



PROYECTO GLACIARES+

Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades

El futuro del clima y de los glaciares en el Perú



 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Embajada de Suiza en el Perú

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



University of
Zurich^{UZH}



METEODAT

crealp

 **ANA**
Autoridad Nacional del Agua



PROYECTO GLACIARES+

Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades

El futuro del clima y de los glaciares en el Perú

La producción de este documento fue posible gracias al Proyecto Glaciares+, iniciativa de la cooperación Suiza-Perú en el marco del Programa Global de Cambio Climático y Medio Ambiente de la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (COSUDE), ejecutado por CARE Perú y el consorcio suizo liderado por la Universidad de Zurich, y conformado por Meteodat, el Centro de Investigación del Medio Alpino (CREALP) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL).

Autores:

Simone Schauwecker - Universidad de Zurich y Meteodat GmbH

Marlene Kronenberg - Meteodat GmbH

Rolando Cruz - Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH)
de la Autoridad Nacional del Agua del Perú (ANA)

Editado por:

CARE Perú

Av. General Santa Cruz 659

Jesús María, Lima - Perú

1a. edición Noviembre 2017

Diseño y diagramación:

Herbert Salvatierra Böttger

Para más información:

proyectoglaciares.care.org.pe

infoglaciares@care.org.pe

Si usted tiene alguna consulta o queja sobre el Proyecto Glaciares+, llame desde un teléfono fijo a la línea telefónica gratuita: 0800 - 14417, o envíe un correo electrónico a opinion@care.org.pe

ÍNDICE

Resumen ejecutivo	4
Introducción y objetivos	5
El futuro del clima	6
Escenarios de emisión	6
Temperatura	6
Altura de congelación	7
Precipitación	8
El futuro de los glaciares	9
Un posible indicador climatológico: la altura de congelación	9
Un posible indicador ambiental: el aerosol	13
Conclusiones	16
Referencias	17

RESUMEN EJECUTIVO

Durante las últimas décadas, el Cambio Climático ha producido un significativo retroceso glaciar en las cordilleras del Perú (p. ej. *Kaser et al.*, 1990; *Hastenrath y Ames*, 1995; *Georges*, 2004; *ANA*, 2012; *Rabateletal.*, 2013). En la cordillera Vilcanota, el 33% de su área glaciar desapareció entre 1970 y 2010 (*ANA*, 2012); similar a lo ocurrido en la cordillera Blanca, donde el 27% de la superficie se perdió en el periodo 1970-2003 (*ANA*, 2012). Para la cordillera Central, la extensión glaciar disminuyó en un 56% entre los años 1970 y 2007 (*ANA*, 2012). El encontrar medidas adecuadas de adaptación frente a los efectos del Cambio Climático sobre los glaciares, implica conocer los futuros cambios meteorológicos así como la reacción de aquellas reservas de agua dulce frente a las potenciales alteraciones en el clima local-regional. El presente informe pretende resumir los resultados de la investigación sobre el futuro del clima y del retroceso glaciar hacia fines del siglo XXI en el Perú, desarrollada en el marco del proyecto Glaciares.

El uso de modelos climáticos permite estimar posibles cambios en determinadas variables. Existe un consenso sobre el aumento significativo de la temperatura durante el siglo XXI. No obstante, aún se exhiben grandes incertidumbres sobre la magnitud del calentamiento: por un lado, debido a la dispersión de los resultados de los modelos y, por el otro, debido a la dependencia climática a las emisiones de gases de efecto invernadero durante las próximas décadas (escenarios de emisión). Comparada con la temperatura, la estimación de futuros cambios en la precipitación es aún más compleja. Es probable, para las próximas décadas, una disminución de la precipitación durante el periodo de estiaje. En relación a la época húmeda, no se exhibe determinada tendencia o patrón. La capacidad de los modelos para simular el clima futuro (principalmente precipitación) se ve limitada debido a la compleja topografía regional. En ese sentido, los vientos locales pueden ser utilizados como indicadores de precipitación para

los Andes centrales y el Perú. Sobre este punto, los modelos exhiben una reducción del viento del este durante el siglo XXI, lo que indicaría una posible disminución de la precipitación en 19 a 33% durante la estación húmeda (meses de diciembre, enero y febrero) de finales del mismo, comparado con la situación actual (*Neukom et al.*, 2015).

El aumento de la temperatura hasta fines del siglo XXI se ve y verá reflejado en el continuo retroceso glaciar de los Andes Tropicales y, por ende, del Perú. En la actualidad, existe limitada investigación sobre el futuro de los glaciares en el país. Ello, en gran parte, debido a la carencia de data y mediciones a grandes altitudes, con lo cual no es posible estimar futuras tasas de retroceso local con complejos modelos. Una posible solución consiste en el uso de la altura de congelación como indicador de la extensión glaciar durante la estación húmeda (*Schauwecker et al.*, 2017), considerando los modelos climáticos globales y los escenarios de emisión. Si se asume el escenario más optimista (RCP2.6), el 50% del área glaciar actual estará por debajo de ese nivel, lo que implicaría la pérdida de la mitad de la superficie hacia fines del siglo XXI. Con el escenario más pesimista (RCP8.5), únicamente pequeñas áreas glaciares y neviza de las cordilleras más altas (p. ej., cordilleras Blanca y Vilcanota) podrán ser conservadas. El asumir el escenario pesimista conlleva también a un nivel de congelación por encima de las cumbres glaciares de cordilleras menores (p. ej., cordillera Central).

Otro posible indicador a considerar en el grado de retroceso glaciar está directamente relacionado con los aerosoles transportados por la acción de los vientos y depositados sobre las superficies glaciares. Estudios desarrollados por la UGRH-ANA evidenciaron una mayor conservación de masa glaciar (58%) en el Artesonraju (cordillera Blanca) a partir de la extracción de la capa superficial cubierta por aquellos sedimentos.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Durante las últimas décadas, un significativo retroceso glaciar es observado en las cordilleras del Perú (p. ej. *Kaser et al.*, 1990; *Hastenrath y Ames*, 1995; *Georges*, 2004; *ANA*, 2012; *Rabatel et al.*, 2013). En la cordillera Vilcanota, el 33% de su área glaciar desapareció entre 1970 y 2010 (*ANA*, 2012); similar a lo ocurrido en la cordillera Blanca, donde el 27% de la superficie se perdió en el periodo 1970-2003 (*ANA*, 2012). Para la cordillera Central, la extensión glaciar disminuyó en un 56% entre los años 1970 y 2007 (*ANA*, 2012). Los glaciares cumplen un rol importante en el ciclo hidrológico, al permitir el almacenamiento de la precipitación sólida durante la estación de lluvias y la liberación de agua durante la estación seca o de estiaje. Además de la temporal disminución hídrica a largo plazo, el derretimiento glaciar puede originar futuras lagunas en lechos glaciares, con

consecuentes y posibles peligros e impactos para las poblaciones aguas abajo (*Colonia et al.*, 2017). La toma de medidas adecuadas de adaptación frente a los impactos del cambio climático se convierte así en un requisito indispensable para el desarrollo sostenible, donde se precisa un claro entendimiento sobre el futuro del clima y de los glaciares.

