

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE LETRAS Y CIENCIAS HUMANAS



**IMPACTOS DEL RETROCESO GLACIAR Y DISPONIBILIDAD HÍDRICA
EN LA SUBCUENCA LLULLÁN-PARÓN, CUENCA DEL RÍO SANTA**

Tesis para optar el título de Licenciado en Geografía y Medio Ambiente que
presenta el Bachiller:

MARCOS FABIO IZAGUIRRE LIVIAC

ASESOR: DR. FABIAN DRENKHAN

Lima, mayo 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por su apoyo incondicional, a mis compañeros, amigos, colegas y profesores de la especialidad de Geografía y Medio Ambiente por sus sugerencias, recomendaciones, y, sobre todo, por ofrecerme sus diferentes puntos de vista que nutrieron este trabajo.

Gracias profundamente al Doctor Fabian Drenkhan, por todo el tiempo que dedicó a la revisión constante de la tesis, por la paciencia, dedicación y exigencia a lo largo del proceso.

También agradezco especialmente a la magister Inés Yanac por compartir sus conocimientos y brindarme bases de datos sobre el área de estudio. Asimismo, agradezco al doctor Martín Timaná por su minuciosa revisión y por sus comentarios que ayudaron a corregir detalles claves de este documento.

Gracias al INAIGEM y al CIGA por confiar en mí como asistente de investigación y apoyarme con los recursos académicos necesarios.

Este trabajo fue financiado por el Fondo Newton-Paulet del CONCYTEC-FONDECYT y la NERC en el marco de la convocatoria E031-2018-01-NERC "Círculos de Investigación en Glaciares" [Contrato N°08-2019-FONDECYT] del proyecto "Peruvian Glacier Retreat and its Impact on Water Security – Perú GROWS".

Estos agradecimientos también son para quienes me acompañaron y para quienes no despertaron más durante estos meses históricos de crisis sanitaria mundial.

RESUMEN

El retroceso glaciar en la Cordillera Blanca (Perú) está alterando la variabilidad estacional e interanual del régimen hidrológico. Esta situación genera impactos severos para la disponibilidad hídrica de las sociedades asentadas aguas abajo que dependen de este recurso para su subsistencia. Con el retroceso glaciar, el régimen hidrológico registraría un caudal máximo, luego del cual la oferta hídrica disminuiría, especialmente durante la época seca. Paralelamente, la demanda hídrica está creciendo en la región, debido a la expansión de la frontera agrícola, el crecimiento poblacional, y el aumento de la demanda energética. Así, la reducción de la oferta y del aumento de la demanda hídrica afectarían la seguridad hídrica, dificultando la gestión de recursos hídricos a largo plazo.

Esta tesis se centra en la subcuenca Lullán-Parón (144 km²), en la cuenca alta del río Santa (Perú), la cual abarca una amplia cobertura glaciar (23 km²). Aquí se encuentra Parón (45 hm³), la laguna más grande en la Cordillera Blanca, la cual cumple un rol esencial para el suministro de agua de uso agrícola, doméstico, hidroeléctrico y turístico. Se analizan los impactos del retroceso glaciar en la disponibilidad hídrica mediante un modelo agregado con escenarios de variación de precipitación. El modelo incluye la oferta-demanda hídrica actuales (2006-2016) y futuras (2030 y 2050). Se halló que sin el control de la laguna Parón ocurriría un déficit del balance hídrico en la época seca (-0.77 m³/s en 2006-2016). Una mayor precipitación (+10%/década) incrementaría la variabilidad estacional del balance hídrico en un 24% hacia 2050; en cambio, una menor precipitación (-10%/década) la reduciría hasta en un 37% hacia 2050. En este contexto, es urgente encontrar formas eficaces de adaptación al cambio climático y socioeconómico. Estas deberían enfocarse en medidas estructurales y no-estructurales dentro de un marco de gestión coordinada entre actores locales y estatales, evitando potenciales conflictos hídricos e inseguridad hídrica. Finalmente, se debe considerar escenarios de cambio para la planificación futura de recursos hídricos.

ABSTRACT

Glacier retreat in the Cordillera Blanca (Peru) is affecting the seasonal and interannual variability of the hydrological regime. This situation leads to severe impacts for water availability of people situated downstream, that depend on this resource for their livelihoods. With decreasing glacier extent, the hydrological regime would register a tipping point after which river streamflow decreases, especially during the dry season. At the same time, water demand is increasing in the region due to the expansion of the agricultural frontier, population growth, and increasing energy demand. Thus, the water supply decrease and water demand increase would affect water security and hamper long-term water management.

This thesis focuses on the Lullán-Parón sub-basin (144 km²), in the upper basin of the Santa River. Lullán-Parón included a wide glacier cover (23 km²) and hosts Lake Parón (45 hm³), the largest lake in the Cordillera Blanca which plays a vital role of water supply for agriculture, housing, hydropower and tourism. The impacts of glacier retreat on water availability are analysed by setting up a lumped hydrological model with different scenarios of precipitation variability. The model includes current (2006-2016) and future (2030 and 2050) water supply and demand. It was found that, without discharge control of Lake Parón, a deficit in the water balance would occur in the dry season (-0.77 m³/s in 2006-2016). A precipitation increase (+10%/decade) would increment seasonal variability by about 24% towards 2050; in contrast, a precipitation decrease (-10%/decade) would lead to reduced discharge by up to 37% by 2050. In this context, effective ways for adaptation to climatic and socio-economic changes are urgently necessary. Adaptation strategies should focus on *hard path* and *soft path* measures within a coordinated management framework between local stakeholders and the government, avoiding potential water conflicts and water insecurity. Finally, scenarios of change need to be considered for future water resources planning.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	X
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.1. PROBLEMÁTICA.....	3
2.2. JUSTIFICACIÓN	4
2.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	5
2.4. HIPÓTESIS.....	6
2.5. OBJETIVOS	6
CAPÍTULO 3 ÁREA DE ESTUDIO	7
3.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	7
3.2. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO NATURAL.....	7
3.3. DESCRIPCIÓN DEL MEDIO HUMANO.....	11
CAPÍTULO 4 MARCO CONCEPTUAL.....	20
4.1. DINÁMICA DE GLACIARES TROPICALES	20
4.2. LA HIDROLOGÍA GLACIAR: BALANCE Y MODELOS HIDROLÓGICOS	22
4.3. HACIA UNA GESTIÓN INTEGRADA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS	25
4.4. ¿QUÉ IMPLICA LA SEGURIDAD HÍDRICA Y CÓMO SE MIDE?.....	27
4.5. UN ENFOQUE INTEGRAL: LOS SISTEMAS SOCIOHIDROLÓGICOS	30
4.6. ADAPTACIÓN: LA ACCIÓN DE RESPUESTA Y AJUSTE	31
CAPÍTULO 5 ESTADO DEL ARTE.....	33
5.1. CLIMA EN LOS ANDES TROPICALES	33
5.2. GLACIARES TROPICALES.....	35
5.3. HIDROLOGÍA DE LA CORDILLERA BLANCA.....	41
5.4. LA ACTUALIDAD DE LA GIRH Y SU IMPORTANCIA PARA LOGRAR LA SEGURIDAD HÍDRICA	43
5.5. ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN A LA ESCASEZ DE AGUA.....	48

CAPÍTULO 6	METODOLOGÍA.....	49
6.1.	RECOPIACIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE DATOS	51
6.2.	PROCESAMIENTO DE DATOS	56
6.3.	MODELAMIENTO HIDROLÓGICO	64
6.4.	AJUSTES Y ESCENARIOS FUTUROS: HACIA EL 2030-2050	66
CAPÍTULO 7	RESULTADOS.....	71
7.1.	OFERTA DE AGUA ACTUAL Y FUTURO	71
7.2.	DEMANDA DE AGUA	75
7.3.	BALANCE HIDROLÓGICO	76
CAPÍTULO 8	DISCUSIÓN.....	82
8.1.	LIMITACIONES DEL MODELO HIDROLÓGICO Y EL CONJUNTO DE DATOS COMO SUS INSUMOS	82
8.2.	CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS: GLACIO-HIDROCLIMÁTICOS Y SOCIO-ECONÓMICOS	84
8.3.	CONTRIBUCIÓN GLACIAR Y VARIABILIDAD ESTACIONAL	86
8.4.	IMPLICACIONES PARA LA ADAPTACIÓN	89
CAPÍTULO 9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	XCIV
ANEXOS	CXV

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Niveles de Seguridad Hídrica según la Disponibilidad Hídrica.....	29
Tabla 5.1 Superficie Glaciar en el Perú.....	37
Tabla 5.2 Superficie Glaciar en la Cordillera Blanca	38
Tabla 5.3 Regímenes de descarga histórica de la laguna Parón (m ³ /s).....	47
Tabla 6.1 Escenarios futuros según la variación de la precipitación	68
Tabla 6.2 Proyección demanda de agua potable a nivel EPS Chavín S.A.....	70
Tabla 7.1 Porcentaje de contribución glaciar actual y futuro en la SLP.....	75
Tabla 8.1 Comparación de la contribución glaciar actual en diferentes estudios en la cuenca del río Santa.....	87
Tabla 8.2 Variabilidad de la oferta hídrica mensual entre las subcuencas para cada escenario.....	88
Tabla 8.3 Variabilidad del balance hídrico mensual entre las subcuencas para cada escenario.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Ubicación de la SLP	7
Figura 3.2 Curvas de Nivel dentro la SLP	8
Figura 3.3 Pendientes dentro la SLP	8
Figura 3.4 Caudal diario (m ³ /s) registrado por la Estación Convencional - Hidrométrica Parón entre septiembre de 1952 - agosto 1972	9
Figura 3.5 El promedio del caudal diario (m ³ /s) y el mínimo caudal diario registrado por la Estación Convencional - Hidrométrica Parón (1952- 1973).....	9
Figura 3.6 Cobertura Vegetal en la SLP, según Chimner, R. et al.....	10
Figura 3.7 Proporción de la cobertura de suelo en la SLP	10
Figura 3.8 Evolución de la población por sexo en el distrito de Caraz, 1981-2017	11
Figura 3.9 Pirámide poblacional del distrito de Caraz, 2017.....	12
Figura 3.10 Evolución del cambio poblacional urbano-rural del distrito de Caraz, 2007-2017	12
Figura 3.11 Evolución del acceso al servicio de agua potable en el distrito de Caraz, 1981-2017.....	13
Figura 3.12 ¿A qué empresa o entidad se paga por el servicio de agua?, según las viviendas censadas del distrito de Caraz, 2017	14
Figura 3.13 Actividad económica de la población censada del distrito de Caraz, 2017	14
Figura 3.14 Ocupación principal de la población censada del distrito de Caraz, 2017	15
Figura 3.15 Porcentaje de la superficie de cosecha por cultivo del distrito de Caraz, 2013-2018.....	15
Figura 3.16 Organización de los actores involucrados en la SLP	17
Figura 3.17 Relación entre los actores involucrados en la SLP	19
Figura 4.1 Tipos de Modelos Hidrológicos.....	24

Figura 4.2 Marco Legal e Institucional de la GIRH.....	27
Figura 5.1 Climograma de la Estación PISCO 01 en la SLP (1981-2016).....	35
Figura 5.2 Ubicación de los glaciares tropicales en el mundo.....	36
Figura 5.3 Línea de tiempo de eventos relevantes para la SLP.....	46
Figura 6.1 Flujo de trabajo metodológico de la investigación.....	50
Figura 6.2 Mapa de los tipos de estaciones hidroclimáticas alrededor de la SLP	52
Figura 6.3 Proceso de delimitación de subcuencas de la SLP	56
Figura 6.4 Mapa de las subcuencas que conforman la SLP y sus respectivos outflows.....	57
Figura 6.5 Proceso de cálculo de la ETo en la SLP	59
Figura 6.6 Proceso de cálculo del Kc en la SLP.....	61
Figura 6.7 Mapa de CCPP que demandan agua de la SLP	63
Figura 6.8 Proceso de cálculo de la Demanda Doméstica en la SLP	63
Figura 6.9 Input del Modelo Hidrológico	65
Figura 7.1 Oferta hídrica actual acumulativa (m ³ /s) en las subcuencas de la SLP con los niveles de estrés/escasez hídricos según la Tabla 4.1	71
Figura 7.2 Oferta hídrica futura (m ³ /s) hacia 2030 en la SLP	72
Figura 7.3 Oferta hídrica futura (m ³ /s) hacia 2050 en la SLP	73
Figura 7.4 Demanda hídrica actual (m ³ /s) en la SLP.....	76
Figura 7.5 Demanda doméstica actual y futura (m ³ /s) en la SLP.....	76
Figura 7.6 Comparación del balance hídrico actual con/sin manejo de reservorio (m ³ /s) en la SLP.....	77
Figura 7.7 Balance Hídrico actual y futuro (m ³ /s) de la SLP para cada escenario	79
Figura 7.8 Balance Hídrico mensual (m ³ /s, con manejo de reservorio) en la SLP – Escenario: Sin variación de precipitación.....	80
Figura 7.9 Balance Hídrico mensual (m ³ /s, con manejo de reservorio) en la SLP – Escenario: Con aumento de precipitación.....	80

Figura 7.10 Balance Hídrico mensual (m^3/s , con manejo de reservorio) en la SLP
– Escenario: Con disminución de precipitación 81

Figura 7.11 Balance Hídrico anual promedio (m^3/s) para cada escenario..... 81

Figura 8.1 Niveles de Seguridad Hídrica en comparación de la Oferta-Demanda
hídrica actual (m^3/s) en la SLP..... 90



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua (Perú)
CB	Cordillera Blanca
CCPP	Centros poblados
DEM	Digital Elevation Model o Modelo de Elevación Digital
ET	Evapotranspiración
ETo	Evapotranspiración de referencia
FAO	Food and Agriculture Organization
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Alta Montaña (Perú)
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática (Perú)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kc	Coefficiente de cultivo
JASS	Juntas Administradoras de Servicio y Saneamiento (Perú)
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego (Perú)
MINAM	Ministerio del Ambiente (Perú)
NASA	National Aeronautics and Space Administration (EE.UU.)
PISCO	Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations
σ	Desviación estándar
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SLP	Subcuenca Llullán - Parón
SUNASS	Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Perú)
UGRH	Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (actualmente "Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas") (Perú)

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, el cambio climático es uno de los desafíos más complejos de afrontar por sus impactos transectoriales. En este contexto, el IPCC (2019) señala con un nivel de confianza alto que los cambios glaciares alteran la estacionalidad y la cantidad de escorrentía, y con un nivel de confianza medio que el derretimiento glaciar, localmente, tiene repercusión en los recursos hídricos en zonas como los Andes. Se ha demostrado que el retroceso glaciar en los glaciares tropicales está en aceleración (ANA, 2019; Condom et al., 2012; Coudrain et al., 2005; Drenkhan et al., 2015; Vergara et al., 2007; Vuille et al., 2018), puesto que en los Andes el balance glaciar varió de -0.2 m.w.e./año entre 1964-1975 a -0.76 m.w.e./año entre 1976-2010 (Rabatel et al., 2013).

El Perú alberga ~71% de los glaciares tropicales (ANA, 2019) y la Cordillera Blanca (CB) contiene el ~41% de los glaciares peruanos (INAIGEM, 2018). Los glaciares de la CB han retrocedido intensamente en los últimos años, perdiendo el ~38% de su área glaciar entre 1970-2016 (INAIGEM, 2018). Se detectaron 882 lagunas glaciares en la CB, de las cuales 535 lagunas están en la cuenca del río Santa (Emmer et al. 2016), mientras se proyecta la formación de 41 posibles nuevas lagunas (Guardamino et al., 2019). La presente tesis se enfoca en la subcuenca Lullán-Parón (SLP), en la CB, cuenca alta del río Santa (Perú): la cual incluye a la laguna Parón (45 hm³) (ANA, 2015) y ~16% de cubierta glaciar (22.45 km²) (INAIGEM, 2018). Ante el retroceso glaciar proyectado, la disposición de agua del río Santa podría reducirse en 50% en el caudal de la época seca (Motschmann et al., 2020).

No obstante, la falta de información específica sobre la SLP mantiene la incertidumbre ante este posible escenario y sus potenciales efectos. Si las tendencias observadas se mantienen, la SLP podría tener impactos graves debido al retroceso glaciar, especialmente cuando el glaciar desaparezca por completo, puesto que, en tal caso, el caudal de la temporada seca se reduciría a menos del 40% de su nivel en 2012 (Baraer et al., 2012). Los impactos más severos en los recursos hídricos de la SLP están relacionados con la alta dependencia económica y doméstica de la población de la cuenca del río Santa con las fuentes de agua glaciar (Condom et al., 2012). Por ello, los impactos serán principalmente abordados en este trabajo desde los sectores de mayor demanda: la demanda agrícola con 1489.76 hm³/año (96%); y la doméstica con 23.96 hm³/año (2%)

INTRODUCCIÓN

(ANA, 2015). La demanda doméstica está en crecimiento, ya que la población del distrito de Caraz ha aumentado aproximadamente 208 personas/año entre 1993-2017 (INEI, 1994, 2007, 2017). Además de la demanda agrícola y poblacional, se debe considerar que el sector energético también depende del represamiento de la laguna Parón para mantener la generación eléctrica de la central hidroeléctrica Cañón del Pato con una capacidad de ~263 MW (ANA, 2015; COES, 2020; Drenkhan, 2016; INAIGEM, 2018) y para controlar la concentración de sedimentos en el agua, reduciendo el daño las turbinas (French, 2019). A ello se le suma, el potencial aumento de la demanda hidroenergética, ya que esta central aumentó su capacidad de ~50 MW a ~263 MW entre 1958 y 2016 ante el incremento de la demanda energética (French, 2019). Así también, Duke Energy EGENOR S.A (que desde 2016 es Orazul Energy Peru S.A.), propietaria de la CH, se ha visto involucrada en conflictos con la comunidad Cruz de Mayo dentro de la SLP, debido al control de la descarga de la laguna Parón y la licencia de uso de agua (Carey, 2014; Carey et al., 2012; French, 2016, 2019; Lynch, 2012).

Esta tesis se enfoca en estudiar el balance hídrico en el contexto de retroceso glaciar y los cambios en la demanda de agua, a partir de las estimaciones actuales y futuras (2030 y 2050), obtenidas mediante la ejecución de un modelamiento hidrológico en el contexto de un retroceso glaciar. Para tener una mejor idea de las potenciales situaciones futuras, se construyen escenarios según la variación de la precipitación, basados en de Schauwecker et al. (2014), Condom et al. (2012) y Vergara et al. (2011). Se analiza y discute principalmente los cambios en la variabilidad estacional, la contribución glaciar y los potenciales riesgos para la seguridad hídrica, pero también las potenciales oportunidades para el desarrollo de ciertas actividades, sobre todo la agricultura, e incluso la generación de energía eléctrica. Finalmente, se plantean determinadas pautas y sugerencias preliminares como parte de estrategias de adaptación frente a los impactos del cambio climático y cambios socio-económicos.

Capítulo 2 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Problemática

El retroceso glaciar en la SLP podría conllevar potencialmente a severas consecuencias en la seguridad hídrica, pero un posible déficit en el balance hídrico es incierto para la SLP. Hasta el 2012 no se había notado una superación del “*peak water*” (punto de quiebre de máximo caudal), como sí ha ocurrido en otras subcuencas de la CB, donde el caudal desciende abruptamente (Baraer et al., 2012) (ver Cap. 4.2). La falta de evidencia genera incertidumbre sobre si habrá “*peak water*”, y cuándo podría ocurrir, al no existir estudios específicos en ello desde 2012. Más aún, el problema se complica al desconocer cómo posiblemente será el control de la laguna Parón, ya que existe una escotilla instalada en el túnel que drena el agua de la laguna (French, 2016; Suarez et al., 2008), cuyo control ha sido motivo del largo conflicto entre una comunidad campesina y empresa hidroeléctrica (French, 2016, 2019). Además, se desconoce si una reducción en la oferta hídrica podría generar un grave impacto en la seguridad hídrica de la SLP, ya que se almacena una elevada cantidad de agua en la laguna Parón, la cual representa la más grande de la CB (French, 2016; Haeberli et al., 2016; Navarro et al., 2017) con 45 hm³ (ANA, 2015); y en su cobertura glaciar de ~16% (INAIGEM, 2018).

Este panorama implica una preocupación para los habitantes de la SLP y zonas aledañas, considerando que la provisión de agua en los Andes tropicales para las actividades humanas son: principalmente la agricultura – la cual usa el 80% del agua a nivel nacional - , minería, generación eléctrica, y consumo humano (Condom et al., 2012; Vuille et al., 2018). Bajo un escenario de desglaciación total en la CB y SLP a futuro, se estiman pérdidas de \$ 144 millones ante una reducción forzada de la producción energética de la central hidroeléctrica Caño del Pato de 1540 Gigavatio por hora (GWh) a 970 GWh (Condom et al., 2012; Drenkhan, 2016; Vergara et al., 2007).

Se reconoce que el retroceso glaciar repercute en los ecosistemas, las sociedades, la economía, la cultural, el turismo y la recreación (Vuille et al., 2018), pero este estudio se enfocará en los impactos para las principales actividades que demandan agua en la SLP: el sector agrícola con 42.71 hm³/año y el sector doméstico con 1.35 hm³/año (ANA, 2015).

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.2. Justificación

Los impactos del retroceso glaciar en la SLP se convierten en un problema relevante al tratarse de una subcuenca que genera y almacena una importante cantidad de agua para diferentes usos humanos, incluyendo a la quinta hidroeléctrica de mayor producción energética el Perú (generando el 2.7% de la energía nacional) según COES (2020). Una primera razón se basa en asegurar el acceso a una cantidad y calidad de agua adecuada que permita el desarrollo de la vida. A pesar de que se carece de un aparato internacional que legitime el acceso al agua como un derecho, no implica que no deba considerarse como un derecho universal humano (Guevara, 2008). A nivel internacional, los tratados, acuerdos, declaraciones, y convenios hacen referencia al derecho de una cantidad y calidad de agua necesaria para la vida (Guevara, 2008), mientras que, a nivel nacional, la disposición legal en la que se ampara este derecho es la Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338 (Reglamento de La Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338, 2010). Esta disponibilidad en calidad y cantidad necesaria para la vida se estudia desde la Gestión Integrada de Recursos Hídricos.

Asimismo, este estudio se enmarca en un contexto en el que el cambio climático impacta a los humanos a través del recurso hídrico (Sadoff & Muller, 2010). La población rural de la zona es altamente consciente de la amenaza que representa la carencia de agua para el uso doméstico y agrícola, sobre todo con el declive en el caudal durante la época seca (Motschmann et al., 2020). En ese sentido, es necesario una investigación detallada a nivel de subcuenca con el objetivo de encontrar y comprender los cambios y dinámicas de procesos vinculados a los recursos hídricos, especialmente cuando la amplitud de la cuenca alta del río Santa explica que los impactos del retroceso de los glaciares sean diferentes entre cada subcuenca, por lo que (French et al., 2016). El valor de este estudio yace en la falta de investigación sobre la totalidad de la SLP. Se ha visto que los estudios existentes sobre la SLP suelen centrarse principalmente en los glaciares localizados en la parte media y alta del área de estudio como lo hicieron Gancedo Alonso (2018); Navarro et al. (2017); Rojas Toledo (2018); Suarez (2003); Suarez et al. (2008) y no tratan espacialmente la totalidad de la SLP como un sistema que también incluye aspectos socioeconómicos. En ese contexto, estudiar los procesos y dinámicas que impactan en la

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

oferta y demanda del recurso hídrico puede permitir guiar el proceso de mejora en la gestión de recursos hídricos (Sadoff & Muller, 2010).

Finalmente, esta investigación produce información y bases de datos específicas para el área de estudio que complementará, organizará e integrará la escasa información existente a este nivel espacial. Se ejecutó un modelo hidrológico (ver Cap. 6.3) que simula posibles escenarios (ver Cap. 6.4.2). Los resultados del modelamiento hidrológico ofrecerán una base sobre la cual se evalúen la GIRH de la región, sobre todo para un adecuado manejo de la laguna Parón, y las estrategias generales de adaptación ante una eventual situación de inseguridad hídrica.

2.3. Preguntas de Investigación

La presente tesis está orientada por la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué consecuencias implica el retroceso glaciar en la disponibilidad hídrica para los principales usos de agua (agrícola y doméstico) ante los cambios del balance hídrico en la SLP?

Esta pregunta contiene aspectos específicos que se detallarán a continuación:

¿Cuáles son los potenciales escenarios futuros del balance hídrico y qué aspectos glacio-hidrológicos y socioeconómicos deben considerarse en su construcción?

¿Cuál es la oferta hídrica actual y futura de la SLP, cómo varía estacionalmente, y en qué medida la contribución glaciar actual aporta agua al sistema?

¿Cuál es la demanda hídrica actual y futura y cuán satisfecha está por la oferta hídrica?

¿En qué medida la regulación de la laguna Parón y la contribución glaciar influencia al balance hídrico?

¿Cuál es el nivel de seguridad hídrica en base a la oferta hídrica?

¿Qué diferentes medidas de adaptación preliminares serían viables? ¿qué recomendaciones se pueden ofrecer con el fin de lograr una GIRH?

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

2.4. Hipótesis

Actualmente, la oferta hídrica ha sido suficiente para satisfacer la demanda hídrica, principalmente agrícola, debido a la contribución glaciar y la regulación de la descarga de la laguna Parón. No obstante, ante el acelerado retroceso glaciar, ocurriría un aumento progresivo de la oferta hídrica hacia 2030 y una disminución hacia 2050. Esto sumado a un manejo inadecuado de la descarga de la laguna Parón generaría una situación de potencial déficit de agua en al menos los meses de estiaje con niveles críticos de seguridad hídrica para los principales usuarios dentro de la SLP.

2.5. Objetivos

El propósito de esta tesis de investigación se divide en los siguientes objetivos:

2.5.1. Objetivo General

Determinar las consecuencias del retroceso glaciar y cambios en la demanda de agua para la seguridad hídrica en la SLP hacia los años 2030 y 2050.

2.5.2. Objetivos Específicos

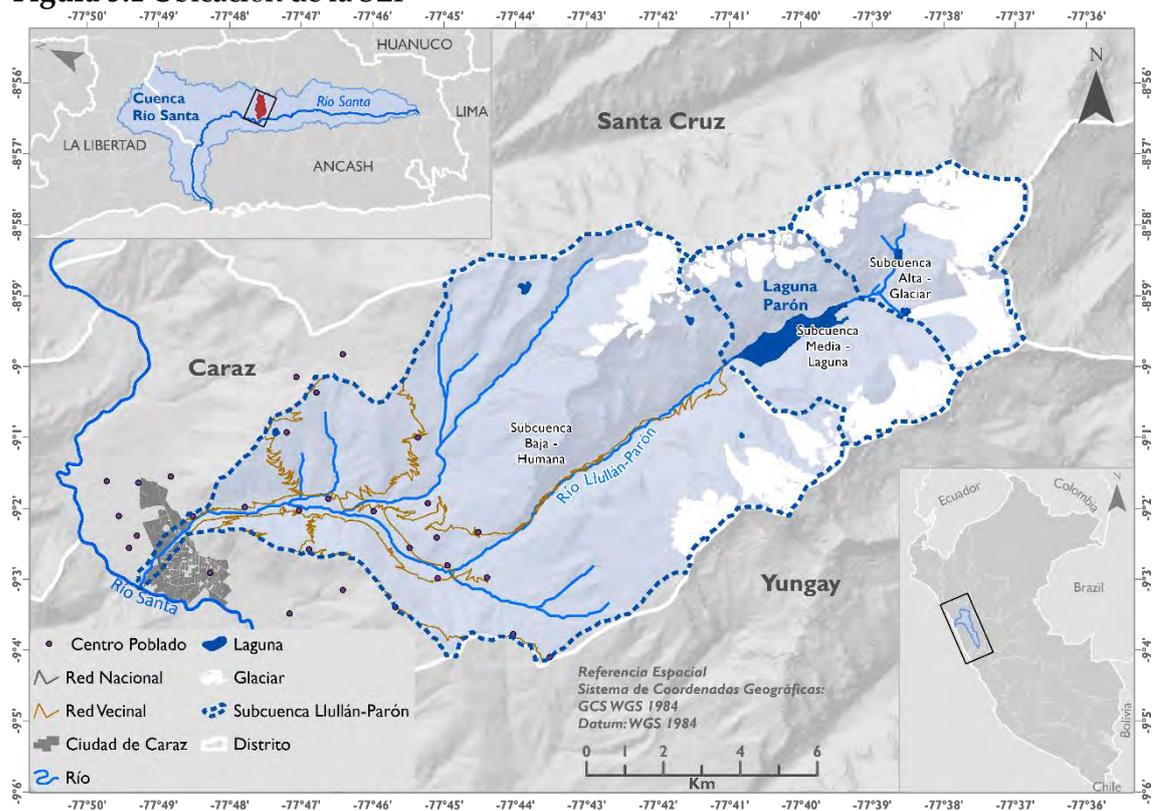
1. Colectar y Procesar los datos necesarios para su uso como insumos del modelo hidrológico
2. Determinar y justificar las variables y parámetros para definir los potenciales escenarios hacia 2030 y 2050
3. Estimar la contribución glaciar, la oferta, demanda y el balance hídrico actual y futuro en base a los escenarios definidos
4. Calcular el actual impacto del retroceso glaciar en el caudal de la SLP, a través de los indicadores de seguridad hídrica y los cambios en la variabilidad estacional
5. Proponer preliminarmente estrategias de adaptación ante tales escenarios

Capítulo 3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización Geográfica

La SLP (143.96 km²) está dentro del Callejón de Huaylas, en el flanco occidental de la CB, en la cuenca alta del río Santa. Está dentro de la jurisdicción de la Autoridad Local del Agua (ALA) Huaraz, y la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) Huarmey-Chicama. Se ubica en el distrito de Caraz, provincia de Huaylas, región Ancash. La desembocadura de la SLP se localiza en la ciudad de Caraz (ver **Figura 3.1**).

Figura 3.1 Ubicación de la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del ANA (2007, 2014); IGN (2020); INAI GEM (2018); MINEDU (2020); MTC (2017, 2019); NASA (2020); SIGRID (2020)

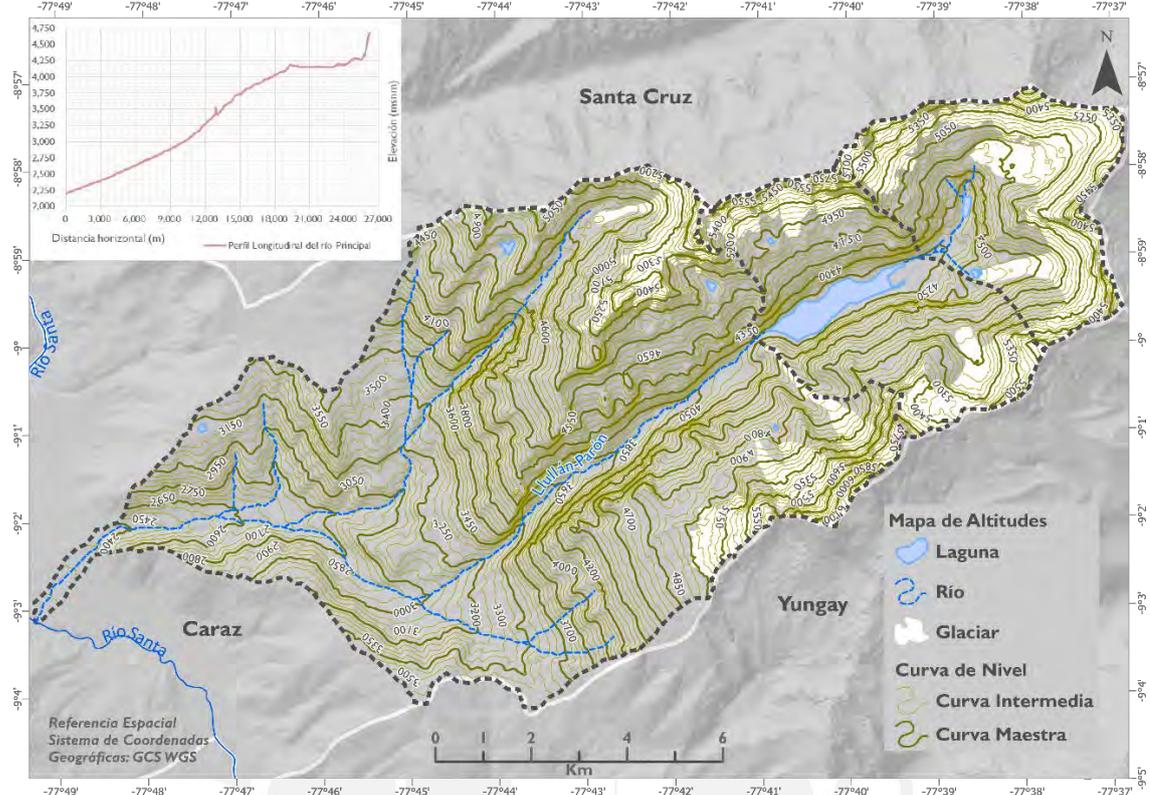
3.2. Descripción del Medio Natural

Características topográficas

La subcuenca baja (102.56 km²) tiene la mayor variación altitudinal (2195-6342 msnm), con el punto más alto (nevado Huandoy) y el más bajo (desembocadura del río Lullán-Parón) de la SLP. Las subcuencas media y alta (41.39 km²) tienen una menor variación altitudinal (4148-5913 msnm), y la mayoría de glaciares y lagunas (ver **Figura 3.2**).

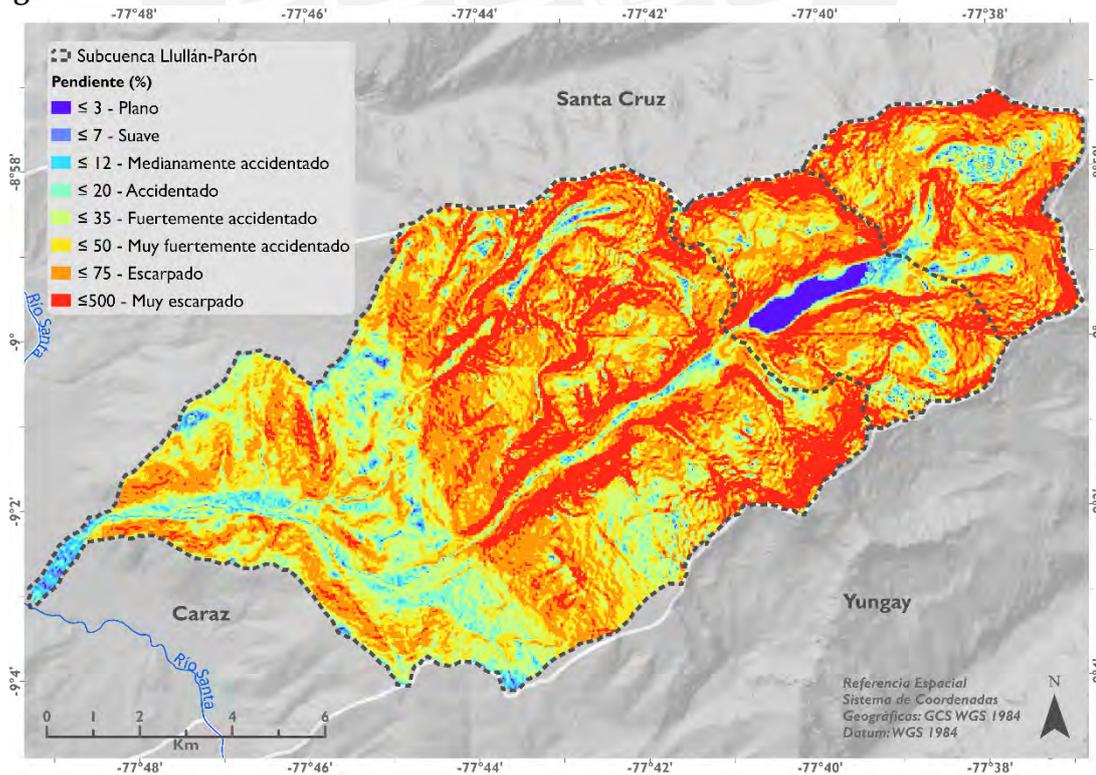
ÁREA DE ESTUDIO

Figura 3.2 Curvas de Nivel dentro la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ANA (2011, 2014); IGN (2020); INAIEM (2018); NASA (2020)

Figura 3.3 Pendientes dentro la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IGN (2020); NASA (2020)

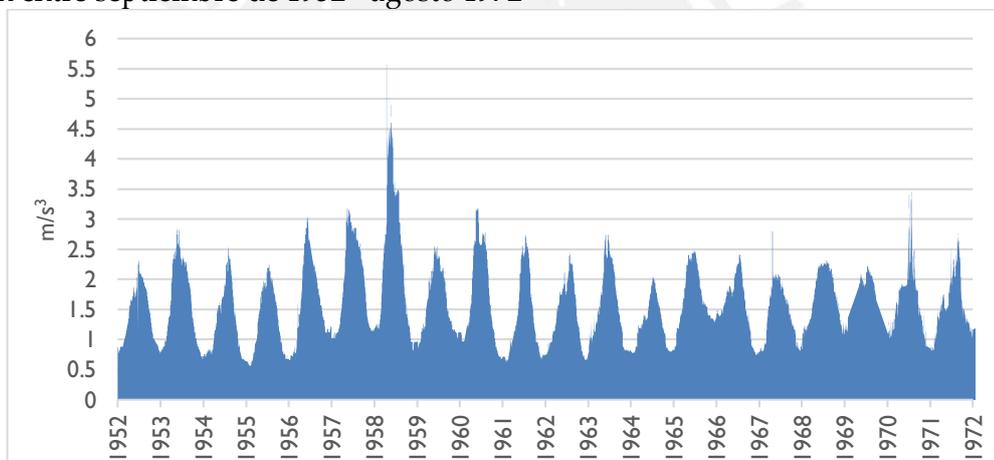
ÁREA DE ESTUDIO

La SLP comprende un relieve sumamente abrupto (> 75%) en el sector oriental, mientras que en el occidental predomina una pendiente menos abrupta (~40%), en donde se ubican los centros poblados (ver **Figura 3.3**). Pese a ello, el perfil longitudinal del río principal muestra pendientes aún mucho más suaves (~9%) (ver **Figura 3.2**).

Características hidrológicas

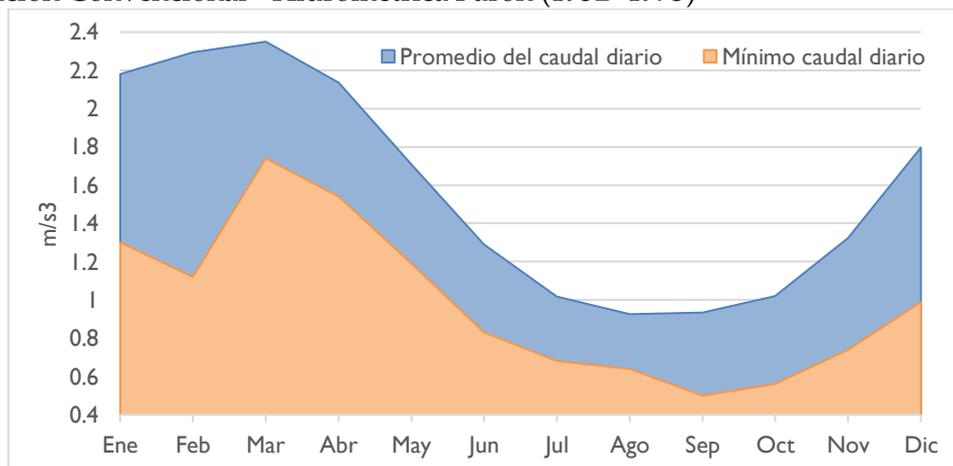
Los registros de estaciones hidrométricas son escasos. Entre 1952-1972, el caudal diario registrado evidenció una fluctuación interanual en el punto de descarga de la laguna Parón (ver **Figura 3.4**). Este patrón estacional indica que de enero a abril el promedio del caudal diario fluctuó entre 2.1-2.4 m³/s; mientras que, de julio a octubre, entre 0.9-1.1 m³/s. El caudal siempre fue mayor a 0.5 m³/s (ver **Figura 3.5**).

Figura 3.4 Caudal diario (m³/s) registrado por la Estación Convencional - Hidrométrica Parón entre septiembre de 1952 - agosto 1972



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ANA (2020)

Figura 3.5 El promedio del caudal diario (m³/s) y el mínimo caudal diario registrado por la Estación Convencional - Hidrométrica Parón (1952- 1973)



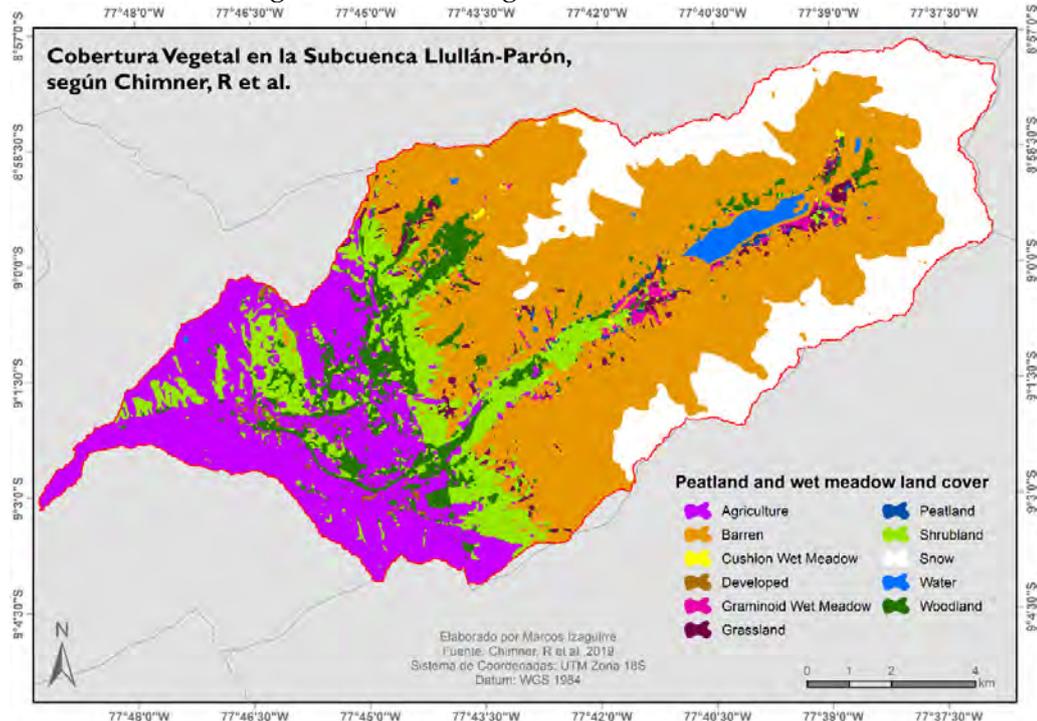
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ANA (2020)

ÁREA DE ESTUDIO

Características bióticas

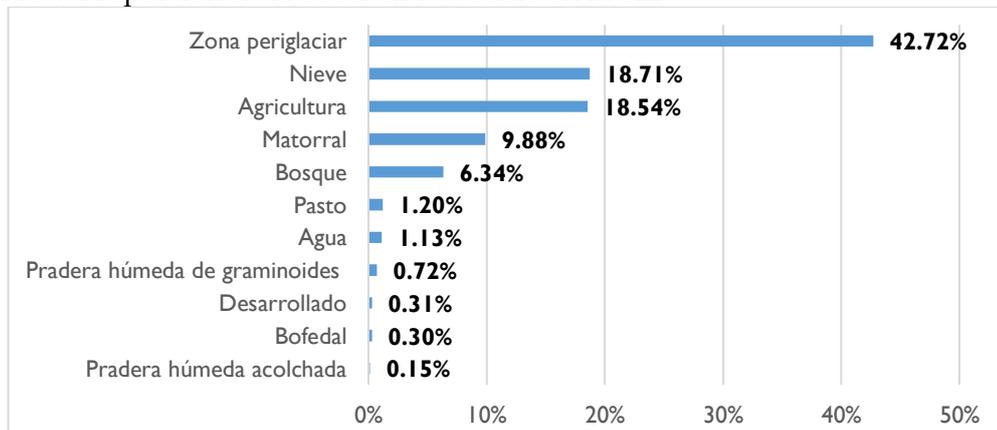
Los principales ecosistemas en la SLP son altoandinos. Por su extensión, el mapa de ecorregiones permite identificar solo dos tipos de ecorregiones (serranía esteparia y puna). En cambio, el mapa de ecosistemas del MINAM permite observar múltiples categorías y ecosistemas al interior de la subcuenca como el bosque de relicto altoandino, el matorral andino y el pajonal de puna subhúmeda que pertenecen a la ecorregión de puna (Brack & Mendiola, 2000).

Figura 3.6 Cobertura Vegetal en la SLP, según Chimner, R. et al.



Fuente: Elaborado a partir de datos de Chimner et al. (2019b)

Figura 3.7 Proporción de la cobertura de suelo en la SLP



Fuente: Elaborado a partir de datos de Chimner et al., 2019b

ÁREA DE ESTUDIO

La especie principal del bosque de relictos es el queñoal (*Polylepis spp.*) (Brack & Mendiola, 2000; Ruíz Ostoic et al., 2019). El matorral andino está formado por vegetación leñosa arbustiva no mayor a 4 m de altura (MINAM, 2007). El pajonal de puna es vegetación herbácea en la cual predominan las gramíneas de poca altura (Brack & Mendiola, 2000; MINAM, 2007).

