

DESBORDES SÚBITOS DE LAGUNAS GLACIARES EN LOS ANDES: DESAFÍOS CONTEMPORÁNEOS PARA TERRITORIOS DE ALTA MONTAÑA

Alonso Brenes
Haris Eduardo Sanahuja





Desbordes súbitos de lagunas glaciares en los Andes: desafíos contemporáneos para territorios de alta montaña

Alonso Brenes
Haris Eduardo Sanahuja

Octubre 2026

Edición y diseño: Words for Development.

Fotografías: Rolando Javier Castro Torres (portada), Nicolás Villaume (portadillas capítulos).

Banco Interamericano de Desarrollo
1300 New York Avenue, N.W.
Washington, D.C. 20577
www.iadb.org

Copyright © 2026 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una Licencia Internacional Pública de Atribución/Reconocimiento 4.0 de Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.es>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

Todas las disputas que surjan en relación con esta licencia y que no puedan resolverse de manera amistosa se resolverán de acuerdo con el siguiente procedimiento. Mediante una notificación de mediación comunicada por medios razonables por usted o el licenciante a la otra parte, la disputa será sometida a mediación no vinculante de conformidad con el Reglamento de Mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). Cualquier disputa que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo, y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, su Directorio Ejecutivo ni de los países que representan.



Contenido

1 Introducción	1
1.1 Objetivos del estudio	7
1.2 La lógica forense y el enfoque longitudinal	7
2 Anatomía de los GLOF: rasgos y dinámicas asociadas	9
2.1 Impactos asociados a un desborde	14
2.2 Tres formas de clasificar un GLOF	15
2.3 Tendencias en los niveles de riesgo	19
2.3.1 Patrones observados en los Andes	20
2.4 Grados de peligrosidad de las lagunas	26
2.4.1 Rasgos de la presa y del lago	26
2.4.2 Entorno geomorfológico y detonantes externos	26
2.4.3 Factores hidrológicos	27
3 La construcción del riesgo asociado a GLOF en los Andes	29
3.1 Emplazamientos de alta exposición	31
3.1.1 Lógicas económicas, rol del Estado y aceptación implícita del riesgo	34
3.2 Variación de la exposición ante la aceleración del cambio criosférico	37
3.2.1 Alteraciones ecosistémicas e hidrológicas asociadas	39
3.3 Factores actuales de exposición	41
3.3.1 Procesos que aumentan la exposición hoy	41
3.4 Expresiones diferenciadas de la vulnerabilidad	43
3.4.1 Hogares y entorno local	44
3.4.2 Actividades productivas privadas	45
3.4.3 Infraestructura y servicios públicos	46
4 Reflexiones finales	48
Referencias	52



**Desbordes súbitos de lagunas
glaciares en los Andes:
desafíos contemporáneos para
territorios de alta montaña**

1

Introducción



La cordillera de los Andes es uno de los sistemas montañosos más estratégicos y sensibles del planeta, tanto por su concentración de diversidad biológica como por su papel en la regulación climática e hidrológica de América del Sur. Como sucede en otras partes del planeta, en la cordillera se ha recolectado evidencia significativa sobre el calentamiento de la atmósfera y sus efectos en los entornos de alta montaña. Las temperaturas en la región se incrementaron 0,11 °C por década¹, en promedio, con aumentos más pronunciados por encima de los 4.000 metros sobre el nivel del mar (Schoolmeester et al., 2018; Drenkhan et al., 2023). Este calentamiento explica en gran parte la pérdida del volumen glaciar y de la superficie nevada a lo largo de toda la cadena montañosa (Imagen 1). Las implicaciones hidrológicas son importantes para los países que comparten la cordillera: en los Andes tropicales, esta reducción puede comprometer la seguridad hídrica de más de 40 millones de personas y afectar el abastecimiento de agua para la agricultura, la generación de energía y el consumo humano (Drenkhan y Castro-Salvador, 2023). Las proyecciones hidrológicas hasta 2050 anticipan una caída del 43% en el aporte glaciar al caudal en la vertiente occidental, con implicaciones directas sobre la generación hidroeléctrica en Bolivia, Chile y Perú (Hugonnet et al., 2021; Drenkhan et al., 2023). El derretimiento acelerado también está formando nuevas lagunas en las cercanías de los glaciares y aumentando el volumen de otras ya existentes a ritmos superiores a los promedios históricos. Esto incrementa la probabilidad de desbordes repentinos altamente destructivos aguas abajo.

Estos procesos forman parte de cambios más amplios observados en las denominadas regiones criosféricas, es decir, territorios donde la presencia de hielo, nieve o suelo permanentemente congelado constituye un elemento dominante de la dinámica ambiental y de los sistemas hídricos. Entre ellas se encuentran los Andes, los Alpes, el Himalaya, el noroeste de América del Norte y las regiones polares. Aunque presentan contextos físicos y sociales diferentes, estas regiones comparten transformaciones aceleradas asociadas al calentamiento global, incluyendo el retroceso glaciar, la expansión de lagunas glaciares y el aumento de peligros vinculados a la pérdida de estabilidad de la criósfera.

Una de las manifestaciones más relevantes de estos cambios son los **desbordes súbitos de lagunas glaciares** o **GLOF** (*glacial lake outburst floods*), eventos en los que una laguna glaciar libera de manera repentina un gran volumen de agua debido a la falla parcial o total de la barrera natural que la contiene.

¹. En términos climatológicos, esta tasa se considera significativa. Aunque inferior a la tasa media global reciente (~0,18–0,20 °C por década), se sitúa en el rango alto observado para Sudamérica (IPCC, 2019; CDKN, 2019).

IMAGEN 1

**Pérdida de la superficie glaciar en los últimos 40 años en el Nevado del Huila,
Colombia**

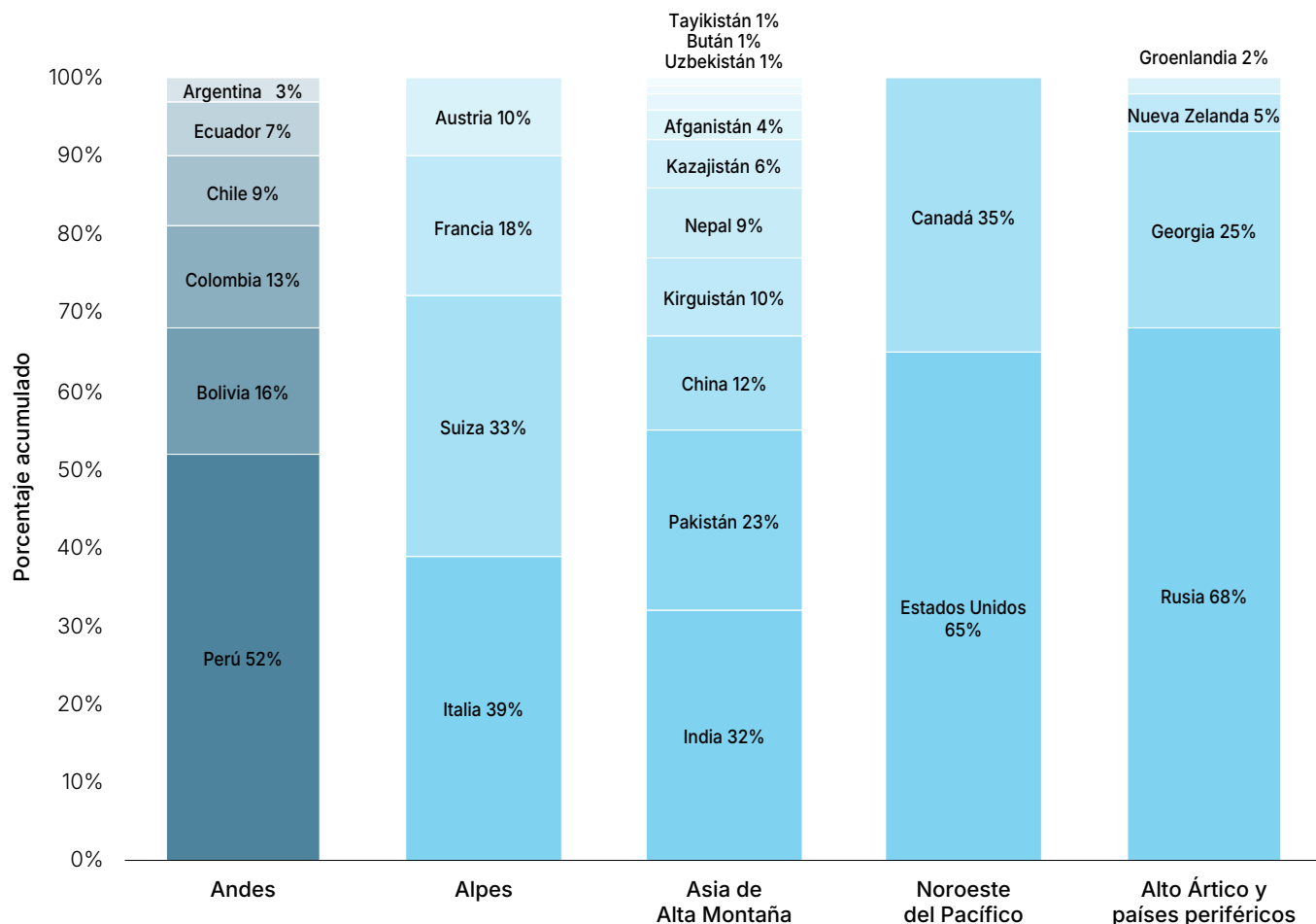


Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes de Landsat.

Estos desbordes pueden afectar a asentamientos humanos, áreas de producción agropecuaria e infraestructura crítica ubicados en zonas colindantes. A escala global, millones de personas se encuentran expuestas (Gráfico 1), con concentraciones relevantes en la cordillera andina (Taylor et al., 2023). Estos eventos son preocupantes por su naturaleza aparentemente repentina. Conocidos como desbordes súbitos de lagos glaciares o GLOF, por sus siglas en inglés (*glacial lake outburst flood*), suelen estar precedidos por largos periodos de latencia en los que se acumula agua a la vez que se debilitan los muros del lago. El crecimiento de las lagunas a lo largo de los Andes está aumentando la cantidad de personas que podrían verse afectadas por eventos de esta naturaleza si se mantienen las actuales tendencias de calentamiento.

GRÁFICO 1

Personas expuestas al riesgo de GLOF en regiones criosféricas



Fuente: Elaboración propia a partir de Taylor et al. (2023).

RECUADRO 1

El GLOF del lago South Lhonak en India: un caso paradigmático

El GLOF del lago South Lhonak, ocurrido en 2023 en el estado de Sikkim, en los Himalayas orientales, es uno de los casos más documentados y paradigmáticos de riesgo glaciar actual. Su importancia se debe tanto a la magnitud del evento como a la claridad con la que ilustra la convergencia de factores físicos, climáticos y de desarrollo. Durante las últimas cinco décadas, el lago experimentó un crecimiento acelerado asociado al retroceso del glaciar del que recibe agua, multiplicando por ocho su tamaño desde los 0,2 km² en la década de 1970 hasta los 1,6 km² en 2023, y con un volumen estimado de entre 65 y 70 millones de m³ inmediatamente antes del colapso (Sattar et al., 2025).

El evento fue el resultado de una combinación de factores desencadenantes. Las investigaciones coinciden en que lluvias intensas previas al colapso incrementaron la saturación de la morrena lateral, el lugar en el que se acumulan rocas y sedimentos depositados en un glaciar, reduciendo su resistencia al corte, lo que hizo que la estructura fuera menos estable y más susceptible de deslizarse o colapsar. Al mismo tiempo, un deslizamiento parcial del material morrénico hacia el lago generó una ola que sobrepasó el borde de la presa. Esto provocó una erosión rápida de la barrera y el vaciamiento progresivo del lago (Shirsat et al., 2024). Una vez abierta la brecha, el proceso se aceleró: el caudal aumentó de forma abrupta y el flujo se transformó en una avenida cargada de sedimentos.

Los impactos del GLOF fueron de una magnitud excepcional. El desastre dejó, al menos, 46 personas fallecidas, más de 70 desaparecidas y alrededor de 88.000 afectadas, además de la destrucción de puentes, carreteras, viviendas y tierras agrícolas a lo largo del valle del río Teesta (Imagen 2) (Sattar et al., 2025). Un elemento crítico fue la falla de la central hidroeléctrica Teesta III, ubicada aguas abajo, cuya destrucción liberó cerca de 5 millones de m³ de agua adicionales, amplificando el pico de la inundación y mostrando cómo un GLOF puede desencadenar impactos tecnológicos secundarios que multiplican los daños iniciales.

Este trabajo aborda los cambios observados en los niveles de riesgo ante los GLOF que enfrentan decenas de comunidades en los Andes. La interacción entre las transformaciones ambientales aceleradas y las estrategias de desarrollo ha incrementado la exposición y la vulnerabilidad de territorios andinos a este tipo de eventos a ritmos que parecen sobrepasar la capacidad de respuesta existente. El crecimiento no planificado de asentamientos humanos de altura, la expansión de la infraestructura energética, vial y de riego, y la persistencia de brechas en los servicios públicos configuran territorios cada vez más expuestos. En este contexto, eventos multiamenaza de baja frecuencia, pero de gran magnitud pueden generar impactos como los

descritos en el Recuadro 1. Así, la propuesta es comprender el riesgo asociado a un GLOF como el resultado de procesos acumulativos que reflejan decisiones de desarrollo tomadas a lo largo del tiempo, y no como eventos aislados o repentinos.

El riesgo de desastre asociado a los GLOF tiene un carácter sistémico, ya que la cordillera funciona como un entramado hidrológico y territorial interdependiente que moviliza efectos e impactos desde las cabeceras glaciadas de las cuencas hacia valles poblados y economías aguas abajo. Los flujos originados en la alta montaña sostienen el abastecimiento urbano y la producción agroindustrial, por lo que su alteración puede comprometer la seguridad hídrica y la productividad a escala regional, en especial en zonas en las que la expansión demográfica está incrementando la demanda y la competencia por el agua (Buytaert et al., 2006; IPCC, 2019). La evidencia indica que las perturbaciones abruptas en las cabeceras pueden activar efectos en cascada que exceden el área directamente impactada, afectando infraestructura estratégica y servicios esenciales, incluidos sistemas energéticos dependientes de los caudales andinos (Banco Mundial, 2014; IPCC, 2019). En algunos países, la generación hidroeléctrica aporta entre el 60% y el 85% de la matriz energética y una fracción relevante de esta infraestructura se emplaza en valles estrechos en los que los flujos de detritos y cargas de sedimentos pueden dañar componentes críticos, reducir la capacidad operativa y acelerar la colmatación de embalses (Vuille, 2013; IPCC, 2019). Carreteras, puentes y sistemas de riego también suelen concentrarse en corredores fluviales, lo que incrementa la probabilidad de interrupciones recurrentes y de pérdidas asociadas a los daños, con consecuencias para la competitividad, la conectividad y la seguridad hídrica (UNISDR, 2015; IPCC, 2019). Estas interrupciones forman parte de un contexto regional en el que las inundaciones y los movimientos en masa han generado pérdidas acumuladas significativas y costos anuales que, en algunos países de ingresos medios, pueden acercarse al 2% del PIB. Estos impactos frenan el crecimiento y aumentan los pasivos contingentes para las finanzas públicas (Schoolmeester et al., 2018; Banco Mundial, 2024; INAIGEM, 2024).

Para los Estados, estos riesgos tienen implicaciones directas sobre la calidad de vida y la integridad física de la ciudadanía, la sostenibilidad fiscal y la eficiencia de la inversión pública. La recurrencia de eventos de alto impacto genera una presión creciente y extraordinaria sobre los presupuestos públicos, los mecanismos de protección financiera y los sistemas de protección social. En un contexto de restricciones fiscales y de aumento de la incertidumbre climática, comprender y anticipar la configuración del riesgo asociado a los GLOF, que presentan umbrales tan altos de incertidumbre, es esencial para orientar decisiones de inversión, fortalecer la resiliencia de los territorios de montaña y evitar la reproducción de vulnerabilidades que comprometan las trayectorias de desarrollo a largo plazo.

1.1 Objetivos del estudio

El objetivo general de esta monografía es analizar cómo los desbordes súbitos de lagunas glaciares se convierten en un riesgo sistémico en los Andes a partir de los cambios en la criósfera, las transformaciones territoriales y los modelos de desarrollo. El estudio busca comprender no solo la evolución del peligro físico, sino también los procesos sociales, económicos e institucionales que determinan los niveles de exposición y vulnerabilidad en territorios de alta montaña y en zonas aguas abajo.

De manera específica, la monografía se propone identificar los principales factores que determinan el riesgo asociado a los GLOF en los Andes, evaluar los avances y las brechas en las políticas y prácticas orientadas a su gestión, y definir orientaciones estratégicas para reducir el riesgo y mejorar la adaptación en zonas de alta montaña. Estos objetivos se articulan con la necesidad de generar evidencia que apoye la toma de decisiones de política pública y la planificación de inversiones, contribuyendo a fortalecer la resiliencia de los territorios andinos frente a escenarios de calentamiento global, de incertidumbre creciente y de repercusiones poco estimadas. Existen decenas de lagunas en la región con altas probabilidades de desbordarse. Al menos para este conjunto, los países deben redoblar los esfuerzos ante la gravedad de las advertencias de los científicos y lo catastrófico que puede ser un desastre de este tipo en las condiciones actuales.

1.2 La lógica forense y el enfoque longitudinal

Este estudio utiliza el enfoque del análisis forense del riesgo de desastre propuesto por el marco *FORIN*², que enfatiza la necesidad de deconstruir la secuencia de factores que confluyen en un desastre, atendiendo tanto a la causalidad inmediata como a los procesos históricos de construcción del riesgo. A diferencia de los métodos tradicionales posteriores al impacto, la lógica forense concibe el desastre como un síntoma dentro de un ensamblaje sistémico de decisiones y condiciones territoriales. Su propósito central no es solo explicar qué ocurrió, sino por qué fue posible y qué cambios estructurales deben implementarse para evitar la repetición. Esta aproximación identifica cadenas causales, puntos de quiebre y mecanismos de amplificación —como déficits de gobernanza, inequidad territorial o fallas de regulación— que pueden permanecer ocultos en análisis descriptivos, pero se vuelven evidentes cuando ocurre el impacto. El análisis forense facilita integrar dimensiones hidrológicas, geotécnicas y sociopolíticas para

2. <https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/71>

revelar cómo las condiciones de exposición y vulnerabilidad evolucionaron a lo largo del tiempo y cómo la interacción entre el clima, la infraestructura y las decisiones de uso del suelo, por ejemplo, desemboca en crisis específicas (Carey et al., 2012; Huggel et al., 2020).

El enfoque longitudinal, que también forma parte de la metodología de este estudio, ofrece ventajas para comprender los procesos de riesgo acumulados, con dinámicas multidécada y cambios no lineales. Los análisis longitudinales permiten observar trayectorias, secuencias temporales y transiciones críticas (Ployhart y Vandenberg, 2010), así como distinguir entre variabilidad interanual y tendencias estructurales asociadas a fenómenos de mayor escala. La posibilidad de aislar los procesos de cambio reduce la confusión entre correlaciones estáticas y causalidad real, un problema ampliamente documentado en la literatura (Singer y Willett, 2003). Además, este tipo de estudios permite captar los efectos diferidos (*lagged effects*) y las retroalimentaciones entre el clima, la exposición humana y las decisiones colectivas. En los Andes, donde el retroceso glaciar, los patrones migratorios y la expansión urbana ocurren de manera simultánea pero con ritmos distintos, esta perspectiva es clave para definir puntos de inflexión, identificar tendencias emergentes y prever cómo las presiones combinadas están configurando nuevos escenarios de amenaza.

