

Actual y futura disponibilidad del agua en un contexto de inseguridad hídrica en la subcuenca de Parón, cuenca del río Santa, Perú

Marcos Fabio Izaguirre Liviac

Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España

ORCID: 0000-0001-5223-3066

Fabian Drenkhan

Pontificia Universidad Católica del Perú

ORCID: 0000-0002-9443-9596

Martín E. Timaná

Pontificia Universidad Católica del Perú,

Centro de Investigación en Geografía Aplicada (CIGA)

ORCID: 0000-0003-1559-4449

Resumen: La seguridad hídrica en las cuencas andinas depende de una gestión adaptativa del agua ante los impactos glaciohidrológicos y socioeconómicos. La subcuenca Parón en la cuenca del río Santa (Áncash, Perú) representa un caso idóneo en este aspecto. El agua es regulada mediante una compuerta en la laguna Parón, convertida en un punto focal de conflicto social. Este estudio analiza el balance hídrico de esta subcuenca mediante un modelo hidrológico semidistribuido para el presente (2006-2016) y futuro (2030-2050), considerando diferentes escenarios de variación de la precipitación, derretimiento glaciar e incremento de la demanda del agua. Sin regulación de la laguna, la subcuenca entraría en un fuerte déficit hídrico en los meses de estiaje (junio-agosto). Hasta el 2030 (2050), asumiendo una regulación máxima de 2.6 m³/s, un aumento de la precipitación en 15% (35%) y una disminución de la contribución glaciar al caudal en 10% (26%) a nivel anual, la disponibilidad hídrica se reduciría en 37% (35%). En un escenario pesimista con una disminución de la precipitación en 15% (35%), la disponibilidad hídrica se reduciría aún en 47% (56%) anualmente. Estos resultados resaltan la necesidad de mantener un mínimo de caudal de agua (>2 m³/s) socialmente aceptable para evitar niveles

críticos de escasez hídrica en los meses de estiaje y para satisfacer las necesidades de los usuarios de agua locales.

Palabras clave: Retroceso glaciar. Escenarios futuros. Balance hídrico. Seguridad hídrica. Cordillera blanca. Modelo hidrológico.

Current and future water availability in the context of water insecurity in the Parón catchment, Santa River basin

Abstract: Water security in Andean watersheds depends on adaptive water management in the face of glaciohydrological and socioeconomic impacts. The Parón sub-basin in the Santa River basin (Ancash, Peru) is a suitable case in this respect. Water is regulated by a floodgate in the Parón lake, which has become a focal point of social conflict. This study analyzes the water balance of this sub-basin using a semi-distributed hydrological model for the present (2006-2016) and future (2030-2050), considering different scenarios of precipitation variation, glacial melting, and increased water demand. Without regulation of the lake, the sub-basin would enter into a strong water deficit in the dry months (June-August). Until 2030 (2050), assuming a maximum regulation of $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, a 15% (35%) increase in precipitation, and a 10% (26%) decrease in the glacier contribution to the annual flow, water availability would be reduced by 37% (35%). In a pessimistic scenario with a 15% (35%) decrease in precipitation, water availability would still be reduced by 47% (56%) annually. These results highlight the need to keep a socially acceptable minimum water flow ($>2 \text{ m}^3/\text{s}$) to avoid critical levels of water scarcity in the dry months and to address the needs of local water users.

Keywords: Glacier retreat. Future scenarios. Water balance. Water security. Cordillera Blanca. Hydrological model.

Marcos F. Izaguirre Liviac

Licenciado en Geografía y Medio Ambiente por la Pontificia Universidad Católica del Perú. Sus áreas de investigación incluyen las zonas de alta montaña, temas de recursos hídricos, cambio climático, sistemas de información geográfica y teledetección. Actualmente, está cursando un máster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la Universidad Pública de Navarra.

Correo: mizaguirre@pucp.edu.pe

Fabian Drenkhan

Tiene un doctorado en Geografía de la Universidad de Zúrich y un postdoctorado en Recursos Hídricos del Imperial College London. Investiga en la interfaz de glaciología, recursos hídricos y adaptación al cambio climático en los Andes Tropicales. Actualmente, trabaja como docente investigador a tiempo completo en la sección de Geografía y Medio Ambiente en la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Correo: fdrenkhan@pucp.pe

Martín Timaná

PhD. en Ciencias Biológicas (Botánica) por la Universidad de Texas, Estados Unidos. Sus áreas de investigación incluyen la biogeografía de los Andes; ecología vegetal; taxonomía; modelamiento estadístico de la distribución de biodiversidad y el impacto del cambio climático en ecosistemas terrestres. Actualmente, es Profesor Asociado en la sección de Geografía y Medio Ambiente de la PUCP y director del Centro de Investigación en Geografía Aplicada (CIGA) de esta universidad.

Correo: mtimana@pucp.edu.pe

1. Introducción

El retroceso glaciar en zonas de alta montaña afecta la escorrentía de los ríos aguas abajo: a largo plazo, el caudal fluvial disminuiría especialmente en la época de estiaje y una mayor variabilidad de escorrentía persistiría a nivel anual (Baraer et al., 2012; Huss & Hock, 2018). Esto preocupa, porque dichas zonas son clave en la seguridad hídrica: sostienen la cantidad y calidad de agua para las sociedades y ecosistemas aguas abajo (Schoolmeester et al., 2018).

Globalmente, los glaciares tropicales muestran un retroceso acelerado (Hugonnet et al., 2021). En el Perú, el balance de masa glaciar disminuye considerablemente entre 2001-2017 (-0.39 ± 0.22 m.w.e.año⁻¹) (Castellanos et al., 2022). En la región andina-tropical, la mayoría de los glaciares por debajo de los 6000 msnm desaparecerían en las próximas décadas (Drenkhan et al., 2018; Vuille et al., 2018). El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) (2018) estimó una pérdida glaciar de 1284.95 km² entre 1962/1975-2016 en el Perú; y una disminución del área glaciar de 277 km² entre 1962/1975-2016 en la Cordillera Blanca.

En la Cordillera Blanca, múltiples estudios evidencian un incremento entre 0.13-0.92°C/década en la temperatura del aire superficial durante los últimos 60 años (Schauwecker et al., 2014). Sobre la precipitación, según Rabatel et al. (2013) y Schauwecker et al. (2014), no existe un patrón general estadísticamente significativo en cuanto a futuras variaciones de precipitación en los Andes tropicales.