El objetivo del presente informe es resumir los resultados de la investigación sobre el futuro del clima y del retroceso glaciar hacia fines del siglo XXI en el Perú, región andina tropical. Los resultados expresados forman parte de lo desarrollado en el marco del proyecto Glaciares (fase 1 y 2), así como de la experiencia empírica emprendida por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la Autoridad Nacional del Agua (*ANA*).

EL FUTURO DEL CLIMA

LOS ESCENARIOS DE EMISIÓN

El estudio del clima comprende la simulación de las interacciones entre la atmósfera, la tierra, los océanos y el hielo. Aquellas complejas interacciones se simulan con diferentes modelos climáticos generales (GCMs, por sus siglas en inglés). Como insumos de los modelos, se utilizan escenarios de forzamiento radiativo para la obtención de resultados a futuro. Estos escenarios permiten estimar cambios en el flujo de energía radiativa (calor) hacia la superficie terrestre, ya sea a causa de la composición atmosférica (p. ej., por un aumento en la concentración de dióxido de carbono), uso de tierras o factores externos como las variaciones en la actividad solar.

La figura 1 muestra el forzamiento radiativo para diferentes escenarios. Los Escenarios de Emisión del Reporte Especial (SRES, por sus siglas en inglés) fueron construidos y presentados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en el año 2000 para el desarrollo de proyecciones climáticas. En su Quinto Informe (AR5) del año 2014, el IPCC hizo uso de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales describen los cambios en el flujo de energía hacia finales del siglo XXI (en Wm^{-2}). Los RCPs se constituyen de cuatro escenarios (identificados con los números 2.6, 4.5, 6

y 8.5); siendo el escenario más optimista (o moderado) el RCP2.6 y más pesimista el RCP8.5. A nivel general, el escenario A2 del SRES es muy similar al RCP8.5 (ambos estiman el aumento continuo de la concentración de gases de efecto invernadero durante el siglo XXI a grandes tasas). Por su parte, el escenario más optimista RCP2.6 es el único donde se asume una disminución de las emisiones después de los años 2010-2020.

LA TEMPERATURA

Lo obtenido a partir de distintos modelos climáticos permite estimar el posible aumento de la temperatura para las próximas décadas. El aumento estimado depende en gran medida del escenario de emisión, pues algunos escenarios duplican las tasas de calentamiento de otros (p. ej., SRES A2 duplica lo exhibido por el SRES B2) (figura 2, *Boulanger et al.*, 2006). Si se asume el escenario de emisión SRES A2 (figura 2, *Bradley et al.*, 2006; *Vuille et al.*, 2008) la temperatura aumentará entre 4.5 a 5°C en los Andes tropicales para finales del siglo XXI. Otro estudio evalúa un incremento de 2.5 a 3°C en la temperatura de la región en caso se duplique la cantidad de dióxido de carbono atmosférico hacia el 2070 (*Bradley et al.*, 2004). El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (*SENAMHI*) también estima

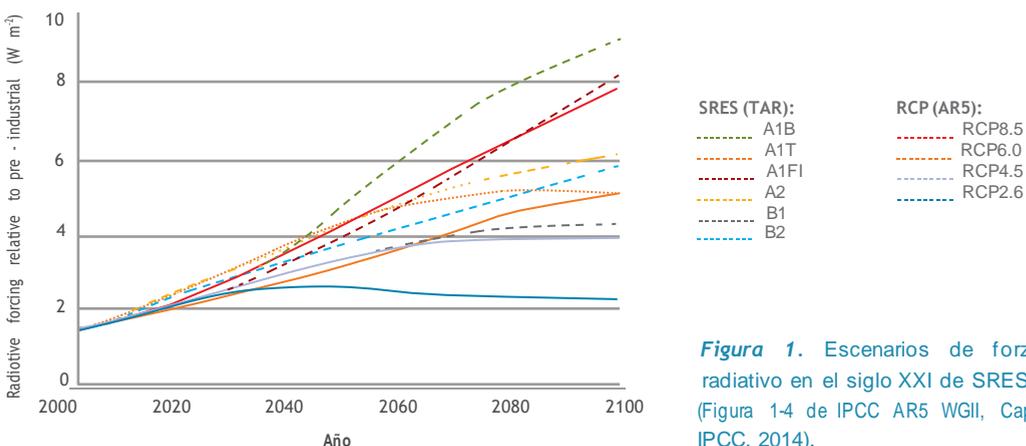


Figura 1. Escenarios de forzamiento radiativo en el siglo XXI de SRES y RCP. (Figura 1-4 de IPCC AR5 WGII, Capítulo 1; IPCC, 2014).

fuertes incrementos para el año 2030 y hacia finales del siglo XXI (figura 2, SENAMHI, 2009; SENAMHI, 2011). Comparado con el calentamiento mundial promedio, es probable un calentamiento amplificado en zonas de gran altitud, como los Andes Tropicales (Bradley et al., 2006).

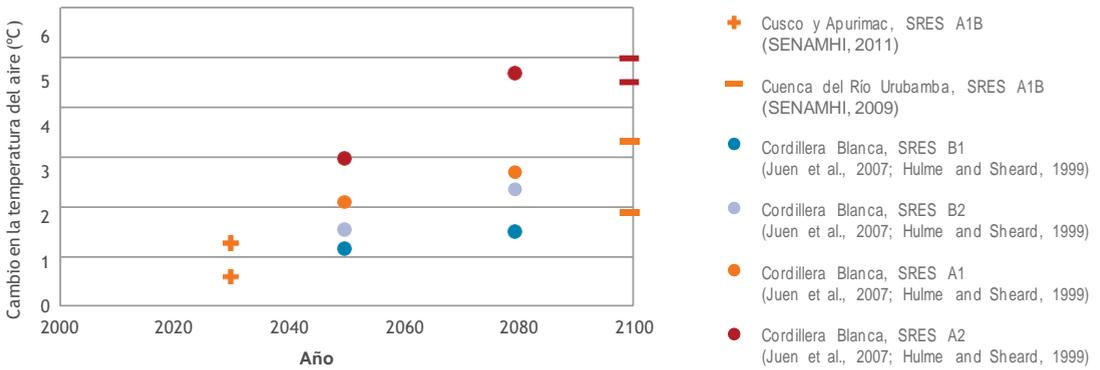


Figura 2. Cambios proyectados en la temperatura del aire según diferentes modelos, regiones y escenarios durante el siglo XXI (Vuille et al., 2008; Bradley et al. 2006: 1990-1999 hasta 2090-2099, SENAMHI, 2009: 1971-2000 hasta 2090-2100; Juen et al., 2007: 1961-1990 hasta 2050 y hasta 2080).