La articulación entre lógica forense y análisis longitudinal proporciona el marco metodológico para el estudio de dinámicas de riesgo en los Andes, donde los rápidos procesos biofísicos conviven con largas transformaciones sociopolíticas. Esta combinación permite reconstruir la *historia causal* de un desastre —desde la génesis del peligro hasta las decisiones institucionales que modulan la vulnerabilidad— y situarla dentro de una temporalidad más amplia que revele patrones persistentes (IRDR, 2011). Asimismo, habilita la comparación entre cuencas, periodos y escalas, capturando la variabilidad espacial característica de la cordillera. Para la planificación del desarrollo, estas metodologías aportan evidencia accionable, ya que permiten anticipar cuellos de botella institucionales, evaluar el desempeño histórico de las políticas de mitigación y proponer reformas basadas en causalidad demostrada. En este sentido, la monografía busca construir una narrativa analítica de la ocurrencia de GLOF a partir de un análisis comparado y complementario de eventos similares que han ocurrido en configuraciones territoriales similares en el pasado, tanto en los Andes como en otras regiones del planeta en las que se da este fenómeno.

El análisis de fuentes también incorpora los resultados de los talleres y las consultas técnicas a especialistas durante las misiones en terreno en el marco de la iniciativa ESW. A su vez, la iniciativa organizó sus consultas y talleres propios a partir de los que se realizaron en Huaraz y Cusco en 2022 y 2023 por parte de la Red de Estudios Sociales para la Prevención de los Desastres en Latinoamérica (LA RED) y la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de los Desastres (UNDRR).



**Desbordes súbitos de lagunas
glaciares en los Andes:
desafíos contemporáneos para
territorios de alta montaña**

2

Anatomía de los GLOF: rasgos y dinámicas asociadas



Un GLOF es un evento hidrológico que ocurre cuando una laguna glaciar libera, de manera súbita y descontrolada, un volumen significativo de agua almacenada, generalmente como consecuencia de la falla parcial o total de la estructura que la contiene. Estas estructuras suelen ser morrenas glaciares jóvenes, presas de hielo o combinaciones de ambas, caracterizadas por una baja cohesión interna, una alta heterogeneidad granulométrica y, en muchos casos, la presencia de hielo enterrado, lo que las hace intrínsecamente inestables (Emmer et al., 2016; Kougkoulos et al., 2018). El vaciamiento puede desencadenarse por distintos mecanismos, incluyendo avalanchas de hielo o roca que impactan en la laguna, lluvias intensas que incrementan rápidamente el nivel del agua, o procesos de debilitamiento progresivo, como la erosión interna o el derretimiento del hielo dentro de la morrena (Carrivick y Tweed, 2016; Li et al., 2025). El resultado es una avenida torrencial de alta energía, con picos de caudal muy superiores a los de crecidas fluviales convencionales y con una elevada carga de sedimentos, capaz de propagarse decenas o incluso cientos de kilómetros aguas abajo.

Desde una perspectiva de desarrollo y gestión del riesgo, los GLOF se consideran eventos de baja recurrencia, pero con consecuencias potencialmente catastróficas, en especial, en regiones de montaña en las que la población, la infraestructura crítica y los medios de vida se concentran en el fondo de valles estrechos. La evidencia empírica muestra que los impactos de un GLOF no dependen únicamente del volumen de material liberado, sino de la interacción entre la dinámica del flujo, la topografía del valle, la disponibilidad de sedimentos y el nivel de exposición y vulnerabilidad social aguas abajo (Cook et al., 2018; Emmer et al., 2022). En el contexto del calentamiento global, el retroceso acelerado de los glaciares ha incrementado tanto el número como el tamaño de las lagunas glaciares, al tiempo que ha generado configuraciones geomorfológicas más inestables, aumentando la exposición a este tipo de eventos (Shugar et al., 2020; Taylor et al., 2023).

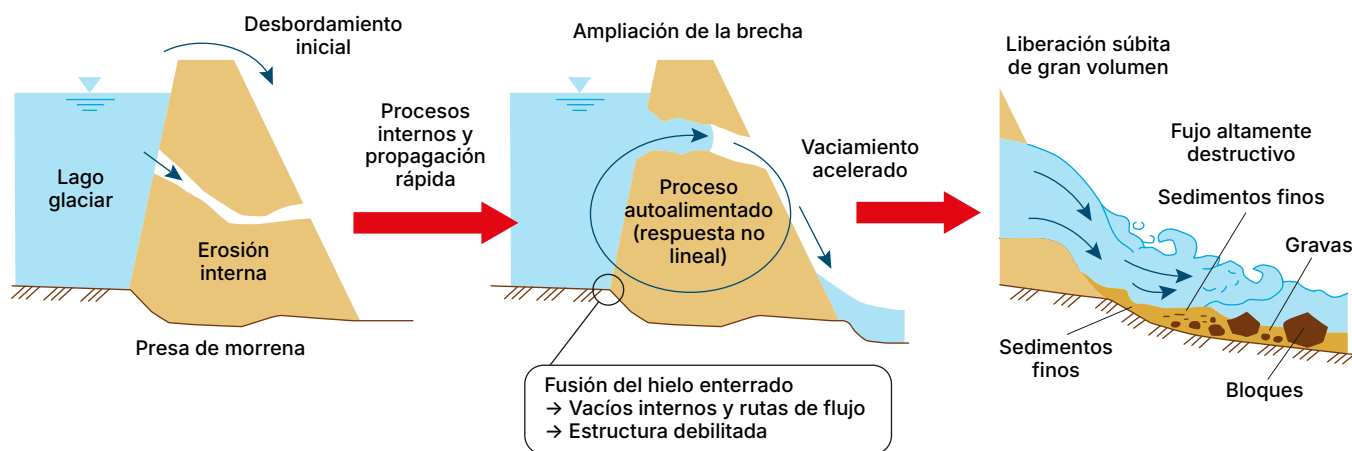
La generación de un GLOF es el resultado de un proceso acumulativo en el que el sistema glaciar-laguna-entorno circundante evoluciona de forma progresiva hacia un estado de inestabilidad crítica. Primero debe darse una configuración geomorfológica propicia, por lo general, asociada al retroceso del glaciar, que deja expuestas cubetas sobreexcavadas o depresiones capaces de almacenar agua. Estas depresiones suelen quedar represadas por morrenas recientes o presas de hielo formadas durante las últimas fases del retroceso glaciar. Al ser material suelto y expuesto suele presentar una baja cohesión interna y, por tanto, una mayor inestabilidad. En paralelo, el aumento sostenido de la fusión glaciar y, en algunos contextos, de la precipitación líquida incrementa de forma gradual el volumen y el nivel del lago, elevando la presión sobre la presa natural. Este proceso de carga es lento pero persistente, y puede extenderse durante años o décadas, acercando el sistema a umbrales críticos sin que existan señales externas de una falla inminente (Kougkoulos et al., 2018; Carrivick y Tweed, 2016).

El entorno inmediato de la laguna desempeña un papel central en la generación de un GLOF, ya que el retroceso del glaciar puede desestabilizar el paisaje aledaño. La pérdida del soporte que proporciona el hielo a las laderas empinadas favorece las avalanchas, los desprendimientos de roca y los deslizamientos, mientras que la degradación del permafrost —la capa del suelo permanentemente congelada— reduce la resistencia mecánica de los macizos rocosos y de los depósitos no consolidados (Carrivick y Tweed, 2016; Emmer et al., 2022). Cuando estos procesos se desarrollan en cuencas con fuerte acoplamiento entre el lago y el glaciar, el riesgo se intensifica: una avalancha o un colapso parcial del frente glaciar que impacta directamente el espejo de agua puede generar ondas de desplazamiento capaces de sobrepasar la cresta de la morrena o erosionar rápidamente su cara externa. Además, para que el GLOF se materialice, deben concurrir procesos internos dentro de la laguna y de la presa que permitan que la falla se propague rápidamente. Una vez iniciado el desbordamiento o la erosión interna, la respuesta del sistema es altamente no lineal: el aumento del caudal incrementa la capacidad erosiva del flujo, lo que amplía la brecha en la presa y acelera el vaciamiento del lago en un proceso autoalimentado (Emmer y Cochachin, 2013; Li et al., 2025). En muchos casos, la presencia de hielo enterrado dentro de la morrena facilita este colapso progresivo, ya que su derretimiento genera vacíos internos y rutas preferenciales de flujo que debilitan aún más la estructura (Diagrama 1). El resultado es una liberación súbita de grandes volúmenes de agua, frecuentemente acompañada de sedimentos finos, grava y bloques, que transforma la descarga en un flujo altamente destructivo.

DIAGRAMA 1

Esquema del colapso del dique por el derretimiento de bloques de hielo enterrados

Proceso GLOF: falla de presa de morrena



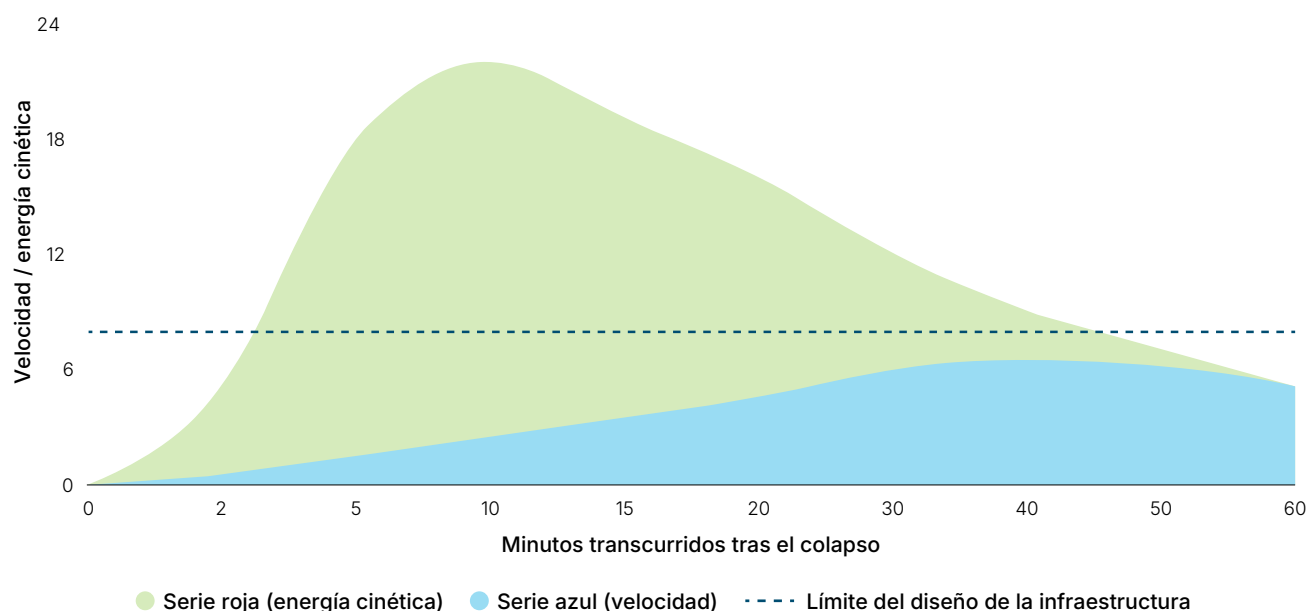
Fuente: Elaboración propia a partir de Emmer y Cochachin (2013) y Li et al. (2025).

Los flujos derivados de un GLOF presentan un comportamiento hidrodinámico excepcionalmente energético. En términos de altura y espesor del flujo, la evidencia muestra que los GLOF suelen propagarse como frentes abruptos, con tirantes iniciales que pueden alcanzar varios metros e, incluso, superar decenas de metros en valles estrechos y encajonados (Imagen 3), especialmente en los tramos proximales al punto de falla de la laguna (Carrivick y Tweed, 2016; Emmer et al., 2022). Este espesor no corresponde únicamente al agua, sino a una mezcla de agua y sedimentos que hace que el flujo tenga una masa y un poder destructivo muy superiores a los de una inundación convencional. A medida que el flujo avanza aguas abajo, el tirante puede disminuir, pero su espesor efectivo sigue siendo elevado debido a la incorporación progresiva de materiales erosionados del cauce y las márgenes. Esto permite que conserve una capacidad de daño significativa incluso a grandes distancias del origen (Emmer et al., 2016).

Los flujos de un GLOF se caracterizan por velocidades extremadamente altas, en especial, en los sectores de fuerte pendiente. Estudios de reconstrucción hidráulica y modelación indican que las velocidades suelen situarse entre los 10 y los 20 m/s, aunque en algunos casos pueden superar estos valores en tramos muy confinados (Koungkoulos et al., 2018; Cook et al., 2018). Estas velocidades, combinadas con el gran volumen movilizado, generan una energía cinética y una potencia específica que exceden ampliamente los niveles considerados en el diseño de la mayoría de las infraestructuras ubicadas en valles de montaña. A diferencia de las crecidas fluviales graduales, el pico de energía de un GLOF se alcanza casi de inmediato tras el colapso de la presa (Gráfico 2), lo que reduce drásticamente las posibilidades de respuesta y explica la elevada letalidad de muchos eventos históricos de este tipo (Carrivick y Tweed, 2016). Además, la rápida erosión del cauce puede incrementar la descarga sólida y modificar la dinámica del flujo en cuestión de minutos.

GRÁFICO 2

Comparación de la potencia específica entre un GLOF y una crecida fluvial

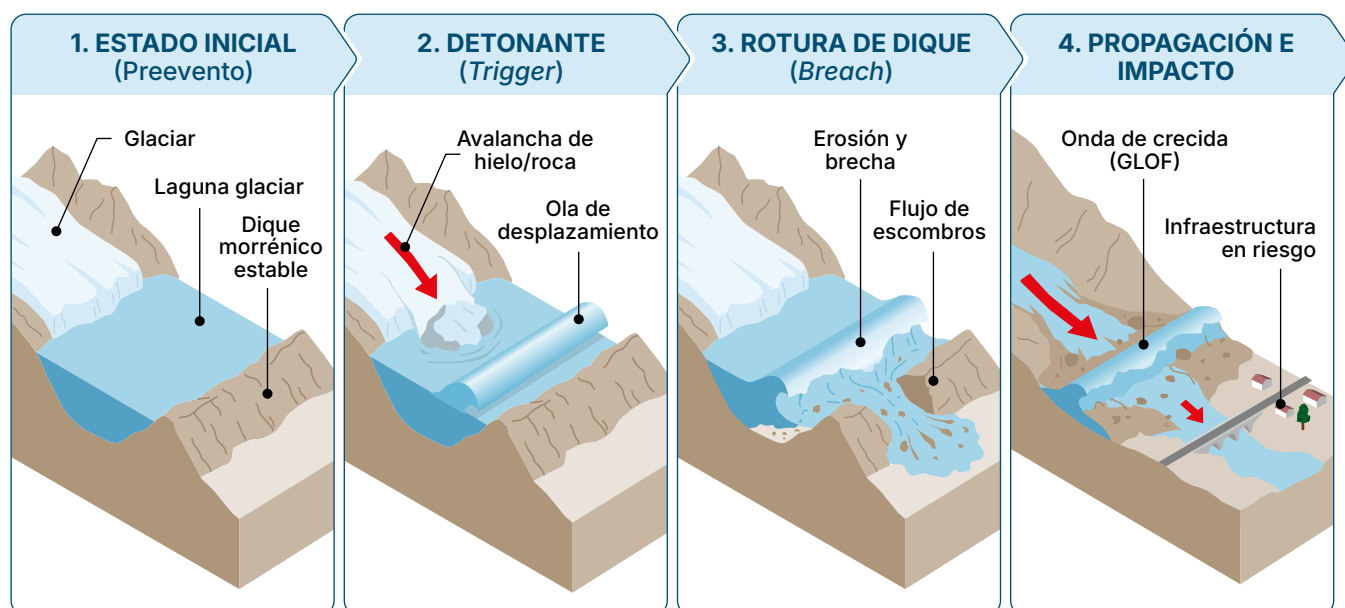


Fuente: Elaboración propia a partir de Carrivick y Tweed (2016).

La naturaleza del material transportado y la forma en que el flujo se comporta y se mueve también requieren atención especial, pues condicionan directamente la viscosidad efectiva del flujo. Estos flujos transportan grandes cantidades de sedimentos finos, gravas, bloques métricos, material orgánico y restos de infraestructura, lo que los sitúa en el espectro de los flujos hiperconcentrados o de detritos (Emmer y Cochachin, 2013; Carrivick y Tweed, 2016). La alta concentración de sólidos incrementa la viscosidad y genera un comportamiento con propiedades intermedias entre un fluido turbulento y un material granular. Esta combinación de agua, sedimentos y materiales de distintos tamaños permite que el flujo ejerza fuerzas de impacto muy elevadas y transporte bloques de gran tamaño a largas distancias, incluso en tramos en los que la pendiente disminuye. La combinación de gran espesor, alta velocidad, elevada energía y viscosidad aumentada explica por qué los GLOF producen daños desproporcionados y por qué requieren enfoques específicos de modelación y mitigación distintos de los utilizados para otros tipos de inundaciones (Kougkoulos et al., 2018; Carrivick y Tweed, 2016).

DIAGRAMA 2

Etapas del desarrollo de un GLOF



Fuente: Elaboración propia a partir de Emmer y Cochachin (2013) y Li et al. (2025).

2.1 Impactos asociados a un desborde

La evidencia muestra que el impacto humano directo es uno de los tres efectos más críticos asociados a los GLOF. En especial, en regiones de montaña en las que los asentamientos y las actividades productivas se concentran en fondos de valle y en las trayectorias potenciales de los flujos. A escala global, se estima que más de 15.000 personas han perdido la vida como consecuencia de GLOF documentados desde el siglo XX, con una concentración significativa en el Himalaya y los Andes (Carrivick y Tweed, 2016; Sattar et al., 2025). Esta elevada letalidad se explica por la combinación de velocidades extremas del flujo, tiempos de aviso de apenas unos minutos y la ubicación de poblaciones en corredores fluviales altamente confinados, lo que limita las opciones de evacuación (Emmer et al., 2016). Un segundo tipo de impacto es la destrucción de infraestructura crítica y de activos estratégicos, con consecuencias macroeconómicas que suelen superar ampliamente los daños físicos iniciales. Los GLOF han causado el colapso de infraestructura que ha interrumpido servicios esenciales durante meses o años. A escala regional, se ha documentado que los GLOF representan una amenaza creciente para el sector hidroeléctrico en zonas de alta montaña, donde se ubican inversiones de cientos de millones de dólares en valles expuestos a flujos de alta energía (Sattar et al., 2025; Carrivick y Tweed, 2016).

Los GLOF también pueden tener impactos ambientales irreversibles al movilizar volúmenes masivos de sedimentos —en algunos casos superiores a varios millones de metros cúbicos— que alteran de forma permanente la geomorfología fluvial, ensanchan cauces, erosionan terrazas agrícolas y degradan hábitats acuáticos y ribereños (Emmer y Cochachin, 2013; Carrivick y Tweed, 2016). Estos cambios suelen traducirse en la pérdida sostenida de tierras productivas, la reducción de la seguridad alimentaria y el deterioro de actividades como el turismo de montaña y la ganadería. En el Himalaya se estima que más de 9.000 muertes y pérdidas económicas sustanciales asociadas a GLOF han tenido efectos acumulativos sobre comunidades ya vulnerables, reforzando ciclos de pobreza y migración (Carrivick y Tweed, 2016). Según su magnitud, estos eventos pueden llegar a ser choques sistémicos que comprometen la resiliencia económica, social y ambiental de los territorios de montaña (Carrivick y Tweed, 2016).

2.2 Tres formas de clasificar un GLOF

La clasificación de los GLOF puede abordarse desde múltiples perspectivas analíticas, cada una de las cuales aporta información específica y complementaria según las necesidades de investigación e intervención. Estas clasificaciones, sin embargo, no son excluyentes, ya que un mismo evento puede inscribirse en varias categorías de manera simultánea. Por ejemplo, una laguna represada por morrena puede experimentar un crecimiento acelerado asociado al retroceso glaciar y, posteriormente, fallar por un desbordamiento inducido por precipitaciones extremas o por un impacto de masa sólida. Este tipo de configuraciones ha sido ampliamente documentado en los Andes, donde numerosos lagos se han identificado como altamente peligrosos debido a la combinación de un rápido aumento de volumen, presas morrénicas jóvenes y una alta exposición aguas abajo (Carrivick y Tweed, 2016).