Numerosos estudios hidrológicos se centran en la cuenca del río Santa y la Cordillera Blanca, considerando clave el aporte glaciar al caudal de dicho río. Vergara et al. (2011), Condom et al. (2012) y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2015), ejecutaron modelamientos hidrológicos en la cuenca alta del río Santa con la herramienta *Water Evaluation And Planning* para simular escenarios futuros hacia 2030/2040 y 2100, considerando variaciones en precipitación y temperatura. Vergara et al. (2011) y Condom et al. (2012) confirman la continuación de las tendencias identificadas en los noventa por Kaser et al. (1990): mayores temperaturas y menores precipitaciones derivan en una mayor ablación; menores

temperaturas y mayores precipitaciones, en una menor ablación en la cuenca alta del río Santa. ANA (2015) encontró que en la época de estiaje entre 1965-2013 la demanda no superó la oferta hídrica y que pueden producirse déficits en subcuencas sin glaciares ni regulación de lagunas.

Motschmann et al. (2022) presentaron un balance hídrico actual y futuro, usando las ecuaciones de Témez, y empleando como insumos la precipitación, la evapotranspiración potencial, el aporte glaciar, la demanda doméstica y agrícola, y el riesgo de desastres. Ellos muestran un aumento ($10\% \pm 12\%$) de la disponibilidad hídrica en 2050 para escenarios de emisiones bajas (RCP2.6) como altas (RCP8.5), y para diferentes escenarios socioeconómicos, por mayores precipitaciones durante la época de lluvias. Además, estimaron que la disponibilidad hídrica en la época de estiaje disminuiría en más de 50%, principalmente, debido al derretimiento de los glaciares en combinación con el aumento de la demanda de agua y un mayor ciclo hidrológico estacional.

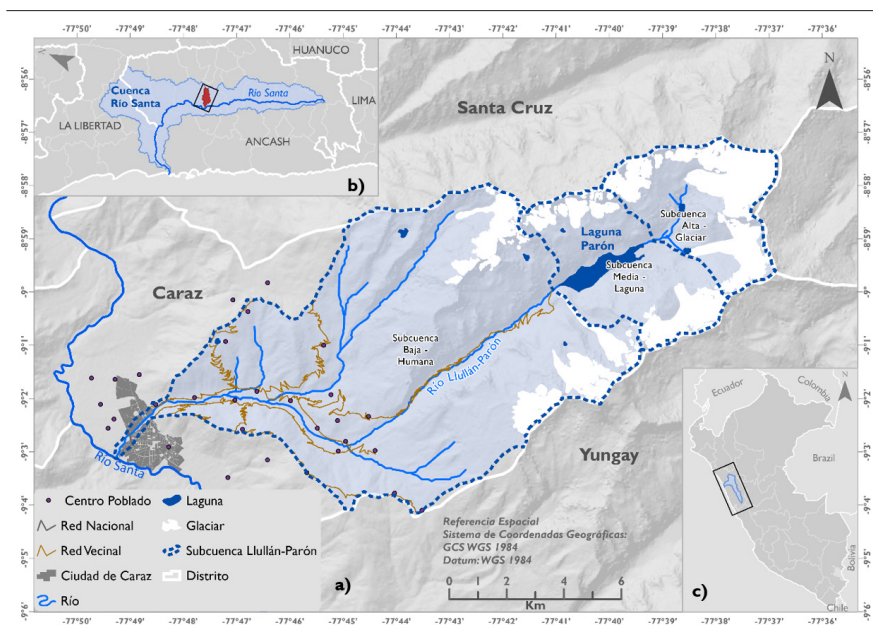
Esta investigación analiza el balance hídrico actual y futuro, mediante un modelo hidrológico semidistribuido en una subcuenca del río Santa. El modelo considera escenarios futuros (2030 y 2050) de oferta hídrica incluyendo diferentes trayectorias de variación de la precipitación y reducción glaciar, enfocándose en los principales sectores del uso de agua. Se discuten los cambios simulados del balance hídrico y la contribución glaciar en un contexto de seguridad hídrica y conflictos por el agua, particularmente por el control de la laguna Parón. Finalmente, se evalúan aspectos de seguridad hídrica en la subcuenca, considerando niveles críticos de estrés y escasez hídricos, y una buena gobernanza del agua.

2. Área de estudio

El estudio se realizó en la subcuenca Parón (distrito de Caraz) (Figura 1), dentro de la cuenca del río Santa (unidad hidrográfica de nivel 5), un área con ~16% de cubierta glaciar (22.45 km^2) (INAIGEM, 2018) que alberga a la laguna Parón (volumen: 45 hm^3), siendo el mayor reservorio de laguna glaciar en la Cordillera Blanca (ANA, 2015).

La subcuenca corresponde a la jurisdicción de la Autoridad Local del Agua Huaraz, y la Autoridad Administrativa del Agua Huarmey-Chicama. Esta subcuenca alberga 21 346 habitantes (en 2017), con un aumento de población urbana (12%) en detrimento de la rural (-15%) entre 2007-2017 (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2017).

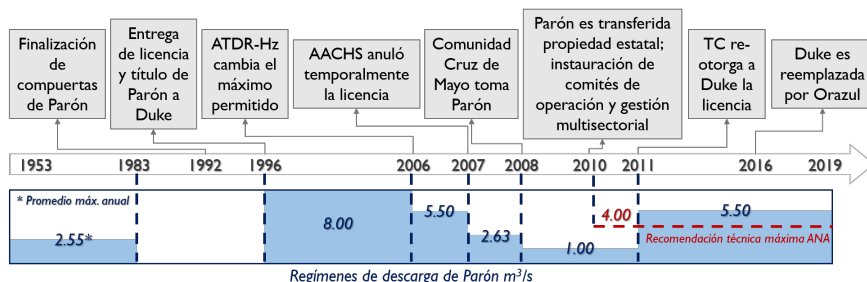
Figura 1. Ubicación de la subcuenca Parón



Elaboración propia basada en ANA (2007, 2014); Instituto Geográfico Nacional (2020); INAIGEM (2018); Ministerio de Educación del Perú (2020); Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2017, 2019); National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020); Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (2020).

Entre 1940-1950, el potencial hidroeléctrico de la cuenca del Santa fue reconocido, empezando la construcción de la hidroeléctrica Cañón del Pato. En 1968, se decidió iniciar la instalación de un túnel en la laguna Parón, ante los desastres suscitados entre 1940-1970 (Carey, 2014). Culminada la construcción, el Estado entregó la licencia de uso de agua a la empresa Duke Energy en 1996, la cual aumentó el caudal de descarga de la laguna a $8 \text{ m}^3/\text{s}$, destruyendo la infraestructura de riego en la subcuenca. Esto suscitó que la Comunidad Campesina Cruz de Mayo tome la laguna en 2008: el momento más álgido del conflicto. Finalmente, el Tribunal Constitucional estableció un nivel de descarga de $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$, superior a la recomendación técnica de la ANA de 2010 (Figura 2).