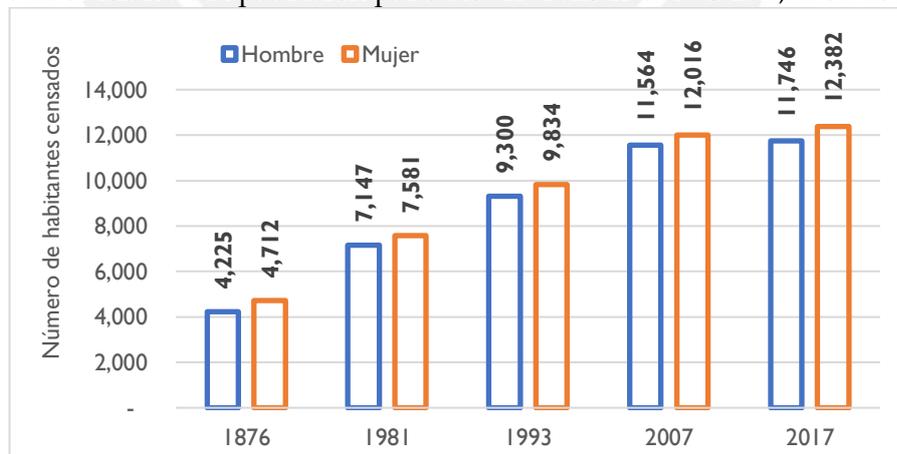
Una distribución más específica se puede observar en el estudio realizado por Chimner et al. (2019a) (ver **Figura 3.6**). Este representa once categorías, aunque de manera similar al mapa anterior se puede visualizar el mismo patrón en las categorías de Agricultura (*Agriculture*), Nieve (*Snow*) y Zona Periglacial (*Barren*) con mayor detalle. Las áreas de Agricultura y Matorrales (*Shrubland*) son las que abarcan mayor porcentaje de las categorías que incluyen vegetación (ver **Figura 3.7**).

3.3. Descripción del Medio Humano

Características socio-demográficas

La población del distrito de Caraz en la parte baja de la SLP ha aumentado en 30% entre 1981-1993, en 23% entre 1993-2007, y solo en 2% entre 2007-2017, lo cual implica una reducción del crecimiento poblacional en 85% (ver **Figura 3.8**).

Figura 3.8 Evolución de la población por sexo en el distrito de Caraz, 1876-2017



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Dirección General de Estadística (1878; INE (1984); INEI (1994, 2007, 2017)

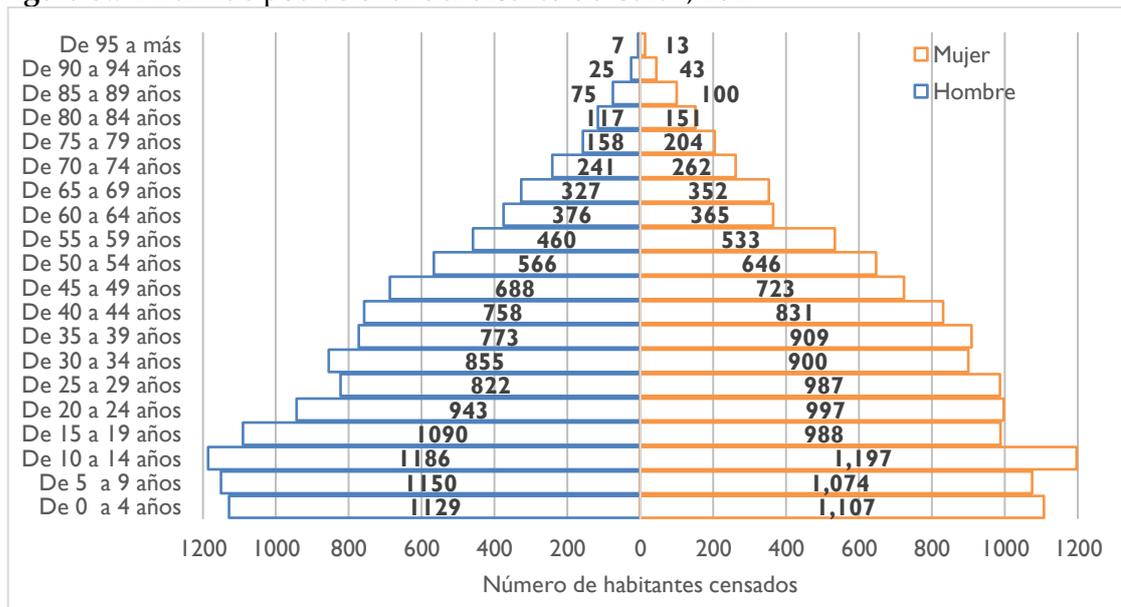
La composición de la población por sexo y edad se muestra en una pirámide poblacional, en la cual la base es más amplia que la cúspide, por lo que la población mayoritaria en

ÁREA DE ESTUDIO

el distrito de Caraz se trata de hombres y mujeres jóvenes y adultos (menores de 40 años) (ver **Figura 3.9**).

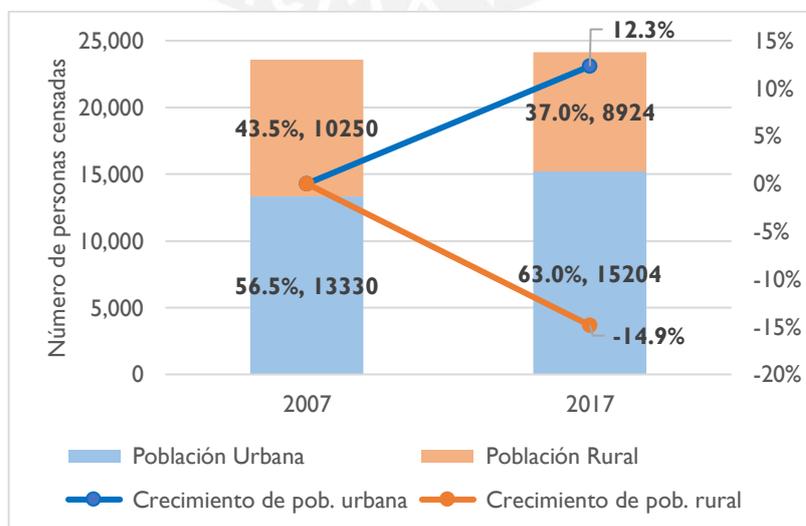
La población mayoritariamente está asentada en zonas urbanas (63%). Se puede evidenciar que ha ocurrido un proceso de migración del campo a la ciudad como sucede a nivel general en el país entre el 2007 y 2017. Si bien el número de viviendas rurales ha disminuido en 1.1 % la reducción poblacional de la zona rural ha sido de 14.9% entre 2007-2017 según el INEI (2007, 2017) (ver **Figura 3.10**).

Figura 3.9 Pirámide poblacional del distrito de Caraz, 2017



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEI (2017)

Figura 3.10 Evolución del cambio poblacional urbano-rural del distrito de Caraz, 2007-2017



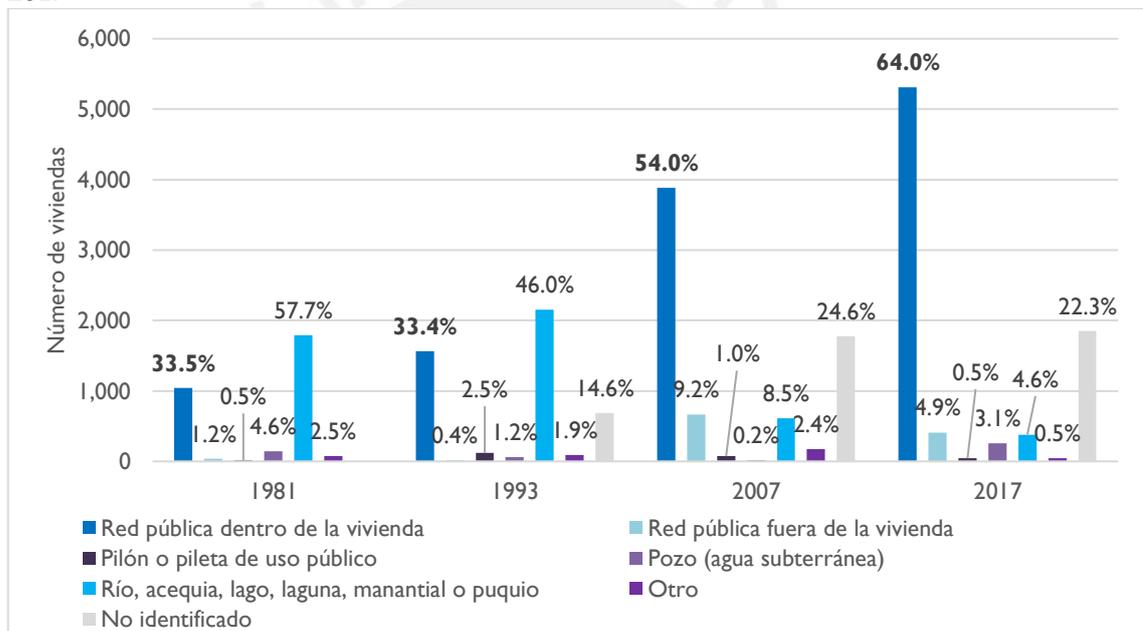
Fuente: Elaboración propia a partir de datos INEI (2007, 2017)

ÁREA DE ESTUDIO

El servicio de alumbrado eléctrico se expandió para cubrir casi cuatro veces más viviendas entre 1981-2017 (de 1236 a 5504): sin embargo, hasta 2017 aún existían 945 viviendas en el distrito de Caraz que no cuentan con tal servicio (INE, 1984; INEI, 1994, 2007, 2017). Esto contrasta con la presencia de la central del Cañón del Pato, la cual es la quinta hidroeléctrica de mayor producción energética anual del Perú (COES, 2020).

La red pública llega cada vez a más viviendas, mientras que las que usaban directamente el agua del río, manantiales, acequias y lagunas han disminuido, aunque aún ~14% de estas no tienen acceso a la red pública (ver **Figura 3.11**). El río Lullán-Parón tiene niveles de calidad aceptables para el consumo humano con un pH neutro (ANA, 2020).

Figura 3.11 Evolución del acceso al servicio de agua potable en el distrito de Caraz, 1981-2017

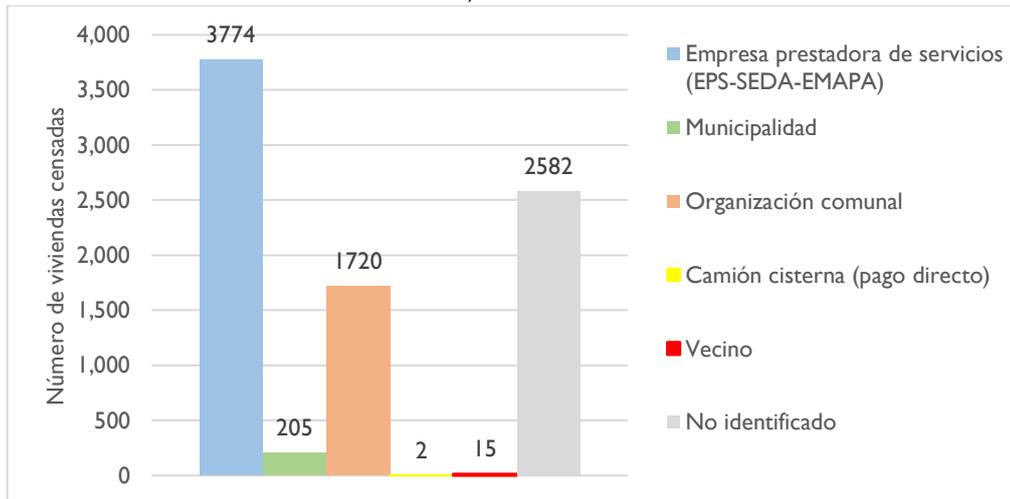


Fuente: Elaboración propia a partir de datos (INE, 1984; INEI, 1994, 2007, 2017)

El 45% de las viviendas censadas del distrito de Caraz en 2017 pagaba por el servicio de agua potable a una Empresa Prestadora de Servicios (EPS) (ver **Figura 3.12**), denominada EPS Chavín S.A (Sunass, 2014, 2015). La segunda entidad que brinda el servicio de agua corresponde a la organización comunal, a través de la JASS (Sunass, 2014, 2015) (ver **Figura 3.17**). Estas entidades cubren 84.3% de la ciudad de Caraz con agua potable y un 74.3%, con alcantarillado, teniendo como fuente principal las aguas del río Lullán-Parón. El uso agrícola en la SLP también tiene como fuente este río para irrigar un área de 2 585.66 ha, requiriendo de 42.71 hm³ anuales (ANA, 2015).

ÁREA DE ESTUDIO

Figura 3.12 ¿A qué empresa o entidad se paga por el servicio de agua?, según las viviendas censadas del distrito de Caraz, 2017

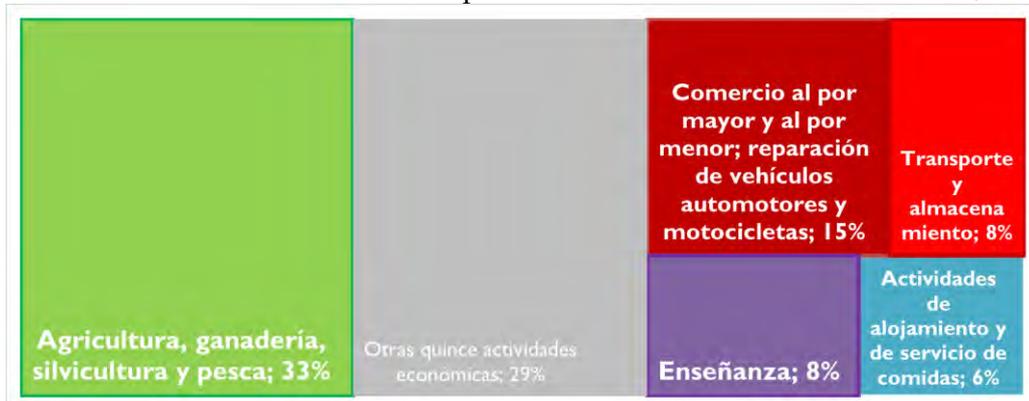


Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEI (2017)

Actividades económicas

Las principales actividades económicas de la población son la agricultura, el comercio y la enseñanza en general (ver **Figura 3.13**). La composición de la población refuerza la importancia de estas actividades, en especial la agricultura, puesto que la población es mayormente joven. Entre los cultivos más comunes, registrados entre 2013-2018, se encontraron el trigo, el maíz, y especialmente el arándano que ha tomado mayor relevancia en los últimos 10 años (MINAGRI, 2020b) (ver **Figura 3.15**). La PEA activa es de 9 377. Las principales ocupaciones de estos se vinculan a las actividades mencionadas anteriormente (la agricultura, el comercio y la enseñanza) puesto que casi el 36% de la PEA está conformada por agricultores, y comerciantes (ver **Figura 3.14**).

Figura 3.13 Actividad económica de la población censada del distrito de Caraz, 2017



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEI (2017)

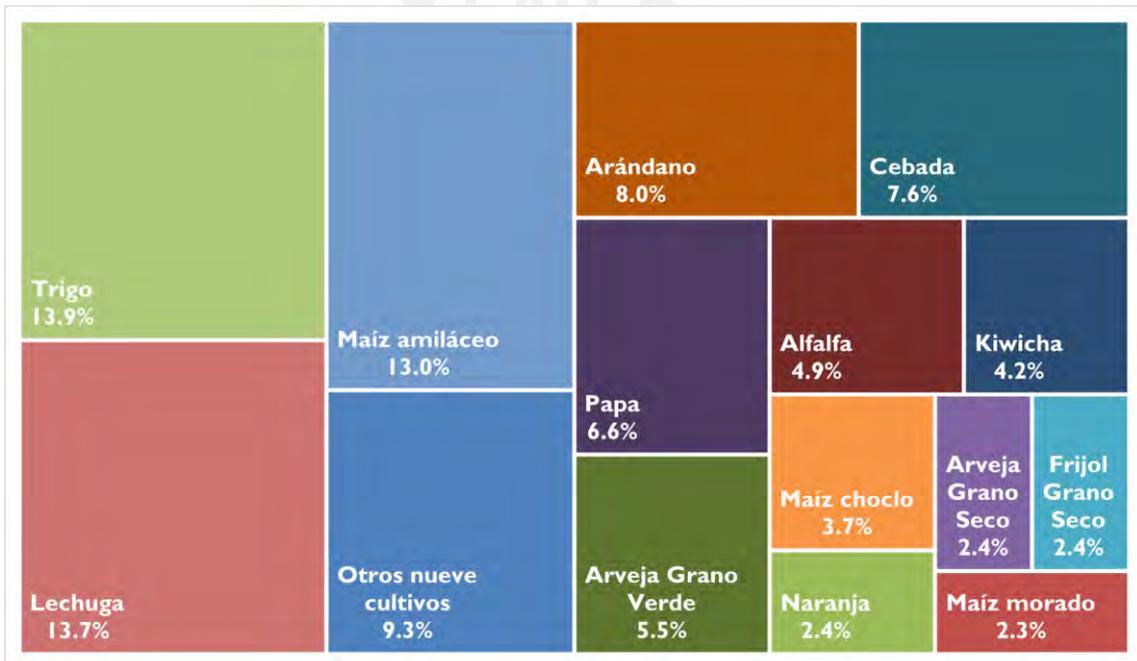
ÁREA DE ESTUDIO

Figura 3.14 Ocupación principal de la población censada del distrito de Caraz, 2017



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del INEI (2017)

Figura 3.15 Porcentaje de la superficie de cosecha por cultivo del distrito de Caraz, 2013-2018



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MINAGRI (2020)

Actores involucrados en la SLP

El principal actor social dentro de la SLP es la comunidad campesina Cruz de Mayo, oficializada en 1976, y cuya inscripción en el registro del directorio de comunidades campesinas se dio en 1998 (SICCAM, 2016). Esta constituye una forma de organización de la sociedad civil la cual tiene un esquema complejo como se aprecia en la **Figura 3.16**. La comunidad, sus miembros y sus suborganizaciones conforman el principal actor de la sociedad civil, cuyas relaciones, influencias y poder está fuertemente establecido espacialmente en la SLP. La comunidad se divide en sectores y para administrar los canales de riego se organizan en Comité de Usuarios de Agua, bajo la coordinación de

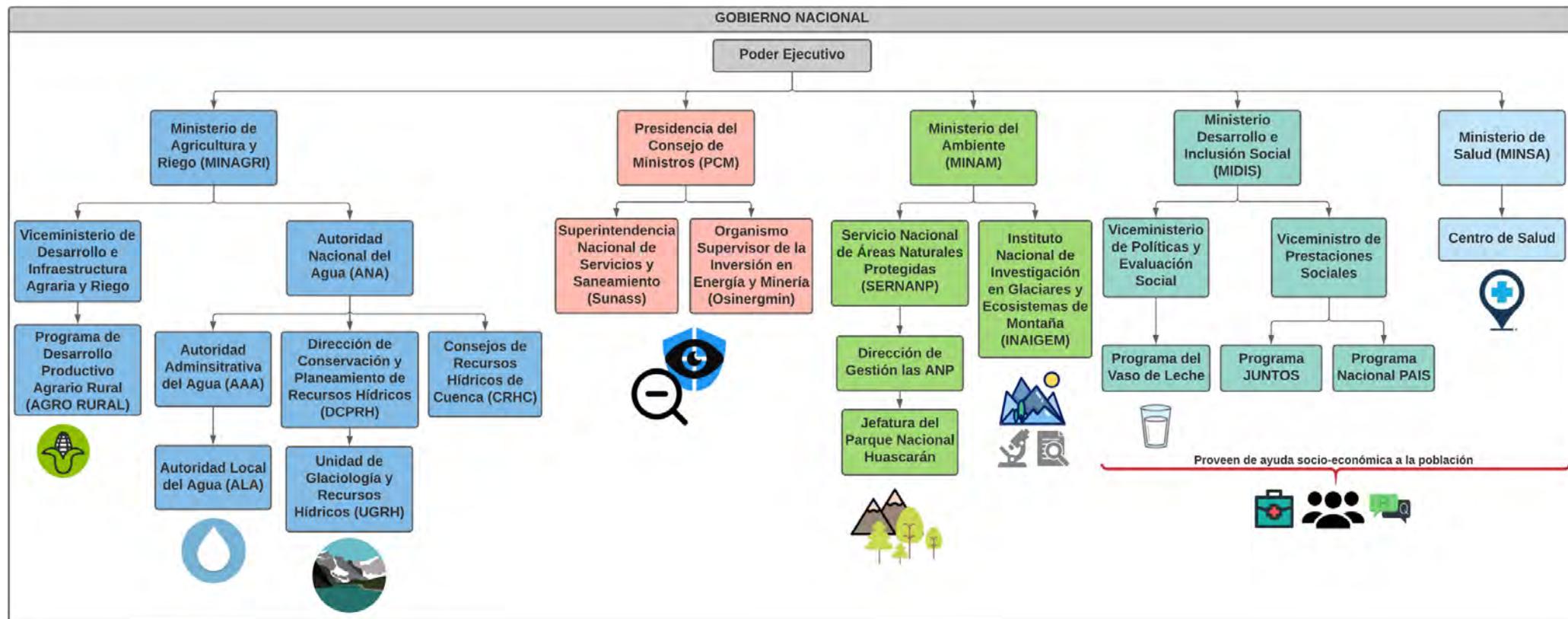
ÁREA DE ESTUDIO

la Comisión de Usuarios de la subcuenca, la cual, a su vez, es reconocida por la Autoridad Local del Agua (ALA) (Yanac León et al., 2020) (ver **Figura 3.17**).

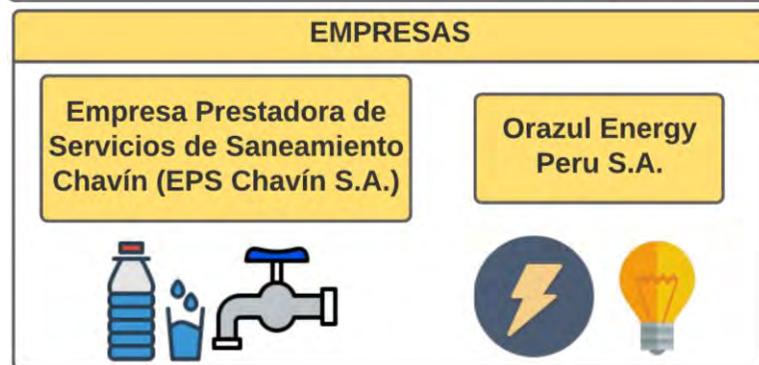
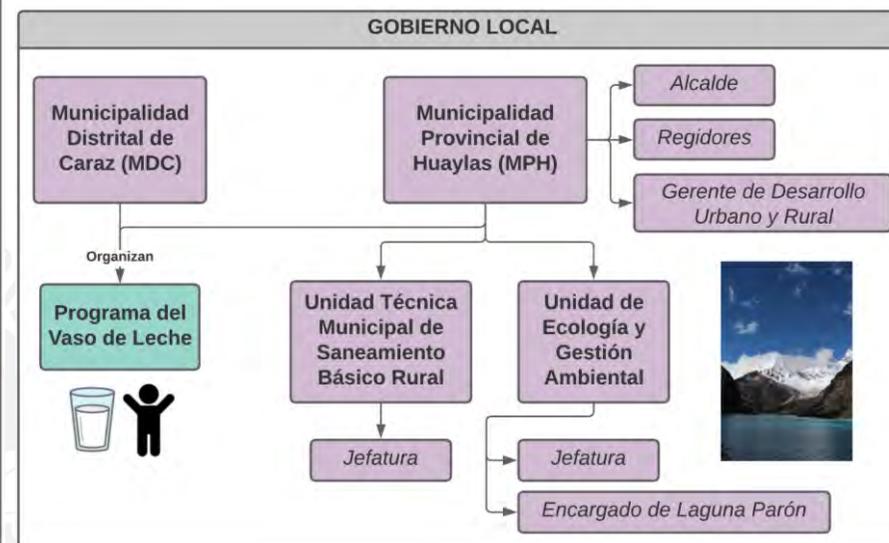
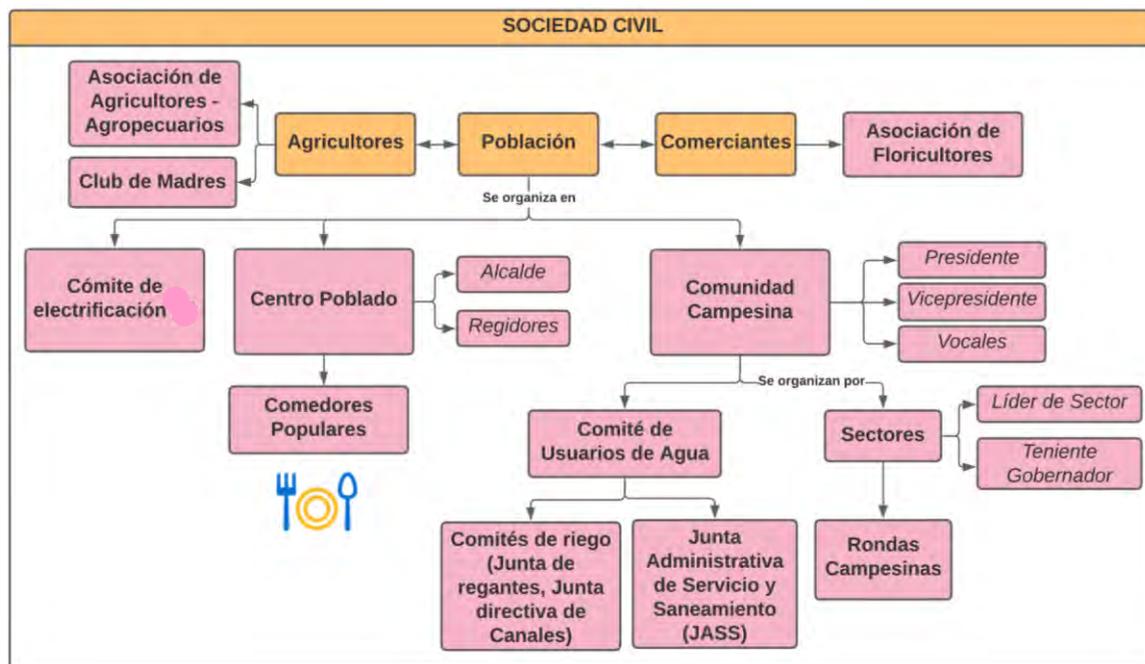
La empresa dueña de la central hidroeléctrica del Cañón del Pato es uno de los actores más relevantes en la SLP: inicialmente, ELECTROPERU obtuvo la licencia de agua de la laguna Parón para uso energético en 1994 (French, 2016), luego, se transfirió su licencia a Duke Energy EGENOR S.A. desde 1996 hasta que fue adquirida por Orazul Energy Peru S.A. en 2016. Estas compañías han controlado tanto el túnel construido en 1984 (French, 2019) como las compuertas de descarga culminadas en 1992 (Carey, 2014).

También los actores estatales del gobierno nacional y local se han visto involucrados en el conflicto de distintas formas (ver Cap. 5.4). El gobierno local tuvo una tendencia a apoyar a los comuneros y agricultores en su pedido para establecer un caudal menos perjudicial, mientras que desde el gobierno nacional se observó una tendencia a apoyar los intereses de la empresa al no escuchar los múltiples reclamos pacíficos sobre lo que estaba ocurriendo en la laguna Parón (French, 2019).

Figura 3.16 Organización de los actores involucrados en la SLP

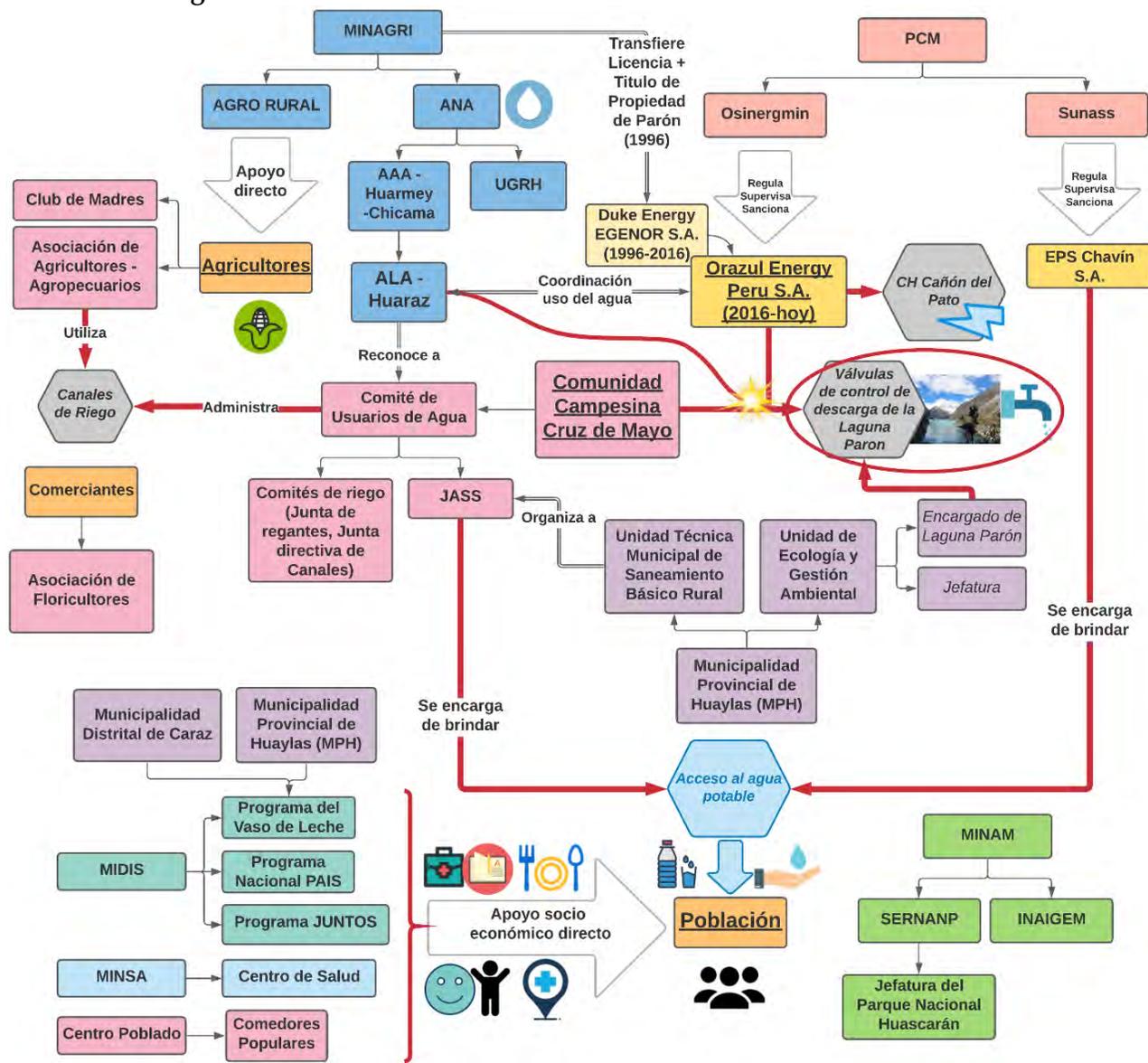


ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia con la contribución de Inés Yanac León, en base a referencias de ANA, 2009, 2015, 2017; Carey, 2014; French, 2016, 2019; French et al., 2016; INAIGEM, 2020; MIDIS, 2020; MINAGRI, 2020a; Municipalidad Provincial de Huaylas, 2020; Osinergmin, 2020; Sunass, 2014, 2020; Yanac León, Walker-Crawford, & Diez Hurtado, 2020

Figura 3.17 Relación entre los actores involucrados en la SLP



Fuente: Elaboración propia con la contribución de Inés Yanac León, en base a referencias de ANA, 2009, 2015, 2017; Carey, 2014; French, 2016, 2019; French et al., 2016; INAIGEM, 2020; MIDIS, 2020; MINAGRI, 2020a; Municipalidad Provincial de Huaylas, 2020; Osinerghmin, 2020; Sunass, 2014, 2020; Yanac León, Walker-Crawford, & Diez Hurtado, 2020

Capítulo 4 MARCO CONCEPTUAL

4.1. Dinámica de Glaciares Tropicales

Formación y dinámica de los glaciares

Los glaciares son masas de hielo formadas por los procesos de acumulación, compactación y recristalización de la nieve (Stahr & Langenscheidt, 2015; Tarbuck & Lutgens, 2005), pero también contienen aire y sedimentos que fluyen con la gravedad por su propia masa (Jain, 2014). Dichos procesos generativos ocurren solo bajo dos condiciones: un déficit en el balance de radiación que genere una pérdida de calor duradera y una topografía que favorezca la acumulación (Muñoz Jiménez, 2000). Es decir, los glaciares suceden donde permanece más nieve de la que se derrite (Jain, 2014). Estos procesos implican un dinamismo por parte de los glaciares, como un agente relevante en el ciclo hidrológico (Tarbuck & Lutgens, 2005), ya que pueden almacenar las precipitaciones durante décadas o incluso siglos (Stahr & Langenscheidt, 2015).

Para entender esta dinámica, el glaciar es comúnmente dividido en dos partes: la zona de acumulación (o de nieves perpetuas) donde ocurre la formación del hielo y aumenta en volumen; y la zona de ablación donde la fusión es predominante (Jain, 2014; Stahr & Langenscheidt, 2015; Tarbuck & Lutgens, 2005). Precisamente, el límite entre ambas zonas ha sido materia de estudio, puesto que permite evaluar la dinámica espacio-temporal de los glaciares; es decir, si los glaciares se extienden o reducen en área, lo cual se relaciona directamente con el balance de masa glaciar (Rabatel et al., 2012). Por ejemplo, múltiples investigadores han estudiado este límite a través de la Línea de Equilibrio (ELA, por sus siglas en inglés) (Schauwecker et al., 2014; Seehaus et al., 2019; Zemp et al., 2015), la altura del nivel de congelamiento (Rabatel et al., 2013; Vuille et al., 2018), la línea de nieve (Rabatel et al., 2012; Suarez et al., 2008), y la altura del nivel de caída de nieve. Todas están basadas principalmente en la temperatura del aire, en especial al momento de eventos de precipitación (Schauwecker et al., 2017). De todas, la más estudiada es la ELA, definida como la separación promedio entre ambas zonas, donde el balance de masa es cero que depende de las condiciones atmosféricas (INAIGEM, 2018; Jain, 2014). La temperatura y la precipitación son las variables físicas que determinan principalmente el cambio de estado y de la elevación de esta (Jain, 2014).

MARCO CONCEPTUAL

Por lo tanto, se entiende el retroceso glaciario como el ascenso de esta línea (ELA o línea de nieve) y un balance de masa glaciario negativo producto de este ascenso (Rabatel et al., 2012; Veettil et al., 2017), generado por cambios en la precipitación y temperatura, e incluso humedad.

Los glaciares tropicales

Existen varios tipos de glaciares, según su ubicación, sus características topográficas y atmosféricas. Los glaciares tropicales, localizados entre los trópicos (23.5° latitud norte – 23.5° latitud sur), se distinguen de los ubicados en latitudes medias y altas por recibir una alta incidencia de radiación solar todos los meses del año lo que impide la creación de una cobertura de nieve extensa alrededor del glaciar durante los meses de invierno (Lejeune et al., 2007; Vuille et al., 2018; Wagnon et al., 2009) y por localizarse, generalmente, sobre 4800 msnm (Jain, 2014; Rabatel et al., 2013; Schauwecker et al., 2017; Suarez et al., 2008; Vuille et al., 2018), aunque esta altitud es variable según las condiciones locales. Dentro de los glaciares tropicales, existen los que se ubican en la zona del trópico exterior como todos los glaciares peruanos. Los glaciares del trópico exterior se caracterizan por lo siguiente: tener una amplitud térmica diaria mayor a la anual, pero con una alta variabilidad anual en precipitación que marcan dos temporadas: seca y húmeda (Georg Kaser, 1999; Georg Kaser et al., 1990); tener cambios continuos de la cobertura de nieve durante el periodo de ablación que dura casi todo el año (7 a 8 meses), especialmente en el verano austral (época húmeda), mientras que durante el invierno austral (época seca) la ablación es reducida (Rabatel et al., 2012); ser sensibles a los cambios en humedad y precipitación, más que a los de temperatura, de hecho el retroceso glaciario en la CB se corresponde más con el aumento de humedad que con el incremento de la precipitación (Veettil et al., 2017).

Entonces, los glaciares de la SLP poseen estas características. Latitudinalmente, se ubican entre 8.5° - 9.5° latitud sur, con características atmosféricas del trópico exterior, dentro de la cadena montañosa CB en la Cordillera de los Andes, alcanzando una elevación de 6342 (ver Cap. 3.2).

4.2. La hidrología glaciar: balance y modelos hidrológicos

En general, la esorrentía glaciar, entendida como toda la esorrentía de la zona glaciar (precipitación, nieve y hielo derretido), está profundamente interconectada con la dinámica acumulación-ablación (el balance de masa glaciar) (Bengtsson et al., 2014). En las zonas de alta montaña, el proceso de derretimiento glaciar es el principal determinante de las variaciones del flujo hídrico superficial a lo largo del día y del año en las cuencas (Stahr & Langenscheidt, 2015). En la SLP, la dinámica acumulación-fusión, repercute en la oferta hídrica de zonas bajas, de modo que existe una esorrentía perenne todo el año en este tipo de cuencas (Suarez et al., 2008) (ver **Figura 3.5**): el aporte glaciar amortigua la variación de la esorrentía superficial entre la temporada húmeda y seca (Baraer et al., 2012).

Sin embargo, estudios han mostrado que el retroceso glaciar actual ha estado causando una alteración en la esorrentía superficial de determinadas cuencas glaciares en los Andes. Este consiste en la ocurrencia de un acentuado aumento inicial de la esorrentía superficial debido al incremento de la contribución glaciar por fusión. Posteriormente, se alcanza un punto de inflexión o “pico hídrico” (“*peak water*”), luego del cual se genera un descenso en la esorrentía superficial y un aumento de la variación intra-anual, p. ej. entre la temporada seca y húmeda (Baraer et al., 2012; Bengtsson et al., 2014; Carey et al., 2014; Drenkhan et al., 2015; Huss & Hock, 2018; IPCC, 2019; UNESCO, 2018; Vuille et al., 2018).

El balance hídrico

El balance hídrico describe los flujos de agua dentro y fuera de un sistema a lo largo de un periodo de tiempo específico en forma de ecuaciones (Sitterson et al., 2017). Las ecuaciones del balance hídrico se rigen bajo el principio físico de la conservación de masa que explica la razón, por la que la masa de agua es constante en el ciclo hidrológico (FAO, 2015). Por lo tanto, cualquier variación en el contenido de agua de un sistema tiene repercusiones en la ecuación que describe las entradas y salidas del sistema (Zhang et al., 2002). Para esta investigación, el balance hídrico se entiende a partir de la ecuación que describe Hartmann (2016) para un balance hídrico promedio de un periodo a largo plazo así: $\Delta f = P - ET$, donde P es la precipitación en forma de nieve, granizo o lluvia;

MARCO CONCEPTUAL

ET es la evapotranspiración; y Δf es la escorrentía superficial. La ET se entiende como el resultado de la suma de la evaporación del agua en el suelo y la transpiración de las plantas (Allen et al., 1998). A esto, posteriormente se añadirán componentes correspondientes a los sistemas humanos como parte del ciclo socio-hidrológico (ver Cap. 4.5). Si bien existen otros elementos involucrados en el ciclo hidrológico como los flujos subterráneos, la percolación y la capilaridad del suelo, y la superficie de condensación, estos factores son difíciles de obtener en periodos cortos (Hartmann, 2016; Allen et al., 1998).

El modelamiento hidrológico

En las últimas décadas, el avance tecnológico computacional, la elaboración de herramientas matemáticas, el aumento de registro de observaciones (a través de sensores remotos o estaciones *in-situ*) junto a un mejor entendimiento del ciclo hidrológico han favorecido el desarrollo del modelamiento hidrológico del balance hídrico (Montanari, 2011). El modelamiento consiste en representar de manera simplificada los procesos del mundo real descritos por el balance hídrico con el objetivo de simular las cantidades de agua de ciertos componentes del ciclo hidrológico (como el caudal), en determinados periodos de tiempo a partir de simulaciones de los procesos hídricos reales (Moradkhani & Sorooshian, 2008; Sitterson et al., 2017; Zhang et al., 2002). Esta simplificación de la realidad busca conseguir estimaciones y predicciones lo más semejantes a esta (Devia et al. 2015). Para ello, un modelo es comparado y calibrado para lograr una mayor exactitud y precisión respecto a lo real.

La literatura científica evidencia que el modelamiento hidrológico actualmente ocupa uno de los subcampos de la hidrología más importantes, siendo herramienta práctica para la gestión de recursos hídricos (Montanari, 2011). Asimismo, permite entender los procesos hídricos en el territorio y que se tomen decisiones más efectiva, puesto que considera no solo variables físicas relacionadas al agua sino también económicas y sociales (Moradkhani & Sorooshian, 2008).

De esta forma, el modelo hidrológico se presenta como una herramienta que permite describir, visualizar, comprender, simular e incluso predecir estos cambios, relaciones y movimientos del agua (Sitterson et al., 2017; Zhang et al., 2002). Conjuntamente, esta

MARCO CONCEPTUAL

herramienta se puede convertir en una opción para mejorar la toma de decisiones y el manejo de recursos hídricos (Montanari, 2011; Moradkhani & Sorooshian, 2008). Es decir, este modelo hidrológico permite entender las variaciones causadas por el retroceso glaciar en la escorrentía superficial vistos en el Cap. 4.2.

Tipos de modelos hidrológicos

El cálculo del balance hídrico puede ser difícil, debido a la complejidad de los procesos hídricos en la realidad (Yarahmadi & Vekerdy, 2003). Por esta razón, existen diversos modelos con sus complejidades y estructuras espaciales. La elección de un modelo específico depende del tipo de información disponible, y el objetivo final (UCAR, 2006; Zhang et al., 2002), incluyendo diferentes parámetros, variables hidroclimáticas, escalas espaciales y niveles de complejidad (Sitterson et al., 2017).

Los modelos se clasifican según su estructura básica y su estructura espacial. La estructura básica define la forma de realizar las estimaciones, las variables y su complejidad, lo cual permite dividirlos en tres categorías: empíricos, conceptuales y físicos (ver **Figura 4.1**). Los empíricos usan pocos parámetros, pero carecen de significancia según las leyes físicas. Los conceptuales simplifican las ecuaciones del balance hídrico, pero no toman en cuenta la variabilidad espacial del territorio. Los físicos utilizan múltiples parámetros que necesitan ser calibrados, pero considera las leyes físicas hidrológicas en sus ecuaciones y la variabilidad espacial del territorio (Sitterson et al., 2017).

Figura 4.1 Tipos de Modelos Hidrológicos



Fuente: Elaboración propia a partir de Sitterson et al. (2017); UCAR (2006)

Los modelos físicos se pueden clasificar de acuerdo a su estructura espacial (la escala espacial de la información que requieren) en tres categorías: agregados, semi-

MARCO CONCEPTUAL

distribuidos, y distribuidos. Los agregados no asumen la variabilidad espacial completa del territorio, y utilizan un área de drenaje particular como única unidad espacial, por lo que los datos que requieren son promedios generalizados para la totalidad del territorio. Los modelos distribuidos usan la información espacialmente grillada, la cual permite asignar parámetros por cada celda, por lo que capta mejor la variabilidad espacial de los datos requeridos. Sin embargo, requiere de información detallada espacialmente (alta resolución espacial) y las celdas pueden incluir (o no) áreas fuera (o dentro) de la cuenca. Entre ambos aparecen los modelos semi-distribuidos considerando datos agregados y distribuidos. Si bien no tiene el detalle espacial del modelo distribuido, el área de drenaje se divide en subcuencas y se estima el flujo hídrico de cada una de estas (Sitterson et al., 2017; UCAR, 2006).

A pesar de las limitaciones del modelo hidrológico, esta investigación resalta su capacidad para dar a comprender los procesos hidrológicos, estimar y predecir (Devia et al., 2015; Sitterson et al., 2017; Zhang et al., 2002). Estas ventajas permiten calcular y proyectar escenarios de disponibilidad hídrica futura que puedan ser tratados desde el marco de una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y la Seguridad Hídrica. En el Perú, la deficiente red de estaciones meteorológicas con registros incompletos (Aybar et al., 2019) y la alta variabilidad espacial del territorio explican que uno de los modelos más usados sea el semi-distribuido como el *Water Evaluation and Planning Tool* (WEAP), el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), y el *Routing System Minerve* (RS MINERVE) (ver Cap. 5.3).

4.3. Hacia una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) apareció en los debates académicos en la década de 1980 para tratar los temas hídricos desde un enfoque holístico (Hoekstra et al., 2018). Inicialmente, lo holístico fue entendido como la intersectorialidad para regular, satisfactoriamente, el uso de agua, asumiendo la estacionalidad de los procesos naturales para predecir el futuro comportamiento de los sistemas biofísicos (Ludwig et al., 2014). Para ello, la GIRH usaba un enfoque basado en escenarios (Sivapalan et al., 2012). Así, la GIRH fue ratificada internacionalmente a

MARCO CONCEPTUAL

través de las cumbres de Dublín y Río, al incluir formalmente el carácter “integral” a la gestión (Eda & Chen, 2010).

No obstante, con el cambio climático, la estacionalidad de los sistemas físico-naturales se tornan inciertos, sumado a la complejidad del comportamiento de los actores (Ludwig et al., 2014). De esta forma, a inicios del siglo XXI, se plantearon una serie de cuestionamientos hacia la GIRH, porque era considerado difícil (y a veces imposible) de implementar gracias a esta complejidad (Cook & Bakker, 2012). Especialmente, ello sucedía en el planteamiento de escenarios a largo plazo, ya que no trata totalmente la dinámica y relación de los sistemas agua-sociedad, al entenderlos como sistemas separados (Blair & Buytaert, 2016; Sivapalan et al., 2012).

En este contexto, Global Water Partnership (GWP) (2005, 2008) definía la GIRH como una herramienta y proceso dinámicos que propone un marco flexible para guiar las políticas, la toma de decisiones y la integración de actores, ajustándose según las especificidades de las cuencas, con la finalidad de lograr un desarrollo sostenible y socioeconómico equitativo. Posteriormente, cuando se empieza a entender la compatibilidad entre la GIRH, la seguridad hídrica (ver Cap. 4.4) (Cook & Bakker, 2012; Drenkhan, 2016) y la sociohidrología (Blair & Buytaert, 2016; Sivapalan et al., 2012), la definición de la GWP se completa al incorporar el objetivo principal de la GIRH y una base científica integral en la que se apoye su práctica. El objetivo de la GIRH es promover y, sobre todo, garantizar la seguridad hídrica (ver Cap.4.4) a través de la gestión y el desarrollo integral-sostenible de las personas (como sociedad) y del medio ambiente, considerando el carácter holístico del agua en cada sistema humano y biofísico (Drenkhan, 2016; Sadoff & Muller, 2010). En tanto, la sociohidrología (ver Cap. 4.5) es la ciencia que sustenta la aplicación de la GIRH, gracias a su énfasis en el entendimiento de la coevolución de los sistemas sociohidrológicos (Sivapalan et al., 2012).

