



PROYECTO GLACIARES+

Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL CAÑETE Y EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS¹

El derretimiento y retroceso glaciar en alta montaña es un proceso agravado por los efectos del cambio climático (WGMS, 2012; Gardner, 2013). La disminución de la cobertura de hielo y la aparición de nuevas masas de agua, productos del mencionado proceso, pueden afectar e incidir gravemente en el sistema socioeconómico y ecosistémico local (Bradley et al., 2006; Drenkhan et al., 2015). La transformación del contexto se verá reflejada en una relación crítica de oferta y demanda hídrica, especialmente en regiones donde se exhibe escasez de agua (estacional) debido a las condiciones hidroclimáticas actuales.

El Proyecto Glaciares+ busca disponer de una herramienta de análisis hidrológico con la cual se identifique la actual y futura reserva hídrica, así como los riesgos potenciales a nivel cuenca. Un primer estudio y desarrollo de este instrumento fue evaluado para la cuenca del río Cañete, donde hasta el momento no se habían ejecutado investigaciones similares. El estudio, cuyos resultados han sido resumidos en el presente brief, tuvo como finalidad: 1) construir y calibrar un modelo hidrológico que permita evaluar la disponibilidad hídrica actual (tanto de las zonas glaciares como no-glaciares), y 2) analizar el impacto del cambio climático bajo determinados escenarios de emisión.

LA CUENCA DEL RÍO CAÑETE Y EL MODELO HIDROLÓGICO.

La cuenca del río Cañete se ubica en las provincias de Cañete y Yauyos, departamento de Lima, Perú. Presenta una superficie total de 6 192 km², de la cual sólo 15 km² (aproximadamente un 0.24%) corresponde a área glaciar. Este espacio se constituye de glaciares de pequeña envergadura localizados a grandes altitudes, desde los 3 700 m.s.n.m. En relación a la precipitación, la cuenca del río Cañete exhibe regiones con condiciones muy secas (parte baja) como muy húmedas (parte alta).

El modelo hidrológico² de la cuenca ha sido elaborado con el software RS MINERVE. Dicho software permite si-

mular la formación y el transporte de flujos mediante la modelización hidráulica e hidrológica según un esquema conceptual semidistribuido³. RS MINERVE toma en consideración ciertos elementos hidráulicos (p. ej., embalses, compuertas y aliviaderos para crecidas) así como procesos hidrológicos particulares de las partes glaciares y no glaciares (p. ej., fusión de nieve, flujos superficiales y flujos subterráneos debidos a la infiltración).

Para la elaboración del modelo, la información geográfica disponible (Modelo Digital del Terreno con resolución de 90 m) fue integrada con elementos hidráulicos

¹ El presente resumen ejecutivo ha sido desarrollado en base al informe *Modelización hidrológica de la cuenca del Cañete y evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos*, ejecutado por J. Fluixá Sanmartín, J. García Hernández, C. Huggel, H. Frey, R. Muñoz, L. Barriga, M. Cerna y J. Núñez.

² Un modelo hidrológico es una representación de la realidad que permite simular los procesos lluvia-escorrentía en una cuenca con distintos grados de complejidad, desde la aplicación de ecuaciones simples hasta el uso de potentes softwares de cálculo. El modelo elaborado permite conocer los procesos hidrológicos y las aportaciones provenientes de las zonas glaciares y no-glaciares, evaluar la disponibilidad hídrica actual e incluso prever a largo plazo posibles aportaciones de la cuenca según futuras condiciones climáticas.

³ En este tipo de modelos, la cuenca que se quiere modelizar se subdivide en varias unidades o subcuencas, y en cada unidad se plantea uno de los modelos disponibles. Una de las ventajas del uso de un modelo conceptual semidistribuido es que considera la heterogeneidad de las distintas subcuencas, lo que permite mayor precisión en la modelización de los procesos hidrológicos. Asimismo, requiere de una menor cantidad de información morfológica del suelo, otorgando mayor rapidez en los distintos cálculos (calibración, validación, simulación, etc.).

(de gran influencia en la gestión de los caudales del río Cañete). En particular, se consideraron los embalses de Paucarcocha y Capilluca de la parte alta y media de la cuenca, respectivamente. Para un uso eficiente del modelo, y atendiendo a la orografía y a la presencia de los elementos hidráulicos, la cuenca se dividió en 26 subcuencas. Cada subcuenca, a su vez, fue subdividida en bandas de altitud de 400 m de desnivel, a partir de lo cual se recogieron los procesos dependientes (p. ej., variación de la temperatura y evapotranspiración). En total, se generaron 116 bandas de altitud, base para la modelización en RS MINERVE.