Figura 2. Línea de tiempo de eventos relevantes para la subcuenca Parón



Elaboración propia basada en Carey (2014), Egúsqiza (2017), French (2019). ATDR-Hz: Administración Técnica del Distrito de Riego de Huaraz; Duke: Duke Energy EGENOR S.A.; Parón: Laguna Parón; TC: Tribunal Constitucional; Orazul: Orazul Energy Peru S.A.

Según la estación hidrométrica de la zona de descarga de la laguna Parón, entre 1952-1972, el promedio del caudal natural diario registrado evidenció un patrón estacional entre 2.3 m³/s (enero-abril) y 1.0 m³/s (julio-octubre). Tras la instalación de la infraestructura, el caudal de descarga osciló entre 1-8 m³/s, debido a las interacciones entre los diversos actores involucrados en la subcuenca (Figura 2). El conflicto permanece latente, pese a los esfuerzos desde diferentes instancias del Estado.

Los conflictos por la licencia de uso de agua y la ausencia de una entidad intersectorial son las principales limitaciones para conseguir una gestión integrada de los recursos hídricos en la subcuenca (French, 2019). Actualmente, no existe un Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca del río Santa, que sería el principal instrumento para una gobernanza equitativa y sostenible del agua en la región (Drenkhan et al., 2015). La subcuenca Parón representa un caso emblemático por la complejidad en la gestión del agua: existen conflictos entre los intereses e interacciones de múltiples actores y una carente gobernanza hídrica (French, 2019).

3. Metodología

3.1 Recopilación, preprocesamiento y procesamiento de datos

Se utilizó el modelo digital de elevación (*Digital Elevation Model [DEM]*) NASADEM, con resolución espacial de 1" de arco y con una raíz cuadrada del error cuadrático medio de 5.30 ±6.05 m verticalmente (Buckley et al., 2020). Con ello, se dividió la subcuenca en tres sectores: glaciar (alta), laguna (media) y humana (baja) (Figura 1).

Dada la escasez de datos meteorológicos *in situ*, se obtuvieron los datos interpolados y grillados (10 km) de precipitación y temperatura del *Peruvian Interpolated data of Senamhi's Climatological and hydrological Observations* (PISCO) v1.1 y v2.1 a nivel diario para el periodo 1981-2016 para cada unidad hidrográfica de la subcuenca (Aybar et al., 2020).

La evapotranspiración fue calculada ajustando los valores obtenidos por el «ETo-Calculator» de *Food and Agriculture Organization* (FAO) para la evapotranspiración de referencia con los valores del coeficiente de cultivo (KC) (Allen et al., 1998). El K_c fue hallado a partir de la cobertura de suelo de la subcuenca descrita por Chimner et al. (2019). La evapotranspiración de referencia se calculó sobre la base de los datos de precipitación y temperatura de PISCO (Senamhi, 2019a) y los datos *in situ* medidos por el Senamhi (2019b).

La extensión y volumen de las lagunas actuales (2016) se obtuvo de la información de la ANA (2014). Para modelar el escenario futuro de extensión de lagunas, se agregaron las cuatro nuevas lagunas glaciares futuras proyectadas por Guardamino et al. (2019), según la probabilidad de que estén completamente formadas hasta 2030 y 2050. La extensión de los glaciares actuales (2016) se obtuvo de INAIGEM (2018). Para el modelo del escenario futuro glaciar hacia 2030/2050, se empleó la proyección de la extensión glaciar para 2050 estimada por Schauwecker et al. (2017), según el escenario del IPCC RCP8.5.

Datos de demanda agrícola mensual son ofrecidos por la ANA (2015) para el periodo 2007-2011 en la subcuenca Parón. La demanda doméstica mensual se estimó para el periodo 2006-2016 basado en el informe de la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass) (2014) y sus proyecciones entre 2014-2018 en la subcuenca Parón, y el censo poblacional del Perú en 2017 (INEI, 2017). Hacia el futuro, la demanda agrícola se mantiene (no existe una tendencia significativa y depende de múltiples factores sobre los cuales se carece de datos) y la doméstica se proyecta según la tasa de crecimiento poblacional (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de insumos para el modelo hidrológico

Insumo	Información	Unidades	Periodo	Fuente
Variables de la cuenca	Área de la cuenca	km ²	2020	NASA, 2020
	Área de glaciares, lagunas y reservorio		2016	ANA, 2014; INAIGEM, 2018
	Volúmenes de lagunas y reservorio	km ³	2016	ANA, 2014; INAIGEM,, 2018
Variables bioclimáticas	Precipitación	mm/mes	2006-2016	Aybar et al., 2020; Senamhi, 2019a
	Evapotranspiración	mm/día		Senamhi, 2019a, 2019b
	KC	Sin unidades	2013-2018	Chimner et al., 2019; Ruíz et al., 2019
Datos de demanda	Población	Número de habitantes	2006-2016	INEI, 1994, 2007, 2017
	Consumo hídrico per cápita	m ³ /día	2014-2018	INEI, 2007, 2017; Sunass, 2014
	Demanda doméstica mensual	m ³ /s		
	Área irrigada	km ²	2007-2011	ANA, 2015
	Consumo hídrico por km ²	m ³ /s		
	Demanda agrícola mensual			

Elaboración propia basada en las fuentes mencionadas.

3.2 Modelamiento hidrológico y construcción de escenarios

Se empleó un modelo hidrológico semidistribuido a nivel mensual considerando los tres sectores de la subcuenca Parón (Figura 2). Se eligió este modelo porque se aplicó en la cuenca glaciar del Vilcanota-Urubamba por Drenkhan et al. (2019), y se adecua a la disponibilidad de datos.

El modelamiento hidrológico requiere como insumos variables de la cuenca, variables bioclimáticas y datos de la demanda hídrica (Tabla 1). Se ajustó la descarga de la laguna Parón a 2.55 m³/s, como valor representativo histórico del régimen hidrológico de la laguna: es el caudal natural promedio máximo entre 1953-1983, próximo al establecido por la Autoridad Autónoma de la Cuenca del río Santa (AACHS) (2.63 m³/s), inferior al umbral máximo recomendado técnicamente por la ANA en 2010 (4 m³/s) (French, 2019).

