la eliminación de glaciares peligrosos por medio de explosión o fusión; sin embargo, por razones económicas y de ausencia de seguridad o confiabilidad, no han sido plenamente recomendadas. Por lo tanto la conclusión, es ubicar a las poblaciones en lugares seguros protegidas de los riesgos que significan las avalanchas de hielo mediante un adecuado ordenamiento territorial.

**Las lagunas en la Cordillera Blanca.-** La actualización del inventario glaciar y de lagunas de origen glaciar, nos señala que tenemos 830 lagunas en la Cordillera Blanca, de las cuales 513 drenan hacia la cuenca del Río Santa, o sea a la cuenca del Océano Pacífico. Todas ellas con áreas mayores a 5000 metros cuadrados y los volúmenes entre 100,000 m<sup>3</sup> y 79 millones de m<sup>3</sup>. Muchas de ellas en el pasado ocasionaron catástrofes y otras constituyen peligros potenciales. Los fenómenos de ruptura de los diques morrénicos no han sido manifestaciones de fenómenos erráticos, sino fenómenos casi periódicos que persisten en las cordilleras nevadas. En las tres últimas décadas, la exacerbación de la variabilidad climática ha modificado la estabilidad de los glaciares con condiciones diferentes a las existentes antes de la década de 1970, por lo cual debemos tomar medidas de prevención aumentando estos nuevos criterios al análisis de la gestión del riesgo.

El análisis de las condiciones de estabilidad de los glaciares o el estudio de las condiciones de vulnerabilidad de las lagunas que se hallan al pie de glaciares, desde un punto de vista pragmático, nos ha orientado a una solución de seguridad que se ha venido aplicando en los últimos 60 años y es **“reducir el volumen de las lagunas”** una solución menos radical, más analítica y ambiental que el “vaciado de las lagunas” planteado originalmente.

Este proceso de reducción del volumen de las lagunas naturalmente que ha tenido una teoría inicial, la cual ha venido siendo mejorada paulatinamente en concordancia con la disponibilidad de recursos

económicos y tecnología actualizada tanto en procedimientos como en equipo mecánico.

## FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ANÁLISIS DEL GRADO DE PELIGROSIDAD DE UNA LAGUNA

**Las características de la masa del glaciar**, para analizar la pendiente, la magnitud de agrietamiento, la magnitud de fragmentación del glaciar, su espesor estimado,

**La pendiente del lecho rocoso**, que es un factor importante para la ocurrencia de avalanchas sobre las lagunas. La pendiente permitirá efectuar los cálculos de estabilidad de la masa glaciar en combinación con la posibilidad de ocurrencia de la falla por efectos de borde o por el tipo de rampa.

**Geometría y Estructura del vaso de la laguna**, considerando que muchos desbordes violentos de las lagunas de origen glaciar se han debido a deslizamientos de material morrénico o rocoso sobre la laguna, por lo cual la pendiente de los taludes interiores del vaso de la laguna y su composición determinará al final las condiciones de estabilidad del vaso de la laguna.

**Longitud del valle de recorrido.-** Una vez producido un fenómeno GLOF (aluvión producido por el desborde de una laguna de origen glaciar – por sus siglas en inglés), la destrucción que ocasione aguas abajo dependerá mucho de la energía cinética y el volumen que transporte. La energía cinética dependerá mucho de las características de la ruta que recorre el flujo. Un recorrido largo y con poca pendiente permitirá disipar la energía del flujo tal como ha ocurrido en los valles inferiores a la capa glaciar Quelccaya, donde en el año 2006 se produjo el desborde de la laguna nueva al pie de la lengua glaciar Qori Kalis. Dada la extensa longitud del valle de recorrido y su pendiente sumamente suave, el flujo perdió velocidad y naturalmente los pobladores aguas abajo no percibieron lo que ocurrió en la cabecera de cuenca, salvo un aumento en el caudal del Río Salcca.

En cambio, cuando en octubre de 2010 se produjo el rebose de una pequeña laguna al pie del Nevado Chicón de la Cordillera Urubamba, el “pequeño” volumen expulsado por la caída de una masa glaciar sobre dicha laguna provocó un flujo que ocasionó destrozos debido a que la pendiente aguas abajo es sumamente pronunciada, propiciando una alta velocidad destructora que felizmente encontró en su recorrido la planicie denominada Occoruruyoc donde

se disipó parcialmente la energía que llevaba el flujo.

**Presencia de glaciares colgantes.-** Las masas de hielo sobre pendientes muy pronunciadas son denominados glaciares colgantes, los cuales combinando volumen más aceleración de caída pueden ocasionar altos oleajes y empujes hidrodinámicos sumamente peligrosos, tal como ha ocurrido en la Laguna 513 cuando una masa de unos 380,000 m<sup>3</sup> inició su deslizamiento hacia la laguna, arrastrando en el camino roca fragmentada y glaciario que presumiblemente pudo haber alcanzado el millón de metros cúbicos, ocasionando una ola de aproximadamente 30 metros sobre una laguna de 8 millones de metros cúbicos y 80 metros de profundidad. La disminución de la adherencia entre el hielo y la roca base -producto del calentamiento global y su incidencia en los glaciares tropicales-, está ocasionando la desestabilización de las masas glaciares adheridas a taludes rocosos muy inclinados.

**Lenguas glaciares socavadas por lagunas.-** Se conoce que los glaciares, durante su retroceso, van dejando tras de sí espacios que paulatinamente se van llenando con agua de fusión o derretimiento del mismo, formando lagunas. Dado que algunas lagunas se hallan todavía en contacto con la lengua glaciario, la diferencia de temperaturas entre el agua y el glaciario origina un proceso de socavación o calving que prácticamente quita pie a la lengua glaciario, originando una especie de ménsula o voladizo que en cierto momento se quiebra y se desprende de la masa total y cae sobre la laguna originando un oleaje que, dependiendo de la magnitud de la masa glaciario y del volumen de la laguna, puede ser peligroso. Este fenómeno ha ocurrido en numerosos lugares y probablemente ha sido la causa de catástrofes como en Huaraz con la laguna Palcacocha, en Huancayo con la laguna Lazo Huntay y recientemente, en la laguna sin nombre al pie del nevado Chicón.

**Volumen de la laguna.-** Una vez que se producen diferentes tipos de fenómenos detonantes, todos ellos inciden sobre las lagunas donde se inicia realmente el proceso destructivo (con excepción de la avalancha producida en el nevado Huascarán en 1970 o en las avalanchas de nieve propias en los Alpes) y naturalmente la magnitud dependerá muchísimo del volumen de la laguna. El detonante sísmico (si realmente produce la desestabilización del glaciario), la avalancha de glaciario, el desplome del glaciario, el deslizamiento de los taludes del vaso de la laguna u otro factor al final de cuentas impulsa la laguna hacia aguas abajo. Por lo tanto, la

medida más simple y más efectiva que se ha venido efectuando ha sido la disminución del volumen de las lagunas caracterizadas como peligrosas en los más de 60 años de obras de prevención en las cordilleras nevadas del Perú.

## PROCEDIMIENTOS PARA DISMINUIR LA AMENAZA DE LAS LAGUNAS PELIGROSAS

El procedimiento para la ejecución de obras de seguridad en las lagunas peligrosas de la Cordillera Blanca se ha orientado a dos objetivos:

- Disminuir el volumen de las lagunas y construir las estructuras necesarias para evitar el incremento del volumen y contener los posibles oleajes que se produzcan por la caída de masas glaciares.
- Aprovechar las obras de seguridad para constituir en algunos casos las mismas lagunas como reservorios de regulación, dada la futura escasez del agua.

**Sobre el primer objetivo,** la reducción del volumen de las lagunas se ha efectuado mediante:

- a) Cortes a tajo abierto en los materiales morrénicos, o sea material suelto, para ir bajando paulatinamente el nivel de las aguas en forma paralela al corte. Esta forma de trabajo se ha llevado a cabo en numerosas lagunas con diques morrénicos, sin embargo, conviene mencionar que ha sido un procedimiento muy audaz, que en la mayor parte de los casos ha sido exitoso únicamente porque durante el proceso de ejecución de las labores no se produjeron avalanchas de glaciario sobre la laguna por este motivo y estos casos debe instalarse un sistema de alerta temprana.
- b) En los casos en los que el dique y vaso de la laguna son de material rocoso, entonces se procede a la horadación de un túnel que permita bajar el nivel de las aguas y guardar un borde libre adecuado para contener los posibles oleajes. En estos casos también es posible usar estos vasos o cubetas de lagunas como vasos reguladores de recurso hídrico dado que el material constitutivo del dique es bastante competente.

**Sobre el segundo objetivo,** y tal como se ha mencionado en el párrafo anterior, hay la gran posibilidad de aprovechar las lagunas de origen glaciario

como reservorios reguladores.

En varias cordillera nevadas del país tales como en las cuencas del río Mantaro, río San Gabán y río Santa se han construido muchos pequeños reservorios en las cubetas o vasos que la naturaleza ha formado luego que los glaciares se han derretido y dejado los espacios para formar las lagunas. Estas lagunas en muchos casos tienen condiciones de estanqueidad necesarias para constituirse en embalses reguladores.

Por lo tanto la investigación no solamente se orienta a reducir la amenaza o peligro sino también a plantear alternativas de incremento de la oferta de recurso hídrico en las cuencas glaciares mediante la propuesta de nuevos reservorios.

**EJEMPLOS DE OBRAS EJECUTADAS PARA DISMINUIR EL RIESGO DE LAS LAGUNAS PELIGROSAS**



Laguna Huallcacocha - Carhuaz  
Fig. 1



Laguna Cuchillacocha - Huaraz Fig. 2

Laguna Shallap - Huaraz Fig. 2



Laguna Llaca - Huaraz  
Fig. 3

### LAGUNAS CON DIQUES MORRÉNICOS

Se han ejecutado alrededor de 33 obras en lagunas con diques morrénicos, en todos los casos las obras han estado orientadas a disminuir el volumen de las lagunas mediante el descenso paulatino del espejo de agua con cortes a tajo abierto, como se ve en la figura 1 que corresponde a la laguna Huallcacocha en la provincia de Carhuaz, para luego construir conductos de rebose y enseguida restituir un dique de seguridad de tierra con núcleo impermeable para contrarrestar los efectos de posibles oleajes por la acción de avalanchas de hielo y roca. Obras similares se han ejecutado en otras lagunas tal como se ve en las figuras 2-3.