Una forma ampliamente utilizada de clasificar los GLOF se basa en el tipo de presa natural que contiene la laguna antes del colapso, dado que este factor condiciona de manera decisiva la estabilidad del sistema y el modo de falla. Desde esta perspectiva, los lagos glaciares pueden estar represados por morrenas, por hielo glaciar o por combinaciones de ambos materiales (Carrivick y Tweed, 2016). Las presas de morrena, constituidas por sedimentos sueltos y heterogéneos depositados durante fases previas de avance glaciar, son particularmente frágiles debido a su baja cohesión, su alta permeabilidad y la frecuente presencia de hielo enterrado. Estas características las hacen propensas a procesos de sobrevertimiento, erosión interna y colapso progresivo bajo condiciones de aumento de la presión hidrostática o de deshielo acelerado (Clague y Evans, 2000). En contraste, las presas de hielo presentan dinámicas distintas: aunque pueden regenerarse tras eventos de vaciamiento parcial, como se observa en casos emblemáticos como el glaciar Perito Moreno, su estabilidad es altamente sensible a incrementos de temperatura, ya que el derretimiento

y la fracturación del hielo pueden desencadenar rupturas súbitas con muy poco aviso (Wilson et al., 2018). Esta clasificación resulta especialmente útil para priorizar acciones de monitoreo y definir medidas de mitigación según los rasgos estructurales de las barreras de las lagunas.

Otra clasificación se centra en el mecanismo de ruptura o detonante del GLOF, es decir, en la forma en que se produce la desestabilización de la presa. Entre los mecanismos más comunes se encuentra el desbordamiento, que ocurre cuando el nivel del agua supera la altura de la presa, por lo general, como resultado de un aumento rápido del volumen almacenado asociado a una fusión glacial intensificada o a precipitaciones extremas (Carrivick y Tweed, 2016). Otro mecanismo frecuente es la erosión interna, o piping, un proceso progresivo mediante el cual las filtraciones de la presa remueven partículas finas, reduciendo su resistencia estructural de forma gradual hasta provocar el colapso (Clague y Evans, 2000). Finalmente, los impactos externos, como avalanchas de hielo, deslizamientos de ladera o, en menor medida, sismos, pueden generar ondas de desplazamiento dentro de la laguna que sobrepasan la presa o erosionan rápidamente su cara externa, desencadenando una falla abrupta (Emmer et al., 2022). Esta forma de clasificación es particularmente valiosa para el diseño de sistemas de alerta temprana (SAT) y para la identificación de umbrales críticos de activación de las alertas.

Una tercera clasificación considera la ubicación del lago respecto al glaciar, lo que permite entender mejor su dinámica hidrológica y su evolución temporal. Los lagos supraglaciares, formados sobre la superficie del glaciar, están expuestos a variaciones rápidas del balance de masa y a cambios estacionales en la acumulación y ablación del hielo, lo que los hace susceptibles a desbordamientos repentinos (Clague y Evans, 2000). Los lagos englaciares, localizados dentro del cuerpo glacial, están controlados por procesos térmicos internos y por la dinámica del flujo de agua y del hielo circundante, que influyen en su estabilidad y en la posibilidad de drenajes súbitos a través de canales subglaciares (Benn et al., 2007). Por su parte, los lagos proglaciares, situados frente al glaciar y generalmente represados por morrenas, concentran gran parte de la atención en la gestión del riesgo debido a su mayor tamaño, a la fragilidad de las presas que los contienen y a su frecuente proximidad a áreas habitadas e infraestructura crítica (Richardson y Reynolds, 2000). La laguna Upischocha, en Perú (Imagen 4), es un ejemplo clásico de lago proglacial desarrollado frente al glaciar y represado por depósitos morrénicos. Este tipo de lagunas se forma como resultado del retroceso glacial y se caracteriza por una dinámica hidrológica fuertemente condicionada por la ablación del hielo, los aportes de escorrentía y la estabilidad de la morrena, que actúa como presa natural. Esto las convierte en uno de los tipos de lagos con mayor relevancia para la gestión del riesgo de GLOF en regiones de alta montaña. Esta clasificación espacial resulta clave para anticipar trayectorias de riesgo y para orientar decisiones de ordenamiento territorial y planificación del desarrollo en regiones de montaña.

IMAGEN 2

Zona de contacto entre el glaciar y el espejo de agua en la laguna Upiscocha, Perú



Fuente: Castro (2023).

RECUADRO 2

El rol de los organismos multilaterales en el conocimiento y la modelación del riesgo en puntos críticos

En 2014, el Banco Interamericano de Desarrollo financió una asistencia técnica para el *Modelo de inundación por potencial aluvión desde la laguna Palcacocha, Huaraz, Perú*, como parte de los esfuerzos del Estado peruano para fortalecer la base técnica de la gestión del riesgo asociada con las lagunas glaciares en la Cordillera Blanca. Este informe respondió a la necesidad de contar con un análisis actualizado sobre los posibles efectos de un aluvión originado en la laguna Palcacocha, en un contexto de retroceso glaciar sostenido y crecimiento progresivo del cuerpo lagunar. El objetivo del estudio fue evaluar la plausibilidad física de distintos escenarios de falla y estimar sus consecuencias potenciales mediante herramientas cuantitativas.

El estudio integró datos de alta resolución y múltiples plataformas de modelación numérica especializadas, lo que constituyó uno de sus principales aportes técnicos. Para ello, se utilizó un modelo digital de elevación generado mediante tecnología LiDAR con resolución espacial de cinco metros, complementado con información batimétrica detallada de la laguna y verificación en campo. Para la caracterización de la superficie y la rugosidad hidráulica se emplearon imágenes satelitales de Landsat y análisis de índices de vegetación. La simulación de avalanchas se realizó mediante el

modelo RAMMS; la dinámica del oleaje y su interacción con la morrena se modeló con FLOW-3D; la formación de brechas se evaluó combinando ecuaciones empíricas y simulaciones hidráulicas con MIKE-11; y la propagación del aluvión aguas abajo se estimó con FLO-2D.

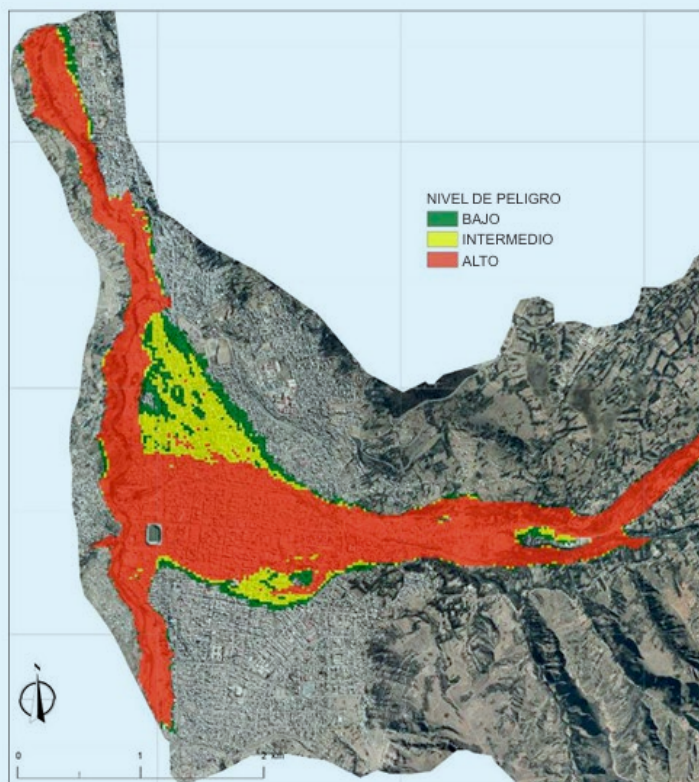
Las simulaciones hidráulicas indicaron que amplias zonas de Huaraz podrían quedar expuestas a inundaciones con profundidades y velocidades del flujo capaces de provocar daños estructurales severos. Los sectores próximos al eje del río Quillcay presentan combinaciones de altura y velocidad del agua que implican riesgo de colapso parcial o total de edificaciones, arrastre de vehículos y pérdida de funcionalidad de infraestructura crítica (Mapa). Más allá del daño directo a viviendas, los resultados muestran afectaciones relevantes en redes viales, puentes, sistemas de abastecimiento de agua y equipamientos urbanos, lo que amplificaría los impactos más allá del evento inicial. Estas condiciones hidráulicas sugieren que los daños variarían considerablemente entre las distintas zonas, haciendo que la recuperación posterior fuera compleja y prolongada debido a la intensidad del impacto físico.

Uno de los mensajes centrales derivados de la modelación es que los tiempos de llegada del aluvión y la extensión espacial de la inundación reducen la efectividad de las respuestas reactivas de forma significativa. Los resultados muestran que sectores clave de la ciudad se verían comprometidos en fases tempranas del evento, afectando simultáneamente áreas residenciales, corredores de movilidad y servicios esenciales. Desde una perspectiva de gestión del riesgo, esto implica que la atención no debe centrarse únicamente en el cauce del río, sino en el conjunto del sistema urbano expuesto. El estudio proporciona evidencia suficiente para priorizar medidas de reducción del riesgo aguas arriba, ajustes en la planificación del uso del suelo y la protección de infraestructura crítica localizada en zonas de alta afectación potencial. En este sentido, los resultados desplazan el debate desde la posibilidad del daño hacia su localización concreta y sus consecuencias territoriales, reforzando la urgencia de acciones preventivas.

MAPA 1

Estimación de peligro por GLOF al que está expuesta la ciudad de Huaraz, Perú

Fuente: McKinney et al. (2014).



2.3 Tendencias en los niveles de riesgo

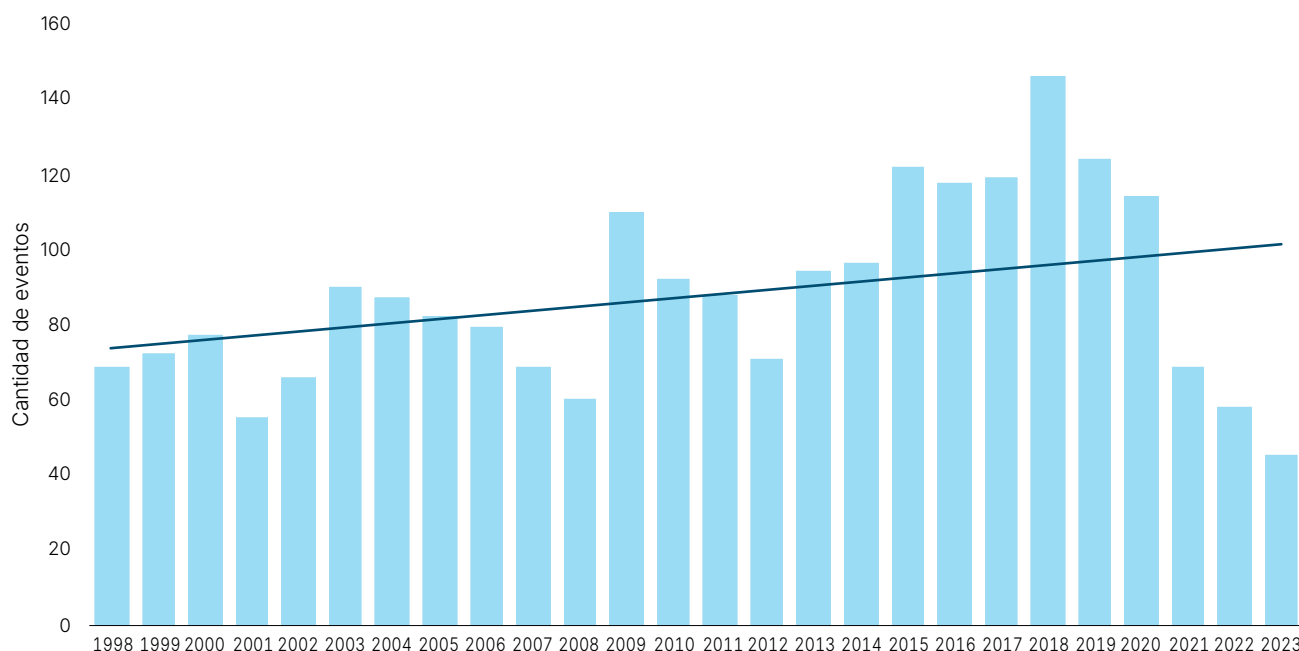
Las tendencias glaciares varían a nivel global y regional, impulsadas principalmente por el calentamiento y por procesos territoriales más acotados. En regiones montañosas como los Andes, la pérdida de masa glaciar ha alcanzado niveles notables, con reducciones de hasta el 87% en algunas zonas desde la década de 1960 (Hugonnet et al., 2021). En paralelo, se ha registrado un incremento de la población asentada en áreas cercanas a glaciares, lo que aumenta la vulnerabilidad a estos fenómenos en países como India, Pakistán y Perú (Taylor et al., 2023).

En las últimas tres décadas, las dinámicas glaciares han mostrado un aumento en el tamaño y la cantidad de lagos glaciares a nivel mundial, atribuido fundamentalmente al retroceso acelerado de estas masas de hielo (Carrivick y Tweed, 2016; Taylor et al., 2023). Lagos como el Tsho Rolpa y el Imja, en los Himalayas, han incrementado su volumen de manera significativa (Shugar et al., 2020), lo que está aumentando la exposición de los poblados cuenca abajo. En los Andes, el aumento de la cota de acumulación de nieve asociado al calentamiento global ha contribuido a una mayor frecuencia de eventos relacionados con GLOF (Hugonnet et al., 2021). Además, se ha documentado un cambio temporal en la ocurrencia de estos eventos, con episodios que se producen cada vez más temprano en el año en el hemisferio norte, lo que podría sugerir nuevas dinámicas climáticas (Schoolmeester et al., 2018). Desde 1998, se registra un incremento de los GLOF a nivel global, aunque esta tendencia muestra un comportamiento errático variable según cada región del planeta (Gráfico 3), por lo que es importante examinar cada caso, por lo menos, a nivel mesorregional. El análisis de los datos disponibles indica que mientras algunas regiones experimentan un aumento sostenido en la frecuencia de estos eventos, otras han mostrado periodos de estabilización o incluso disminuciones temporales. Este comportamiento heterogéneo puede estar relacionado con diferencias en las dinámicas glaciares locales, variaciones climáticas específicas de cada región y la efectividad de las medidas de mitigación adoptadas. La región de los Andes ha mostrado un incremento significativo en la cantidad de lagos glaciares, lo que aumenta el potencial de eventos de este tipo. En contraste, regiones como los Alpes han implementado estrategias de monitoreo y mitigación que han contribuido a reducir el impacto de estos fenómenos. Algunas regiones de Alaska suelen reportar las mayores cantidades de GLOF ocurridos; sin embargo, ocurren en lugares remotos, por lo que no implican un peligro directo para los sistemas construidos³. Esto es un ejemplo claro del peso que tiene la exposición humana dentro de la ecuación particular del riesgo ante estos eventos y, en consecuencia, lo evidente que resulta el énfasis en la reducción de los procesos de exposición para reducir el riesgo de desastre de forma sostenible en el tiempo.

³. Esto no significa que los GLOF que ocurren en zonas remotas no tengan impactos en los ecosistemas circundantes, con las repercusiones concatenadas que pueden afectar distintos sistemas en plazos variables.

GRÁFICO 3

Registro anual de episodios GLOF (1998-2023)



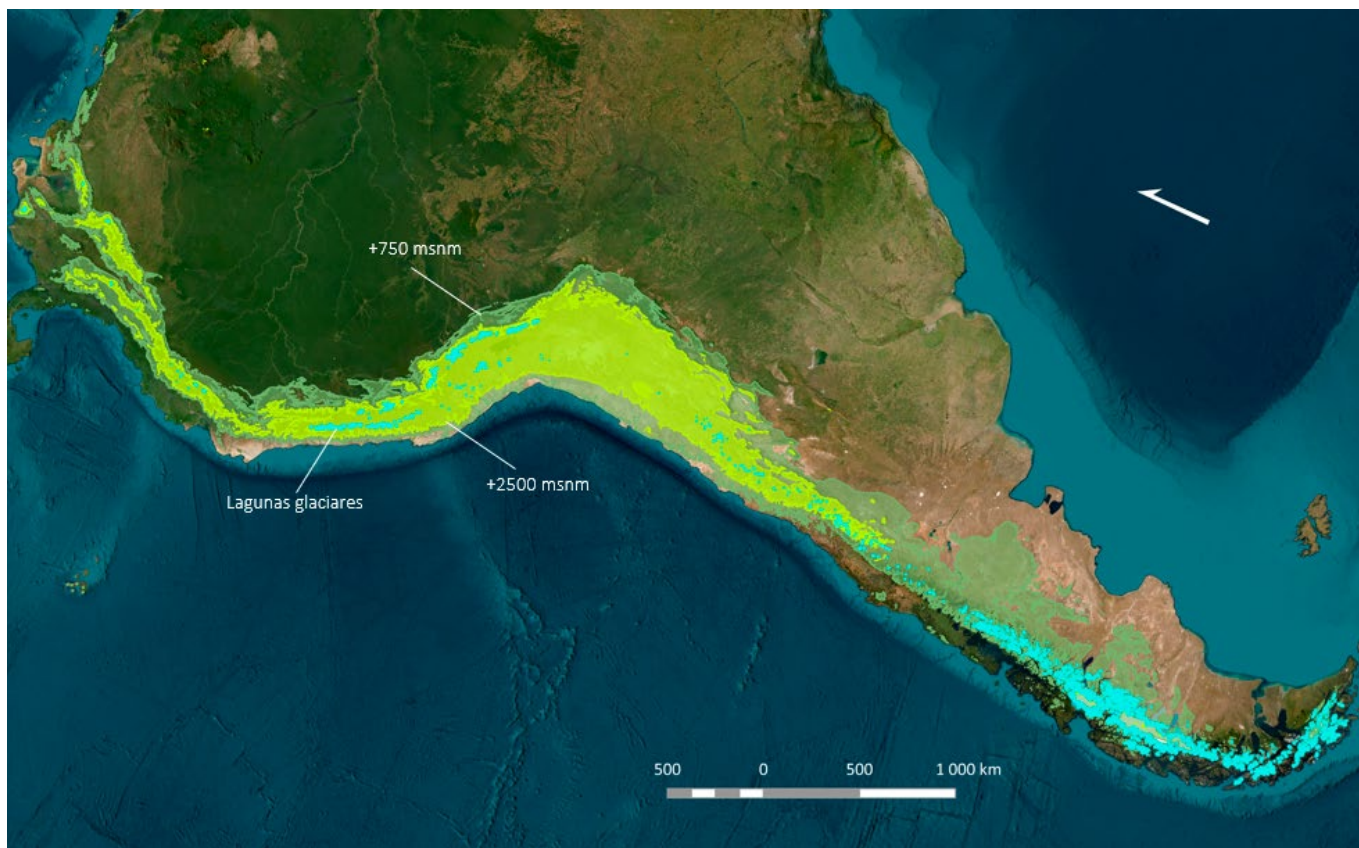
Fuente: Elaboración propia a partir de Glacier Lake Outburst Flood Database V4.1 (<http://glofs.geoecology.uni-potsdam.de/>).

