

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“RECONSTRUCCIÓN HISTÓRICA Y PROYECCIONES DE  
CAMBIO CLIMÁTICO DE LA SEGURIDAD HÍDRICA EN LA  
CUENCA VILCANOTA, URUBAMBA”**

**Presentada por:  
ANDRES GOYBURO PEÑA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima - Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“RECONSTRUCCIÓN HISTORICA Y PROYECCIONES DE  
CAMBIO CLIMÁTICO DE LA SEGURIDAD HÍDRICA EN LA  
CUENCA VILCANOTA, URUBAMBA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**ANDRES GOYBURO PEÑA**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Dr. Abel Mejía Marcacuzco  
**PRESIDENTE**

Dr. Waldo Lavado Casimiro  
**ASESOR**

Ph.D. Eduardo Chávarri Velarde  
**MIEMBRO**

Dr. Néstor Montalvo Aquiñigo  
**MIEMBRO**

Dr. Pedro Rau Lavado  
**CO - ASESOR**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi esposa Andrea, por todo su apoyo y amor. A mis padres y hermanos que son para mí una guía y soporte. A nuestros seres queridos que no están con nosotros pero se que estarían muy felices de compartir este logro conmigo: mi suegro Don Juan Ramos, mis tíos Pepe Goyburo y Silvia Durand, y a la prima Alicia Ramos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*El desarrollo de la presente investigación se dio en el marco del proyecto RAHU con Contrato N° 005-2019-FONDECYT “Water Security and Climate Change adaptation in Peruvian glacier-fed rivers basins”, financiado por el Fondo Newton-Paulet, a través de NERC y Fondecyt.*

*Un agradecimiento especial al Dr. Pedro Rau, por permitirme realizar la investigación y todo lo enseñado. Al Dr. Waldo Lavado, por sus indicaciones y recomendaciones. También a todos los miembros de proyecto RAHU. Adicionalmente agradecer a todo el equipo del CITA (Centro de Investigación y Tecnología del Agua) por su ayuda y amistad.*

*Finalmente a los miembros del jurado que evaluaron la tesis: Dr. Abel Mejia, Ph.D. Eduardo Chávarri y Dr. Néstor Montalvo. Cuyas observaciones y recomendaciones permitieron mejorar el trabajo realizado.*

# ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN . . . . .	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA . . . . .	3
2.1.	GESTIÓN Y SEGURIDAD HÍDRICA . . . . .	3
2.1.1.	Desafíos de la seguridad hídrica en el Perú . . . . .	5
2.2.	MARCO LEGAL Y POLÍTICO PARA EL USO DEL AGUA EN CUSCO . . . . .	6
2.3.	BALANCE HÍDRICO . . . . .	6
2.4.	CAMBIO CLIMÁTICO . . . . .	8
2.4.1.	Modelos climáticos . . . . .	10
2.4.2.	Downscaling . . . . .	11
2.5.	SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP . . . . .	11
2.5.1.	Aplicación . . . . .	12
2.5.2.	Limitaciones . . . . .	14
III.	MATERIALES Y MÉTODOS . . . . .	15
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO . . . . .	15
3.2.	MATERIALES . . . . .	16
3.2.1.	Equipos . . . . .	16
3.2.2.	Programas de computo . . . . .	17
3.2.3.	Análisis y descripción de datos . . . . .	17
3.2.3.1.	Precipitación . . . . .	17
3.2.3.2.	Temperatura . . . . .	18
3.2.3.3.	Humedad relativa . . . . .	19
3.2.3.4.	Velocidad del viento . . . . .	19
3.2.3.5.	Caudales . . . . .	20
3.2.3.6.	Cobertura vegetal . . . . .	21
3.2.3.7.	Población . . . . .	22
3.2.3.8.	Licencias de uso del Agua . . . . .	22
3.3.	METODOLOGÍA . . . . .	23
3.3.1.	Esquema metodológico . . . . .	23
3.3.2.	Modelo WEAP . . . . .	24
3.3.3.	Caudal de entrada . . . . .	26