Las variables de la subcuenca se basan en el cálculo de las áreas de glaciares y lagunas (km^2), y los volúmenes de lagunas (km^3) dados por la ANA (2014), INAIGEM (2018), y las proyecciones de Schauwecker et al. (2017). Para las variables bioclimáticas, se extrajo la información de precipitación de los datos PISCO, interpolada a la zona de estudio para luego hallar las estadísticas zonales según cada sector de la subcuenca. Los datos PISCO, y de estaciones hidroclimáticas, se insertaron en el «ETo-Calculator» de la FAO para estimar la evapotranspiración. Se determinó el K_c con los valores de Allen et al. (1998) para cada tipo de cobertura de suelo caracterizada por Chimner et al. (2019). El K_c se ajustó para las cubiertas agrícolas con los datos de áreas que ocupan los principales cultivos de la subcuenca según el calendario de siembras y cosechas del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (2020). Los datos del tamaño de la población, el consumo hídrico per cápita, la demanda doméstica mensual, el área irrigada, el consumo hídrico por área y la demanda agrícola mensual constituyen los datos de la demanda como parte del insumo del modelo hidrológico (Tabla 2 en página 12 y 13).

Tabla 2. Resumen con valores utilizados por insumos para el modelo hidrológico

Insumo	Información	Unidades	Año	SA	SM	SB	Subcuenca Parón	
Variables de la cuenca	Área de la cuenca	km ²	2006-2016	19.6	21.8	102.6	144	
	Área glaciar		2006-2016	9.8	5.0	7.6	22.5	
			2030	6.8	3.9	5.7	16.4	
			2050	2.5	2.2	2.9	7.6	
			2006-2016	0.1	1.5	0.1	1.7	
	Área de lagunas y reservorio		2030	0.4	1.5	0.5	2.4	
			2050	0.4	1.6	0.5	2.5	
			Volumen de lagunas y reservorio	2006-2016	0.00	0.04	0.00	0.04
	2030							
2050								
Variables bioclimáticas	Precipitación	mm/día	2006-2016	1.6	1.6	1.3	1.4	
			2030	*	*	*	*	
			2050	**	**	**	**	
	Evapotranspiración		2006-2016	3.3	3.3	3.6	3.5	
			2030	3.5	3.5			
			2050	3.55	3.5			
	Kc		Sin unidades	2006-2016	0.5	0.7	0.7	0.7
				2030				0.7
				2050				3.5
Datos de demanda	Población	Número de habitantes	2006-2016	0.0			20,99	
			2030				22,05	
			2050				23,154	
	Consumo hídrico per cápita	m ³ /día	2006-2016				0.17	0.17
			2030					
			2050					
	Demanda doméstica mensual	m ³ /s	2006-2016				0.04	0.04
			2030					
			2050					
	Área irrigada	km ²	2006-2016				25.86	25.86
			2030					
			2050					
	Consumo hídrico por km ²	m ³ /s	2006-2016				1.35	1.35
			2030					
			2050					
Demanda agrícola mensual	m ³ /s	2006-2016	1.35	1.35				
		2030						
		2050						

Elaboración propia. * ±15% de la precipitación; ** ±35% de la precipitación; SB: subcuenca baja; SM: subcuenca media; SA: subcuenca alta.

Finalmente, se construyeron escenarios teniendo en cuenta la variación de la precipitación para 2030/2050, los cuales fueron seleccionados por representar el futuro próximo, permitiendo obtener resultados más precisos. Ante la inexistencia de una tendencia estadísticamente significativa en variaciones de la precipitación hacia el futuro, indicadas por Rabatel et al. (2013) y Schauwecker et al. (2014), este estudio propone escenarios basados en la variación de la precipitación: se consideró un aumento/disminución de la precipitación de $\pm 10\%$ /década respecto al periodo actual (2006-2016), y se contempla un escenario en el que la precipitación no cambie. Aunque es difícil identificar tendencias en precipitación futura, estos valores de variación de precipitación ($\pm 10\%$ /década) surgen a partir de la tendencia de +60 mm/década en la Cordillera Blanca entre 1980-2012 encontrada por Schauwecker et al. (2014). También, se tiene como referencia los escenarios en los que se basaron Condom et al. (2012) y Vergara et al. (2011), considerando un escenario húmedo-cálido hacia 2030 con +15% de precipitación. En total, considerando estos posibles cambios en la precipitación, tenemos tres escenarios: «Sin Variación de Precipitación», «Con Aumento de Precipitación» (+10%/década), «Con Disminución de Precipitación» (-10%/década) (Tabla 3). Además de la precipitación, dentro de los cambios en variables hacia 2030 y 2050, únicamente se considera la disminución en área de glaciares, el aumento en área y volumen de las lagunas, y el aumento de la población que implica una mayor demanda doméstica mensual. Adicionalmente, se definen enero, febrero y marzo como época de estiaje (EFM); y junio, julio, agosto como época de lluvias (JJA).

Tabla 3. Escenarios futuros según variación de precipitación

Escenarios de precipitación	2030	2050
Sin Variación	Sin cambio	
Aumento	15%	35%
Disminución	-15%	-35%

Elaboración propia.

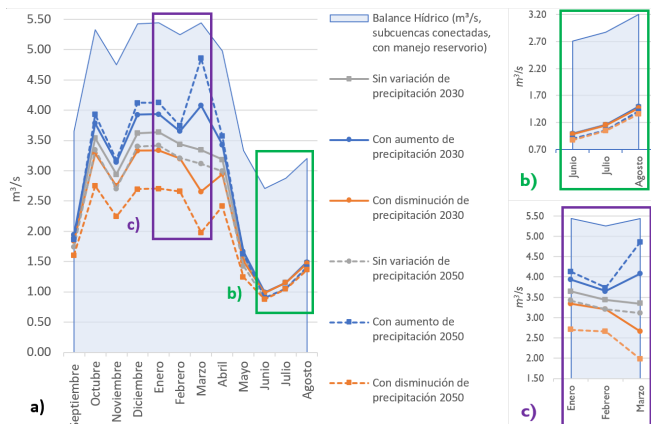
4. Resultados

4.1 Balance hídrico actual y futuro

Se estimó el balance hídrico mensual para la línea base actual (2006-2016) y los escenarios futuros (2030 y 2050) considerando diferentes escenarios de variación de la precipitación. Estos resultados sugieren que la modificación de $4.19 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2.55 \text{ m}^3/\text{s}$ en la descarga de la laguna Parón reduciría la disponibilidad de agua según el balance hídrico resultante en todos los escenarios futuros posibles, pese a que se consideran diferentes escenarios de variación de la precipitación (Figura 3). Así, se puede anticipar la relevancia del control de la descarga de la laguna.