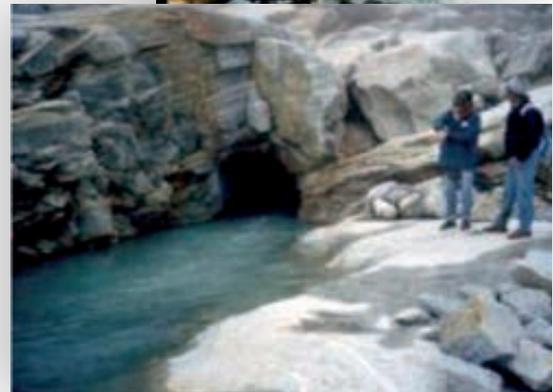
### LAGUNAS CON DIQUES ROCOSOS

#### Laguna 513

Ubicada en la cabecera de la subcuenca del Río Chucchún al pie del Nevado Hualcán a 4431 msnm, en el distrito y provincia de Carhuaz, fue estudiada cuando recién iniciaba su formación en los años 1970 y terminó su formación a fines de los años 1980, provocando la preocupación de la población de la subcuenca Chucchún, debido a los permanentes rebales por efecto de los desplomes de glaciar procedentes de la lengua glaciar. Al inicio, como una medida temporal se procedió a efectuar una tarea de sifonaje logrando bajar el nivel de las aguas en 5 metros, pero posteriormente con el financiamiento del INDECI, se procedió a horadar un túnel de 146 metros de longitud bajando el nivel de las aguas en 20 metros.

Las siguientes vistas nos muestran la laguna al final de su formación, el proceso de drenaje y la boca

de salida del túnel perforado para dejar un borde libre de 20 metros. Las obras terminaron en 1993.



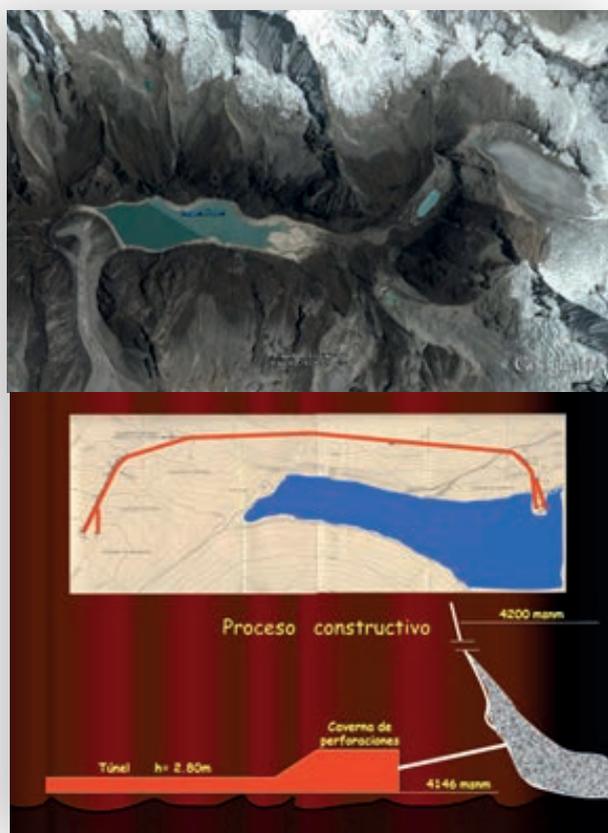
Laguna 513 - Carhuaz

En el año 2010, 17 años después de concluidas las obras, la naturaleza nos mostró que la obra ejecutada no fue suficiente, dado que una ola de 30 metros de altura superó el borde libre permitiendo el rebose de un cierto volumen de agua que originó el pánico en la población y produjo algunos daños en las inmediaciones del cauce del Río Chucchún. Por dicho motivo, se ha planteado la construcción de un segundo túnel 30 más abajo del primero. Este segundo túnel, de acuerdo al diseño efectuado, debe contar adicionalmente con un sistema de válvulas para

regular alrededor de 4 millones de metros cúbicos de agua para los diferentes usos. De esta manera se estará trabajando en los dos objetivos fundamentales actuales que son por un lado la reducción de la amenaza y también aumentando la oferta de recurso hídrico para los diferentes usos.

### Laguna Parón

La laguna Parón ha constituido uno de los trabajos más importantes dentro de los procesos de mitigación de los riesgos de origen glaciar. El estudio y análisis de la laguna conjuntamente con los glaciares circundantes se inició en la década de 1960, y en aquella oportunidad se estableció que la mejor medida de prevención sería bajar el nivel de las aguas dejando un borde libre de seguridad de 15 metros. Para este efecto, se recomendó perforar un túnel por la margen derecha de la laguna y por el basamento rocoso de granodiorita. La longitud del túnel fue de 1245 metros y se conectó el túnel con la laguna a 54 metros de profundidad, procediéndose al desagüe parcial, estudio geotécnico del dique natural y luego instalación de dos compuertas para regular hasta 40 millones de metros cúbicos para los diferentes usos aguas abajo.



En las siguientes fotografías se muestra la Laguna Parón en planta y el diagrama que muestra la ubicación

del túnel y un corte que muestra la conexión túnel – laguna.

### Bibliografía

- Carey, M.: In the Shadow of Melting Glaciers: Climate Change and Andean Society, Oxford 27 Univ. Press, New York, 2010.
- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C., and Haeberli, 1 W.: An integrated socio environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru, Climatic Change 112:733–767, 2012.
- Chronology of Global Climate Change- Public Utilities Commission of Ohio. Columbus-Ohio 1996.
- Cordillera Blanca – Glaciares en la Historia – Alcides Ames Márquez y Bernard Francou – Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos-1995,24(1):37-64.
- Glaciological problems set by the control of dangerous lakes i Cordillera Blanca, Peru. III. Study of moraines and mass balances at Safuna by Louis Lllboutry, (Laboratoire de Glaciologie du cnrs, Grenoble, France) Benjamin Morales Arnao (Instituto de Geología y Minería, Lima, Peru) and Bernard Schneider (Coyne et Bellier, Paris, France)
- Hidrandina (1988) Primer Inventario de Glaciares del Perú.
- Portocarrero, C. R. (1995) Retroceso de Glaciares en al Peru: Consecuencias Sobre los Recursos Hídricos y los Riesgos Geodinámicos. Bull. Inst. fr. Etudes andines 24(3):697-706.
- Portocarrero, C. R. (1995) Proyecto prioritario del afianzamiento hídrico del rio Santa, Hidrandina S.A., Huaraz (Perú), 28 pp.
- Portocarrero, C. R. (1998) El aluvión de Ahobamba del 27 de febrero de 1998, análisis de las causas y conclusiones, desde el punto de vista climatológico y glaciológico-Cusco-1998.
- Reducing risk from dangerous glacial lakes in the Cordillera Blanca, Perú. Technical Report: The Glacial Lake Handbook – USAID 2014. César Portocarrero.
- S Y Z Consultores Asociados (1986) Informe Final de Evaluación Laguna Parón.

# LOS RIOS ROJOS EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES, ALTERACION Y ACIDIFICACION DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

Autor: Ing. Gabriel Armando Martel Valverde

## Resumen

*La acidificación de los ríos, lagos y quebradas en la Cordillera Blanca producto del retroceso glaciar origina alteraciones en la calidad de agua, según los resultados preliminares obtenidos.*

## Palabras claves

ECA: Estándares de Calidad Ambiental / WGS: World Geodetic System / DAR (Drenaje Ácido de Roca) / DAM (Drenaje Ácido de Mina)

## INTRODUCCIÓN

La Cordillera de los Andes, formada por el batolito de Cordillera Blanca y Cordillera Negra, alberga los glaciares más importantes del Perú, donde nacen ríos, lagunas y quebradas. Los glaciares de la Cordillera Blanca están sufriendo procesos acelerados de desglaciación, lo que está generando que nuevas áreas que se mantuvieron cubiertas durante miles de años ahora estén expuestas y sometidas a la erosión glaciar y procesos de criofracción, que está generando la formación de material morrénico.

En el presente artículo se da a conocer los impactos sobre la calidad de las aguas superficiales que derivan de la desglaciación, la generación del DAR, que provoca el incremento de la lixiviación de metales pesados y la alteración de la calidad de agua.

## OBJETIVOS

- Analizar las condiciones generadoras de DAR en los cuerpos de agua superficial en la Cordillera Blanca.
- Describir las condiciones generadoras de DAR en el batolito de la Cordillera Blanca.
- Describir el manejo de DAR en la Cordillera Blanca.

## METODOLOGÍA

Consintió en vistas de inspección a las quebradas de Quillcayhuanca, Santa Cruz y Llaca, la toma de muestras de agua para su análisis físico, químico y control de la calidad. Revisión bibliografía de información relacionada al tema.

## CONTENIDO

### Condiciones Generadoras de Aguas Ácidas en el Batolito de La Cordillera Blanca.

La Cordillera Blanca es una gran cadena de montañas que, de acuerdo a la geología, está formada por material granítico que contiene formaciones laterales de rocas sedimentarias e importantes reservas de minerales, como oro, plata, plomo, cinc, cobre y carbón, que establecen condiciones para la generación del DAR.

Las características básicas de la geológica de la Cordillera Blanca son:

- Granodiorita es la roca base de la Cordillera Blanca.
- Rocas formadas por esquistos y areniscas

finas de espesor considerable con un buen grado de sedimentación en la Formación Chicama. Esta formación se encuentra sobre todo en algunos circos glaciares y depósitos fluvio-glacial.

