



Ing. Nelson Santillán Portilla  
Responsable del Área de Glaciares y Lagunas  
Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos  
Autoridad Nacional del Agua

# Evolución de la laguna glaciar Palcacocha

## RESUMEN

Uno de los temas que suscitan mayor debate es el impacto que tendrá el cambio climático en los países tropicales, como el Perú. En la Cordillera Blanca, se ha observado un retroceso glaciar de un 42 % durante los últimos cuarenta años. A pesar de esta situación, se trata de la cordillera con cobertura glaciar más extensa de los trópicos, donde el cambio climático se manifiesta a través de dos fenómenos relacionados entre sí: el retroceso de los glaciares y la aparición de nuevas lagunas, cuando las depresiones que originó la erosión glaciar en el pasado (sobre-excavación) son rellenadas por las aguas del deshielo. Este es el caso de la laguna Palcacocha (4 562 msnm),

emplazada en una de las cabeceras fluviales de la ciudad de Huaraz. Su presencia actual se debe al retroceso de los glaciares Pucaranra y Palcaraju, que ha dejado al descubierto una cubeta previamente generada por la erosión glaciar, que los procesos naturales rellenan y vacían a lo largo del tiempo. Esa dinámica ha provocado dos procesos significativos: el rompimiento y desborde súbito de la cubeta, que en 1941 provocó la muerte de unos 4 800 huaracinos y, la formación posterior de una nueva laguna, que cuenta con 17,3 millones de metros cúbicos de agua. Por ello, es necesario seguir desarrollando estudios y obras de prevención.



## INTRODUCCIÓN

El sistema orográfico de la Cordillera de los Andes contiene importantes extensiones de cobertura glaciar. En Sudamérica, son cuatro los países favorecidos con estas masas de hielo: Perú, Bolivia, Ecuador y Colombia. De acuerdo al último inventario de glaciares realizado por la Autoridad Nacional del Agua, el Perú posee el 70% (1 299 km<sup>2</sup>) de los glaciares tropicales.

Estos glaciares han experimentado rápidos cambios por el impacto del cambio climático en las últimas décadas. La observación sistemática de glaciares de Sudamérica es relativamente reciente y se remonta a mediados de los 1970. Nueve glaciares han sido objeto de monitoreo y estudios a lo largo de los últimos cuarenta años en los Andes. Estudios recientes indican que el retroceso de glaciares tropicales en los Andes está progresando a un ritmo más acelerado que lo previsto.

El proceso del cambio climático agravará probablemente la intensidad y la frecuencia de los fenómenos hidrometeorológicos y geodinámicos como los ciclones tropicales en Centroamérica, acentuará los efectos de la variabilidad climática en la forma de sequías cíclicas como El Niño, tendrá influencia en el origen de nuevas amenazas como las avalanchas o aludes de hielo, deslizamientos y formaciones de flujos aluviónicos.

A corto y mediano plazo, el retroceso de glaciares generará una serie de amenazas emergentes, particularmente, mediante la formación de nuevas lagunas con vasos morrénicos, que estructuralmente tienden a ser inestables y susceptibles a rompimientos y desbordes catastróficos. Estos fenómenos naturales típicos de regiones de alta montaña son especialmente peligrosos para las poblaciones que viven en su ámbito de influencia. Pueden ser estimulados por movimientos sísmicos o por la propia dinámica de los glaciares, que, al estar seccionados y fracturados sobre sustratos de pendientes que superan los 23°; y pueden producir grandes desprendimientos sobre las lagunas y generar olas que pueden causar súbitas avenidas catastróficas

cuando rompen o desbordan la morrena que represa el cuerpo de agua. El número de escenarios que cumple esa condición (glaciares sobre lagunas inestables) está creciendo rápidamente en el mundo, particularmente en los Andes, en Europa y en la región del Himalaya.