Para el escenario sin variación de precipitación, el balance hídrico sugiere un decrecimiento en la disponibilidad hídrica en todos los meses del año: -41% hacia 2030, y -45% hacia 2050 con respecto a la línea base (2006-2016); considerando una disminución de la precipitación en 15% y 35%, el balance hídrico actual se reduciría en -46% hacia 2030, y -55% hacia 2050. Esta reducción sería más evidente en EFM, disminuyendo la disponibilidad hídrica en el punto de descarga hacia el río Santa en $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$, y en los meses de estiaje, donde no decrecería en más de $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ entre el estimado actual y el de 2050, la variabilidad estacional se reduciría cada vez más. En el escenario sin variación de la precipitación, la variabilidad estacional disminuiría en 5.7% hacia 2030 y 10.9% hacia 2050; en el escenario con disminución de la precipitación, esta variabilidad se reduciría en mayor medida, -18% hacia 2030 y -36.7% hacia 2050 respecto a la variabilidad estacional del balance hídrico actual ($\sigma = \pm 1.07 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 3 y Tabla 4).

Figura 3. Comparación del Balance Hídrico actual y futuro (m^3/s) de la subcuenca Parón para cada escenario



Elaboración propia.

Al aumentar la precipitación, el balance hídrico muestra mayor variación, reduciéndose en 36% hacia 2030 y en 34% hacia 2050 respecto al balance hídrico actual, causando una reducción en la disponibilidad hídrica actual hacia 2030 (en un total de $1.6 m^3/s$), aunque, de 2030 a 2050, ante un escenario con aumento de precipitación, se estimaría un incremento leve ($0.1 m^3/s$). Hacia 2030, el balance hídrico disminuiría respecto al actual, pero aumentaría hacia 2050 entre octubre y abril ($0.23 m^3/s$), en tanto que en los cinco meses restantes (incluyendo la estación seca) decrecería ligeramente ($<0.1 m^3/s$). La mayor diferencia se observa en marzo, con un aumento de $0.78 m^3/s$ entre 2030-2050. En consecuencia, la variabilidad estacional del balance hídrico en el escenario con aumento de precipitación seguiría un patrón opuesto al de los otros dos escenarios, al presentar un incremento de 8.2% hacia 2030 y 23.5% hacia 2050 respecto al balance hídrico actual ($\sigma = \pm 1.07 m^3/s$) (Figura 3 y Tabla 4).

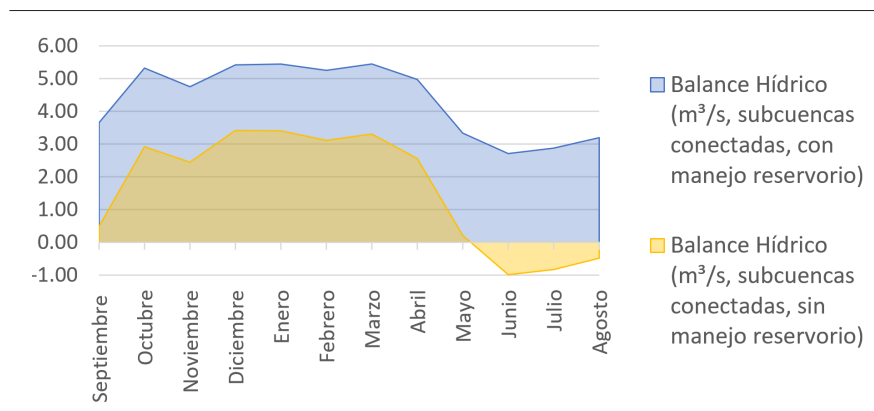
Tabla 4. Variabilidad del balance hídrico mensual entre las subcuencas para cada escenario

Escenarios de precipitación	2016	2030	2050	2016-2030 ($\Delta\%$)	2030-2050 ($\Delta\%$)
Sin Variación		1.01	0.95	-5.7	-10.9
Aumento	1.07	1.15	1.32	8.2	23.5
Disminución		0.87	0.68	-18.0	-36.7

Elaboración propia.

El balance hídrico actual de la subcuenca Parón con el manejo de la descarga de la laguna Parón ($4.37 \pm 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$) sería superior al calculado sin un manejo de esta descarga en todos los meses del año ($1.63 \pm 1.71 \text{ m}^3/\text{s}$). Inclusive, el balance hídrico actual sin un manejo del reservorio sería negativo en junio, julio y agosto, alrededor de $-1 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto resalta la importancia del control de la laguna Parón para mantener el balance hídrico positivo con valores por encima de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante junio, julio y agosto (Figura 4).

Figura 4. Comparación del balance hídrico actual con/sin manejo de reservorio (m^3/s) en la subcuenca Parón



Elaboración propia.

Asimismo, el balance hídrico actual de la subcuenca Parón sin un manejo de la descarga de la laguna Parón ($1.63 \pm 1.71 \text{ m}^3/\text{s}$) sería inferior al calculado con un manejo de esta descarga en todos los meses del año ($4.37 \pm 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$). Incluso, sin un manejo del reservorio, el balance hídrico actual estaría negativo en los meses de estiaje con un promedio de $-1 \text{ m}^3/\text{s}$. Es así como el control de la descarga de la laguna Parón ha mantenido el balance hídrico por encima de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante los meses de estiaje entre 2006-2016 (Figura 4).

4.2 Contribución glaciar actual

La contribución glaciar estima el porcentaje del total de la oferta hídrica que corresponde al caudal glaciar absoluto (m^3/s). En este caso, el caudal glaciar absoluto (m^3/s) no tiene variaciones entre los diferentes escenarios, pero se observa que se reduce progresivamente hacia 2030 y 2050. La contribución actual anual es 57% para toda la subcuenca Parón. La contribución en JJA es evidentemente mayor (91%) ante la falta de lluvias; contrariamente, es menor durante EFM (37%) por la contribución de la precipitación a la oferta hídrica. La contribución glaciar anual se reduciría en todos los escenarios hacia 2050:

-21% sin variación de la precipitación, -26% con aumento de la precipitación y -14% con disminución de la precipitación (Tabla 5).