La ejecución del proceso combinó dos modelos hidrológicos:

1) GSM (Glacier Snow Melt) para la modelización de la parte glaciar, y

2) SOCONT (Soil CONTRIBUTion) para la modelización de la parte no-glaciar de la cuenca. Para facilitar la

gestión de la gran cantidad de elementos hidrológicos creados (14 elementos glaciares y 102 elementos no-glaciares), los objetos resultantes de ambos modelos fueron agrupados en 34 submodelos. A partir de esta división, se crearon y añadieron los restantes elementos hidráulicos.

Todos los elementos fueron finalmente conectados, en el sentido de la corriente, hasta su desembocadura en el océano Pacífico.

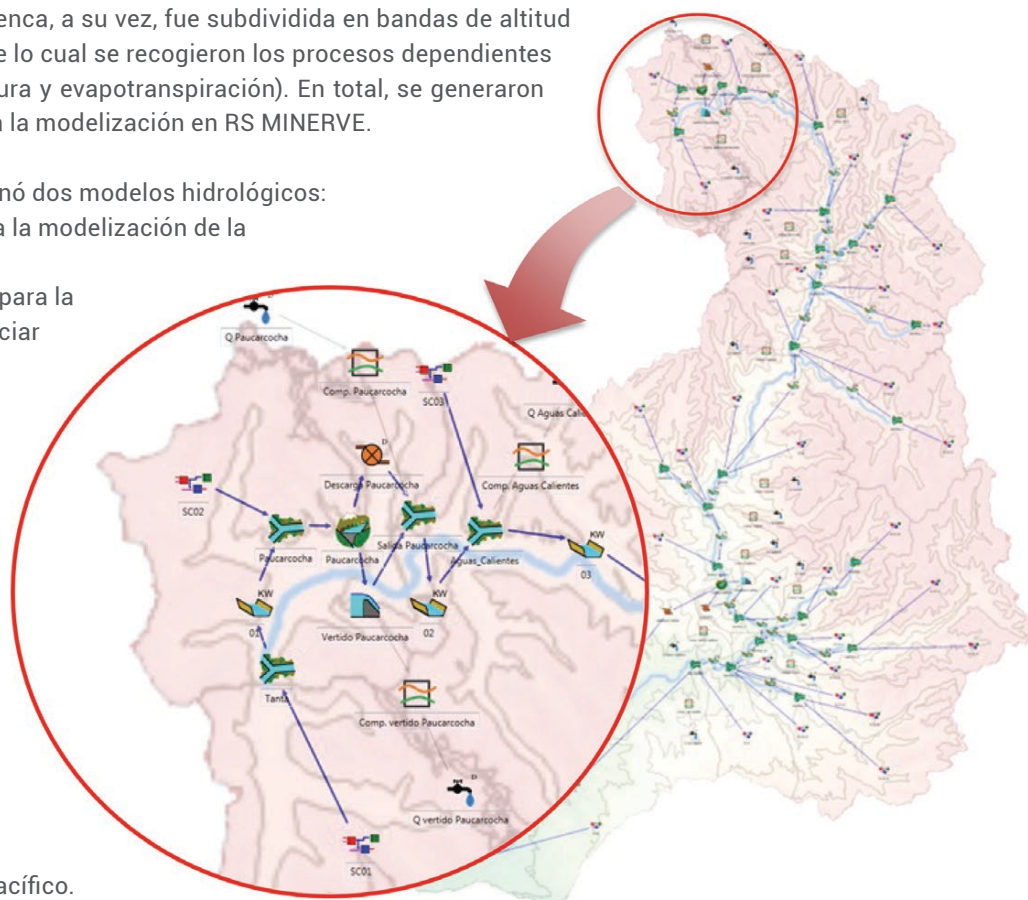


Figura 1. Modelo hidrológico superpuesto a la cuenca de estudio.

La calibración del modelo construido (es decir, la identificación de los valores de sus parámetros para los cuales la serie de datos simulados se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados) hizo uso de:

- Datos meteorológicos de las estaciones más cercanas a la cuenca, estaciones que son gestionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La elaboración del modelo precisaba de data confiable de precipitación y temperatura. La consideración de este requisito derivó en la selección de 11 series completas de datos de precipitación y 6 de temperatura para el proceso de calibración.
- Datos hidrológicos de los caudales observados en distintos puntos de la cuenca. Estos datos fueron recogidos, procesados y suministrados por CELEPSA/Ambiand.