El Perú tiene una historia reciente de inundaciones repentinas causadas por la ruptura de lagunas de vasos morrénicos. La cordillera de los Andes del Perú ha sido testigo de más de treinta inundaciones de origen glaciar en el pasado. Desde 1941, han fallecido aproximadamente 6 000 personas. Como respuesta a estos crecientes riesgos, sucesivos gobiernos del Perú han invertido para mejorar el monitoreo de estas lagunas de origen glaciar para reducir los potenciales riesgos. Sin embargo, a pesar de iniciativas importantes para salvaguardar los pueblos cercanos, es necesario seguir impulsando nuevos estudios e investigaciones en materia de peligros, riesgos y vulnerabilidad de origen glaciar.

Resulta por ello importante contribuir a mejorar el desarrollo de las tareas de medición, implementación y monitoreo científico del fenómeno de retroceso glaciar en nuestro país. Este desarrollo sería un aporte al fortalecimiento de las poblaciones de las comunidades y ciudades locales con herramientas prácticas para mejorar las intervenciones efectivas en adaptación al cambio climático y reducción de riesgos de desastres que reduzcan la vulnerabilidad de las poblaciones y, potencialmente, mejoren la resiliencia a los impactos del cambio climático para las décadas venideras.

En la actualidad, existe la comprobación del retroceso acelerado de glaciares en el territorio peruano, específicamente, en los glaciares de los departamentos de Ancash y el Cusco. Este hecho cambia las condiciones de posibles deslizamientos, avalanchas y aluviones y, por lo tanto, incrementa los riesgos de desastres. Esta situación hace prever que, en el mediano y largo plazo, exista una menor disponibilidad de agua en las cuencas, lo que alteraría los calendarios de producción agrícola, la generación de energía, la incidencia en la proliferación de nuevos vectores biológicos y los indicadores climatológicos. Se daría, también, un incremento de los conflictos sociales por el agua.

## UBICACIÓN Y ACCESO

Palcacocha, a 4 562 msnm, se encuentra emplazada, al noreste de la ciudad de Huaraz y al sur del nevado Palcaraju, en la cabecera de la quebrada Cojup, cuyo drenaje final al río Santa es mediante el río Quillcay, que atraviesa la ciudad de Huaraz de este a oeste. Perteneció políticamente a la jurisdicción del distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash.

Al ubicarse en pleno corazón de la Cordillera Blanca, el acceso a la laguna Palcacocha es accidentado y un tanto complicado. Desde Huaraz, se sigue una trocha carrozable, un camino de herradura y un sendero hasta llegar al dique y borde frontal del espejo de agua.

## EVOLUCIÓN Y ESTADO ACTUAL

Palcacocha es una de las lagunas de la Cordillera Blanca que tienen origen glaciar y están represadas por morrenas, donde se han realizado obras de seguridad y descarga. La actual laguna se formó como resultado de la retracción y fusión de los glaciares que descienden de los nevados Pucaranra y Palcaraju. El vaso que actualmente ocupa la laguna, fue generado por el último avance de los glaciares, que pudo ocurrir en la primera mitad de la Pequeña Edad de Hielo. De ese modo, se denomina a la última pulsación fría observada en la Tierra, que los isótopos de oxígeno del glaciar Quelccaya sitúan en el periodo 1490-1880.

El origen de este tipo de lagunas se debe a una secuencia de procesos geomorfológicos. En primer lugar, un glaciar que desciende por la vertiente impulsado por su propio peso erosiona el lecho rocoso sobre el que se desliza. Las acciones erosivas de sobre-excavación generan una depresión que se denomina cubeta glaciar. La morfología de la cubeta depende de la preparación previa del lecho, que puede deberse a diferentes procesos anteriores a la presencia del glaciar (p.e. alteración hidrotermal o gelifracción). Al tratarse de un fluido de alta densidad y, por tanto, con alta capacidad de transporte, el glaciar desaloja todo el material asequible a su competencia y lo incorpora al flujo de hielo. El resultado del proceso de sobre-excavación solamente es visible cuando la deglaciación deja al descubierto las vertientes anteriormente ocupadas por el hielo. Es una depresión que puede aparecer ocupada por una laguna o colmatada por sedimentos lacustres y frecuentemente está rodeada por las formas que el glaciar construye con el material transportado, denominadas morrenas. Esa secuencia de procesos es la causa por la que muchas lagunas de origen glaciar aparecen represadas por morrenas, que funcionan como diques de contención de las aguas de deshielo.