ALTURA DE CONGELACIÓN

La altura de congelación es una variable climatológica usada frecuentemente para estudiar cambios en el sistema climático y, principalmente, atmosférico. Constituye el nivel más bajo de la atmósfera, donde se encuentra una temperatura de 0°C (figura 3). Este nivel también es conocido como isocero o isoterma de cero grados.

La importancia de la altura de congelación radica en su directa relación con la temperatura del aire: el aumento de la temperatura se refleja en el aumento de la isoterma. En este sentido, un calentamiento del aire en 1°C implica un aproximado incremento del isocero en 150 m.

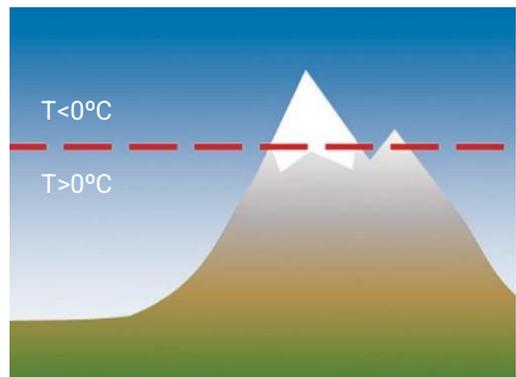


Figura 3. La altura de congelación bajo condiciones normales (línea roja).

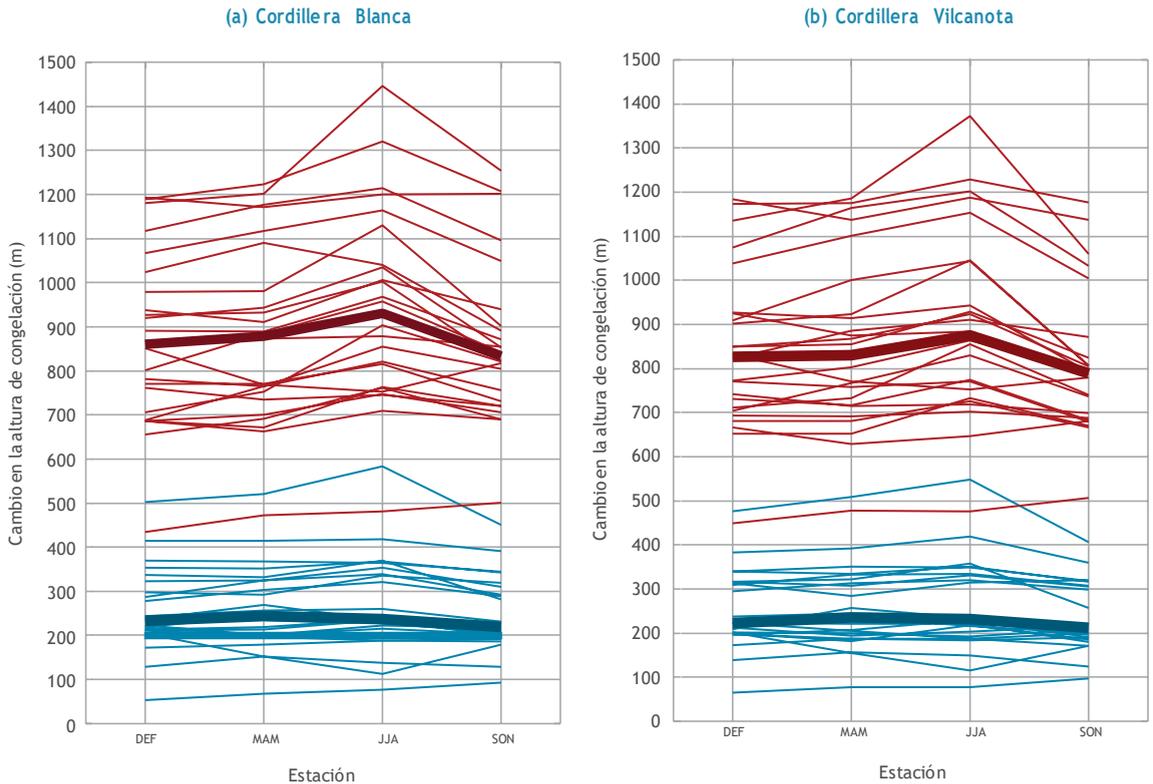


Figura 4. El aumento en la isoterma de cero grados en la cordillera Blanca y la cordillera Vilcanota hacia finales del siglo XXI bajo dos escenarios de emisión. La línea oscura y gruesa muestra la mediana de los diferentes modelos (Schauwecker et al., 2017).

La figura 4 muestra el incremento de la altura de congelación en la cordillera Blanca y la cordillera Vilcanota, según varios modelos climáticos y dos escenarios de emisión (Schauwecker et al., 2017). Los resultados son muy similares para ambas regiones así como para otras cordilleras del Perú (no mencionadas). El aumento del isocero es marcadamente más fuerte bajo el escenario de emisión RCP8.5 (tres veces mayor al estimado por el RCP2.6 y/o al aumento observado durante las últimas décadas). Asimismo, se observa gran dispersión en los resultados obtenidos por los diferentes modelos, lo que indica clara incertidumbre. Sin embargo, a nivel general se estima un mayor calentamiento durante la temporada seca o de estiaje (meses de junio, julio y agosto).

LA PRECIPITACIÓN

La mayoría de los modelos climáticos del IPCC (AR4) estiman un aumento de precipitación durante la temporada húmeda y de disminución durante la temporada seca en los Andes Tropicales (Vuille et al., 2008; Vera et al., 2006). Los presentes cambios serán amplificadores de la variabilidad anual de la precipitación, siendo de mayor magnitud aquellos relacionados a escenarios de emisión pesimistas. Por ejemplo, para la cuenca del río Urubamba, se estima un incremento de precipitación entre 10 a 24% durante la estación húmeda y una reducción de hasta un 50% para la estación seca (SENAMHI, 2011). El aumento de la variabilidad anual, hasta la mitad del siglo XXI, también se estima para los departamentos de Cusco y Apurímac (SENAMHI, 2011). Estos cambios tendrían consecuencias graves para el ciclo hidrológico de la región andina tropical, al presentarse una ma-

yor disminución de la escorrentía durante la estación seca.