El periodo de referencia utilizado para la calibración del modelo y la evaluación de los recursos hídricos corresponde al lapso de tiempo en el que se dispone de una

mayor cantidad de datos hidrometeorológicos fiables. Tras un análisis de las series de estos datos, se decidió considerar el periodo 2004-2016 como referencia. La calibración del modelo consideró la división de la cuenca en zonas (alta, media y baja) y la subdivisión en subzonas. Cada subzona se calibró de manera independiente con la estación de aforo inmediatamente disponible aguas abajo. La corta longitud de las series de caudales aforados forzó a utilizar una única fase de calibración, sin posibilidad a una validación posterior.

La calidad del modelo resultante se evaluó mediante el uso de indicadores de eficiencia (p. ej., índice de Nash o Kling-Gupta Efficiency), los cuales estiman cuánto se parecen los caudales simulados a los realmente observados. A mayor similitud, mayor valor del indicador. Pese a la limitada cantidad de data disponible, el modelo hidrológico construido para la cuenca del río Cañete ofrece resultados adecuados. Se exceptúan un par de zonas donde no se consiguió una óptima calidad en la calibración, principalmente debido a la falta de registros hidrológicos.

Una vez efectuadas las calibraciones por subzonas, se integraron los valores de los parámetros medidos en el modelo completo de la cuenca del río Cañete. Para el periodo de referencia, los resultados muestran la poca influencia de las partes glaciares en la aportación hídrica de la cuenca, consecuencia de su escasa presencia en el territorio (15 km² de superficie glaciar frente a 6 000 km² de superficie no-glaciar). Ello es concordante con las aportaciones medias de la subcuenca de entra-

da al embalse Capilluca (donde las partes no-glaciares aportan entre el 97 y 100% de la reserva hídrica). Sin embargo, en época seca (junio a septiembre) se exhibe una contribución no despreciable, proveniente de la fusión glaciar y de nieve de la parte alta de la cuenca, que aporta directamente al embalse de Paucarcocha (figura 2). Este aspecto es relevante, al ser el embalse de Paucarcocha (de 109 hm³ de capacidad) un importante regulador hídrico para la cuenca del río Cañete.

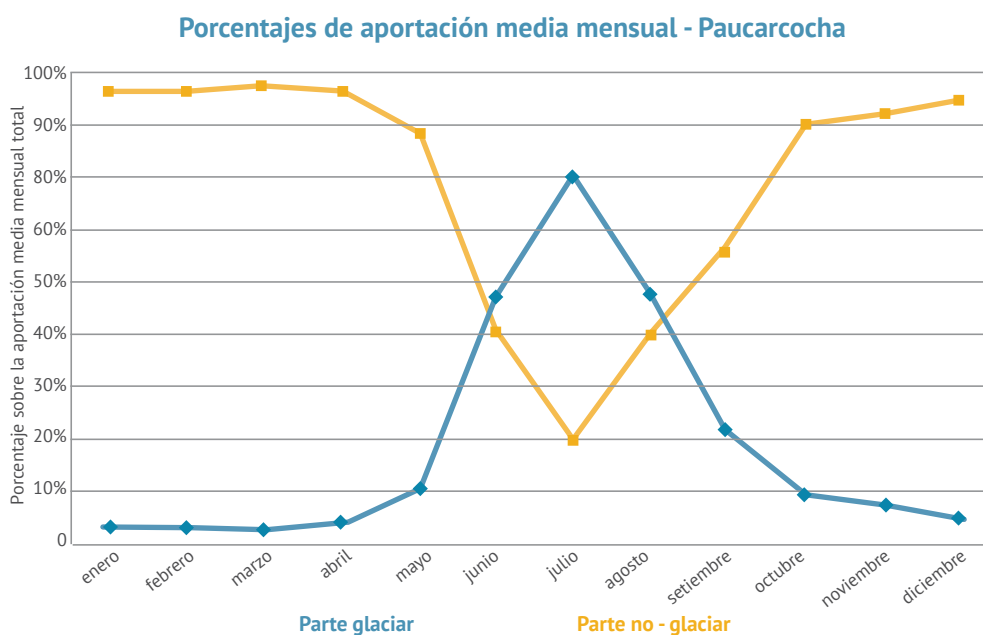


Figura 2. Porcentajes sobre la aportación media mensual de la parte glaciar y no-glaciar al embalse Paucarcocha.