UBICACIÓN DE LA LAGUNA GLACIAR PALCACOCHA



Vista de la laguna Palcacocha, tomada por Hanz Kinzl en 1932, a nueve años de producirse el catastrófico rompimiento (13 de diciembre 1941). En ella, se observa el alto grado de fragilidad y vulnerabilidad del vaso, en contacto con el frente glaciar, que descarga por rebose por la zona frontal



Este tipo de lagunas, como es el caso de Palcacocha, es el más común en la Cordillera Blanca y, en determinados casos, constituye un peligro potencial por cuanto el material morrénico, generalmente, posee bajo grado de consolidación y es muy vulnerable a los efectos de los oleajes. La mayoría de los desbordes ha ocurrido en lagunas que tienen dique de esta naturaleza, cuya erosión ha causado aluviones, como son los casos de Arteza (1938), Jancarurish (1950), Artesoncocha (1951), Milluacocha (1952 – 1982) y Pacliashcocha (1997). En la mayoría de los casos, el proceso de formación de lagunas se realiza de una manera progresiva. Como resultado de la ablación, inicialmente se forman charcos sobre la superficie de la lengua glaciar. Esta última, cuando se produce un incremento importante de temperatura, retrocede aceleradamente y permite la unión y conversión de los charcos en una laguna que, en muy corto tiempo, desarrolla grandes dimensiones, tornándose en una amenaza de carácter potencial que pone en riesgo la seguridad física de las poblaciones, la infraestructura, las áreas de cultivo y pastoreo que se ubican dentro de la zona de aluvionamiento.

Hay un factor desestabilizador importante que constituye una amenaza a los cuerpos de agua y la cobertura glaciar en el flanco occidental de la Cordillera Blanca y que, en promedio, se encuentra a 8 kilómetros de estos. Es de tipo normal y, en algún grado, ejerce influencia en su evolución. Me refiero al sistema de fallas denominado Falla de la Cordillera Blanca. La falla ha proveído de canales para el emplazamiento de los plutones del batolito de la Cordillera Blanca. Por esta razón, es que ha penetrado profundamente en la corteza, tal vez hasta llegar al manto. Esta evidencia de la profundidad de penetración es apoyada por la actividad de fuentes termales a lo largo de la falla.

El levantamiento, durante el Neógeno, del batolito de la Cordillera Blanca a lo largo de la línea de falla ha dado como resultado la actual expresión morfológica de la Cordillera Blanca, como también el desarrollo de un graben estructural en el lado oeste de la Cordillera, el cual llegó a ser la depresión donde se depositó material del Neógeno-Cuaternario, erosionado tanto de la Cordillera Blanca como de la Cordillera Negra.

El movimiento a lo largo del sistema de fallas ha continuado en el Cuaternario de manera que se ha desarrollado un sistema de fallas de echelón normal al pie de la Cordillera Blanca, involucrando graben cuaternario.

El 13 de diciembre de 1941, se produjo la ruptura del dique morrénico como consecuencia del desprendimiento de grandes masas de hielo del nevado Pucaranra y Palcaraju hacia el espejo de agua. La energía cinética del oleaje generado superó la resistencia de la zona morrénica frontal y causó el rompimiento y el desborde violento del agua contenida.