Sin embargo, y como fue mencionado anteriormente, la gran dispersión de resultados según los distintos modelos exhibe gran incertidumbre sobre el futuro del clima. Regiones montañosas como las cordilleras del Perú se caracterizan por una topografía compleja con altas cumbres, valles profundos y grandes diferencias de elevación. En aquellas regiones, la capacidad de los modelos climáticos es reducida, lo que dificulta la óptima simulación del clima a una escala adecuada. Debido a las incertidumbres, surge la idea de relacionar la variable de precipitación con los vientos zonales de la tropósfera alta (vientos del este/oeste), y así examinar y evaluar las precipitaciones futuras desde otro punto de vista. En los Andes del Perú, el mayor porcentaje de humedad para la precipitación es transportada por los vientos del este, desde el océano Atlántico y la región amazónica hacia las cordilleras. En ese sentido, los vientos

locales pueden ser utilizados como indicadores de precipitación para los Andes centrales. Se precisa hallar una correlación entre el viento zonal y la precipitación actual para poder evaluar precipitaciones futuras (haciendo uso de estimaciones de vientos futuros según modelos climáticos). En conjunto, los modelos exhiben una reducción del viento del este durante el siglo XXI, lo que indica una posible disminución futura de la precipitación en 19 a 33% durante la estación húmeda (meses de diciembre, enero y febrero), comparado con la situación actual (Neukom et al., 2015).

Aun así, todavía no es posible conocer si la precipitación anual disminuirá o aumentará hacia fines del siglo XXI. La mayoría de los estudios coinciden en la disminución de la precipitación durante la estación seca. Para la estación húmeda, si bien los modelos climáticos indican un aumento, los cambios proyectados para la circulación global manifiestan una disminución importante de la precipitación durante aquel período (Neukom et al., 2015).

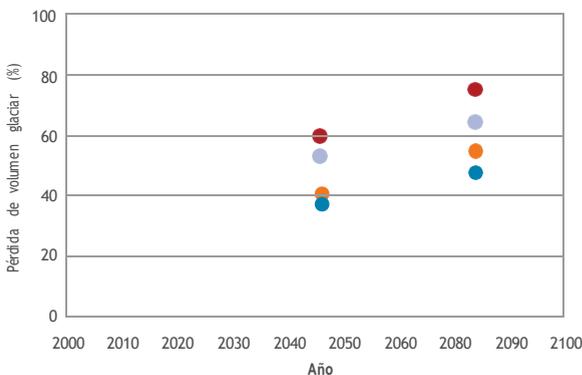
EL FUTURO DE LOS GLACIARES

UN POSIBLE INDICADOR CLIMATOLÓGICO: LA ALTURA DE CONGELACIÓN

El incremento de la temperatura producirá consecuencias e impactos negativos en las áreas glaciares. En la actualidad, existe limitada investigación sobre el futuro de los glaciares en el Perú. Dependiendo del escenario de emisión

(figura 5), se estima que la superficie glaciar nacional se reducirá entre un 38 a 60% hacia la mitad del siglo XXI, y de 49 a 75% hacia el año 2080 (Juen et al., 2007).

La compleja interacción entre los glaciares y el clima impide una predicción precisa sobre los futuros cambios en la superficie y volumen glaciar.



● SRES A2 ● SRES A1 ● SRES B2 ● SRES B1

Figura 5. Pérdida de volumen glaciar de la cordillera Blanca según distintos escenarios SRES, con respecto al año 1990. Horizonte de tiempo hasta los años 2050 y 2080 (Juen et al., 2007).

El aumento de la temperatura domina varios procesos que afectan la ablación y, por ende, el retroceso de los glaciares. Además, el hielo no solo se derrite por un mayor calentamiento ambiental, sino también por otras variables climáticas que influyen en los procesos de acumulación y fusión (p. ej., precipitación, radiación y humedad). Para entender la interacción entre los glaciares y el clima, se requiere de modelos complejos que simulan todos los flujos de energía y masa, con mediciones muy detalladas como insumos. En las cordilleras del Perú - similar a otras zonas remotas de alta montaña en el mundo –data y mediciones a grandes altitudes son generalmente inexistentes.

En aquellas regiones, una posible solución al problema consiste en el uso de la altura de congelación como indicador de la extensión glacial durante la estación húmeda (*Schauwecker et al.*, 2017). Debajo de la altura de congelación, gran parte de la precipitación cae como lluvia y no nieve, lo cual no aporta a la acumulación de masa glacial. Además, la superficie de la lengua del glaciar por debajo del isocero es mayormente hielo, lo que genera un menor albedo y una mayor absorción de la radiación solar (con el consiguiente derretimiento del hielo).

A partir de esta relación, se asume que la altura de congelación puede servir como indicador de la elevación mínima del área glacial (*Schauwecker et al.*, 2017). En base a esta suposición, se puede estimar la futura extensión de los glaciares con los resultados de los modelos climáticos y los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Según proyecciones, la altura de congelación aumentará en 230 m ($\pm 190\text{m}$) bajo el escenario RCP2.6. La figura 6 muestra el área en color plomo donde el hielo se derretirá a partir de la elevación de la isoterma de 0°C (simulada para el RCP2.6 en color verde). Bajo el escenario más pesimista RCP8.5, el aumento será acelerado y aproximadamente tres veces mayor (en $850\text{ m}/\pm 390\text{ m}$), comparado con el presentado en las últimas décadas (similar al RCP2.6). A partir de este escenario, únicamente se preservarán las áreas glaciares por encima de la nueva altura de congelación (simbolizada con una línea roja en la figura 6).

Si bien la simplicidad del método puede conducir a errores, el uso de la altura de congelación como indicador permite realizar estimaciones aproximadas de la extensión glacial futura en regiones donde la carencia de mediciones impide el uso de complejos modelos climáticos.

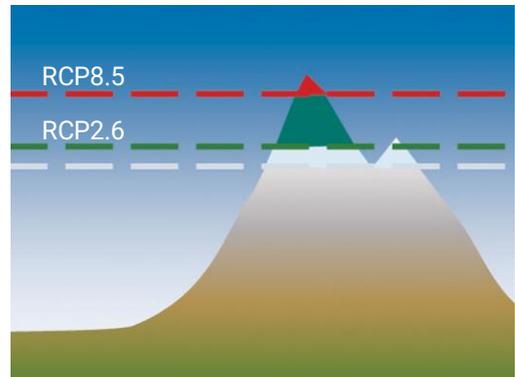


Figura 6. La isoterma de cero grados actual (línea plomo), y hacia fines del siglo XXI, asumiendo los escenarios de emisión RCP2.6 (línea verde) y RCP8.5 (línea roja). Los colores de las bandas de elevación verde y rojo simbolizan altitudes por encima de la isoterma de cero grados según escenario RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente.