3.3.4.	Método de modelamiento . . . . .	26
3.3.5.	Embalse . . . . .	28
3.3.6.	Central hidroeléctrica de paso . . . . .	29
3.3.7.	Demandas de agua . . . . .	29
3.3.7.1.	Estimación del intervalo de confianza (IC) . . . . .	30
3.3.8.	Calibración y validación . . . . .	31
3.3.9.	Escenarios a evaluar . . . . .	33
3.3.9.1.	Proyección de variables climáticas (2017-2099) . . . . .	33
3.3.9.2.	Proceso de downscaling con “Quantile mapping” . . . . .	33
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN . . . . .	36
4.1.	VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DEL PRODUCTO PISCO . . . . .	36
4.2.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO . . . . .	37
4.3.	DEMANDA Y SEGURIDAD HÍDRICA INICIAL . . . . .	39
4.3.1.	Demanda agrícola . . . . .	40
4.3.2.	Demanda poblacional . . . . .	41
4.3.3.	Demanda industrial . . . . .	42
4.3.4.	Demanda energética . . . . .	42
4.3.5.	Seguridad hídrica en el periodo 2010-2018 . . . . .	42
4.3.5.1.	Ingresos de agua . . . . .	43
4.3.5.2.	Salidas de agua . . . . .	44
4.4.	ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO . . . . .	45
4.5.	DEMANDA Y SEGURIDAD HÍDRICA FUTURA . . . . .	47
4.5.1.	Demanda poblacional . . . . .	47
4.5.2.	Demanda agrícola . . . . .	49
4.5.3.	Demanda industrial . . . . .	49
4.5.4.	Escenario futuro con el cambio climático . . . . .	50
4.5.5.	Escenario de CC con cambios socio-económicos . . . . .	52
V.	CONCLUSIONES . . . . .	56
VI.	RECOMENDACIONES . . . . .	59
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .	61
VIII.	ANEXOS . . . . .	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Definición de seguridad hídrica: el agua como fuente de producción y destrucción Fuente: Grey y Sadoff (2007). . . . .	4
Figura 2	La compleja relación entre las variables observadas (a, b, c) y las emisiones de gases de efecto invernadero (d) Fuente: IPCC (2014) . . . . .	9
Figura 3	Esquema de los procesos físicos y la resolución espacial que se utilizan para los GCM. Fuente: NOAA (2017). . . . .	10
Figura 4	Interfaz de WEAP, diagrama esquemático. Fuente: Sieber y Purkey (2015). . . . .	13
Figura 5	Área de estudio cuenca Vilcanota - Urubamba. . . . .	15
Figura 6	Mapa de las subcuencas que forman el sistema de la cuenca VUB . . . . .	16
Figura 7	Precipitación promedio mensual para los años 1981-2016 . . . . .	18
Figura 8	Temperatura promedio mensual para los años 1981-2016 . . . . .	19
Figura 9	Velocidad de viento promedio mensual . . . . .	20
Figura 10	Caudal promedio mensual en la estación Pisac (1981-2016) . . . . .	20
Figura 11	Porcentaje de cobertura en la cuenca VUB . . . . .	21
Figura 12	Esquema metodológico de la investigación. . . . .	24
Figura 13	Periodos de tiempo para los datos utilizados y etapas del modelamiento. . . . .	25
Figura 14	Esquema del modelo WEAP de la cuenca VUB . . . . .	25
Figura 15	Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo Fuente: Sieber y Purkey (2015). . . . .	27
Figura 16	Zonas de simulación de embalses Fuente: Sieber y Purkey (2015). . . . .	28
Figura 17	Resultado del proceso de empírico de cuantiles para la variable de precipitación en la subcuenca 1. Donde $PP45$ : representa la $P$ sin corregir del escenario Rcp45; $PP45c$ : corresponde a la serie corregida; $PP$ : es la serie de dato observados. . . . .	35
Figura 18	Correlación de la precipitación y temperatura entre el producto PISCO y observada en la estación Granja Kcayra (1981-2016) . . . . .	36
Figura 19	Caudal simulado y observado (1987-2016) . . . . .	38
Figura 20	Promedio mensual del caudal simulado y observado (1987-2016) . . . . .	38