En el escenario con disminución de precipitación, la contribución porcentual decrecería en menor medida (4% para 2030 y 14% para 2050). En contraste, dicha contribución aumentaría en un escenario con aumento de la precipitación (10% para 2030 y 26% para 2050). Esto ocurriría porque la precipitación es una fuente de la oferta hídrica y contribuye a esta, por lo que menos precipitaciones (menos contribución a la oferta) generaría un alza porcentual de la contribución de otras fuentes como el aporte glaciar, y viceversa.

Se puede notar un patrón similar en la disminución de la contribución glaciar durante los periodos de lluvia y sequía, tanto para 2030 como de manera más marcada para 2050. En el escenario con disminución de precipitación, durante EFM la contribución glaciar se reduce en 4% hacia 2030 y luego en 11% entre 2030-2050. En este escenario, la menor reducción ocurre durante JJA, porque la contribución glaciar se reduce en solo 2% hacia 2030 y luego 6% entre 2030-2050. Esto evidencia nuevamente que en un escenario donde las precipitaciones disminuyen y durante la estación en la que menos llueve, la contribución glaciar es la más alta ($\geq 83\%$). El caso contrario ocurre en el escenario con aumento de precipitación y en la época de mayores lluvias, donde el porcentaje de la contribución glaciar disminuiría significativamente en 11% hacia 2030 y 14% entre 2030-2050, representando los menores porcentajes de contribución glaciar (12% en 2050). El porcentaje de la contribución glaciar en EFM en todos los escenarios hacia 2030 y 2050 es menor al de JJA (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentaje de contribución glaciar actual y futuro, y caudal glaciar absoluto en la subcuenca Parón

Escenarios de precipitación		Sin variación			Aumento			Disminución			Caudal glaciar absoluto
		JJA	EFM	anual	JJA	EFM	anual	JJA	EFM	anual	anual (m ³ /s)
Contribución Glaciar (%)	2006-2016	91	37	57	91	37	57	91	37	57	1.58
	2030	88	29	50	86	26	47	89	33	53	1.15
	2050	77	16	36	72	12	31	83	22	43	0.54

Elaboración propia; JJA: junio, julio, agosto; EFM: enero, febrero, marzo.

5. Discusión

5.1 Incertidumbre en la línea base y desagregación del modelo hidrológico

Durante la recopilación de información, se observó que existían series incompletas de datos glaciohidroclimáticos para un periodo climático considerable (~28 años), registros de observaciones distribuidas desigualmente con poca representatividad espacial, y datos inconsistentes con valores atípicos y errores en el registro. Por ello, se emplearon fuentes de datos como PISCO y de cobertura de suelo para estimar la evapotranspiración y el K_c ; el modelo hidrológico utilizó como insumos principalmente valores empíricos.

La ausencia de datos de caudal medidos en el punto de descarga final de la subcuenca Parón explica la falta de calibración del modelo con los valores del caudal del río Parón antes de unirse al río Santa, utilizándose solamente la calibración del caudal de salida de la laguna Parón. Se optó por convertir un modelo inicialmente agregado en uno semidistribuido, mediante la división del área de estudio en tres sectores (Figura 1), para obtener mayor precisión en los resultados, permitiendo así considerar las conexiones y la variabilidad espacial al interior de la subcuenca.

5.2 Construcción de escenarios glaciohidroclimáticos y socioeconómicos

Los escenarios fueron elaborados basados en cambios en las variables del medio físico-natural (cuenca y bioclimáticas, Tabla 1), las cuales definen la oferta hídrica. La construcción de los escenarios está orientada a considerar los diferentes posibles futuros ante un escenario de cambio climático pesimista con un retroceso glacial máximo (RCP 8.5). Conjuntamente, para una construcción óptima de los escenarios, fue necesario contemplar las variaciones de precipitación, aumento y disminución de $\pm 10\%$ /década, por su tendencia futura incierta según Rabatel et al. (2013) y Schauwecker et al. (2014).

La disponibilidad hídrica futura dependerá del futuro del clima, de los glaciares y del caudal del río, como se refleja hasta cierto grado en el modelo hidrológico. Pero también está fuertemente ligado a los cambios en la demanda del agua, específicamente la agrícola, ya que, asumiendo el aumento de la población hacia 2030 y 2050, la doméstica es poco significativa (<4.5%). La importancia

de la demanda agrícola radica en la relevancia de la agricultura para la población de esta subcuenca, ya que es la actividad económica practicada por el 33% de la población de Caraz (INEI, 2017). En tanto, se estableció que la demanda agrícola no tendría variación en los escenarios futuros, por falta de información para determinar tendencias futuras estadísticamente significativas: es complejo establecer algún tipo de tendencia por ser afectada por múltiples procesos de los cuales no hay datos para constituir algún escenario.

5.3 Contribución glaciar y variabilidad estacional

El régimen hidrológico de la subcuenca Parón está altamente influenciado por la contribución hídrica de la fusión de los glaciares. Se halló unos porcentajes de contribución glaciar del periodo actual anual en JJA y EFM elevados (>35%): son valores superiores a otros cálculos realizados en la zona de la cuenca del río Santa (Tabla 6).

La reducción del porcentaje de la contribución glaciar, ocasionada principalmente por la disminución del aporte del caudal glaciar absoluto (de 1.58 m³/s en 2006-2016 a 0.54 m³/s en 2050) a la oferta hídrica, ocurre en todos los escenarios. Esta reducción porcentual de la contribución glaciar se agudizaría más en los escenarios con aumento de precipitación: al aumentar la precipitación, porcentualmente cualquier otro aporte disminuye.

Con ello, la contribución glaciar ha sido y seguirá siendo clave para mantener una esorrentía perenne durante el año en esta subcuenca, pese a la disminución de los aportes de la precipitación en JJA.

Tabla 6. Comparación de la contribución glaciar actual en diferentes estudios en la cuenca del río Santa

Cuenca	Fuente	JJA	EFM	anual
Subcuenca Parón	Este estudio	91%	37%	57%
Microcuenca laguna Parón	Buytaert et al. (2017)	76%**		32%
Alto Río Santa (La Balsa)	Condom et al. (2012) Motschmann et al. (2022)	67% 23%	30%* 13%*	38% 15%

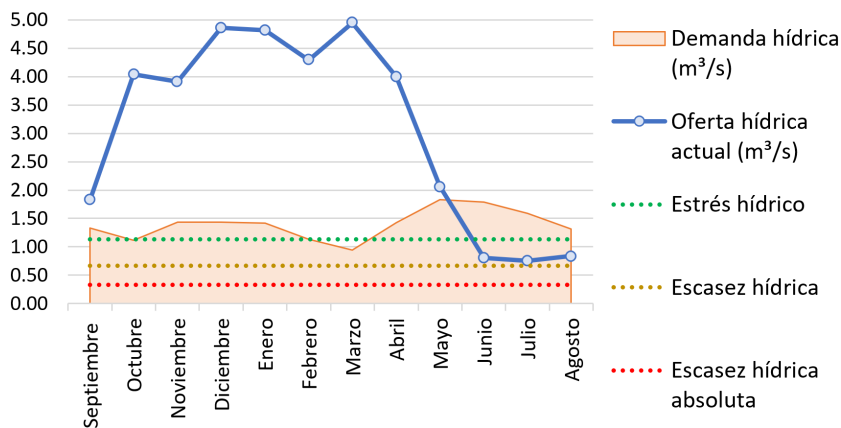
Elaboración propia basada en los autores mencionados; *diciembre, enero y febrero; **época de estiaje (no necesariamente junio, julio, y agosto).