La figura 7 muestra la ubicación actual y proyectada de la isoterma de 0°C en las cordilleras Blanca, Vilcanota y Central, según escenario de emisión. Aproximadamente el 15% del área glacial de las cordilleras se encuentra por debajo de la altura de congelación actual (temporada húmeda). Este porcentaje está compuesto principalmente por lenguas glaciares o cubiertas con detritos. Si se asume el escenario más optimista (RCP2.6), el 50% del área glacial actual estará por debajo de ese nivel, lo que implicaría la pérdida de la mitad de la superficie hacia fines del siglo XXI. Con el escenario más pesimista (RCP8.5), únicamente pequeñas áreas glaciares y neviza de las cumbres más altas podrán ser conservados. El asumir el escenario pesimista conlleva a un nivel de congelación por encima de las cumbres glaciares más altas de la cordillera Central. En la actualidad, pequeños glaciares de elevaciones bajas se encuentran en desequili-

brio climático y desaparecerán durante las siguientes décadas (Vuille *et al.*, 2008; Schauwecker *et al.*, 2014).

Algunas investigaciones exhiben la posibilidad futura del incremento de las precipitaciones en

la región. En teoría, un aumento de la precipitación podría compensar el retroceso glaciar por un mayor calentamiento ambiental. Sin embargo, es probable que el aumento de la precipitación sólida no sea suficiente para equilibrar el derretimiento acelerado (Schauwecker *et al.*, 2014).

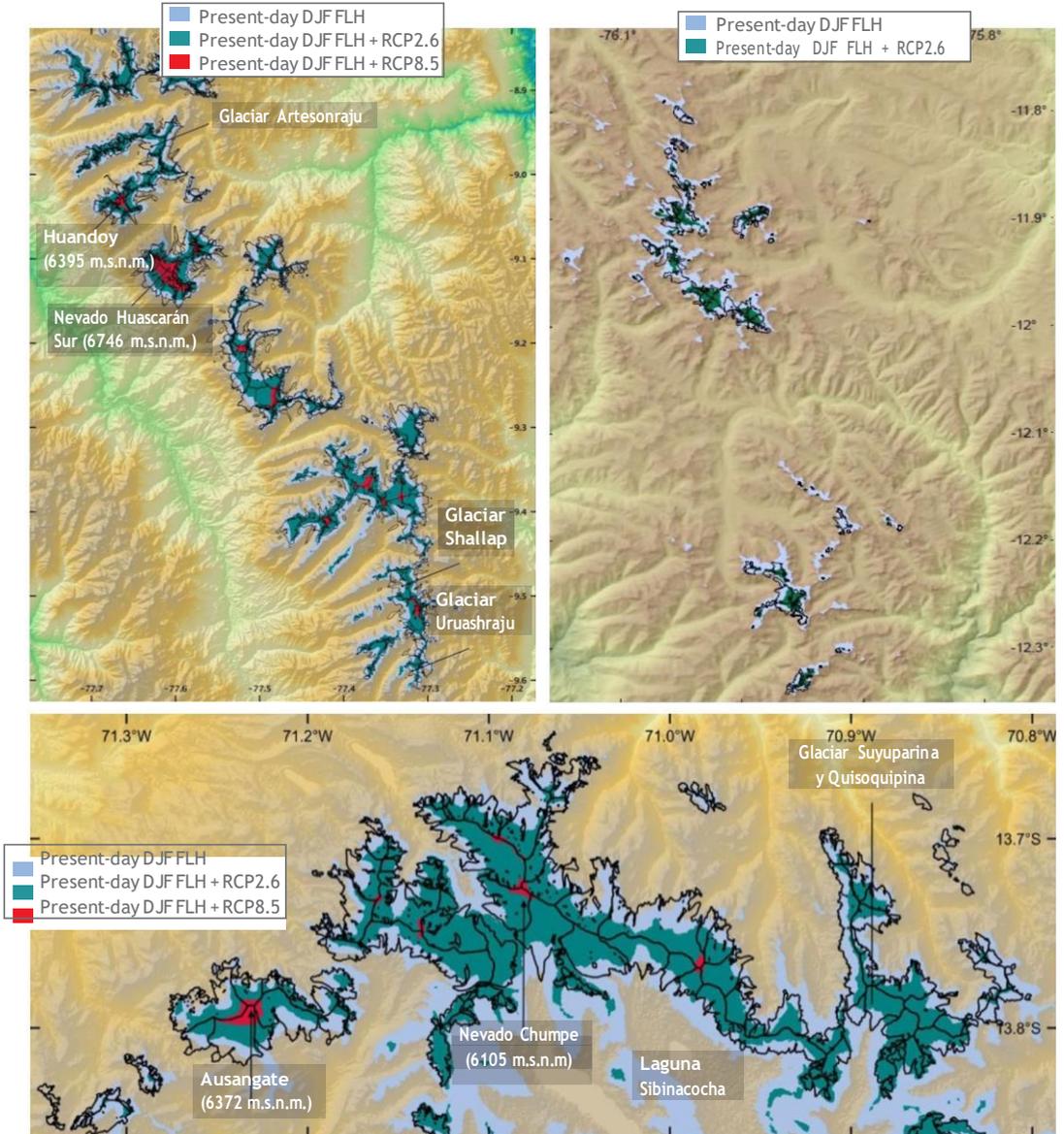


Figura 7. La isoterma de cero grados en la cordillera Blanca (superior izquierda), Central (superior derecha) y Vilcanota (inferior centro). El color azul claro simboliza las elevaciones que están actualmente por encima de la altura de congelación. Verde y rojo simbolizan las elevaciones que estarán por encima de la isoterma hasta fines del siglo XXI asumiendo los escenarios de emisión RCP2.6 y RCP8.5, respectivamente. Líneas negras indican los límites de los glaciares. "Present-day DJF FLH": Isoterma de cero grados actual (dic-feb) (Schauwecker *et al.*, 2017).

La figura 8 muestra la hipsografía del área glaciar de las cordilleras Blanca, Vilcanota y Central. La distribución del área glaciar reafirma lo expuesto en párrafos anteriores sobre la desaparición inminente de los glaciares de la cordillera Central con el RCP8.5. Se concluye que la tasa de retroceso glaciar depende del escenario. Si se consigue reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el mayor porcentaje de glaciares peruanos no desaparecerá por completo.