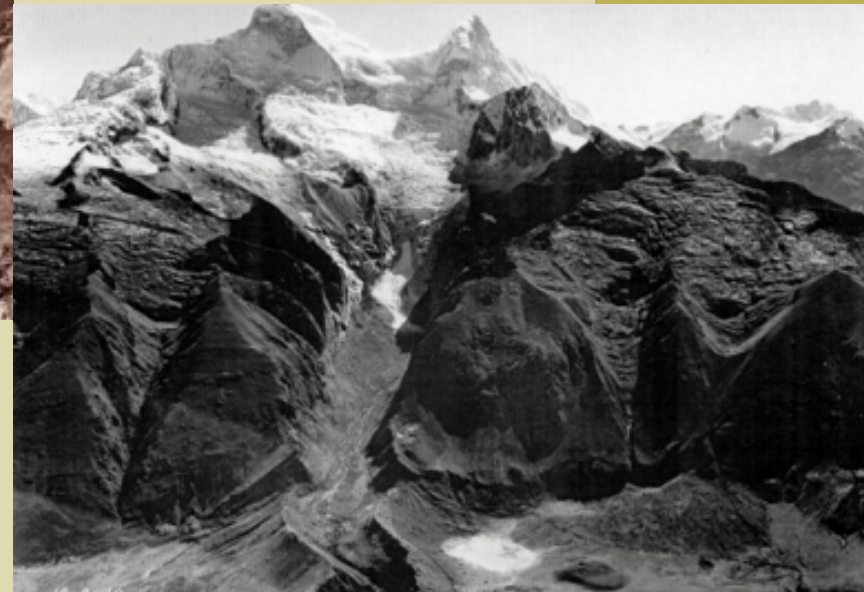
La reconstrucción de las condiciones iniciales —realizada basándose en la observación, comparación de fotografías aéreas y el levantamiento topográfico general del vaso (batimetría aérea para la cuantificación de volúmenes)— indica que la laguna Palcacocha tuvo antes del desborde un volumen aproximado de 14 MMC de agua. Por lo tanto, esa fue la cantidad que se vació en el evento del 13 de diciembre de 1941.

La brecha fue abierta en el arco de cierre frontal y la zona terminal del flanco izquierdo por donde descargaba la laguna por rebose, por lo cual se infiere que hubo una sobresaturación de humedad del área, aunada a las intensas precipitaciones que suelen ocurrir en los Andes en el mes de diciembre.

El flujo aluviónico generado se transportó por toda la quebrada Cojup, erosionando el cauce y las laderas, adquiriendo grandes velocidades en los tramos de fuertes pendientes y zonas de estrangulamiento, hasta conformar una masa hiperconcentrada y de alta viscosidad, para finalmente llegar a la ciudad de Huaraz. Los daños producidos en esta ciudad fueron de tipo material (un tercio fue arrasado) y de vidas humanas, superando estas últimas las 4 800.

Cabe indicar que la ciudad de Huaraz se encuentra emplazada en el cono aluviónico formado en la zona de confluencia del río Quillcay (que atraviesa la ciudad de este a oeste) y el río Santa.

Falla geológica regional de la Cordillera Blanca. De condición activa y de tipo normal, se encuentra, en promedio, a 8 km de distancia de las lagunas y glaciares del flanco occidental de la referida cordillera



Al vaciarse totalmente el vaso lagunar, deja expuesta a la vista el grado de inclinación de los taludes interiores, el material constitutivo y, sobre todo, la potencia de la cuña terminal del frente glaciar que dio origen a la laguna y cuyo retroceso daría posteriormente origen a una nueva laguna que, en la actualidad, supera en volumen a las que tuvo antes del desborde.

Después de este evento, la lengua terminal glaciar descrita anteriormente comienza un nuevo proceso de retracción y da lugar a la formación de otro cuerpo lagunar, que va adquiriendo dimensiones de superficie de espejo de agua y volumen cada vez mayores. Ante esta situación de una nueva amenaza, se realizan estudios glaciológicos, geodinámicos, hidrológicos y geofísicos. Los estudios determinan que debe ejecutarse infraestructuras civiles de seguridad y descarga que minimicen en gran medida la ocurrencia de hechos extraordinarios como el descrito.