5.4 Seguridad hídrica en la subcuenca Parón

El balance hídrico actual y futuro resalta la necesidad de mantener un mínimo de regulación del caudal de agua ($>2.55 \text{ m}^3/\text{s}$) en la subcuenca Parón para evitar la escasez de agua y mayores conflictos por este recurso. Este umbral es cercano al establecido por la AACHS ($2.63 \text{ m}^3/\text{s}$), y la recomendación técnica de la ANA ($4 \text{ m}^3/\text{s}$). Aplicando el concepto de estrés hídrico ($1000\text{-}1700 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}$), escasez hídrica ($500\text{-}1000 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}$) y escasez hídrica extrema ($<500 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{persona}^{-1}$) (Falkenmark et al., 1989), se evidencia una constante amenaza de contar con niveles hídricos críticos y no poder satisfacer la demanda hídrica en al menos JJA (Figura 5).

Estos hallazgos llaman a optar por una planificación prudente e integrada para gestionar los recursos hídricos en la subcuenca frente a los impactos del incremento de la demanda del agua, del cambio climático y de los conflictos sociales en la región. La regulación de la laguna Parón debe ser gestionada dentro de un marco integrado de la gestión hídrica y del riesgo de desastres, promoviendo un proceso multisectorial y multiactor, respetando los intereses de los usuarios del agua, y definiendo umbrales críticos del nivel del espejo de agua frente a un posible desborde de la laguna (Haerberli & Drenkhan, 2022).

Figura 5. Evaluación de niveles de estrés y escasez hídricos con relación al balance hídrico actual en la subcuenca Parón



Elaboración propia.

Aparte del manejo de estructura gris, aplicar un enfoque más reciente como las soluciones basadas en la naturaleza (WWAP, 2018) optimizan la infiltración, el almacenamiento y la regulación del agua: por ejemplo, la implementación integrada de los andenes (terrazas), los antiguos canales de infiltración (*amunas*) y los microembalses (*qochas*) para la recolección de agua, recarga de acuíferos, y uso posterior de agua, usando el conocimiento local (Ochoa-Tocachi et al., 2019).

Implementar exitosamente estas y otras medidas de adaptación a largo plazo requiere una capacitación y una estrecha coordinación entre las partes interesadas dentro del nuevo marco legal de gestión de recursos hídricos. El principal instrumento para esta coordinación entre usuarios y partes interesadas es representado por el Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca (CRHC) del río Santa. Aunque el Santa fue una de las primeras cuencas consideradas para la conformación del CRHC desde 2010, hasta la fecha no hay un proceso continuo para su implementación, debido principalmente a los conflictos sociales y a las competencias locales entre usuarios de agua (Drenkhan et al., 2015). Los futuros planes de gestión deberían desarrollarse en un marco de buena gobernanza, integrando la ciencia, la sociedad y la política, y, así, aumentar la aceptación pública frente a las medidas correspondientes.

6. Conclusiones

Este estudio analiza el balance hídrico de la subcuenca Parón mediante un modelo hidrológico semidistribuido para el presente (2006-2016) y futuro (2030-2050). La disponibilidad hídrica actual ($4.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio) disminuiría en un 37% (35%), hasta 2030 (2050), en un escenario optimista con una regulación máxima de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, considerando un aumento de la precipitación de 15% (35%) y una disminución de la contribución glaciaria al caudal en un 10% (26%) a nivel anual. En un escenario pesimista con una disminución de la precipitación en un 15% (35%), la disponibilidad hídrica se reduciría en un 47% (56%) a nivel anual. Los resultados de la ejecución del modelamiento hidrológico evidencian una reducción del balance hídrico hacia el futuro en todos los escenarios previstos (Figura 3). La variabilidad estacional del balance hídrico disminuiría ante escenarios sin variación y con disminución (-10%/década) de la precipitación. Solo un incremento futuro de la precipitación (+10%/década) podría conducir a un aumento de la variabilidad estacional del balance hídrico (Tabla 4).

Los resultados resaltan la importancia de la contribución glaciaria (>30% anual hacia 2030 y 2050) (Tabla 5) y el establecimiento de un nivel de regulación de

la laguna moderado ($2.55 \text{ m}^3/\text{s}$) para mantener un balance hídrico positivo, incluso durante la época de estiaje en los escenarios propuestos: $0.81 \text{ m}^3/\text{s}$ en junio de 2050 en el escenario con disminución de precipitación sería el nivel más bajo de disponibilidad hídrica alcanzado dentro de todos los resultados calculados (Figura 3). Esto resalta la importancia de establecer un caudal de descarga adecuado para evitar un déficit hídrico y alcanzar niveles de inseguridad hídrica. Por ello, una regulación consensuada y coordinada, respetando los umbrales técnicos y a los usuarios del agua, es clave, así como facilitar la comunicación, desde las instituciones y marcos legales.

Sin la infraestructura para el control de la descarga de la laguna Parón, la subcuenca habría ingresado en un periodo de escasez hídrica absoluta en la época de estiaje entre 2006-2016 (Figura 4 y Figura 5). Esta infraestructura ha reducido el riesgo de ocurrencia de desbordes de la laguna, gracias a que permitió reducir el nivel de la laguna Parón en momentos en los que se superaban los umbrales críticos (French, 2019). Pero, paralelamente, se debe considerar los conflictos sociohídricos que se generan a partir de la competencia por el control de las compuertas de descarga de la laguna Parón.