2.3.1 Patrones observados en los Andes

La base de datos de la Universidad de Potsdam registra más de 160 GLOF en los Andes (Mapa 2), con una aceleración marcada desde la década de 1990. En conjunto, la cordillera concentra cerca del 12% de los eventos globales, aunque con flujos de energía e impacto por evento significativamente superiores. Los registros se agrupan en tres periodos principales: 1940–1950, 1990–2010 y un repunte parcial tras 2020. Esta evolución responde al retroceso sostenido de los glaciares desde la Pequeña Edad de Hielo y al incremento de lagunas proglaciares formadas en zonas recientemente deglaciadas (Lützow et al., 2023), aunque el aumento reciente también refleja mejoras en el monitoreo satelital y la comunicación científica, más que un incremento natural en la frecuencia del fenómeno. Cabe destacar que, a pesar de su menor número frente a otras regiones montañosas, los Andes concentran algunos de los eventos más destructivos registrados, que destacan por su alta energía y las complejas interacciones entre glaciares, lagunas y asentamientos humanos en valles confinados (Emmer et al., 2022).

MAPA 2

Localización de las lagunas glaciares en la cordillera de los Andes



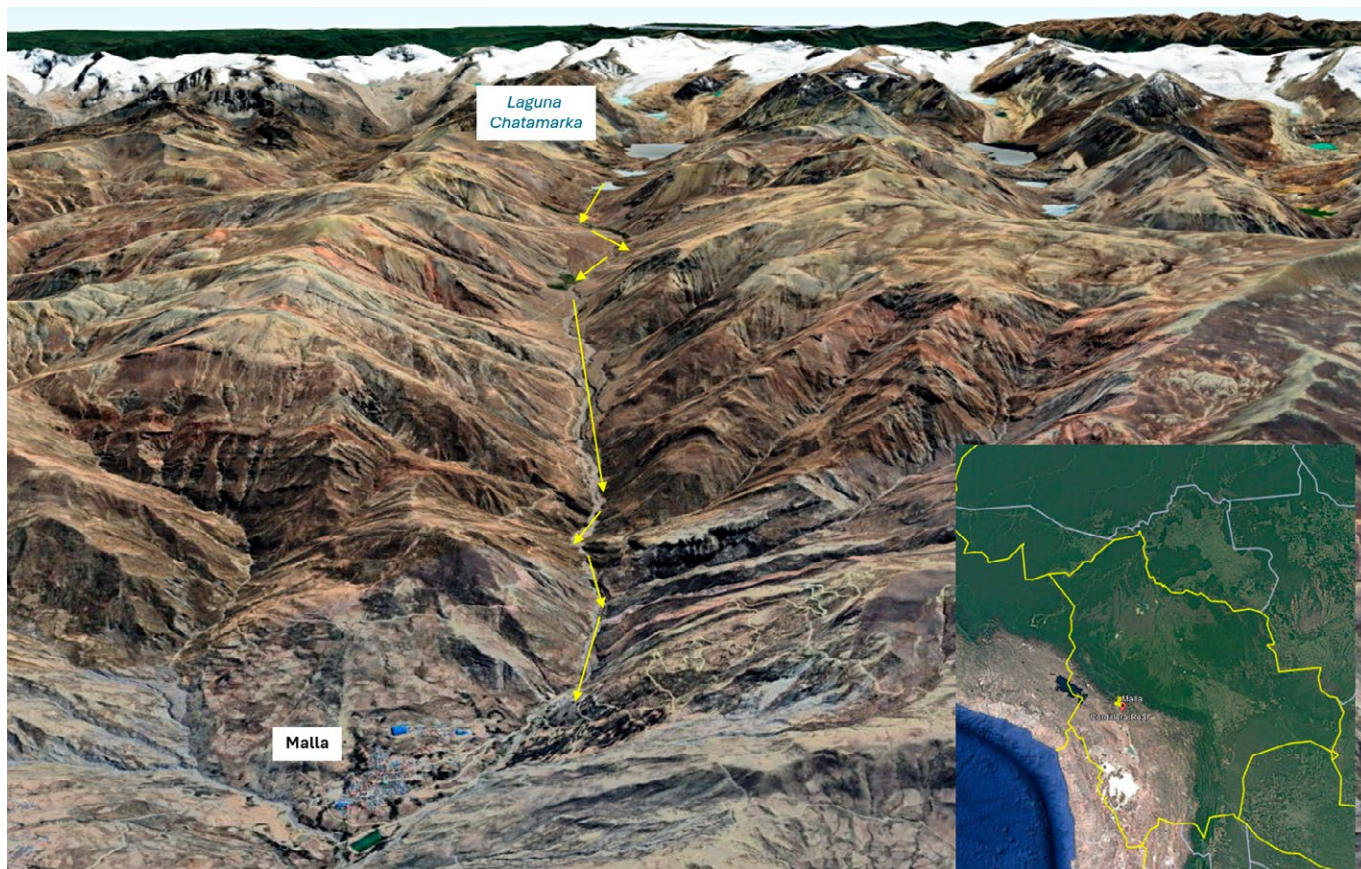
Fuente: Elaboración propia a partir de Song (2024).

Las variaciones espaciales revelan un predominio de los Andes Patagónicos, donde se concentran más del 70% de los GLOF ocurridos desde el año 2000, frente a una menor frecuencia pero mayor severidad en los Andes Tropicales. En Patagonia, los lagos represados por hielo, como el Cachet II o el Chileno, muestran vaciamientos recurrentes y parcialmente previsibles, con bajo impacto humano directo, pero con pérdidas económicas considerables en infraestructura y ganadería (Wilson et al., 2018). En contraste, los Andes Tropicales presentan lagunas morrénicas inestables y una alta densidad poblacional aguas abajo, lo que amplifica los daños por su localización en valles estrechos como los del Santa y el Cañete en Perú (Schneider et al., 2014). En los Andes Centrales, la aridez limita la formación de lagos extensos, pero los registros recientes sugieren una tendencia creciente ligada al retroceso de glaciares en cuencas altoandinas áridas (Iribarren Anaconda et al., 2015). En la zona norte de la cordillera andina, Ecuador y Bolivia presentan una dinámica de GLOF menos frecuente que Perú, aunque con características geomorfológicas que aumentan su potencial destructivo. En Ecuador, los registros históricos son escasos (con apenas media docena de eventos

confirmados), pero destacan por su relación con lagunas proglaciares en contacto con hielo activo, como las de los glaciares Antisana y Carihuairazo. La pérdida del 50% de la masa glaciaria desde 1980 explica la formación acelerada de nuevos cuerpos lacustres a altitudes entre 4.500 y 5.000 m s.n.m., aumentando la exposición de infraestructuras hídricas y de generación eléctrica en cuencas como la del río Guayllabamba (Lützow et al., 2023). En Bolivia, los eventos más significativos, como el del lago Keara en 2009, se vinculan con morrenas degradadas en la Cordillera Real, donde la combinación de altas pendientes y la falta de monitoreo sistemático limita la anticipación de riesgos (Kougkoulos et al., 2018). La evidencia apunta a que, pese a su baja frecuencia, el potencial de impacto social es elevado, dado que las cuencas bolivianas abastecen a poblaciones rurales dispersas y a sistemas urbanos como La Paz–El Alto, donde un evento de magnitud moderada podría afectar a los servicios básicos y al transporte (Mapa 3).

MAPA 3

Localización del municipio de Malla respecto a la laguna Chatamarka, en la Cordillera Real, Bolivia



Fuente: Elaboración propia por Alonso Brenes a partir de imágenes Landsat (USGS/NASA) y Copernicus Sentinel (European Union), visualizadas mediante Google Earth, 2026.

Perú tiene una importancia particular en la región, ya que cuenta con más del 70% de los GLOF tropicales, con una marcada concentración en la Cordillera Blanca y en la cuenca del río Santa (Emmer et al., 2022). Desde mediados del siglo XX, los eventos de Huaraz (1941), Safuna Alta (2003) y Lago 513–Carhuaz (2010) han situado a Perú como uno de los puntos de interés a nivel global para el estudio de los GLOF. La formación acelerada de lagunas morrénicas refleja la rápida deglaciación y el ascenso térmico sostenido en altitudes superiores a los 4.000 metros (Taylor et al., 2023). Las trayectorias de riesgo muestran un desplazamiento hacia nuevas lagunas recientemente formadas, muchas de ellas aún sin monitoreo instrumental, lo que genera un panorama de incertidumbre y vulnerabilidad latentes. Pese a los avances institucionales del Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y de proyectos piloto en Carhuaz y Palcacocha, los sistemas de alerta temprana cubren actualmente menos del 10% de las lagunas consideradas críticas.

En comparación con el noroeste norteamericano, donde existen series continuas desde 1950, los Andes presentan una cobertura instrumental inferior al 10% de sus lagunas glaciares activas (Emmer et al., 2022). Este déficit genera un subregistro sistemático, ya que los vaciamientos menores o remotos no se documentan y la información se concentra en eventos catastróficos. Esto es problemático porque sesga el peso que el efecto acumulado de los pequeños eventos puede tener sobre descargas más fuertes, y porque, además, podría afianzar una falsa sensación de seguridad entre los asentamientos humanos potencialmente expuestos. Según Emmer et al. (2022), la densidad de investigación sobre GLOF andinos es cinco veces menor que en el Himalaya o Alaska, lo que dificulta la caracterización de tendencias regionales comparables. Los sistemas de alerta temprana (SAT) y los drenajes de contención cubren solo una fracción de las cuencas en riesgo. En consecuencia, la magnitud real del peligro podría estar subestimada, tanto en frecuencia como en extensión territorial, lo que requiere que se fortalezcan las capacidades técnicas, el monitoreo interinstitucional y la cooperación regional (Lützow et al., 2023).

Los eventos GLOF registrados en Suramérica desde 1970 (Cuadro 1) sugieren una vulnerabilidad sistémica frente a peligros glaciares de alta energía, con impactos que trascienden el daño local inmediato y comprometen la funcionalidad territorial a distintas escalas. Episodios de letalidad extrema, como los asociados al Nevado Huascarán, en Perú, en 1970 y al Nevado del Ruiz, en Colombia, en 1985, representan el umbral superior de consecuencias humanas observadas en la región y reflejan la convergencia entre detonantes físicos excepcionales y configuraciones territoriales altamente expuestas (UNISDR, 2015). Un rasgo recurrente es la destrucción de infraestructura crítica: aluviones vinculados a la laguna 513, en 2010, y a Chuspicocha, en 1990, ambas en Perú, inhabilitaron sistemas de abastecimiento de agua y riego, amplificando los efectos económicos aguas abajo (Carey et al., 2012; Somos-Valenzuela et al., 2016). Casos como el de Keara, en 2009, y el de Upiscocha, en 2022, mostraron cómo la pérdida de activos productivos

y el aislamiento prolongado alteran los medios de vida durante meses (Drenkhan et al., 2019). Desde una perspectiva procesual, estos desastres operan como cadenas de peligros disparadas por avalanchas mixtas o interacciones volcánicas, con alcances superiores a los 100 kilómetros y tiempos de propagación de minutos (Emmer y Cochachin, 2013; IPCC, 2019). La recurrencia de vaciamientos en sistemas como el Cachet II confirma que estas configuraciones no son anomalías aisladas, sino estados inestables bajo las actuales condiciones climáticas (Emmer et al., 2022).

CUADRO 1

Principales GLOF registrados en los Andes

Evento / año / país	Localidad	Descripción del evento
Laguna Chuspicocha (1990), Perú	Nevado Huaytapallana, Huancayo (Junín)	Una avalancha de hielo y roca cayó sobre la laguna, generando un desembalse súbito. El aluvión causó la muerte de cuatro personas y afectó el suministro de agua potable en la zona. Además, se registraron pérdidas agrícolas significativas que perjudicaron a los productores locales.
Laguna Artizón Bajo (1997), Perú	Cordillera Blanca, Santa Cruz (Áncash)	Ruptura del dique morrénico frontal de la laguna. Este evento forma parte de los registros históricos de peligros en Áncash asociados a la inestabilidad de las presas naturales frente al retroceso glaciar continuo.
Nevado Salkantay (1998), Perú	Santa Teresa, La Convención (Cusco)	Desprendimiento de una masa de hielo y roca que generó un aluvión masivo en el valle con gran poder destructivo. El flujo destruyó totalmente Santa Teresa la Antigua, dejando un saldo de 100 desaparecidos, 1.000 damnificados y la destrucción de alrededor de 100 viviendas.
Volcán El Altar / Laguna Amarilla (2000), Ecuador	Cañón de los ríos Blanco y Pastaza (Chimborazo)	Colapso de una pared del pico Monja Grande que impactó en la Laguna Amarilla, desplazando hasta 3 millones de m ³ de agua. La ola de 50 metros recorrió 100 km, dejando 13 fallecidos y destruyendo 30 casas. El flujo de lodo fue tan potente que erosionó laderas hasta los 40 metros de altura.
Laguna Mullaca (2001), Perú	Glaciar Wallunaraju Sur, Cordillera Blanca (Áncash)	Desborde violento de la laguna provocado por una avalancha de hielo proveniente del glaciar Wallunaraju Sur. Este evento es un ejemplo de la fuerte dinámica de peligros que caracteriza a los Andes centrales peruanos, donde los desprendimientos de glaciares colgados impactan directamente en los vasos lagunares en expansión.
Laguna Safuna Alta (2002), Perú	Cordillera Blanca, Huaylas (Áncash)	Avalancha masiva de roca y escombros que impactó en la laguna, que contenía 14 millones de m ³ de agua. El choque generó un oleaje extremo de 70 metros de altura. A pesar de la magnitud del impacto, la infraestructura de drenaje previa ayudó a mitigar daños mayores.
Laguna Palcacocha (2003), Perú	Quebrada Cojup, Huaraz (Áncash)	Derrumbe de la morrena lateral izquierda hacia la laguna. Aunque no generó un aluvión de gran alcance, provocó el desabastecimiento de agua potable en la ciudad de Huaraz durante cuatro días.

Evento / año / país	Localidad	Descripción del evento
Laguna Matara (2006), Perú	Huari, Cordillera Blanca (Áncash)	Desborde de la laguna debido al colapso de su represa artificial, terminada ese mismo año. Este incidente puso en duda la eficacia de algunas intervenciones de ingeniería y subrayó la necesidad de un monitoreo técnico constante sobre las obras de seguridad situadas en entornos glaciares activos.
Glaciar #13 (2006), Ecuador	Volcán Chimborazo (Chimborazo)	GLOF repentino de pequeña magnitud originado en una laguna formada sobre el glaciar número 13. El evento es relevante por ser uno de los pocos casos registrados en glaciares ecuatorianos en proceso de extinción, demostrando que incluso cuerpos de agua menores representan riesgos para las zonas de montaña.
Lago Cachet II (2008-2015), Chile	Glaciar Colonia, Aysén (Patagonia)	Este lago, represado por el hielo, ha experimentado 14 vaciamientos repentinos en siete años. La dinámica se debe a la falla del dique de hielo del glaciar Colonia ante la presión hidrostática.
Ventisquero Negro (2009), Argentina	Río Manso, Bariloche (Patagonia)	Un GLOF masivo liberó aproximadamente 10 millones de m ³ de agua tras la ruptura de un dique morrénico. El evento fue provocado por lluvias intensas que erosionaron el dique. El flujo de sedimentos afectó la transparencia del Lago Mascaradi y alteró significativamente la morfología del cauce del río Manso aguas abajo.
Keara (2009), Bolivia	Cordillera Apolobamba, Valle Pelechuco (La Paz)	Ruptura de un dique de hielo que provocó una inundación. El aluvión destruyó cultivos de papa y maíz, mató ganado y destruyó caminos, dejando al poblado de Keara aislado por meses. Es el evento GLOF mejor documentado en Bolivia.
Laguna 513 (2010), Perú	Nevado Hualcán, Carhuaz (Áncash)	Una avalancha de hielo impactó la laguna, generando olas de 28 metros que sobrepasaron el dique. El aluvión resultante destruyó hogares, puentes y la planta de agua local. Las obras de seguridad previas evitaron una tragedia mayor, pero el evento dejó a la ciudad de Carhuaz sin agua potable durante días.
Laguna Riticocha (2010), Perú	Nevado Chicón, Urubamba (Cusco)	Una avalancha del nevado Chicón cayó sobre la laguna, provocando un desembalse violento. El aluvión de lodo y detritos recorrió la quebrada e inundó diversas zonas urbanas de la ciudad de Urubamba.
Lagunas Artizón (2012), Perú	Quebrada Santa Cruz, Huaylas (Áncash)	Un deslizamiento sobre la laguna Artizón Alto causó la ruptura en cadena del dique de la laguna Artizón Bajo, impactando en la laguna Hatuncocha.
Laguna Hualcacocha (2015), Perú	Nevado Chequiaraju, Carhuaz (Áncash)	Avalancha de hielo y roca que impactó el vaso lagunar. El desborde violento resultante es característico de las lagunas proglaciares situadas bajo paredes empinadas.
Laguna Salkantaycocha (2020), Perú	Nevado Salkantay, Santa Teresa (Cusco)	Un desprendimiento masivo de roca y hielo generó un aluvión que recorrió el valle en tres minutos. El desastre causó muertes, desapariciones y la destrucción de infraestructura en el distrito de Santa Teresa.
Laguna Upiscocha (2022), Perú	Nevado Ausangate, Quispicanchi (Cusco)	Dos desbordes fueron provocados por la caída de bloques de roca desde taludes inestables. Los aluviones dañaron viviendas, puentes peatonales y bocatomas de riego, afectando los medios de vida de las comunidades locales. Actualmente, Upiscocha presenta el nivel más alto de susceptibilidad de desborde en Perú.

2.4 Grados de peligrosidad de las lagunas

La determinación de si una laguna glaciar puede considerarse peligrosa frente a un posible GLOF se basa en una evaluación integrada de criterios físicos, geomorfológicos e hidrometeorológicos, tal como proponen las directrices de GAPHAZ (Glacier and Permafrost Hazards in Mountains) y la literatura científica reciente aplicada en los Andes, el Himalaya y otras regiones de montaña (Richardson y Reynolds, 2000; Clague y Evans, 2000; Carrivick y Tweed, 2016; Emmer et al., 2016). Estos criterios se refuerzan mutuamente y permiten estimar tanto la susceptibilidad de la laguna a fallar como la magnitud potencial del evento en caso de colapso. En términos operativos, suelen agruparse en tres grandes dimensiones: las características de la presa y del lago, el entorno geomorfológico y los posibles detonantes externos, y los factores hidrológicos y de cuenca que controlan la rapidez con la que el sistema puede alcanzar condiciones críticas.

2.4.1 Rasgos de la presa y del lago

Las características de la presa y del lago constituyen el núcleo de la evaluación de peligrosidad. El tipo de represa es un factor determinante: las lagunas represadas por morrenas son generalmente más susceptibles a fallar que aquellas contenidas por roca madre, debido a su baja cohesión y alta permeabilidad (Clague y Evans, 2000; Carrivick y Tweed, 2016). La geometría de la presa, en particular el borde libre y la pendiente exterior de la morrena, es igual de crítica. Un borde libre reducido facilita que una ola de desplazamiento generada dentro del lago sobrepase la presa, mientras que pendientes externas muy pronunciadas y estrechas indican una menor estabilidad estructural (Richardson y Reynolds, 2000). A ello se suman el volumen y el área del lago, que controlan la energía potencial disponible: los lagos grandes y profundos tienen una mayor capacidad de generar picos de caudal destructivos, y por ello se utilizan umbrales de área (por ejemplo, del orden de $>0,03 \text{ km}^2$) como criterios preliminares de filtrado de lagos potencialmente peligrosos (Huggel et al., 2004; Emmer et al., 2016). Por último, la integridad estructural de la presa, evaluada a través de evidencias de filtraciones o procesos de tubificación (*piping*), es un indicador clave de inestabilidad progresiva que puede culminar en un colapso súbito (Clague y Evans, 2000).