- Rocas de cuarcita, areniscas y lutitas, con vetas de carbón, en la Formación Chimú. Cantos rodados de material detrítico.
- Areniscas y lutitas con delgadas capas de cuarcita marrón intercalan con piedra caliza y yeso. Este tipo de formación se encuentra sobre todo en la provincia de Carhuaz.



Figura 01. Exposición del batolito en la Cordillera Blanca, dentro de la quebrada Santa Cruz en Proceso de desglaciación.

En la Cordillera Blanca la generación de DAR está determinada por los siguientes factores:

- Material disgregado morrénico.
- Disponibilidad de pirita en nuevas zonas expuestas ante el retroceso glaciar.
- Presencia de condiciones oxidantes como el oxígeno (O<sub>2</sub>) ante el retroceso glaciar.
- Disponibilidad de agua procedente de la desglaciación para el proceso de oxidación.
- Precipitación estacional durante el año, lo que origina una variación de los caudales de las fuentes hídricas.

### El Calentamiento Global en la Generación de Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca

El calentamiento global sin duda genera indudables impactos a nivel mundial, y sus efectos en la Cordillera

Blanca llegan a alterar el caudal y la calidad del agua. De acuerdo a los trabajos realizados por el glaciólogo César Portocarrero, desde la década de 1970 al 2010, los glaciares de la Cordillera Blanca se redujeron de 723 a 480 km<sup>2</sup>. Esta disminución en la Cordillera Blanca ha dado como consecuencia lo siguiente:



Figura 02. Generación de material morrénico producto del retroceso glaciar en la laguna Taullicocha.

- La exposición de nuevas zonas mineralizadas y no mineralizadas con un área total de 243 km<sup>2</sup>.
- La formación y modificación de nuevas lagunas.
- Modificación del caudal de cuerpos de agua superficial que originan arrastres de material y sedimentos.



Figura 03. Modificación y alteración de los cursos de agua superficial en la quebrada Santa Cruz producto de desglaciación acelerada.

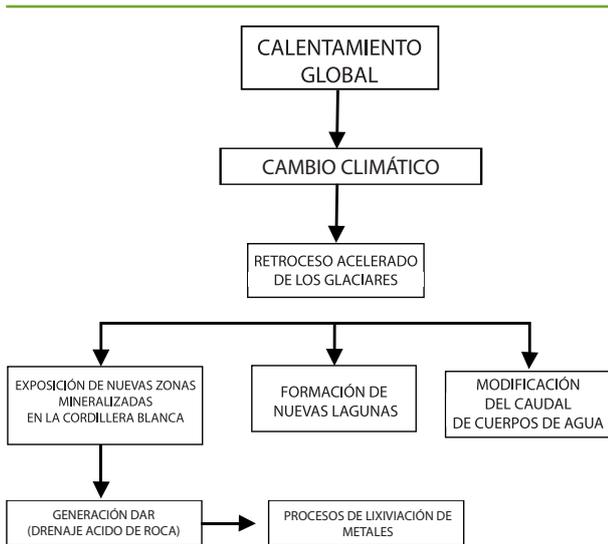


Diagrama 1: Los efectos del calentamiento global en la Cordillera Blanca para la generación de aguas ácidas  
Fuente: Elaboración Propia.

catalizan las reacciones de oxidación y obtienen energía de este proceso.



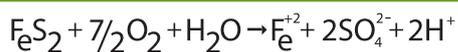
Figura 04. Proceso de formación de material morrénico al pie del nevado Taulliraju

### Proceso de Formación de Drenaje Ácido de Roca

El congelamiento y descongelamiento de la lámina de agua que rodea los minerales cautivos en las rocas debajo de los glaciares genera procesos de lixiviación y oxidación de los minerales, pasando a estar de estado sólido a estado líquido. Este proceso se agrava cuando los minerales presentes derivan de sulfuros como la pirita (FeS<sub>2</sub>) que es el más común en la naturaleza, encontrándose en formaciones de rocas ígneas y depósitos sedimentarios.

Los sulfuros son estables y muy insolubles mientras no entren en contacto con agentes oxidantes como el oxígeno (O<sub>2</sub>), en este caso los glaciares sirvieron como cápsulas. Actualmente, el retroceso glaciar crea condiciones reductoras que permiten la lixiviación del material por el incremento y la disponibilidad de oxígeno, esencial para la oxidación de sulfuros.

#### Ecuación general de oxidación de la Pirita



Por otro lado, el proceso de oxidación se podría dar de manera lenta. Sin embargo, la intervención de determinadas bacterias quimiolitótrofas, Acidithiobacillus ferrooxidans, Leptospirillum ferrooxidans y Acidithiobacillus thiooxidans, que tienen su desarrollo óptimo a condiciones de pH ácido,

### Coloración Rojiza en los Ríos de la Cordillera Blanca

La coloración rojiza de los ríos con metales disueltos se debe a la alta concentración de óxidos de hierro. Esto se hace evidente en la quebrada Quillcayhuanca, donde los cursos de agua han sido modificados y alterados, dando la impresión de observar un río de color rojo. Cuando los lixiviados circulan en la superficie, el hierro ferroso rápidamente se oxida a férrico, produciendo precipitados que confieren al agua su característico color rojizo. En la quebrada Quillcayhuanca este proceso fue acelerado por el abrupto corte del curso de agua producto de la construcción de un pequeño dique.



Figura 05. Coloración rojiza en el lecho de seco de la quebrada Quillcayhuanca en la Cordillera Blanca.



Figura 06. DAR en la quebrada Santa Cruz donde se muestra la tolerancia del Quisuar a la acidez.

### Predicción de la Generación de Drenaje Ácido de Roca

La predicción de la generación del DAR en la Cordillera Blanca es una tarea compleja y difícil. Delimitar las zonas donde se produce condiciones para la acidificación y lixiviación requiere de estudios detallado en áreas donde la desglaciación ha generado condiciones cambiantes y se han expuesto nuevas zonas mineralizadas de forma rápida.

En la actualidad, la predicción del DAR o DAM en minería se realiza mediante análisis de pruebas estática y cinética de material alterado de las unidades litológicas. Una prueba estática define el balance entre los minerales potencialmente generadores de acidez y aquellos potencialmente consumidores o neutralizadores del ácido. La prueba cinética sirve para confirmar el potencial de generación ácido y predecir la calidad del agua de drenaje. Esto se realiza sometiendo el material compuesto de desmonte a un intemperismo simulado, bajo condiciones controladas de laboratorio en ciclos semanales durante un periodo de cinco meses.

### Manejo del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca

Como hemos planteado, la generación de DAR se está haciendo más evidente al presentarse la exposición de nuevas zonas mineralizadas en la Cordillera Blanca. Los metales precipitan a diferentes pH, lo que hace difícil el manejo del DAR. La pregunta es si será posible prevenir, controlar y mitigar esto:

- **La prevención para la generación del DAR en la Cordillera Blanca**

Para la prevención de la generación del DAR en la Cordillera Blanca se debería considerar un aspecto importante el calentamiento global que es el incremento de la temperatura promedio sobre la superficie de la Tierra que es en gran parte responsable de la desglaciación y sus efectos, detener esto está fuera del alcance humano y suena utópico pensar que se puede lograr. Si así fuera, los efectos se registrarían a largo plazo.

- **El control de la generación de aguas acidas en la Cordillera Blanca**

Se podría dar si se identifican las zonas de alteración para planificar adecuadamente actividades de control de los efluentes, así como sus efectos al medio ambiente, promover la construcción de barreras de control, controlar los efluentes aislándolos del entorno. Estas actividades demandarían fuertes inversiones y financiamiento a largo o indeterminado plazo, dada la extensión de la Cordillera Blanca.

- **Mitigar la generación del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca.**

La mitigación es la única alternativa razonable. Si el proceso de generación de DAR continúa, se debería priorizar las zonas y realizar una adecuada caracterización para los tratamientos pasivos y activos.

Aquí surge un nuevo problema: los tratamientos pasivos podrían darse para pequeños flujos y el tratamiento activo se realizaría para tratar grandes volúmenes. Dada las condiciones naturales, demandaría la construcción de plantas de tratamiento que podrían ser financiadas si tenemos en cuenta la escasez del recurso agua como factor limitante para la generación de nuevos proyectos de inversión. El otro problema que surgiría sería el de los residuos propios



Figura 07. Monitoreo de agua superficial en aporte a la quebrada Quillcayhuanca.

del tratamiento, y la generación de lodos con contenido de metales pesados que deberían ser adecuadamente almacenados en grandes rellenos.

### Evaluación en la Quebrada Quillcayhuanca

La quebrada Quillcayhuanca se ubica en los distritos de Independencia y Huaraz en el departamento de Ancash, que atraviesa la ciudad de Huaraz, y es tributaria del río Santa.

La evaluación hidrológica preliminar efectuada en la quebrada Quillcayhuanca durante el mes de diciembre 2015 nos muestra en el lado sur valores de pH ácidos y en el norte pH alcalinos, existiendo una tendencia natural a la neutralización, lo que sin embargo no la hace apta para el consumo humano y mantiene valores que exceden los ECA. El incremento del pH acelera la precipitación de metales disueltos en especial en la zona de Cayesh en la cual se puede apreciar una marcada coloración rojiza en la zona.