Finalmente, ante la constante amenaza de entrar en niveles de escasez hídrica o escasez hídrica absoluta (Figura 5), es necesario implementar una gestión integrada de los recursos hídricos, en un contexto de cambio climático, aumento de la demanda de agua y conflictos sociales en la región. Además, debe ofrecer un marco de gestión integral del riesgo de desastres y niveles críticos de agua en estrecha coordinación entre usuarios del agua, respetando los criterios técnicos en la laguna Parón.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2007). *Unidades Hidrográficas*. Catálogo de Metadatos-ANA.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2014). *Inventario Lagunas Glaciares del Perú*. Catálogo de Metadatos-ANA.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Santa*.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), pp. 770-785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>

- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C. A., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207), pp. 134-150. <https://doi.org/10.3189/2012JogG11J186>
- Buckley, S. M., Agram, P. S., Belz, J. E., Crippen, R. E., Gurrola, E. M., Hensley, S., Kobrick, M., Lavalle, M., Martin, J. M., Neumann, M., Nguyen, Q. D., Rosen, P. A., Shimada, J. G., Simard, M., & Tung, W. W. (2020). *NASADEM*.
- Buytaert, W., Moulds, S., Acosta, L., De Bièvre, B., Olmos, C., Villacis, M., Tovar, C., & Verbist, K. M. J. (2017). *Glacial melt content of water use in the tropical Andes*. *Environmental Research Letters*, 12(11), 114014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa926c>
- Carey, M. (2014). *Glaciares, cambio climático y desastres naturales: ciencia y sociedad en el Perú*. Instituto Francés de Estudios Andinos.
- Castellanos, E. J., Lemos, M. F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Vale, M. M., Ometto, J. P., Peri, P. L., Postigo, J. C., Ramajo, L., Roco, L., Rusticucci, M., Menezes, J. A., Borges, P., Bueno, J., Cuesta, F., Drenkhan, F., & Valladares, M. (2022). Chapter 12: Central and South America. En *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability-Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-181). Cambridge University Press.
- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Clarke, A. M. P., Polk, M. H., Lilleskov, E. A., & Fuentealba, B. (2019). Mapping Mountain Peatlands and Wet Meadows Using Multi-Date, Multi-Sensor Remote Sensing in the Cordillera Blanca, Peru. *Wetlands*, 39(5), pp. 1057-1067. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1>
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Tacsí, A., & Gomez, J. (2012). Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International*, 37(4), pp. 442-459. <https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706773>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The changing áter cycle: climatic and socioeconomic drivers of áter-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), pp. 715-733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, pp. 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Drenkhan, F., Huggel, C., Guardamino, L., & Haeberli, W. (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, pp. 465-483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Egúsqiza Cerrón, P. F. (2017). *Aspectos legales sobre un conflicto socioambiental por el uso del agua: análisis del caso de la laguna Parón (Ancash)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. En *Natural resources forum*, 13(4), pp. 258-267. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

- French, A. (2019). Webs and Flows: Socionatural Networks and the Matter of Nature at Peru's Lake Parón. *Annals of the American Association of Geographers*, 109 (1), pp. 142-160. <https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1484682>
- Guardamino, L., Haerberli, W., Muñoz, R., Drenkhan, F., Tacsí, A., & Cochachin, A. (2019). *Proyección de lagunas futuras en las cordilleras glaciares del Perú*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3597>
- Haerberli, W. & Drenkhan, F. (2022). Future Lake Development in Deglaciating Mountain Ranges. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*, pp. 1-45. Doi: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.361
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Farinotti, D., Huss, M., Dussaillant, I., Brun, F., & Kääb, A. (2021). Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature* 2021 592:7856, 592(7856), pp. 726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), pp. 135-140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Instituto Geográfico Nacional (2020). *Instituto Geográfico Nacional-Infraestructura de Datos Geoespaciales Fundamentales*. Ministerio de Defensa, IGN. <http://www.idep.gob.pe/#visor>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (1994). *Censos nacionales 1993, IX de población, IV de vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2007). *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda*.
- Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (2018). *El inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú*. INAIGEM.
- Kaser, G., Ames, A., & Zamora, M. (1990). Glacier Fluctuations and Climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*, 14, pp. 136-140. <https://doi.org/10.3189/S0260305500008430>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú (2020). *Calendario de Siembras y Cosechas*. SIEA.
- Ministerio de Educación del Perú (2020). *Descarga de información espacial del MED*. <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2017). *Red vial vecinal del Perú del Sistema Nacional de Carreteras al 31.dic.2016*. Catálogo de Metadatos-MTC.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (2019). *Red vial departamental del Perú del Sistema Nacional de Carreteras Dic.2018*. Catálogo de Metadatos-MTC.
- Motschmann, A., Teutsch, C., Huggel, C., Seidel, J., León, C. D., Muñoz, R., Siemel, J., Drenkhan, F., & Weimer-Jehle, W. (2022). Current and future water balance for coupled human-natural systems – Insights from a glacierized catchment in Peru. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101063. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101063>
- National Aeronautics and Space Administration (2020). *Earthdata*. NASA.
- Ochoa-Tocachi, Boris F., Juan D. Bardales, Javier Antiporta, Katya Pérez, Luis Acosta, Feng Mao, Zed Zulkafli, Junior Gil-Ríos, Oscar Angulo, Sam Grainger, Gena Gammie, Bert De Bièvre, & Wouter Buytaert (2019). Potential Contributions of Pre-Inca Infiltration Infrastructure to Andean Water Security. *Nature Sustainability* 2(7), pp. 584-93. Doi: 10.1038/s41893-019-0307-1

- 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., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), pp. 81-102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Ruíz, L., Quijandría, G., Otárola, E., Rios, S., Álvarez, J., & Núñez, F. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas: Memoria Descriptiva*.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, pp. 85-97. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- 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), pp. 5172-5189. <https://doi.org/10.1002/2016JD025943>
- Schoolmeester, T., Johansen, K. S., Alfthan, B., Baker, E., Hesping, M., & Verbist, K. (2018). *The Andean glacier and water atlas: the impact of glacier retreat on water resources*. UNESCO y GRID-Arendal.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi) (2019a). *Datos PISCO*.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (Senamhi) (2019b). *Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional*. Senamhi.
- Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres (2020). *Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres-SIGRID Versión 3.0. CENEPRED*.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass) (2014). *Determinación de la formula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicables a la empresa municipal de servicio de agua potable y alcantarillado Chavín Sociedad Anónima-EPS Chavín S.A. para el quinquenio regulatorio 2014-2019*.
- Vergara, W., Deeb, A., Leino, I., Kitoh, A., Kitoh, A., & Escobar, M. (2011). Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8662-0>.
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, pp. 195-213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- WWAP (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. UN Water Report. UNESCO.