LA INTEGRACIÓN DE LAS NUEVAS CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

La incorporación de futuras condiciones meteorológicas y glaciares en el modelo hidrológico elaborado para mediano (mitad de siglo XXI) y largo plazo (finales de siglo XXI), implicó la revisión de la siguiente documentación técnico-científica:

- **Cañete: Escenarios de cambio climático (Meteodat, 2016).** Estudio que utiliza proyecciones climáticas para obtener cambios en las variables meteorológicas futuras, en particular en la precipitación y la temperatura. Propone la utilización de dos modelos climáticos (GISS-E2-H_p3 y MPI-ESM-MR) bajo dos supuestos de emisión (RCP2.6, optimista; y RCP8.5, pesimista).
- Informe **El futuro del clima y de los glaciares en el Perú (Schauwecker, 2016)** y artículo científico **The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indica-**

tor for present and future glacier extents (Schauwecker et al., 2017). Ambos trabajos investigan el cambio esperado en las superficies glaciares del Perú hacia finales del siglo XXI.

La información obtenida de los mencionados estudios fue incorporada aplicando cambios en las variables meteorológicas (precipitación y temperatura) y cambios en las áreas glaciares respecto de las condiciones actuales. Así, se obtuvieron las aportaciones hídricas de la cuenca para dos horizontes temporales: periodo 2051-2075 y periodo 2076-2100.

A nivel general, los resultados muestran la disminución de los recursos hídricos disponibles hasta un 25% hacia finales de siglo. Dependiendo del modelo climático y el escenario de emisión considerado, los resultados muestran una mayor o menor reducción del caudal en los me-

ses húmedos (en pocos casos se exhibe pequeños aumentos). En términos relativos, se puede apreciar que la

disminución será mayor en los meses del periodo seco, lo cual acentuará la temporal escasez hídrica.

		RCP2.6	RCP8.5
2051-2075	GISS-E2-H_p3	-13.6%	-19.9%
	MPI-ESM-MR	-0.6%	-8.9%
2076-2100	GISS-E2-H_p3	-17.7%	-24.0%
	MPI-ESM-MR	+1.6%	-1.6%

Tabla 1. Variación del volumen medio anual de aportación respecto del estado actual

El efecto del retroceso glaciar es poco significativo en la cuenca del río Cañete (menos del 1% sobre las medias anuales). Así, los mayores impactos provienen de los cambios en las variables meteorológicas futuras (precipitación y temperatura). Sin embargo, en el caso de la cuenca vertiente al embalse Paucarcocha, la influencia del retroceso glaciar sobre la disponibilidad hídrica es mucho más importante, principalmente en época seca o de estiaje. Este caso ilustra el fenómeno de reducción del agua

disponible, susceptible de producirse a futuro en cuencas andinas con considerable extensión de superficie glaciar.

Finalmente, se observa una cierta dispersión de los resultados (figuras 3 y 4), fruto de las incertidumbres intrínsecas a los modelos climáticos utilizados. Pese a que la tendencia lleva a esperar un descenso de los caudales en la cuenca, los cambios a nivel mensual pueden diferir entre distintos supuestos.

Variación aporte - Cuenca Cañete (escenario RCP2.6)