### Riesgos de los Metales Pesados para la Salud

Los principales riesgos de la lixiviación de metales pesados que excedan los ECA en los cuerpos de agua superficial son variados. Entre los principales metales nocivos a la salud tenemos:

- Arsénico (As): Bronquitis; cáncer de esófago, laringe, pulmón y vejiga, hepatotoxicidad y enfermedades vasculares.
- Berilio (Be): Irritación de las membranas mucosas y de la piel, cáncer de pulmón.
- Cadmio (Cd): Bronquitis, enfisema,

Estaciones de control	pH	Coordenadas WGS-84	
		Este	Norte
QUI-AG-01	7.34	241232	8955057
QUI-AG-02	5.11	241757	8956460
QUI-AG-03	4.33	241699	8956482
QUI-AG-04	4.13	242400	8955095
QUI-AG-05	4.65	241174	8954638
QUI-AG-06	4.84	241270	8954965
QUI-AG-07	4.90	240340	8954289
QUI-AG-08	7.95	239384	8953727
QUI-AG-09	4.65	238805	8952803
QUI-AG-010	8.03	237943	8951835
QUI-AG-011	8.02	237450	8951474
QUI-AG-012	7.82	236899	8951032
QUI-AG-013	7.78	232342	8948435
QUI-AG-014	4.95	234753	8949128

Tabla 1. Características químicas del DAR, en la quebrada Quillcayhuanca.

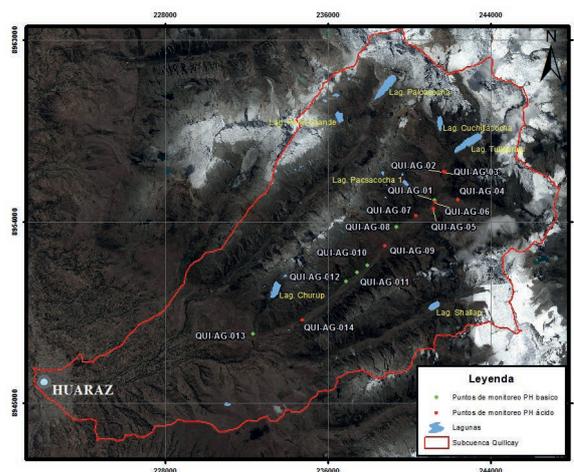


Figura 08. Mapa de ubicación de puntos de monitoreo en la quebrada Quillcayhuanca. Fuente: Ing. Helder Mallqui

nefrotoxicidad, infertilidad, cáncer de próstata, alteraciones neurológicas, hipertensión, enfermedades vasculares.

- Cromo (Cr): Nefrotoxicidad, hepatotoxicidad, cáncer de pulmón.
- Mercurio (Hg): Alteraciones neurológicas, afecciones del sistema respiratorio, autismo, depresión.
- Plomo (Pb): Alteraciones neurológicas (disminución del coeficiente intelectual infantil), nefrotoxicidad, anemia, cáncer de riñón.
- Mercurio (Hg): El metal pesado más estudiado y conocido. Cuando eliminamos este metal del cuerpo, el resto de metales tóxicos, incluso en mayores cantidades, son desalojados con mayor facilidad, siendo este metal el principal a vencer. Este metal se encarga de destruir los microtúbulos celulares impidiendo la eliminación de tóxicos.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describió la problemática de la generación del DAR en la Cordillera Blanca como consecuencia de la desglaciación. El estudio aborda de manera muy general este problema. Los resultados que se presentan provienen de la toma de muestras de agua realizadas en la quebrada Quillcayhuanca–Ancash. El proceso de monitoreo se realizó de acuerdo a lo estipulado en el Protocolo de Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos del ANA.

La evaluación de la calidad de agua dentro de la zona de Cordillera Blanca demanda un mayor análisis e investigación para poder delimitar las zonas, identificar los reales impactos y realizar trabajos de control que permitan mejorar y remediar zonas afectadas.

El monitoreo realizado en la quebrada Quillcayhuanca nos muestra de manera preliminar que la calidad del agua está alterada.

En estudios previos realizados en la misma subcuenca de Quillcayhuanca por el Ministerio del Ambiente en su publicación titulada “Una aproximación para evaluar la calidad del agua y potencial remediación en la subcuenca Quillcay” mostraron que de siete puntos de monitoreo escogidos, cinco presentaron pH ácidos y se pudo detectar concentraciones elevadas de metales pesados que exceden los ECA vigentes.

Entre los principales metales se tiene al Al, Fe, Mn y Cr. Estos metales se presentan en el río Quillcayhuanca, la Laguna Shallap, el río Shallap, la confluencia de ríos Shallap - Quillcayhuanca y el río Auqui.

No se tienen estudios que puedan evaluar los impactos relacionadas a la salud humana, actividades agrícolas y pecuarias.

El Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña, dada la importancia e interés del DAR, realizará estudios más detallados al respecto.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) A. I. López-Archilla (2005) Riotinto: un universo de mundos microbianos. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente.
- 2) Baquero et al., Macla, Juan B., Rafael F., Julio V., / David L., (2008) Tratamiento de Aguas Ácidas. Revista de la Sociedad Española de Mineralogía.
- 3) César A. Portocarrero (2014) The Glacial Lake Handbook. USAID.
- 4) Jorge R. (2007) Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. Universidad Tecnológica de Pereira.
- 5) Raúl L. (2014) Calidad de agua en cabeceras de cuenca altoandinas en el contexto de cambio climático. Ministerio del Ambiente.
- 6) Miguel-Sarmiento, A., Nieto-Líñán, J.M., Olías-Álvarez, M., Ruiz- Cánovas, C. 2010. La Contaminación Minera de los Ríos Tinto y Odiel.
- 7) LIFE. (2012). Drenajes Ácidos de Minas (AMD). 16/12/15, de LIFE- ETAD Sitio web: <http://www.lifeetad.com/index.php/es/drenajes-acidos-de-minas-amd>

## CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO QUILLCAY

Por: Ivonne Sotelo, Ricardo Durán y Alexzander Santiago

### Resumen

*El presente estudio busca conocer el comportamiento de la precipitación en la subcuenca del río Quillcay mediante la generación de mapas de caracterización climática. En relación a esto, es importante mencionar que mucha de la información hidrometeorológica de toda la Cuenca del Río Santa, existe solo hasta el año 2000, pues varias estaciones dejaron de operar ese año, principalmente aquellas administradas por Duke Energy International. En nuestro caso, se recopiló la información pluviométrica de las estaciones existentes dentro y fuera de la zona de estudio del periodo 1971 a 1999, correspondiente a cuatro estaciones pluviométricas que tuvieron un mejor desempeño estadístico. Se evaluaron diferentes variables para explicar la variación de la precipitación e identificar así la que mejor se ajuste a nuestra zona de estudio.*

### Palabras claves

Precipitación / Mapa de caracterización climática / Distancia al mar / Latitud / Longitud / Subcuenca del río Quillcay (Huaraz, Ancash)

### INTRODUCCIÓN

El presente estudio busca conocer el comportamiento de la precipitación en la subcuenca del río Quillcay mediante la generación de mapas de caracterización climática. En relación a esto, es importante mencionar que mucha de la información hidrometeorológica de toda la Cuenca del Río Santa, existe solo hasta el año 2000, pues varias estaciones dejaron de operar ese año, principalmente aquellas administradas por Duke Energy International y la información de las estaciones instaladas posterior a esa fecha no es de fácil acceso. Ante la necesidad de contar con este tipo de información para poder realizar estudios a nivel regional, el INAIGEM actualmente está impulsando la reactivación de esta red de estaciones que dejó de operar; y a la vez está promoviendo la recopilación de toda la información hidrometeorológica existente de Ancash. A razón de esto, para el presente estudio se recopiló la información pluviométrica de las estaciones a las que se pudo tener acceso, ubicadas dentro y fuera de la zona de estudio, del periodo 1971

a 1999, correspondiente a cuatro estaciones pluviométricas que tuvieron un mejor desempeño estadístico. Se evaluaron diferentes variables para explicar la variación de la precipitación e identificar así la que mejor se ajuste a nuestra zona de estudio.

### Área de estudio

La subcuenca del río Quillcay se localiza en los Andes centrales del Perú en el Continente Sudamericano, y es una de las principales aportantes de la cuenca del río Santa. Limita por el norte con la subcuenca de Llaca y por el sur con la subcuenca de Pariac.

Políticamente, está ubicada en los distritos de Independencia y Huaraz, pertenecientes a la Provincia de Huaraz, Departamento de Ancash.

### OBJETIVO

- Caracterizar el comportamiento climático de la precipitación en la Subcuenca del río Quillcay durante el periodo 1971 – 1999.