La comparación del porcentaje del área glaciar por debajo del isocero, según los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, se muestra en la tabla 1. El rango (Min – Media – Max) deriva del grado de incertidumbre de los diferentes modelos climáticos (figura 4).

Las cifras expuestas permiten deducir que, con el escenario RCP2.6, la conservación del casi 50% del área glaciar actual hacia fines del siglo XXI presenta un rango de incertidumbre del 30%. Según el escenario RCP8.5, únicamente entre 1 a 5% del área glaciar permanecerá en las cumbres más altas, con una incertidumbre del 15%. En la Cordillera Central, la pérdida relativa del área glaciar será aún mayor. Esta estimación es aproximada, ignorando otros factores (p. ej., tiempo de reacción del glaciar, topografía del terreno y la dinámica del flujo glaciar) y variables climáticas importantes. Para una estimación más adecuada, se requiere modelos físicos distribuidos que consideren estos elementos.

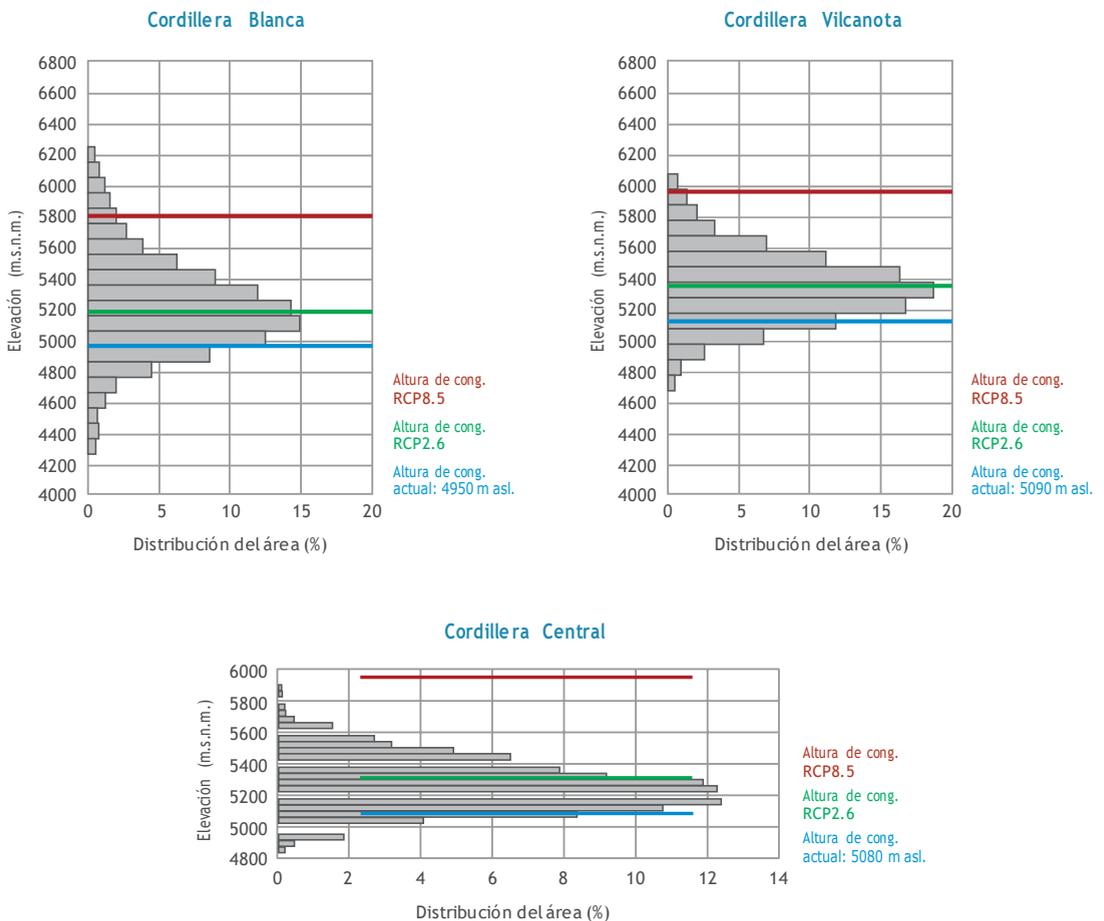


Figura 8. Hipsografía del área glaciar de la cordillera Blanca, cordillera Vilcanota y cordillera Central; altura de congelación actual y futura (asumiendo RCP2.6 y RCP8.5).

	RCP2.6			RCP8.5		
	Min	Media	Max	Min	Media	Max
Cordillera Blanca	25	49	77	1	5	22
Cordillera Vilcanota	18	47	80	0	1	14
Cordillera Central	1	37	74	0	0	5

Tabla 1. Comparación de porcentajes de área glaciaria situada por encima de la altura de congelación futura (asumiendo RCP2.6 y RCP8.5), en referencia al estado actual. Las áreas relativas se presentan con rangos de incertidumbres (Min-Media-Max). La media corresponde al aumento medio de la altura de congelación según los modelos climáticos, mientras que el Min y Max corresponden a los mayores o menores cambios proyectados por los mismos.

UN POSIBLE INDICADOR AMBIENTAL: EL AEROSOL

Otro posible indicador a considerar en el grado de retroceso glaciario está directamente relacionado con la contaminación ambiental. Recientes estudios (2016) desarrollados por la UGRH-ANA y financiados por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD, por sus siglas en francés), analizaron los componentes físico-químicos de aerosoles¹ (sedimentos) depositados en las zonas de ablación de los glaciares Artesonraju, Yanamarey y Pastoruri (cordillera Blanca). Estudios que involucran un análisis de la concentración de aerosoles en la nieve permiten comprender la relación albedo-energía implicada en procesos de derretimiento glaciario. Cambios en esta relación deben ser incorporados en los modelos climáticos para obtener resultados más certeros sobre la situación glaciaria futura.

El análisis de las condiciones fisicoquímicas de los sedimentos depositados en la superficie de ablación determinó un pH relativamente ácido del polvo hallado. Asimismo, los resultados evidenciaron la presencia de altas concentraciones de nutrientes (fosfatos y nitratos) y otros no metales, tales como Calcio (Ca), Potasio (K), Sodio (Na) y Fósforo (P). La muestra de sedimentos también constató la presencia de metales sobre la superficie de ablación de los tres glaciares. Entre los elementos encontrados, se destacan las concentraciones de Hierro (Fe), Aluminio (Al), Manganeseo (Mn), Talio (Tl), Arsénico (As), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Cobre (Cu). En los tres glaciares, la alta concentración del hierro excedió los valores límite de detección de los equipos de análisis.