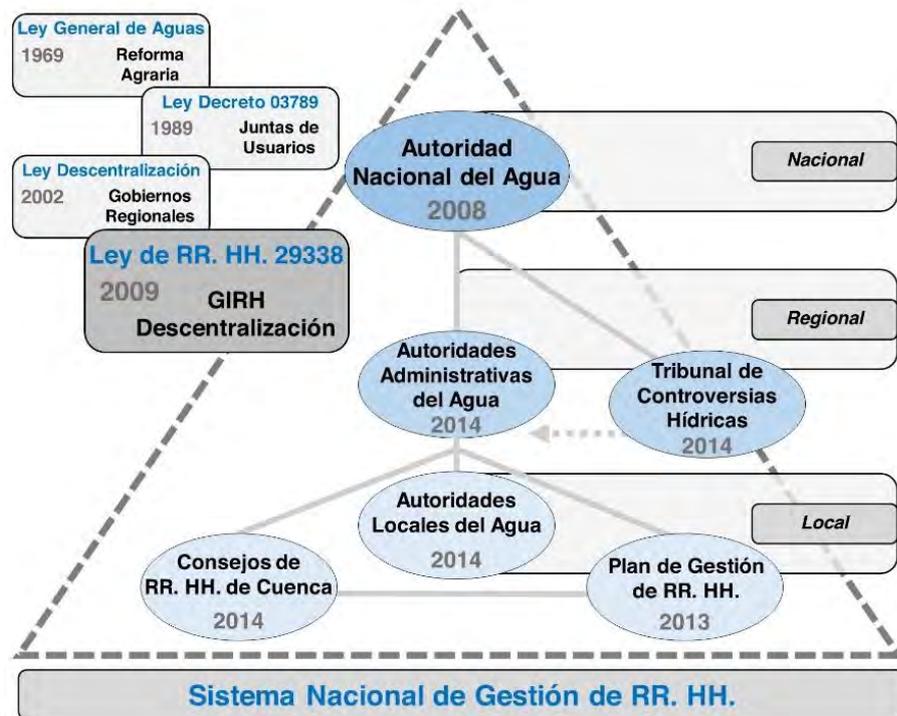
La GIRH reduce las limitaciones mencionadas a partir de su integración con conceptos – de seguridad hídrica y sociohidrología - que se tratan posteriormente (ver Cap. 4.4 - 4.5). Además, es especialmente relevante en la SLP, por la alta cantidad agua que almacena (ver Cap. 3.2), ya que sus principios se basan en el carácter holístico de este recurso (GWP, 2008).

MARCO CONCEPTUAL

A nivel nacional, la aplicación de la GIRH en esta subcuenca peruana se apoya en la 33° Política de Estado que orienta al Gobierno peruano hacia la GIRH (Acuerdo Nacional, 2012). En legislación peruana, su aplicación se ampara en el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338 Art. 6 que estipula que el objetivo del Estado es conseguir un desarrollo sostenible a través de la GIRH (Reglamento de La Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338, 2010). Esta ley devino en la creación de la ANA, y sus entidades adscritas (AAA y ALA) como las estructuras institucionales para implementar la GIRH desde el Estado (ver **Figura 4.2**).

En consecuencia, esta investigación ha sido elaborada en el marco de la GIRH, sustentada en la ciencia sociohidrológica, tratando de cubrir todos los aspectos, sectores, actores, y sistemas involucrados con el agua en el área de estudio para lograr una seguridad hídrica y una adaptación a largo plazo ante los impactos intersectoriales del retroceso glaciar.

Figura 4.2 Marco Legal e Institucional de la GIRH



Fuente: Modificado de Drenkhan (2019)

4.4. ¿Qué implica la Seguridad Hídrica y cómo se mide?

La Seguridad Hídrica no posee una definición concreta, ya que ha sido conceptualizada desde diferentes sectores y enfoques (Ardalan et al., 2019). Esto se debe a que abarca

MARCO CONCEPTUAL

diferentes aspectos como la gestión de riesgos, la disponibilidad hídrica, la accesibilidad hídrica, e incluso la adaptabilidad. Pese a esta amplitud en la definición, para esta investigación, se propone una definición que integre estos aspectos, excluyendo la gestión de riesgos de desastres, la cual no es objeto central de esta tesis: la seguridad hídrica es la capacidad de las sociedades de asegurar sosteniblemente un acceso y disponibilidad a una cantidad y calidad de agua que permita respaldar los medios de subsistencia humanos y ecosistémicos (Cook & Bakker, 2012; Sadoff & Muller, 2010; UN-Water, 2013). Esta se posiciona como eje central del cual dependen, especialmente, la seguridad alimentaria, energética, humana (Willis et al., 2016), e incluso la seguridad nacional y climática (Zeitoun, 2011). Y debe ser trabajada bajo un enfoque que considere inseparables a los procesos biofísicos y sociales vinculados al agua, y que proponga un análisis interdisciplinario y una aplicación multisectorial (Zeitoun, 2011). Justamente, este último aspecto encaja dentro de lo que propone la sociohidrología (ver Cap. 4.5).

La principal ventaja que se tomará de la seguridad hídrica como complemento de la GIRH está en el término “seguridad”. Esto implica un umbral (o estándar), a partir del cual se puede medir y monitorear los niveles (o estado) de seguridad (Cook & Bakker, 2012), por lo que brinda un objetivo final y cuantificable a la GIRH. Esta idea de tener un umbral de seguridad ha llevado a los científicos a desarrollar indicadores que permitan reflejar el estado de un territorio: es decir, si hídricamente es seguro o no.

Tradicionalmente, la seguridad hídrica se usa para medir niveles de escasez hídrica en base a la oferta y demanda según el número de habitantes para un periodo de tiempo (Gain et al., 2016). Inicialmente, se desarrollaron índices de seguridad hídrica centrados en cuantificar el uso de agua per cápita para satisfacer las necesidades básicas humanas y determinar umbrales que indiquen necesidades hídricas insatisfechas (Willis et al., 2016). En tanto, sus principales limitaciones radicaban en su poca atención a la dimensión social, política e institucional del agua (Gain et al., 2016).

Ante estas limitaciones, la GIRH permite reforzar la integración de estas dimensiones (ver Cap. 4.3). Por esta razón, en esta investigación, la seguridad hídrica es entendida en el marco que ofrece la GIRH sustentada en la sociohidrología. Entonces, la seguridad hídrica es el objetivo que se puede alcanzar mediante una GIRH (Sadoff & Muller, 2010)

MARCO CONCEPTUAL

a través de su complementariedad, gracias a sus enfoques transversales sobre el agua (Cook & Bakker, 2012; Drenkhan, 2016).

Indicadores de la Seguridad Hídrica

Se han desarrollado indicadores vinculados a la capacidad adaptativa de la sociedad (Shrestha et al., 2018; Willis et al., 2016), la gobernanza, la gestión, los riesgos de desastres (Ardalan et al., 2019; Jensen & Wu, 2018), e incluso al acceso a servicios básicos como electricidad, salud, y educación (Arreguin-Cortes et al., 2019). En los últimos años, los indicadores mayormente utilizados representan la disponibilidad y la accesibilidad al recurso hídrico (Ardalan et al., 2019; Gain et al., 2016; Jensen & Wu, 2018; Willis et al., 2016). Por su uso más extendido, el siguiente estudio utilizó los indicadores de disponibilidad hídrica para plantear niveles de seguridad hídrica con los que evaluar los resultados del modelamiento hidrológico.

Se necesita un umbral que indique la necesidad hídrica básica humana en un determinado periodo de tiempo por persona. Falkenmark et al. (1989) establecen 1000 m³/año per cápita como principal umbral, basado en el agua requerida para actividades domésticas básicas (alimentación e higiene), y actualmente ha sido tomado por el Banco Mundial como estándar bajo el cual se considera un estado de escasez hídrica (Ardalan et al., 2019). A partir de este umbral se marcan otros dos: 1700 y 500 m³/año per cápita. Estos tres marcan 4 estados de seguridad (ver **Tabla 4.1**).

Tabla 4.1 Niveles de Seguridad Hídrica según la Disponibilidad Hídrica

Disponibilidad hídrica (m ³ /año per cápita)	Estado de Seguridad Hídrica
>1700	No hay estrés hídrico
1000 - 1700	Estrés hídrico
500 - 1000	Escasez hídrica
<500	Escasez hídrica absoluta

Fuente: Basado en Ardalan et al. (2019) y Falkenmark et al. (1989)

La limitación de estos índices yace en que fueron elaborados para medir la seguridad hídrica en zonas urbanas (como Ardalan et al., 2019; Jensen & Wu, 2018; Shrestha et al., 2018) y no en zonas rurales, de actividad primordialmente agrícola como la SLP. Finalmente, la seguridad hídrica será de utilidad por ofrecer objetivos concretos medibles a la GIRH (ver Cap. 4.3) y por qué debe ser trabajada bajo lo que la

MARCO CONCEPTUAL

sociohidrología (ver Cap.4.5) propone como la mejor forma de conseguir tal seguridad. En este caso, este estudio se enfocaría en la provisión confiable de agua en lo que respecta a su cantidad y no en la calidad.

4.5. Un Enfoque Integral: Los Sistemas Sociohidrológicos

La socio-hidrología es una ciencia que estudia a las personas y sus impactos como parte del sistema socio-hidrológico del agua. El enfoque que adquiere considera a los sistemas humanos y el ciclo hidrológico como parte de un mismo ciclo en el cual las dinámicas de uno afecta y produce al otro de manera inseparable (Blair & Buytaert, 2016; Sivapalan et al., 2012). El ciclo hidro-social trasciende la dualidad entre el agua-sociedad, entendiéndola como una relación dialéctica. Por ello, la socio-hidrología facilita estudiar cómo los aspectos humanos afectan al agua y cómo esta a su vez influye en la configuración de relaciones sociales y de poder (Linton & Budds, 2014).

La investigación hidro-social contempla que el agua circula a través de un proceso físico-social, como un flujo híbrido entre la naturaleza y la sociedad de una forma indisociable. Así, se considera que el medio ambiente es producido como resultado de procesos socio-biofísicos específicos a lo largo del tiempo y que dichos procesos (socioambientales) son de naturaleza inherentemente conflictiva. Inclusive, generalmente, la configuración hidro-social es reflejo de hegemonía de ciertas preferencias políticas, sociales y culturales (Swyngedouw, 2009).

La sociohidrología busca estudiar los sistemas humanos e hídricos como sistemas acoplados, junto a las dinámicas y la coevolución de estos mismos (Blair & Buytaert, 2016). A diferencia de la hidrología tradicional que considera las actividades y gestiones de humanos en los recursos hídricos como fuerzas externas, la sociohidrología entiende la acción humana como parte del ciclo del agua con el fin de predecir las trayectorias futuras de los sistemas hídrico-humano. Por esta razón, esta ciencia se considera fundamental para sustentar la práctica de la GIRH, ya que entender y conocer las trayectorias futuras permite una mejor gestión del agua (Sivapalan et al., 2012).

Por ende, esta investigación incluye, dentro del modelamiento hidrológico, no solo variables físicas, sino variables antrópicas. Esto se da con la finalidad de generar un

MARCO CONCEPTUAL

modelo integral (humano-natural) como lo entiende la sociohidrología para aplicar apropiadamente la GIRH. La consideración de un sistema sociohidrológico permite un mejor entendimiento del ciclo hidrológico (incluyendo el aporte glaciar) y del impacto del cambio climático en la sociedad, porque las variables antrópicas también influyen en el ciclo hidrológico (Sivapalan et al., 2012).

4.6. Adaptación: la acción de respuesta y ajuste

La adaptación es un proceso de cambio de los sistemas socioecológicos como ajuste o adecuación a las variaciones del cambio climático y sus impactos cuyo objetivo es evitar, y moderar en la mayor medida posible las repercusiones negativas o aprovechar en convertir tales efectos perjudiciales en oportunidades y beneficios (IPCC, 2014; McDowell et al., 2019). Es decir, la capacidad de adaptación la tienen los sistemas socioecológicos (los ecosistemas, y las sociedades). En esta investigación, la capacidad de adaptación se centrará en el actuar de las sociedades para disminuir estas potenciales repercusiones dañinas (Leal Filho & Nalau, 2018). En ese sentido, las estrategias de adaptación son las acciones humanas que buscan aprovechar las oportunidades, y reducir el potencial daño del cambio climático y sus efectos (IPCC, 2014). En un marco de GIRH, ante la urgencia de saber cómo ajustarse y responder ante los potenciales escenarios futuros se requiere adaptarse ante múltiples cambios inevitables que están por venir (Ludwig et al., 2014).

La ventaja de la adaptación radica en que permite enfatizar en un accionar futuro a largo plazo, lo cual es una de las deficiencias de la GIRH (Ludwig et al., 2014) (ver Cap. 4.3). Paralelamente, los límites de la adaptación se presentan principalmente por la complejidad de los procesos y elementos de la realidad interactuando (Leal Filho & Nalau, 2018). En ese sentido, la inclusión de la sociohidrología facilitaría reduciría esta limitación.

Existen cuatro componentes claves que deben estar balanceados para lograr exitosa estrategia adaptativa: efectividad, eficiencia, equidad y legitimidad (Drenkhan & Walker-Crawford, 2020). Así también, las estrategias de adaptación deben contar con una amplia base, aprovechando las ventajas y minimizando las limitaciones de diversos enfoques. El primero de ellos son dos perspectivas que han sido consideradas opuestas:

MARCO CONCEPTUAL

top-down “desde arriba” y *bottom-up* “desde abajo”. La primera busca reducir al máximo las incertidumbres en los modelos, basándose en variables biofísicas y construyendo potenciales escenarios, pero que puede a llegar traer múltiples incertidumbres que dificulten la toma de decisiones. La segunda se centra en el aspecto socioeconómico, pero no consigue soluciones técnicas (Ludwig et al., 2014). La GIRH permitiría brindar estrategias adaptativas que apunten a la gobernabilidad y a la legislación. Drenkhan & Walker-Crawford (2020) indican que también el éxito de la estrategia adaptativa depende de la conjunción de medidas *soft path* (no basado en infraestructuras, sino en factores sociales e institucionales) y *hard-path* (basado en infraestructura). Y las estrategias adaptativas se pueden basar en los saberes locales y ancestrales.

Considerando estos puntos en la adaptación, se busca evitar posibles efectos inesperados de las medidas de adaptación que puedan generar otros tipos de problemas (Carey et al., 2012). En la SLP, la infraestructura de control de descarga de la laguna Parón contribuyó a la disminución del riesgo de desastre y a un mejor aprovechamiento energético (Carey, 2014); sin embargo, su inadecuado manejo propició esta ventaja energética ocurra en detrimento del desarrollo de la comunidad Cruz de Mayo, generándose el conflicto entre actores por el agua (French, 2019; French et al., 2016).

Capítulo 5 ESTADO DEL ARTE

5.1. Clima en los Andes tropicales

Las investigaciones sobre la variación de la temperatura y precipitación se han vinculado con los glaciares en varias ocasiones, porque son factores determinantes en sus dinámicas, incluyendo el retroceso glaciar (Rabatel et al., 2013; Suarez et al., 2008; Veettil et al., 2017). Las características altitudinales y geográficas de los glaciares del trópico exterior explican que estén bajo determinadas condiciones atmosféricas. Asimismo, las múltiples investigaciones en esta región describen un patrón atmosférico temporal característico de la zona del trópico exterior (ver Cap. 4.1).

Variación espacial y temporal de la temperatura

En general, los estudios muestran una tendencia al aumento de la temperatura que va desde $+0.1$ °C/década hasta $+0.42$ °C/década, dependiendo de la altitud y el rango temporal considerado por las investigaciones.

A lo largo de los Andes tropicales, Vuille et al. (2008) detectaron un incremento de la temperatura anual en $+0.1$ °C/década entre 1939-2006 en base a 279 estaciones. Después, Vicente-Serrano et al. (2017) identificaron un incremento anual de la temperatura máxima de 0.4 °C/década a 5000 msnm entre 1964-2014.

En la CB, Mark & Seltzer (2005) hallaron un incremento de la temperatura anual a partir de los registros de 29 estaciones climáticas entre 1951-1999 de $+0.39$ °C/década. Sin embargo, determinaron que esta cifra disminuía a $+0.26$ °C/década para el periodo 1962-1999. Posteriormente, Racoviteanu et al. (2008) analizaron los registros de temperatura completos de 1970 a 1999, pero solamente fueron tomados de tres estaciones, ubicadas entre 3000 y 4100 msnm. A través de la prueba de Mann-Kendall, comprobaron una tendencia significativa al aumento de la temperatura anual en las tres estaciones. Además, espacialmente, mostraron que la tasa de incremento de la temperatura anual fue casi tres veces mayor en zonas de altitud baja ($+0.92$ °C/década a 3000 msnm) que en zonas más elevadas ($+0.34$ °C/década a 4100 msnm). Recientemente, Schauwecker et al. (2014) tuvieron resultados similares a Mark & Seltzer (2005), puesto que encontraron que la tasa de aumento de la temperatura anual había variado de $+0.31$ °C/década entre 1969-

ESTADO DEL ARTE

1998 a $+0.13$ °C/década entre 1983-2012. Sin embargo, cálculos más actuales mostraron una tendencia superior a lo mencionado antes: $+0.42$ °C/década para el sur de la CB entre 1979-2014 (Veettil et al., 2017).

Variación espacial y temporal de la precipitación

A diferencia de la temperatura cuya variación interanual (incluso interdecadal) ha mostrado una tendencia significativa al aumento, las investigaciones aún muestran un panorama de incertidumbre en cuanto a la variación de la precipitación en los siguientes años, pese a que los análisis de los registros en algunos casos muestran variaciones. Mark & Seltzer (2005) no llegan a una conclusión sobre la precipitación, mientras que Rabatel et al. (2013) y Schauwecker et al. (2014) señalan que no hay un patrón general claro en cuanto a futuras variaciones en los Andes tropicales. La menor certidumbre se debe a la falta de tanto de datos como de estudios y también por los hallazgos contradictorios.

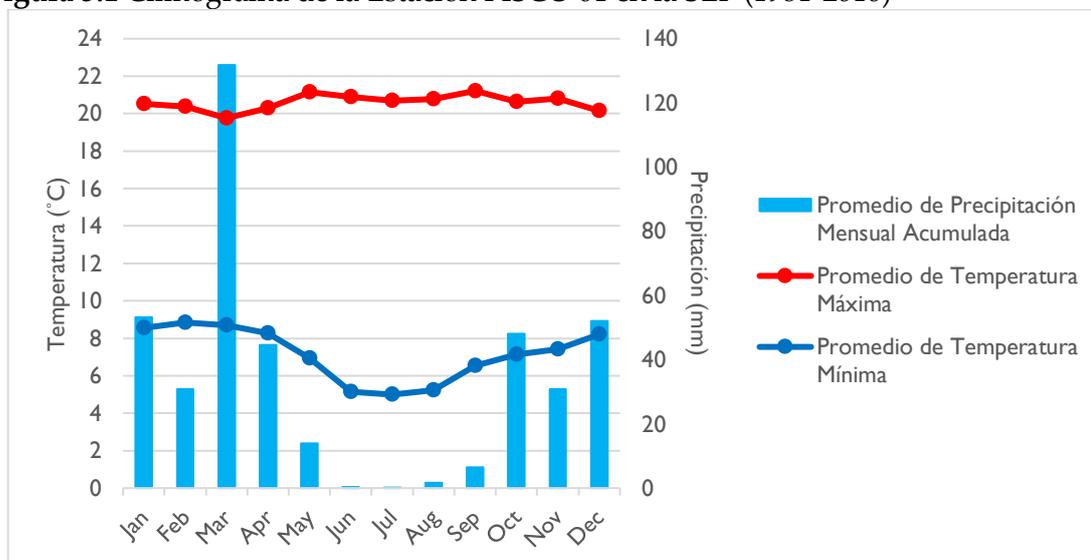
En la CB, entre octubre y abril, se determinó que ocurre más del 80% de la precipitación, mientras que durante el invierno austral, prácticamente, no se registra lluvias (Baraer et al., 2012, 2014) Por esta razón, en las zonas del trópico exterior, se han distinguido dos periodos en el año: la temporada húmeda (octubre-marzo) y seca (mayo-septiembre) (Georg Kaser et al., 1990; Rabatel et al., 2012). En el periodo húmedo, se identificó que la acumulación ocurre en mayor medida, especialmente, en el sector más alto de los glaciares (Baraer et al., 2012).

Para la SLP, Suarez et al (2008) ajustaron dichas temporadas, dividiendo el año en un periodo húmedo (noviembre-marzo), uno seco (mayo-agosto), y uno transitorio (abril, septiembre y octubre) (ver **Figura 5.1**). Racoviteanu et al. (2008) notaron una disminución en la precipitación registrada por la estación Parón (4100 msnm) entre 1970-1999 de -11.6 mm/década; en cambio, Schauwecker et al. (2014) evidenciaron un aumento de 60 mm/década entre 1983-2012, según lo registrado por la estación Recuay (3444 msnm), ubicada en una subcuenca aledaña a la SLP. También, en otra subcuenca aledaña a la SLP, Gurgiser et al. (2016) estudiaron detalladamente cambios de la precipitación entre 1965-2012, en la subcuenca del río Auqui (Huaraz). Identificaron breves periodos secos entre los meses más lluviosos de diciembre y abril, por lo que la variabilidad de la precipitación es fuerte en la temporada húmeda. Asimismo, notaron

ESTADO DEL ARTE

que las precipitaciones intensas (> 17 mm/día) ocurren con mayor frecuencia entre enero y marzo. No obstante, no comprobaron ninguna tendencia significativa en la frecuencia y duración de los periodos secos.

Figura 5.1 Climograma de la Estación PISCO 01 en la SLP (1981-2016)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos PISCO del SENAMHI (2019) para las coordenadas -77.8 longitud, -9.0 latitud, y 3395 msnm altitud

5.2. Glaciares Tropicales

5.2.1. Glaciares del Perú

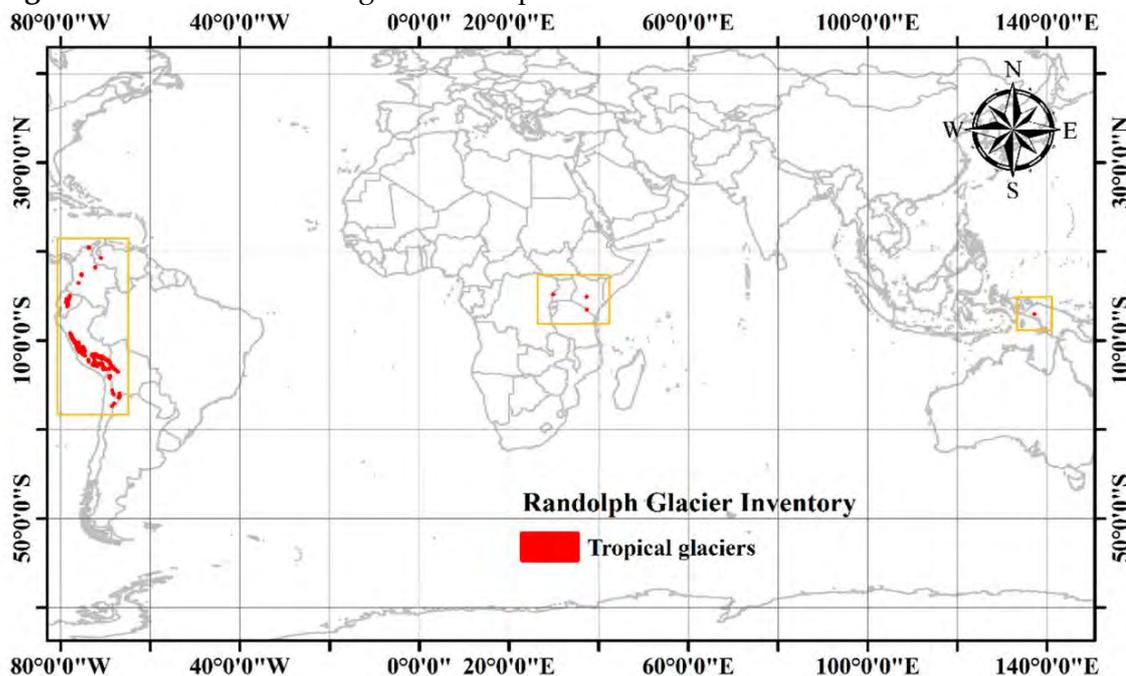
En el mundo, múltiples estudios han verificado el retroceso glaciar global en las últimas décadas (Mark & Mckenzie, 2007; Vuille et al., 2018). G. Kaser et al. (2006) hallaron la media anual del balance glaciar mundial entre 2001-2004 (-0.5 ± 0.1 m.w.e./año). Zemp et al. (2015) obtuvieron resultados ligeramente superiores entre 2001-2010 (-0.5 ± 0.3 m.w.e./año). En general, ambos estudios concluyen que el balance glaciar calculado para el s. XXI tuvo valores más negativos respecto a las décadas previas (G. Kaser et al., 2006; Zemp et al., 2015). Por ello, se entiende que se trata de un retroceso glaciar sin precedentes desde la Pequeña Era de Hielo (s. XVII-s. XVIII) (Rabatel et al., 2013).

En los Andes, se halla el 99% de glaciares tropicales (~ 2341 km²), mientras que, en el Perú, está el 70% (~ 1603 km²) (Condom et al., 2012; Rabatel et al., 2013; Veettil & Kamp, 2019) (ver **Figura 5.2**). Precisamente, en los Andes tropicales, el retroceso glaciar no ha sido constante, porque varía según el periodo de tiempo y la altitud del glaciar. Rabatel et al., (2013) hallaron que el balance de masa de glaciares superiores a 5400 msnm (-0.6

ESTADO DEL ARTE

m.w.e./año) era la mitad que en los que no superaban dicha altitud (-1.2 m.w.e./año). Asimismo, el balance glaciario entre 1976-2010 (-0.76 m.w.e./año) fue notoriamente superior al hallado para el periodo 1964-1975 (-0.2 m.w.e./año), confirmando el aumento en la velocidad de derretimiento.

Figura 5.2 Ubicación de los glaciares tropicales en el mundo



Fuente: Tomado de Veettil & Kamp (2019)

A nivel nacional, la información oficial la proporciona el INAIGEM (2018) en un inventario nacional de glaciares, basado en la recopilación y mejoramiento de cálculos anteriores. Ofrece una base de datos confiable para un periodo de casi 50 años a partir de imágenes satelitales. Si bien usualmente las investigaciones se centran a nivel de cordilleras, Seehaus et al. (2019) calcularon específicamente el área glaciaria dentro del Perú (ver **Tabla 5.1**).

Las estimaciones más antiguas son resultado de un proceso de reanálisis de imágenes satelitales de 1962 y 1975 realizado por el INAIGEM en 2016 (2018). Este proceso ajusta lo hallado por la Corporación Peruana del Santa y ELECTROPERU, cuyos resultados han sido citados previamente para describir áreas de estudio o compararlos con sus propios resultados por Ames Marquez & Francou (1997); Bernex & Tejada (2010); Bury et al. (2011); Condom et al. (2012); French et al. (2016); Georges (2004); Hanshaw &

ESTADO DEL ARTE

Bookhagen (2014); Huh et al. (2017); Georg Kaser et al. (1990); Mark, McKenzie, & Gómez (2005); Racoviteanu et al. (2008); Seehaus et al. (2019); Veettil (2018). Luego, se calculó el área glaciaria, basado en un estudio del Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) del 2001 y del ANA del 2014. El último cálculo de superficie glaciaria fue hecho por la Dirección de Investigación en Glaciares del INAIGEM (2018) (ver **Tabla 5.1**).

Gracias a ello, se identificó una pérdida glaciaria de 1 284.95 km² (-53.56%) entre 1962/1975 y 2016 (INAIGEM, 2018), perdiéndose más de la mitad de la superficie glaciaria en casi 50 años. De esta manera, el estudio del INAIGEM (2018) permite contrastar las cifras del inventario nacional del ANA (2014a), donde se estimó una pérdida de superficie glaciaria de -42.6%, durante los últimos 40 años. En resumen, se puede afirmar que los glaciares peruanos actualmente abarcan aprox. 1000-1400 km², representando a la mayoría de glaciares tropicales y de los Andes.

Tabla 5.1 Superficie Glaciaria en el Perú

Año	Área estimada (km ²)	Fuente
1962/1975	2399.1	INAIGEM (2018)
1970	2041.9	ANA (2014a) basado en HIDRANDINA S.A. (1970)
1997	1595.6	INAIGEM (2018) basado en CONAM
2000	1916.6 ± 48	Seehaus et al. (2019)
2003	1298.5	INAIGEM (2018) basado en ANA (2014a)
2013	1571.9 ± 43	Seehaus et al. (2019)
2016	1368.1 ± 45	Seehaus et al. (2019)
2016	1114.1	INAIGEM (2018)

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla

Estudios sobre glaciares en la Cordillera Blanca

Los estudios de glaciares de la CB tienen una larga historia y tradición. Uno de los primeros investigadores fue el geógrafo Antonio Raimondi en 1860 (Drenkhan, 2016). En tiempos más recientes, el uso de la tecnología como las imágenes satelitales y fotos aéreas se sumaron a las tradicionales expediciones científicas.

Uno de los cálculos para el periodo más antiguo es el de Georges (2004), quien estimó la extensión glaciaria de la CB en 1930, usando mapas históricos hechos en base a técnicas fotogramétricas. También, investigadores han obtenido estimaciones con ligeras disimilitudes entre ellas y los cálculos del INAIGEM (2018), debido a metodologías y periodos de tiempo considerados. Veettil (2018) recopiló algunas de estas estimaciones

ESTADO DEL ARTE

y, a través de imágenes satelitales (Sentinel-2 MSI, Landsat MSS y Landsat OLI), calculó cifras similares al inventario del INAI GEM (2018). Entre las estimaciones recopiladas para la CB están: Silverio & Jaquet (2017); Burns & Nolin (2014); y Racoviteanu et al. (2008). Recientemente, Seehaus et al. (2019) obtuvieron una estimación con cifras superiores al resto de estudios, debido a que estudiaron a la CB en conjunto con otras cordilleras de la zona central peruana (ver **Tabla 5.2**).

En cuanto al retroceso glaciar, el INAI GEM (2018) calculó una disminución del área glaciar de 277 km² (-38%) entre 1962/1975 y 2016, mientras que otros estudios, hallaron tasas parecidas de pérdida para un periodo similar (-24%) (Burns & Nolin, 2014; Racoviteanu et al., 2008). Asimismo, se estimó un retroceso glaciar de aproximadamente 46% entre 1930-2016 (Huh et al., 2017; Seehaus et al., 2019; Silverio & Jaquet, 2017) y de 33.5% entre 1975-2016 (Seehaus et al., 2019; Veettil, 2018).

Tabla 5.2 Superficie Glaciar en la Cordillera Blanca

Año	Área estimada (km ²)	Fuente
1930	~800–850	Georges (2004)
1962/1975	726.3	INAI GEM (2018)
1970	723.4	ANA (2014a) basado en HIDRANDINA S.A. (1970)
1975	726 ± 20	Veettil (2018)
1987	618 ± 60	Silverio & Jaquet (2017)
1987	643.5	Burns & Nolin (2014)
1994	576.9 ± 15	Veettil (2018)
1996	584	Burns & Nolin (2014)
1997	611.9	INAI GEM (2018) basado en CONAM
2000	910.1 ± 32	Seehaus et al. (2019)
2003	527.6	INAI GEM (2018) basado en ANA (2014a)
2003	569.6 ± 2	Racoviteanu et al. (2008)
2004	569.4	Burns & Nolin (2014)
2010	482.4	Burns & Nolin (2014)
2013	774.9 ± 28	Seehaus et al. (2019)
2016	657.0 ± 27	Seehaus et al. (2019)
2016	482.8 ± 7	Veettil (2018)
2016	448.8	INAI GEM (2018)
2016	449 ± 56	Silverio & Jaquet (2017)

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla

A pesar de las diferencias en los cálculos, estas cifras permiten afirmar que la CB es la cadena montañosa que contiene el área más extensa de glaciares tropicales en el mundo (Muñoz et al, 2020). Por lo tanto, es la cordillera con mayor superficie glaciar en Sudamérica y los Andes tropicales, puesto que contiene ~40% de la extensión de

ESTADO DEL ARTE

superficie glaciar en el Perú (Drenkhan, 2016; INAIGEM, 2018; Yakabi & Bernex, 2017). Esto se debe a la alta elevación de los glaciares de la CB: la mayoría de estos (~80%) tienen un ELA ubicado entre 5001-5500 msnm (ANA, 2010).

Estudios sobre glaciares en la Subcuenca Lullán-Parón

La SLP tenía un área glaciar de 22.45 km² en 2016 en base al estudio de INAIGEM (2018). En tanto, el inventario del ANA (2010) basado en el trabajo de la UGRH. Este posiciona a la SLP como la sexta subcuenca dentro de la cuenca del río Santa con mayor superficie glaciar (24 km²), representando el ~16.9% del área de la SLP. Además, dicho inventario identificó cada uno de los glaciares entre los cuales destacan: Artesonraju (5.4 km²), Pirámide (3.4 km²), Jatunraju (1.3 km²), Huandoy (1.1 km²) y Agujas Nevadas (0.6 km²), siendo el más estudiado ha sido el Artesonraju (4685-5980 msnm) (Rabatel et al., 2012) con un ELA entre 4959-5071 msnm (Seehaus et al., 2019). Dentro de la SLP, se ubica la microcuenca de Parón (41.39 km²), cuyo punto de desembocadura es el mismo que el de descarga de la laguna Parón, con un área glaciar de 14.85 km² en 2016 (lo cual representa 35.9% de la microcuenca) (INAIGEM, 2018). Suarez et al. (2008) determinaron que el área glaciar era de 20.7 km², mientras que Burns & Nolin (2014) estimaron cifras similares (coherentes con las del INAIGEM): 18.7 km² (1987), 17.9 km² (1996), 17.3 (2004), y 16.1 km² (2010).

La literatura académica y los reportes de organismos estatales se han enfocado mayormente en la CB como su área de interés posiblemente por ser la cordillera con mayor cobertura glaciar del Perú. Se evidenció que el objetivo de estas estimaciones sobre los glaciares ha sido evaluar su evolución temporal, intentando relacionar al retroceso con las alteraciones atmosféricas (como el aumento de temperatura).

5.2.2. Impactos del retroceso glaciar en la Cordillera Blanca

A nivel nacional, el ANA ha contabilizado 8355 lagunas inventariadas y 3246 lagunas no inventariadas, abarcando entre todas un total de 925.49 km² (ANA, 2014b). También, a lo largo de la cuenca del río Santa, se realizaron estudios hidrológicos en diferentes subcuencas. Baraer et al. (2012) estudiaron nueve subcuencas de la cuenca alta del Santa (que desemboca en La Balsa) e identificaron la superación del “*peak water*” en la mayoría de ellas (7).

ESTADO DEL ARTE

Lagunas Glaciares en la Cordillera Blanca y la Cuenca del río Santa

Hace casi 35 años, ELECTROPERU S.A. & UGRH (1988) elaboraron un inventario de lagunas, dentro de la cual se incluía la cuenca del río Santa. Si bien esta cuenca abarca únicamente el flanco occidental de la Cordillera Blanca, este inventario permite tener una aproximación de cuántas lagunas se identificaron en este sector.

Recientemente, el ANA contabilizó 1902 lagunas en la CB (inventariadas y no inventariadas), abarcando un área de 59.7 km² (ANA, 2014b), de las cuales 860 lagunas tienen un área mayor a 5000 m² (INAIGEM, 2018).

En el inventario de ELECTROPERU S.A. & UGRH (1988), únicamente se identificó la laguna Parón y la laguna Huandoy. La laguna Parón tenía un área de ~1.8 km², una profundidad de 67.5 m y un volumen de 71.95 hm³, siendo la tercera de mayor volumen en la cuenca del Santa. Para la laguna Huandoy, solo se determinó su área (12 500 m²).

La SLP comprende actualmente 8 lagunas con una superficie total de 1.66 km² (ANA, 2014b). Entre las ocho lagunas, la laguna Parón destaca por su volumen y capacidad de almacenamiento. Según los estudios batimétricos de la laguna Parón elaborados por el ANA, su área es de 1.48 km², su profundidad de 43.2 m, y su volumen de 39.89 hm³ (ANA, 2014a). No obstante, existen divergencias en cuanto al volumen medido, puesto que la ANA (2015), en una evaluación de recursos hídricos del Santa, determinó un volumen actual de 45 hm³, mientras que, en base a la Unidad de Glaciología (2003), también determinó un espejo de agua era de 1 480 489 m². Por lo tanto, su volumen actual está entre 40-45 hm³, lo que evidencia una disminución del agua almacenada (aprox. -30 hm³) entre 1988 y 2015. Ello se corresponde con los lineamientos dados para la laguna Parón, de tal modo que pueda ser usada como reservorio y se disminuya el riesgo de ocurrencia de GLOF (Glacial Lake Outburst Flood) (French, 2019). Así, se estableció que el nivel máximo de la superficie de la laguna sea de 4185 msnm, con un margen de 15 m entre el punto más alto del dique natural y la superficie de la laguna; este nivel máximo implica un volumen máximo de 54 hm³ (French, 2019), a pesar de que su capacidad de almacenamiento puede llegar a estar entre 70-80 hm³ (ANA, 2015; ELECTROPERU S.A. & UGRH, 1988; Haerberli et al., 2016; Lliboutry et al., 1977). El túnel se construyó a 4155

ESTADO DEL ARTE

msnm (30 m debajo de límite máximo), lo cual deja disponible 36 hm³ (French, 2016, 2019).

Recientemente, INAIGEM (2016) elaboró un informe sobre la nueva laguna: Artesoncocha alta. Se rastreó su formación desde el 2003 cuando tenía un área de 2020 m². En el 2015, alcanzó un área de 22 314 m² y un volumen de 0.13 hm³. Posteriormente, algunos estudios identificaron la formación de posibles lagunas glaciares que incluían a esta nueva laguna. Colonia et al. (2017) identificaron la formación de dos lagunas en una formación inminente (incluyendo Artesoncocha alta), mientras que otra se proyecta que se forme hacia el 2050. Hallaron que Artesoncocha alta sería la nueva laguna de mayor volumen de la cuenca del río Santa. Similarmente, Guardamino et al. (2019) proyectaron la formación de posibles lagunas glaciares al interior de la SLP, que serían cuatro y alcanzarían un volumen total de 5.6 hm³ hacia el 2050. Colonia et al. (2017) y Guardamino et al. (2019) coinciden en que identificaron la futura laguna del glaciar Pirámide y estimaron un mismo volumen para Artesoncocha alta: 4.45 hm³.

5.3. Hidrología de la Cordillera Blanca

Modelamiento hidrológico en la Cordillera Blanca

Los estudios hidrológicos de la cuenca alta del río Santa y la CB se han centrado principalmente en determinar la disponibilidad de agua y con ello calcular un balance hídrico completo, mediante el cálculo de los cambios hidrológicos producidos por el retroceso glaciar.

Suarez et al. (2008) realizaron el último estudio detallado sobre modelamiento hidrológico de balance hídrico en la microcuenca de la laguna Parón (cuya desembocadura es la desembocadura de la laguna) publicado en un artículo científico, pero sin simular futuros escenarios. Ejecutaron un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido que requirió dos variables principales: la temperatura y la precipitación. La ET no fue considerada, porque afirman que, en zonas de alta elevación, la variabilidad de esta tiene menor significancia que las otras dos variables.

De los estudios realizados en la cuenca del río Santa que incluyen el aporte glaciar, destaca de Condom et al. (2012) por ser los primeros en introducir la demanda de agua,

ESTADO DEL ARTE

a través de algunas variables humanas (infraestructura), en su modelamiento semi-distribuido con WEAP (Carey et al., 2014). Específicamente, realizaron un modelamiento hidrológico en la cuenca alta del río Santa, teniendo como punto de desembocadura la estación La Balsa, la cual es la estación con mayores datos disponibles. El modelo indicó una contribución glaciaria promedio de 38% al caudal anual, y que en temporada húmeda es 30%, mientras que en temporada seca es 67%.

Asimismo, Condom et al. (2012) utilizaron dos escenarios hacia el 2030 para estimar el caudal en la estación La Balsa: húmedo-cálido (+0.5 °C de temperatura, +15% de precipitación); seco-muy cálido (+2 °C de temperatura, +10% de precipitación). Los resultados mostraron un aumento del caudal en la temporada húmeda (verano-otoño austral) para ambos escenarios. En cambio, el caudal estimado para la temporada seca disminuyó en el escenario húmedo-cálido porque la contribución por derretimiento disminuye en los meses fríos con +0.5 °C, mientras que dicho caudal se mantuvo en el escenario seco-muy cálido porque la contribución del derretimiento se mantiene en los meses fríos con +2 °C.

Igualmente, Vergara et al. (2011) ejecutaron el modelamiento hidrológico en la cuenca alta del río Santa a través de WEAP. Utilizaron dos escenarios extremos del IPCC hacia el 2040: las condiciones marginalmente más cálidas (+0.5 °C de temperatura, +15% de precipitación), y las condiciones mucho más cálidas (+2 °C de temperatura, +10% de precipitación). Es decir, Vergara et al. (2011) y Condom et al. (2012) usaron los mismos softwares de modelamiento (WEAP), y los mismos escenarios de temperatura y precipitación, aunque Vergara et al. (2011) se proyectaron 10 años más (hacia 2040). Finalmente, el modelo de Vergara et al. (2011) simula una variación del caudal similar a Condom et al. (2012) con un incremento de la magnitud de la estacionalidad: un aumento durante el verano-otoño austral en ambos escenarios y una reducción durante la temporada seca, la cual es notoria en el escenario más húmedo y ligera en el escenario más seco, proponiendo retos para la GIRH. Ambos resultados confirman la continuación de tendencias identificadas hace 30 años: Kaser et al. (1990) mostraron que mayores precipitaciones y menores precipitaciones llevan a una mayor ablación (mayor

ESTADO DEL ARTE

contribución al caudal), mientras que menores temperaturas y mayores precipitaciones llevan a una menor ablación (menor contribución al caudal).

El ANA (2015) en una evaluación de recursos hídricos de toda la cuenca alta del río Santa, también realizó un modelamiento con el software WEAP. Para la ejecución del modelamiento hidrológico se consideró la oferta y demanda hídrica, la infraestructura y los regímenes de explotación del sistema en el periodo de 1963-2013, con el que luego se simuló dos escenarios hacia 2100. Esta evaluación de la ANA (2015) inclusive describe los registros del caudal en la microcuenca de la laguna Parón (cuya desembocadura es la desembocadura de la laguna) para el periodo 1965-2013: un caudal medio anual de $1.35 \text{ m}^3/\text{s}$, y un caudal medio acumulado de $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ con una aportación acumulada de $42.46 \text{ hm}^3/\text{año}$. Esto significó una oferta natural media total de $42.34 \text{ hm}^3/\text{año}$ durante tal periodo (ANA, 2015). Estos valores guardan similitud con los datos representados en el apartado de Hidrología del Cap. 3.2 (ver **Figura 3.5**).

Últimamente, al investigar sobre las variaciones de la disponibilidad hídrica en la CB, Motschmann et al. (2020) ejecutaron un modelamiento hidrológico en base a las ecuaciones de Témez, usando como insumos físicos la precipitación y ET potencial. Además, en su estudio incluyeron factores como el riesgo de desastres, y la demanda agrícola. Así, lograron determinar la proporción de la contribución anual actual a la oferta hídrica: del agua subterránea (41%), de los glaciares (37%), de la escorrentía superficial (22%). Las simulaciones se ejecutaron para los escenarios RCP (Representative Concentration Pathway) 2.6 y 8.5 y los resultados indican que hacia 2100 el balance hídrico puede ser negativo en los meses secos.

5.4. La actualidad de la GIRH y su importancia para lograr la Seguridad Hídrica

El Perú concentra un alto suministro de agua (4.6% del volumen de la escorrentía superficial mundial) (Eda & Chen, 2010) junto con la mayor disponibilidad de agua en Latinoamérica ($62.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ per cápita) (Drenkhan, 2016). No obstante, es notoria la incongruencia entre la distribución espacial del agua y la población cada territorio. Esto se debe a que la vertiente de mayor tamaño (del Atlántico con $\sim 957 \text{ km}^2$) que cuenta con el 97% de la oferta hídrica (1719.8 hm^3) tiene solo 8,7 millones de habitantes, mientras que la región más poblada con casi 19 millones de habitantes (cuenca del Pacífico con

ESTADO DEL ARTE

~279 km²) solo cuenta con el 2% de esta oferta (38.8 hm³) (Drenkhan, 2016; Eda & Chen, 2010; Guevara, 2008)

La situación de las políticas para la gestión del agua a nivel nacional

Eda & Chen (2010) repasan los antecedentes de la GIRH en la política y la legislación. Primero, la Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales en 1997 que se promulgó con el fin de regular el uso de los recursos sosteniblemente y luego la Décimo Novena Política del Acuerdo Nacional de 2002 donde se propuso explícitamente un manejo de cuencas, lo cual la diferencia de la ley anterior. Guevara (2008) llamaba la atención ante la ausencia de un marco legal, e incluso resaltaba la falta de una norma para demarcar y codificar cuencas hidrográficas. Hasta entonces las políticas hídricas que conformaban parte del manejo de los recursos hídricos en los Andes estaban siendo perjudiciales para la seguridad hídrica de comunidades campesinas andinas (Guevara, 2008).

Sin duda el mayor avance en cuanto políticas hídricas ocurrió en 2009 con la aprobación de la Ley de los Recursos Hídricos N° 29338 la cual ofreció el marco legal e institucional en temas hídricos preponderante para los siguientes años (ver Cap. 4.3). Esta estableció la creación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como ente normativo-técnico del Sistema Integrado de Recursos Hídricos (ver **Figura 4.2**). Además, con ello, se promulgaron una serie de disposiciones legales-normativas y reglamentos entre las que destacan la planificación hídrica, los derechos de uso de agua, la infraestructura hidráulica, el reconocimiento al acceso y distribución de agua, y, sobre todo, el reconocimiento de las comunidades campesinas (y nativas) como organizaciones de usuarios (Reglamento de La Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338, 2010; MINAGRI & ANA, 2019). Esto último punto es relevante porque reafirma las formas tradicionales de organización de comunidades campesinas como Cruz de Mayo (ver **Figura 3.16** y **Figura 3.17**).