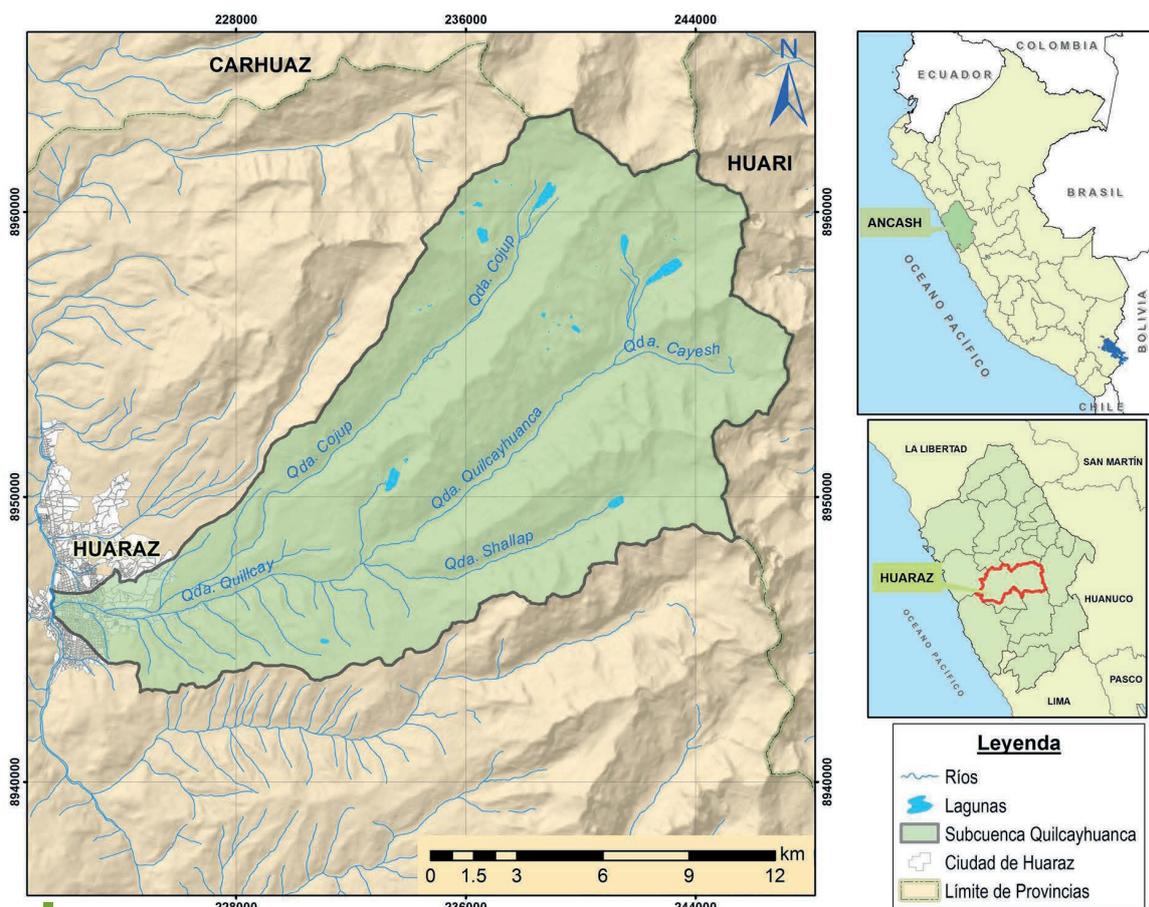


Figura 1. Mapa de ubicación de la Subcuenca del río Quillcay  
Fuente: Elaboración IGC - INAIGEM

## METODOLOGÍA

- Identificación, recopilación y selección de información pluviométrica consistente de la zona de estudio.
- Generación de información pluviométrica para estaciones de apoyo.
- Evaluación de las variables (latitud, longitud, altitud y distancia al mar) que mejor expliquen la variación de la precipitación.
- Generación de mapas de caracterización climática de precipitación de la subcuenca del río Quillcay.

## CONTENIDO

### Estaciones pluviométricas de estudio

Dentro de la subcuenca del río Quillcay, existe una sola estación, llamada Huaraz, ubicada casi en el punto de cierre de la subcuenca, que cuenta con registro histórico de información pluviométrica. Es por ello que se identificaron otras cuatro estaciones

aledañas, que se tomaron en cuenta para este análisis por su cercanía y también por el registro histórico que poseen: Shacaypampa, Querococha, Chancos y Llanganuco. La información fue proporcionada por la empresa Duke Energy Internacional (Central Hidroeléctrica del Cañón del Pato), y corresponde a datos mensuales de precipitación del periodo 1971 – 1999, analizados, tratados y en algunos casos completados, llegando a un nivel de confianza del 95%, ya que toda esta información fue monitoreada por la empresa en mención.

### Precipitación promedio mensual

En el cuadro 1 y la figura 2, se presenta la precipitación promedio mensual de las 5 estaciones identificadas, donde la estación pluviométrica de Querococha presenta el mayor valor en el mes de marzo con 171.33 mm. Este análisis se basa en el periodo de mayor precipitación, que es entre los meses de diciembre y marzo. Con respecto a la época seca, entre los meses de mayo y agosto, la estación pluviométrica con menor valor de precipitación corresponde a Chancos, con 0.35 mm.

Cuadro 1. Precipitación promedio mensual periodo 1971 - 1999 (mm)

Estación (apoyo)	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Querococha	3930	163.80	160.81	171.33	96.24	38.29	13.64	5.49	14.16	41.34	82.50	96.80	121.96
Shacaypampa	3600	91.16	120.40	127.40	65.02	25.20	4.12	0.47	3.29	13.24	41.82	54.86	73.98
Huaraz	3063	116.38	120.53	134.82	83.83	24.99	4.99	1.74	6.63	29.63	64.84	65.38	87.71
Chancos	2840	96.05	94.41	125.55	76.25	18.76	3.18	0.35	2.23	9.18	36.13	45.95	68.41
Llanganuco	3850	87.21	107.80	137.89	76.99	24.51	3.59	0.47	3.98	13.08	34.20	60.83	73.71

Fuente: (Tarazona, 2005)

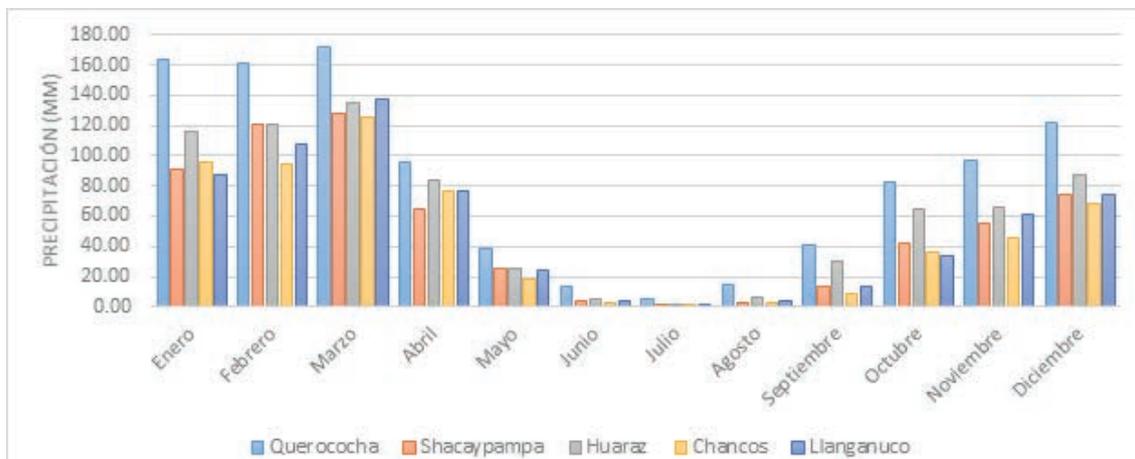


Figura 2. Variación temporal de la Precipitación Promedio mensual

En zonas montañosas que tienen características geográficas relativamente homogéneas, la altitud explica en gran proporción la variación anual de la precipitación. Por esta razón, algunos investigadores desarrollan únicamente la relación de precipitación contra elevación para dichas áreas (Linsley, Kohler, & Paulus, 1977). Sin embargo, también se ha investigado la variación de la precipitación debido a otros factores con el objetivo de explicar con más certeza, su comportamiento.

Las precipitaciones se distribuyen de forma desigual en el planeta debido a la latitud. Las áreas próximas al ecuador, que son más cálidas y tienen grandes cantidades de vapor de agua, registran más lluvias que las zonas templadas y las regiones polares. Estas últimas presentan escasa cantidad de vapor de agua y bajos niveles de evaporación. Con relación a la distancia al mar, es fuente de humedad, y por eso el mismo autor señala que el mar es fuente de humedad, y por eso el litoral recibe más precipitaciones que el interior de los continentes. No obstante, existen notables diferencias entre unas fachadas marítimas

y otras en función de los vientos dominantes y de las corrientes oceánicas, ya sean frías o cálidas (Roubault, M. et.al).

De acuerdo a Milla (1992), la variación de la precipitación en el relieve andino del Perú, más que la diferencia de latitud o de longitud, se debe a la rápida variación de la distancia al mar o de la costa sobre el nivel del mar, por lo que correlacionó la precipitación media mensual con la distancia mínima al mar en línea recta y la altitud del punto en el que deseaba calcular la precipitación, obteniendo coeficientes de correlación  $R^2$  aceptables.

En nuestro caso, el análisis se centra en la subcuenca del río Quillcay, que tiene un área de 250 km<sup>2</sup> aproximadamente, con presencia de los Andes tropicales, por lo cual esta zona presenta dos estaciones bien marcadas durante el año, una lluviosa y otra seca.

Es así que, para conocer la distribución espacial de la precipitación en nuestra zona de estudio, se realizó un análisis estadístico de correlación múltiple

asociando la precipitación promedio mensual con la altitud, longitud y latitud; asimismo, un análisis paralelo asociando la precipitación promedio mensual con la altitud y distancia al mar.

Todo esto con el fin de conocer la correlación que mejor represente las condiciones de precipitación en la subcuenca del río Quillcay, y que a la vez sea útil para generar mapas climáticos de precipitación.

De las 5 estaciones reales identificadas, luego de un análisis estadístico, la estación de Huaraz tuvo que ser omitida, ya que no mostró una buena correlación.

**Generación de información pluviométrica para las estaciones de apoyo**

Como se observa en la figura 3, las estaciones seleccionadas no están bien distribuidas, todas están ubicadas entre los 2800 m.s.n.m. y 3900 m.s.n.m. Por esta razón, se optó por generar estaciones de apoyo (ficticias). Las estaciones de apoyo se ubicaron principalmente en zonas glaciares (puntos más altos de la subcuenca) y en algunos puntos en la parte

media y baja de la subcuenca, con el objetivo de tener mayor cobertura de información.