Glaciario	pH	Fosfato	Nitrato	Sulfato	Ca	K	Na	P
Artesonraju	5.09	108.75	20.23	180	591.8	1867.4	151.1	768.1
Yanamarey	6.29	0.3	13.35	212	1698.6	1916.2	249.4	1808.2
Pastoruri	6.12	0.3	8.25	426.5	695.5	820.8	100.2	732.9

Glaciario	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
Artesonraju	8454	21.9	36	5.25	5.5	6.23	59.64	>20000	229.32	30.6	7.25	62.39	12	287.1	31.6	94.9
Yanamarey	14901	363	43	18.7	4.9	12	315.3	>20000	203.09	23	5.91	225.8	34	236.3	50	221
Pastoruri	7072	153	25	41.9	2.6	1.16	65.74	>20000	154.2	2	3.39	236.7	11	101.5	26.9	112

Tabla 2. pH y concentraciones de nutrientes, no metales y metales (mg/kg) encontrados en sedimentos depositados sobre la superficie de zonas de ablación de los glaciares Artesonraju, Yanamarey y Pastoruri (UGRH-ANA, 2016).

¹Los aerosoles se constituyen de partículas suspendidas en estado sólido (polvo, humo) o líquido, cuyo tamaño puede variar entre 0.002 a más de 100 µm (Hinds, 1999). Si bien el origen de estos materiales aún no está confirmado, anteriores investigaciones a nivel mundial han demostrado la acción de los vientos y flujos atmosféricos en el transporte y desplazamiento de materiales, desde pocos hasta miles de kilómetros de distancia.

El presente análisis fue complementado con una investigación experimental en el glaciar Artesonraju. El estudio consistió en la reversión del albedo para conservar masa glaciar. El albedo es el porcentaje de radiación solar reflejada por cualquier superficie y/o cuerpo terrestre. Los colores claros poseen un mayor albedo al reflejar

en mayor porcentaje la energía solar, lo que genera un efecto de enfriamiento en aquella superficie; mientras que los colores oscuros poseen un menor albedo y por ende absorben en mayor medida la luz, lo que genera un efecto de calentamiento.

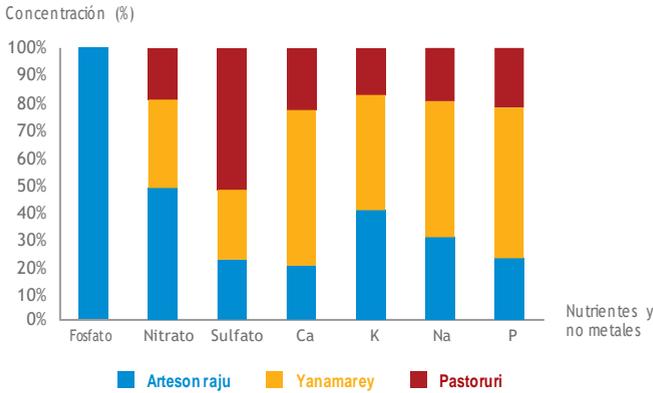


Figura 9. Porcentajes de concentraciones de nutrientes y no metales presentes en las muestras de sedimentos de la zona de ablación de los glaciares Artesonraju, Yanamarey y Pastoruri (UGRH-ANA, 2016).

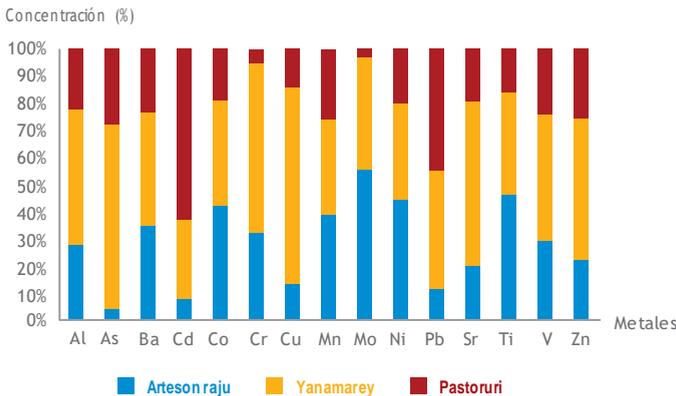


Figura 10. Porcentajes de concentraciones de metales presentes en las muestras de sedimentos de la zona de ablación de los glaciares Artesonraju, Yanamarey y Pastoruri (UGRH-ANA, 2016).

El método de reversión del albedo se desarrolló a partir de la limpieza de un área de 1m² cercana a una estación meteorológica, de donde se extrajo una capa de 15 cm de espesor que contenía los aerosoles (sedimentos depositados) de la superficie de la zona de ablación glaciar. La medición del albedo del área experimental fue

evaluada para un periodo de 4 meses (2 de junio a 24 de octubre de 2016). A modo de comparación, se realizó la medición del mismo parámetro en un área no intervenida (con aerosoles en su superficie). El albedo fue calculado mediante el uso de un piranómetro con la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{Sin}{Sout}$$

Donde:

α : Albedo

Sin: Radiación solar de onda corta incidente

Sout: Radiación solar de onda corta reflejada

Tiempo

Meses ▲

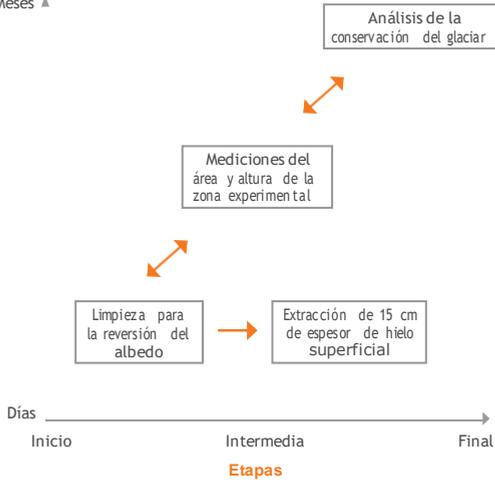


Figura 11. Procesos para la reversión del albedo de la superficie glaciar y análisis temporal (UGRH-ANA, 2016).

Durante el periodo de prueba se realizaron mediciones en tres distintas fechas. Los resultados obtenidos mostraron que el área limpia de superficie glaciar (sin aerosoles) presentaba valores de albedo superiores a los presentados en el área sin intervención. Si bien los valores de albedo fueron calculados únicamente para el área sin intervención, lo expuesto anteriormente pudo ser comprobado a partir de la altura de masa glaciar conservada en el área experimental. Iniciándose con una altura de 0 m (2 de junio), para la segunda fecha de evaluación se había conservado 1.5

m, mientras que en el final del periodo de prueba se tenía 2.1 m de altura glaciar preservada en el área intervenida. Con la reversión del albedo en esta área, se logró finalmente conservar un 58% de la altura (masa) del glaciar Artesonraju durante el periodo de estudio (figura 12). Este análisis dio muestra que los aerosoles son indicadores a considerar en la aceleración de la fusión glaciar por la absorción de la radiación solar directa y, por ende, en el estado futuro de los glaciares del Perú.