En la década de los 60, se realiza obras primarias y básicas constituidas por pequeños diques de tierra y roca y conductos de descarga de concreto de pequeño diámetro interconectados por canales de ingreso y salida. En 1970, estas obras sufren algunos deterioros como consecuencia del terremoto acontecido. Finalmente, en 1974, la Unidad de Glaciología y Seguridad de Lagunas de Electro Perú S.A. termina la construcción de la sección de tajo abierto en la morrena frontal con un dique de 8 metros de altura después de bajar un metro el nivel del espejo de agua, evacuando gradualmente un volumen de 60 000 m<sup>3</sup>, mediante un sistema de canalización que comprende doce metros de canal de ingreso, 33 metros de conducto cubierto y 10 metros de canal de salida. Esta obra fue complementada con un dique artificial secundario, ubicado en el extremo derecho.

El corte abierto en la nueva morrena frontal fue gradual y controlado para evacuar el volumen de 70 000 m<sup>3</sup>. Luego, esta abertura fue restituida por un dique de tierra de sección trapezoidal de ocho metros de altura y recubierto con enrocado y emboquillado de concreto para evitar las erosiones causadas por las precipitaciones y los eventos extraordinarios. En el extremo derecho de la morrena frontal, se construyó otro dique auxiliar, pero sin conducto de descarga; esta infraestructura se ejecutó para uniformizar la cota del borde libre debido a que en esta zona había una depresión topográfica natural del terreno.

En 1972, se realiza un levantamiento batimétrico de la nueva laguna Palcacocha, donde se obtienen los siguientes resultados:

• Volumen	: 514 800 m <sup>3</sup>
• Superficie espejo de agua	: 62 600 m <sup>2</sup>
• Largo máximo	: 398 m
• Ancho máximo	: 227 m
• Profundidad máxima	: 13,50 m

En 2002, la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Intendencia de Recursos Hídricos (ex INRENA) programó y ejecutó un conjunto de trabajos de mantenimiento de lagunas con obras de seguridad y descarga en previsión al fenómeno de El Niño de 2003. Una de estas lagunas fue Palcacocha, donde se ejecutó la reconstrucción del conducto cubierto, el emboquillado del talud interior y la corona de la presa secundaria, así como la construcción de dos aleros en el canal de ingreso.

El 19 de marzo de 2003, se produce el deslizamiento de material morrénico del talud interior de la zona de arranque del flanco izquierdo. Gran parte del material hace impacto en el área de contacto de la parte terminal de la lengua glaciar y el espejo de agua. Esto provoca oleajes que superan la altura de la zona frontal (las dos infraestructuras de seguridad y descarga de la laguna); y ocasiona deterioros de las mismas, sobre todo en el dique secundario, así como el aumento del caudal y la turbidez del agua escurrida por la quebrada Cojup, parte del cual es captada y tratada para el consumo poblacional en la ciudad de Huaraz.





Este pequeño evento, originado no por las avalanchas de masas de hielo sino por el movimiento en masas del flanco izquierdo (geodinámica externa), erosionó de forma total la mitad del cuerpo del dique auxiliar (talud externo) y causó erosiones menores en el dique principal y la morrena frontal (ver figura 8).

A finales del mes de octubre de 2003, el Gobierno Regional de Ancash inicia los trabajos de restitución o rehabilitación de las obras civiles de seguridad afectadas como consecuencia de lo ocurrido en marzo de 2003.

El suceso descrito motivó un análisis más exhaustivo de otros componentes que tienen influencia en la estabilidad y evolución de la laguna Palcacocha. Los taludes interiores del vaso tienen inclinaciones que superan los 35° y que, incluso, llegan a tener entre 70° y 80° de pendiente. Las inclinaciones descritas, junto con el estado estructural inconsolidado, hacen que estos taludes se tornen susceptibles de desestabilizarse y generar deslizamientos, derrumbes y caídas.