El cuadro 2 presenta las 16 estaciones de apoyo y los valores de precipitación estimados para cada una. Esta información se obtuvo mediante la ecuación que se muestra abajo, y que estima la precipitación en función de la altitud de las estaciones de apoyo y la precipitación promedio de las estaciones reales (serie histórica). La figura 3 muestra la ubicación de las 20 estaciones utilizadas (reales y de apoyo).

$$Pp_m = P p_{mE} r \frac{A e a}{P A e r}$$

Dónde:

- $Pp_{m,a}$  : Precipitación promedio mensual (mm)
- $P p_{mE} r$ : Precipitación promedio de las estaciones reales (mm)
- $Aea$  : Altura de la estación de apoyo (m)
- $PAer$  : Promedio de las alturas de las estaciones reales (m)

Estación (apoyo)	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
P1	3414	133.74	133.14	149.53	87.73	29.71	8.59	3.11	9.05	30.08	66.06	75.21	98.94
P2	3843	159.52	157.55	167.54	95.11	37.09	12.75	5.09	13.47	40.80	81.64	93.96	118.84
P3	4150	177.97	175.02	180.44	100.39	42.37	15.73	6.50	16.63	48.48	92.78	107.38	133.09
P4	5108	235.55	229.53	220.67	116.87	58.85	25.02	10.91	26.50	72.43	127.56	149.24	177.54
P5	5318	248.17	241.47	229.49	120.48	62.46	27.06	11.87	28.66	77.68	135.18	158.42	187.28
P6	5369	251.23	244.38	231.64	121.36	63.34	27.55	12.11	29.19	78.95	137.03	160.65	189.65
P7	5374	251.53	244.66	231.85	121.45	63.42	27.60	12.13	29.24	79.08	137.21	160.86	189.88
P8	5430	254.90	247.85	234.20	122.41	64.39	28.14	12.39	29.82	80.48	139.25	163.31	192.48
P9	5465	257.00	249.84	235.67	123.01	64.99	28.48	12.55	30.18	81.35	140.52	164.84	194.11
P10	5651	268.18	260.42	243.48	126.21	68.19	30.29	13.40	32.09	86.00	147.27	172.97	202.74
P11	5745	273.83	265.77	247.43	127.83	69.80	31.20	13.84	33.06	88.35	150.68	177.08	207.10
P12	5932	285.07	276.41	255.28	131.04	73.02	33.01	14.70	34.99	93.03	157.47	185.25	215.77
P13	5955	286.45	277.72	256.25	131.44	73.42	33.23	14.80	35.22	93.60	158.30	186.25	216.84
P14	6080	293.96	284.83	261.50	133.59	75.57	34.45	15.38	36.51	96.73	162.84	191.72	222.64
P15	6139	297.51	288.19	263.98	134.60	76.58	35.02	15.65	37.12	98.20	164.98	194.30	225.38
P16	6241	303.64	293.99	268.26	136.36	78.33	36.01	16.12	38.17	100.75	168.68	198.75	230.11

Cuadro 2. Precipitación promedio mensual estimada para las estaciones de apoyo (mm)

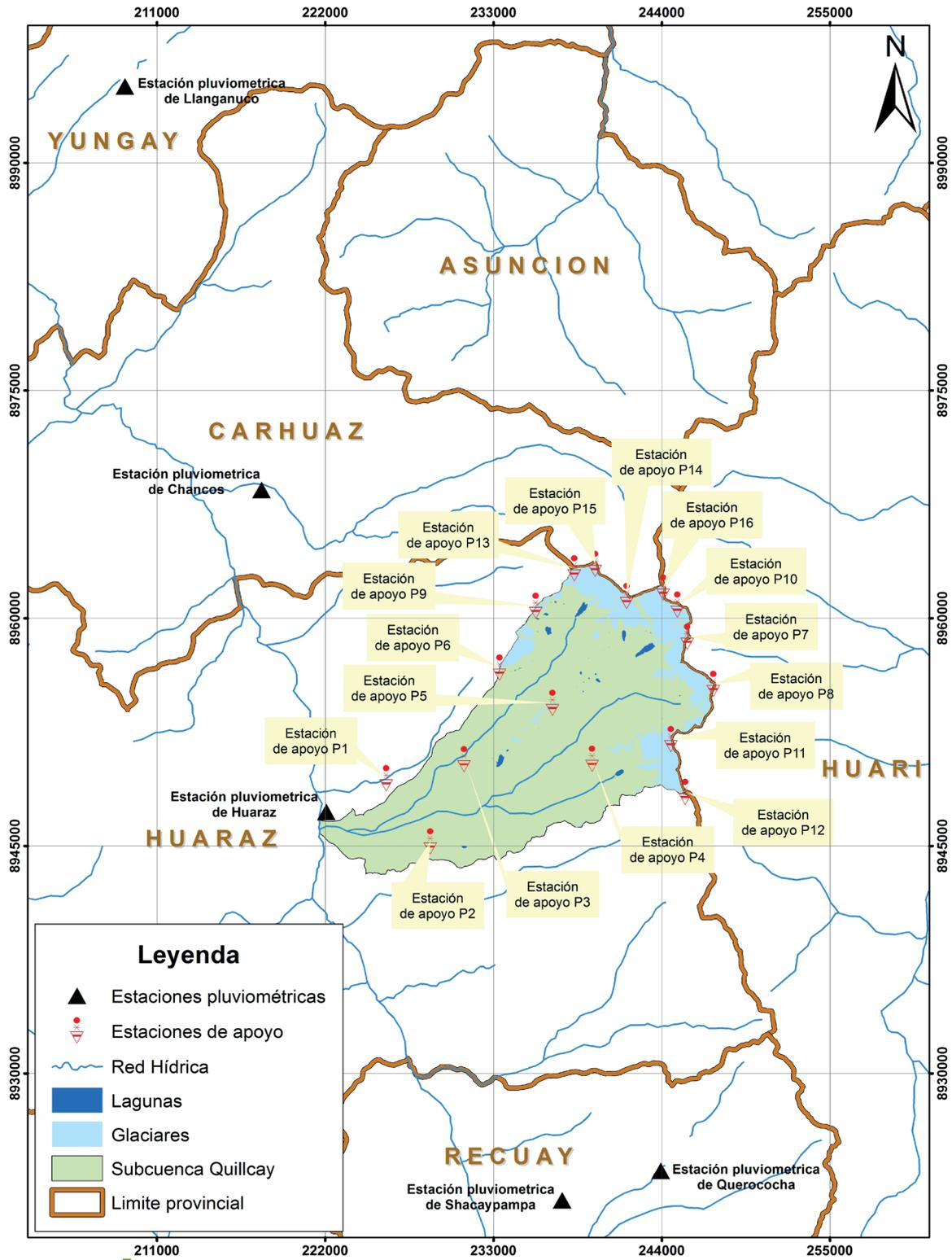


Figura 3. Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas existentes y de apoyo utilizadas.  
Fuente: Elaboración IGC - INAIGEM

Evaluación de las variables que mejor expliquen la variación de la precipitación en la subcuenca del río Quillcay

Las variables consideradas en la evaluación son: la latitud, longitud, altitud y distancia al mar.

Regresión Lineal Múltiple (RLM)

Mediante un modelo de regresión lineal múltiple, se trata de explicar el comportamiento de una determinada variable que denominaremos variable de

respuesta o a explicar, en función de un conjunto de variables explicativas.

En nuestro caso, la variable de respuesta es la precipitación y las variables explicativas son: longitud, latitud, distancia al mar (en línea recta) y altitud, asociadas en dos grupos, a) longitud, latitud y altitud; y b) distancia al mar y altitud, a los que en adelante llamaremos caso a y caso b respectivamente.

Estación	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Distancia al mar (m)
	Longitud (m)	Latitud (m)		
Querococha	243945	8923605	3930	98260
Shacaypampa	237494	8921654	3600	91666
Chancos	217843	8968453	2840	89264
Llanganuco	208913	8995042	3850	89299
P1	226008	8949459	3414	86932
P2	228883	8945298	3843	88092
P3	231088	8950713	4150	92103
P4	239457	8950739	5108	99896
P5	236869	8954424	5318	98870
P6	233418	8956755	5369	96680
P7	245688	8958785	5374	108695
P8	247389	8955675	5430	109074
P9	235780	8960826	5465	100589
P10	245030	8960904	5651	108959
P11	244606	8952034	5745	105173
P12	245549	8948563	5932	104909
P13	238304	8963294	5955	103960
P14	241724	8961468	6080	106205
P15	239661	8963574	6139	105294
P16	244108	8962016	6241	108593

Cuadro 3. Variables analizadas

Mediante el procedimiento de análisis de regresión lineal, se obtuvieron los estadísticos y parámetros de

regresión para ambos casos (a y b). Los resultados comparativos se muestran a continuación.

Estadísticos	Enero	
	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.95	0.94
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.90	0.88
R <sup>2</sup> ajustado	0.89	0.86
Error típico	11.81	12.85

Estadísticos	Febrero	
	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.99	0.98
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.98	0.96
R <sup>2</sup> ajustado	0.98	0.95
Error típico	5.58	8.05

Marzo		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.99	0.99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.98	0.98
R <sup>2</sup> ajustado	0.97	0.97
Error típico	6.74	6.63

Abril		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.98	0.98
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.95	0.95
R <sup>2</sup> ajustado	0.95	0.95
Error típico	5.48	5.39

Mayo		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.98	0.96
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.96	0.93
R <sup>2</sup> ajustado	0.95	0.92
Error típico	1.90	2.37

Junio		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.84	0.76
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.71	0.58
R <sup>2</sup> ajustado	0.65	0.53
Error típico	1.58	1.84

Julio		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.71	0.57
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.50	0.32
R <sup>2</sup> ajustado	0.41	0.25
Error típico	0.86	0.97

Agosto		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.79	0.72
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.63	0.52
R <sup>2</sup> ajustado	0.56	0.47
Error típico	1.85	2.04

Setiembre		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.85	0.78
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.72	0.61
R <sup>2</sup> ajustado	0.67	0.56
Error típico	4.70	5.38

Octubre		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.94	0.89
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.88	0.80
R <sup>2</sup> ajustado	0.85	0.78
Error típico	6.48	7.94

Noviembre		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.96	0.95
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.92	0.90
R <sup>2</sup> ajustado	0.91	0.89
Error típico	6.31	6.82

Diciembre		
Estadísticos	Longitud, latitud y altitud	Distancia al mar y altitud
Coefficiente de correlación múltiple	0.97	0.96
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.94	0.92
R <sup>2</sup> ajustado	0.93	0.91
Error típico	7.22	8.05

Según el análisis estadístico, podemos decir que, en general, los valores observados y simulados en ambos casos alcanzan coeficientes de determinación que se ubican dentro de un rango confiable en todos los meses. Sin embargo, la relación entre longitud, latitud y altitud presentó valores ligeramente más altos en comparación con la relación distancia al mar y

altitud. Se observa también que en los meses secos, especialmente junio y julio, se presentaron estadísticos más bajos, debido a que la precipitación es mínima.