El conflicto sobre la laguna Parón y la GIRH en la Cuenca del río Santa

En la SLP, la situación actual de la GIRH ha sido tratada a partir del conflicto entre actores. En ese sentido, French (2016, 2019) y Egúsqiza Cerrón (2017) describen y analizan la historia de los principales eventos que acentuaron el conflicto y la tensión

ESTADO DEL ARTE

entre los actores sociales locales (Comunidad Campesina Cruz de Mayo) y la empresa dueña de la central hidroeléctrica Cañón del Pato, mientras que Carey (2014) permite complementar el conflicto desde una perspectiva más histórica y documental.

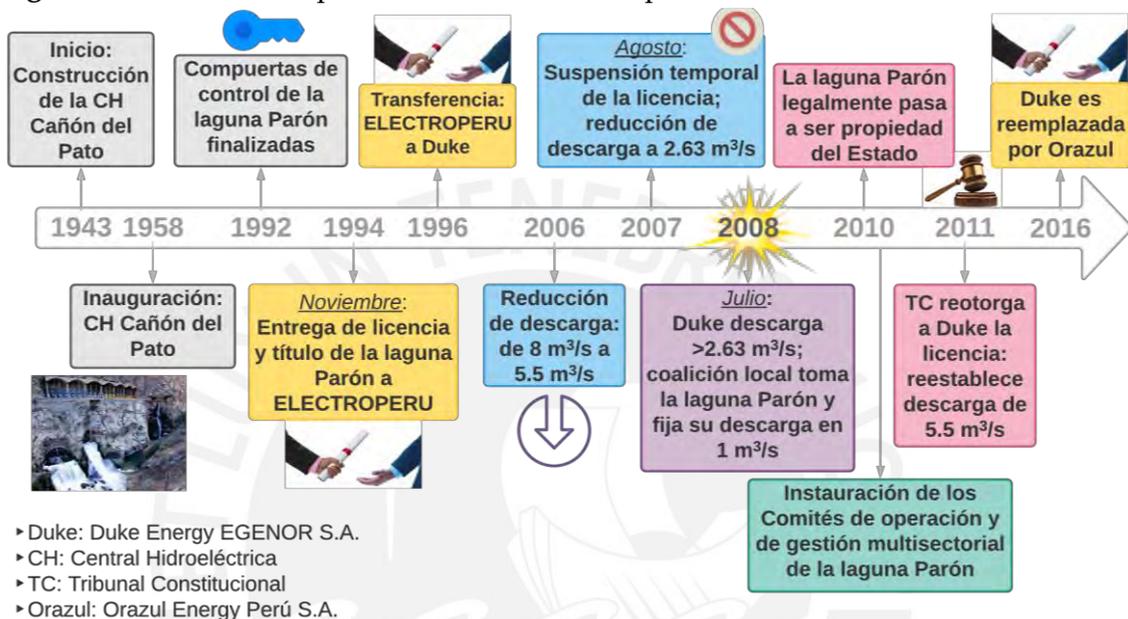
Inicialmente, ante el potencial hidroeléctrico descrito por el ingeniero Antúnez de Mayolo, se construyó la central hidroeléctrica del Cañón del Pato entre 1943-1958. Esta central necesitaba controlar el caudal del río Santa para su funcionamiento continuo y sus posteriores ampliaciones. En ese sentido, en 1968, la instalación del túnel de la laguna Parón para la regulación de su descarga se inició, también incitado por los devastadores desastres ocurridos entre 1940-1970 (Carey, 2014). Con la infraestructura instalada en 1992 (el túnel y las compuertas de descarga), French (2016, 2019) rastrea la problemática sobre el control de la descarga hacia la década de 1990. Al principio, en 1994, se otorgó la licencia de uso de agua y propiedad de la laguna Parón (junto con un área de 540 ha alrededor de la laguna) a ELECTROPERÚ, la cual por aquel entonces administraba la central hidroeléctrica, convirtiéndose en la entidad que controlaba el nivel de descarga de la laguna. Luego, en pleno proceso de neolibertización de la economía nacional, en 1996, la central hidroeléctrica fue adquirida por la empresa Duke Energy EGENOR S.A., con lo cual tanto el título como la licencia fueron transferidas a esta empresa.

La licencia permitía una descarga diaria de hasta 8 m³/s (ver **Tabla 5.3**), lo cual es más de tres veces la descarga anual máxima promedio de décadas anteriores a la construcción de las válvulas de control (ver Cap. 3.2- 5.3). Así la licencia permitía una descarga excesiva que fue aprovechada por la empresa para una mayor generación eléctrica, en detrimento de la agricultura desarrollada por la comunidad Cruz de Mayo, ya que sus tierras y canales eran dañados por el poder erosivo de la descarga. Pese a que se requería legalmente de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y un estudio más detallado por estar dentro de un Área Natural Protegida (ANP), no se llevó a cabo. En consecuencia, en los años siguientes, los reclamos y quejas a través de diferentes vías (cartas, pronunciamientos), en donde incluso el alcalde de Huaylas solicitó revocar la licencia de uso de agua en 2001, no cambiaron la situación. Posteriormente, entre 2004 y 2006, se llevaron a cabo inspecciones por parte de autoridades del Parque Nacional Huascarán y del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía (OSINERG), quienes solicitaron un

ESTADO DEL ARTE

EIA detallado. Ese mismo año (2006), la Administración Técnica del Distrito de Riego de Huaraz (ATDR-Hz) decidió reducir el nivel máximo permitido de descarga diaria de 8 m³/s a 5.5 m³/s (ver **Tabla 5.3**). Al año siguiente, la Autoridad Autónoma de la Cuenca del río Santa (AACHS) anuló temporalmente la licencia y estableció un régimen de 2.63 m³/s hasta que las autoridades judiciales manifiesten un veredicto.

Figura 5.3 Línea de tiempo de eventos relevantes para la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de Carey, 2014; Egúsqiza Cerrón, 2017; French, 2016, 2019

En julio de 2008, la empresa desató lo fijado por la AACHS y, así, el conflicto derivó en la toma de la laguna por la coalición local, fijando 1 m³/s de descarga. Esta coalición, llamada también Frente de Defensa de la laguna Parón, se conformó con miembros de la comunidad campesina Cruz de Mayo, los comités de riego y la población de la ciudad de Caraz. El régimen determinado por la coalición, sumado a las intensas precipitaciones del periodo lluvioso en 2008 y 2009, provocó que se sobrepasara el nivel máximo (ver Cap. 5.2.2), llegando hasta 4195 msnm con solo 5 m de borde libre (*freeboard*) para superar el punto más alto del dique, lo cual constituyó un riesgo inminente de desbordamiento para las personas aguas abajo. Las autoridades trataron de convencer a la coalición local de bajar el nivel de la laguna. En 2010, la laguna Parón y sus alrededores dejaron de ser propiedad privada y el título pasó a ser propiedad del Estado, lo cual permitió convencer a la coalición de reducir el nivel de la laguna y aminorar el riesgo de desborde.

ESTADO DEL ARTE

Ello favoreció la instauración de un comité de operación manejar la descarga de la laguna Parón, así como un comité de gestión multisectorial para establecer un diálogo entre los usuarios sobre el plan de operación de la laguna. Ambos comités tuvieron la participación de la ANA y los actores locales. No obstante, en mayo de 2011, el Tribunal Constitucional falló en favor de la empresa, retornando la licencia de 5.5 m³/s, pese a que los expertos de la ANA recomendaron en 2010 un máximo de 4 m³/s de descarga. A partir de este punto, la situación y relación entre actores se volvió a complicar, por lo que se han tratado de impulsar ciertas negociaciones, mesas de diálogo, comisiones intermediadoras, entre otros esfuerzos, para solucionar el conflicto que aún sigue latente. Por ejemplo, desde la ANA, en 2014 se instauró el Tribunal Nacional de Resolución de Controversias, el cual se limitó a tratar problemas de corte administrativo y no conflictos como este, y la Unidad de Prevención y Gestión de Conflictos Internos.

Tabla 5.3 Regímenes de descarga histórica de la laguna Parón (m³/s)

Promedio anual máximo (1953-1983)	Licencia legal (1994-2006)	Licencia legal (2006-2007;2011-2019)	Suspensión por la AACHS (2007-2011)	Coalición local luego de toma de 2008	Recomendación técnica máxima de ANA
2.55	8	5.5	2.63	1	4

Fuente: Tomado de French (2019)

El análisis concluye que las dos principales limitaciones para lograr una GIRH en la SLP son: los conflictos legales de la licencia de uso del agua dada a la compañía, y a la falta de una entidad formal transectorial que lidere el conceso junto a la participación de todos los actores (French, 2016, 2019). Finalmente, el ANA ha planificado crear 29 Consejos de Recursos Hídricos de Cuenca y las AAA, como parte de la Ley de Recursos Hídricos, con el objetivo de implementar un Plan de Gestión de Recursos Hídricos que busca ser un espacio de diálogo y consenso entre todos los actores de cada una de las cuencas (gobiernos regionales y locales, comunidades campesinas, sociedad civil, entre otros). No obstante, pese a los años de esfuerzos, aún no se ha formado este consejo para la cuenca del río Santa, debido a los múltiples conflictos vinculados al agua, siendo el conflicto de la laguna Parón uno de los más importantes (French et al., 2016). La creación de esta entidad podría significar un avance significativo sobre todo porque es una de las limitaciones indicadas por French (2016) en cuanto al conflicto de la laguna Parón.

5.5. Estrategias de adaptación a la escasez de agua

A nivel mundial, el IPCC (2019) señala que las estrategias de adaptación en agricultura, y oferta de agua potable han sido dirigidas hacia la disminución de los impactos en los cambios glaciares en zonas de alta montaña con un nivel medio de confianza, a pesar de la escasa evidencia que pruebe la efectividad de estas, lo cual se debe a limitaciones financieras, técnicas e institucionales. Esto permite entender lo que ha sucedido en la cuenca alta del río Santa y la SLP.

En la cuenca del río Santa, han existido ciertas estrategias de adaptación que surgieron a partir de intereses económicos vinculados a la producción hidroenergética. Las grandes obras de ingeniería como los túneles y las válvulas que regulan la descarga de la laguna Parón fueron en principio realizadas con la finalidad de traer prosperidad económica a la región, ya que permitiría impulsar la generación eléctrica de la central hidroeléctrica Cañón del Pato (Carey, 2014). Esta construcción también sirvió para regular el nivel de la laguna y así reducir el riesgo de desastre (ante un GLOF). Por un tiempo, esta estrategia de adaptación fue efectiva en todos los aspectos, ya que permitió el aumento de la generación eléctrica (sobre todo en los meses de estiaje) y redujo la posibilidad de ocurrencia de GLOF. No obstante, (Carey et al., 2012) notaron que con el pasar de los años la estrategia de adaptación había conllevado efectos inesperados, los cuales en este caso son positivos, sino motivo de conflicto por el control de la descarga de la laguna Parón.

Las estrategias adaptativas en este caso deberían considerar más un enfoque desde la GIRH, puesto que el conflicto social es producido por las contradicciones sociales y económicas (French, 2016, 2019) entre los dos principales actores señalados. Egúsqüiza Cerrón (2017) identifica que las causas del conflicto yacen en la ausencia de mecanismos que justamente protejan a los usuarios del agua en el caso de una licencia otorgada para el funcionamiento de una CH, en unas instituciones sólidas, y en la ausencia del instrumento de gestión ambiental desde el inicio de la construcción. Claramente, las medidas de adaptación tienen que enfocarse en esos aspectos de carácter normativo e institucional.

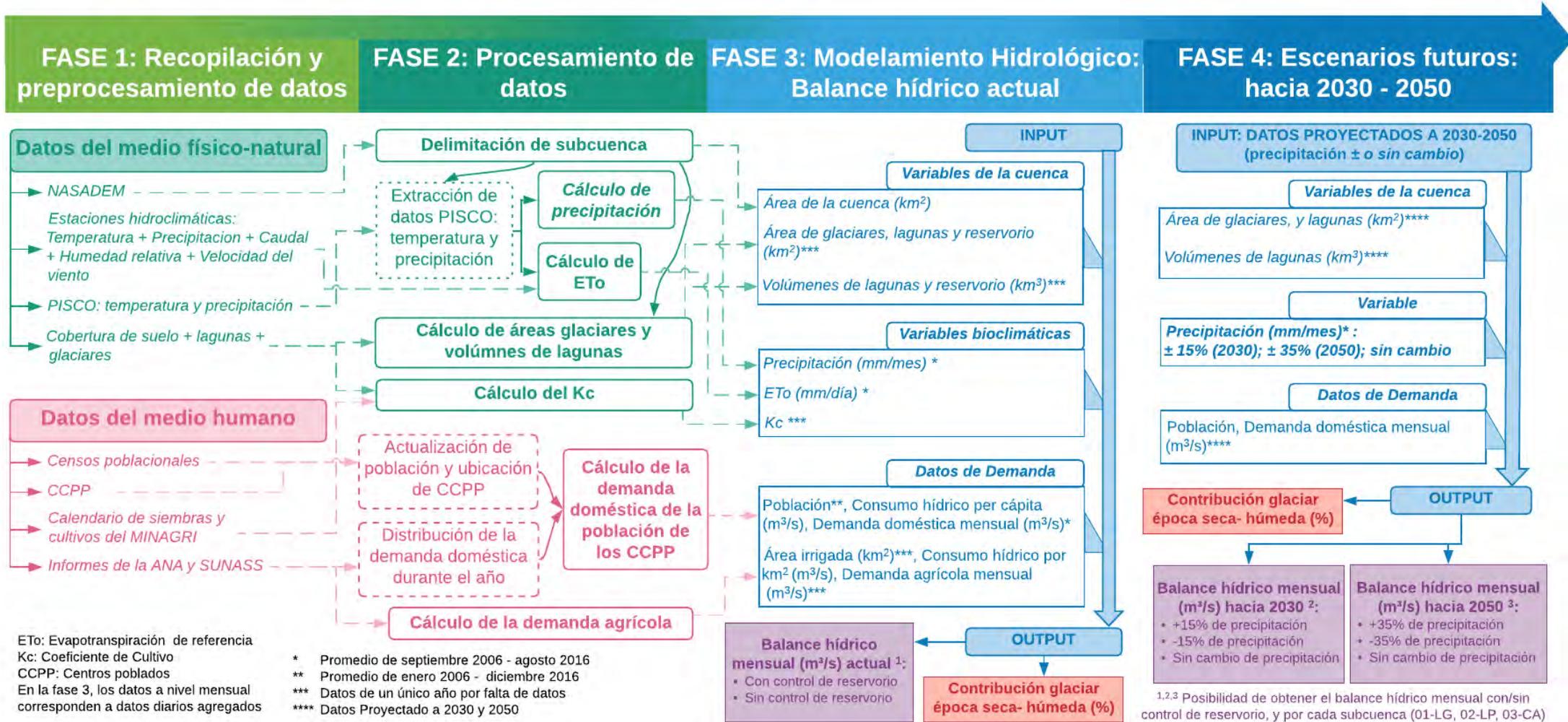
Capítulo 6 METODOLOGÍA

La metodología consiste en cuatro etapas de procesamiento de datos (ver **Figura 6.1**).

En la primera etapa, se buscó y organizó la información necesaria para que sea usada directa o a través de un previo preprocesamiento como insumos del modelo hidrológico. Así, se recopiló datos topográficos, hidroclimáticos, de cobertura del suelo (incluyendo glaciares y lagunas), así como estadísticas de demografía y agricultura. Estos datos provienen de diversos grupos de investigación científicos, entidades gubernamentales y no gubernamentales, por lo que el trabajo se basó en una amplia gama de datos. La segunda etapa consistió en realizar el procesamiento de estos para obtener los insumos que requiere el modelo hidrológico. En estas dos primeras fases, el procesamiento de geodatos espaciales se ejecutó, mayoritariamente, en el software ArcGIS versión 10.5, indicando las herramientas y geoprocесamientos correspondientes.

La tercera fase comprende ejecución y generación del modelo hidrológico para la SLP junto a las tres subcuencas correspondientes. Finalmente, en la cuarta fase, ajustando el modelo hidrológico con los posibles cambios a futuro se logró simular escenarios para el balance hídrico hacia 2030 y 2050. Estos escenarios ofrecerán, fundamentalmente, un panorama sobre cuál sería la disponibilidad hídrica futura de modo que se pueda evaluar los impactos que ello cause y así apoyar la toma de decisiones. A continuación, se detallan los diferentes pasos en cada fase.

Figura 6.1 Flujo de trabajo metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

6.1. Recopilación y preprocesamiento de datos

6.1.1. Modelo Digital de Elevación: NASADEM

El NASADEM es un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) elaborado y mejorado por la NASA, cuya resolución espacial es de un segundo de arco (sexagesimal) (~30 m), en la zona tropical y abarca aproximadamente el 80% de la superficie terrestre, excluyendo las zonas de latitudes altas (Buckley et al., 2020; NASA, 2020). Este producto ha sido publicado a inicios del año 2020 (Buckley, 2020; Dempsey, 2020). Se deriva, de los datos de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) tomados en febrero de 2000 e incluye mejoras y correcciones realizadas a partir de otros productos satelitales posteriores: productos de estereoscopia del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) del satélite TERRA; productos de altimetría laser del Geoscience Laser Altimeter (GLAS), junto al NASA's Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (ICESat); y productos DEM del Global DEM (GDEM), la National Elevation Data para EE.UU.- México, el Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010), y el Canadian Digital Elevation Data (CDED) (Buckley, 2020; Buckley et al., 2020; Crippen et al., 2016; Dempsey, 2020; NASA, 2020).

Se usó el NASADEM para la delimitación del área de estudio de la SLP, debido a la consistencia y precisión dadas por los procesos de mejoramiento y correcciones, basándose en datos provenientes de sensores y satélites múltiples. La NASA empleó el método de Height Ripple Error Correction (HREC) para disminuir el error en los datos de elevación, apoyándose en el GLAS y el ICESat. La NASA elabora este producto con el objetivo de proveer un DEM global de vanguardia (Buckley, 2020). Asimismo, al tener un error RMS de 5.30 ± 6.05 m verticalmente (Buckley et al., 2020), se trata de uno de los mejores DEM de alta precisión (menor error vertical) libremente disponibles que favorece mayor precisión en la delimitación de cuenca. Finalmente, se descargó este producto desde la plataforma virtual de la NASA en formato HGT. Para el área estudio, los cuadrángulos del DEM fueron "s09w078" y "s10w078".

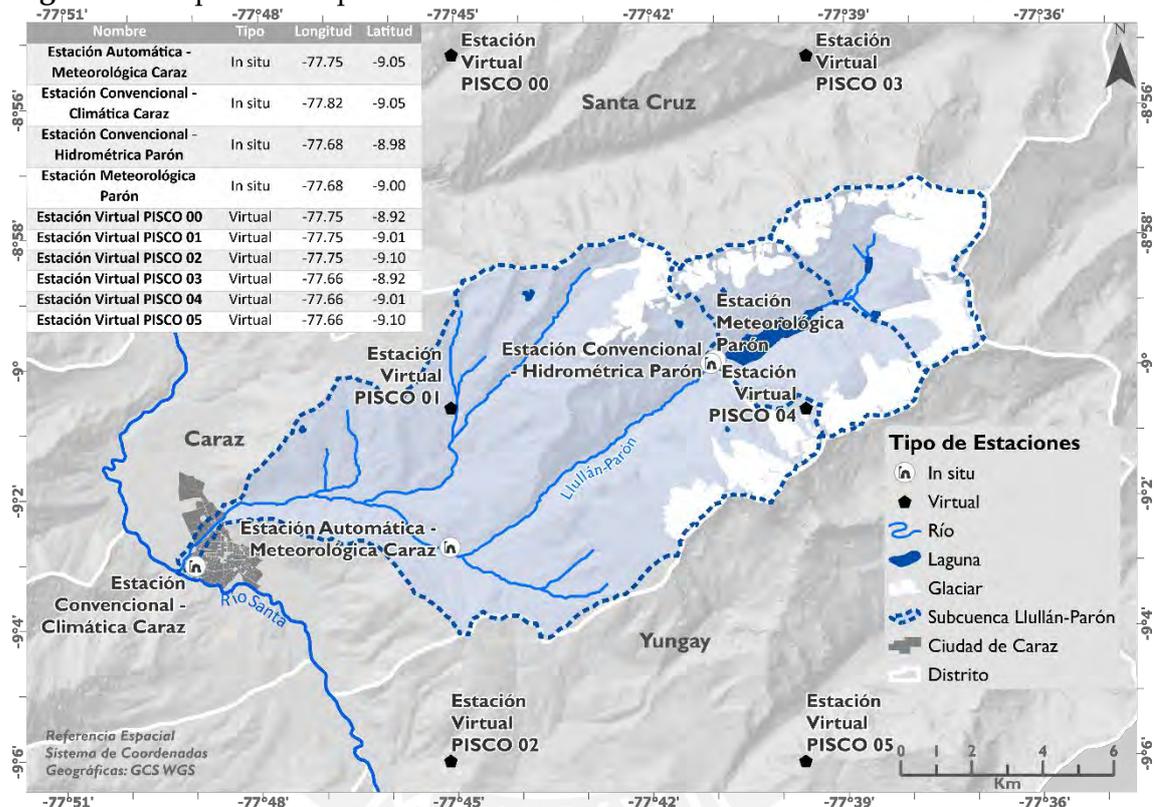
6.1.2. Datos de estaciones hidroclimáticas *in situ* y virtuales (PISCO)

La información hidro-climática forma parte de los insumos del modelo hidrológico (Cap. 6.3); no obstante, la red de estaciones hidroclimáticas *in situ* está distribuida

METODOLOGÍA

inequitativamente a lo largo de territorio peruano con registros incompletos y de baja calidad (Aybar et al., 2019). Si bien los datos registrados por estas estaciones *in situ* no son usados directamente como insumos en la ejecución del modelamiento, funcionan para verificar la información dada por las estaciones virtuales PISCO (ver Cap. 6.1.2), y para ajustar los valores de ET (ver Cap. 6.2.4), los cuales sí son insumos directos para el modelo. La **Figura 6.2** muestra las estaciones usadas, incluyendo las virtuales.

Figura 6.2 Mapa de los tipos de estaciones hidroclimáticas alrededor de la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de ANA (2011, 2014b, 2020); IGN (2020); INAI GEM (2018); NASA (2020); SIGRID (2020)

Los datos PISCO

Los datos Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO) representan la primera base de datos espaciotemporales interpolados y grillados nivel nacional, elaborado por el Servicio de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la cual contiene únicamente información atmosférica (temperatura y precipitación) para el Perú. Su resolución espacial está entre 0.1° - 0.05° (arcsec)(~5-10 km), y se trabajará con la resolución de 10 km. Abarcan un periodo desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016 con una frecuencia diaria y mensual Este producto es resultado de la utilización de los registros de las estaciones meteorológicas

METODOLOGÍA

(*in situ*), y datos interpolados con técnicas de deriva externa (Kriging) con datos satelitales Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations data (CHIRPS) (Aybar et al., 2017, 2019; Díaz et al., 2015).

Los últimos productos de datos construidos para la variable temperatura máxima y mínima a nivel mensual son PISCO versión 1.1, mientras que para la precipitación son PISCO versión 2.1. Esta serie de datos es completa a nivel mensual para el periodo 2006-2015 que requiere el modelo hidrológico (Cap.6.3). Estas bases de datos se descargaron desde el servidor del SENAMHI, en formato NetCDF y se extrajeron con el programa R.

Los datos de las estaciones hidroclimáticas *in situ* en la SLP no registran series completas de información por un periodo de tiempo prolongado, en los años recientes (en los últimos 15 años) (Cap. 0), lo cual dificulta la obtención de los insumos esenciales para ejecutar un modelamiento hidrológico (Cap.6.3). Ante las deficiencias de datos atmosféricos completos y de calidad en el Perú (Aybar et al., 2019), se decidió utilizar los datos PISCO. Si bien la principal limitación yace en que se basa en una red de estaciones *in situ* deficiente, incompleta y distribuida inequitativamente a lo largo del territorio peruano (especialmente en las zonas altoandinas), este producto ha sido sometido a un proceso de control de calidad detallado con el fin de que oriente la ejecución de modelamientos hidrológicos (Aybar et al., 2017). Actualmente, existen al menos dos estudios recientes que han usado exitosamente los datos PISCO: Aybar et al., (2020); Gubler et al.(2020).

6.1.3. Cobertura de suelo

La cobertura de suelo permite conocer describir, caracterizar, y espacializar a las comunidades vegetales, así como la extensión de glaciares, campos agrícolas, y lagunas en la SLP. En primer lugar, los principales insumos que requiere el modelo hidrológico son de carácter espacial, ya que se necesita el área de los glaciares, junto con el área y volumen de las lagunas y reservorios (lagunas que funcionen como reservorio). Para ello se utilizó archivos con datos geospaciales agrupadas en glaciares y lagunas para el presente y el futuro. Estos provienen del inventario de lagunas de ANA (2014c) dentro del Catálogo de Metadatos del ANA - complementado con información espacial delimitada en Google Earth para julio de 2016 - , del inventario de lagunas futuras del

METODOLOGÍA

Proyecto Glaciares + (Guardamino et al., 2019), del inventario de glaciares (INAIGEM, 2018), y de la proyección de glaciares futuros para 2050 según el escenario de Trayectorias de Concentración Representativa 8.5 (o RCP8.5 por sus siglas en inglés) del IPCC, la cual está basada en Schauwecker et al. (2017).

Para el resto de la subcuenca (no glaciar, ni lagunas), se han utilizado un mapa de Bofedales (humedales y turberas) realizado por Chimner et al. (2019a), complementado con información espacial de otros dos mapas: el mapa de cobertura vegetal del MINAM con 10 categorías definidas para la SLP ; y el mapa de ecosistemas, también del MINAM con 10 categorías idénticas al anterior (MINAM, n.d., 2007; Ruíz Ostoic et al., 2019).

Descarga de información de la cobertura de suelo

La información espacial del mapa de cobertura vegetal y ecosistemas se descargó desde la plataforma “Geoservidor Intercambio de datos” del MINAM, en formato shapefile. Se realizó un recorte espacial (*Clip*) para obtener la información de cobertura vegetal y ecosistemas únicamente para la SLP.

El mapa de cobertura de suelo elaborado por Chimner et al. (2019a) fue obtenido a través de la página del Center for International Forestry Research ([CIFOR](#)), en formato ráster HGT. Se transformó el formato de los datos a un formato shapefile (*Raster to Polygon*) para luego recortar espacialmente (*Clip*) a la SLP.

A partir de ello, se calcularon las áreas para cada una de las categorías de las tres capas espaciales de cobertura de suelo. Luego de verificar la información, según su ubicación espacial, su área, y el porcentaje de superficie que representa cada categoría (respecto al total de la subcuenca) se determinó que el mapa realizado por Chimner et al. (2019a) es el que mejor caracteriza a la SLP por su nivel de detalle en la cobertura de vegetación y se usaron los otros mapas para complementar.

6.1.4. Datos demográficos y consumo de agua

El cálculo de la demanda poblacional se realizó a partir de fuentes múltiples de información como capas espaciales, informes, reportes de instituciones del Estado, y censos nacionales (Perú), con la finalidad de obtener datos precisos y exactos.

METODOLOGÍA

Los insumos para hallar la demanda doméstica en la SLP fueron los siguientes: la tabla de atributos de los *shapefiles* de centros poblados (CCPP) del XII Censo poblacional del 2017 recopilado por el SIGRID (2020); los *shapefiles* con las ubicaciones actualizadas de CCPP recopiladas por el MINEDU (2020); el informe de la Sunass (2014) sobre la EPS Chavín S.A.; la evaluación de recursos hídricos en la cuenca del río Santa (ANA, 2015); y los censos poblacionales IX (1993), XI (2007) y XII (2017) (INEI, 1994, 2007, 2017).

Se halló la cantidad de población por cada año que el modelo hidrológico requiere y que, también, por su ubicación espacial se abastece del agua de la SLP.

6.1.5. Demanda agrícola

La demanda agrícola es un insumo sumamente relevante puesto que representa la mayor demanda de agua en la SLP así como en la cuenca del río Santa (ANA, 2015). Esta depende tanto del área irrigada como del consumo promedio por unidad de área y varía según el mes del año. El informe de la ANA (2015) determina el área irrigada y la distribución de la demanda agrícola por cada mes del año. Entonces, debido a la falta de información específica de cada una de las parcelas de cultivo, se consideran estos valores medidos por el ANA para la SLP.

El área irrigada en la SLP considerada como insumo es la calculada por la ANA (2015), porque cuenta con una mayor precisión que las coberturas del suelo (ver Cap. 6.1.3). Esto se debe a que en este informe se trata con mayor detenimiento la medición del área irrigada, mientras que las áreas dedicadas a la agricultura en la SLP dadas por las coberturas de suelo permiten verificar el valor dado por la ANA. En tanto, el consumo promedio por unidad de área permite establecer la demanda agrícola mensual, la cual es ajustada, posteriormente, por los valores del mismo informe de la ANA (2015).

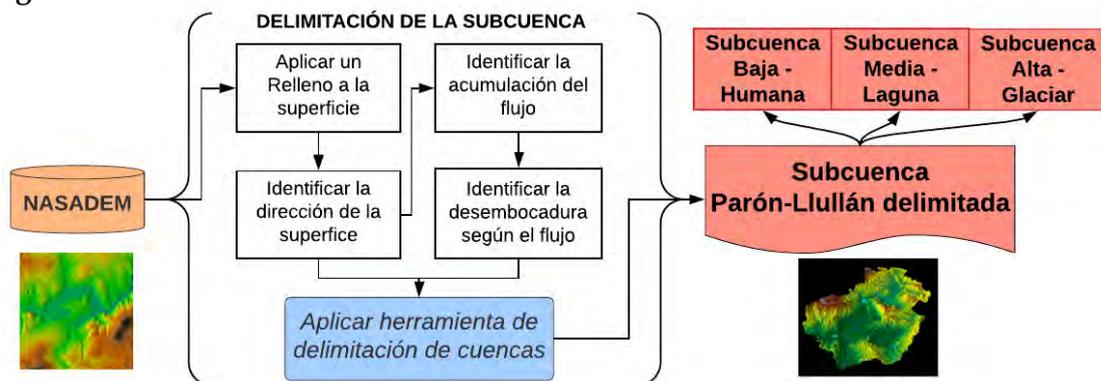
Finalmente, a diferencia de los otros datos, la demanda agrícola utiliza información establecida en el informe del ANA (2015). Por ello, no fue necesario que estos datos atravesasen por la fase 2, procesamiento de datos, sino que fueron utilizados directamente como insumo del modelamiento hidrológico (ver **Figura 6.1**).

6.2. Procesamiento de datos

6.2.1. Delimitación de la subcuenca

Se ejecutó un procedimiento que aplica un conjunto de herramientas de geoprocésamiento para la delimitación de la SLP (ver **Figura 6.3**). Este método ha sido ejecutado para delimitar cuencas y subcuencas en diferentes continentes: Ezz, Gomaah, & Abdelwares (2019) en Egipto, Orewole et al. (2016) en Nigeria, Miller & Clancy (2017) en Wisconsin (EE.UU.), Pokharel, Basnet, & Paudel (2019) en Nepal.

Figura 6.3 Proceso de delimitación de subcuencas de la SLP



Fuente: Elaboración propia a partir de la información del manual de Bajjali (2018)

El procedimiento ejecutado sigue lo indicado por Li, Yang, & Wu (2019) para la delimitación de cuencas y se basa en el manual de ArcGIS para la delineación de cuencas de Bajjali (2018). Este manual indica que se necesita únicamente un DEM del área de estudio para el delineamiento de la cuenca, para lo cual los cuadrángulos DEM deben ocupar un área evidentemente mayor a la de la SLP.

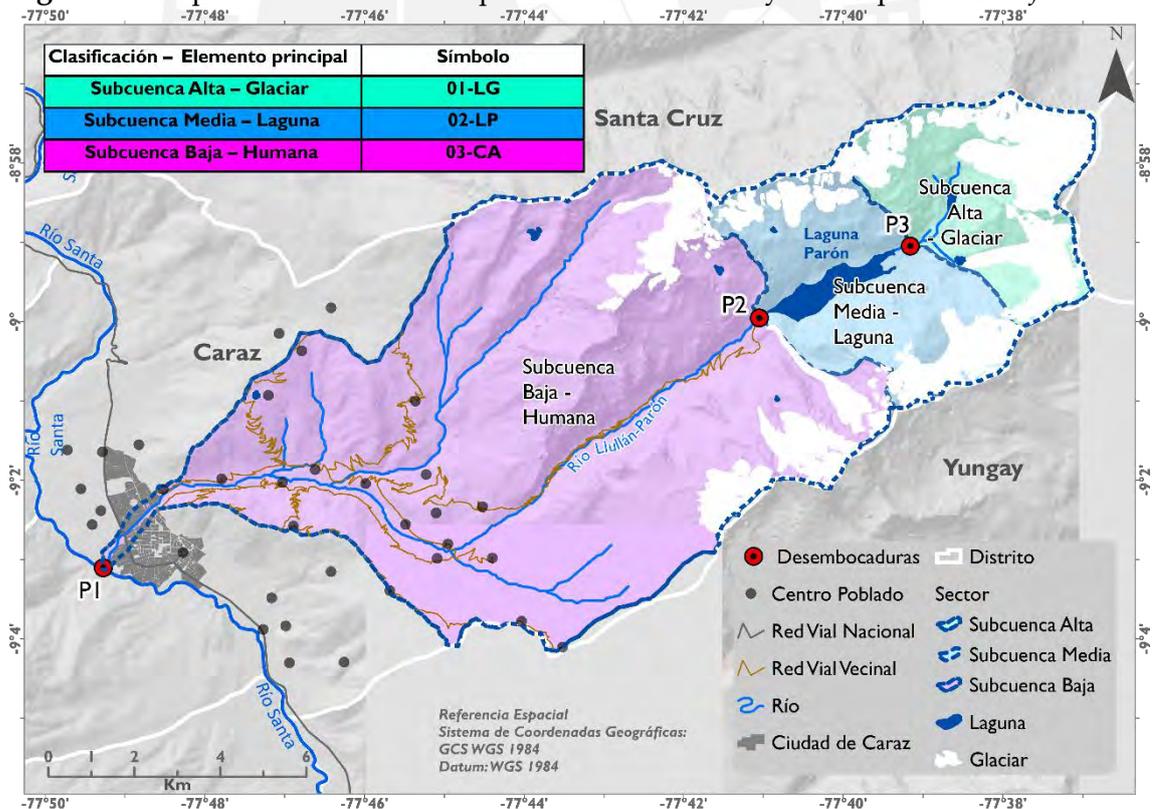
Se unieron ambos cuadrángulos (*Mosaic To New Raster*) para formar un solo, el cual será utilizado para delimitar la SLP. Después, se aplica un relleno (*Fill*) para verificar que no existan depresiones en el terreno que generen errores en el proceso. Luego, se calculó la dirección (*Flow Direction*) y acumulación (*Flow Accumulation*) del flujo hidrológico. Esta última herramienta crea una capa ráster de la misma resolución del DEM (~30 m) con ubicación sobre dónde se produce la acumulación de flujo hídrico, según el relieve. En esta parte del procedimiento, se crea un punto *outflow*, en la desembocadura del río principal de la SLP, manualmente, a partir de la visualización de las zonas de acumulación del flujo, reconociendo la red hídrica en dicha capa. Posteriormente, se

METODOLOGÍA

delimita automáticamente la subcuenca (*Watershed*), usando la capa que representa la ubicación de la acumulación del flujo hídrico, y el punto de desembocadura creado en el paso anterior (ver **Figura 6.3**).

Finalmente, la subcuenca delimitada fue dividida en tres partes: subcuenca alta-glaciar (01-LG) (4982 ± 352 msnm, entre 4179-5911 msnm), subcuenca media-laguna (02-LP) (4842 ± 430 msnm, entre 4148-5913 msnm), subcuenca baja-humana (03-CA) (4019 ± 841 msnm, entre 2195-6342 msnm). Para esta delimitación se utilizó el mismo método con otros dos puntos de desembocadura y hallando la diferencia entre las áreas delimitadas. Para obtener la subcuenca alta, se creó un punto *outflow* al este de la laguna Parón en donde confluye el río de mayor aporte en caudal a esta laguna (ver P3 en la **Figura 6.4**) y se aplicó el método de delimitación. Para la subcuenca media, se utilizó el punto *outflow* de la desembocadura de la laguna Parón (ver P2 en la **Figura 6.4**). La subcuenca baja fue definida a partir de la diferencia entre la SLP y las otras dos subcuencas.

Figura 6.4 Mapa de las subcuencas que conforman la SLP y sus respectivos *outflows*



Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

6.2.2. Extracción de datos PISCO

Se ejecutó un proceso de extracción de datos PISCO para obtener los datos correspondientes al área de estudio. Para ello, se utilizó principalmente el programa R en la plataforma RStudio. Inicialmente, se crea una red de puntos (*Fishnet*), con una separación de 10 km (la resolución espacial de los datos PISCO), donde cada punto, será denominado estación virtual. Los datos PISCO de cada punto son extraídos a través de la ejecución de una línea de código (con los paquetes "*raster*" y "*ncdf4*") (Hijmans et al., 2020). Con ello, se halla la serie de datos de precipitación y temperatura de seis estaciones virtuales (ver **Figura 6.2**) para el periodo 1981-2016.

Para ser empleados como insumos del modelamiento hidrológico, estos datos han sido comparados con los datos registrados por estaciones *in situ* (Estación Automática-Meteorológica Caraz, Estación Convencional-Climática Caraz, Estación Meteorológica Parón) (ver Cap.6.1.2) con la finalidad de verificar que los principales patrones de variación estacional sí coinciden y representan las condiciones atmosféricas. En tanto, como se detalla en el siguiente subcapítulo (ver Cap. 6.2.3), la serie de datos de precipitación fue procesada para ser empleada como insumo del modelo hidrológico.

6.2.3. Cálculo de la precipitación

Este apartado consiste netamente en el tratamiento de la serie de datos obtenida de los datos PISCO a través del método de Distancia Inversa Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) para la interpolación de los valores de precipitación para toda el área de la SLP.

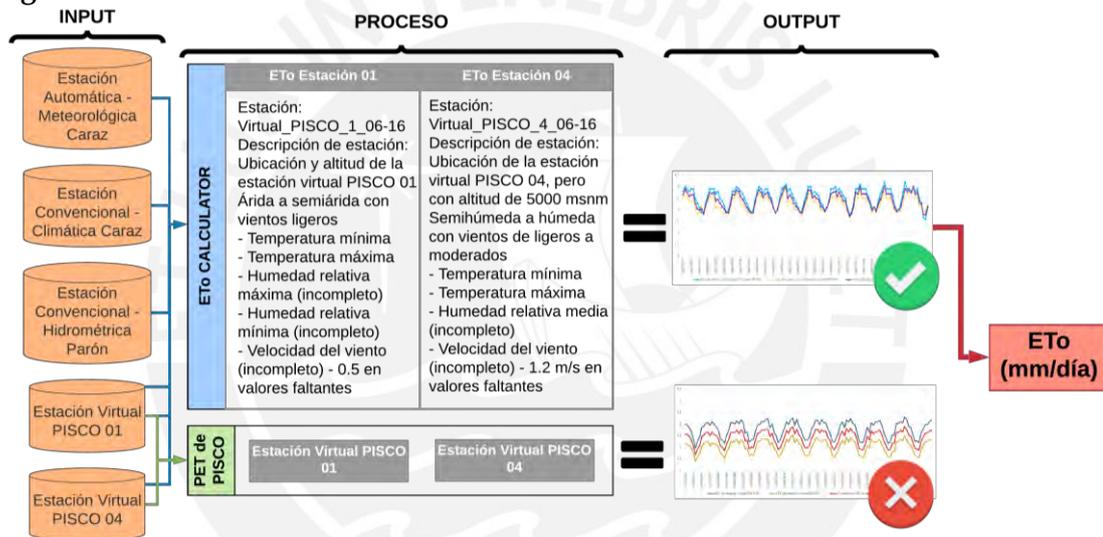
Se utilizó un factor de 3, ya que aumenta la dependencia a la distancia ante la alta resolución espacial de los datos PISCO. Se aplicó la herramienta *Inverse Distance Weighting*, correspondiendo a los promedios de precipitación mensual para los 12 meses del año. Luego, se calculó el promedio de precipitación zonal (*Zonal Statistics as Table*) para las tres subcuencas al interior de la SLP. De esta forma, se consiguió valores más precisos de precipitación para cada una de las tres subcuencas, especialmente, para la subcuenca baja-humana, ya que esta ocupa la mayor área y variación altitudinal de las tres subcuencas. Finalmente, los valores se usaron como insumos agrupados en tres grupos (por las tres subcuencas) de 12 (por los meses del año).

METODOLOGÍA

6.2.4. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o)

Se describió la evapotranspiración (ET) como la conjunción de la evaporación del agua en el suelo y la transpiración de las plantas (ver Cap. 4.2). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se trata de la ocurrencia de este proceso en condiciones específicas: cuando la superficie de referencia es el césped, por lo que no considera las características de los cultivos que yacen en el terreno ni los tipos de suelo (Allen et al., 1998). Es decir, la ET_o es un valor referencial de la medición de la ET, la cual se ajusta con el coeficiente de cultivo (K_c) (ver Cap. 6.2.6) a las características de los cultivos y suelos que yacen en el terreno.

Figura 6.5 Proceso de cálculo de la ET_o en la SLP



Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la ET_o se obtuvo de dos formas diferentes con la finalidad de escoger los valores más adecuados que servirán de insumo al modelo hidrológico (ver **Figura 6.5**). La primera forma fue la obtención de los valores de ET_o a través de la extracción de datos PISCO, siguiendo el mismo procedimiento indicado en el subcapítulo anterior (ver Cap. 6.2.2). Al existir dos estaciones virtuales ubicadas en dos zonas de diferente altitud dentro de la SLP, se decidió promediar los resultados. La segunda forma de hallar la ET_o fue a través de la aplicación denominada “ET_o Calculator” perteneciente a la FAO (Allen et al., 1998). Luego de una comparación de la ET_o calculada de ambas formas, se determinó que el empleo del segundo método era mucho más adecuado por ser más preciso y coherente con el resto de datos hidroclimáticos (ver **Figura 6.5**).

METODOLOGÍA

Ejecución del ETo Calculator

Para calcular el ETo, se tuvo como referencia, principalmente, los datos de temperatura, ubicación y altitud de las estaciones virtuales PISCO 01 y 04 hallados en el Cap. 6.2.2. Los parámetros de lugar fueron los valores de altitud y ubicación de tales estaciones virtuales. En cuanto a los parámetros climáticos del lugar, se utilizaron los registros de la “Estación Automática - Meteorológica Caraz” y la “Estación Convencional - Climática Caraz” para la subcuenca baja, mientras que para el área de la subcuenca media fueron los registros de la “Estación Meteorológica Parón” (ver **Figura 6.2**). Para clasificarlos adecuadamente se empleó la clasificación climática de Allen et al. (1998) y la clasificación de vientos según Diaz & Isemer (1995).

Para la ubicación de la estación virtual PISCO 01, los insumos fueron series de datos de temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, y velocidad del viento para el periodo de septiembre de 2006 a agosto de 2016. Para la ubicación de la estación virtual PISCO 04, los insumos fueron series de datos de temperatura máxima y mínima, humedad relativa promedio, y velocidad del viento para el mismo periodo.

Finalmente, se obtuvo la ETo (mm/día) para cada mes entre septiembre de 2006 y agosto de 2016 tanto para la subcuenca baja como la media. El valor de ETo de la subcuenca media también representa a la subcuenca alta, debido a la falta de datos y la proximidad entre ambas.

6.2.5. Cálculo de áreas glaciares y volúmenes de lagunas

Para la información de las lagunas actuales, se utilizó la información proporcionada por la ANA (2014c) que tuvieron que ser complementadas, porque no incluye el área de todas las lagunas formadas hasta el 2016, el cual es el año de referencia para el modelo hidrológico. Por ello, a través de Google Earth, se trazó las orillas de las lagunas restantes en formato KML. Posteriormente, se añadió el área medida con el fin de obtener el área de las lagunas para el año 2016.

Para modelar el escenario futuro laguna, se tomaron cuatro nuevas lagunas futuras proyectadas de Guardamino et al. (2019) según la probabilidad de que esté completamente formada para el 2030 o para el 2050. La nueva laguna de mayor

METODOLOGÍA

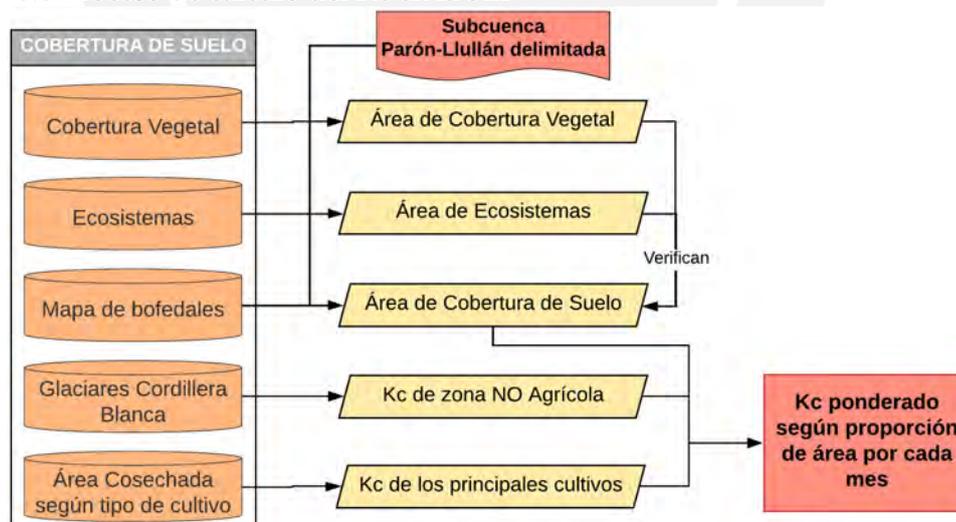
relevancia es la de código “1376932-18-1”, llamada Nueva Artesoncocha Alta (INAIGEM, 2016), debido a que se estima que su volumen sería 4.45 hm^3 (0.2 km^2). Las tres lagunas suman un volumen de 1.2 hm^3 y un área de 0.12 km^2 .

El área de los glaciares del INAIGEM (2018) corresponde a la extensión glaciaria de 2016. En tanto, para modelar el escenario futuro glaciario hacia 2030 y 2050, se empleó la proyección de la extensión glaciaria para el 2050 realizada por Schauwecker en 2019, quien se basó lo estimado por Schauwecker et al. (2017), según el escenario RCP8.5. Luego, se calculó el área glaciaria proyectada hacia 2030, en base a la tasa de variación de la extensión glaciaria entre 2016 y 2050.