2.4.2 Entorno geomorfológico y detonantes externos

En segundo lugar, el entorno geomorfológico circundante y los detonantes externos desempeñan un papel central, dado que la mayoría de los GLOF no se producen por un colapso espontáneo de la presa, sino por perturbaciones externas que generan olas de desplazamiento dentro del lago (Emmer et al., 2022). Entre estos factores destaca el potencial de movimientos de masa, evaluado a partir de la proximidad del lago a laderas empinadas (típicamente $\geq 30^\circ$) o a paredes rocosas y

glaciares colgantes inestables. Las avalanchas de hielo o de roca que impactan el espejo de agua pueden generar olas capaces de sobrepasar incluso presas relativamente altas (Richardson y Reynolds, 2000; Carrivick y Tweed, 2016). De manera similar, la interacción directa entre el lago y el glaciar es un criterio crítico. Por ejemplo, en lagos proglaciares, el calving del frente glaciar — el proceso por el que se desprenden bloques de hielo— puede producir perturbaciones súbitas. En este caso, la anchura y la altura del frente del desprendimiento son indicadores relevantes de susceptibilidad (Emmer et al., 2016). Otro factor emergente es la degradación del permafrost, que puede desestabilizar tanto las laderas circundantes como la propia morrena, favoreciendo deslizamientos hacia el lago o asentamientos diferenciales de la presa (Allen et al., 2017). La presencia de lagos aguas arriba también introduce el riesgo de efectos en cascada, en los que el desborde de un lago superior desencadena el colapso de uno inferior, amplificando la magnitud del evento de forma significativa (Emmer et al., 2016).

2.4.3 Factores hidrológicos

Otro conjunto de criterios se relaciona con los factores hidrológicos y de la cuenca, que determinan la rapidez con la que el lago puede llenarse y alcanzar condiciones de desbordamiento. La extensión y la pendiente de la cuenca de aporte condicionan la velocidad de concentración de escorrentía, de modo que cuencas grandes y empinadas pueden transferir rápidamente agua de lluvia o deshielo hacia la laguna, incrementando de forma abrupta la presión hidrostática sobre la presa (Carrivick y Tweed, 2016). En cuencas donde el componente glaciar se ha reducido significativamente, la respuesta hidrológica a lluvias intensas tiende a ser más rápida, al desaparecer el efecto amortiguador del hielo, lo que facilita episodios de llenado acelerado y desbordamiento, como se ha documentado en eventos emblemáticos del Himalaya (Richardson y Reynolds, 2000).

La medición y el monitoreo de estos criterios combinan cada vez más el uso de sensores remotos y el trabajo de campo. Las imágenes satelitales ópticas de alta resolución (como las de Landsat, Sentinel, SPOT o Planet) permiten medir el área del lago, analizar su crecimiento temporal, mapear el tipo de presa y detectar cambios en la cobertura de nieve y hielo (Shugar et al., 2020; Emmer et al., 2016). Los modelos digitales de elevación (DEM), derivados de misiones como SRTM o ASTER, se utilizan para calcular las pendientes de la cuenca, alturas de las presas y posibles trayectorias de inundación. Cuando es posible, los levantamientos batimétricos proporcionan estimaciones directas del volumen del lago. En su ausencia, se emplean relaciones empíricas entre el área y la profundidad, basadas en estudios comparativos (Huggel et al., 2004). Por último, en lagunas de alta peligrosidad, se recomienda instalar SAT que integren estaciones meteorológicas, sensores de nivel y caudal, cámaras y geófonos para un seguimiento en tiempo real de variables críticas y la emisión de alertas oportunas para la reducción del riesgo (Carrivick y Tweed, 2016).

La dinámica de las lagunas glaciares en la cordillera de los Andes atraviesa una fase de transformación estructural crítica, caracterizada por una desglaciación acelerada. En los Andes del Sur y la Patagonia, se registra un incremento del 43% en el número de lagunas entre 1986 y 2016, lo que representa un aumento volumétrico masivo de aproximadamente 65 km³ (Wilson et al., 2018; Shugar et al., 2020). Esta tendencia también se aprecia en los Andes Tropicales. Perú ha registrado una pérdida de su cobertura glaciaria desde 1962 que ha dejado una red de más de 8.400 lagunas (INAIGEM, 2018; INAIGEM, 2024). Este cambio sistémico, en el que el retroceso de los frentes de hielo expone depresiones sobreprofundizadas, altera significativamente la capacidad de almacenamiento hídrico y el paisaje físico de la cordillera (Drenkhan et al., 2019).

Más allá de la expansión superficial, estas lagunas pasan por procesos geofísicos complejos que modifican su forma, volumen y patrones de drenaje. La transición de glaciares terrestres a proglaciares activa mecanismos de retroalimentación como el calvamiento, que acelera drásticamente la pérdida de masa glaciaria (Wilson et al., 2018; Shugar et al., 2020). La laguna Palcacocha, en Perú, ha multiplicado su volumen 34 veces desde 1974 y actualmente alberga más de 17 millones de m³, lo que plantea un riesgo severo de GLOF para la infraestructura urbana (INAIGEM, 2018; Shugar et al., 2020). De forma simultánea, emergen dinámicas diferenciadas de filtrado y vaciamiento; mientras que los embalses represados por hielo, como el lago Cachet II en Chile, han sufrido 14 drenajes repentinos desde 2008, en regiones del norte como Ecuador, la extinción de glaciares como el Carihuairazo transforma sistemas estables en cuencas efímeras (Wilson et al., 2018; Schoolmeester et al., 2018).



**Desbordes súbitos de lagunas
glaciares en los Andes:
desafíos contemporáneos para
territorios de alta montaña**

3

La construcción del riesgo asociado a GLOF en los Andes



El riesgo asociado a GLOF es el resultado de trayectorias territoriales que han configurado, en el caso de muchos valles andinos, combinaciones específicas de exposición, vulnerabilidad y capacidad de respuesta. La evidencia comparada sugiere que, incluso bajo condiciones físicas relativamente similares, los impactos potenciales de un GLOF varían de manera significativa en función de cómo se han organizado históricamente los asentamientos, la infraestructura y los sistemas productivos aguas abajo. Esta sección ofrece una lectura comparada que combina la evidencia global desde mediados de la década de 1980 con un análisis de los Andes y sus dinámicas de riesgo particulares. La literatura posterior a eventos como el de Dig Tsho o el Imja permite identificar regularidades en los mecanismos de desestabilización, la propagación de flujos y los límites de la intervención estructural. Sin embargo, su traducción directa a los Andes resulta insuficiente si no se consideran particularidades geomorfológicas, sociales e institucionales de la región. En los Andes tropicales, por ejemplo, la combinación de pendientes abruptas, valles estrechos y alta densidad de activos aguas abajo genera configuraciones de riesgo que difieren sustantivamente de las observadas en cordilleras con mayor espacio de disipación o menor presión demográfica.

Las lagunas analizadas se consideran peligrosas, según un consenso evidente entre distintas fuentes. Esto implica el reconocimiento del potencial carácter repentino del fenómeno y que, una vez liberada la masa de agua, la capacidad de los sistemas expuestos para “negociar” con la energía del flujo es prácticamente nula. En la ruta principal del aluvión, los márgenes de tolerancia estructural y social son extremadamente bajos, lo que convierte la exposición en un factor determinante del daño potencial (Stuart-Smith et al., 2021; Portocarrero, 2014). Bajo este enfoque, la gestión del riesgo se orienta a comprender por qué existen personas, infraestructuras y actividades localizadas en espacios en los que el impacto sería total. Esto permite analizar el riesgo GLOF no como un problema de predicción, sino como un problema de organización territorial.

Desde esta lógica, el aumento y la consolidación de la exposición se ven como el eje dominante del riesgo asociado a GLOF en los Andes, no porque otros componentes sean irrelevantes, sino porque, en escenarios de alta energía, su peso relativo supera al de variables como la resistencia constructiva o la capacidad de respuesta inmediata. En los casos documentados en la Cordillera Blanca y en el macizo de El Altar, se observa que la localización de asentamientos y de infraestructura crítica en corredores de flujo condiciona la magnitud de los impactos, más allá de variaciones moderadas en el volumen liberado o en el detonante. La evidencia sugiere que, una vez superados ciertos umbrales de velocidad y carga sólida, las diferencias en materiales constructivos o en obras de protección local tienen un efecto marginal en la reducción del daño (Mergili et al., 2021). En este contexto, analizar cómo se ha configurado la exposición —y por qué persiste o se incrementa— resulta más útil que profundizar en la caracterización física de eventos cuya peligrosidad ya ha sido demostrada.

El análisis desarrollado en esta sección se organiza en torno a dos grandes escenarios territoriales que se repiten a lo largo de la cordillera. El primero corresponde a asentamientos cuya fundación se realizó desde un inicio en zonas de alta exposición, generalmente asociadas a lógicas coloniales, extractivas o administrativas que privilegiaron el control del valle y el acceso a recursos estratégicos. El segundo escenario remite a procesos más graduales, en los que la exposición se ha construido o intensificado con el tiempo, ya sea por la densificación urbana, la expansión de actividades económicas o el desplazamiento progresivo de sistemas hacia áreas originalmente no ocupadas, o porque cambios en la laguna cercana amplificarían el alcance de un desbordamiento, impactando zonas que antes se consideraban seguras en los análisis técnicos. Estos escenarios no son excluyentes y, en muchos casos, coexisten en un mismo territorio, generando capas superpuestas de riesgo.

Con el fin de ilustrar estos procesos sin recurrir a un inventario exhaustivo de casos, esta sección examina evidencia de Bolivia, Ecuador y Perú, países que, pese a compartir rasgos fisiográficos generales, presentan diferencias relevantes en términos de institucionalidad, densidad poblacional y estrategias de gestión del riesgo. Esta selección busca observar cómo detonantes parecidos producen resultados distintos en contextos comparables. Los casos considerados permiten contrastar situaciones en las que la exposición histórica ha sido reforzada por procesos recientes de urbanización, con otras donde la presión sobre el territorio proviene de actividades rurales o de infraestructura lineal.

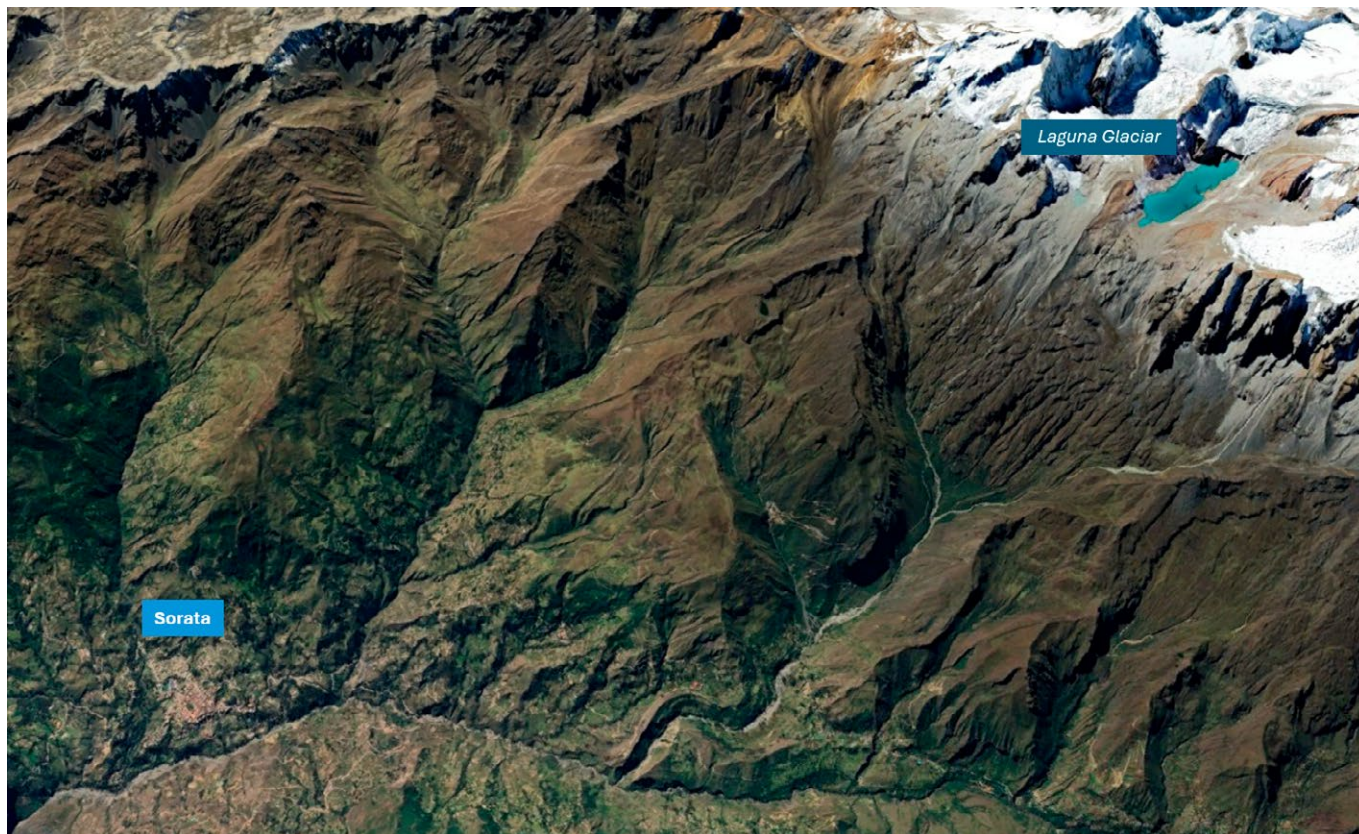
3.1 Emplazamientos de alta exposición

La localización actual de muchos asentamientos expuestos a GLOF en los Andes responde a una ruptura histórica profunda entre los patrones de ocupación prehispánicos y las lógicas instaladas después de la conquista. Las sociedades andinas tendieron a emplazarse en posiciones elevadas, fuera de los fondos de valle y de los abanicos aluviales activos, privilegiando el control visual, la defensa y la reducción del riesgo asociado a flujos súbitos (Oliver-Smith, 1999). La colonización española revirtió este patrón al priorizar la fundación de ciudades en valles estrechos y corredores fluviales, en los que convergían rutas comerciales, tierras fértiles y acceso directo al agua, aun cuando esos espacios coincidían con rutas naturales de aluviones y desbordes (Carey, 2010). Este cambio no fue marginal: en el caso de Huaraz, los registros históricos indican que el núcleo urbano colonial se consolidó sobre terrazas aluviales activas del río Quillcay, un espacio que ya había registrado depósitos torrenciales previos.

En Bolivia, la minería y el control territorial reforzaron la ocupación temprana de valles de alta exposición. Localidades como Sorata y Pelechuco fueron consolidadas desde el siglo XVI como enclaves estratégicos para la explotación aurífera y la articulación entre el Altiplano y la Amazonía, lo que implicó que se formaran asentamientos permanentes en valles encajonados aguas abajo de sistemas lacustres glaciares (Carey, 2010). Ambos centros urbanos mantienen hoy infraestructuras críticas como puentes, plazas y edificios administrativos, situadas a menos de 200 metros del cauce principal, con tiempos de llegada del flujo inferiores a 15 minutos en caso de ruptura súbita (Mapa 4). Esta localización obedeció a la cercanía al agua, a la energía hidráulica y a las rutas comerciales, cuyo aprovechamiento inmediato se privilegia sobre cualquier consideración de seguridad geomorfológica. La persistencia y el peso de estas funciones económicas asociadas a estos lugares explican por qué, incluso tras eventos destructivos como los documentados en la región de Apolobamba, no se plantea una relocalización urbana.

MAPA 4

Localización del asentamiento de Sorata respecto a la Laguna Glaciar en Bolivia



Fuente: Elaboración propia por Alonso Brenes a partir de imágenes Copernicus Sentinel (European Union), visualizadas mediante Google Earth, 2026.

El sistema de haciendas consolidó la ocupación de zonas expuestas de la alta montaña andina al concentrar población y actividades productivas vinculadas a la ganadería y la agricultura de altura. La localidad de Tres Ríos (Arkhata) se originó como un conjunto de unidades de trabajo ligadas a grandes propiedades rurales ubicadas estratégicamente cerca de fuentes de agua glaciar. La Reforma Agraria de 1953 transformó estas haciendas en comunidades campesinas, otorgando títulos colectivos en los mismos emplazamientos, lo que institucionalizó la permanencia en zonas de alta exposición. Datos censales y registros territoriales muestran que más del 70% de los hogares en estas comunidades mantienen su base productiva en bofedales —humedales de alta montaña característicos de los Andes— y pastizales localizados en fondos de valle, que coinciden con rutas potenciales de flujo. Esta fijación territorial redujo drásticamente las opciones de movilidad futura, ya que la propiedad de la tierra quedó ligada a espacios físicamente inseguros, pero económicamente indispensables para estas familias. El resultado es una exposición estructural que no puede interpretarse como una elección individual reciente, sino como el producto de reformas institucionales que consolidaron trayectorias territoriales difíciles de revertir a corto plazo.

La acción estatal de los años 50 desempeñó un rol clave en la consolidación temprana de estos emplazamientos, reforzando su permanencia y densificación. La designación de cabeceras municipales y la instalación de escuelas, puestos de salud y redes básicas de infraestructura suelen ser prácticas que consolidan asentamientos en zonas ya expuestas a amenazas de origen glaciar. En los casos de Bolivia analizados, los registros administrativos muestran que Sorata y Pelechuco fueron reconocidos tempranamente como centros de servicios regionales, atrayendo población adicional y capital público hacia áreas de alto riesgo. En Perú, procesos similares se observan en Huaraz, donde las reconstrucciones posteriores a 1941 y 1970 mantuvieron el núcleo urbano en el mismo cono aluvial, acompañado de inversiones estatales en vialidad y saneamiento. Estas decisiones generaron una validación implícita del riesgo, al transmitir a la población la señal de que el Estado consideraba aceptable la ocupación de esos espacios.

Desde una perspectiva histórica, muchas de estas decisiones territoriales fueron racionales dada la información disponible en su momento. Antes del desarrollo de la glaciología moderna, las lagunas proglaciares eran percibidas principalmente como reservas de agua y no como fuentes de peligro catastrófico. Carey (2010) documenta que, hasta bien entrado el siglo XX, incluso después de eventos destructivos, el conocimiento técnico sobre los mecanismos de ruptura de morrenas era limitado y estaba fragmentado. En ese contexto, asentarse en fondos de valle ofrecía ventajas muy claras, climas más benignos, suelos fértiles y conectividad. La ausencia de registros sistemáticos de eventos pasados —las llamadas “rupturas invisibles”— reforzó la percepción de seguridad relativa. Este vacío de información ayuda a explicar por qué la exposición se consolidó sin una percepción explícita de riesgo, y por qué la memoria social de eventos extremos tendió a disiparse con el tiempo (Oliver-Smith, 1999; Carey, 2010).

3.1.1 Lógicas económicas, rol del Estado y aceptación implícita del riesgo

En las localidades altoandinas expuestas a GLOF, el agua de origen glaciar no constituye solo un recurso productivo, sino la condición material mínima de existencia territorial. Los datos consolidados de los estudios de caso para Upis (Cusco) y Arkhata (Palca) muestran que más del 85% de los hogares dependen directamente de bofedales alimentados por escorrentía glaciar para sostener sus medios de vida primarios, principalmente, ganadería de camélidos y, en menor medida, cultivos de tubérculos de altura (Drenkhan et al., 2023; INAIGEM, 2024). En ambos casos, la infraestructura de captación y conducción de agua se localiza sistemáticamente en fondos de valle que coinciden con rutas potenciales de flujo. Desde una perspectiva económica básica, la permanencia en zonas de alto riesgo no responde a una subestimación del peligro, sino a una evaluación implícita en la que la pérdida inmediata del sustento se percibe como más cierta que la probabilidad de que ocurra un GLOF.