En abril de 2009, la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos con sede en Huaraz, que es parte de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, realiza un levantamiento batimétrico y topográfico general de la laguna Palcacocha, donde se obtienen los siguientes resultados:

• Volumen	: 17 325 207 m <sup>3</sup>
• Superficie espejo de agua	: 518 126 m <sup>2</sup>
• Largo máximo	: 1592 m
• Ancho máximo	: 398 m
• Profundidad máxima	: 73 m

El estado situacional actual de la laguna es el siguiente:

En la zona posterior, se encuentra el frente residual de la lengua glaciar proveniente de los nevados Palcaraju y Pucaranra, y que hace contacto con el espejo de agua. Aproximadamente en la parte intermedia de la referida lengua glaciar, se visualiza un gran afloramiento de la roca base, lo que nos indica claramente que se está produciendo la desconexión de la misma en dos corrientes.

Vista aérea de la laguna Palcacocha tomada en 1947 por Arnold Heim. Se muestra la gran brecha en su morrena frontal por donde salieron aproximadamente 14 millones de metros cúbicos de agua el 13 de diciembre de 1941





Vista donde se puede ver la zona del deslizamiento del flanco izquierdo y los bloques y fragmentos de hielo flotando sobre el espejo de agua de la laguna Palcacocha



Vista fotográfica de la laguna Palcacocha (1974), donde vemos las dos infraestructuras descritas: el dique principal de seguridad y descarga, y el dique auxiliar en el extremo derecho (aguas abajo). También se observa la zona posterior de contacto entre la superficie del agua y el frente glaciar, que en la parte terminal se encuentra cubierto con una capa de detritos

También se observa que de los niveles más altos se vienen produciendo constantes desprendimientos de bloques de hielo debido a la fuerte pendiente de los picos rocosos (donde se encuentran todavía adheridas significativas masas de hielo, algunas en condiciones colgantes). Estos bloques se desintegran en el recorrido. Gran parte de ellos se deposita, en forma desintegrada, en el frente glaciar en contacto con el espejo de agua, que viene comportándose como superficie de disipación. Sin embargo, también se puede notar con claridad, que el retroceso de esta masa de hielo en contacto con el espejo de agua se viene produciendo a una gran velocidad, situación que se ve reflejada en una mayor longitud de la laguna. De continuar con esta tendencia, la laguna alcanzaría su máximo desarrollo en pocos años hasta hacer contacto con la estructura rocosa. De alcanzar este estado y de seguir originándose desprendimientos de los bloques de hielo o pequeñas avalanchas de los niveles intermedios y altos de los nevados Pucaranra y Palcaraju, los bloques caerían directamente en la superficie lagunar y generarían oleajes que comprometerían la estabilidad de la laguna (como lo ocurrido en el año 2003). Así mismo, la parte terminal de la masa de hielo en contacto con el espejo de agua presenta, en la actualidad, agrietamientos transversales que posibilitan los permanentes desplomes (proceso calving). Además, gran parte de la superficie exterior se encuentra cubierta por una delgada capa de detritos con una coloración que va de marrón a negro, condición que favorece la fusión debido a una mayor absorción de la radiación solar.

Los flancos laterales, así como el dique frontal, son de material morrénico inestable y de fuertes pendientes que llegan en algunas partes a los 80°. En la zona de arranque del flanco izquierdo, donde el año 2003 se produjo un derrumbe, se observa que el material morrénico continua cayendo debido a la saturación producida por el aporte que drena de la fusión de las pequeñas masas de hielo existentes en los niveles superiores y, también, por las fuertes precipitaciones de la temporada de lluvias. Esta zona de deslizamiento y derrumbe, está próxima de hacer contacto con la roca base que sostiene el nevado Pucaranra.