6.2.6. Cálculo del coeficiente de cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo (K_c) permite ajustar la E_{To} (ver Cap. 6.2.4) a las condiciones que realmente existen en el terreno, a través de una multiplicación entre ambos parámetros (Allen et al., 1998). Es una medición que usualmente se hace de manera experimental, según las características de los tipos de cultivos y vegetación (altura de planta, área de la hoja, cobertura del dosel, etc.) que yacen en la superficie (Irmak, 2008; Pokorny, 2018).

Figura 6.6 Proceso de cálculo del K_c en la SLP



Fuente: Elaboración propia

Para su cálculo, en primer lugar, es necesario conocer las proporciones de las áreas que abarca cada tipo de cobertura de suelo y vegetación o cultivo. Para ello, se consideró las coberturas del suelo en las cuales los mapas de Cobertura Vegetal y Ecosistemas del MINAM verifican el porcentaje de área correspondiente a determinado tipo de

METODOLOGÍA

vegetación del mapa de bofedales de Chimner et al. (2019a) (ver Cap. 6.1.3). Gracias a ello, se logró identificar el área y la proporción que ocupa cada tipo de cobertura de suelo para cada una de las tres subcuencas al interior de la SLP. Conjuntamente, se halló el área y la proporción que ocupan los 9 principales cultivos del distrito de Caraz según el calendario de siembras y cosechas del periodo 2013-2018 (MINAGRI, 2020b). Después, se halló un promedio ponderado entre la proporción del área que ocupa cada tipo de cobertura de suelo, vegetación o cultivo y el valor de K_c que corresponde a cada uno, empleando los valores de K_c dados por (Allen et al., 1998).

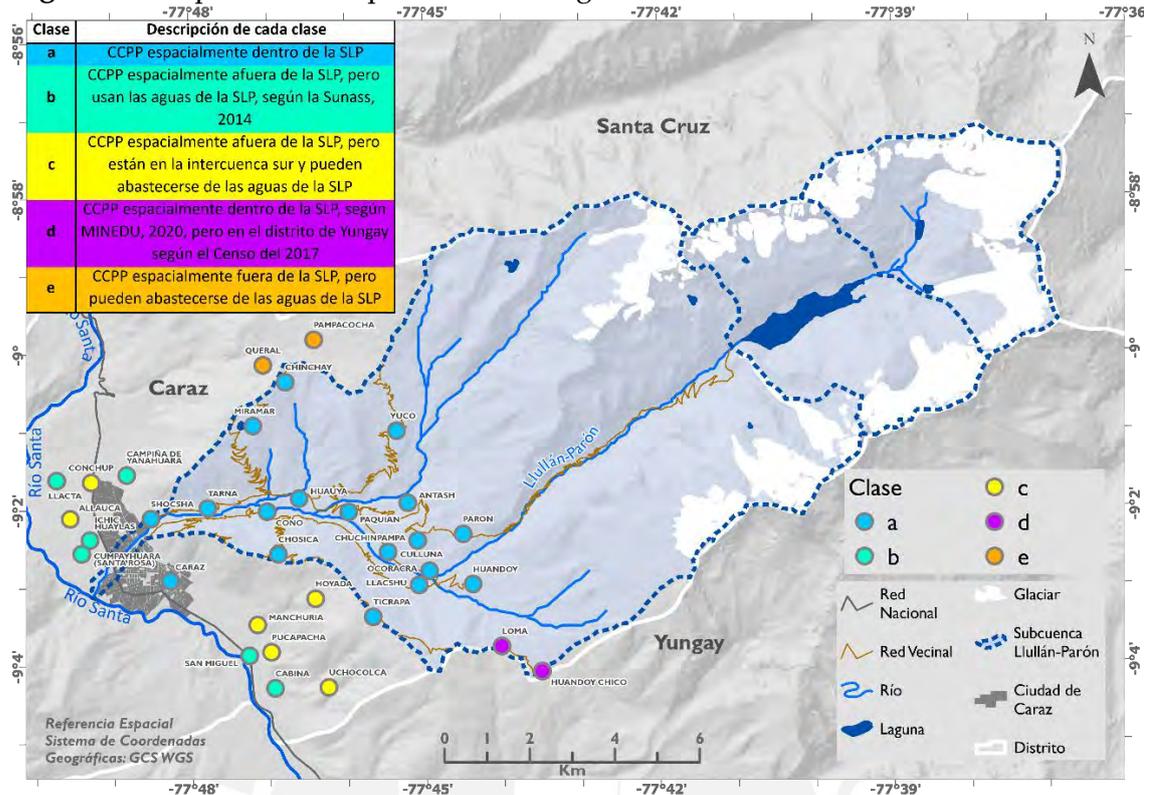
6.2.7. Cálculo de la demanda doméstica

Los centros poblados (CCPP) fueron localizados en base a la ubicación actualizada dada por el MINEDU, mientras que la cantidad de población de cada uno de estos se obtuvo a partir de la tabla de atributos. Dicha tabla contiene la información según el censo poblacional XII (2017). Se incluyeron 34 CCPP como usuarios domésticos del agua del río Lullán-Parón. De estos, 20 (categoría A y D) están espacialmente dentro de la SLP, mientras que otros 6 (categoría B) son abastecidos a través de la administración de la EPS Chavín o corresponden a alguna JASS del ámbito de la localidad de Caraz (Sunass, 2014). Ante la falta de información sobre el abastecimiento de agua de los 8 CCPP restantes, se decidió considerarlos como usuarios domésticos debido a su cercanía a la SLP (categorías C y E) (ver **Figura 6.7**).

Así, se determinó la población promedio que se abasteció del agua del río Lullán-Parón entre 2006-2016. En base a los censos, se usaron las tasas de variación del número de habitantes urbanos y rurales entre 1993-2007 y 2007-2017 del distrito de Caraz para obtener cuánta población demanda agua de la SLP para uso doméstico entre 2006-2016.

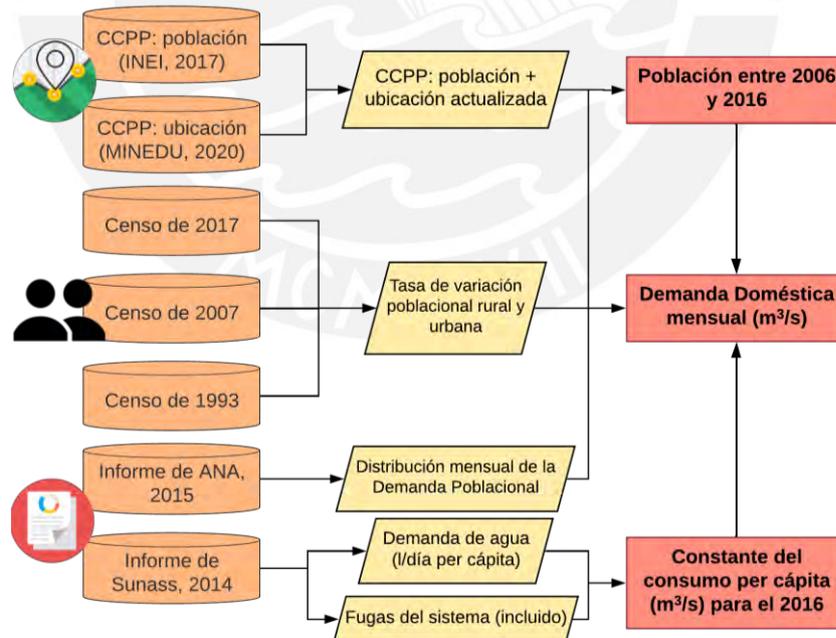
METODOLOGÍA

Figura 6.7 Mapa de CCPP que demandan agua de la SLP



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.8 Proceso de cálculo de la Demanda Doméstica en la SLP



Fuente: Elaboración propia

Distribución mensual de la demanda doméstica mensual

El informe de la Sunass (2014) ofrece una proyección de la demanda de agua potable a nivel de la EPS Chavín en litros per cápita por día desde el año 2013 al 2018. Este valor

METODOLOGÍA

incluye las fugas del sistema de agua potables o agua no facturada (pérdidas técnicas y comerciales). Con ello, se calcula la constante del consumo per cápita que permite hallar la demanda doméstica mensual. Adicionalmente, se consideró la evaluación de recursos hídricos hecha por la ANA (2015) que muestra la distribución de la demanda poblacional del río Lullán-Parón por cada mes del año, para ajustar los valores mensuales de esta demanda. Por lo tanto, a partir de estas proporciones y la cantidad de población hallada previamente, se obtuvo la demanda doméstica para cada mes desde septiembre de 2006 hasta agosto de 2016 (ver **Figura 6.8**).

6.3. Modelamiento Hidrológico

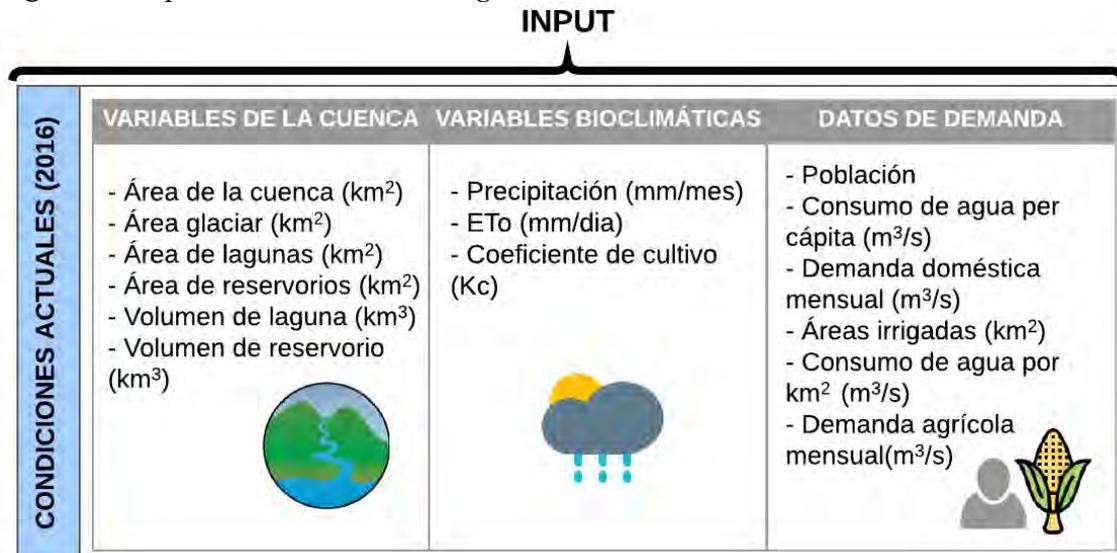
El modelamiento hidrológico ejecutado funciona como un modelo agregado, ya que considera al territorio como una única unidad espacial, sin diferencias en sus características físicas-ambientales (ver Cap. 4.2). En primer lugar, se eligió este modelo, debido a que se adecua a la información disponible ante las dificultades en la obtención y accesibilidad de información completa y de calidad. El modelamiento hidrológico requiere insumos que se pueden conseguir directamente o a través de procedimientos como los mencionados anteriormente (ver Cap. 6.1 y 6.2). La lista de insumos se describe en la **Figura 6.9**. Este modelo hidrológico no considera parámetros del suelo, los cuales son difícilmente de obtener a una escala tan detallada como el de la SLP.

En segundo lugar, este modelo hidrológico se ha aplicado recientemente en la cuenca glaciar del Vilcanota-Urubamba por parte de Drenkhan et al. (2019). Además, ante la principal limitación que presenta un modelo de tipo agregado (ver Cap. 4.2), se dividió la SLP en tres sectores (ver Cap. 6.2.1). Esto se debe a que cada sector tiene características hidrológicas predominantes. En la subcuenca alta, la influencia del glaciar es mucho mayor, puesto que ocupa el 35% del área de la subcuenca y no hay actividad humana. En la subcuenca media, si bien hay una cobertura glaciar del 16%, lo primordial es que toda el agua que es drenada hacia la laguna Parón ocupa el 7% y es considerada como el reservorio regulado por válvulas de control (ver Cap. 5.4). La subcuenca baja se caracteriza por la predominante presencia de actividades humanas que influyen en el recurso hídrico como la demanda poblacional y, sobre todo, agrícola, lo cual no existe en los sectores medio y alto. De esta forma, el modelo agregado, al ser aplicado en tres

METODOLOGÍA

sectores (en las tres subcuencas de la SLP), se convertiría en uno semi-distribuido. Con ello, se aprovecha las ventajas que ello implica: considerar la distribución espacial de las variables hidrológicas y parámetros físicos en las características del territorio.

Figura 6.9 Input del Modelo Hidrológico



Fuente: Elaboración propia basado en el modelo usado por Drenkhan et al., 2019

El modelamiento hidrológico permite estimar el balance hídrico en m³/s para cada mes del año. Además, este posibilita la estimación de la contribución glaciaria mensual y, por ende, también para la época seca y húmeda. Inclusive, una ventaja significativa de este es que se puede obtener un balance hídrico considerando o no el control de las válvulas de descarga de la laguna Parón. Esto claramente favorece la comparación con un escenario en el que no se tuviese el control sobre la descarga de la laguna Parón: por ejemplo, se podría destacar la importancia de la construcción de la infraestructura en la laguna. A continuación, se explicará cómo cada uno de los insumos hallados previamente es introducido en el modelo hidrológico para la estimación del balance hídrico en el escenario actual correspondiente al periodo 2006-2016 para tres subcuencas al interior de la SLP.

6.3.1. Variables de la cuenca

El área de la cuenca se calculó en base a la delimitación con el NASADEM (NASA, 2020) (ver Cap. 6.2.1). Las áreas de glaciares y de lagunas (km²) actuales corresponden al año 2016 según la información espacial dada por INAIGEM (2018) y ANA (2014c) y

METODOLOGÍA

complementadas por Google Earth, respectivamente (ver Cap. 6.1.4). El volumen de las lagunas y del reservorio (km^3) también pertenecen a una medición para el año 2016 (ver Cap. 6.1.4).

6.3.2. Variables bioclimáticas

La precipitación (mm/mes) fue hallada en base al promedio de la interpolación de los valores de cada estación virtual PISCO para el periodo correspondiente a septiembre 2006- agosto 2016 (ver Cap. 6.1.2). La ETo promedio mensual (mm/día) para el periodo septiembre 2006- agosto 2016 corresponde a los valores dados por ETo Calculator basado en la estación virtual PISCO 01 (para la subcuenca baja), y 04 (para la subcuenca media y alta), ante la falta de información específica (ver Cap. 6.2.4). El Kc, a diferencia de los otros datos, es un promedio ponderado de información perteneciente a diferentes fechas (ver Cap. 6.2.6) y se encuentra como una variable hidroclimática, debido a que permite ajustar la ETo (ver Cap. 6.2.4).

6.3.3. Parámetros de demanda de agua

La demanda de agua incluye a la demanda doméstica mensual (m^3/s) y la demanda agrícola mensual (m^3/s). El primer insumo es la población que se abastece del agua que provee la SLP. La población se estimó para cada año entre 2006 - 2016 a partir de los datos de los censos y CCPP (ver Cap. 6.2.7). Por ello, la población empleada en el modelamiento hidrológico corresponde a un promedio de habitantes entre estos años.

El consumo hídrico promedio per cápita (m^3/s) es el producto de la cantidad de habitantes promedio entre 2006 - 2016 y el promedio de la demanda de agua potable para la EPS Chavín que la Sunass (2014) proyectó entre 2013-2016. Con ambos insumos se calcula la demanda doméstica mensual (m^3/s) para cada año entre 2006-2016 (ver Cap. 6.2.7). En tanto, el área irrigada (25.86 ha) y la demanda agrícola mensual (m^3/s) se extraen directamente del informe de la ANA (2015).

6.4. Ajustes y Escenarios futuros: hacia el 2030-2050

Dentro de las posibilidades del modelo hidrológico, se encuentra la capacidad de calcular un balance hídrico actual y futuro, insertando como insumos que representen

METODOLOGÍA

las condiciones actuales y proyectadas. Así también, permite incorporar la regulación de la descarga sobre la laguna Parón.

6.4.1. Ajustes del modelo hidrológico actual y futuro: descarga del reservorio

El modelo hidrológico permite plantear escenarios en los que se ejerce control de descarga sobre la laguna Parón al posibilitar el cambio manual en los valores de descarga de la laguna Parón. Así, por ejemplo, se pueden modificar los regímenes de descarga históricos de la laguna Parón: por ejemplo, el caudal máximo legal establecido por la licencia otorgada a ELECTROPERU entre 1994-2006 (8 m³/s) o el caudal máximo establecido por recomendación técnica (4 m³/s), o el caudal establecido por la coalición local que tomó la laguna en 2008 (1 m³/s) (French, 2019). Inclusive, al realizar estas modificaciones en el modelo hidrológico, se permite considerar que existe un control sobre el régimen de descarga de la laguna como también considerar que no existe un control de este régimen.

Los valores de descarga de la subcuenca 02-LP para el periodo actual se ajustaron respecto a los regímenes de descarga que señala French (2019) para los años 2006-2016 (ver **Tabla 5.3**). Así se promediaron los meses cuyo caudal estaba bajo los siguientes regímenes de descarga: Licencia legal (1994-2006); Licencia legal (2006-2007;2011-2019); Suspensión por la AACHS (2007-2011); y Coalición local luego de toma de 2008. De esta forma, se utilizó un valor de 4.19 m³/s para el periodo actual (2006-2016) como caudal de salida de la 02-LP, lo cual se convierte automáticamente en el input para la 03-CA.

Hacia el futuro, se eligió un valor específico de los regímenes de descarga que señala French (2019) indicados en la **Tabla 5.3**, puesto que estos funcionan como referentes de caudales reales (y por tanto posibles de repetir) de descarga. Se decidió utilizar la descarga promedio anual máximo (1953-1983): 2.55 m³/s para ajustar el balance hídrico hacia 2030 y 2050. En primer lugar, esto se debe a que este valor está dentro del máximo técnico viable (4 m³/s). Los regímenes de descarga superiores a esta recomendación habían causado daños a la agricultura local, lo cual fue uno de los motivos principales que desencadenó el conflicto por el control de la descarga de la laguna Parón (French, 2016, 2019). Así, se descartó utilizar regímenes que habían sido perjudiciales para los agricultores y causantes de conflicto social. En segundo lugar, si bien el régimen

METODOLOGÍA

establecido por la coalición que tomó la laguna en 2008 (1 m³/s) no perjudicó a los agricultores, llegó a implicar una situación de alto riesgo por GLOF, debido al aumento del nivel de la laguna en los años posteriores (2009-2010) (French, 2019). Finalmente, el promedio anual máximo entre 1953-1983 (2.55 m³/s) corresponde a la descarga natural, previa a la construcción del túnel y se asemeja al valor establecido por la AACHS (ver **Tabla 5.3**).

Asimismo, gracias a que el modelamiento hidrológico se ejecutó considerando la división en tres subcuencas dentro de la SLP, se identificaron los valores específicos de ETc eff (mm/d) en cada subcuenca que requerían de ajustes. Estos fueron realizados según los valores acumulados de la oferta hídrica de la SLP. De este modo, se ajustaron específicamente los valores de ETc eff (mm/d) de determinados meses en ciertas subcuencas para que se asemejen a los valores acumulados de la SLP.

6.4.2. Construcción de escenarios: selección de cambios en la precipitación

Se construyen los escenarios para dos años específicos del futuro (2030 y 2050) junto con tres diferentes escenarios de variación de la precipitación (ver **Tabla 6.1**).

Tabla 6.1 Escenarios futuros según la variación de la precipitación

Escenarios	Sin Variación De Precipitación	Con Aumento De Precipitación	Con Disminución De Precipitación
2030	Sin cambio	+15%	-15%
2050	Sin cambio	+35%	-35%

Fuente: Elaboración propia

Temporalmente, se ha seleccionado específicamente a los años 2030 y 2050, porque disminuye las incertidumbres que implica el aspecto socio-económica (como la demanda de agua) al construir escenarios hacia un periodo más prolongado como 2080 o 2100. Además, los años 2030 y 2050 son usados comúnmente para proyectar escenarios futuros: por ejemplo, Condom et al. (2012) estima sus escenarios hacia 2030 (ver Cap. 5.3), y tanto Colonia et al. (2017), Guardamino et al. (2019) (ver Cap. 5.2.2), y Schauwecker et al. (2017) (ver Cap. 6.2.5) utilizan el año 2050 para sus proyecciones de lagunas o glaciares.

METODOLOGÍA

Las variaciones en la precipitación propuestas en la **Tabla 6.1** se deben a que se considera que habrá un aumento o una disminución de 10% de la precipitación por década o que no habrá una variación de la precipitación significativa. Se estableció que estas variaciones ocurran respecto a la precipitación del periodo actual (2006-2016). Entonces, con la finalidad de estimar un balance hídrico futuro correcto, la precipitación es el parámetro atmosférico que debe variar significativamente en el modelo hidrológico para la construcción de escenarios. Esto se debe a que, pese a la dificultad en identificar tendencias climáticas en los Andes tropicales (ver Cap. 5.1), se ha tomado en cuenta el estudio de Schauwecker et al. (2014), y los escenarios construidos por Condom et al. (2012) y Vergara et al. (2011) para la cuenca del Santa. Los primeros lograron identificar una tendencia a un aumento de la precipitación de 60 mm/década, en tanto, los segundos basaron su escenario húmedo-cálido hacia 2030 en un aumento de +15% de precipitación. Considerando ello, se estableció que la cantidad de precipitación mensual en uno de los escenarios aumente en 10%/década. No obstante, ante las incertidumbres sobre la posibilidad de que ocurra dicho escenario, se estableció considerar uno en el que la precipitación no varíe significativamente y otro en el que disminuya en la misma tasa que aumenta. Esto implica una variación de $\pm 15\%$ hacia 2030 y $\pm 35\%$ hacia 2050 para los escenarios en donde la precipitación varía significativamente (ver **Tabla 6.1**).

Para la construcción de escenarios futuros, las modificaciones dentro de los parámetros de cuenca se realizan en lo referente a lagunas y glaciares, pero no en la extensión de la cuenca. El área glaciar evidentemente disminuye, mientras que las lagunas aumentan en área y en volumen hacia los años 2030 y 2050 (estos valores se calcularon en el Cap. 6.2.5).

En cuanto a la demanda, se ha decidido no modificar la demanda agrícola, lo cual implica que las cantidades demandadas se mantienen hacia el 2030 y 2050. Este tema se discute ampliamente en el Cap. 8.3. En contraste, se puede estimar el cambio de la demanda poblacional en base a la tasa de crecimiento poblacional. En tanto, la demanda de agua potable per cápita no es modificada, debido a que su proyección no varía significativamente: se ha proyectado que fluctúa entre 179 y 168 (decreciendo y aumentando) (ver **Tabla 6.2**). Esto representaría cambios casi nulos en el consumo de agua doméstico y en el sistema de provisión de agua potable (evitando o aumentando

METODOLOGÍA

las posibles fugas). De esta manera, se puede obtener una demanda doméstica mensual que varíe, únicamente, de acuerdo al número de habitantes.

Tabla 6.2 Proyección demanda de agua potable a nivel EPS Chavín S.A.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Demanda de agua (l/día per cápita)	179	174	173	167	167	168

Fuente: Tomado de Sunass (2014)

Finalmente, se estableció a enero, febrero y marzo (EFM) como la temporada núcleo de lluvias (o húmeda). Si bien se suele considerar al mes de diciembre en lugar de marzo, se decidió realizar esta excepción, puesto que se trata de los meses de mayores precipitaciones (en marzo llueve más que en diciembre) (ver *Figura 5.1*), y marzo también sería el mes de mayor balance hídrico actual. En tanto, los meses de junio, julio, y agosto se establecieron como la temporada núcleo de sequía (seca o de estiaje).



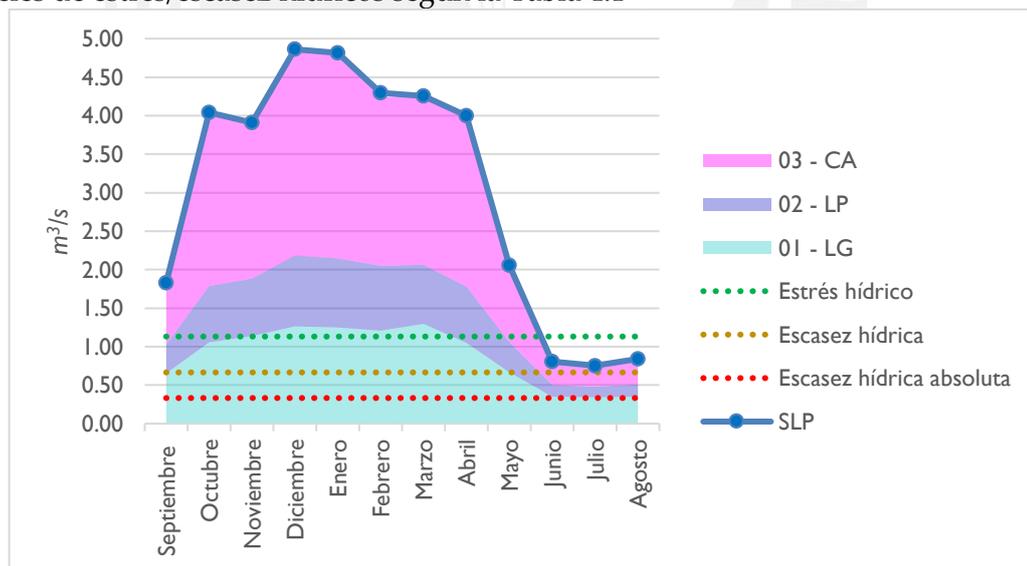
Capítulo 7 RESULTADOS

7.1. Oferta de agua actual y futuro

7.1.1. Oferta de caudal actual

En las subcuencas alta-glaciar (01-LG) y subcuenca media-laguna (02-LP), se estimó una oferta hídrica actual con poca variabilidad ($0.88 \pm 0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.57 \pm 0.29 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente), en la subcuenca baja-humana (03-CA), la variación anual de la oferta de agua sería mucho más notable ($1.57 \pm 0.91 \text{ m}^3/\text{s}$), con lo que alcanzaría la máxima oferta hídrica acumulada la SLP en diciembre ($4.86 \text{ m}^3/\text{s}$). Asimismo, la mayor oferta en todas las subcuencas se centraría entre octubre y abril con un máximo nivel en los meses de diciembre a marzo. La menor oferta ocurriría entre junio y agosto ($<1 \text{ m}^3/\text{s}$). Entre el final de la temporada húmeda (marzo), y el inicio de la temporada seca (junio) la oferta disminuiría abruptamente en $3.44 \text{ m}^3/\text{s}$ en tres meses. Inclusive, de abril a mayo la oferta se reduciría a la mitad (de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2.06 \text{ m}^3/\text{s}$) (ver **Figura 7.1**).

Figura 7.1 Oferta hídrica actual acumulativa (m^3/s) en las subcuencas de la SLP con los niveles de estrés/escasez hídricos según la **Tabla 4.1**



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico con los umbrales de estrés/escasez de las definiciones en **Tabla 4.1**

Además, durante todo el año, la oferta hídrica actual de la SLP superaría el umbral de disponibilidad hídrica bajo el cual se indicaría un estado de escasez hídrica ($0.67 \text{ m}^3/\text{s}$) según los niveles de seguridad hídrica (ver **Tabla 4.1**). No obstante, durante la estación seca (junio, julio, y agosto) la oferta hídrica actual ($\sim 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$) se encontraría claramente

RESULTADOS

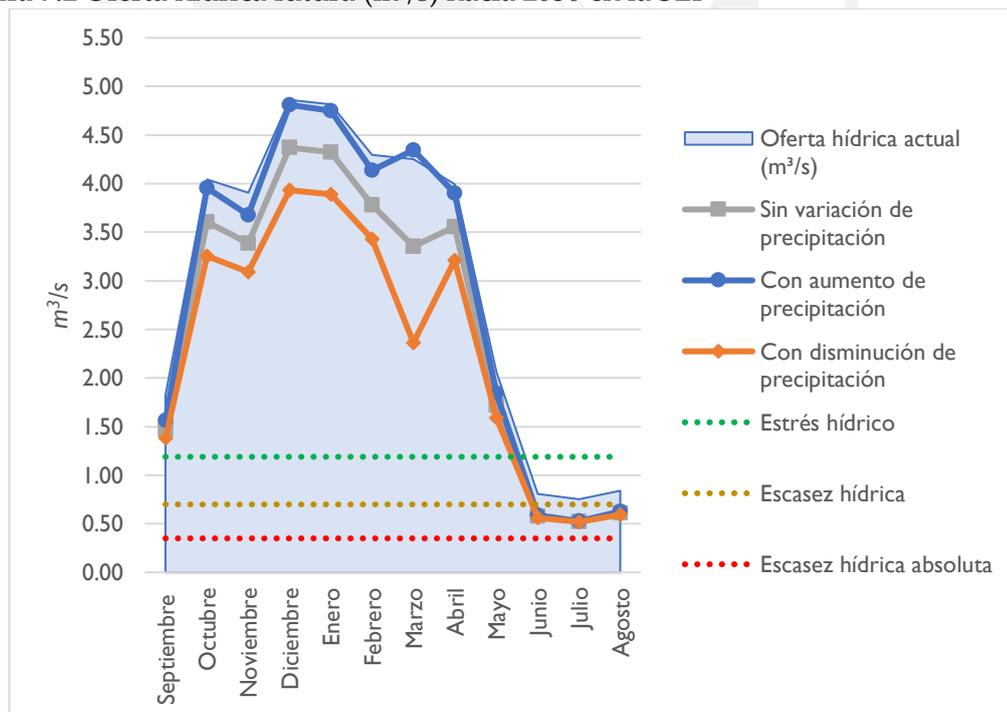
por debajo del umbral sobre el cual se indicaría un estado de estrés hídrico ($1.13 \text{ m}^3/\text{s}$). Cabe resaltar que estar por debajo o encima de tales umbrales permiten tener una referencia sobre la posible situación de la seguridad hídrica de la SLP: no indican necesariamente alguno de los estados, puesto que la oferta no considera el control de la descarga de la laguna Parón.

7.1.2. Oferta de caudal futura

Hacia 2030

La oferta hídrica futura hacia 2030 diferiría según el escenario de cambio en la precipitación. Respecto a la oferta hídrica estimada para el periodo actual, el escenario con aumento de precipitación sería el que menor cambio tendría, puesto que en promedio difiere en $-0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, cuando en el escenario sin variación y con disminución de precipitación la diferencia promedio es $-0.43 \text{ m}^3/\text{s}$ y $-0.72 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Con un aumento de precipitación, solo en la época seca (junio, julio, y agosto) la distinción sería más notable ($-0.22 \text{ m}^3/\text{s}$) con un nuevo caudal mínimo ($\sim 0.58 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figura 7.2 Oferta hídrica futura (m^3/s) hacia 2030 en la SLP



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico con los umbrales de estrés/escasez de las definiciones en **Tabla 4.1**

RESULTADOS

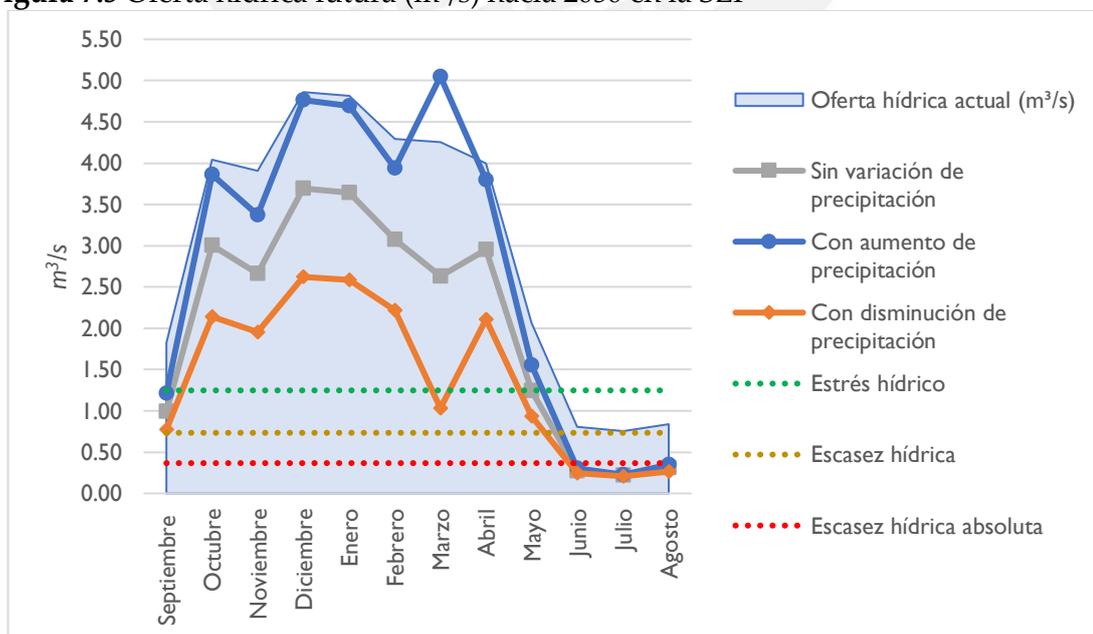
La variabilidad estacional de la oferta hídrica hacia 2030 disminuiría respecto a la estimada para el periodo actual en -8.2% para el escenario sin variación de la precipitación y en -19.4% para el escenario con disminución de la precipitación, pero para el escenario con aumento de precipitación aumentaría en +4.6% (ver **Tabla 8.2**).

En todos estos escenarios hacia el 2030, la oferta hídrica en la época seca, sería crítica, puesto que se reduciría a $\sim 0.57 \text{ m}^3/\text{s}$ en todos los escenarios, por debajo del umbral de escasez hídrica ($0.7 \text{ m}^3/\text{s}$), a diferencia de la oferta hídrica actual (ver **Figura 7.2**)

Hacia 2050

Los escenarios de la oferta hídrica proyectados para 2050 difieren mucho más respecto a la oferta hídrica estimada para el periodo actual: el escenario con aumento de precipitación diferiría en promedio en $-0.28 \text{ m}^3/\text{s}$, en tanto, el escenario sin variación y con disminución de la precipitación la diferencia sería mucho mayor ($-0.98 \text{ m}^3/\text{s}$ y $-1.61 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente). En un escenario con un aumento de la precipitación hacia 2050 la oferta incrementaría su variabilidad estacional en +14.9% respecto a la del periodo actual, lo cual se evidencia en el decrecimiento de $-4.75 \text{ m}^3/\text{s}$ entre marzo y junio. Esta sería la más abrupta, ya que ocurriría en tres meses, y mayor a cualquiera de los escenarios proyectados hacia 2030 y 2050.

Figura 7.3 Oferta hídrica futura (m^3/s) hacia 2050 en la SLP



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico con los umbrales de estrés/escasez de las definiciones en **Tabla 4.1**

RESULTADOS

En contraste, sin variación o con disminución de la precipitación, habría una reducción de la variabilidad estacional de la oferta (-17.8% y -42.8%, respectivamente) respecto a la estimación del periodo actual (ver **Tabla 8.2**). Ello se explica en mayor medida con el notable descenso de la oferta futura (de tales escenarios) entre octubre-abril respecto a la oferta hídrica actual: -1.22 m³/s en el escenario sin variación de la precipitación y -2.22 m³/s en el escenario con disminución de la precipitación.

En todos estos escenarios hacia 2050, la oferta hídrica en la época de estiaje (junio, julio, y agosto) sería mucho más crítica que las estimaciones hacia 2030, debido a que disminuiría a ~0.27 m³/s en todos los escenarios, estando por debajo del umbral que indica una escasez hídrica absoluta (0.37 m³/s) (ver **Figura 7.3**).

7.1.3. Contribución glaciar actual

La contribución glaciar mide qué porcentaje del total de la oferta corresponde al caudal glaciar absoluto (m³/s). La contribución actual anual sería de 57% para toda la SLP. Naturalmente, la contribución durante junio, julio, y agosto sería mayor ante la ausencia de lluvias (91%), mientras que sería contrastablemente menor durante enero, febrero, y marzo (37%) por la contribución de las lluvias. En promedio, se estima que el porcentaje que representaría la contribución glaciar anual se reduciría progresivamente en todos los escenarios: hacia 2030 sería entre 4 a 10 puntos porcentuales, y hacia 2050 sería entre 14 a 26 puntos porcentuales.

El porcentaje que representa la contribución glaciar disminuiría en menor medida en un escenario con disminución de la precipitación (4 puntos porcentuales hacia 2030 y 14 hacia 2050). En cambio, en el escenario en donde la precipitación aumenta, se generaría una disminución mucho más significativa en el porcentaje (10 puntos porcentuales hacia 2030 y 26 hacia 2050) (ver **Tabla 7.1**).

De la misma forma que disminuye el porcentaje de la contribución glaciar anual promedio, también en enero, febrero, y marzo como en junio, julio, y agosto, disminuiría. Esta reducción sería más significativa durante enero, febrero, y marzo (de -15 a -25 puntos porcentuales), que, durante junio, julio, y agosto (de -8 a -19 puntos porcentuales) hacia 2050. La contribución glaciar podría ser mermada fuertemente ante un escenario con aumento de precipitación hacia 2050 sobre todo en la época húmeda (enero, febrero,

RESULTADOS

y marzo). Pese a ello la contribución glaciar de la época húmeda (verano austral) seguiría siendo mayor el caudal glaciar absoluto (m^3/s) durante junio, julio, y agosto como sucede con los glaciares del trópico exterior durante el invierno austral (ver Cap. 4.1).

Tabla 7.1 Porcentaje de contribución glaciar actual y futuro en la SLP

Escenarios		Sin variación de precipitación			Con aumento de precipitación			Con disminución de precipitación		
Subcuenca		SLP			SLP			SLP		
Periodo del año		JJA	EFM	anual	JJA	EFM	anual	JJA	EFM	anual
Contribución Glaciar	2006-2016	91%	37%	57%	91%	37%	57%	91%	37%	57%
	2030	88%	29%	50%	86%	26%	47%	89%	33%	53%
	2050	77%	16%	36%	72%	12%	31%	83%	22%	43%

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Esto se explicaría a partir de que los ingresos de agua en el sistema de la subcuenca provienen principalmente de la precipitación y el derretimiento glaciar (ver Cap. 4.2): si uno de ellos disminuye la contribución del otro sería más cuantiosa. También, se podría deber al mismo descenso de caudal glaciar absoluto (m^3/s). En este caso, se estima que la contribución glaciar seguiría siendo significativa aportando más del 30% anual a la oferta hídrica en cualquiera de los escenarios previstos.

7.2. Demanda de agua

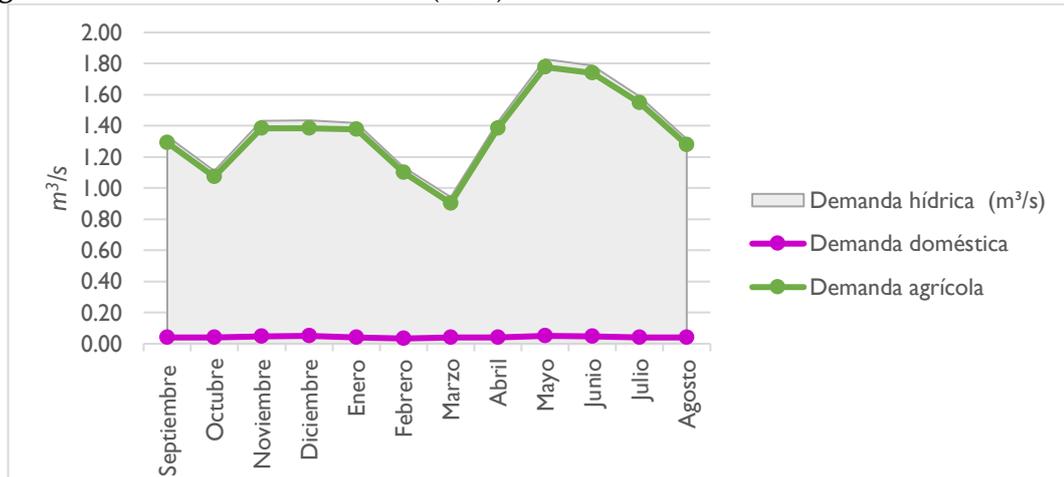
7.2.1. Demanda hídrica actual

Composición de la demanda hídrica

La demanda hídrica se compone principalmente de la demanda agrícola (~97%), y, en menor medida, de la doméstica (~3%). Por lo tanto, la demanda hídrica promedio (~1.4 m^3/s) se basa principalmente en la demanda agrícola (~1.35 m^3/s). Según ANA (2015), la demanda agrícola en la SLP durante el año se muestra en la **Figura 7.2**. Los meses de mayor demanda agrícola son mayo, junio, julio (1.78, 1.74 y 1.55 m^3/s respectivamente), mientras que los meses de octubre, febrero y marzo (1.07, 1.1, 0.9 m^3/s respectivamente) son los de menor demanda. En tanto, la demanda doméstica actual es muy reducida (<0.06 m^3/s) y constante a lo largo del año ($0.04 \pm 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$).

RESULTADOS

Figura 7.4 Demanda hídrica actual (m^3/s) en la SLP

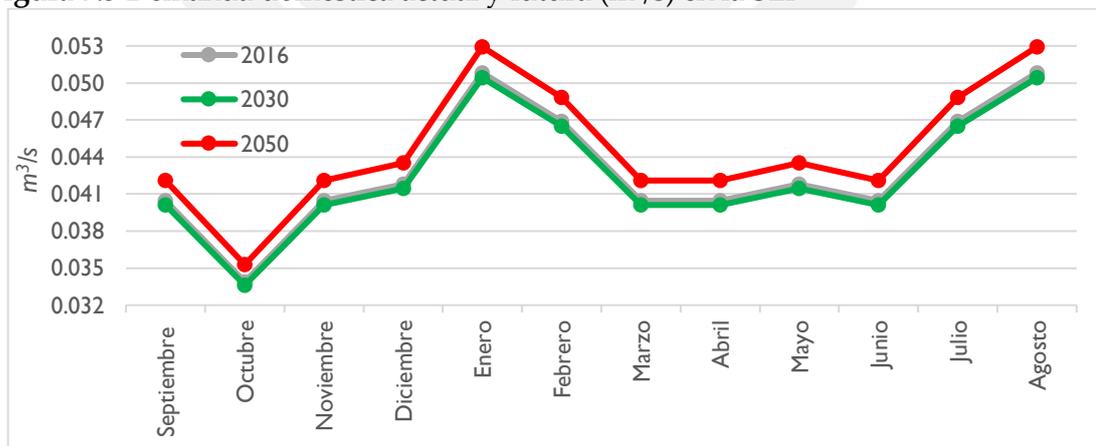


Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

7.2.2. Demanda hídrica futura

Para la demanda hídrica futura se consideró una misma demanda agrícola para los escenarios 2030 y 2050 (esto se explica en el Cap. 8.2.2). Por lo tanto, la ligera variación de la demanda hídrica hacia el futuro se basa en los cambios proyectados para la demanda doméstica. La demanda doméstica tendría cambios insignificantes, puesto que no aumenta/disminuye más de $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver **Figura 7.5**). Por ende, se puede afirmar que la demanda hídrica futura es similar a la actual ($\sim 1.4 \pm 0.003 \text{ m}^3/\text{s}$).

Figura 7.5 Demanda doméstica actual y futura (m^3/s) en la SLP



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

7.3. Balance hidrológico

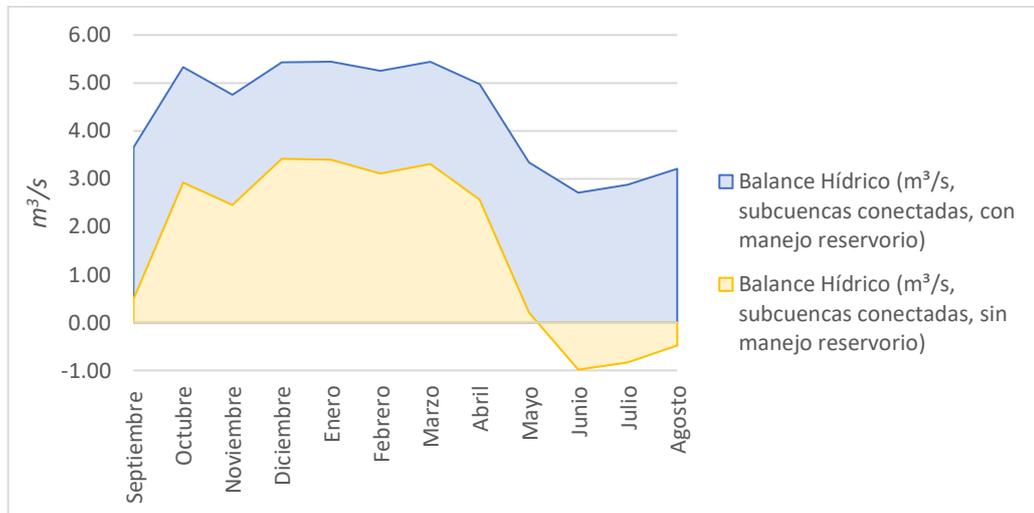
7.3.1. Balance hidrológico actual sin/con regulación

El balance hídrico actual de la SLP con el manejo de la descarga de la laguna Parón ($4.37 \pm 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$) sería claramente superior al estimado sin un manejo de esta descarga en

RESULTADOS

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 adquiriría valores negativos en junio, julio, y agosto, que serían casi $-1 \text{ m}^3/\text{s}$. En este sentido, el control de la laguna Parón permitiría mantener el balance hídrico por encima de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante junio, julio, y agosto (ver **Figura 7.6**).

Figura 7.6 Comparación del balance hídrico actual con/sin manejo de reservorio (m^3/s) en la SLP



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Sin el control de la descarga de la laguna Parón, hacia 2030 se estimaría que el déficit llegue a ser entre $-0.92 \text{ m}^3/\text{s}$ y $-1.01 \text{ m}^3/\text{s}$ en junio, julio, y agosto (con el control se mantendría sobre $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que hacia 2050 podría estar entre -1.21 y $-1.26 \text{ m}^3/\text{s}$ en junio, julio, y agosto (con control se mantendría sobre $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$).