La rigidez de los medios de vida de estas zonas refuerza esta aceptación implícita del riesgo. En los casos rurales, el capital económico dominante adopta la forma de “riqueza viva”: rebaños de alpacas, llamas o ganado vacuno cuya viabilidad depende de pastizales húmedos localizados en áreas específicas del territorio. Los registros productivos muestran que, en comunidades como Tres Ríos y Pelechuco, entre el 70% y el 90% del valor patrimonial familiar está concentrado en el ganado y las tierras de pastoreo situadas en zonas potencialmente inundables. A diferencia de los activos financieros o industriales, este capital no es fácilmente trasladable sin incurrir en pérdidas sustanciales y permanentes. Un GLOF no solo elimina los animales, sino que también sepulta los bofedales bajo sedimentos estériles, interrumpiendo la base productiva durante años (INAIGEM, 2024). Esta coyuntura empuja a que muchas familias, aun reconociendo el peligro, opten por permanecer, porque la reubicación preventiva no ofrece un camino viable para reproducir sus medios de vida en otro lugar. Así, la vulnerabilidad se expresa tanto en la exposición inicial como en la imposibilidad de transformar sus medios de vida sin apoyo externo masivo y sostenido (Oliver-Smith, 1999).

Las reformas agrarias y la formalización o promesa de derechos de tenencia han operado como un elemento fijador del riesgo en varias cuencas glaciares andinas: cuando el Estado transforma relaciones de hacienda/colonato en comunidades con derechos reconocidos, también consolida la permanencia de la población y los activos en territorios que funcionan como corredores naturales de flujo de detritos. En el subconjunto boliviano de asentamientos expuestos sistematizado, cinco de los siete registros vinculan explícitamente el origen o consolidación del asentamiento con la Reforma Agraria de 1953 o con procesos inmediatamente derivados de ella, lo que muestra que

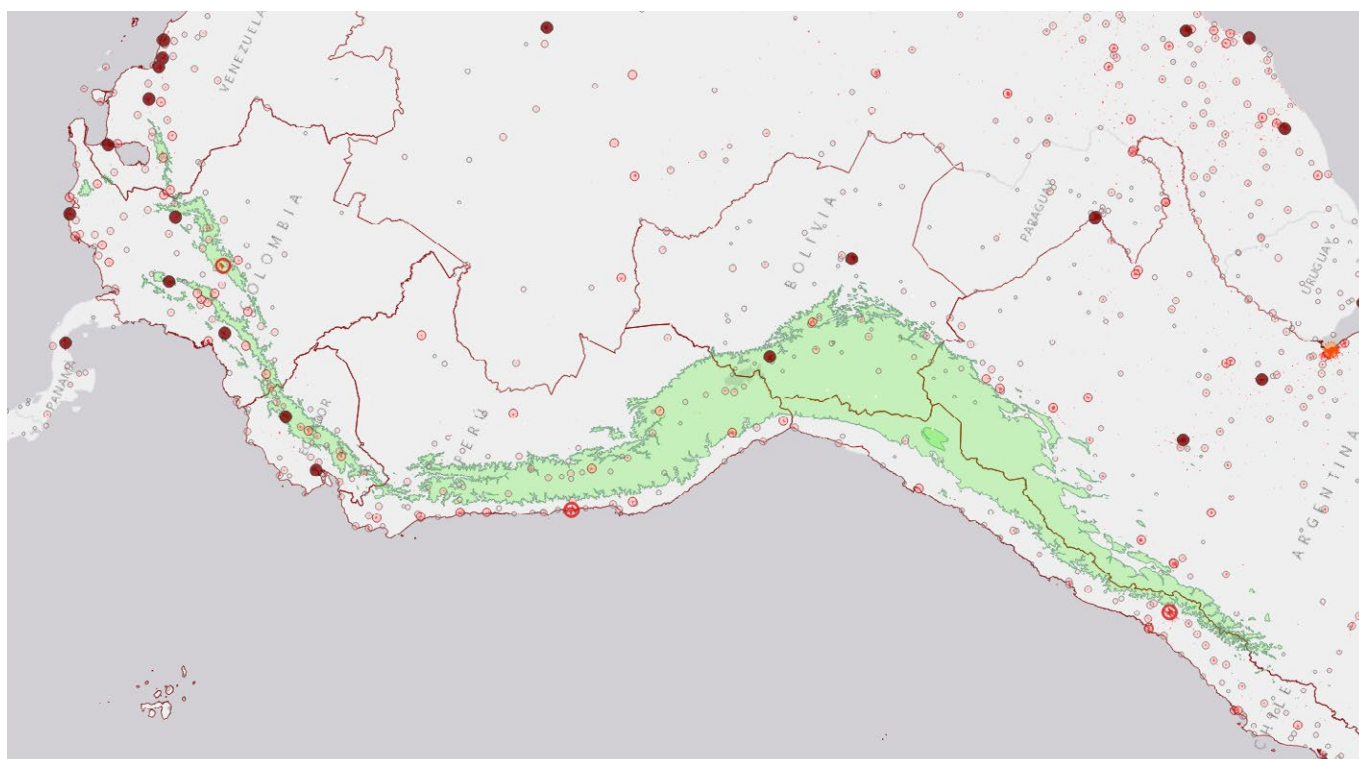
el derecho a la tierra no tomó en cuenta la geodinámica de los valles. En contextos en los que el acceso a la tierra ha sido un desafío histórico, la reubicación se vuelve un problema de derechos adquiridos, expectativas de compensación y legitimidad estatal más que una *decisión técnica*.

En contextos semiurbanos y urbanos, la aceptación del riesgo se articula con procesos de integración a mercados y corredores de transporte. Los casos de Mocha (Ecuador) y Huaraz (Perú) muestran que la proximidad a ejes viales estratégicos —como la Panamericana o los corredores interandinos de Ancash— ha sido un factor decisivo en la consolidación de asentamientos en zonas expuestas. En Mocha, más del 60% de las actividades agrocomerciales dependen del acceso inmediato a la red vial para abastecer mercados regionales, lo que ha incentivado la expansión de infraestructura y vivienda en planicies aluviales asociadas a sistemas glaciares del Carihuairazo (Carey, 2010; Somos-Valenzuela et al., 2016). En Huaraz, las estadísticas urbanas muestran que el crecimiento poblacional posterior a 1970 se concentró en áreas con mayor accesibilidad a servicios, empleo y comercio, muchas de ellas ubicadas en la ruta histórica del río Quillcay. Esta localización ofrece ventajas económicas, mientras que la reubicación en zonas altas y seguras implica mayores costos de transporte, menor acceso a mercados y pérdida de centralidad funcional. El resultado es una tolerancia social al riesgo que se sostiene en beneficios económicos cotidianos, aun cuando los escenarios de impacto extremo puedan ser ampliamente conocidos (Carey, 2010; Taylor et al., 2023).

La subregión andina transitó de una estructura mayoritariamente rural a una configuración urbana en la que cerca del 79% de la población reside en ciudades, impulsada por la migración interna asociada a brechas socioeconómicas y a la concentración de servicios, empleo y funciones administrativas (Schoolmeester et al., 2018; IPCC, 2019). Los Andes figuran entre las regiones montañosas más urbanizadas del mundo, con una consolidación de metrópolis y ciudades intermedias por encima de los 2.500 m s. n. m. (Mapa 5) (Vuille, 2013; IPCC, 2019). Con frecuencia, el crecimiento ocurre sin planificación técnica suficiente, con alta informalidad y con una expansión sobre laderas inestables y cauces de inundación (Banco Mundial, 2014; IPCC, 2019). Esta urbanización intensifica la presión sobre ecosistemas reguladores como páramos y cabeceras glaciares debido a la deforestación, la impermeabilización y la alteración de ciclos hídricos (Schoolmeester et al., 2018; Fadrique et al., 2018). En consecuencia, se multiplica la exposición a amenazas hidrogeomorfológicas y a impactos asociados a la dinámica de la criósfera.

MAPA 5

Distribución de las aglomeraciones urbanas en la cordillera de los Andes



Fuente: Elaboración propia a partir de GHS Urban Centre Database (2025).

La organización histórica del territorio andino se basó en una lógica de eficiencia distribuida, en la que los sistemas agroecológicos verticales articulaban pisos ecológicos complementarios. En contraste, los modelos contemporáneos de urbanización han consolidado una eficiencia concentrada, caracterizada por la especialización funcional de las ciudades y la desconexión de los sistemas rurales circundantes (Oliver-Smith, 1999). Este cambio ha incrementado la productividad agregada, pero ha reducido la coherencia ecológica del territorio, generando vulnerabilidades estructurales frente al calentamiento global, la desigualdad fiscal y la distribución de servicios (Drenkhan et al., 2019; Carey, 2010). Así, los Andes presentan hoy un patrón territorial de alto rendimiento parcial y baja eficiencia sistémica, en el que la concentración de inversión e infraestructura en zonas urbanas coexiste con amplias brechas de desempeño ambiental, social y logístico, reflejadas en costos diferenciales de energía, agua y transporte, entre otros (IPCC, 2019).

A su vez, la infraestructura pública opera como anclaje porque convierte el riesgo en un problema de continuidad de servicios: carreteras, puentes, captaciones, redes y equipamientos no solo están expuestos, sino que organizan la vida regional. Cuando esos sistemas quedan en la posible

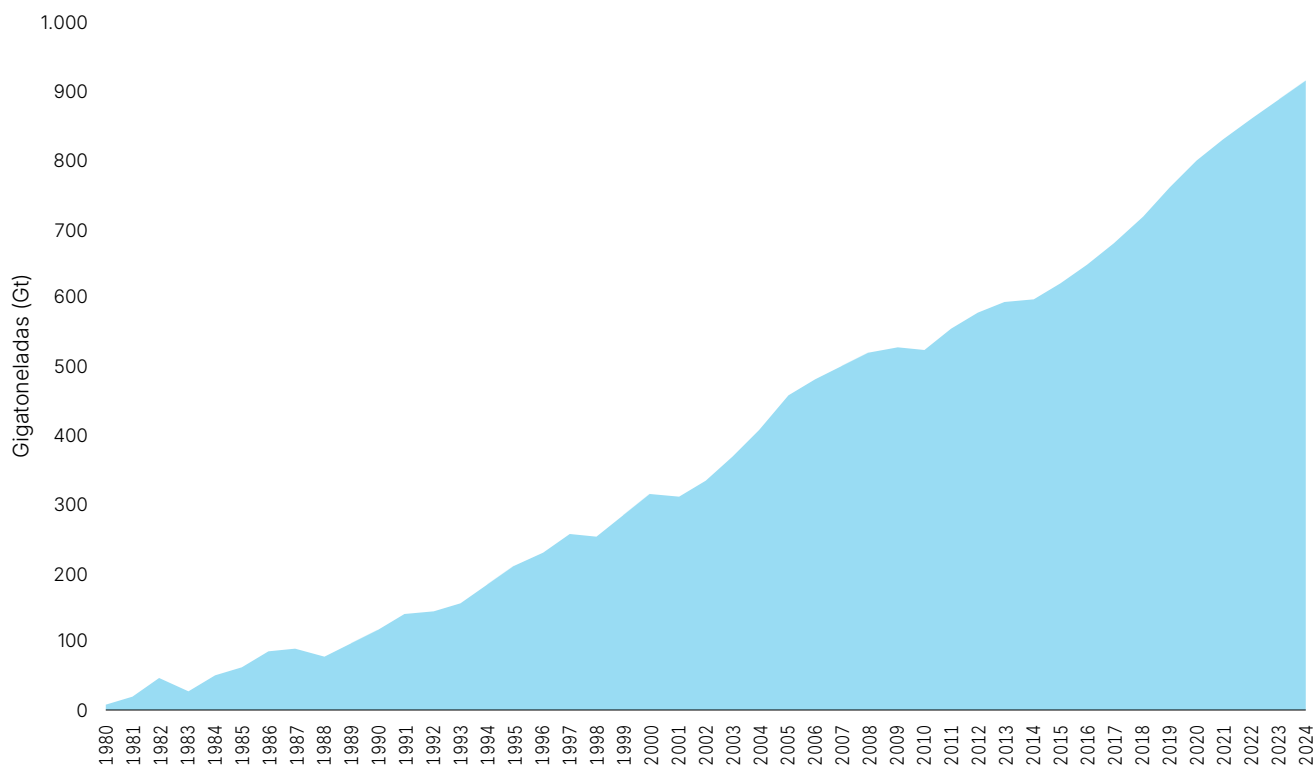
trayectoria del flujo, el debate desde los procesos de administración de infraestructura pública debe considerar cómo se sostendría el territorio si esa infraestructura llegara a fallar. Esa transición prioriza soluciones de ingeniería y monitoreo como sustitutos de decisiones territoriales más disruptivas, aun cuando la evidencia comparada subraya que, en amenazas de dinámica rápida, la ventana operativa para reaccionar es mínima y el fallo de una obra no es un evento moderado, sino un salto de régimen (Portocarrero, 2014; Huggel et al., 2020). Los casos de Laguna Amarilla-Releche y Laguna Congelada-Mocha, en Ecuador, ilustran cómo, incluso cuando las poblaciones en riesgo son relativamente menores que en Huaraz, la dependencia de rutas y servicios localizados en valles productivos hace que las soluciones territoriales —evitar la ocupación de zonas expuestas y reubicar activos— compitan directamente con la economía local y con la lógica de inversión pública.

3.2 Variación de la exposición ante la aceleración del cambio criosférico

El retroceso glaciar andino es uno de los indicadores más robustos del calentamiento global en la criósfera tropical (Gráfico 4). En promedio, los glaciares tropicales andinos se redujeron en un 42% entre 1990 y 2020, con descensos más marcados en elevaciones inferiores a 5.000 m s. n. m. (Turpo Cayo et al., 2022). En el sur de Perú, la pérdida acumulada desde 1975 ha superado el 50%, alcanzando valores cercanos al 60% en algunas zonas, y está acompañada de un ascenso de la altitud media glaciar de hasta 30 metros por década (Dussaillant et al., 2019). En la Cordillera Real de Bolivia, las observaciones satelitales realizadas entre 2000 y 2016 registran una reducción del 29% de la superficie glaciar y un balance de masa negativo de $-403 \pm 78 \text{ kg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, con una aceleración del retroceso durante los eventos de El Niño (Seehaus et al., 2019). Este patrón responde a un desequilibrio entre acumulación y ablación, amplificado por el calentamiento altitudinal y por el ascenso sostenido de la línea de equilibrio (Hugonnet et al., 2021). La pérdida de hielo altera la regulación estacional del agua y genera un aumento en la formación de lagunas proglaciares que conllevan riesgos geomorfológicos asociados (Drenkhan et al., 2023).

GRÁFICO 4

Pérdida anual de masa glaciar en la cordillera de los Andes (1980-2024)



Fuente: Elaboración propia a partir de Dussaillant et al. (2019).

Este retroceso, sin embargo, no es uniforme en toda la cordillera. Su heterogeneidad espacial se explica por la interacción entre altitud, orientación, latitud y precipitaciones (Cuadro 2). Los glaciares situados a menor cota o con exposición directa al sol presentan tasas de ablación más altas, mientras que los efectos de la sombra orográfica y la orientación controlan el balance energético local (Turpo Cayo et al., 2022; Dussaillant et al., 2019).



CUADRO 2

Variación del número de lagunas glaciares por país en la cordillera de los Andes

País	Porcentaje de pérdida glaciár (1980–2020)	Incremento de lagunas glaciares (%)	Número estimado de nuevas lagunas	Fuente
Argentina	25%-30%	10%	~100	Carrivick et al., 2024
Bolivia	50%-55%	25%	~250	Schoolmeester et al., 2018
Chile	30%-35%	15%	~150	Carrivick et al., 2024
Colombia	35%-40%	8%	~40	Van Wyk de Vries et al., 2022
Ecuador	40%-45%	12%	~60	Van Wyk de Vries et al., 2022
Perú	55%-60%	35%	>900	Turpo Cayo et al., 2022; Schoolmeester et al., 2018
Venezuela	98%	— (colapso total)	<10 (residuales)	Ramírez et al., 2020

Fuente: Elaboración propia a partir de las fuentes citadas en el cuadro.

3.2.1 Alteraciones ecosistémicas e hidrológicas asociadas

Los cambios observados en los Andes están reordenando la provisión de servicios ambientales de las cuencas. La transición hacia caudales más erráticos afecta la evapotranspiración, la infiltración y la recarga de acuíferos, y disminuye la retención de humedad en suelos de páramo y bofedal (Buytaert et al., 2006; Hofstede et al., 2014). En paralelo, el desplazamiento de umbrales ecológicos impulsa una termofilización altitudinal —con especies de zonas más cálidas que aparecen a mayores altitudes, desplazando a las propias de ambientes más fríos— y presiones de pérdida de biodiversidad, con efectos sobre las funciones de regulación y provisión (Fadrique et al., 2018). Estos cambios se relacionan con la formación de lagunas proglaciares, elevando la probabilidad de impactos súbitos que se propagan aguas abajo (INAIGEM, 2018; Drenkhan et al., 2023).

Los ecosistemas altoandinos están experimentando transformaciones estructurales y funcionales aceleradas debido al calentamiento global y la alteración de los regímenes de humedad. En los páramos, el aumento térmico está modificando los procesos de descomposición y reduciendo la capacidad de retención hídrica de los suelos, lo que debilita su papel en la liberación gradual de agua hacia las cuencas bajas. Estudios en páramos ecuatorianos reportan una reducción de entre el 25% y el 30% en la capacidad de infiltración y una caída del contenido hídrico del suelo de 0,84 a 0,60 cm³ durante eventos de sequía, con tiempos de recuperación de hasta tres meses (Fadrique et al., 2018; Buytaert et al., 2006). Por otra parte, la menor frecuencia de nieblas y

nubosidad reduce los aportes de agua de condensación que aportan entre el 10% y el 15% del contenido hídrico anual del suelo (Buytaert et al., 2006; Schoolmeester et al., 2018). En las punas, la combinación de estrés térmico y sobrepastoreo aumenta la degradación de los bofedales (Imagen 5), con descensos de la cobertura vegetal de hasta el 40% en áreas intensamente pastoreadas, lo que incrementa la erosión y la pérdida de carbono orgánico del suelo (Fadrique et al., 2018; IPCC, 2019).

IMAGEN 3

Monitoreo de bofedales en Perú

Los bofedales son paisajes críticos cuyo funcionamiento condiciona la estabilidad hídrica y geomorfológica de los territorios de alta montaña. Fortalecer las capacidades de funcionarios de sectores como agua, ambiente, agricultura, energía, planificación territorial y gestión del riesgo resulta estratégico para superar las lecturas fragmentadas y sectoriales de estos ecosistemas. Sin una comprensión compartida de su rol en la regulación de caudales, la retención de sedimentos y la amortiguación de perturbaciones hidrológicas, las decisiones públicas tienden a subestimar su valor y a reproducir intervenciones que los degradan. En paralelo, invertir en sistemas de monitoreo —hidrológico, ecológico y climático— permite transformar estos ecosistemas en sensores capaces de ofrecer señales tempranas sobre cambios en la disponibilidad de agua, la estabilidad de las cuencas y la intensificación de procesos asociados al calentamiento global.



Fuente: Brenes (2024).

Esta combinación de procesos está debilitando la capacidad reguladora de las cabeceras de cuenca, a la par que incrementa la variabilidad de caudales y desplaza los riesgos hacia zonas pobladas aguas abajo. Modelos hidrológicos muestran que, tras un período inicial esperado de aumento de la escorrentía por deshielo, las cuencas altoandinas tenderán a regímenes pluviales más difíciles de estimar, con reducciones de entre el 15% y el 25% en el caudal base y picos de crecida más intensos (Buytaert et al., 2006; Drenkhan et al., 2019). En paralelo, la degradación del suelo y la pérdida de cobertura vegetal están incrementando la turbidez y los costos de tratamiento del agua, mientras que en áreas deglaciadas, la exposición de sulfuros metálicos podría intensificar el drenaje ácido y degradar la calidad del agua, tal como se ha documentado recientemente en cuencas de Perú (INAIGEM, 2024).