En la continuación de la pared morrénica, aguas abajo, se puede ver nuevos agrietamientos y líneas de arranque de futuros derrumbes o deslizamientos, así como áreas de donde se vienen produciendo frecuentes caídas, que son atenuadas, en su mayor parte, por los conos de deyección formados en la zona de contacto con la superficie lagunar. No se descarta que puedan generarse fuertes oleajes si estos materiales fuesen de grandes volúmenes.

La laguna Palcacocha, en 37 años (1972-2009), ha experimentado un proceso acelerado de desarrollo. El último levantamiento batimétrico muestra que su volumen se ha incrementado de 514 800 m<sup>3</sup> a 17 325 207 m<sup>3</sup>. De igual forma, su área de espejo de agua ha aumentado de 62 600 m<sup>2</sup> a 518 426 m<sup>2</sup>; el largo máximo, de 398 m a 1 592 m; el ancho máximo, de 227 m a 398 m; y la profundidad máxima, de 13,50 m a 73,1m.

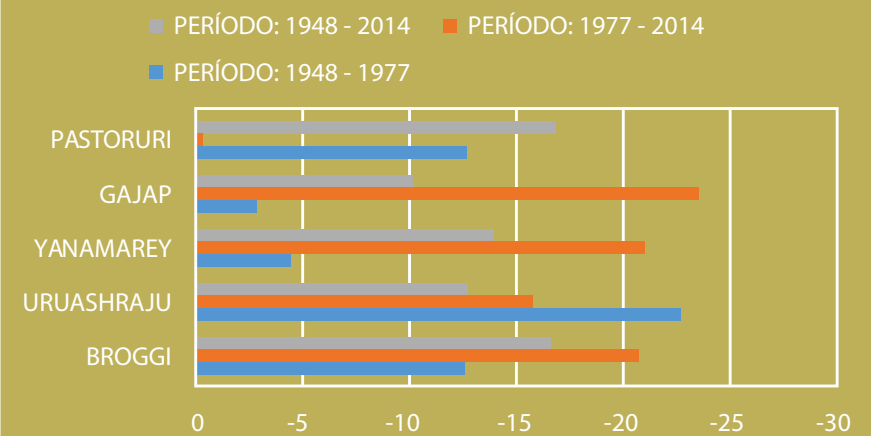


### EVOLUCIÓN DE LA LAGUNA PALCACOCHA

Resultados de los estudios batimétricos de los años 1972 y 2009

Año	Volumen (m <sup>3</sup> )	Superficie (m <sup>2</sup> )	Largo máximo (m)	Ancho máximo (m)	Profundidad máxima(m)
1972	514 800	62 600	398	227	13,5
2009	17 325 207	518 426	1 592	398	73

### PROMEDIO DE RETROCESO GLACIAR (m) CORDILLERA BLANCA (1948 - 2014)





## CONCLUSIONES

La actual sección hidráulica natural del río Quillcay, que cruza la ciudad de Huaraz de este a oeste, es en promedio de 8 m<sup>2</sup> a 10 m<sup>2</sup>, que cada vez se ve reducida debido a los materiales que se arrojan diariamente como escombros, basura y otros tipos de residuos sólidos. Bajo estas condiciones, es prácticamente imposible que pueda soportar eventualidades extremas como el paso de máximas avenidas y flujos aluviónicos.

Sobre la laguna Palcacocha, se han realizado muchos estudios y trabajos técnicos, gran parte por profesionales peruanos y, en algunos casos por investigadores extranjeros. Por ejemplo, en el marco del convenio suscrito entre la ANA y la República Checa, se instaló un pluviómetro automático en la cercanía de la laguna Palcacocha.

La Autoridad Nacional del Agua ha concluido, en el presente año, la actualización del Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas Altoandinas, realizado en base a las imágenes satelitales. El informe concluye que, en cuarenta años, la retracción glaciaria es del orden del 42% (871 km<sup>2</sup>). El monitoreo de los glaciares pilotos señala que, en promedio, el retroceso de estas masas en la Cordillera Blanca ha sido de 12 metros por año en el período comprendido entre 1948 y 2014.