7.3.2. Balance hidrológico de la SLP: Actualidad y escenarios futuro

El principal resultado de este estudio es la estimación del balance hídrico mensual para el escenario actual y los escenarios futuros (ver **Figura 7.7**) contruidos a partir de la variación (o no) de la precipitación (ver Cap. 6.4.2). Los resultados en una primera instancia mostrarían 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 (ver Cap. 6.4.1) habría mermado el balance hídrico en todos los escenarios futuros posibles.

El balance hídrico estimado para el escenario en el que la precipitación no varíe/disminuya mostraría una evidente tendencia hacia 2030 y 2050: habría una reducción constante del balance hídrico en todos los meses del año (ver **Figura 7.7**). En el escenario sin variación de la precipitación, el balance hídrico disminuiría en -41%

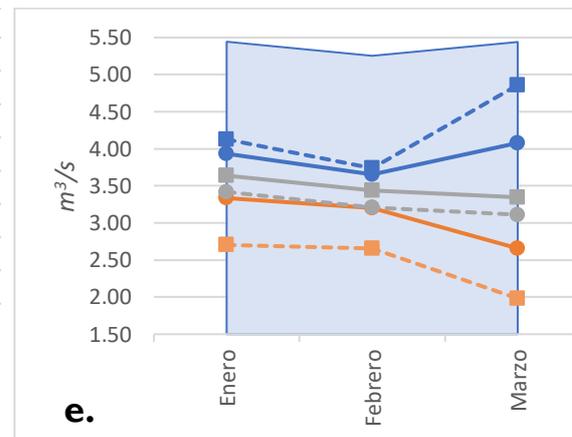
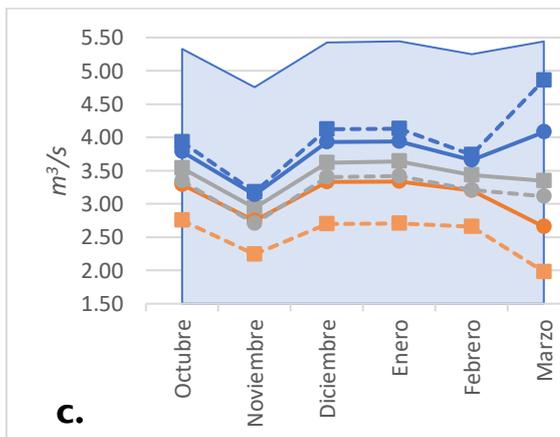
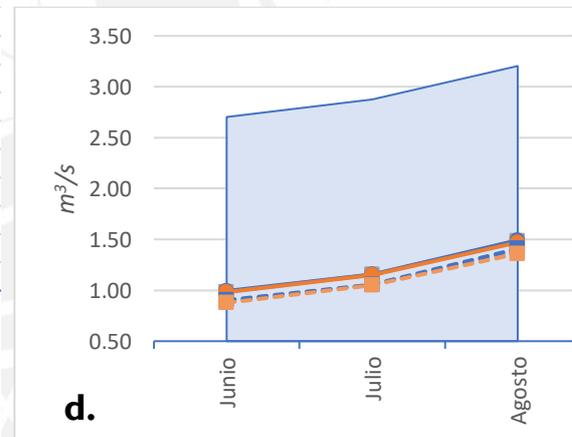
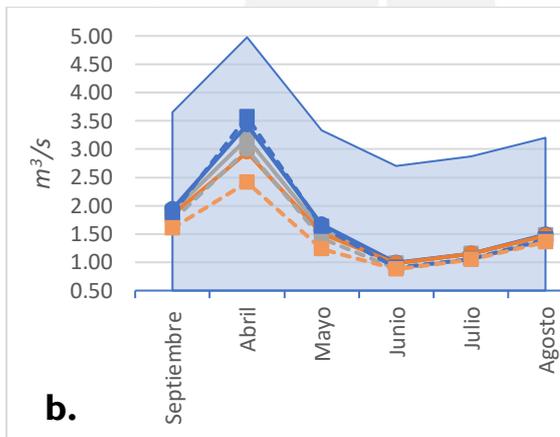
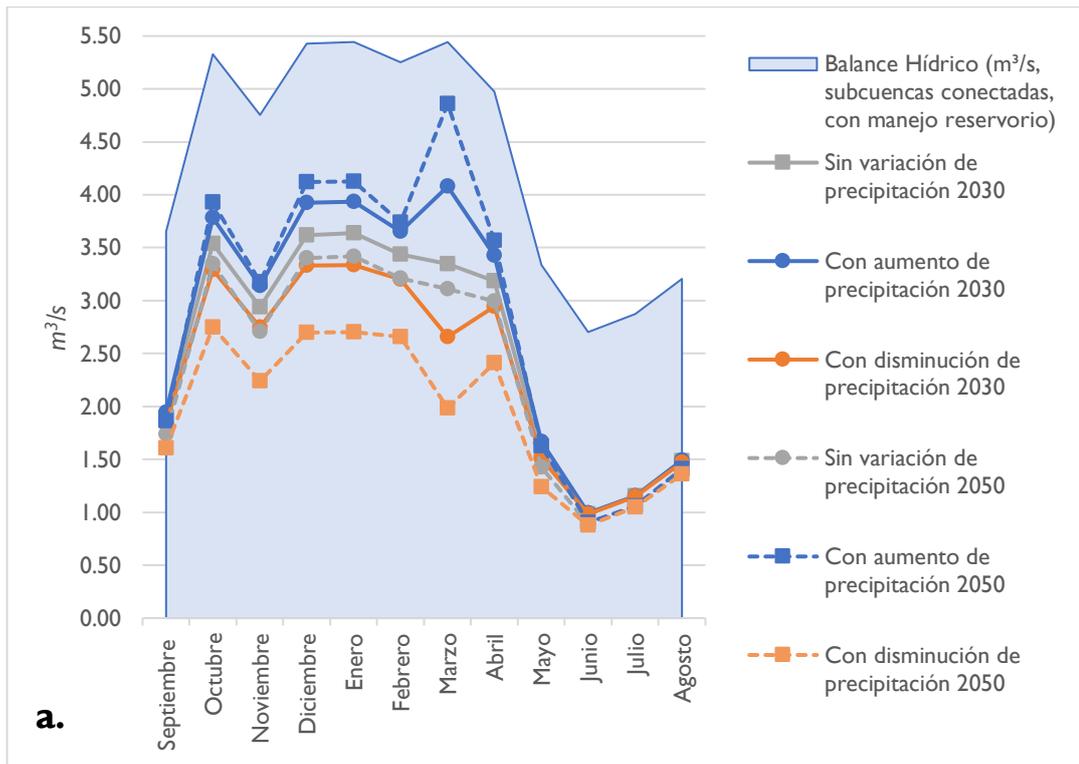
RESULTADOS

hacia 2030, y -45% hacia 2050, respecto al balance hídrico actual; en tanto, con disminución de la precipitación, sería en -46% hacia 2030, y -55% hacia 2050 respecto al balance hídrico actual (ver **Figura 7.11**). Debido a que este descenso sería mucho más notable en enero, febrero, y marzo (decreciendo hasta en más de 2.1 m³/s), que en junio, julio, y agosto donde no descendería más de 1.9 m³/s entre el estimado actual y el de 2050 (ver **Figura 7.8** y **Figura 7.10**), la variabilidad estacional sería cada vez menor en ambos escenarios. En el escenario sin variación de la precipitación, esta variabilidad decrecería -5.7% hacia 2030 y -10.9% hacia 2050; en tanto, en el escenario con disminución de la precipitación, disminuiría en mayor medida, -18% hacia 2030 y -36.7% hacia 2050 respecto a la variabilidad estacional del balance hídrico actual ($\sigma = \pm 1.07 \text{ m}^3/\text{s}$) (ver **Tabla 8.2**).

En cambio, para el escenario en el que la precipitación aumenta, el balance hídrico sería más variable con el pasar de los años, puesto que disminuiría en promedio -36% hacia 2030, y -34% hacia 2050, respecto al balance hídrico actual. Esto significa que habría una reducción del balance hídrico actual hacia 2030 (-1.6 m³/s), pero, luego de 2030 a 2050 se estimaría un aumento ligero del balance hídrico (+0.1 m³/s) ante un escenario con aumento de precipitación (ver **Figura 7.11**). Conjuntamente, ocurriría aumentos y descensos en el balance hídrico durante diferentes meses del año (ver **Figura 7.7**). Así, hacia 2030 el balance hídrico se reduciría (como en todos los escenarios) respecto al actual; no obstante, hacia 2050 este se incrementaría solo entre octubre y abril (+0.23 m³/s), mientras que, en los cinco meses restantes (incluyendo la estación seca), decrecería ligeramente ($< 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$). La mayor diferencia sería la ocurrida en marzo: +0.78 m³/s entre 2030-2050 (ver **Figura 7.8**). Gracias a ello, la variabilidad estacional del balance hídrico en el escenario con aumento de precipitación sí seguiría un patrón concreto (contrario al de los otros dos escenarios): un ascenso de +8.2% hacia 2030 y +23.5% hacia 2050, respecto al balance hídrico actual ($\sigma = \pm 1.07 \text{ m}^3/\text{s}$) (ver **Tabla 8.2**).

RESULTADOS

Figura 7.7 Balance Hídrico actual y futuro (m^3/s) de la SLP para cada escenario

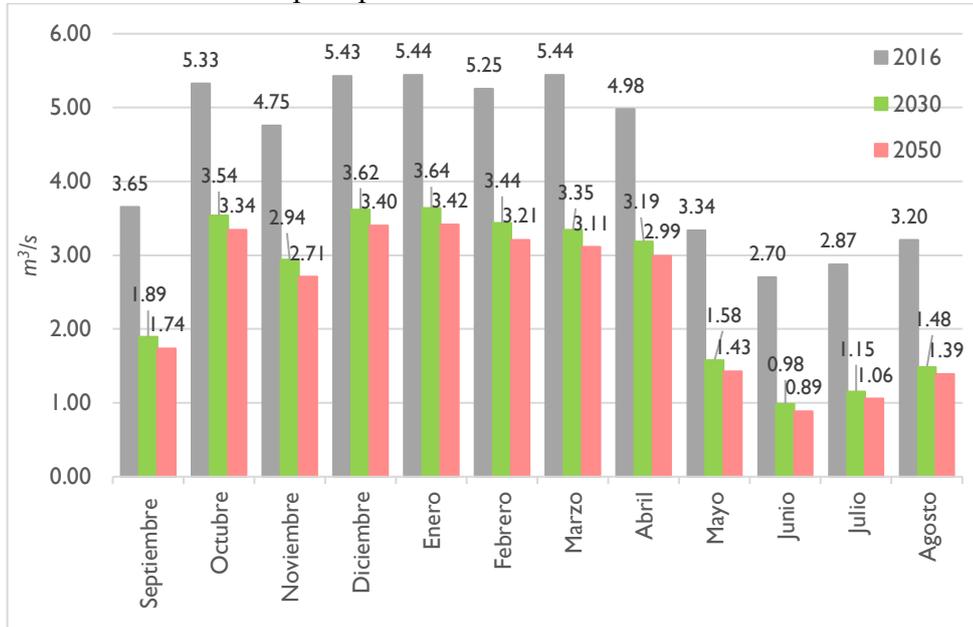


Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico. **a.** Balance Hídrico mensual actual y futuro de la SLP para cada escenario propuesto; **b.**

RESULTADOS

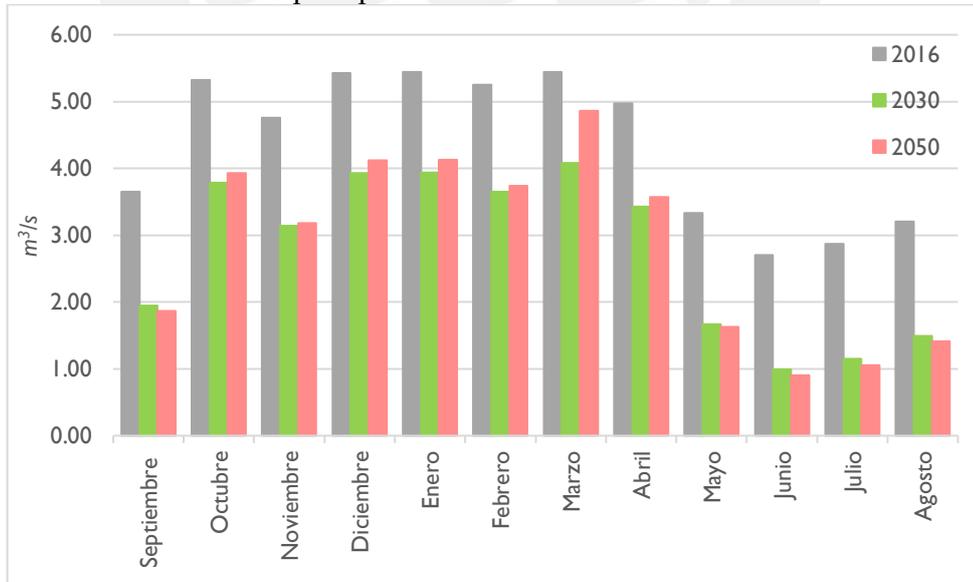
Recorte de "a." para los meses de septiembre, abril, mayo, junio, julio y agosto; c. Recorte de "a." para los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; **d.** Recorte de "b." para la época seca (junio, julio, y agosto); **e.** Recorte de "c." para la época húmeda (enero, febrero, y marzo)

Figura 7.8 Balance Hídrico mensual (m^3/s , con manejo de reservorio) en la SLP – Escenario: Sin variación de precipitación



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

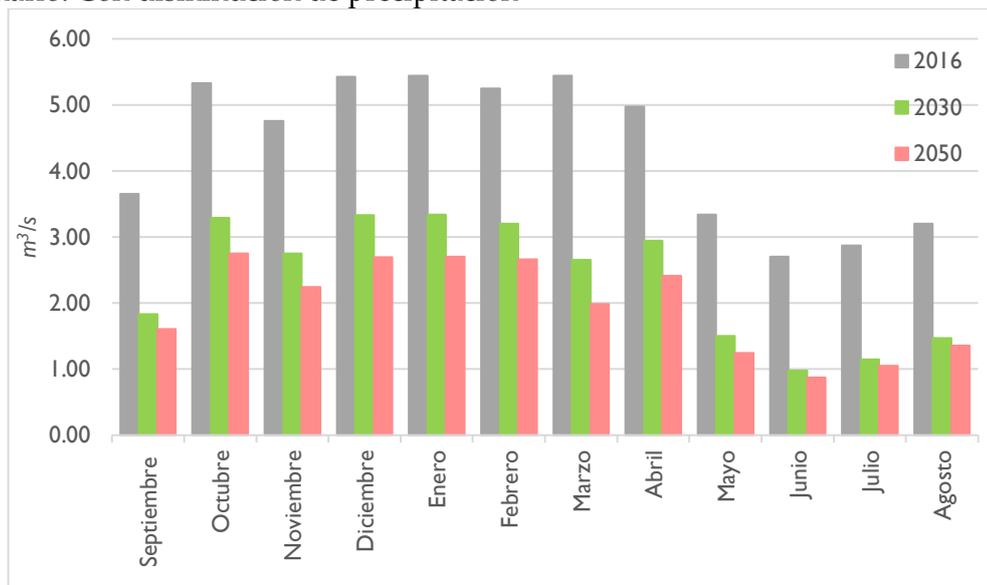
Figura 7.9 Balance Hídrico mensual (m^3/s , con manejo de reservorio) en la SLP – Escenario: Con aumento de precipitación



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

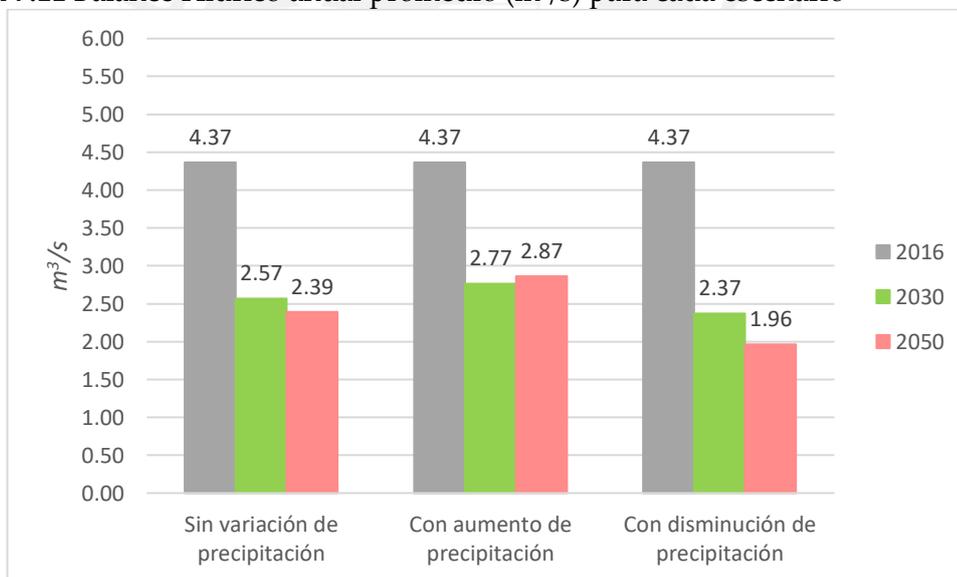
RESULTADOS

Figura 7.10 Balance Hídrico mensual (m^3/s , con manejo de reservorio) en la SLP – Escenario: Con disminución de precipitación



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Figura 7.11 Balance Hídrico anual promedio (m^3/s) para cada escenario



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Capítulo 8 DISCUSIÓN

8.1. Limitaciones del modelo hidrológico y el conjunto de datos como sus insumos

8.1.1. Faltas e inconsistencia en el conjunto de datos

Uno de los principales criterios para elegir qué modelo hidrológico se utilizaría fue la disponibilidad y características de los datos. Inicialmente, se pensaba contar con los registros de las estaciones *in situ* localizadas en la SLP (ver **Figura 6.1**) para obtener los insumos básicos para el modelo hidrológico como la precipitación, temperatura, la ET, e inclusive el caudal, pero estos estaban incompletos o no existían (en el caso del caudal para la SLP y de la ET). En ese contexto, se ha identificado la carencia de información con las siguientes características: registros completos de observaciones para un periodo de tiempo considerable (25-30 años) (por ejemplo, precipitación, temperatura, ET); datos consistentes con la menor cantidad de valores atípicos producto de posibles errores en el registro (por ejemplo, los registros de ET); registro de observaciones en puntos clave estratégicamente distribuidos, de tal modo que espacialmente representativos de las diferentes características de la SLP (por ejemplo, registro del caudal del río Lullán-Parón que contribuye al río Santa). En el peor de los casos, se identificó la falta de estas tres características juntas, lo que limitó la elección del modelo hidrológico.

Por esta razón, se tuvo que recurrir a diversas fuentes como los datos PISCO, coberturas de suelo basadas en imágenes satelitales para estimar insumos fundamentales para el modelo hidrológico como la ET y el Kc. En el caso de estas variables, lo ideal sería haberlas obtenido a partir de registros de estaciones *in situ* y mediciones en parcelas experimentales, localizados dentro del área de estudio. Por lo tanto, la estimación hallada con el modelo hidrológico se ha basado principalmente en valores empíricos, y no ha sido calculada directamente con el registro de datos observados (datos *in situ*). Por ello, se puede afirmar que los resultados del modelo hidrológico correspondientes a esta investigación tienen una incertidumbre elevada, la cual se sugiere que sea comparada con otras investigaciones en la región de la cuenca alta del río Santa.

A esto se le suma, el hecho de que la ausencia de datos *in situ* también ha repercutido en la calibración del modelo hidrológico. No existe una estación hidrométrica para cada *outflow*, solo para la 02-LP en donde se ubica la “Estación Convencional – Hidrométrica

DISCUSIÓN

Parón” (ver **Figura 6.2** y **Figura 6.4**). Por esta razón, la calibración de las estimaciones halladas sobre un nivel de referencia real no se llevó a cabo, con excepción de la calibración realizada sobre la descarga de la laguna Parón entre 2006-2016, en el *outflow* P3.de la 03-LG (ver Cap. 6.4). La falta de una calibración en cada uno de los *outflows* compromete la certeza de los resultados del modelamiento hidrológico.

Para minimizar las incertidumbres, se seleccionó el periodo 2006-2016 como el periodo de tiempo base actual, durante el cual no solo existen más datos, sino que son más precisos y confiables, tales como los datos PISCO, los inventarios de glaciares y lagunas de INAIGEM y ANA, entre otros. Conjuntamente, en el siguiente subcapítulo, se explica la manera en la que se buscó reducir estas incertidumbres a través de desagregar el modelo hidrológico, y de establecer escenarios dentro de la primera mitad del siglo (y no escenarios futuros tan lejanos como hacia 2080 o 2100).

8.1.2. Desagregación del modelo hidrológico

El modelamiento hidrológico escogido considera al sistema que se desea evaluar (una cuenca o subcuenca) como una unidad que tiene similares características físicas. En este sentido, tiene una similitud con los modelos hidrológicos físicos agregados, ya que asume unas condiciones promedio para todo el sistema omitiendo la variabilidad espacial de este (ver Cap. 4.2 y **Figura 4.1**). Ante esta evidente limitación, se decidió dividir la SLP en las tres subcuencas (ver **Figura 6.4**). Con ello, el modelamiento hidrológico se asemeja a uno semi-distribuido cuyas áreas de drenaje se dividan justamente en subcuencas.

De este modo, se puede observar y analizar las conexiones de lo que ocurre a nivel hidrológico entre las subcuencas, evitando una generalización para toda la SLP. Gracias a este proceso de aplicar de manera desagregada un modelamiento hidrológico similar al agregado, se obtuvieron resultados no solo más precisos, sino que también son más detallados espacialmente, puesto que se asume una variabilidad espacial del territorio y que por ello cada subdivisión del sistema tiene características específicas, evitando la generalización de toda el área de estudio.

DISCUSIÓN

8.2. Construcción de escenarios: glacio-hidroclimáticos y socio-económicos

Los escenarios se construyeron principalmente a partir de cambios en las variables del medio físico-natural (en este caso son glacio-hidroclimáticos) que se caracterizan por definir la oferta hídrica, mientras que las variables socio-económicas se distinguen por definir la demanda hídrica. Por supuesto, se debe aclarar que estas variables inevitablemente están en relación, siempre unas repercutirán sobre las otras y viceversa. Por ello, realmente, las variables físicas influyen en la demanda y las humanas, en la oferta, aunque sea en menor medida. Por ello, debe tomarse con mucha precaución la vinculación entre variables y la idoneidad en la construcción de escenarios futuros junto con sus respectivos resultados. En ese sentido, el enfoque sociohidrológico nos indica que lo ideal sería construir escenarios con variaciones en la demanda hídrica, ya que de esa forma se incluiría la acción humana en el sistema hídrico-humano.

8.2.1. Variación en la oferta hídrica: variables glacio-hidroclimáticos

La construcción de escenarios busca considerar una amplitud de posibles futuros. Desde un inicio, se decidió que los escenarios se basen en una situación en la que el retroceso glaciar sea máximo, por lo que se tomó la proyección de extensión glaciar para el RCP 8.5 de (Schauwecker et al., 2017). Schauwecker et al. (2017), a pesar de que las diferencias más intensas entre los RCP aparecen a partir de 2050. Es el retroceso glaciar y sus posibles repercusiones en la seguridad hídrica de la SLP lo que impulsó el estudio; por lo tanto, realizar el modelamiento hidrológico basándose en una situación futura más optimista (RCP 2.6), en la que los glaciares mantengan una velocidad de retroceso mínima, sería omitir lo que implicaría una situación futura más pesimista (RCP 8.5) pero no imposible de ocurrir. Si los glaciares se mantienen o pierden masa a menor velocidad, significa que podrían almacenar más agua en forma sólida que los escenarios que se han utilizado en esta investigación.

En ese mismo sentido, se entiende la construcción de escenarios basados en cambios fuertes en la precipitación en los dos posibles sentidos (una reducción y un aumento), ante la incertidumbre que expresan los estudios revisados (ver Cap. 5.1). Así, se construyeron estos escenarios a partir de algunos estudios sobre la región como Colonia et al. (2017), Condom et al. (2012), Guardamino et al. (2019), y Schauwecker et al. (2017)

DISCUSIÓN

(ver Cap. 6.4.2). La necesidad de definirlos de alguna forma yace en que, hubiese sido omitir cambios en el ciclo hidrológico realmente significativos (la precipitación), y porque el modelamiento hidrológico tiene en cuenta la precipitación como un insumo fundamental. En ese sentido, se benefició de las variables del medio físico-natural (lo vinculado a los glaciares y lagunas) que contaban con proyecciones calculadas. En cambio, la precipitación es el único insumo fundamental, cuyo impacto repercute en gran medida en los glaciares (sobre todo los del trópico exterior) (ver Cap. 4.1), que no tenía una tendencia hacia el futuro definida. Es más, por este motivo, establecieron los escenarios sin variación, con aumento y con disminución de la precipitación, basándose en las estimaciones de Condom et al. (2012), Schauwecker et al. (2014) y Vergara et al. (2011) (ver Cap. 6.4.2), con la finalidad de conseguir una visión amplia y de primer orden de los posibles cambios a futuro.

8.2.2. Variación de la demanda hídrica: variables socio-económicas

Las variaciones estimadas de la cantidad de población son poco significativas en los resultados finales, puesto que la demanda doméstica representa menos del 4.5% de la demanda total. En tanto, se decidió que la demanda agrícola no tenga alguna variación. Esta decisión es una cuestión discutible, puesto que se tienen argumentos para agregar escenarios que impliquen cambios en la demanda agrícola.

En primer lugar, no existe una tendencia notable, significativa y cuantificada hacia el futuro sobre la variación de la demanda agrícola, a diferencia de la mayoría de las variables de la cuenca y atmosféricas (a excepción de la ET y el Kc), que permita establecer posibles escenarios en los que la demanda agrícola se incremente o disminuya. Los valores dados por los últimos censos agrarios, los cuales podrían brindar una tendencia sobre la variación de la superficie agrícola en las últimas décadas, resultan ser inconsistentes. Los censos agrarios muestran que entre 1994-2012 la superficie agrícola del distrito de Caraz se redujo significativamente de 60.58 km² a 26.78 km² (- 55.79%) (INEI, 1996, 2012); no obstante, se puede demostrar fácilmente que esta abrupta disminución no se corresponde con lo que se puede visualizar a través de imágenes satelitales de Google Earth, donde el área agrícola actual del distrito es mucho mayor a 26.78 km². En segundo lugar, establecer tendencias de la demanda agrícola es complejo,

DISCUSIÓN

puesto que esta depende de múltiples factores sobre los cuales se carece de datos para establecer algún escenario, como el cambio en el área de irrigación, en el sistema de irrigación, en los cultivos sembrados y cosechados. A su vez, la alteración en estos factores depende de cambios socio-económicos y demográficos complejos. Esto abre una serie de posibilidades que combina la migración hacia la ciudad de Caraz u otras del callejón de Huaylas, la expansión de la frontera agrícola que puede avanzar hacia zonas más altas y detenerse en el límite del ANP Parque Nacional Huascarán, el cambio de cultivos según los requerimientos del mercado local, e incluso global, y las decisiones tomadas por los miembros de la comunidad campesina Cruz de Mayo ante alguna de estas posibilidades.

Por este motivo, se ha optado por considerar que la demanda agrícola no varíe significativamente en los escenarios proyectados hacia el 2030 y el 2050. Además de lo explicado, se entiende que si bien se pudo determinar una migración campo-ciudad en los últimos años, la actividad agrícola sigue siendo la predominante entre la PEA (ver Cap. 3.3). Asimismo, la comunidad Cruz de Mayo, reconocida desde 1976, tiene una estructura organizacional compleja vinculada a tratar los temas agrícolas como el Comité de Usuarios de Agua, los Comités de Riego y las JASS (ver Cap. 3.3), lo cual evidencia un control y prioridad sobre sus tierras agrícolas. Es así que la comunidad no posee la capacidad económica de inversión para impulsar cambios rápidos en la agricultura como lo tienen las empresas del sector agricultura: en el sistema de riego, la planificación de las campañas de acuerdo a un mercado más grande como el regional o internacional.

8.3. Contribución glaciar y variabilidad estacional

Considerando que la SLP está cubierta por glaciares en ~16%, la hidrología de la subcuenca está influenciada en gran medida por el aporte hídrico de la fusión de los glaciares lo cual afecta la oferta hídrica cuenca abajo (ver Cap. 4.2). Esto se reafirma a partir del elevado porcentaje de contribución glaciar en la SLP, tanto en la actualidad como en los escenarios futuros, puesto que no alcanzaría a aportar menos del 30% hacia 2050 (ver **Tabla 7.1**). Estos porcentajes pueden considerarse altos, puesto que el porcentaje de la contribución glaciar anual de la SLP (57%) sería notablemente superior a lo estimado por Condom et al. (2012) (38%) y Motschmann et al. (2020) (15%) para la

DISCUSIÓN

cuenca alta del río Santa, e incluso a lo simulado por Buytaert et al. (2017) para la zona media y alta de la SLP (32%) (ver **Tabla 8.1**). Inclusive, este elevado porcentaje del aporte glaciar en la SLP sería más notorio en los meses de estiaje (junio, julio, y agosto): actualmente estaría sobre 90%. Evidentemente, supera los porcentajes estimados para un territorio más amplio como la cuenca alta del río Santa, y también podrían sobreestimar los valores de Buytaert et al. (2017) sobre la subcuenca media-alta de la SLP. También los valores tan diferentes dan una muestra de la complejidad del sistema hidrológico en la región y las incertidumbres para encontrar la estimación más precisa y exacta. Lo que se puede afirmar con certeza es que se entiende por qué la contribución glaciar ha sido crucial para mantener una escorrentía perenne durante el año en esta subcuenca, pese a la disminución de la precipitación en los meses de sequía.

Tabla 8.1 Comparación de la contribución glaciar actual en diferentes estudios en la cuenca del río Santa

Contribución n Glaciar	Cuenca	Autores	JJA	EFM	anual
	SLP	Resultados propios	91%	37%	57%
	Cuenca laguna Parón	Buytaert et al 2017	76%**		32%
	Alto Río Santa (La Balsa)	Condom et al. (2012)	67%	30%*	38%
	Alto Río Santa (La Balsa)	Motschmann et al. (2020)	23%	13%*	15%

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico y los autores mencionados. * En meses de diciembre, enero y febrero ** En meses de sequía (no necesariamente junio, julio, y agosto)

A pesar de su alta contribución (>30%), el aporte de los glaciares de la SLP no solo sería cada vez menor en el porcentaje que representan de la oferta hídrica, sino también en el caudal glaciar absoluto (m³/s), el cual disminuiría en todos los escenarios proyectados. En este sentido, se esperaría que una reducción del aporte glaciar podría significar un aumento de la variabilidad estacional de la oferta hídrica, puesto que la contribución glaciar perenne a la escorrentía superficial mengua la variación estacional entre la temporada húmeda y seca (ver Cap. 4.2). No obstante, los resultados muestran que en el escenario sin variación y con disminución de la precipitación (en todas las subcuencas), la variabilidad estacional de la oferta y balance hídrico se reduciría cada vez más, mientras que en el escenario con aumento de precipitación la variabilidad estacional de la oferta y balance hídrico aumentaría (ver **Tabla 8.2**).

DISCUSIÓN

Tabla 8.2 Variabilidad de la oferta hídrica mensual entre las subcuencas para cada escenario

Subcuenca	Escenarios	2016	2030	2050	2016-2030 (Δ%)	2030-2050 (Δ%)
01-LG	Sin variación de precipitación	0.37	0.32	0.25	-14.1	-33.0
	Con aumento de precipitación		0.34	0.33	-6.4	-10.3
	Con disminución de precipitación		0.29	0.17	-21.7	-53.6
02-LP	Sin variación de precipitación	0.29	0.27	0.24	-7.6	-16.8
	Con aumento de precipitación		0.30	0.33	3.3	11.0
	Con disminución de precipitación		0.24	0.18	-17.6	-37.6
03-CA	Sin variación de precipitación	0.91	0.87	0.82	-5.1	-10.3
	Con aumento de precipitación		1.01	1.18	10.1	28.5
	Con disminución de precipitación		0.75	0.57	-17.6	-37.9
SLP	Sin variación de precipitación	1.57	1.44	1.29	-8.2	-17.8
	Con aumento de precipitación		1.64	1.81	4.6	14.9
	Con disminución de precipitación		1.27	0.90	-19.4	-42.8

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Tabla 8.3 Variabilidad del balance hídrico mensual entre las subcuencas para cada escenario

Subcuenca	Escenarios	2016	2030	2050	2016-2030 (Δ%)	2030-2050 (Δ%)
01-LG	Sin variación de precipitación	0.37	0.32	0.25	-14.1	-33.0
	Con aumento de precipitación		0.34	0.33	-6.4	-10.3
	Con disminución de precipitación		0.29	0.17	-21.7	-53.6
03-CA	Sin variación de precipitación	1.06	1.01	0.96	-5.2	-9.8
	Con aumento de precipitación		1.16	1.34	8.9	25.6
	Con disminución de precipitación		0.88	0.68	-17.6	-36.3
SLP	Sin variación de precipitación	1.07	1.01	0.95	-5.7	-10.9
	Con aumento de precipitación		1.15	1.32	8.2	23.5
	Con disminución de precipitación		0.87	0.68	-18.0	-36.7

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico

Una razón para que ello ocurra sería que si bien el porcentaje de la contribución glaciar disminuiría cada vez más en los escenarios sin variación y con disminución de la precipitación (hasta un 36% anual hacia 2050), esta reducción sería inclusive más fuerte en el escenario con aumento de precipitación (hasta un 31% anual hacia 2050) (ver **Tabla 7.1**). Por lo tanto, se cumpliría que una menor contribución porcentual glaciar

DISCUSIÓN

significaría un aumento de la variabilidad estacional de la oferta y balance hídrico a pesar de que numéricamente caudal glaciar absoluto (m^3/s) sería el mismo en todos los escenarios: las precipitaciones tendrían mayor importancia y la variabilidad estacional de la precipitación afectaría (aumentándola) en mayor medida la variabilidad estacional de la oferta y balance hídrico. A diferencia del escenario con aumento de precipitación donde el sistema incrementa sus ingresos de agua en detrimento del porcentaje de aporte glaciar, en los otros dos escenarios, no existen mayores ingresos, es más, en uno de estos escenarios la precipitación disminuye, sobre todo durante la temporada húmeda.

8.4. Implicaciones para la adaptación

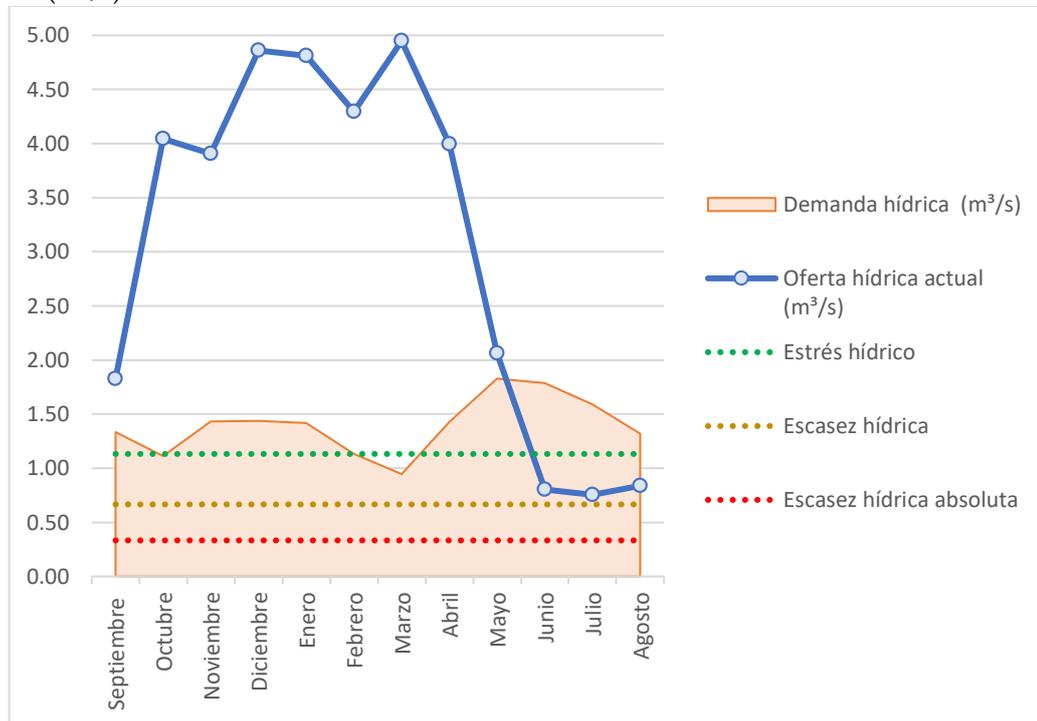
Los niveles de seguridad hídrica según la disponibilidad hídrica (ver **Tabla 4.1**) están definidos básicamente para sistemas urbanos, donde la demanda doméstica es la principal, lo cual no corresponde al contexto de la SLP por su alta demanda agrícola. Por esta razón, en un principio, se entendió su uso en esta investigación como niveles referenciales. Se observó que el umbral que marcaría un estado (o no) de estrés hídrico se asemeja a la demanda hídrica. Una similitud está en que la demanda supera a la oferta hídrica en los mismos meses en los que el umbral de estrés hídrico también es superior a la oferta (durante junio, julio, y agosto) (ver **Figura 8.1**). Cabe aclarar que pese a que la oferta hídrica actual y proyectada sea menor inclusive al umbral de escasez hídrica absoluta (ver **Figura 7.3**), ello no implicaría la ocurrencia de un déficit en el balance hídrico, porque este considera el control sobre el régimen de descarga ($2.55 m^3/s$). Por supuesto, este régimen de control puede aún ser modificado dependiendo de la ocurrencia de conflictos sociales y/o de una agudización en los niveles de escasez hídrica.

En este sentido, la cuestión de tener un potencial escenario con un déficit en el balance hídrico que sin duda situó a la SLP en un estado de inseguridad hídrica, se centra la regulación adecuada de la descarga de la laguna Parón. La estrategia adaptativa estaría en controlar adecuadamente la salida de agua de la laguna. En este caso, lo adecuado implica todas las perspectivas y los componentes claves señalados previamente (ver Cap. 4.6). Particularmente, se podría destacar que lo que se requiere más es que esta medida sea equitativa en lo social y eficiente en lo económico. No se puede perjudicar a ninguno de los actores intrincados, como hizo durante décadas con los agricultores de

DISCUSIÓN

la SLP causado por las altas descargas de la laguna, pero también se debe enfocar en que la descarga permita desarrollar la actividad agrícola y energética de manera eficiente.

Figura 8.1 Niveles de Seguridad Hídrica en comparación de la Oferta-Demanda hídrica actual (m^3/s) en la SLP



Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelamiento hidrológico con los umbrales de estrés/escasez de las definiciones en **Tabla 4.1**

Por ende, considero que las estrategias de adaptación deberían enfocarse en medidas *soft path*, porque actualmente se cuenta con una valiosa infraestructura (el túnel y las compuertas de descarga) en la SLP. Las estrategias deberían ahora dirigirse hacia alcanzar una normativa e institucionalidad multisectorial para que desde las autoridades se construya un ambiente de diálogo y consenso (Egúsqiza Cerrón, 2017). En ese sentido, se tiene un amparo legal en la Ley de Recursos Hídricos que dota a la comunidad Cruz de Mayo con los mismos derechos que otros organizadores de usuarios del agua, lo cual se suma a su poder efectivo (demostrándolo durante los momentos álgidos del conflicto, cuando tomaron la laguna). Las estrategias deberían tomar como referencia un hecho tan reciente como el establecimiento del comité de gestión y operación multisectorial que alcanzó un alto nivel de diálogo y coordinación entre los actores estatales y locales, y que incluso fue considerado un progreso en la gestión integral del recurso hídrico (French, 2016).

Capítulo 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo hidrológico muestra en general una disminución del balance hídrico hacia el futuro en todos los escenarios previstos (ver **Figura 7.11**), respecto al estimado para el periodo actual (2006-2016), debido a la regulación en la descarga de la laguna Parón (de 4.19 m³/s a 2.55 m³/s). Únicamente, en el escenario con aumento de precipitación el balance hídrico aumenta ligeramente de 2030 a 2050 en un promedio de 0.1 m³/s, causado por los leves incrementos durante los meses de octubre a abril.

La variabilidad estacional del balance hídrico durante el año hidrológico se reduciría ante escenarios sin variación (2.5 ± 1.01 m³/s en 2030; 2.31 ± 0.95 m³/s en 2050) y con disminución de la precipitación (2.30 ± 0.87 m³/s en 2030; 1.91 ± 0.68 m³/s en 2050). En cambio, únicamente un aumento de la precipitación podría conducir a un incremento ligero de la variabilidad estacional del balance hídrico (2.7 ± 1.15 m³/s en 2030; 2.79 ± 1.32 m³/s en 2050). Esto se debería a que el aumento de precipitación mermaría porcentualmente la contribución glaciaria a la oferta hídrica (hasta un 47% anual hacia 2030 y un 31% anual hacia 2050). Esta minimización indicaría que la precipitación (por ende, la variación estacional de la precipitación) tendría mayor influencia sobre un caudal futuro que la contribución glaciaria. Entonces, en el escenario donde la precipitación aumenta 10% por década, la variación estacional de la precipitación será cada vez mayor, lo cual significaría un incremento progresivo de la variabilidad estacional de la oferta y el balance hídrico. Contrariamente, en un escenario donde la precipitación se reduce 10% por década, el porcentaje de la contribución glaciaria se reduciría en menor medida (hasta un 53% anual hacia 2030 y un 43% anual hacia 2050), y, por ende, la precipitación tendría menor influencia sobre la oferta y balance hídrico. Así, en el escenario de disminución de la precipitación, la variación estacional de la precipitación sería cada vez menor, lo cual significaría una reducción notable y progresiva de la variabilidad estacional de la oferta y balance hídrico (ver **Tabla 8.2y Tabla 8.3**).

Si bien se ha visto que en la época seca (junio, julio, y agosto) la demanda supera a la oferta hídrica y los indicadores de seguridad hídrica señalarían escasez hídrica absoluta respecto de la oferta, luego de evaluar el balance hídrico, se puede afirmar que no habría

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

una situación de inseguridad hídrica en ninguno de los escenarios. Esto se debería principalmente a la regulación del caudal de descarga de la laguna Parón (2.55 m³/s). Esto resalta la importancia de establecer un caudal de descarga adecuado para evitar una reducción en la disponibilidad hídrica, y se alcancen niveles de inseguridad hídrica (estrés, y escasez hídrica).

El modelo hidrológico estima que en todos los escenarios actuales y futuros sin la infraestructura para el control de la descarga de la laguna Parón la SLP entraría en un déficit hídrico en los meses de estiaje (junio, julio, y agosto). Esta situación afectaría principalmente a los 21 mil habitantes de la SLP que hacen uso doméstico y agrícola del agua, inclusive también a la empresa hidroeléctrica.

Se ha observado que los niveles de seguridad hídrica considerados en esta investigación permiten identificar cuándo y en cuánto la demanda excedería a la oferta hídrica, lo cual se evidencia en un balance hídrico ciertamente menor (pero no un déficit). Por lo tanto, ante estas facilidades, estos niveles de seguridad hídrica urbana podrían ser usados como referenciales en el sistema de la SLP o incluso podrían adaptarse para zonas rurales de la CB.

La relevancia social e hídrica (potenciales situaciones de escasez hídrica) de esta subcuenca debería llamar la atención y preocupación de las autoridades encargadas de recolectar datos para un monitoreo y evaluación del estado de la SLP y también para futuras investigaciones. Principalmente, es imprescindible una estación hidrométrica que registre el aporte del sistema SLP al río Santa, de modo que cualquier otro estudio pueda calibrar modelos más sofisticados. Los estudios revisados que tratan la SLP desde el aspecto hidrológico se centran en la zona media y alta, cuando los sistemas hídricos comprenden a los sistemas sociales y económicos (como la agricultura y el mercado) situados en la parte baja de la SLP.

Por una parte, es evidente que la instalación de infraestructura para el control de la descarga de la laguna Parón ejemplifica cómo una estrategia enfocada solo en la construcción de infraestructura de regulación del ciclo hidrológico genera posibles conflictos tales como la disputa entre la empresa hidroeléctrica y la comunidad

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

campesina. Por otro lado, dentro de los aspectos positivos, evita que sucedan posibles escenarios de déficit del balance hídrico, especialmente, cuando otras subcuencas cuentan con una menor cobertura glaciar que limitan su aporte durante los meses de estiaje. Es decir, este tipo de construcciones permite regular de manera dinámica y evitar estados de estrés, escasez o escasez hídrica absoluta, principalmente en los meses de estiaje. Asimismo, la infraestructura hidráulica es imprescindible para el manejo del nivel de la laguna, de modo que se reduce el riesgo ante un posible GLOF. Si bien este punto no ha sido el tema central de la investigación, es especialmente importante para las subcuencas de la cuenca alta del río Santa, donde su historia así lo evidencia.

A pesar de que en el área de estudio no se identificó problemas derivados de la alteración de la calidad del agua, esta cuestión debe ser prioritaria también en otras subcuencas. Esto se debe a que se tienen registros de casos en los que la calidad de agua disminuye por disminución del pH, causado por drenaje de rocas ácidas (como en Quilcay, Huaraz). Este estudio, se enfoca en la cantidad del recurso hídrico para evaluar posibles estados de seguridad/inseguridad hídrica en el presente y futuro, porque no se identificó problemas derivados de la alteración de la calidad del agua. La seguridad hídrica se puede ver afectada por la calidad y cantidad de agua.

Finalmente, se puede afirmar que actualmente la oferta ha sido suficiente para satisfacer la demanda hídrica, en particular, gracias a la regulación de la descarga de la laguna Parón. En el futuro, el control adecuado de la descarga de la laguna Parón mantendría un balance hídrico positivo, pese al aumento o disminución en la precipitación, y a la reducción de la contribución glaciar producida por el retroceso glaciar. Si bien parece que la infraestructura en sí soluciona el problema del déficit hídrico, se debe entender que es el uso adecuado de esta infraestructura lo que realmente permitiría garantizar una seguridad hídrica para los principales usuarios del agua. El control adecuado debe ser coordinado y consensuado, respetando a los usuarios y las opiniones técnicas, para lo cual es necesario establecer canales de comunicación a través de instituciones públicas, dentro de las facilidades institucionales que brinda el Sistema de Gestión Nacional de Recursos Hídricos, y legales que ofrece la nueva ley de Recursos Hídricos (2009). Uno de los mecanismos posiblemente más viables podría basarse en la experiencia de los

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

logros de los Comités de operación y de gestión multisectorial de la laguna Parón Conjuntamente, además de los principales temas tratados en esta tesis, las acciones no solo deberían centrarse en la forma en cómo se usa la infraestructura de control de la laguna o la construcción de otros reservorios, sino que se recomienda que consideren la posibilidad de implementar medidas estructurales y no estructurales como por ejemplo: mejoras en el sistema de riego, establecimiento de sistema de monitoreo y alarma ante desbordes, programas de educación ambiental enfocados en los recursos hídricos de la zona, capacitación de la población ante potenciales desastres, entre otros.



BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo ANA. (2014c, August 29). *Inventario Lagunas Glaciares del Perú*. Catálogo de Metadatos - Autoridad Nacional Del Agua. <http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/6d825533-5346-421a-9c2b-308c10d3422f>

ANA. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Santa*. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/23>

ANA. (2017, June 29). *Administraciones Locales del Agua*. Catálogo de Metadatos - Autoridad Nacional Del Agua. <http://geo2.ana.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/ba4b1120-07f7-43a9-8c63-19563ce9ecf8>

ANA. (2019). *Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca 1948 - 2018*. ANA. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3770>

ANA. (2020). *Visor de estaciones*. Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH). <http://snirh.ana.gob.pe/visors2/>

Ardalan, A., Rad, M. K., & Hadi, M. (2019). *Urban Drought* (B. Ray & R. Shaw (eds.)). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8947-3>

Arreguin-Cortes, F. I., Saavedra-Horita, J. R., Rodriguez-Varela, J. M., Tzatchkov, V. G., Cortez-Mejia, P. E., Llaguno-Guilberto, O. J., Sainos-Candelario, A., Sandoval-Yoval, L., Ortega-Gaucin, D., Mendoza-Cazares, E. Y., & Navarro-Barraza, S. (2019). Municipal level water security indices in Mexico. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1180-2>

Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>

BIBLIOGRAFÍA

- 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), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. *Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017*, 1–22. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Bajjali, W. (2018). *Watershed Delineation* (pp. 235–245). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61158-7_14
- 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), 134–150. <https://doi.org/10.3189/2012JoG11J186>
- Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., Gomez, J., Knox, S., & Fortner, S. K. (2014). Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: a multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561–2581. <https://doi.org/10.1002/hyp.10386>
- Bengtsson, L., Bonnet, R.-M., Calisto, M., Destouni, G., Gurney, R., Johannessen, J., Kerr, Y., Lahoz, W. A., & Rast, M. (2014). The Earth’s Hydrological Cycle. In Lennart Bengtsson, R.-M. Bonnet, M. Calisto, G. Destouni, R. Gurney, J. Johannessen, Y. Kerr, W. A. Lahoz, & M. Rast (Eds.), *Surveys in Geophysics* (Vol. 46). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8789-5>
- Bernex, N., & Tejada, M. (2010). *Cambio Climático, Retroceso Glaciar y Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*.

BIBLIOGRAFÍA

- Blair, P., & Buytaert, W. (2016). Socio-hydrological modelling: a review asking “why, what and how?” *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), 443–478. <https://doi.org/10.5194/hess-20-443-2016>
- Brack, A., & Mendiola, C. (2000). *Ecología del Perú*. <https://www.peruecologico.com.pe/libro.htm>
- Buckley, S. M. (2020, February 18). *NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products*. NASA Earthdata. <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measurements/nasadem>
- Buckley, S. M., Agram, P. S., Belz, J. E., Crippen, R. E., Gurrola, E. M., Hensley, S., Kobrick, M., Lavelle, M., Martin, J. M., Neumann, M., Nguyen, Q. D., Rosen, P. A., Shimada, J. G., Simard, M., & Tung, W. W. (2020). *NASADEM*.
- Burns, P., & Nolin, A. (2014). Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, 140, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>
- Bury, J. T., Mark, B. G., McKenzie, J. M., French, A., Baraer, M., Huh, K. I., Zapata Luyo, M. A., & Gómez López, R. J. (2011). Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*, 105(1), 179–206. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9870-1>
- 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*.
- Carey, M., Baraer, M., Mark, B. G., French, A., Bury, J., Young, K. R., & McKenzie, J. M. (2014). Toward hydro-social modeling: Merging human variables and the social sciences with climate-glacier runoff models (Santa River, Peru). *Journal of Hydrology*, 518(PA), 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.006>

BIBLIOGRAFÍA

- Carey, M., French, A., & O'Brien, E. (2012). Unintended effects of technology on climate change adaptation: An historical analysis of water conflicts below Andean Glaciers. *Journal of Historical Geography*, 38(2), 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.jhg.2011.12.002>
- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Clarke, A. M. P., Polk, M. H., Lilleskov, E. A., & Fuentealba, B. (2019a, October 2). *Peatland and wet meadow land cover- Cordillera Blanca-2019*. Center for International Forestry Research (CIFOR). <https://data.cifor.org/file.xhtml?fileId=2556&version=1.2>
- Chimner, R. A., Bourgeau-Chavez, L., Grelik, S., Hribljan, J. A., Clarke, A. M. P., Polk, M. H., Lilleskov, E. A., & Fuentealba, B. (2019b). Mapping Mountain Peatlands and Wet Meadows Using Multi-Date, Multi-Sensor Remote Sensing in the Cordillera Blanca, Peru. *Wetlands*, 39(5), 1057–1067. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1>
- COES. (2020). *Estadísticas Anuales* 2019. <https://www.coes.org.pe/Portal/publicaciones/estadisticas/estadistica2019#>
- Colonia, D., Torres, J., Haerberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C., & Cochachin, A. (2017). Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating 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>
- 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), 442–459. <https://doi.org/10.1080/02508060.2012.706773>
- Cook, C., & Bakker, K. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 22(1), 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>
- Coudrain, A., Francou, B., & Kundzewicz, Z. W. (2005). Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 925–932. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.925>

BIBLIOGRAFÍA

- Crippen, R., Buckley, S., Agram, P. S., Belz, E., Gurrola, E., Hensley, S., Kobrick, M., Lavallo, M., Martin, J., Neumann, M., Nguyen, Q., Rosen, P. A., Shimada, J. G., Simard, M., & Tung, W. W. (2016). *NASADEM GLOBAL ELEVATION MODEL: METHODS AND PROGRESS*. <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/46123/CL%2316-2137.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Dempsey, C. (2020, March 4). *Updated Global Elevation Data Released by NASA*. GIS Lounge. <https://www.gislounge.com/updated-global-elevation-data-released-by-nasa/>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Díaz, A., Villegas, E., Lavado, W., Felipe, O., & Fernández, C. (2015). *Generación de base de datos de precipitación mensual grillada de alta resolución a nivel nacional 1981-2013*.
- Diaz, H. F., & Isemer, H.-J. (1995). *Proceedings of the International COADS Winds Workshop, Kiel, Germany, 31 May-2 June 1994* (Institut Für Meereskunde (ed.)). U.S. Department of Commerce.
- Dirección General de Estadística. (1878). *Censo general de la República del Perú formado en 1876*. Dirección General de Estadística. <http://hdl.handle.net/2027/chi.18850032>
- Drenkhan, F. (2016). En la sombra del Cambio Global: hacia una gestión integrada y adaptativa de recursos hídricos en los Andes del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 51(28), 25–51. <https://doi.org/10.18800/espaciodydesarrollo.201601.002>
- Drenkhan, F. (2019). Risks and future options from changing water resources in the deglaciating Andes of Peru [University of Zurich]. In *University of Zurich, Faculty of Science*. <https://www.zora.uzh.ch/id/eprint/177831/>
- 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. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715–733. <https://doi.org/10.1002/wat2.1105>

BIBLIOGRAFÍA

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.070>
- Drenkhan, F., & Walker-Crawford, N. (2020). *Adaptation strategies to water scarcity in the Santa River Basin , Peru.*
- Eda, L. E. H., & Chen, W. (2010). Integrated water resources management in Peru. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.039>
- Egúsquiza 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.
- ELECTROPERU S.A., & UGRH. (1988). *Inventario de lagunas: cuencas Santa, Nepeña, Casma, Culebras, Huarmey, Fortaleza, Pativilca, Marañón.* <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2121>
- Emmer, A., Klimeš, J., Mergili, M., Vilímek, V., & Cochachin, A. (2016). 882 lakes of the Cordillera Blanca: An inventory, classification, evolution and assessment of susceptibility to outburst floods. *Catena*, 147, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.032>
- Ezz, H., Gomaah, M., & Abdelwares, M. (2019). Watershed Delineation and Estimation of Groundwater Recharge for Ras Gharib Region, Egypt. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 07(04), 202–213. <https://doi.org/10.4236/gep.2019.74013>
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. *Natural Resources Forum*, 13(4), 258–267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>
- FAO. (2015). *Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security.* <http://www.fao.org>

BIBLIOGRAFÍA

- French, A. (2016). El desborde del conflicto por la Laguna Parón. In *El Estado frente a los conflictos por el agua. Terceras Jornadas de Derecho de Aguas*.
<http://departamento.pucp.edu.pe/derecho/cicaj/publicaciones/el-estado-frente-a-los-conflictos-por-el-agua-terceras-jornadas-de-derecho-de-aguas/>
- 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), 142–160.
<https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1484682>
- French, A., Baraer, M., Bury, J., Carey, M., Mark, B. G., Mckenzie, J. M., Young, K. R., & Polk, M. H. (2016). Coyuntura Crítica: Cambio climático, globalización, y la doble exposición del sistema socio-hidrologico de la cuenca del Río Santa, Perú. In *Naturaleza y Sociedad: Perspectivas socio-ecológicas sobre cambios globales en América Latina*.
- Gain, A. K., Giupponi, C., & Wada, Y. (2016). Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*, 11(12), 124015.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124015>
- Gancedo Alonso, U. (2018). *Evolución del Balance de Masas y Retroceso Glaciar en el Nevado Artesonraju (Cordillera Blanca, Perú)*. Universidad del País Vasco.
- Georges, C. (2004). 20th-Century Glacier Fluctuations in the Tropical Cordillera Blanca, Perú. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 100–107. [https://doi.org/doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0100:TGFITT\]2.0.CO;2](https://doi.org/doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0100:TGFITT]2.0.CO;2)
- Guardamino, L., Haeberli, W., Muñoz, R., Drenkhan, F., Tacsí, A., & Cochachin, A. (2019). *Proyección de lagunas futuras en las cordilleras glaciares del Perú*.
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3597>

BIBLIOGRAFÍA

- Gubler, S., Rossa, A., Avalos, G., Brönnimann, S., Cristobal, K., Croci-Maspoli, M., Dapozzo, M., van der Elst, A., Escajadillo, Y., Flubacher, M., Garcia, T., Imfeld, N., Konzelmann, T., Lechthaler, F., Liniger, M., Quevedo, K., Ramos, H., Rohrer, M., Schwierz, C., ... Wüthrich, B. (2020). Twinning SENAMHI and MeteoSwiss to co-develop climate services for the agricultural sector in Peru. *Climate Services*, 20, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100195>
- Guevara, A. (2008). *Derechos y conflictos de agua en el Perú*. www.eclac.cl/drni/proyectos/walir
- Gurgiser, W., Juen, I., Singer, K., Neuburger, M., Schauwecker, S., Hofer, M., & Kaser, G. (2016). Comparing peasants' perceptions of precipitation change with precipitation records in the tropical Callejón de Huaylas, Peru. *Earth Syst. Dynam*, 7, 499–515. <https://doi.org/10.5194/esd-7-499-2016>
- GWP. (2005). *Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de optimización del agua* (C. T. del G. W. Partnership (ed.)). Elanders. www.sinfo.se
- GWP. (2008). Principios de gestión integrada de los recursos hídricos: Bases para el desarrollo de planes nacionales. *Global Water Partnership–GWP*, 12.
- Haerberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y., & Schleiss, A. J. (2016). New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, 139(2), 201–214. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>
- Hanshaw, M. N., & Bookhagen, B. (2014). Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *The Cryosphere*, 8(2), 359–376. <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>
- Hartmann, D. L. (2016). The Hydrologic Cycle. In *Global Physical Climatology* (pp. 131–157). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-328531-7.00005-0>

BIBLIOGRAFÍA

- Hijmans, R. J., Van Etten, J., Sumner, M., Cheng, J., Baston, D., Andrew Bevan, Bivand, R., Busetto, L., Canty, M., Forrest, D., Ghosh, A., Golicher, D., Gray, J., & Greenberg, J. A. (2020). *Package "raster."* <https://github.com/rspsatial/raster/issues/>
- Hoekstra, A. Y., Buurman, J., & van Ginkel, K. C. H. (2018). Urban water security: A review. *Environmental Research Letters*, 13(5), 053002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- Huh, K. I., Mark, B. G., Ahn, Y., & Hopkinson, C. (2017). Volume change of tropical peruvian glaciers from multi-temporal digital elevation models and volume–surface area scaling. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 99(3), 222–239. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1313095>
- Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- IGN. (2020). *Instituto Geográfico Nacional - Infraestructura de Datos Geoespaciales Fundamentales*. Ministerio de Defensa, Instituto Geográfico Nacional | OEINFO - CIDE. <http://www.idep.gob.pe/#visor>
- INAIGEM. (2016). *Reconocimiento peligros naturales en la laguna nueva Artesoncocha Alta*.
- INAIGEM. (2018). *El inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú*. INAIGEM. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2623>
- INAIGEM. (2020). *INAIGEM - Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. MINAM. <https://www.inaigem.gob.pe/>
- INEI. (1984). *Censos nacionales, VIII de población, III de vivienda, 12 de julio de 1981 : resultados definitivos*. INEI.
- INEI. (1994). *Censos nacionales 1993, IX de población, IV de vivienda*.
- INEI. (1996). *III Censo nacional agropecuario, 15 de octubre al 14 de noviembre, 1994 : resultados definitivos*. INEI.

BIBLIOGRAFÍA

- INEI. (2007). *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda - Base de Datos REDATAM*.
<http://censos.inei.gob.pe/Censos2007/redatam/>
- INEI. (2012). *IV Censo Nacional Agropecuario 2012 - Base de Datos REDATAM*.
<http://censos.inei.gob.pe/Cenagro/redatam/>
- INEI. (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas - Base de Datos REDATAM*. <http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Impactos, adaptación y vulnerabilidad*. Field, Christopher B Barros, Vicente R Dokken, David Jon Mach, Katharine J Mastrandrea Codirector, Michael D Calvo Buendía, Eduardo Moreno, José M Eren Bilir, T Chatterjee, Monalisa Yuka, Kristie L Ebi Estrada, Otsuki Genova, Robert C Girma, Betelhem Kiss. www.ipcc.ch.
- IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: High Mountain Areas. In *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Vol. 1). Elizabeth Jimenez Zamora.
- Irmak, S. (2008). Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set* (pp. 1432–1438). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00270-6>
- Jain, S. (2014). Fundamentals of Physical Geology. In *Fundamentals of Physical Geology*. Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1539-4>
- Jensen, O., & Wu, H. (2018). Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science & Policy*, 83, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.003>
- Kaser, G., Cogley, J. G., Dyurgerov, M. B., Meier, M. F., & Ohmura, A. (2006). Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004. *Geophysical Research Letters*, 33(19), L19501. <https://doi.org/10.1029/2006GL027511>
- Kaser, Georg. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)

BIBLIOGRAFÍA

- Kaser, Georg, 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>
- Leal Filho, W., & Nalau, J. (2018). Limits to Climate Change Adaptation. In W. Leal Filho & J. Nalau (Eds.), *Environmental Systems Research* (Vol. 6, Issue 1). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5>
- Lejeune, Y., Wagnon, P., Bouilloud, L., Chevallier, P., Etchevers, P., Martin, E., Sicart, J.-E., & Habets, F. (2007). *Melting of Snow Cover in a Tropical Mountain Environment in Bolivia: Processes and Modeling*. <https://doi.org/10.1175/JHM590.1>
- Li, L., Yang, J., & Wu, J. (2019). A Method of Watershed Delineation for Flat Terrain Using Sentinel-2A Imagery and DEM: A Case Study of the Taihu Basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12), 528. <https://doi.org/10.3390/ijgi8120528>
- Linton, J., & Budds, J. (2014). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A., & Schneider, B. (1977). Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79).
- Ludwig, F., van Slobbe, E., & Cofino, W. (2014). Climate change adaptation and Integrated Water Resource Management in the water sector. *Journal of Hydrology*, 518(PB), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.010>
- Lynch, B. D. (2012). Vulnerabilities, competition and rights in a context of climate change toward equitable water governance in Peru's Rio Santa Valley. *Global Environmental Change*, 22(2), 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.02.002>

BIBLIOGRAFÍA

- Mark, B. G., & McKenzie, J. M. (2007). Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water. *Environmental Science and Technology*, 41(20), 6955–6960. <https://doi.org/10.1021/es071099d>
- Mark, B. G., McKenzie, J. M., & Gómez, J. (2005). Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejon de Huaylas, Peru. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 975–988. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.975>
- Mark, B. G., & Seltzer, G. O. (2005). Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): Spatial distribution of mass loss and climatic forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24(20–21), 2265–2280. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.01.003>
- McDowell, G., Huggel, C., Frey, H., Wang, F. M., Cramer, K., & Ricciardi, V. (2019). Adaptation action and research in glaciated mountain systems: Are they enough to meet the challenge of climate change? *Global Environmental Change*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.012>
- MIDIS. (2020). *Programa Nacional PAIS: Construyendo Historias de Vida*. <http://www.pais.gob.pe/webpais/public/>
- Miller, K., & Clancy, K. F. (2017). Improving Curve Number Runoff Estimates Using Dual Hydrologic Soil Classification and Potential Contributing Source Areas Delineation Methods. *Journal of Water Resource and Protection*, 09(01), 20–39. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.91003>
- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338, (2010).
- MINAGRI. (2020a). *AGRO RURAL – Programa de Desarrollo Productivo Agrario Rural*. Programa de Desarrollo Productivo Agrario Rural. <https://www.agrorural.gob.pe/>
- MINAGRI. (2020b). *Calendario de Siembras y Cosechas*. SIEA. <http://siea.minagri.gob.pe/calendario/>
- MINAGRI, & ANA. (2019). *Ley de los Recursos Hídricos: Ley N° 29338*. www.ana.gob.pe

BIBLIOGRAFÍA

- MINAM. (n.d.). *Intercambio de datos – Geoservidor - Ministerio del Ambiente*. Retrieved May 3, 2020, from <http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>
- MINAM. (2007). *Definiciones conceptuales de los Ecosistemas del Perú*. <http://www.ambiente.gob.ec/el-ministerio/>
- MINEDU. (2020). *Descarga de información espacial del MED*. <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>
- Montanari, A. (2011). Uncertainty of Hydrological Predictions. In *Treatise on Water Science* (Vol. 2, pp. 459–478). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53199-5.00045-2>
- Moradkhani, H., & Sorooshian, S. (2008). General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. In *Hydrological Modelling and the Water Cycle* (pp. 1–24). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_1
- Motschmann, A., Huggel, C., Carey, M., Moulton, H., Walker-Crawford, N., & Muñoz, R. (2020). Losses and damages connected to glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02770-x>
- MTC. (2017, July 12). *Red vial vecinal del Perú del Sistema Nacional de Carreteras al 31.dic.2016*. Catálogo de Metadatos - Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <http://mtcgeo2.mtc.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/b4286688-2070-4cde-9a29-2771c1a13da1>
- MTC. (2019, March 9). *Red vial departamental del Perú del Sistema Nacional de Carreteras Dic.2018*. Catálogo de Metadatos - Ministerio de Transportes y Comunicaciones. <http://mtcgeo2.mtc.gob.pe:8080/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/587e97f0-b784-40d0-9bd5-0026b2d98bca>
- Municipalidad Provincial de Huaylas. (2020). *Municipalidad Provincial de Huaylas - Caraz*. <https://municaraz.gob.pe/index.php>

BIBLIOGRAFÍA

- Muñoz Jiménez, J. (2000). Geomorfología general. In Editorial Síntesis (Ed.), *Espacios y Sociedades*.
- Muñoz, R., Huggel, C., Frey, H., Cochachin, A., & Haeberli, W. (2020). Glacial lake depth and volume estimation based on a large bathymetric dataset from the Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, *i*, esp.4826. <https://doi.org/10.1002/esp.4826>
- NASA. (2020). *Earthdata*. NASA EarthData. https://search.earthdata.nasa.gov/search/granules/collection-details?p=C1546314043-LPDAAC_ECS&q=nasadem&sb=-77.83417958021164%2C-9.092971676635202%2C-77.58808583021164%2C-8.93475135097458&m=-8.879567700834656!-79.38544911146164!7!1!0!0%2C2&tl=1568076851!4!!
- Navarro, Á., Úbeda, J., Santillán, N., Dávila, L., Concha, R., Cochachin, A., Gómez, J., Cruz, R., & Torres, L. (2017). RECONSTRUCCIÓN DE ELAAABI EN GLACIARES DE LA CUENCA PARÓN (CORDILLERA BLANCA). *International Congress on Climate Change and Its Impacts*, *1*(ICCC12017), 1. <https://www.researchgate.net/publication/320035614>
- Orewole, M., Kappo, A., Isa, I., Fatile, S., Lukman, I., & Alaga, A. (2016). Application of Geospatial Technology in Watershed Delineation and Extraction of Hydrologic Characteristics in Opa Catchment, Southwestern Nigeria. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, *8*(2), 1–9. <https://doi.org/10.9734/JGEEESI/2016/29267>
- Osinermin. (2020). *Osinermin - Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería*. Organismo Supervisor de La Inversión En Energía y Minería. https://www.osinermin.gob.pe/seccion/institucional/acerca_osinermin/quienes_somos#
- Pokharel, N., Basnet, K., & Paudel, R. C. (2019). Morphometric Analysis of East Seti Watershed in Gandaki Province, Nepal using GIS. *Proceedings of IOE Graduate Conference, 2019-Winter Peer*, 7.
- Pokorny, J. (2018). Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Ecology* (pp. 292–303). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11182-0>

BIBLIOGRAFÍA

- Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., & Sicart, J.-E. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, 58(212), 1027–1036. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J027>
- 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), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordoñez, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186). <http://www.glims>.
- Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, & Martin Smith. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
- Rojas Toledo, D. D. (2018). *Relación de las variables meteorológicas y la fusión glaciaria de la zona de ablación y acumulación del glaciar Artesonraju y la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca, para los años hidrológicos 2004 al 2016*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.
- Ruíz Ostoic, L., Quijandría Acosta, G., Otárola Acevedo, E., Rios Torres, S., Álvarez Alonso, J., & Núñez Neyra, F. (2019). *Mapa Nacional de Ecosistemas: Memoria Descriptiva*. www.minam.gob.pe
- Sadoff, C. W., & Muller, M. (2010). *La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales*.

BIBLIOGRAFÍA

- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmán, N., & Vuille, M. (2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*, 119, 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., Salzmán, 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>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13(10), 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- SENAMHI. (2019). *Datos PISCO*. ftp://publi_dgh2:123456@ftp.senamhi.gob.pe/
- Shrestha, S., Aihara, Y., Bhattarai, A. P., Bista, N., Kondo, N., Futaba, K., Nishida, K., & Shindo, J. (2018). Development of an objective water security index and assessment of its association with quality of life in urban areas of developing countries. *SSM - Population Health*, 6, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2018.10.007>
- SICCAM. (2016). *Directorio de Comunidades Campesinas del Perú*. <http://website.ibcperu.org/wp-content/uploads/2017/06/DIRECTORIO-DE-COMUNIDADES-CAMPESINAS-DEL-PERU-2016.pdf>
- SIGRID. (2020). *Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres - SIGRID Versión 3.0*. CENEPRED. <http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa>
- Silverio, W., & Jaquet, J.-M. (2017). Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 and 2016 in the context of ENSO. *Archives Des Sciences*, 69, 145–162. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:98197>

BIBLIOGRAFÍA

- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M., & Avant, B. (2017). *An Overview of Rainfall-Runoff Model Types An Overview of Rainfall-Runoff Model Types* (Issue September). U.S. Environmental Protection Agency.
- Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, 26(8), 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>
- Stahr, A., & Langenscheidt, E. (2015). Landforms of High Mountains. In *Landforms of High Mountains*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-53715-8>
- Suarez, W. (2003). *Bilan hydrique d'un système lacustre de haute montagne : le bassin Paron (Cordillère Blanche-Pérou)*. Université Montpellier II.
- Suarez, W., Chevallier, P., Pouyaud, B., & Lopez, P. (2008). Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin (White Cordillera, Peru). *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 266–277. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.1.266>
- Sunass. (2014). *Determinacion de la formula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestion aplicables a la empresa municipal de servicio de agua potable y alcantarillado Chavin Sociedad Anonima - EPS Chavín S.A. para el quinquenio regulatorio 2014-2019*.
- Sunass. (2015). *Determinacion de la formula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestion aplicables a la empresa municipal de servicio de agua potable y alcantarillado Chavin Sociedad Anonima - EPS Chavín S.A. para el quinquenio regulatorio 2015-2020*.
- Sunass. (2020). *Quiénes somos*. <https://www.sunass.gob.pe/websunass/index.php/sunass/quienes-somos>
- Swyngedouw, E. (2009). The Political Economy and Political Ecology of the Hydro-Social Cycle. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 142(1), 56–60. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2009.00054.x>
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (P. Education (ed.); 8th ed.).

BIBLIOGRAFÍA

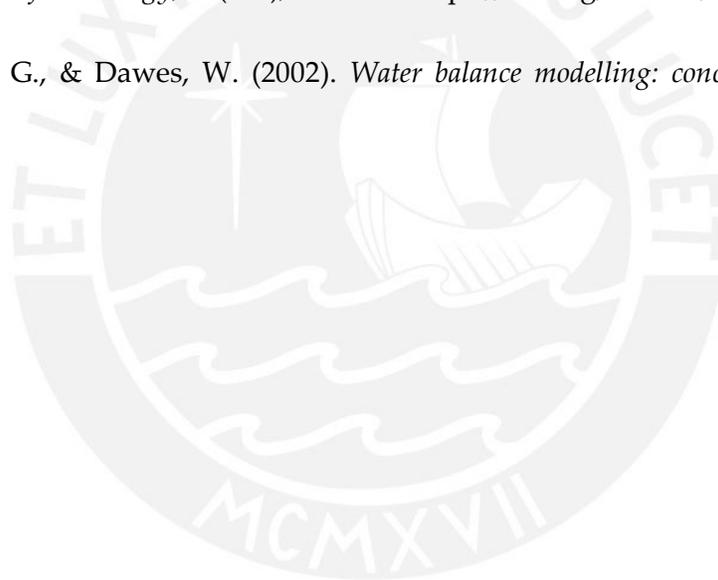
- UCAR. (2006). *Runoff Processes*. The Comet Program - University Corporation for Atmospheric Research. <https://www.meted.ucar.edu/hydro/basic/Runoff/>
- UN-Water. (2013). *Water Security & the Global Water Agenda A UN-Water Analytical Brief*. United Nations University. <http://www.fao.org/3/a-i2930e.pdf>
- UNESCO. (2018). *The Andean glacier and water atlas: the impact of glacier retreat on water resources*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810>
- Veettil, B. K. (2018). Glacier mapping in the Cordillera Blanca, Peru, tropical Andes, using Sentinel-2 and Landsat data. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 39(3), 351–363. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12247>
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, Causes, and Challenges. In *Geosciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 5, p. 196). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Veettil, B. K., Wang, S., Bremer, U. F., de Souza, S. F., & Simões, J. C. (2017). Recent trends in annual snowline variations in the northern wet outer tropics: case studies from southern Cordillera Blanca, Peru. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1–2), 213–227. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1775-0>
- Vergara, W., Deeb, A., Leino, I., Kitoh, A., Kitoh, A., & Escobar, M. (2011). Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology. In *Assessment of the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-8662-0>
- Vergara, W., Deeb, A., Valencia, A., Bradley, R., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A., & Haeussling, S. (2007). Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 88(25), 261–264. <https://doi.org/10.1029/2007EO250001>

BIBLIOGRAFÍA

- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Correa, K., Avalos, G., Bazo, J., Azorin-Molina, C., Domínguez-Castro, F., Kenawy, A. El, Gimeno, L., & Nieto, R. (2017). Recent changes in monthly surface air temperature over Peru, 1964-2014. *International Journal of Climatology*, 38(1), 283–306. <https://doi.org/10.1002/joc.5176>
- 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, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B. G., & Bradley, R. S. (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>
- Wagnon, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., Maisincho, L., Rojas, M., & Chazarin, J. P. (2009). Understanding and modeling the physical processes that govern the melting of snow cover in a tropical mountain environment in Ecuador. *Journal of Geophysical Research*, 114(D19), D19113. <https://doi.org/10.1029/2009JD012292>
- Willis, H., Groves, D., Ringel, J., Mao, Z., Efron, S., & Abbott, M. (2016). Developing the Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index: Toward a Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment. In *Developing the Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index: Toward a Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment*. RAND Corporation. <https://doi.org/10.7249/tl165>
- Yakabi, K., & Bernex, N. (2017). *El agua en el Perú: Situación y Perspectivas* (N. Bernex & K. Yakabi (eds.)). AD&D Grafica S.A.C.
- Yanac León, I., Walker-Crawford, N., & Diez Hurtado, A. (2020). *Preliminary Social Data Report - Lullán, Quillcay and Yanayacu Sub-basins*.

BIBLIOGRAFÍA

- Yarahmadi, J., & Vekerdy, Z. (2003). The integration of satellite images, GIS and CROPWAT model to investigation of water balance in irrigated area. A case study of Salmas and Tassoj plain, Iran. *Wrs, MSc*(January), 56. https://doi.org/10.1207/s15326985ep2803_7
- Zeitoun, M. (2011). The Global Web of National Water Security. *Global Policy*, 2(3), 286–296. <https://doi.org/10.1111/j.1758-5899.2011.00097.x>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haerberli, W., Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N., Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N., ... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
- Zhang, L., Walker, G., & Dawes, W. (2002). *Water balance modelling: concepts and applications*. ACIAR.



ANEXOS

Figura A1 Porcentaje de área que ocupa de la SLP, según Cobertura Vegetal

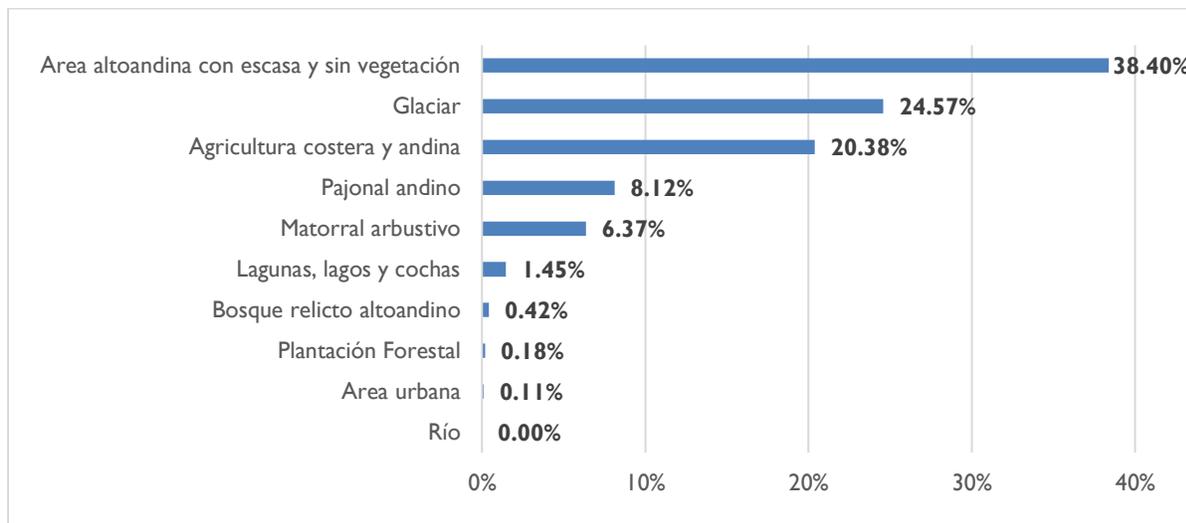


Figura A2 Mapa de la Cobertura Vegetal en la SLP, según MINAM

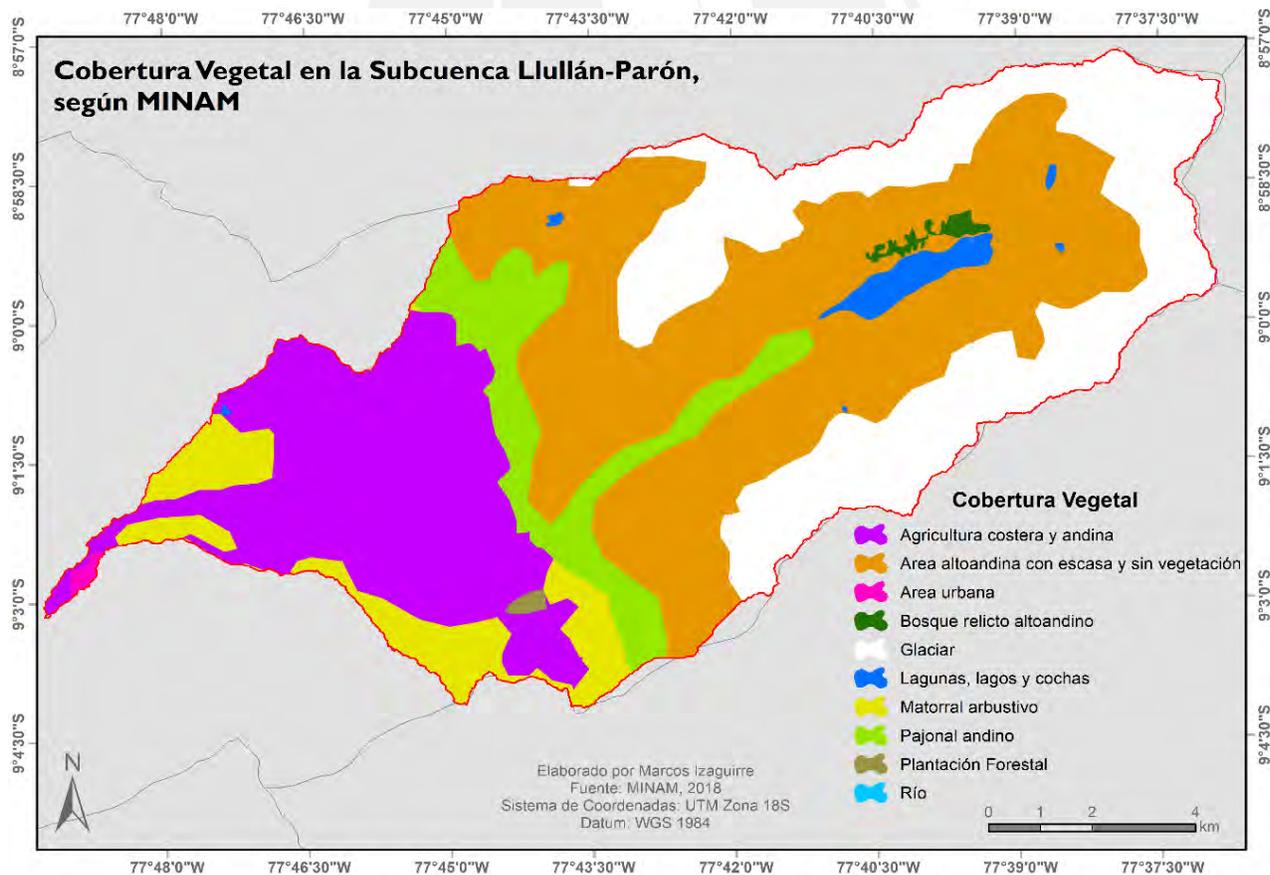


Figura A3 Porcentaje de área que ocupa de la SLP, según Ecosistemas

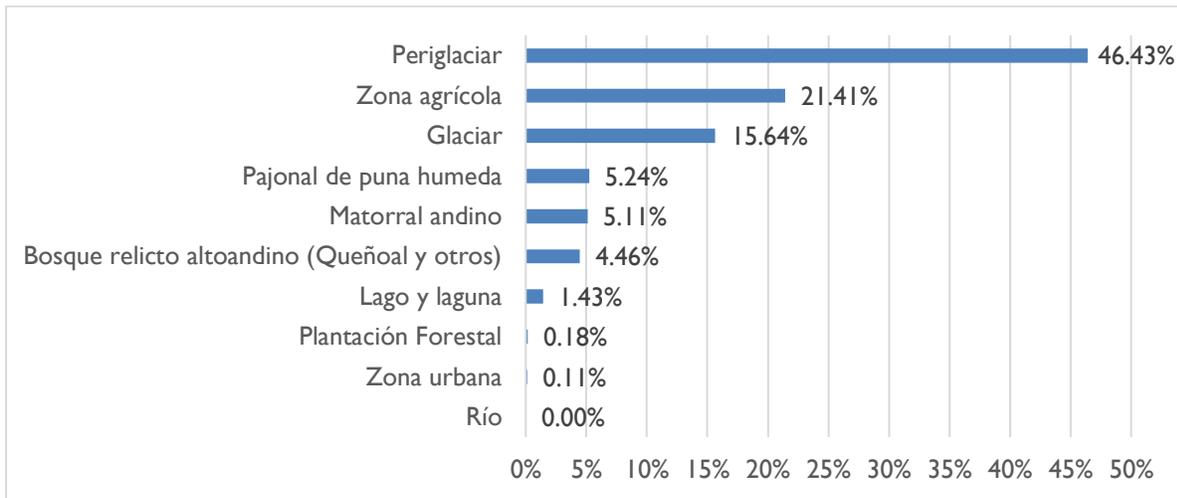
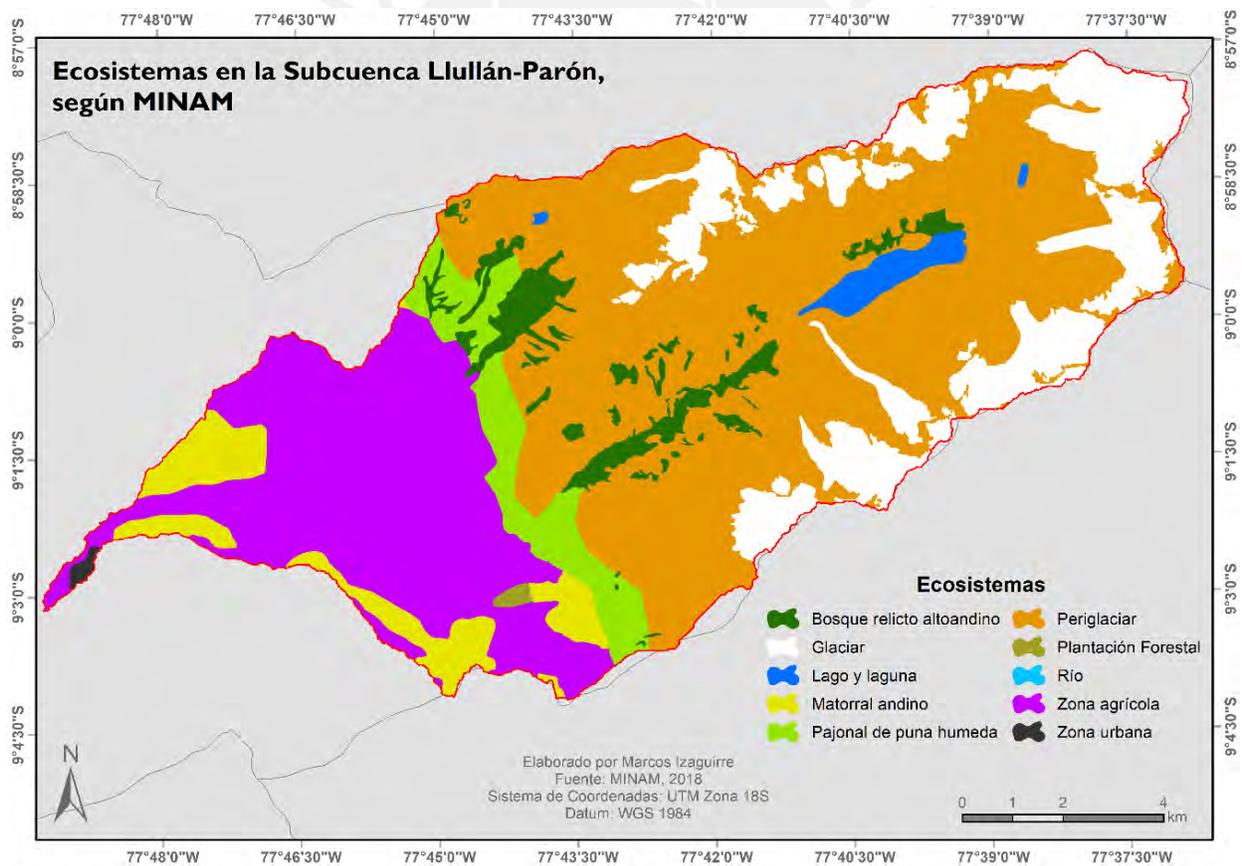


Figura A4 Mapa de Ecosistemas en la SLP, según MINAM



ANEXOS

Tabla A1 Características de las estaciones utilizadas en el estudio

Ubicación	Descripción	Resolución temporal	Periodo - Inicio	Periodo - Fin	Unidades
Estación Automática - Meteorológica Caraz	Temperatura	hora	01/11/2014	31/12/2019	°C
	Precipitación	hora	01/11/2014	31/12/2019	mm/hora
	Humedad	hora	01/11/2014	31/12/2019	%
	Dirección del Viento	hora	01/11/2014	31/12/2019	° Grados
	Velocidad del Viento	hora	01/11/2014	31/12/2019	m/s
Estación Convencional - Climática Caraz	Temperatura Máxima	día	01/02/1964	31/03/1973	°C
	Temperatura Mínima	día	01/02/1964	31/03/1973	°C
	Horas de Sol	día	01/02/1964	31/03/1973	horas
	Evapotranspiración acumulada en 12 horas	día	01/01/1964	31/03/1973	mm
	Precipitación acumulada en 12 horas	día	01/01/1964	31/03/1973	mm
	Humedad Relativa cada 12 horas	día	01/01/1964	31/03/1973	%
Estación Convencional - Hidrométrica Parón	Caudal	día	01/09/1952	31/08/1973	m ³ /s
Estación Virtual PISCO 01	Temperatura Máxima	mes	01/01/1981	31/12/2016	°C
	Temperatura Mínima	mes	01/01/1981	31/12/2016	°C
	Precipitación	mes	01/01/1981	31/12/2016	mm/mes
Estación Virtual PISCO 04	Temperatura Máxima	mes	01/01/1981	31/12/2016	°C
	Temperatura Mínima	mes	01/01/1981	31/12/2016	°C
	Precipitación	mes	01/01/1981	31/12/2016	mm/mes
Estación Meteorológica Parón	Temperatura Mínima	mes	01/01/2003	31/07/2008	°C
	Temperatura Máxima	mes	01/01/2003	31/07/2008	°C
	Temperatura Promedio	mes	01/01/2003	31/07/2008	°C
	Precipitación acumulada	mes	01/01/2003	31/12/2012	mm/mes
	Humedad Relativa	mes	01/01/2003	31/07/2008	%
	Velocidad del Viento	mes	01/01/2003	31/07/2008	km/h
	Dirección del Viento	mes	01/01/2003	31/07/2008	Punto cardinal
	Velocidad del Viento máxima	mes	01/01/2003	31/07/2008	km/h
	Evapotranspiración	mes	01/01/2003	31/07/2008	mm/mes

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A2 Población y Consumo de agua estimado en la SLP entre 2006-2050

Año	Proyección Población Urbana	Proyección Población Rural	Proyección Población Total	Consumo proyectado (l/día per cápita)	Consumo doméstico en SLP (hm ³ /año)
2006	13066	7414	20480	179	1.3381
2007	13330	7468	20798	179	1.3588
2008	13517	7335	20853	179	1.3624
2009	13705	7203	20908	179	1.3660
2010	13892	7070	20962	179	1.3696
2011	14080	6938	21017	179	1.3732
2012	14267	6805	21072	179	1.3767
2013	14454	6672	21127	179	1.3803
2014	14642	6540	21182	174	1.3452
2015	14829	6407	21236	173	1.3410
2016	15017	6275	21291	167	1.2978
2017	15204	6142	21346	167	1.3011
2018	15391	6009	21401	167	1.3045
2019	15579	5877	21456	167	1.3078
2020	15766	5744	21510	167	1.3112
2021	15954	5612	21565	167	1.3145
2022	16141	5479	21620	167	1.3178
2023	16328	5346	21675	167	1.3212
2024	16516	5214	21730	167	1.3245
2025	16703	5081	21784	167	1.3279
2026	16891	4949	21839	167	1.3312
2027	17078	4816	21894	167	1.3345
2028	17265	4683	21949	167	1.3379
2029	17453	4551	22004	167	1.3412
2030	17640	4418	22058	167	1.3446
2031	17828	4286	22113	167	1.3479
2032	18015	4153	22168	167	1.3513
2033	18202	4020	22223	167	1.3546
2034	18390	3888	22278	167	1.3579
2035	18577	3755	22332	167	1.3613
2036	18765	3623	22387	167	1.3646
2037	18952	3490	22442	167	1.3680
2038	19139	3357	22497	167	1.3713
2039	19327	3225	22552	167	1.3746
2040	19514	3092	22606	167	1.3780
2041	19702	2960	22661	167	1.3813
2042	19889	2827	22716	167	1.3847
2043	20076	2694	22771	167	1.3880
2044	20264	2562	22826	167	1.3913
2045	20451	2429	22880	167	1.3947
2046	20639	2297	22935	167	1.3980
2047	20826	2164	22990	167	1.4014
2048	21013	2031	23045	167	1.4047
2049	21201	1899	23100	167	1.4080
2050	21388	1766	23154	167	1.4114

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A3 Fuentes de información sobre lagunas de la SLP