Del análisis de regresión también se obtuvieron los coeficientes para la generación de una ecuación de regresión lineal múltiple por mes y para ambos casos, que tiene la forma de la siguiente función matemática:

$$Pp = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3 Z + r$$

Dónde:

- Pp = Precipitación (mm)
- a<sub>0</sub>, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> = Coeficientes de la ecuación de regresión
- x = Variable 1
- y = Variable 2
- z = Variable 3
- r = Error

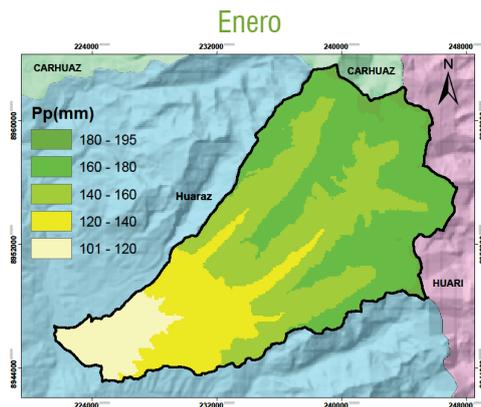
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Mapas de caracterización climática de precipitación

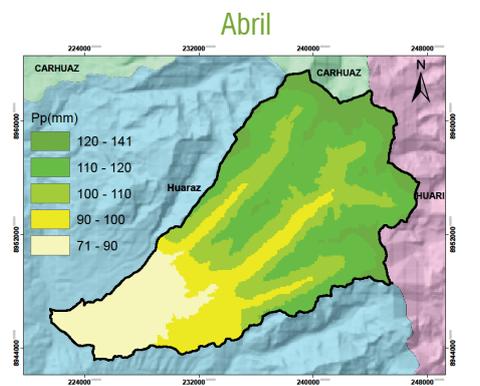
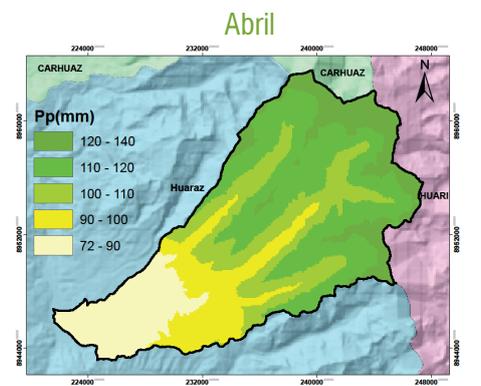
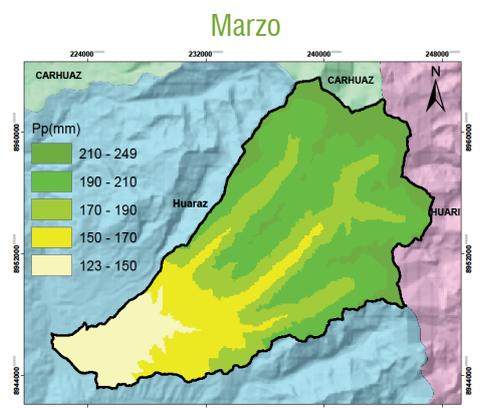
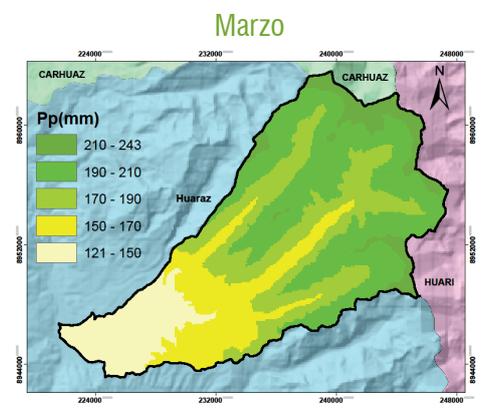
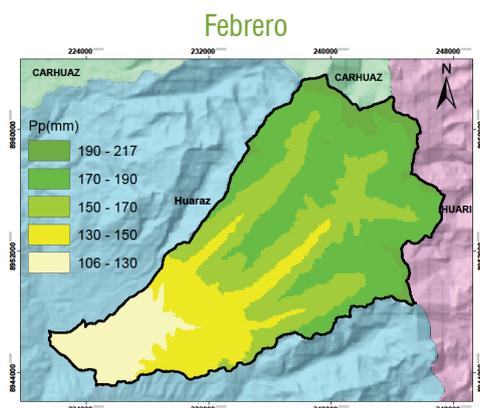
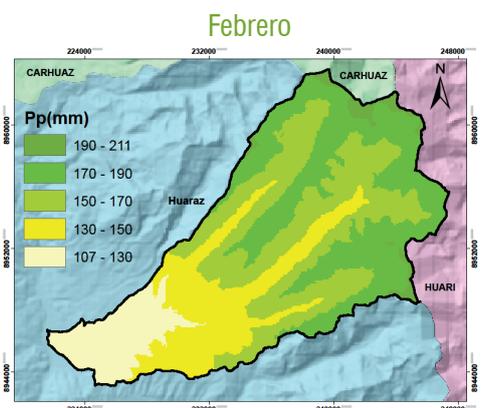
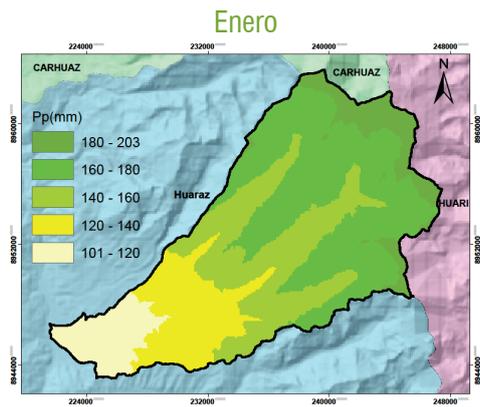
A partir de las ecuaciones generadas, se obtuvo un mapa de caracterización climática por cada mes, haciendo un total de 24 mapas. Estos se elaboraron

mediante técnicas de análisis espacial que adoptan el modelo de regresión lineal múltiple. La figura 4 presenta los mapas de caracterización climática de precipitación de la subcuenca del río Quillcay para ambos casos (a y b).

a. Variables: Longitud, latitud y altitud

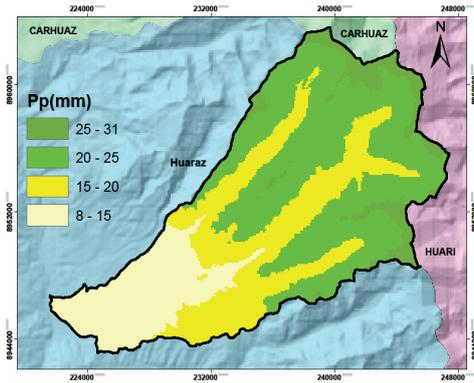


b. Variables: Distancia al mar y altitud



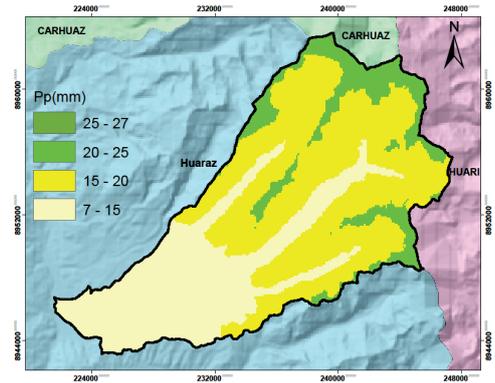
a. Variables: Longitud, latitud y altitud