Figura 21 Promedio mensual de los ingresos y salidas de agua al área de estudio (2010-2018) . . . . .	43
Figura 22 Promedio mensual de los ingresos al área de estudio (2010-2018) .	44
Figura 23 Promedio mensual de las salidas al área de estudio (2010-2018) .	45
Figura 24 Anomalías de la precipitación anual (con respecto a la media de los años 1981-2016) para el periodo 1981-2099, para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. . . . .	46
Figura 25 Cambio de la media mensual de la precipitación para los años 2040, 2070 y 2099 para el escenarios RCP 4.5 con respecto a la media del periodo (1981–2016). . . . .	46
Figura 26 Relación entre la demanda de agua y el número de habitantes . .	47
Figura 27 Demanda poblacional proyectada (2010-2099) . . . . .	48
Figura 28 Demandas agrícolas estimadas para el Escenario 1 y Escenario 2 (2020-2099) . . . . .	49
Figura 29 Tendencia lineal positiva de las demandas industriales . . . . .	50
Figura 30 Demanda industrial proyectada (2019-2099) . . . . .	50
Figura 31 Demanda no cubierta anual para el Escenario 1 y 2 para el periodo 2017-2099 . . . . .	51
Figura 32 Demanda no cubierta mensual para los Escenario 1 y 2 en la cuenca Vilcanota-Urubamba para el periodo (2017-2099) . . . . .	52
Figura 33 Demanda no cubierta anual con cambios socio-económicos en los Escenarios 1,2,3 y 4 para el periodo 2050-2099 . . . . .	53
Figura 34 Demanda no cubierta mensual para todos los escenarios con cambios socio económicos en la cuenca Vilcanota-Urubamba para el periodo (1981-2099) . . . . .	55



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Área correspondiente a cada cobertura según la subcuenca. . . . .	21
Tabla 2	Poblacion en el subcuenca 1 y 4 . . . . .	22
Tabla 3	Demandas totales anuales en VUB (2018) . . . . .	22
Tabla 4	Rango de valores para la clasificación de las métricas según Moriasi et al. (2007) . . . . .	32
Tabla 5	Características de los escenarios a evaluar . . . . .	33
Tabla 6	Parámetros calibrados para el modelo . . . . .	37
Tabla 7	Valores de las métricas para los caudales observados y simulados .	39
Tabla 8	Demandas actuales estimadas en el área de estudio . . . . .	40
Tabla 9	Demanda agrícola estimada por cultivo en el área de estudio . . . . .	41
Tabla 10	Empresas generadoras de energia en el área de estudio . . . . .	42
Tabla 11	Ingreso total anual promedio al área de estudio . . . . .	44
Tabla 12	Salida total anual promedio al área de estudio . . . . .	45
Tabla 13	Demanda poblacional futura anual en el área de estudio . . . . .	48

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	Modelo hidrológico en WEAP. . . . .	67
Anexo 2	Promedio mensual de la precipitación y temperatura. . . . .	68
Anexo 3	Demanda agrícola futura. . . . .	69
Anexo 4	Demanda industrial futura. . . . .	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

- IPCC:** Panel Intergubernamental en Cambio Climático
- CC:** Cambio Climático
- WEAP:** Water Evaluation and Planning System (SEI 2019)
- RH:** Recursos Hídricos
- GCM:** Modelos de Circulación General
- NEX-GDDP:** NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections (Thrasher et al. 2012)
- CMIP5:** Proyecto de intercomparación de modelos acoplados 5 (Taylor et al. 2012)
- RCP:** Trayectorias de Concentración Representativas (Meinshausen et al. 2011)
- P:** Precipitación
- Q:** Caudal
- T:** Temperatura
- Tx:** Temperatura Máxima
- Tn:** Temperatura Mínima
- RHC:** Requerimiento hídrico del cultivo
- SENAMHI:** Servicio Nacional de Meteorología de Hidrología del Perú
- PISCO:** Datos Interpolados peruanos de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI
- PISCOp:** PISCO precipitación
- PISCOt:** PISCO Temperatura
- PROMEDIO:** Promedio de los modelos GCM
- PNRH:** Plan Nacional de Recursos Hídricos
- ANA:** Autoridad Nacional del Agua
- AAA-UV:** Autoridad Administrativa del Agua Urubamba Vilcanota
- RADA:** Registro Administrativo de Derechos de Uso de Agua
- UH:** Unidad Hidrográfica
- NSE:** Coeficiente Nash-Sutcliffe
- PBIAS:** Porcentaje de desviación