Documento	Autor	Publicación	Formato	Año	Lugar	Altitud (msnm)	Área (m²)	Volumen (hm³)
Inventario nacional de lagunas y represamientos: segunda aproximación	ONERN	1980	PDF	1980	Laguna Parón	4190		
					Laguna Artesoncocha	4290		
					Laguna Pampacocha	3330		
					Laguna Huandoy	4730		
Inventario de lagunas: cuencas Santa, Nepeña, Casma, Culebras, Huarmey, Fortaleza, Pativilca, Marañón	ELECTROPER U	1988	PDF	1988	Laguna Parón	4198	1.723	71.945
					Laguna Huandoy	4740	0.013	
					Laguna Artesoncocha	4285	0.073	
Inventario de Lagunas Glaciares del Perú	ANA	2014	PDF	2014	Laguna Artesoncocha	4288	0.068	0.638
					Laguna de Nevadas Aguja	4862	0.033	0.247
					Laguna Parón	4174	1.480	39.889
					Laguna Huandoy	4740	0.008	0.017
			Shapefile	2014	Laguna Artesoncocha	4300	0.058	
					Laguna Chacra	4436	0.023	
					Laguna Parón	4200	1.480	39.889
					Laguna Caballacocha	4650	0.044	
					Laguna Pampacocha	3319	0.109	
					Laguna Huandoy	4750	0.008	0.017
Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Santa	ANA	2015	PDF	2015	Laguna de Nevadas Aguja	5000	0.009	
					Laguna Parón	4174	0.001	
					Nueva Artesoncocha Alta	4700	0.022	0.134
					Nueva Artesoncocha Alta	4700	0.009	
Reconocimiento peligros naturales en la laguna nueva Artesoncocha Alta	INAIGEM	2016	PDF	2015	Nueva Artesoncocha Alta	4700	0.002	
					Laguna Artesoncocha			0.638
					Laguna Parón			
					Nueva Artesoncocha Alta		0.022	0.134
					Laguna Artesoncocha	4288	0.068	0.638
					Laguna Parón	4176	1.480	39.889
					Laguna Parón	4195		
Proyección de lagunas futuras en las cordilleras glaciares del Perú	Guardamino et al.	2019	PDF	2019	Nueva Artesoncocha Alta	4775	0.218	4.451
					Huancotay 1	4659	0.040	0.388
					Parón 2	4501	0.062	0.626
					Parón 3	4946	0.023	0.149
Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca 1948 - 2018	ANA	2019	PDF	2017	Nueva Artesoncocha Alta			0.341

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A4 Oferta y Demanda Hídrica para cada subcuenca según el escenario sin variación de la precipitación

Sin variación de precipitación												
Oferta hídrica actual (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.49	0.26	0.37	0.31	0.22	0.79	0.67	0.52	1.83	1.47	0.99
Octubre	1.05	0.84	0.56	0.74	0.66	0.55	2.25	2.10	1.91	4.04	3.60	3.00
Noviembre	1.14	0.89	0.54	0.75	0.66	0.52	1.99	1.82	1.59	3.91	3.38	2.66
Diciembre	1.26	1.03	0.72	0.92	0.84	0.71	2.67	2.51	2.29	4.86	4.37	3.69
Enero	1.25	1.02	0.70	0.90	0.82	0.69	2.67	2.51	2.29	4.81	4.32	3.64
Febrero	1.20	0.97	0.64	0.85	0.76	0.63	2.19	2.02	1.79	4.29	3.78	3.08
Marzo	1.30	1.04	0.73	0.77	0.61	0.47	2.19	1.74	1.51	4.25	3.35	2.63
Abril	1.05	0.84	0.55	0.73	0.65	0.54	2.21	2.06	1.87	4.00	3.56	2.95
Mayo	0.67	0.50	0.28	0.40	0.34	0.25	0.97	0.86	0.71	2.06	1.71	1.24
Junio	0.35	0.24	0.10	0.15	0.11	0.05	0.30	0.22	0.13	0.81	0.58	0.27
Julio	0.34	0.23	0.08	0.14	0.10	0.04	0.27	0.19	0.10	0.75	0.52	0.22
Agosto	0.35	0.24	0.10	0.16	0.12	0.06	0.33	0.25	0.16	0.84	0.61	0.31
AVERAGE	0.88	0.70	0.44	0.57	0.50	0.39	1.57	1.41	1.24	3.04	2.61	2.06
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>1.01</i>	<i>0.69</i>	<i>0.84</i>	<i>0.73</i>	<i>0.59</i>	<i>2.35</i>	<i>2.09</i>	<i>1.86</i>	<i>4.45</i>	<i>3.82</i>	<i>3.12</i>
<i>JFM change (%)</i>		<i>-19.23</i>	<i>-31.58</i>		<i>-13.32</i>	<i>-18.19</i>		<i>-11.16</i>	<i>-10.80</i>		<i>-14.23</i>	<i>-18.38</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.15</i>	<i>0.11</i>	<i>0.05</i>	<i>0.30</i>	<i>0.22</i>	<i>0.13</i>	<i>0.80</i>	<i>0.57</i>	<i>0.27</i>
<i>JJA change (%)</i>		<i>-31.40</i>	<i>-61.29</i>		<i>-26.26</i>	<i>-54.41</i>		<i>-26.01</i>	<i>-42.97</i>		<i>-28.73</i>	<i>-53.32</i>
StdDev	0.37	0.32	0.25	0.29	0.27	0.24	0.91	0.87	0.82	1.57	1.44	1.29

ANEXOS

Demanda hídrica (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.33	1.34	1.33	1.33	1.34
Octubre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11
Noviembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Diciembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
Enero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Febrero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
Marzo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.94	0.95	0.94	0.94	0.95
Abril	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Mayo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Junio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79
Julio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
AVERAGE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.17</i>	<i>1.16</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.16</i>	<i>1.17</i>
<i>JFM change (%)</i>								<i>-0.03</i>	<i>0.16</i>		<i>-0.03</i>	<i>0.16</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.56</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>	<i>1.56</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>
<i>JJA change (%)</i>								<i>-0.02</i>	<i>0.13</i>		<i>-0.02</i>	<i>0.13</i>
StdDev	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A5 Oferta y Demanda Hídrica para cada subcuenca según el escenario con aumento de la precipitación

Con aumento de precipitación												
Oferta hídrica actual (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.50	0.30	0.37	0.33	0.27	0.79	0.73	0.65	1.83	1.56	1.21
Octubre	1.05	0.89	0.69	0.74	0.72	0.69	2.25	2.35	2.50	4.04	3.96	3.86
Noviembre	1.14	0.93	0.66	0.75	0.71	0.65	1.99	2.02	2.06	3.91	3.68	3.37
Diciembre	1.26	1.10	0.89	0.92	0.92	0.91	2.67	2.81	3.00	4.86	4.81	4.77
Enero	1.25	1.08	0.87	0.90	0.89	0.87	2.67	2.81	3.00	4.81	4.75	4.70
Febrero	1.20	1.02	0.79	0.85	0.82	0.79	2.19	2.25	2.33	4.29	4.13	3.94
Marzo	1.30	1.16	1.06	0.77	0.75	0.83	2.19	2.48	3.26	4.25	4.35	5.05
Abril	1.05	0.89	0.68	0.73	0.71	0.68	2.21	2.31	2.45	4.00	3.90	3.79
Mayo	0.67	0.52	0.32	0.40	0.36	0.30	0.97	0.94	0.90	2.06	1.84	1.55
Junio	0.35	0.24	0.10	0.15	0.12	0.06	0.30	0.23	0.14	0.81	0.59	0.30
Julio	0.34	0.23	0.09	0.14	0.10	0.04	0.27	0.20	0.10	0.75	0.53	0.23
Agosto	0.35	0.25	0.11	0.16	0.12	0.07	0.33	0.26	0.18	0.84	0.63	0.35
AVERAGE	0.88	0.73	0.55	0.57	0.55	0.51	1.57	1.61	1.71	3.04	2.89	2.76
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>1.09</i>	<i>0.90</i>	<i>0.84</i>	<i>0.82</i>	<i>0.83</i>	<i>2.35</i>	<i>2.51</i>	<i>2.86</i>	<i>4.45</i>	<i>4.41</i>	<i>4.56</i>
<i>JFM change (%)</i>		<i>-13.12</i>	<i>-16.66</i>		<i>-1.79</i>	<i>1.25</i>		<i>6.73</i>	<i>14.14</i>		<i>-0.95</i>	<i>3.41</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.10</i>	<i>0.15</i>	<i>0.11</i>	<i>0.06</i>	<i>0.30</i>	<i>0.23</i>	<i>0.14</i>	<i>0.80</i>	<i>0.58</i>	<i>0.29</i>
<i>JJA change (%)</i>		<i>-30.89</i>	<i>-59.51</i>		<i>-24.68</i>	<i>-50.19</i>		<i>-23.90</i>	<i>-38.27</i>		<i>-27.36</i>	<i>-49.60</i>
StdDev	0.37	0.34	0.33	0.29	0.30	0.33	0.91	1.01	1.18	1.57	1.64	1.81

Demanda hídrica (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.34	1.34	1.33	1.34	1.34
Octubre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	1.11	1.12	1.11	1.11	1.12
Noviembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Diciembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44	1.43	1.43	1.44	1.43	1.43
Enero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Febrero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	1.14	1.15	1.13	1.14	1.15
Marzo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.95	0.95	0.94	0.95	0.95
Abril	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Mayo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.83	1.82	1.82	1.83	1.82	1.82
Junio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	1.78	1.79	1.79	1.78	1.79
Julio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
AVERAGE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>
<i>JFM change (%)</i>								<i>0.44</i>	<i>0.18</i>		<i>0.44</i>	<i>0.18</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>	<i>1.57</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>	<i>1.57</i>
<i>JJA change (%)</i>								<i>0.05</i>	<i>0.14</i>		<i>0.05</i>	<i>0.14</i>
StdDev	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A6 Oferta y Demanda Hídrica para cada subcuenca según el escenario con disminución de la precipitación

Con disminución de precipitación												
Oferta hídrica actual (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.47	0.22	0.37	0.29	0.17	0.79	0.62	0.39	1.83	1.38	0.77
Octubre	1.05	0.80	0.43	0.74	0.60	0.40	2.25	1.85	1.32	4.04	3.25	2.14
Noviembre	1.14	0.85	0.43	0.75	0.61	0.40	1.99	1.63	1.12	3.91	3.09	1.95
Diciembre	1.26	0.97	0.55	0.92	0.76	0.52	2.67	2.21	1.58	4.86	3.93	2.62
Enero	1.25	0.96	0.53	0.90	0.74	0.51	2.67	2.21	1.58	4.81	3.89	2.59
Febrero	1.20	0.92	0.49	0.85	0.69	0.46	2.19	1.80	1.25	4.29	3.43	2.22
Marzo	1.30	0.93	0.40	0.77	0.46	0.10	2.19	1.05	0.38	4.25	2.36	1.03
Abril	1.05	0.80	0.43	0.73	0.60	0.40	2.21	1.82	1.29	4.00	3.21	2.11
Mayo	0.67	0.48	0.23	0.40	0.31	0.19	0.97	0.78	0.51	2.06	1.59	0.94
Junio	0.35	0.24	0.09	0.15	0.11	0.05	0.30	0.22	0.11	0.81	0.56	0.24
Julio	0.34	0.23	0.08	0.14	0.10	0.04	0.27	0.19	0.09	0.75	0.52	0.21
Agosto	0.35	0.24	0.09	0.16	0.11	0.05	0.33	0.24	0.13	0.84	0.59	0.27
AVERAGE	0.88	0.66	0.33	0.57	0.45	0.27	1.57	1.22	0.81	3.04	2.32	1.42
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>0.93</i>	<i>0.48</i>	<i>0.84</i>	<i>0.63</i>	<i>0.36</i>	<i>2.35</i>	<i>1.69</i>	<i>1.07</i>	<i>4.45</i>	<i>3.23</i>	<i>1.95</i>
<i>JFM change (%)</i>		<i>-25.33</i>	<i>-48.94</i>		<i>-24.85</i>	<i>-43.59</i>		<i>-28.31</i>	<i>-36.48</i>		<i>-27.52</i>	<i>-39.70</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.15</i>	<i>0.11</i>	<i>0.04</i>	<i>0.30</i>	<i>0.22</i>	<i>0.11</i>	<i>0.80</i>	<i>0.56</i>	<i>0.24</i>
<i>JJA change (%)</i>		<i>-31.91</i>	<i>-63.11</i>		<i>-27.83</i>	<i>-58.81</i>		<i>-27.97</i>	<i>-47.94</i>		<i>-30.10</i>	<i>-57.19</i>
StdDev	0.37	0.29	0.17	0.29	0.24	0.18	0.91	0.75	0.57	1.57	1.27	0.90

ANEXOS

Demanda hídrica (m ³ /s)												
Mes	01 - LG			02 - LP			03 - CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.34	1.34	1.33	1.34	1.34
Octubre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	1.11	1.12	1.11	1.11	1.12
Noviembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Diciembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.44	1.43	1.43	1.44	1.43	1.43
Enero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
Febrero	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	1.14	1.15	1.13	1.14	1.15
Marzo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.95	0.95	0.94	0.95	0.95
Abril	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43	1.43
Mayo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.83	1.82	1.82	1.83	1.82	1.82
Junio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	1.78	1.79	1.79	1.78	1.79
Julio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32	1.32
AVERAGE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
<i>JFM avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>	<i>1.17</i>
<i>JFM change (%)</i>								<i>0.44</i>	<i>0.18</i>		<i>0.44</i>	<i>0.18</i>
<i>JJA avg (m³/s)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>	<i>1.57</i>	<i>1.56</i>	<i>1.57</i>	<i>1.57</i>
<i>JJA change (%)</i>								<i>0.05</i>	<i>0.14</i>		<i>0.05</i>	<i>0.14</i>
StdDev	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A7 Balance Hídrico para cada subcuenca según el escenario sin variación de la precipitación

Sin variación de precipitación												
Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas separadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01_LG			02_LP			03_CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.49	0.26	0.37	0.31	0.22	-0.54	-0.66	-0.81	0.49	0.14	-0.34
Octubre	1.05	0.84	0.56	0.74	0.66	0.55	1.13	0.99	0.79	2.93	2.49	1.89
Noviembre	1.14	0.89	0.54	0.75	0.66	0.52	0.56	0.39	0.16	2.48	1.95	1.23
Diciembre	1.26	1.03	0.72	0.92	0.84	0.71	1.23	1.07	0.85	3.43	2.94	2.26
Enero	1.25	1.02	0.70	0.90	0.82	0.69	1.25	1.09	0.87	3.39	2.90	2.22
Febrero	1.20	0.97	0.64	0.85	0.76	0.63	1.06	0.89	0.66	3.16	2.65	1.94
Marzo	1.30	1.04	0.73	0.77	0.61	0.47	1.25	0.80	0.56	3.31	2.41	1.69
Abril	1.05	0.84	0.55	0.73	0.65	0.54	0.78	0.64	0.44	2.57	2.13	1.52
Mayo	0.67	0.50	0.28	0.40	0.34	0.25	-0.86	-0.97	-1.12	0.23	-0.11	-0.59
Junio	0.35	0.24	0.10	0.15	0.11	0.05	-1.49	-1.57	-1.66	-0.98	-1.21	-1.52
Julio	0.34	0.23	0.08	0.14	0.10	0.04	-1.32	-1.40	-1.49	-0.84	-1.07	-1.37
Agosto	0.35	0.24	0.10	0.16	0.12	0.06	-0.99	-1.07	-1.16	-0.48	-0.71	-1.01
Promedio (m³/s)	0.88	0.70	0.44	0.57	0.50	0.39	0.17	0.02	-0.16	1.64	1.21	0.66
Δ Promedio (%)		-21.39	-50.42		-13.20	-31.38		-90.43	-192.58		-26.30	-59.81
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>1.01</i>	<i>0.69</i>	<i>0.84</i>	<i>0.73</i>	<i>0.59</i>	<i>1.19</i>	<i>0.92</i>	<i>0.70</i>	<i>3.29</i>	<i>2.65</i>	<i>1.95</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-19.23</i>	<i>-31.58</i>		<i>-13.32</i>	<i>-18.19</i>		<i>-22.10</i>	<i>-24.62</i>		<i>-19.27</i>	<i>-26.52</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.15</i>	<i>0.11</i>	<i>0.05</i>	<i>-1.26</i>	<i>-1.34</i>	<i>-1.44</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.99</i>	<i>-1.30</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-31.40</i>	<i>-61.29</i>		<i>-26.26</i>	<i>-54.41</i>		<i>6.15</i>	<i>7.27</i>		<i>29.96</i>	<i>30.75</i>

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.49	0.26	1.03	0.80	0.48	0.49	0.20	-0.27	0.49	0.14	-0.34
Octubre	1.05	0.84	0.56	1.79	1.50	1.10	2.92	2.56	1.96	2.93	2.49	1.89
Noviembre	1.14	0.89	0.54	1.89	1.55	1.07	2.45	2.00	1.29	2.48	1.95	1.23
Diciembre	1.26	1.03	0.72	2.18	1.87	1.43	3.42	3.01	2.35	3.43	2.94	2.26
Enero	1.25	1.02	0.70	2.15	1.83	1.39	3.40	2.99	2.32	3.39	2.90	2.22
Febrero	1.20	0.97	0.64	2.05	1.73	1.27	3.11	2.68	1.99	3.16	2.65	1.94
Marzo	1.30	1.04	0.73	2.07	1.65	1.20	3.31	2.51	1.82	3.31	2.41	1.69
Abril	1.05	0.84	0.55	1.78	1.50	1.09	2.56	2.20	1.60	2.57	2.13	1.52
Mayo	0.67	0.50	0.28	1.06	0.84	0.52	0.21	-0.07	-0.54	0.23	-0.11	-0.59
Junio	0.35	0.24	0.10	0.50	0.35	0.15	-0.98	-1.15	-1.45	-0.98	-1.21	-1.52
Julio	0.34	0.23	0.08	0.48	0.33	0.13	-0.83	-1.00	-1.30	-0.84	-1.07	-1.37
Agosto	0.35	0.24	0.10	0.51	0.36	0.16	-0.48	-0.64	-0.94	-0.48	-0.71	-1.01
Promedio (m³/s)	0.88	0.70	0.44	1.46	1.19	0.83	1.63	1.27	0.74	1.64	1.21	0.66
Δ Promedio (%)		-21.39	-50.42		-18.17	-42.93		-21.85	-54.84		-26.30	-59.81
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>1.01</i>	<i>0.69</i>	<i>2.09</i>	<i>1.74</i>	<i>1.29</i>	<i>3.27</i>	<i>2.72</i>	<i>2.05</i>	<i>3.29</i>	<i>2.65</i>	<i>1.95</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-19.23</i>	<i>-31.58</i>		<i>-16.86</i>	<i>-25.98</i>		<i>-16.77</i>	<i>-24.89</i>		<i>-19.27</i>	<i>-26.52</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.50</i>	<i>0.35</i>	<i>0.14</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.93</i>	<i>-1.23</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.99</i>	<i>-1.30</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-31.40</i>	<i>-61.29</i>		<i>-29.85</i>	<i>-59.12</i>		<i>21.11</i>	<i>32.85</i>		<i>29.96</i>	<i>30.75</i>
StdDev	0.37	0.32	0.25	0.66	0.58	0.49	1.71	1.58	1.44	1.72	1.58	1.43

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, con manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.72	0.55	0.32	4.19	2.55	2.55	3.65	1.89	1.74	3.59	1.83	1.66
Octubre	1.12	0.91	0.62	4.19	2.55	2.55	5.33	3.54	3.34	5.27	3.47	3.27
Noviembre	1.20	0.95	0.61	4.19	2.55	2.55	4.75	2.94	2.71	4.72	2.89	2.65
Diciembre	1.33	1.10	0.79	4.19	2.55	2.55	5.43	3.62	3.40	5.37	3.55	3.31
Enero	1.31	1.08	0.77	4.19	2.55	2.55	5.44	3.64	3.42	5.37	3.55	3.32
Febrero	1.27	1.03	0.71	4.19	2.55	2.55	5.25	3.44	3.21	5.24	3.41	3.16
Marzo	1.36	1.11	0.80	4.19	2.55	2.55	5.44	3.35	3.11	5.37	3.25	2.97
Abril	1.11	0.91	0.62	4.19	2.55	2.55	4.98	3.19	2.99	4.92	3.12	2.91
Mayo	0.73	0.57	0.34	4.19	2.55	2.55	3.34	1.58	1.43	3.30	1.53	1.38
Junio	0.42	0.31	0.16	4.19	2.55	2.55	2.70	0.98	0.89	2.64	0.92	0.82
Julio	0.41	0.30	0.15	4.19	2.55	2.55	2.87	1.15	1.06	2.81	1.08	0.99
Agosto	0.42	0.31	0.16	4.19	2.55	2.55	3.20	1.48	1.39	3.14	1.42	1.32
Promedio (m³/s)	0.95	0.76	0.50	4.19	2.55	2.55	4.37	2.57	2.39	4.31	2.50	2.31
Δ Promedio (%)		-19.92	-46.96		-39.18	-39.18		-41.21	-45.27		-41.97	-46.36
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.32</i>	<i>1.07</i>	<i>0.76</i>	<i>4.19</i>	<i>2.55</i>	<i>2.55</i>	<i>5.38</i>	<i>3.47</i>	<i>3.25</i>	<i>5.33</i>	<i>3.40</i>	<i>3.15</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-18.27</i>	<i>-29.66</i>		<i>-39.18</i>	<i>0.00</i>		<i>-35.41</i>	<i>-6.55</i>		<i>-36.12</i>	<i>-7.43</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.41</i>	<i>0.30</i>	<i>0.16</i>	<i>4.19</i>	<i>2.55</i>	<i>2.55</i>	<i>2.93</i>	<i>1.21</i>	<i>1.11</i>	<i>2.86</i>	<i>1.14</i>	<i>1.04</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-26.46</i>	<i>-48.18</i>		<i>-39.18</i>	<i>0.00</i>		<i>-58.75</i>	<i>-8.07</i>		<i>-60.18</i>	<i>-8.67</i>
StdDev	0.37	0.32	0.25	0.00	0.00	0.00	1.06	1.01	0.96	1.07	1.01	0.95

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A8 Balance Hídrico para cada subcuenca según el escenario con aumento de la precipitación

Con aumento de precipitación												
Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas separadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01_LG			02_LP			03_CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.50	0.30	0.37	0.33	0.27	-0.54	-0.61	-0.69	0.49	0.23	-0.13
Octubre	1.05	0.89	0.69	0.74	0.72	0.69	1.13	1.23	1.38	2.93	2.84	2.75
Noviembre	1.14	0.93	0.66	0.75	0.71	0.65	0.56	0.59	0.63	2.48	2.25	1.94
Diciembre	1.26	1.10	0.89	0.92	0.92	0.91	1.23	1.38	1.57	3.43	3.38	3.34
Enero	1.25	1.08	0.87	0.90	0.89	0.87	1.25	1.38	1.58	3.39	3.33	3.27
Febrero	1.20	1.02	0.79	0.85	0.82	0.79	1.06	1.10	1.19	3.16	2.99	2.79
Marzo	1.30	1.16	1.06	0.77	0.75	0.83	1.25	1.53	2.31	3.31	3.40	4.10
Abril	1.05	0.89	0.68	0.73	0.71	0.68	0.78	0.88	1.02	2.57	2.47	2.36
Mayo	0.67	0.52	0.32	0.40	0.36	0.30	-0.86	-0.88	-0.92	0.23	0.02	-0.27
Junio	0.35	0.24	0.10	0.15	0.12	0.06	-1.49	-1.56	-1.65	-0.98	-1.20	-1.48
Julio	0.34	0.23	0.09	0.14	0.10	0.04	-1.32	-1.40	-1.49	-0.84	-1.07	-1.37
Agosto	0.35	0.25	0.11	0.16	0.12	0.07	-0.99	-1.06	-1.14	-0.48	-0.69	-0.97
Promedio (m³/s)	0.88	0.73	0.55	0.57	0.55	0.51	0.17	0.22	0.32	1.64	1.50	1.36
Δ Promedio (%)		-17.07	-38.30		-4.73	-10.42		24.85	82.17		-8.82	-17.09
EFM (m³/s)	1.25	1.09	0.90	0.84	0.82	0.83	1.19	1.34	1.69	3.29	3.24	3.39
EFM cambio (%)		-13.12	-16.66		-1.79	1.25		12.92	26.33		-1.44	4.57
JJA (m³/s)	0.35	0.24	0.10	0.15	0.11	0.06	-1.27	-1.34	-1.43	-0.77	-0.98	-1.28
JJA cambio (%)		-30.89	-59.51		-24.68	-50.19		5.72	6.68		28.68	29.46

ANEXOS

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.50	0.30	1.03	0.83	0.57	0.49	0.29	-0.05	0.49	0.23	-0.13
Octubre	1.05	0.89	0.69	1.79	1.61	1.37	2.92	2.91	2.82	2.93	2.84	2.75
Noviembre	1.14	0.93	0.66	1.89	1.64	1.30	2.45	2.29	2.00	2.48	2.25	1.94
Diciembre	1.26	1.10	0.89	2.18	2.01	1.80	3.42	3.45	3.43	3.43	3.38	3.34
Enero	1.25	1.08	0.87	2.15	1.97	1.74	3.40	3.42	3.38	3.39	3.33	3.27
Febrero	1.20	1.02	0.79	2.05	1.84	1.58	3.11	3.01	2.83	3.16	2.99	2.79
Marzo	1.30	1.16	1.06	2.07	1.92	1.90	3.31	3.51	4.27	3.31	3.40	4.10
Abril	1.05	0.89	0.68	1.78	1.60	1.36	2.56	2.54	2.44	2.57	2.47	2.36
Mayo	0.67	0.52	0.32	1.06	0.88	0.63	0.21	0.06	-0.23	0.23	0.02	-0.27
Junio	0.35	0.24	0.10	0.50	0.36	0.16	-0.98	-1.13	-1.42	-0.98	-1.20	-1.48
Julio	0.34	0.23	0.09	0.48	0.34	0.13	-0.83	-1.00	-1.30	-0.84	-1.07	-1.37
Agosto	0.35	0.25	0.11	0.51	0.37	0.17	-0.48	-0.63	-0.91	-0.48	-0.69	-0.97
Promedio (m³/s)	0.88	0.73	0.55	1.46	1.28	1.06	1.63	1.56	1.44	1.64	1.50	1.36
Δ Promedio (%)		-17.07	-38.30		-12.22	-27.34		-4.29	-11.72		-8.82	-17.09
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>1.09</i>	<i>0.90</i>	<i>2.09</i>	<i>1.91</i>	<i>1.74</i>	<i>3.27</i>	<i>3.31</i>	<i>3.49</i>	<i>3.29</i>	<i>3.24</i>	<i>3.39</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-13.12</i>	<i>-16.66</i>		<i>-8.57</i>	<i>-8.94</i>		<i>1.20</i>	<i>5.49</i>		<i>-1.44</i>	<i>4.57</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.10</i>	<i>0.50</i>	<i>0.35</i>	<i>0.15</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.92</i>	<i>-1.21</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.98</i>	<i>-1.28</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-30.89</i>	<i>-59.51</i>		<i>-29.02</i>	<i>-56.53</i>		<i>19.86</i>	<i>31.55</i>		<i>28.68</i>	<i>29.46</i>
StdDev	0.37	0.34	0.33	0.66	0.65	0.65	1.71	1.80	1.98	1.72	1.79	1.96

ANEXOS

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, con manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.72	0.57	0.37	4.19	2.55	2.55	3.65	1.94	1.86	3.59	1.88	1.79
Octubre	1.12	0.96	0.75	4.19	2.55	2.55	5.33	3.78	3.93	5.27	3.72	3.86
Noviembre	1.20	0.99	0.72	4.19	2.55	2.55	4.75	3.14	3.18	4.72	3.10	3.12
Diciembre	1.33	1.16	0.96	4.19	2.55	2.55	5.43	3.93	4.12	5.37	3.85	4.02
Enero	1.31	1.14	0.93	4.19	2.55	2.55	5.44	3.93	4.13	5.37	3.85	4.02
Febrero	1.27	1.08	0.85	4.19	2.55	2.55	5.25	3.65	3.74	5.24	3.63	3.70
Marzo	1.36	1.23	1.13	4.19	2.55	2.55	5.44	4.08	4.86	5.37	3.97	4.69
Abril	1.11	0.95	0.74	4.19	2.55	2.55	4.98	3.43	3.57	4.92	3.36	3.49
Mayo	0.73	0.58	0.39	4.19	2.55	2.55	3.34	1.67	1.63	3.30	1.63	1.59
Junio	0.42	0.31	0.17	4.19	2.55	2.55	2.70	0.99	0.90	2.64	0.93	0.84
Julio	0.41	0.30	0.15	4.19	2.55	2.55	2.87	1.15	1.06	2.81	1.08	0.99
Agosto	0.42	0.31	0.17	4.19	2.55	2.55	3.20	1.49	1.41	3.14	1.42	1.34
Promedio (m³/s)	0.95	0.80	0.61	4.19	2.55	2.55	4.37	2.77	2.87	4.31	2.70	2.79
Δ Promedio (%)		-15.90	-35.67		-39.18	-39.18		-36.64	-34.37		-37.33	-35.36
EFM (m³/s)	1.32	1.15	0.97	4.19	2.55	2.55	5.38	3.89	4.24	5.33	3.82	4.14
EFM cambio (%)		-12.47	-15.72		-39.18	0.00		-27.69	9.07		-28.36	8.35
JJA (m³/s)	0.41	0.31	0.16	4.19	2.55	2.55	2.93	1.21	1.12	2.86	1.15	1.06
JJA cambio (%)		-26.03	-46.85		-39.18	0.00		-58.58	-7.37		-59.98	-7.84
StdDev	0.37	0.34	0.33	0.00	0.00	0.00	1.06	1.16	1.34	1.07	1.15	1.32

Fuente: Elaboración propia

ANEXOS

Tabla A9 Balance Hídrico para cada subcuenca según el escenario con disminución de la precipitación

Con disminución de precipitación												
Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas separadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01_LG			02_LP			03_CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.47	0.22	0.37	0.29	0.17	-0.54	-0.71	-0.95	0.49	0.05	-0.57
Octubre	1.05	0.80	0.43	0.74	0.60	0.40	1.13	0.74	0.20	2.93	2.14	1.02
Noviembre	1.14	0.85	0.43	0.75	0.61	0.40	0.56	0.20	-0.31	2.48	1.66	0.52
Diciembre	1.26	0.97	0.55	0.92	0.76	0.52	1.23	0.78	0.15	3.43	2.50	1.19
Enero	1.25	0.96	0.53	0.90	0.74	0.51	1.25	0.79	0.15	3.39	2.47	1.17
Febrero	1.20	0.92	0.49	0.85	0.69	0.46	1.06	0.65	0.11	3.16	2.29	1.07
Marzo	1.30	0.93	0.40	0.77	0.46	0.10	1.25	0.11	-0.57	3.31	1.42	0.08
Abril	1.05	0.80	0.43	0.73	0.60	0.40	0.78	0.39	-0.14	2.57	1.78	0.68
Mayo	0.67	0.48	0.23	0.40	0.31	0.19	-0.86	-1.05	-1.31	0.23	-0.23	-0.89
Junio	0.35	0.24	0.09	0.15	0.11	0.05	-1.49	-1.57	-1.67	-0.98	-1.22	-1.54
Julio	0.34	0.23	0.08	0.14	0.10	0.04	-1.32	-1.40	-1.50	-0.84	-1.07	-1.39
Agosto	0.35	0.24	0.09	0.16	0.11	0.05	-0.99	-1.08	-1.19	-0.48	-0.73	-1.06
Promedio (m³/s)	0.88	0.66	0.33	0.57	0.45	0.27	0.17	-0.18	-0.59	1.64	0.92	0.02
Δ Promedio (%)		-25.71	-62.55		-21.67	-52.33		-203.50	-438.08		-43.87	-98.48
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>0.93</i>	<i>0.48</i>	<i>0.84</i>	<i>0.63</i>	<i>0.36</i>	<i>1.19</i>	<i>0.52</i>	<i>-0.10</i>	<i>3.29</i>	<i>2.06</i>	<i>0.77</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-25.33</i>	<i>-48.94</i>		<i>-24.85</i>	<i>-43.59</i>		<i>-56.56</i>	<i>-119.79</i>		<i>-37.42</i>	<i>-62.39</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.15</i>	<i>0.11</i>	<i>0.04</i>	<i>-1.26</i>	<i>-1.35</i>	<i>-1.46</i>	<i>-0.77</i>	<i>-1.01</i>	<i>-1.33</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-31.91</i>	<i>-63.11</i>		<i>-27.83</i>	<i>-58.81</i>		<i>6.70</i>	<i>7.84</i>		<i>31.53</i>	<i>31.95</i>

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, sin manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.65	0.47	0.22	1.03	0.76	0.39	0.49	0.11	-0.49	0.49	0.05	-0.57
Octubre	1.05	0.80	0.43	1.79	1.40	0.83	2.92	2.21	1.10	2.93	2.14	1.02
Noviembre	1.14	0.85	0.43	1.89	1.46	0.83	2.45	1.72	0.58	2.48	1.66	0.52
Diciembre	1.26	0.97	0.55	2.18	1.73	1.07	3.42	2.58	1.28	3.43	2.50	1.19
Enero	1.25	0.96	0.53	2.15	1.70	1.04	3.40	2.55	1.26	3.39	2.47	1.17
Febrero	1.20	0.92	0.49	2.05	1.61	0.96	3.11	2.33	1.13	3.16	2.29	1.07
Marzo	1.30	0.93	0.40	2.07	1.38	0.50	3.31	1.55	0.00	3.31	1.42	0.08
Abril	1.05	0.80	0.43	1.78	1.39	0.83	2.56	1.85	0.75	2.57	1.78	0.68
Mayo	0.67	0.48	0.23	1.06	0.80	0.42	0.21	-0.18	-0.83	0.23	-0.23	-0.89
Junio	0.35	0.24	0.09	0.50	0.35	0.14	-0.98	-1.15	-1.47	-0.98	-1.22	-1.54
Julio	0.34	0.23	0.08	0.48	0.33	0.12	-0.83	-1.00	-1.32	-0.84	-1.07	-1.39
Agosto	0.35	0.24	0.09	0.51	0.36	0.14	-0.48	-0.66	-0.98	-0.48	-0.73	-1.06
Promedio (m³/s)	0.88	0.66	0.33	1.46	1.11	0.60	1.63	0.99	0.08	1.64	0.92	0.02
Δ Promedio (%)		-25.71	-62.55		-24.12	-58.53		-39.18	-94.85		-43.87	-98.48
<i>EFM (m³/s)</i>	<i>1.25</i>	<i>0.93</i>	<i>0.48</i>	<i>2.09</i>	<i>1.56</i>	<i>0.83</i>	<i>3.27</i>	<i>2.14</i>	<i>0.80</i>	<i>3.29</i>	<i>2.06</i>	<i>0.77</i>
<i>EFM cambio (%)</i>		<i>-25.33</i>	<i>-48.94</i>		<i>-25.14</i>	<i>-46.78</i>		<i>-34.53</i>	<i>-62.91</i>		<i>-37.42</i>	<i>-62.39</i>
<i>JJA (m³/s)</i>	<i>0.35</i>	<i>0.24</i>	<i>0.09</i>	<i>0.50</i>	<i>0.35</i>	<i>0.13</i>	<i>-0.77</i>	<i>-0.94</i>	<i>-1.26</i>	<i>-0.77</i>	<i>-1.01</i>	<i>-1.33</i>
<i>JJA cambio (%)</i>		<i>-31.91</i>	<i>-63.11</i>		<i>-30.68</i>	<i>-61.76</i>		<i>22.57</i>	<i>34.05</i>		<i>31.53</i>	<i>31.95</i>
StdDev	0.37	0.29	0.17	0.66	0.53	0.35	1.71	1.39	1.01	1.72	1.39	1.01

ANEXOS

Balance Hídrico (m ³ /s, subcuencas conectadas, con manejo reservorio)												
Mes	01-LG			02-LP			03-CA			SLP		
	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050	2016	2030	2050
Septiembre	0.72	0.54	0.28	4.19	2.55	2.55	3.65	1.84	1.60	3.59	1.77	1.53
Octubre	1.12	0.86	0.50	4.19	2.55	2.55	5.33	3.29	2.75	5.27	3.22	2.68
Noviembre	1.20	0.91	0.50	4.19	2.55	2.55	4.75	2.75	2.24	4.72	2.69	2.18
Diciembre	1.33	1.04	0.61	4.19	2.55	2.55	5.43	3.33	2.70	5.37	3.26	2.61
Enero	1.31	1.02	0.60	4.19	2.55	2.55	5.44	3.34	2.70	5.37	3.25	2.61
Febrero	1.27	0.98	0.56	4.19	2.55	2.55	5.25	3.20	2.66	5.24	3.16	2.60
Marzo	1.36	0.99	0.47	4.19	2.55	2.55	5.44	2.66	1.98	5.37	2.52	2.07
Abril	1.11	0.86	0.49	4.19	2.55	2.55	4.98	2.94	2.41	4.92	2.87	2.34
Mayo	0.73	0.55	0.29	4.19	2.55	2.55	3.34	1.50	1.24	3.30	1.46	1.18
Junio	0.42	0.30	0.15	4.19	2.55	2.55	2.70	0.98	0.88	2.64	0.92	0.81
Julio	0.41	0.30	0.15	4.19	2.55	2.55	2.87	1.15	1.05	2.81	1.08	0.98
Agosto	0.42	0.31	0.16	4.19	2.55	2.55	3.20	1.47	1.36	3.14	1.40	1.29
Promedio (m³/s)	0.95	0.72	0.40	4.19	2.55	2.55	4.37	2.37	1.96	4.31	2.30	1.91
Δ Promedio (%)		-23.95	-58.26		-39.18	-39.18		-45.70	-55.00		-46.65	-55.80
EFM (m³/s)	1.32	1.00	0.54	4.19	2.55	2.55	5.38	3.07	2.45	5.33	2.98	2.43
EFM cambio (%)		-24.07	-45.74		-39.18	0.00		-43.01	-20.13		-44.08	-18.54
JJA (m³/s)	0.41	0.30	0.15	4.19	2.55	2.55	2.93	1.20	1.09	2.86	1.13	1.02
JJA cambio (%)		-26.89	-49.53		-39.18	0.00		-58.99	-8.81		-60.46	-9.54
StdDev	0.37	0.29	0.17	0.00	0.00	0.00	1.06	0.88	0.68	1.07	0.87	0.68

Fuente: Elaboración propia

Tabla A10 Secuencia de eventos relevantes para la SLP

Eventos	Año	Día-Mes	Fuente
Desastre: Aluvión de la laguna Palcacocha a Huaraz (aprox. 5000 muertes)	1941	13 diciembre	Carey, 2014
Inicio de construcción de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato	1943		Carey, 2014
Creación de la Comisión de Control de Lagunas de la Cordillera Blanca (CCLCB)	1951		Carey, 2014
Desastre: 2 aluviones de la laguna Artesoncocha hacia la laguna Parón	1951		Carey, 2014
Se coloca una pared de bolsas de arena en la laguna Parón	1952		Carey, 2014
Inauguración de la Central Hidroeléctrica Cañón del Pato administrada por empresas estatales	1958		Carey, 2014
Desastre: Avalancha del Huascarán a Ranrahirca (aprox. 4000 muertes)	1962	10 enero	Carey, 2014
Estudio de ingenieros franceses (Lliboutry) recomienda análisis del dique morrénico de Parón	1967		French, 2016; French 2019
Inicio de la construcción del túnel de la laguna Parón	1968		French, 2016; French 2019
Desastre: Avalancha del Huascarán a Yungay (aprox. 15 000 muertes)	1970	31 mayo	Carey, 2014
Desactivación de la Comisión de Control de Lagunas de la Cordillera Blanca (CCLCB)	1971		Carey, 2014
Fin de la construcción del túnel en la laguna Parón (4155 msnm; 36 hm ³)	1984		Carey, 2014; French, 2016; French 2019
Estudio de S&Z establece nivel máximo de la laguna Parón en 4185 msnm (54 hm ³)	1986		French, 2016; French 2019
Fin de la instalación de compuertas para control del caudal de la laguna Parón	1992		Carey, 2014; French, 2016; French 2019
Inicio de manejo de la laguna Parón por ELETROPERU	1992		French, 2016; French 2019
Entrega de primera licencia de uso de agua de la laguna Parón para fines energéticos a ELECTROPERU que otorga el derecho de descargar un caudal máximo de 8m ³ /s y mínimo de 1 m ³ /s	1994	7 noviembre	Carey, 2014; French, 2016; French 2019
ELECTROPERU se inscribe como propietario de la infraestructura de descarga, la laguna Parón y sus alrededores (540 ha)	1994	10 noviembre	Carey, 2014; French, 2016; French 2019
La Central Hidroeléctrica y la infraestructura de la laguna Parón fueron vendidas a Duke Energy EGENOR S.A.	1996		French, 2016; French 2019
Transferencia de la licencia de uso aguas y del título de propiedad de la laguna Parón a Duke Energy EGENOR S.A.	1996		French, 2016; French 2019
Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) cierra	1997		Carey, 2014; French, 2016; French 2019
Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) reinicia operaciones	2001		Carey, 2014
El alcalde de la provincia de Huaylas solicita la revocación de la licencia a Duke Energy EGENOR S.A. por el uso indiscriminado de las aguas, destruyendo carreteras, puentes y canales de irrigación locales	2001	Septiembre	French, 2016; French 2019
El presidente de la Comisión de Regantes Parón-Llullán acusa a Duke Energy EGENOR S.A. de hacer uso arbitrario y abusivo del agua, infringiendo la Ley General de Aguas de 1969	2002		French, 2016; French 2019
Duke Energy EGENOR S.A. responde a las acusaciones de la población local	2002		French, 2016; French 2019
El ANP Parque Nacional Huascarán inspecciona la laguna Parón y recomienda elaborar EIA	2004		French, 2016; French 2019
Supervisión de OSINERGMIN identifica infracciones a la normativa ambiental por parte de Duke Energy EGENOR S.A. como el daño a canales de riego debido al caudal de descarga	2005	Julio	Egúsquiza, 2017
La Administración Técnica del Distrito de Riego de Huaraz (ATDR-Hz) reduce el caudal de descarga de la licencia de 8 m ³ /s a 5.5 m ³ /s	2006		French, 2016; French 2019
Supervisión de OSINERGMIN identifica infracciones a la normativa ambiental	2006	Junio	Egúsquiza, 2017
El Ministerio de Energía y Minas solicita un EIA para la laguna Parón	2007		French, 2016; French 2019
La Autoridad Autónoma de la Cuenca Hidrográfica del Río Santa (AACHS) suspende temporalmente la licencia de uso de agua	2007	Agosto	Egúsquiza, 2017; French, 2016; French 2019

ANEXOS

Luego de la suspensión temporal, se limita la descarga a 2.63 m ³ /s	2007		Egúsquiza, 2017; French, 2016; French 2019
Duke Energy EGENOR S.A. interpone una demanda de amparo ante la suspensión de su licencia	2007		French, 2016; French 2019
El 15to Juzgado Especializado Civil de Lima anula la suspensión de la licencia a favor de la empresa	2007		French, 2016; French 2019
Supervisión de OSINERGMIN identifica infracciones a la normativa ambiental	2007	Junio	Egúsquiza, 2017; French, 2019
Con la decisión legal aún pendiente, Duke Energy EGENOR S.A. empieza a descargar más de 2.63 m ³ /s	2008	Julio	French, 2016; French 2019
El Frente de Defensa de la laguna Parón (Comunidad Cruz de Mayo, la Junta de Regantes Parón-Llullán y residentes de Caraz) toman el control de laguna Parón y su infraestructura, fijando la descarga en 1 m ³ /s	2008	Julio	Egúsquiza, 2017; French, 2016; French 2019
Se supera el máximo nivel de seguridad de la laguna Parón (4185 msnm)	2009	Febrero	French, 2016; French 2019
La laguna Parón alcanza un nivel de 4195 msnm	2009	Fines	French, 2016; French 2019
Recomendación técnica de la ANA: descarga máxima de la laguna Parón de 4 m ³ /s	2010		French, 2016; French 2019
La laguna Parón legalmente deja de ser propiedad privada y se registró a nombre del Estado a través de SERNANP	2010	Febrero	Egúsquiza, 2017; French, 2016
El Frente de Defensa de la laguna Parón permite reducir el nivel de la laguna por primera vez desde 2008	2010	Febrero	French, 2016; French 2019
OSINERGMIN multa a Duke Energy EGENOR S.A. por erosionar las márgenes del río Parón	2010	Mayo	Egúsquiza, 2017
Instauración del Comité de operación (ANA y actores locales) para manejar la descarga de la laguna Parón	2010-2011		Egúsquiza, 2017; French, 2016; French 2019
Instauración del Comité de gestión multisectorial (actores locales y estatales) para dialogar entre diversos usuarios sobre el plan de operación de la laguna	2010-2011		French, 2016; French 2019
Duke Energy EGENOR S.A. readquiere sus derechos sobre las licencias de uso de agua suspendidas a partir de una sentencia favorable del Tribunal Constitucional, luego de la demanda de amparo de 2007	2011	Mayo	Egúsquiza, 2017
Luego de la sentencia del Tribunal Constitucional, se establece una descarga de 5.5 m ³ /s	2011		Egúsquiza, 2017
La coalición de actores locales expresa su descontento ante el fallo del Tribunal Constitucional	2011		French, 2016; French 2019
Se disuelve el Comité de operación de la laguna Parón, luego de finalizado el estado de emergencia, condicionado por la decisión del Tribunal Constitucional	2011	Octubre	French, 2016; French 2019
Inicio del mantenimiento integral de la infraestructura de descarga de la laguna Parón	2011		French, 2016; French 2019
Inicia funciones el Tribunal Nacional de Resolución de Controversias de la ANA, pero se limita a solucionar procesos administrativos y no conflictos hídricos intersectoriales	2014	Febrero	French, 2016; French 2019
Finaliza el mantenimiento integral de la infraestructura de descarga de la laguna Parón	2014		French, 2016; French 2019
La ANA crea la Unidad de Prevención y Gestión de Conflictos en un intento por resolver el conflicto de Parón	2014	Agosto	French, 2016; French 2019
La laguna Parón alcanza un nivel de 4184 msnm y se previó un fenómeno de El Niño moderado-severo	2015	Fines de año	French, 2016; French 2019
ANA desarrolla y difunde el plan de regulación basado en datos hidrológicos históricos y la necesidad de usuarios locales para la época húmeda 2015-2016	2015	Agosto	French, 2016; French 2019
Ciertos usuarios locales rechazan el plan, retrasando el avance del plan de regulación	2015		French, 2016; French 2019
Inicio del plan de regulación 2015-2016 de la ANA	2016	Enero	French, 2016; French 2019
Duke Energy EGENOR S.A. es reemplazada por Orazul Energy Perú S.A.	2016		French, 2019

Fuente: Elaboración propia