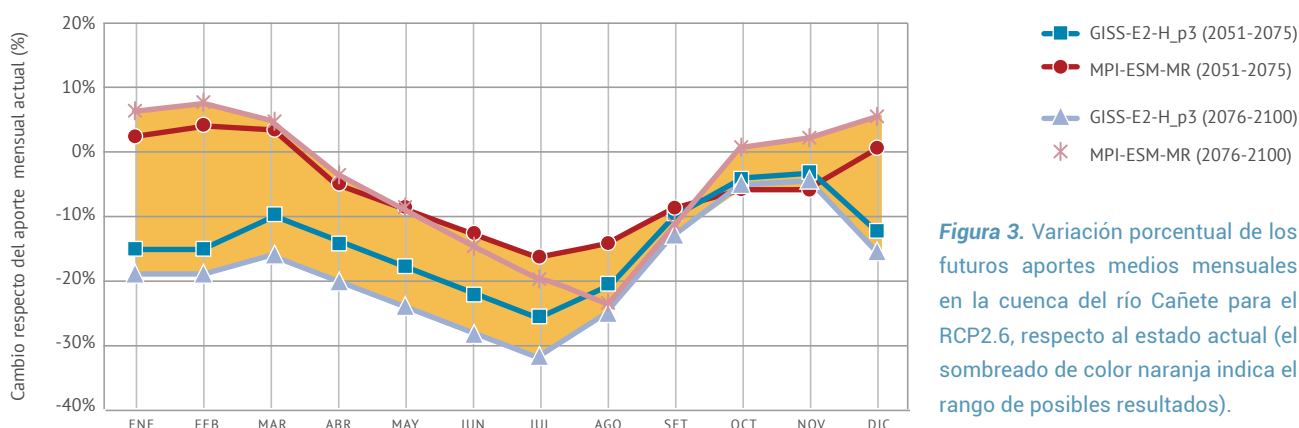


Figura 3. Variación porcentual de los futuros aportes medios mensuales en la cuenca del río Cañete para el RCP2.6, respecto al estado actual (el sombreado de color naranja indica el rango de posibles resultados).

Variación aporte - Cuenca Cañete (escenario RCP8.5)

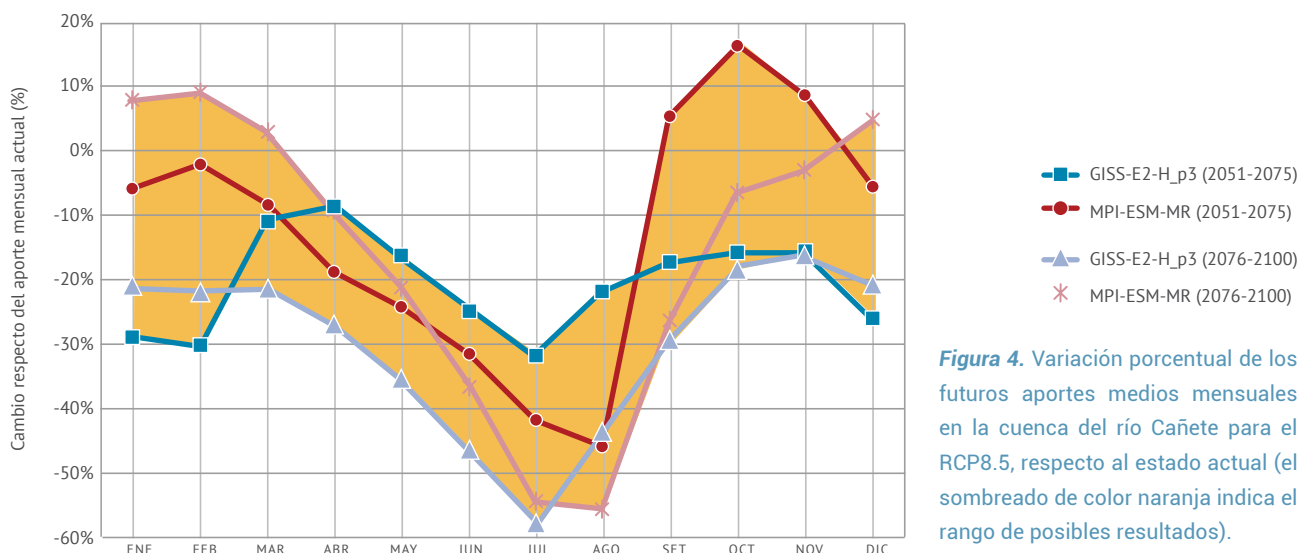


Figura 4. Variación porcentual de los futuros aportes medios mensuales en la cuenca del río Cañete para el RCP8.5, respecto al estado actual (el sombreado de color naranja indica el rango de posibles resultados).