El retroceso del frente glaciario, que hace contacto con la laguna Palcacocha, en 37 años es de 1194 m (en la batimetría de 2009, se obtiene un largo máximo de la laguna de 1592 m; y, 398 m en 1972); por lo tanto, el promedio de retroceso es de 32 m/año. Esta tasa de retracción es superior al promedio registrado en el último período de monitoreo en la Cordillera Blanca (19 m/año). Se ha observado que los mayores retrocesos de los frentes glaciares se dan cuando están en contacto con cuerpos de agua (lagunas) debido a varios factores, entre ellos: la diferencia de temperatura existente entre los dos masas (la del agua es siempre mayor), los mayores fracturamientos que se producen en el frente (dinámica glaciaria que debilita su cohesión), y el proceso mecánico de los oleajes que golpean constantemente a los frentes y generan inestabilidad (proceso calving).

- a) Desde su formación, estimada en la primera mitad de la Pequeña Edad de Hielo, la laguna Palcacocha ha mostrado un progresivo y veloz crecimiento como resultado del retroceso de los nevados Pucaranra y Palcaraju. Este proceso que fue truncado por la rotura del dique morrénico y desborde violento del volumen contenido de agua (aproximadamente 14 MMC) ocurridos en diciembre de 1941. El flujo aluviónico formado arrasó un tercio de la ciudad de Huaraz y sepultó alrededor de 4 800 personas.
- b) A partir de ese hecho, con el vaciamiento total de la cubeta lagunar y al seguir retrocediendo el frente glaciario, se forma la nueva laguna Palcacocha. En volumen, superficie de espejo de agua, largo, ancho y profundidad ha superado en la actualidad las condiciones iniciales.
- c) La laguna Palcacocha, en 37 años (1972-2009), ha experimentado un proceso acelerado de desarrollo. El último levantamiento batimétrico muestra que su volumen se ha incrementado de 514 800 m<sup>3</sup> a 17 325 207 m<sup>3</sup>. También han aumentado su área de espejo de agua de 62 600 m<sup>2</sup> a 518 426 m<sup>2</sup>, el largo máximo de 398 m a 1592 m, el ancho máximo de 227 m a 398 m y la profundidad máxima de 13,50 m a 73,10 m.
- d) En los estudios batimétricos de la laguna Palcacocha realizados en los años 1972 y 2009, se obtiene longitudes máximas de 398 m y 1 592 m respectivamente. Por lo tanto, en 37 años, el crecimiento de la laguna ha sido de 1 194 m, lo que quiere decir que el retroceso del frente glaciario ha sido del mismo orden y a una tasa de 32,3 m/año.
- e) Esta tasa de retracción es superior al promedio registrado en el último período (de 1977 a 2014) de monitoreo de glaciares en la Cordillera Blanca: 19 m/año.
- f) La explicación de este proceso la hallamos cuando observamos que las mayores retracciones de los frentes glaciares se dan cuando están en contacto con cuerpos de agua (lagunas) debido a varios factores, entre ellos: la diferencia de temperatura existente entre los dos masas ( $\Delta T$  desfavorable para el glaciario), los mayores fracturamientos que se producen en el frente (dinámica glaciaria que debilita su cohesión), y el proceso mecánico de los oleajes que golpean constantemente a los frentes y generan inestabilidad.
- g) La Autoridad Nacional del Agua —en coordinación con los sectores competentes (como la Presidencia del Consejo de Ministros y el Ministerio del Ambiente), instituciones (como el INGEMMET, IGP, INDECI y CENEPRED) y los gobiernos regionales y locales— viene desarrollando un enorme esfuerzo para la elaboración de estudios y la ejecución de nuevas infraestructuras de seguridad y descarga que brinden la debida garantía a las poblaciones ante posibles eventualidades extremas.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> El presente artículo tiene como base un trabajo más amplio y detallado que el autor viene realizando.