3.3 Factores actuales de exposición

En los casos andinos, el riesgo asociado a los GLOF aumenta cuando los asentamientos y los activos se expanden hacia superficies funcionales para el flujo, como terrazas, abanicos y márgenes fluviales, o cuando aumenta la densidad de ocupación dentro de estas áreas, incluso sin que se amplíe la mancha urbana. Ese desplazamiento se acelera cuando el cambio físico del sistema glaciar-lagunar y las decisiones de ocupación territorial se refuerzan entre sí. La evidencia disponible apunta a una interacción físico-social con dos mecanismos recurrentes: (i) aumento del potencial de liberación súbita (más volumen, laderas más inestables, detonantes más probables) y, en paralelo, (ii) fijación de capital en la trayectoria del flujo mediante inversiones que vuelven costosa la retirada. En términos inmediatos, estos son los procesos en los que se debería intervenir de forma prioritaria para que, al tiempo que se implementan medidas paliativas para liberar volumen en las lagunas, se puedan controlar y revertir los procesos activos que están aumentando la exposición en las vecindades que las rodean.

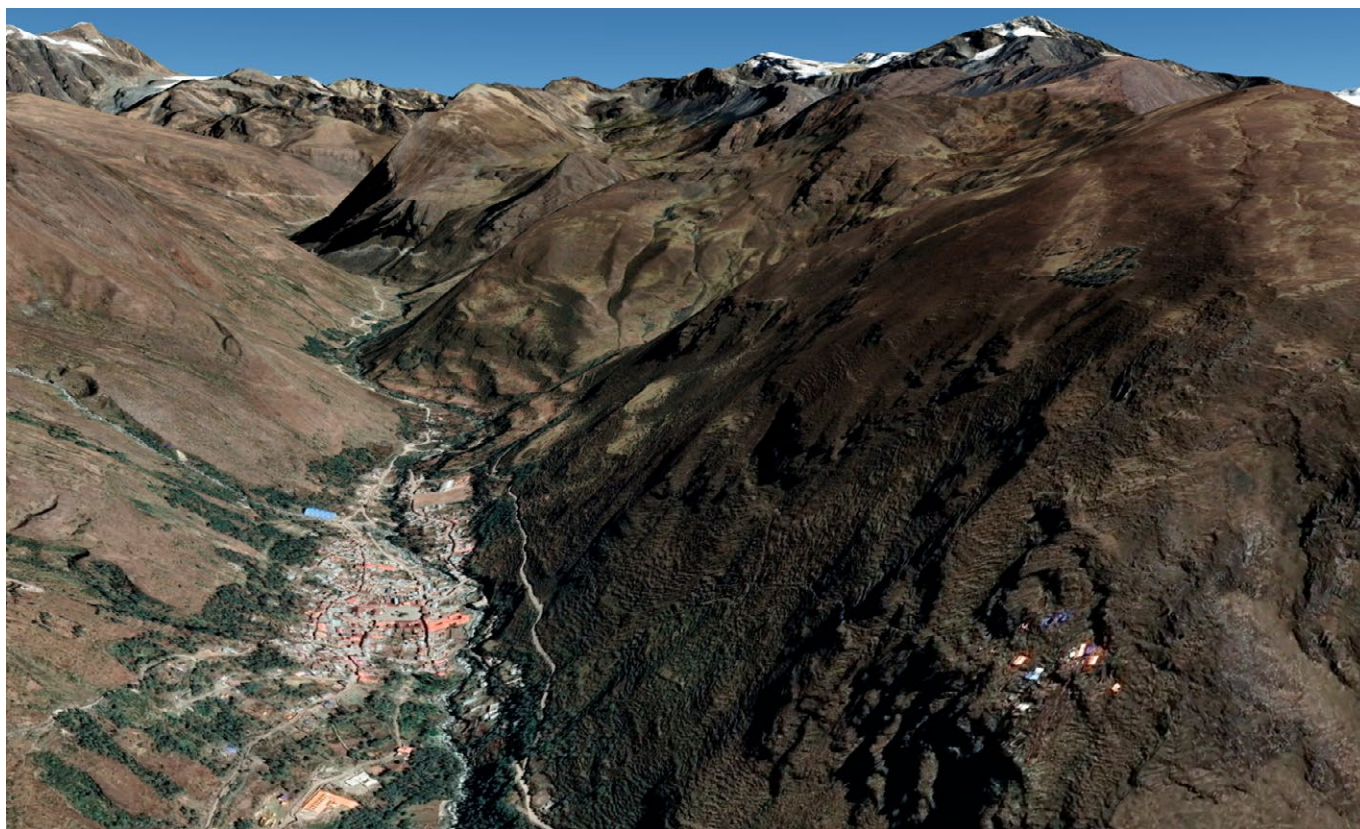
3.3.1 Procesos que aumentan la exposición hoy

La urbanización y la densificación incrementan la exposición de dos maneras que conviene separar: agregan personas en la trayectoria posible del flujo y elevan el valor de lo que se puede perder, aun si el número de viviendas no cambia mucho. En Huaraz, el problema de la ciudad radica en la consolidación de centralidades, servicios (actualmente con un nuevo aeropuerto) y vivienda en un corredor en el que el flujo histórico del río Quillcay funciona como canal de descarga potencial. Por eso, el aumento de exposición se contempla tanto en la población como en la infraestructura de agua, saneamiento, salud y movilidad, que concentra pérdidas indirectas (Huggel et al., 2020; Portocarrero, 2014). La laguna de Palcacocha, en Huaraz, presenta una población en riesgo muy superior a la de otros casos andinos, lo que cambia la naturaleza del

problema fiscal y operativo ante un escenario severo (Taylor et al., 2023; Somos-Valenzuela et al., 2016). Pelechuco (Imagen 6) opera a otra escala, pero con una geometría más crítica, pues presenta un valle estrecho con cauce único, poca redundancia vial y un centro poblado que concentra funciones públicas y comercio local próximos al río, lo que reduce las opciones de repliegue y aumenta la probabilidad de interrupción total de los servicios tras un impacto (Kougkoulos et al., 2018). La densificación, además, tiende a colonizar suelo barato o disponible en márgenes fluviales y terrazas aluviales. Esa lógica es estructuralmente peligrosa porque coloca hogares y microempresas en lugares en los que el tiempo de aviso efectivo se mide en minutos (Carey, 2010; Taylor et al., 2023).

IMAGEN 4

Emplazamiento de Pelechuco, en Bolivia



Fuente: Elaboración propia a partir de Copernicus (2026).

La infraestructura vial suele presentarse como una forma de reducir la vulnerabilidad porque mejora el acceso. En las cuencas expuestas a GLOF, también puede favorecer la exposición por tres vías: habilita nuevas áreas para la urbanización, induce inversiones complementarias y concentra nodos críticos en torno al cauce. En los casos de Bolivia, la conectividad hacia Pelechuco y su entorno sostiene mercados, turismo y provisión de servicios. Esa misma conectividad empuja la construcción de puentes, defensas y trazados que, por economía de obra, tienden a seguir el fondo del valle y acercarse al río, justo donde un flujo de detritos gana eficiencia de transporte (Portocarrero, 2014; Taylor et al., 2023). En Ecuador, los valles que drenan El Altar articulan la movilidad local y el acceso productivo. Cuando la ruta se ubica en planicies de inundación o cerca de abanicos, el daño vial corta el sistema económico además del impacto inmediato en los caminos (Taylor et al., 2023; Somos-Valenzuela et al., 2016). Por ello, el análisis de la exposición debe considerar las líneas vitales y su grado de redundancia, además de contabilizar la población expuesta. Una carretera nueva puede reducir los tiempos de respuesta ante una emergencia, pero, al mismo tiempo, puede aumentar la exposición si incentiva la ocupación y valorización del suelo en lugares de riesgo (Taylor et al., 2023; Portocarrero, 2014).

Por su parte, la agricultura puede expandir la exposición cuando incrementa la dependencia de caudales futuros y concentra las actividades en zonas en las que el sistema físico descarga su energía. Las fases de abundancia relativa de escorrentía sostienen la expansión de riego, mejora de pasturas y mayor carga ganadera; pero el efecto colateral es que canales, bocatomas, terrazas productivas y corrales quedan en corredores que recibirían sedimentos y bloques en un GLOF, o que se verían afectados si hay alteraciones significativas del cauce. En el caso de Arkhata, hay una exposición de escala poblacional baja, pero con concentración extrema de capital familiar en riqueza viva e infraestructura de riego y manejo de bofedales. En Upiscocha-Upis/Ocongate, las vías de acceso y la configuración de su economía local, basada en la agroganadería y el turismo, sitúan a personas y actividades sobre planicies y márgenes que funcionan como áreas de depósito. En ellas, la exposición humana incluye a residentes y a población temporal (Drenkhan et al., 2019).

3.4 Expresiones diferenciadas de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad asociada a los GLOF puede manifestarse de distintas formas en el territorio y a lo largo del continuo de riesgo. La vulnerabilidad de un activo depende de su capacidad para resistir el impacto del flujo de la laguna. En los sistemas expuestos, esta capacidad de resistencia se puede medir a partir de los atributos que les permiten seguir en funcionamiento. En ambos casos, se requieren herramientas diferentes de evaluación que no se aplican plenamente en la fase de amenaza ni en la de exposición, sino en el momento posterior al impacto, cuando se ponen a prueba la capacidad real de recuperación, la elasticidad de los medios de vida y la fortaleza

institucional de los territorios afectados. Los casos analizados muestran que impactos de magnitud física comparable producen trayectorias de recuperación divergentes. En los datos de los eventos ocurridos se puede observar cómo los que afectaron a hogares y actividades productivas de manera directa exhiben pérdidas económicas que persisten por años, incluso cuando el evento no generó mortalidad masiva, lo que evidencia que el daño relevante no siempre es inmediato ni visible (Hallegatte et al., 2017). En esta sección se aborda cómo distintos sistemas —hogares, actividades privadas e infraestructura logística— absorben o no el impacto, y cómo esas respuestas configuran trayectorias de empobrecimiento, dependencia o recuperación incompleta en el marco de la planificación del desarrollo.

3.4.1 Hogares y entorno local

La vivienda aparece sistemáticamente como el activo más vulnerable en la fase posterior a un GLOF, no solo por su destrucción física sino por su rol como acervo patrimonial. Los datos de impactos muestran que, en eventos con flujos canalizados en valles estrechos, la pérdida de viviendas en la ruta principal tiende a ser prácticamente total, con tasas cercanas al 100% en asentamientos rurales contruidos en su mayoría en adobe o tapial (Hallegatte et al., 2017; Carrivick y Tweed, 2016). En los casos bolivianos de Keara y Arkhata, por ejemplo, los archivos de evento registran una destrucción completa del parque habitacional expuesto, sin que existiera capacidad local de reconstrucción autónoma. En Palcacocha, Huaraz, aunque el evento histórico de 1941 es antiguo, la evidencia comparada muestra que la vulnerabilidad estructural de la vivienda sigue siendo un factor crítico ante escenarios actuales, dado el crecimiento urbano en zonas con tipologías constructivas similares (INAIGEM, 2024). Desde el punto de vista económico, la vivienda concentra ahorros de décadas y funciona como colateral informal. Su pérdida no solo implica un déficit habitacional inmediato, sino la desaparición del principal activo de seguridad familiar, lo que dificulta la capacidad de acceso a crédito, relocalización o reinversión productiva (Oliver-Smith, 1999).

Los impactos post-GLOF sobre los hogares no se agotan en las pérdidas materiales. Las fuentes revisadas y los estudios de caso coinciden en que los impactos intangibles, como el trauma psicológico, la ruptura del tejido social o la pérdida de referentes culturales, juegan un papel central en la calidad de la recuperación. En comunidades indígenas andinas, la destrucción de espacios rituales, cementerios o elementos del paisaje sagrado asociados a los nevados afecta la cohesión social y la disposición colectiva a relocalizarse o a adoptar medidas externas de gestión del riesgo (Carey, 2010; Oliver-Smith, 1999). Aunque estos impactos no se cuantifican directamente en los cuadros de pérdidas, su efecto se refleja en indicadores indirectos: la prolongación de la dependencia de asistencia estatal, la resistencia a planes de reasentamiento y los conflictos sociales posteriores a la intervención técnica. En los casos documentados de Chicón y Keara, las

fichas de seguimiento posteriores al evento registran conflictos comunitarios y desconfianza hacia las autoridades como factores que retrasaron la implementación de medidas correctivas (Carey, 2010; Kougkoulos et al., 2018).

3.4.2 Actividades productivas privadas

La agricultura, sobre todo la de subsistencia, es uno de los sectores productivos más severamente afectados en la fase post-GLOF, no tanto por la pérdida de cosechas puntuales como por la destrucción prolongada del suelo. A diferencia de las inundaciones fluviales convencionales, los flujos GLOF depositan capas gruesas de lodo, rocas y sedimentos que pueden inutilizar las tierras agrícolas durante décadas. En los casos de Ecuador (Carihuaírazo, Mocha) y Perú (cuenca del Santa), los registros estadísticos muestran pérdidas recurrentes de áreas cultivadas en planicies aluviales que habían sido intensificadas durante el pico de agua glaciar (Drenkhan et al., 2019; INAIGEM, 2018). En Áncash, por ejemplo, la expansión agrícola documentada entre 1995 y 2000 incrementó significativamente la exposición de superficie de alto valor, amplificando las pérdidas potenciales ante un evento (INAIGEM, 2018). Tras el impacto, la recuperación agrícola requiere inversiones en remoción de sedimentos, reconstitución de suelos y rehabilitación de canales, costos que superan ampliamente la capacidad financiera de productores pequeños y medianos, consolidando procesos de abandono productivo y migración forzada (Hallegatte et al., 2017).

El turismo de montaña y naturaleza, cada vez más relevante en las cuencas glaciares andinas, muestra una vulnerabilidad post-GLOF particularmente alta debido a su dependencia de infraestructuras ligeras y cadenas locales frágiles. Los estudios de caso de Upischocha-Upis y Amarilla-Releche indican que la destrucción de senderos, puentes peatonales y albergues informales provoca la interrupción casi inmediata de la actividad turística, con efectos en cascada sobre guías, arrieros, transporte local y comercio (Drenkhan et al., 2019). Aunque el valor absoluto de las pérdidas puede ser menor que en sectores como la hidroelectricidad, la dependencia de ingresos diarios convierte estos efectos en impactos severos para economías locales con escasa diversificación. Tras un evento GLOF, los flujos turísticos tardan varios años en recuperarse, incluso cuando el atractivo paisajístico persiste, debido a la percepción de inseguridad y a la falta de inversión en infraestructura resiliente (Taylor et al., 2023). En términos territoriales, esto refuerza trayectorias de informalidad y precarización laboral en zonas que ya presentan altos niveles de vulnerabilidad. En Perú, estas disrupciones se han vuelto cada vez más recurrentes y están ligadas a un aumento en la accidentalidad y a cierres temporales de los parques nacionales a los turistas por condiciones de inseguridad asociadas al estado de la nieve.

3.4.3 Infraestructura y servicios públicos

Cuando un GLOF alcanza infraestructura energética, la pérdida sectorial se convierte en un multiplicador territorial. Sin electricidad, se reducen las comunicaciones, el bombeo de agua, las cadenas de frío y la continuidad de servicios básicos, lo que eleva la mortalidad indirecta y el costo de recuperación. Los impactos sobre la infraestructura y los servicios públicos aparecen con alta frecuencia relativa respecto de otros universos (25 registros de impacto asociados a infraestructura y servicios, frente a 19 en hogares y 18 en actividades productivas privadas). Ese patrón sugiere que, aun cuando el 'punto de impacto' sea localizado, la red de efectos se extiende por fallas en nodos críticos (Hallegatte et al., 2017). Además, la distribución de fallecidos es marcadamente asimétrica: las medianas son bajas (≈ 3 en infraestructura y servicios), pero las medias suben por los pocos eventos catastróficos. Esto es consistente con sistemas energéticos expuestos a fallas poco frecuentes, pero con consecuencias masivas (Hallegatte et al., 2017). Para la Cordillera Blanca, la literatura muestra que la regulación hídrica y la generación hidroeléctrica se integran al mismo corredor de valle en el que viajan los flujos, por lo que la reducción de riesgo y la seguridad energética no se pueden separar sin perder realismo analítico (Portocarrero, 2014; Huggel et al., 2020).

La conectividad (carreteras, puentes, telecomunicaciones) define la pendiente social de la recuperación: si se corta, el territorio queda aislado, y la reconstrucción se vuelve más lenta, más cara y políticamente más frágil. Además del problema que implica la pérdida de un activo como un puente, esta interrumpe mercados laborales, acceso a la salud y el abastecimiento, y convierte daños privados en pérdidas públicas durante semanas o meses. En los casos andinos sintetizados en el Cuadro 1, la dimensión humana del problema varía en órdenes de magnitud: Huaraz concentra un rango de población en riesgo de entre 100.000 y 140.000 personas, mientras que localidades como Keara o Quilotoa oscilan en rangos de entre 1.000 y 5.000 habitantes. Esa diferencia cambia por completo la demanda sobre rutas, evacuación y logística posterior al evento (Taylor et al., 2023). Ese mismo cuadro permite leer un segundo rasgo: la exposición se localiza alrededor de pocos corredores de valle, lo que convierte a la conectividad en un cuello de botella (Taylor et al., 2023). La evidencia comparada indica que, cuando el corredor vial coincide con el cauce de descarga, la reconstrucción prioriza restablecer el tránsito y el comercio, aun si eso consolida la permanencia en zonas de peligro, reproduciendo el riesgo por la vía de la inversión pública (Carey, 2010; Oliver-Smith, 1999).

Respecto al agua y el saneamiento, el GLOF produce una combinación particularmente compleja ante el daño físico a captaciones y redes, la contaminación por sedimentos finos y la degradación de la confianza social sobre la potabilidad. A diferencia de una crecida meteorológica típica, el material transportado tiende a colmar bocatomas, romper tuberías por impacto de bloques

y elevar la turbidez por periodos prolongados, lo que obliga a depender de un abastecimiento alternativo con altos costos y una cobertura desigual (Portocarrero, 2014). En los casos utilizados en este capítulo, los registros clasificados como infraestructura y servicios concentran un número de fallecidos con una distribución media alta, un patrón compatible con interrupciones sistémicas que agravan emergencias en territorios densos, como el corredor de Huaraz-Quillcay (Motschmann et al., 2020). El componente de saneamiento añade un segundo impacto potencial, ya que cuando fallan las redes y el tratamiento, aumentan los riesgos sanitarios en un momento en el que los centros de salud enfrentan una sobrecarga y la conectividad limita la llegada de ayuda. Desde un punto de vista de gestión pública, el mensaje operativo es que garantizar la redundancia del abastecimiento exige separar el restablecimiento mínimo (horas–días), la continuidad segura (semanas) y la resiliencia (meses), con inversiones que, si se ubican sin control territorial, terminan fijando población y activos en la misma huella de exposición (Hallegatte et al., 2017; Huggel et al., 2020).



**Desbordes súbitos de lagunas
glaciares en los Andes:
desafíos contemporáneos para
territorios de alta montaña**

4

Reflexiones finales



En los territorios altoandinos, el riesgo asociado a desbordes súbitos está pasando de ser una anomalía excepcional a una condición estructural del desarrollo en la alta montaña que emerge de la interacción entre cambios acelerados en la criósfera y decisiones históricas de ocupación, inversión y gobernanza territorial. Estas interacciones se están intensificando con aumentos directos en los niveles de riesgo. La evidencia analizada a lo largo de este estudio muestra que el impacto de los GLOF no se debe interpretar como un evento exógeno ni como una amenaza natural, sino como un mecanismo a través del cual se manifiestan las fragilidades acumuladas del territorio de forma abrupta y concentrada. En este sentido, el riesgo de GLOF es un problema del desarrollo cuando la planificación ignora dinámicas físicas de alta energía y baja reversibilidad. El presente estudio deja algunas reflexiones finales:

Actualmente, la exposición domina la ecuación del riesgo asociado a un GLOF en el entorno andino. La evidencia revisada permite sostener que, en el contexto andino, la exposición se ha convertido en el componente dominante del riesgo asociado a un GLOF. En valles encajonados, con pendientes pronunciadas, tiempos de llegada reducidos y flujos de alta energía, resulta limitada la capacidad de resistencia de las viviendas, la infraestructura convencional y los sistemas locales de respuesta. Bajo estas condiciones, reducir la probabilidad de falla de una laguna no necesariamente reduce el riesgo en proporción equivalente si la población, los servicios públicos, la infraestructura crítica y los activos productivos siguen ubicados en corredores naturales de descarga. El reto, por tanto, no se limita a la peligrosidad física de la laguna, sino a la persistencia de decisiones territoriales que concentran valor económico, social e institucional en zonas en las que el impacto puede ser severo.