CONCLUSIONES

- El modelo hidrológico de la cuenca del río Cañete fue elaborado con el software RS MINERVE, haciendo uso de data suministrada por CARE, Ambiad y CELEPSA, así como de data seleccionada del SENAMHI.
- El modelo se divide, por un lado, en subcuencas y, por otro, en zonas y subzonas para facilitar la calibración del mismo y la gestión de los resultados. La calibración del modelo resultó satisfactoria para los propósitos del estudio.
- El modelo calibrado representa una herramienta que permite evaluar los recursos hídricos a nivel de cuenca y por zonas, y analizar escenarios hidrometeorológicos futuros a partir de lo cual se planteen estrategias de adaptación para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos.
- Se exhibe una limitada influencia de las partes glaciares frente a las no-glaciares en la aportación de agua a nivel de cuenca. Esto se debe principalmente a la extensión de dichas partes: 15 km² de superficie glaciar frente a 6 000 km² de superficie no-glaciar. A pesar de ello, las zonas glaciares sí juegan un papel importante en la contribución hídrica que llega al embalse de Paucarcocha, superando incluso las aportaciones no-glaciares durante el periodo seco (representan hasta un 80% del total aportado).
- Los impactos de los cambios en las condiciones meteorológicas (en particular, en las temperaturas y precipitaciones), y del retroceso glaciar sobre los recursos hídricos futuros, se han analizado tanto de forma independiente como conjunta. Para ello, se ha considerado dos horizontes temporales (2051-2075 y 2076-2100) y dos escenarios de emisión: uno optimista (RCP2.6) y otro pesimista (RCP8.5). El análisis desarrollado indica un mayor impacto hídrico por parte de las futuras variaciones climáticas.
- Al integrar las condiciones meteorológicas y glaciares en el modelo hidrológico, se observa una disminución generalizada del aporte hídrico en la cuenca del río Cañete para ambos horizontes temporales. No obstante, el cambio sería más marcado hacia finales de siglo XXI (desde un 1.6% de aumento hídrico con el escenario optimista, hasta un 24% de disminución con el escenario pesimista).

RECOMENDACIONES

- **La calidad del modelo elaborado** permite estudiar los procesos hidroclimáticos más relevantes que se dan en la cuenca del río Cañete. Sin embargo, este modelo **está sujeto a mejoras potenciales que dependen de la disponibilidad de data** registrada en las diferentes estaciones meteorológicas e hidrológicas de la cuenca. La mejora del modelo es un proceso continuo que debe adaptarse a las necesidades de cada usuario.
- Los estudios de proyecciones climáticas utilizados sugieren una gran **incertidumbre en las previsiones**. Dicha incertidumbre queda plasmada en los resultados de los impactos en los recursos hídricos y se debe tener en cuenta en el momento de plantear medidas de adaptación que sean ampliamente válidas para todos los supuestos contemplados. A pesar de ello, la tendencia global a la disminución de los caudales queda patente.
- La futura situación esperada para la cuenca del río Cañete es de disminución de la disponibilidad hídrica, lo que corrobora la **necesidad de disponer de herramientas de gestión de manera óptima y adaptada** a cada caso de estudio.
- Para conocer el impacto del cambio climático en el grado de satisfacción de los requerimientos locales en recursos hídricos, **es necesario disponer de estudios que evalúen las demandas locales de agua**. Una vez esta información esté disponible, será necesario integrarla en el modelo y evaluar los cambios futuros en los aportes a cada punto de demanda.

REFERENCIAS

Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to Water Supplies in the Tropical Andes. *Science*, 312 (5781), 1755 - 1756.
<http://doi.org/doi:10.1126/science.1128087>

Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water - related changes in the Andes of Peru. *WIRES Water*, 2(6), 715 - 733.
<http://doi.org/10.1002/wat2.1105>

García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A., Claude, A., Roquier, B., & Boillat, J. L. (2016). *RS MINERVE - Technical manual v1.7*. RS MINERVE Group: Zurich.

Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., & Wahr, J. (2013). A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. *Science*, 340(6134), 852-857.

Meteodat. (2016). *Cañete: Escenarios de cambio climático. Informe*. Proyecto Glaciares+: Lima.

Schauwecker, S. (2016). *El futuro del clima y de los glaciares en el Perú. Informe*. Proyecto Glaciares+: Lima.

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>


Slater, A. G. & Clark, M.P. (2006). Snow Data Assimilation via an Ensemble Kalman Filter. *Journal of Hydrometeorology*, 7(3), 478 - 493. <http://doi.org/10.1175/JHM505.1>

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485 - 498. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

World Glacier Monitoring Service (WGMS). (2012). *Fluctuations of Glaciers 2005 - 2010*. WGMS: Zurich.

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).

El proyecto se realiza en estrecha coordinación con la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Centro de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED); y es implementado por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la ANA, gobiernos regionales de Ancash, Cusco y Lima, gobiernos y universidades locales.

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Embajada de Suiza en el Perú

Agencia Suiza para el Desarrollo
y la Cooperación COSUDE



**PROYECTO
GLACIARES+**
Más allá de los riesgos hacia
las oportunidades



University of
Zurich ^{UZH}



crealp

Socios y aliados PG+



Visualice y descargue el informe *Modelización hidrológica de la cuenca del Cañete y evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos*.



Download and view
english version of
the *Executive Brief*.