Fecha	Altura conservada (m)	Altura total conservada (m)	Espesor de hielo derretido (m)	Espesor total de hielo derretido (m)
2/06/16	0	0	0	0
17/08/16	1.5	1.5	-1.48	-1.48
24/10/16	0.6	2.1	-2.16	-3.64

Figura 12. Mediciones de la altura conservada con balizas de control en el área experimental. Las fotografías muestran el valor del albedo del área circundante al área experimental, así como la altura de masa preservada en ésta última según cada fecha de medición (UGRH-ANA, 2016).

CONCLUSIONES

EL FUTURO DEL CLIMA

Precipitación:

- Existen incertidumbres considerables sobre futuras precipitaciones.
- La mayoría de los estudios concuerdan en que, durante la estación seca, la precipitación tiende a disminuir. Sin embargo, durante la estación de lluvias no hay una tendencia inequívoca. Mientras que los modelos climáticos indican que la precipitación aumentara durante la estación húmeda, los cambios proyectados en la circulación global indican una disminución importante de la precipitación durante aquel periodo (Neukom *et al.*, 2015).

Temperatura del aire:

- El aumento de la temperatura ambiental depende del modelo y del escenario de emisión.
- Asumiendo un escenario con grandes emisiones (RCP8.5), se estima un incremento de 4.5-5°C hacia fines del siglo XXI, comparado con el clima actual.

Altura de congelación:

- Con el escenario de emisión más optimista RCP2.6, el futuro aumento en la altura de congelación es comparable con el aumento observado en las últimas décadas.
- Con el escenario de emisión más pesimista RCP8.5, el aumento sería aproximadamente tres veces más fuerte del escenario optimista.

EL FUTURO DE LOS GLACIARES

Indicador climático: la altura de congelación

- En regiones con poca disponibilidad de data y medición, la altura de congelación puede ser utilizada como indicador de la extensión del glaciar (principalmente en época de lluvias). Ello, a partir de los resultados obtenidos por los modelos climáticos globales y los escenarios de emisión.
- Asumiendo un escenario de emisión optimista RCP2.6, los glaciares van a continuar retrocediendo y se va a perder, como mínimo, la mitad del área total glaciar para finales del siglo XXI. Se presenta un rango de incertidumbre del 30%.
- Asumiendo un escenario de emisión pesimista RCP8.5, únicamente entre 1 a 5% del área glaciar permanecerá en las cumbres más altas, con una incertidumbre del 15%. El asumir el escenario pesimista conlleva a un nivel de congelación por encima de las cumbres glaciares más altas de la cordillera Central.
- Glaciares pequeños y de elevaciones bajas desaparecerán en los próximos años y décadas.

Un posible indicador ambiental: el aerosol

- Los aerosoles depositados en superficies glaciares disminuyen el albedo correspondiente, siendo una variable importante de aceleración de fusión y derretimiento glaciar. Trabajos experimentales en glaciares peruanos permiten constatar este efecto.

REFERENCIAS

- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2012). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Autoridad Nacional del Agua: Lima.
- Boulanger, J.-P., Martínez, F. & Segura E. (2006). Research for mountain area development: climatic fluctuations in the mountains of the Americas and their significance. *Ambio*, 29, 233–259.
<https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.7.364>
- Bradley, R. S., Keimig, F. T. & Diaz H. F. (2004). Projected temperature changes along the American cordillera and the planned GCOS network. *Geophysical Research Letters*, 31, L16210.
<https://doi.org/10.1029/2004GL020229>
- Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F. & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755-1756.
<https://doi.org/10.1126/science.1128087>
- Bøggild, C., Brandt, R., Brown, K., & Warren, S. (2010). The Ablation Zone in Northeast Greenland: Ice Types, Albedos and Impurities. *Journal of Glaciology*, 56(195), 101–13.
<https://doi.org/10.3189/002214310791190776>
- Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauweckers, S., Braendle, E., Giraldez, C. and Cochachin, A., 2017. Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in Deglaciating Areas of the Peruvian Andes: Approach, First Results and Perspectives for Adaptation to Climate Change. *Water*, 9(5), 336.
<https://doi.org/10.3390/w9050336>
- Georges, C. (2004). Climate in support of the UNFCCC. Reports GCOS - 82 (WMO/TD No. 1143). Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 36, 100-107.
- Hastenrath, S., & Ames, A. (1995). Recession of Yamanarey Glacier in Cordillera Blanca, Peru, during the 20th century. *Journal of Glaciology*, 41(137), 191–196.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology Properties Behavior and Measurement of Airborne Particles*, Second ed. John Wiley and Sons, New York.
- Hulme, M. & Sheard, N. (1999). *Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte*. Unidad de Investigación Climática: Norwich.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge and New York.
- Juen, I., Kaser, G., & Georges, C. (2007). Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global and Planetary Change*, 59(1-4), 37-48.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.038>
- Kaser, G., Ames, A., & Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, 136–140.
<https://doi.org/10.3189/S0260305500008430>
- Neukom, R., Rohrer, M., Calanca, P., Salzmann, N., Huggel, C., Acuña, D., Christie, D. A., & Morales, M.S. (2015). Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000–2100. *Environmental Research Letters*, 10(8).
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084017>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J. E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Ménégoz, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., & Wagnon,

P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multicentury perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102.

<https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>

Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B. G., Burns, P., & Portocarrero, C. (2013). Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere*, 7, 103-118.

<https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Huggel, C., Endries, J., Montoya, N., Neukom, R., Perry, B., Salzmann, N., Schwarb, M., & Suarez, W. (2017). The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 122(10), 5172-5189.

<https://doi.org/10.1002/2016JD025943>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2009). *Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Urubamba para el año 2100. Resumen técnico.*

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2011). *Escenarios de Cambio Climático para las Regiones Cusco y Apurímac 2030 y 2050.*

Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & Gonzales, P. (2006). Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research letters*, 33(13), L13707.

<https://doi.org/10.1029/2006GL025759>

Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., & Bradley, R. (2008), Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth Science Reviews*, 89(3-4), 79-96.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.04.002>



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Embajada de Suiza en el Perú

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



**PROYECTO
GLACIÈRES**
Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades



University of
Zurich UZH



METEODAT

crealp

ANA
Autoridad Nacional del Agua