Mayo

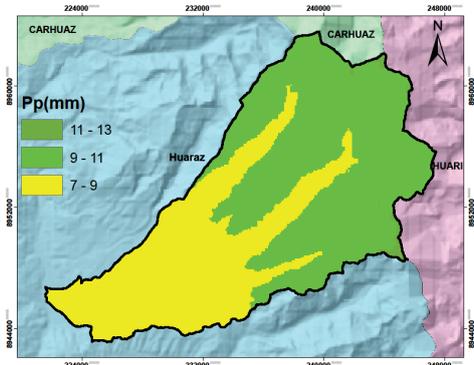


b. Variables: Distancia al mar y altitud

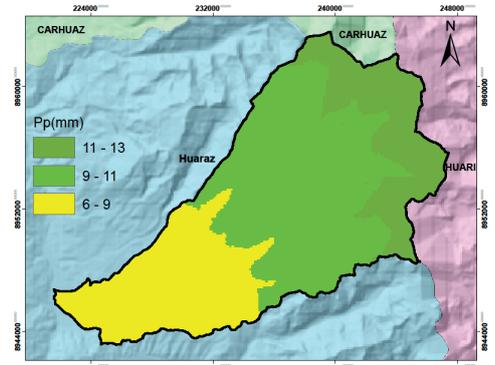
Mayo



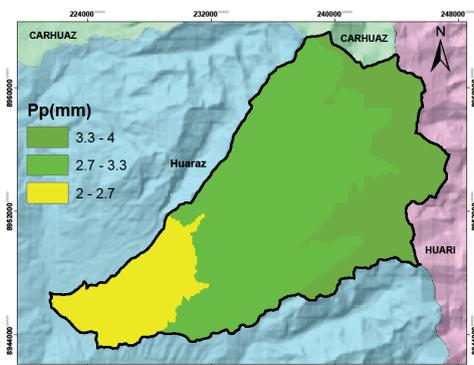
Junio



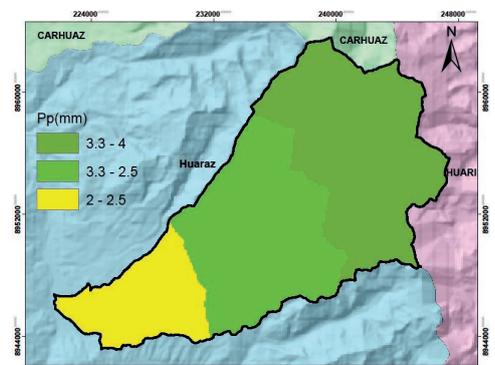
Junio



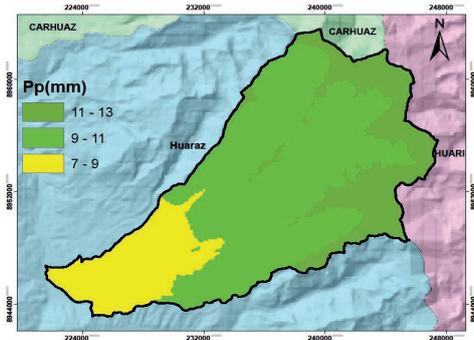
Julio



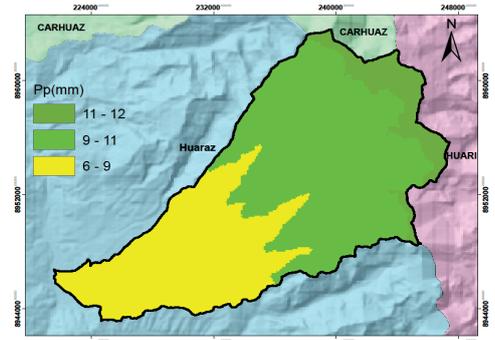
Julio



Agosto

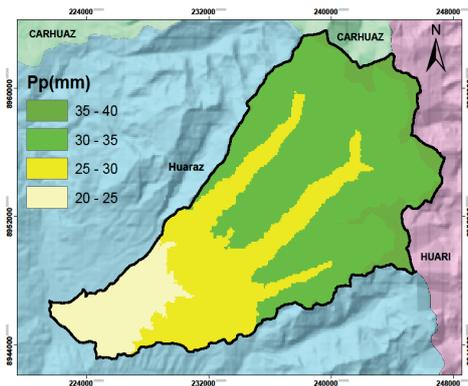


Agosto

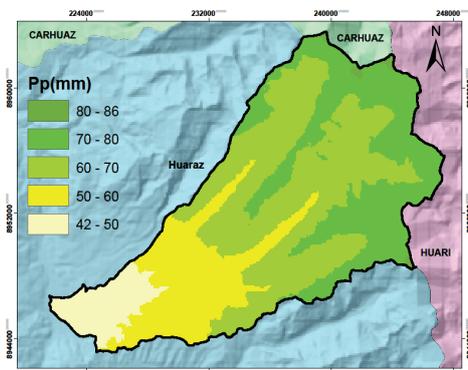


a. Variables: Longitud, latitud y altitud

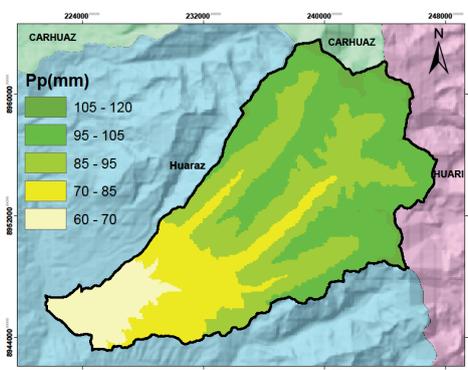
Setiembre



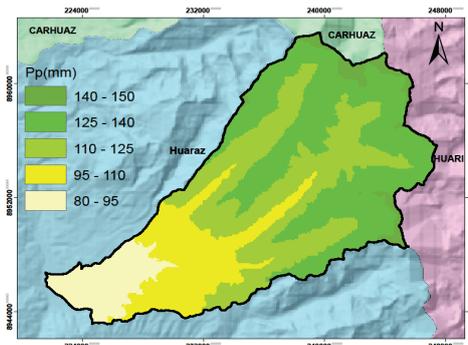
Octubre



Noviembre

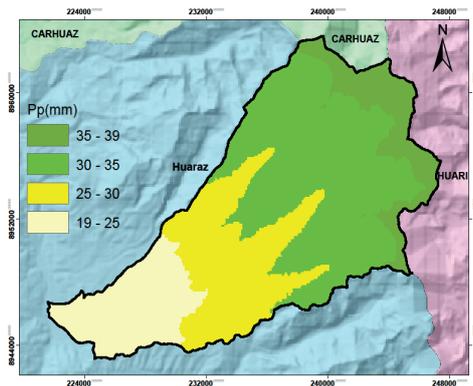


Diciembre

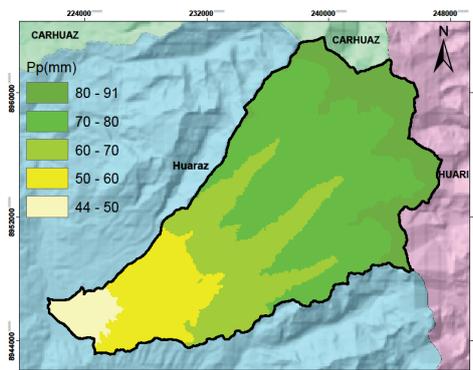


b. Variables: Distancia al mar y altitud

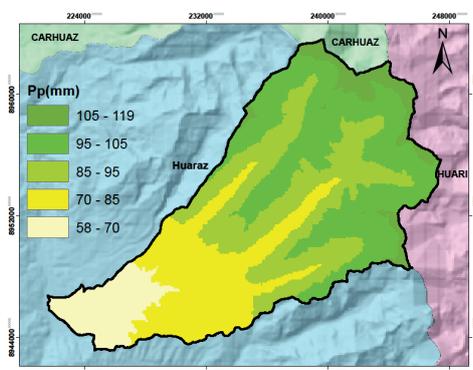
Setiembre



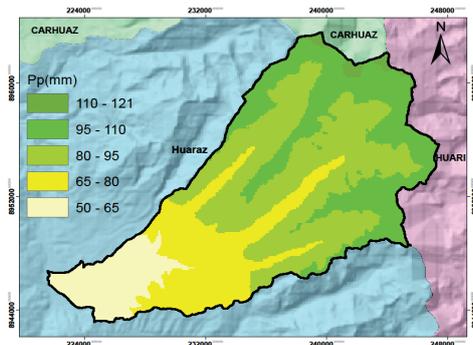
Octubre



Noviembre



Diciembre



De acuerdo a los resultados obtenidos para cada caso, podemos decir que los mapas generados a partir de la relación que plantea el caso (a), presenta una mejor distribución espacial de la precipitación, ya que respeta el relieve de la zona. Y sumado a los resultados de los estadísticos, podemos afirmar que, de las variables planteadas, la longitud, latitud y altitud explican mejor la variación y distribución espacial de la precipitación para la subcuenca del río Quillcay. Sin embargo, existen otros factores topográficos o climáticos que se podrían analizar, por tanto la posibilidad de seguir trabajando al respecto queda abierta.

A continuación, haremos un análisis del comportamiento de la precipitación tanto en época seca como en época de lluvia, aplicable a los dos casos (a y b) analizados. Debemos tener en cuenta los sistemas atmosféricos que se presentan en Sudamérica y que controlan las condiciones climáticas en nuestra región, como son: la Alta de Bolivia (AB); la vaguada del noreste de Brasil (VNEB); el Anticiclón del Pacífico Sur (APS); el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS); la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), relacionada íntimamente con la latitud; y la ubicación geográfica.

### Periodo de Lluvia (diciembre-enero-febrero - marzo)

En este periodo, el sistema atmosférico con mayor predominancia en niveles medios y altos (5 a 12 km aproximadamente) es la Alta de Bolivia (AB), la cual se caracteriza por tener un giro antihorario que empieza a formarse en Bolivia debido a la presencia de humedad y calor sensible en la superficie. Este sistema atmosférico es también apoyado por la baja del noreste de Brasil (BNEB), la cual tiene un giro horario que apoya así el proceso de convergencia en niveles bajos (1.5 km aproximadamente) que por ascenso orográfico en la vertiente oriental y acción del viento son desplazadas hacia las cumbres de la sierra, presentando cantidades altas de precipitación que se pueden observar en los mapas generados en este trabajo.

### Periodo seco (junio-julio-Agosto)

En este trimestre, las condiciones climáticas se caracterizan principalmente porque los vientos son de componente oeste en niveles medios y altos, así como por el poco transporte de humedad, presentándose así convergencia y por ende

subsistencia en los niveles antes mencionados. Estas condiciones hacen que el cielo no presente cobertura nubosa y las precipitaciones sean escasas en este periodo. Lo más resaltante, aparte de la lluvia, es el descenso de temperaturas en las zonas altoandinas, registrándose valores por debajo de los 0 °C (heladas meteorológicas), estas condiciones se presentan a primeras horas del día. En el transcurso del día, la temperatura máxima también alcanza valores muy altos. En los mapas generados, se puede observar claramente la ausencia de precipitaciones en estos meses.

### BIBLIOGRAFIA

- Linsley, R., Kohler, M. Y Paulhus, J. (1975). Hidrología para ingenieros. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Milla V. (1992). "Regionalización de la precipitación media mensual en el Callejón de Huaylas. Huaraz, Perú" (Tesis de pregrado), Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.
- Roubault, M, y otros. Elementos del clima en nuestro planeta, recuperado de [http://www.ecured.cu/Factores\\_clim%C3%A1ticos#](http://www.ecured.cu/Factores_clim%C3%A1ticos#)
- Tarazona N. (2005), "Generación de descargas mensuales en subcuencas de la Cuenca del Río Santa utilizando el método de Lutz Scholz" (Tesis de pregrado), Universidad Agraria La Molina, Lima.



**10 al 13**  
**AGOSTO**  
**2016**

**HUARAZ - PERÚ**