Esto desplaza el foco de la gestión del riesgo desde el control del evento hacia el control de la exposición. Las obras de drenaje, los diques, los sensores y los sistemas de alerta temprana son necesarios, pero resultan insuficientes si no se articulan con decisiones de ordenamiento territorial, regulación del crecimiento urbano, localización segura de infraestructura y protección de medios de vida. En el entorno andino, es importante orientar la expansión del desarrollo lejos de superficies funcionales del flujo. Mientras esto no se incorpore en la planificación pública y privada, la región seguirá reproduciendo y amplificando potenciales impactos en zonas expuestas a lagunas peligrosas.

La inversión pública tiene un rol central para desestimular crecimientos en zonas peligrosas. La inversión pública tiene un rol determinante en la configuración del riesgo asociado a los GLOF. Puede reducirlo cuando orienta infraestructura, servicios y equipamientos hacia zonas seguras; pero también puede reproducirlo cuando consolida escuelas, hospitales, carreteras, sistemas de riego, redes de agua, puentes o centrales hidroeléctricas en corredores potenciales de inundación. En estos casos, la inversión pública no solo instala activos expuestos, sino que envía una señal de

validación, ya que si el Estado construye y amplía servicios en una zona peligrosa, la población y los mercados tienden a interpretar ese espacio como apto para permanecer o invertir. De esa forma, la inversión pública puede convertirse en un mecanismo de anclaje del riesgo y transferir pasivos contingentes hacia el futuro.

Por esta razón, los sistemas de inversión pública en territorios altoandinos deben incorporar criterios específicos de riesgo ante GLOF desde la fase de prefactibilidad. Además de evaluar la rentabilidad social, demanda de servicios o conectividad, también se debe analizar si la inversión inducirá nueva ocupación, elevará el valor del suelo o fijará funciones estratégicas en zonas en las que la recuperación posterior sería costosa o inviable. Esto requiere que los mapas de amenaza, los escenarios de flujo, los inventarios de lagunas peligrosas y la información sobre exposición sean vinculantes para el desarrollo de infraestructura pública, vivienda, turismo, riego, energía y equipamientos sociales. En términos prácticos, la inversión pública debe dejar de actuar como compensación posterior al riesgo y convertirse en un instrumento preventivo para orientar el desarrollo fuera de las trayectorias de impacto.

Existen brechas significativas de conocimiento sobre el riesgo asociado a los GLOF. El análisis muestra que las brechas de conocimiento sobre GLOF en los Andes no se limitan a la falta de estudios científicos. Existen metodologías consolidadas para identificar lagunas peligrosas, modelar escenarios de inundación y estimar afectaciones potenciales, pero esa información rara vez se convierte en normas, criterios de inversión, restricciones de uso del suelo o estándares obligatorios para la infraestructura. Persiste, además, el desafío de fortalecer la interfaz entre ciencia y política pública para que los mensajes se comuniquen mejor y contribuyan a reformar procesos que podrían estar incrementando el riesgo.

También persisten brechas operativas. La cobertura instrumental sobre lagunas críticas sigue siendo limitada, los sistemas de alerta temprana cubren solo una fracción de las cuencas expuestas y los datos relevantes se encuentran dispersos entre entidades con mandatos distintos, como glaciología, agua, ambiente, meteorología, infraestructura, planificación, gestión del riesgo, universidades y gobiernos subnacionales. Esta fragmentación reduce la capacidad de anticipar, priorizar y actuar. Además, muchas lagunas recientemente formadas o menos emblemáticas permanecen fuera del radar operativo, lo que puede generar una falsa sensación de seguridad. Desarrollar la costumbre institucional de monitorear e inventariar las lagunas glaciares es una tarea crítica que se puede constituir en un primer estadio de línea base para llevar un control más sistemático.

Los países andinos necesitan fortalecer la gobernanza local. El riesgo asociado a los GLOF se materializa en territorios concretos, por lo que la gobernanza local es un componente central de cualquier estrategia de reducción del riesgo. Los gobiernos locales son los que enfrentan presiones inmediatas de expansión urbana, provisión de servicios, mantenimiento de caminos, formalización de asentamientos, promoción turística, habilitación de actividades productivas y atención de demandas comunitarias. Sin capacidades técnicas, recursos y respaldo normativo, estas decisiones tienden a responder a urgencias de corto plazo, aun cuando existan estudios que indiquen niveles severos de peligrosidad. Las consultas realizadas en los territorios confirman la importancia de fortalecer las capacidades técnicas, normativas e instrumentales en las instancias de gobierno local y subnacional.

Este fortalecimiento puede iniciar por la construcción de arreglos multinivel, en los que las instituciones nacionales de glaciología, agua, meteorología, ambiente, infraestructura y gestión del riesgo provean información útil, actualizada y aplicable, y los gobiernos locales cuenten con instrumentos para usarla en permisos, zonificación, inversión, mantenimiento de infraestructura, comunicación del riesgo y preparación comunitaria. También requiere incorporar conocimiento territorial en rutas usadas por la población, localización de activos productivos, dependencia de bofedales, zonas de pastoreo, senderos turísticos y redes locales de apoyo, entre otros.

Existen mecanismos de generación de valor que pueden reducir la exposición y reforzar los medios de vida. La reducción del riesgo asociado a los GLOF puede generar valor si se integra con las agendas sectoriales y territoriales prioritarias para las comunidades y los Estados. Las intervenciones más sostenibles son las que combinan una reducción del riesgo con la seguridad hídrica, la regulación de caudales, la protección de bofedales y el fortalecimiento productivo. Esto genera una narrativa de desarrollo seguro y permite controlar algunos aspectos de la amenaza, ganando tiempo para que las autoridades implementen medidas estructurales a largo plazo. Esta lógica permite que la gestión del riesgo deje de depender exclusivamente de financiamiento episódico y se vincule con beneficios tangibles para la agenda de desarrollo y los medios de vida de las comunidades altoandinas.

En territorios en los que los hogares dependen de bofedales, pastizales, riego, ganadería de camélidos, agricultura de altura o turismo de montaña, reducir la exposición requiere ofrecer alternativas viables además de procesos de concientización sobre el riesgo. La reubicación o el control del crecimiento en zonas peligrosas solo serán socialmente sostenibles si se acompañan de acceso seguro al agua, infraestructura productiva, diversificación económica, rutas turísticas seguras, mecanismos financieros y apoyo a la transición de medios de vida. Los programas de desarrollo rural resiliente son puntos de partida estratégicos que pueden integrar la reducción del riesgo, fomentar prácticas autóctonas de adaptación a los cambios en el clima y a otros efectos derivados, y generar mercados de trabajo de mayor valor agregado.



**Desbordes súbitos de lagunas
glaciares en los Andes:
desafíos contemporáneos para
territorios de alta montaña**



Referencias



- Allen, S., H. Frey y C. Huggel. 2017. *Assessment of glacier and permafrost hazards in mountain regions: Technical guidance document*. Scientific and Technical Partnership GAPHAZ/ COSUDE (Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación).
- Banco Mundial. 2014. *Turn down the heat: Confronting the new climate normal*. Washington, DC: Banco Mundial.
- . 2024. *Climatic resilience and adaptation in Latin America: Country diagnostics and investment priorities*. Washington, DC: Banco Mundial.
- Benn, D. I., C. R. Warren y R. H. Mottram. 2007. "Calving processes and the dynamics of calving glaciers." *Earth-Science Reviews* 82 (3–4): 143–79.
- Buytaert, W., R. Céleri, B. De Bièvre, F. Cisneros, G. Wyseure, J. Deckers y R. Hofstede. 2006. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos." *Earth-Science Reviews* 79 (1–2): 53–72.
- Carey, M. 2010. *In the shadow of melting glaciers: Climate change and Andean society*. Oxford University Press.
- Carey, M., C. Huggel, J. Bury, C. Portocarrero y W. Haeberli. 2012. "An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru." *Climatic Change* 112 (3–4): 733–67.
- Carrivick, J. L., M. Davies, R. Wilson, B. J. Davies, T. Gribbin, O. King, A. Rabatel, J.-L. García y J. C. Ely. 2024. "Accelerating glacier area loss across the Andes since the Little Ice Age." *Geophysical Research Letters* 51 (13): e2024GL109154.
- Carrivick, J. L. y F. S. Tweed. 2016. "A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods." *Global and Planetary Change* 144: 1–16.
- Clague, J. J. y S. G. Evans. 2000. "A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia." *Quaternary Science Reviews* 19 (17–18): 1763–83.
- Comisión Europea, Centro Común de Investigación (JRC). 2025. *GHS Urban Centre Database (GHS-UCDB R2025)*. Comisión Europea.
- Cook, K. L., C. Andermann, F. Gimbert, B. R. Adhikari y N. Hovius. 2018. "Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya." *Science* 362 (6410): 53–57.

- Drenkhan, F. y S. Castro-Salvador. 2023. "Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: desafíos y perspectivas." *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente* (12): 211–35. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.A006>.
- Drenkhan, F., C. Huggel, L. Guardamino y W. Haeberli. 2019. "Managing risks and future options from new lakes in the deglaciating Andes of Peru: The example of the Vilcanota-Urubamba basin." *Science of the Total Environment* 665: 465–83.
- Drenkhan, F., N. Salzmänn, C. Huggel, T. Wild y C. Giráldez. 2023. "Looking beyond glaciers to understand mountain water security." *Nature Sustainability* 6: 130–38.
- Dussaillant, I., E. Berthier, F. Brun, M. Masiokas, R. Hugonnet, V. Favier, A. Rabatel, P. Pitte y L. Ruiz. 2019. "Two decades of glacier mass loss along the Andes." *Nature Geoscience* 12 (10): 802–8.
- Emmer, A., S. K. Allen, M. Carey, H. Frey, C. Huggel, O. Korup, M. Mergili, A. Sattar, G. Veh, T. Y. Chen, S. J. Cook, M. Correias-Gonzalez, S. Das, A. Díaz Moreno, F. Drenkhan, M. Fischer, W. W. Immerzeel, E. Izagirre, R. C. Joshi, I. Koungkoulos, R. Kuyakanon Knapp, D. Li, U. Majeed, S. Matti, H. Moulton, F. Nick, V. Piroton, I. Rashid, M. Reza, A. Ribeiro de Figueiredo, C. Riveros, F. Shrestha, M. Shrestha, J. Steiner, N. Walker-Crawford, J. L. Wood y J. C. Yde. 2022. "Progress and challenges in glacial lake outburst flood research (2017–2021): a research community perspective." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22 (9): 3041–61.
- Emmer, A. y A. Cochachin. 2013. "The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North Peru, and the study area Zuros." *AUC Geographica* 48 (2): 5–15.
- Emmer, A., V. Vilímek y M. L. Zapata. 2016. "Hazard mitigation of glacial lake outburst floods in the Cordillera Blanca (Peru): the effectiveness of remedial works." *Journal of Flood Risk Management* 11 (S2): S489–S501.
- Fadrique, B., S. Báez, Á. Duque, A. Malizia, C. Blundo, J. Carilla, O. Osinaga-Acosta, L. Malizia, M. Silman, W. Farfán-Ríos, Y. Malhi, K. R. Young, F. Cuesta, J. Homeier, M. Peralvo, E. Pinto, O. Jadan, N. Aguirre, Z. Aguirre y K. J. Feeley. 2018. "Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change." *Nature* 564 (7735): 207–12.
- Hallegatte, S., A. Vogt-Schilb, M. Bangalore y J. Rozenberg. 2017. *Unbreakable: Building the resilience of the poor in the face of natural disasters*. Washington, DC: Banco Mundial.

- Hindustan Times. 2023. "Deadly floods in Sikkim: Images from the ground." Fotografía. *Hindustan Times*, 5 de octubre de 2023.
- Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove y H. Steltzer. 2019. "High mountain areas." En *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*, editado por H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama y N. M. Weyer, 131–202. IPCC.
- Hofstede, R., J. Calles, V. López, R. Polanco, F. Torres, J. Ulloa, A. Vásquez y M. Cerra. 2014. *Los páramos andinos: ¿qué sabemos? Estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo*. UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza).
- Huggel, C., M. Carey, A. Emmer, H. Frey, N. Walker-Crawford e I. Wallimann-Helmer. 2020. "Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: local and global drivers and responsibilities for the case of Lake Palcacocha, Peru." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (8): 2175–93.
- Huggel, C., W. Haeberli, A. Kääb, D. Bieri y S. Richardson. 2004. "An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps." *Canadian Geotechnical Journal* 41 (6): 1068–83.
- Hugonnet, R., R. McNabb, E. Berthier, B. Menounos, C. Nuth, L. Girod, D. Farinotti, M. Huss, I. Dussailant, F. Brun y A. Kääb. 2021. "Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century." *Nature* 592 (7856): 726–31.
- INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña). 2018. *Inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú*. INAIGEM.
- . 2024. *Monitoreo de glaciares y ecosistemas de montaña: informe técnico 2024*. INAIGEM.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2019. *Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. IPCC.
- IRDR (Integrated Research on Disaster Risk). 2011. *Forensic investigations of disasters (FORIN): A conceptual framework and guide to research*. IRDR FORIN Publication No. 1. ICSU.
- Iribarren Anacona, P., A. Mackintosh y K. P. Norton. 2015. "Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes." *Earth Surface Processes and Landforms* 40 (1): 2–21.

- Kouggoulos, I., S. J. Cook, L. A. Edwards, L. J. Clarke, E. Symeonakis, J. M. Dortch y K. Nesbitt. 2018. "Modelling glacial lake outburst flood impacts in the Bolivian Andes." *Natural Hazards* 94 (3): 1415–38.
- Li, S., C. Li, Z. Li, L. Li y W. Wang. 2025. "Ice Avalanche-Triggered Glacier Lake Outburst Flood: Hazard Assessment at Jiongpuco, Southeastern Tibet." *Water* 17 (14): 2102. <https://doi.org/10.3390/w17142102>.
- Lützow, N., G. Veh y O. Korup. 2023. "A global database of historic glacier lake outburst floods." *Earth System Science Data* 15 (7): 2983–3000.
- McKinney, D. C., M. Somos-Valenzuela, C. Portocarrero et al. 2014. *Lake Palcacocha hazard assessment: Hazard mapping and modeling of potential glacial lake outburst flood impacts for Huaraz, Peru*. Austin, TX: University of Texas at Austin.
- Mergili, M., A. Emmer, A. Juřicová, A. Cochachin, J.-T. Fischer, C. Huggel y S. P. Pudasaini. 2021. "The 2020 glacial lake outburst flood process chain at Lake Salkantaycocha (Cordillera Vilcabamba, Peru)." *Landslides* 18 (7): 2211–34.
- Motschmann, A., C. Huggel, R. Muñoz y A. Thür. 2020. "Towards integrated assessments of water risks in deglaciating mountain areas: water scarcity and GLOF risk in the Peruvian Andes." *Geoenvironmental Disasters* 7 (1): 28.
- Oliver-Smith, A. y S. M. Hoffman, eds. 1999. *The angry earth: Disaster in anthropological perspective*. Routledge.
- Ployhart, R. E. y R. J. Vandenberg. 2010. "Longitudinal research: The theory, design, and analysis of change." *Journal of Management* 36 (1): 94–120.
- Portocarrero Rodríguez, C. A. 2014. *The glaciology of the Cordillera Blanca (Peru) revisited: New results on past glacial extents and rate of change*. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences/ANA Perú.
- Richardson, S. D. y J. M. Reynolds. 2000. "An overview of glacial hazards in the Himalayas." *Quaternary International* 65–66: 31–47.
- Sattar, A., U. K. Haritashya, J. S. Kargel, S. Harrison, S. Tayal, S. K. Allen et al. 2025. "The Sikkim flood of October 2023: Drivers, causes, and impacts of a multihazard cascade." *Science*.

- Schneider, D., C. Huggel, A. Cochachin, S. Guillén y J. García. 2014. "Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru." *Advances in Geosciences* 35: 145–55.
- Schoolmeester, T., K. S. Johansen, B. Alfthan, E. Baker, M. Hespings y K. Verbist. 2018. *The Andean glacier and water atlas: The impact of glacier retreat on water resources*. UNESCO/GRID-Arendal.
- Seehaus, T., P. Malz, C. Sommer, S. Lippl, A. Cochachin y M. H. Braun. 2019. "Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations." *The Cryosphere* 13 (10): 2537–56.
- Shirsat, T. S., R. S. Bhatt, A. V. Kulkarni y M. R. Bhutiyani. 2024. "Analysis of triggering factors behind the October 2023 glacial lake outburst flood at South Lhonak Lake, Sikkim Himalaya." *Geoenvironmental Disasters* 11: 12.
- Shugar, D. H., A. Burr, U. K. Haritashya, J. S. Kargel, C. S. Watson, M. C. Kennedy, A. R. Bevington, R. A. Betts, S. Harrison y K. Strattman. 2020. "Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990." *Nature Climate Change* 10 (10): 939–45.
- Singer, J. D. y J. B. Willett. 2003. *Applied longitudinal data analysis: Modeling change and event occurrence*. Oxford University Press.
- Somos-Valenzuela, M. A., R. E. Chisolm, D. S. Rivas, C. Portocarrero y D. C. McKinney. 2016. "Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru." *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (6): 2519–43.
- Song, C., Y. Sheng, L. Ke, Y. Nie y J. Wang. 2024. "Global glacial lake inventory derived from multi-source remote sensing imagery (Version 1.0)." Conjunto de datos. Zenodo.
- Stuart-Smith, R. F., G. H. Roe, S. Li y M. R. Allen. 2021. "Increased outburst flood hazard from Lake Palcacocha due to human-induced glacier retreat." *Nature Geoscience* 14 (2): 85–90.
- Taylor, C., T. R. Robinson, S. Dunning, J. R. Carr y M. Westoby. 2023. "Glacial lake outburst floods threaten millions globally." *Nature Communications* 14: 487.
- The Atlantic. 2013. "Devastation in India: Floods in Uttarakhand." Fotografía. *The Atlantic*, 19 de junio de 2013.

- Turpo Cayo, E. Y., M. O. Borja, R. Espinoza-Villar, N. Moreno y C. Yarleque. 2022. "Mapping three decades of changes in the tropical Andean glaciers using Landsat data processed in the Earth Engine." *Remote Sensing* 14 (9): 1974.
- UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). 2015. *Global assessment report on disaster risk reduction 2015: Making development sustainable: The future of disaster risk management*. UNISDR.
- Van Wyk de Vries, M., D. Carchipulla-Morales, A. D. Wickert y V. G. Minaya. 2022. "Glacier thickness and ice volume of the Northern Andes." *Scientific Data* 9: 342.
- Vuille, M. 2013. "Climate change and the tropical Andes: Impacts and responses." En *Adapting to climate change in mountain regions*, editado por S. Strobel, T. Kohler y F. Hinterberger, 144–62. Elsevier.
- Wilson, R., N. F. Glasser, J. M. Reynolds, S. Harrison, P. Iribarren Anaconda, M. Schaefer y S. Shannon. 2018. "Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes." *Global and Planetary Change* 162: 275–91.