## RESUMEN

El agua es un recurso esencial para el desarrollo social y económico. La disponibilidad de este recurso se ve siempre amenazada por el rápido incremento de su demanda. Realidad que se está dando en diferentes partes del mundo. La demanda del agua se incrementa por efectos antropogénicos y a su vez la oferta se ve afectada por efectos del cambio climático, la planificación equitativa y sostenible de la asignación del agua es la mejor manera de hacerles frente. Para asignar el agua de forma eficiente, es esencial comprender el balance hídrico en el área de estudio. Esta investigación tiene como objetivo reconstruir y evaluar la seguridad hídrica futura hasta el año 2099, en la cuenca Vilcanota-Urubamba. Se tomaron en consideración escenarios socioeconómicos y de cambio climático utilizando la herramienta WEAP (“Water Evaluation and Planning System”) para realizar un modelo hidrológico distribuido. El área de estudio cubre la cuenca Vilcanota-Urubamba en el sur de los Andes peruanos y presenta un contexto complejo de demanda de agua como un sistema alimentado por glaciares. Los resultados revelan que la disponibilidad de agua es mucho mayor que la demanda actual de agua en la cuenca Vilcanota-Urubamba. La actual demanda de agua anual se estima de  $254 \text{ hm}^3/\text{año}$ , siendo los principales usuarios los sectores agrícola (86.6%), doméstico (12%) e industrial (1.4%). La oferta hídrica se estimó de  $4848 \text{ hm}^3/\text{año}$  la principal fuente es la precipitación (98%) y el embalse Sibinacocha (2%). También se está obteniendo agua de las aguas subterráneas pero no se consideró en el estudio. La oferta hídrica es 19 veces mayor que la demanda. Para los escenarios de cambio climático *Escenario 1* y *Escenario 2* se espera un incremento de las precipitaciones y de la temperatura. Para el periodo 2017-2040 se cubre la demanda hídrica. A partir del año 2050 se detecta un incremento en la demanda no cubierta para cada escenario. En el periodo 2041-2070 se estima una demanda no cubierta de  $56.72 \text{ hm}^3$  para el *Escenario 1* y para el *Escenario 2* de  $42.62 \text{ hm}^3$ . Para el periodo 2071-2099 es de  $477.21 \text{ hm}^3$  en el *Escenario 1* y  $445.80 \text{ hm}^3$  para el *Escenario 2*. Las principales demandas no cubiertas son la poblacional y agrícola. Se generaron dos nuevos escenarios *Escenario 3* y *Escenario 4* para medir el efecto de medidas de control poblacional y mejoramiento de infraestructura de riego. Estas medidas probaron tener un impacto positivo reducir la demanda no cubierta. Para el periodo 2041-2070 la demanda no cubierta del *Escenario 4* es de  $34.6 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 39%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $26.7 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 37%. Para el periodo 2070-2099 la demanda no cubierta del *Escenario 3* es de  $252.8 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 46%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $238.2 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 47%. Actualmente los recursos hídricos de la cuenca VUB pueden ser más aprovechados para el desarrollo socio económico basado en el uso del recurso hídrico. Sin embargo, se debe tener en cuenta medidas para gestionar y distribuir adecuadamente el recurso hídrico en toda el área de estudio. Esto asegura que las medidas sean sostenibles en el tiempo y no afecta de forma negativa a la cuenca. De continuar el uso actual que se le da al recurso hídrico, las demandas no serán cubiertas por la oferta hídrica.

**Palabras clave:** WEAP, balance hídrico, seguridad hídrica, cambio climático, cuenca Vilcanota-Urubamba

## ABSTRACT

Water is an essential resource for social and economic development. The availability is always threatened by the rapid increase in its demand. A reality that is occurring in different parts of the world. Water demand increases due to anthropogenic effects and, the supply is affected by climate change. Equitable and sustainable planning of water allocation is the best way to deal with them. To allocate the water resources efficiently, it is essential to understand the water balance in the study area. This research aims to reconstruct and evaluate future water security until the year 2099, in the Vilcanota-Urubamba basin. Two scenarios were taken into consideration: socio-economic and climate change and used the WEAP tool (“Water Evaluation and Planning System”) to perform a distributed hydrological model. The study area covers the Vilcanota-Urubamba basin in the southern Peruvian Andes and presents a complex context of water demand as a glacier-fed system. The results reveal that the water available is much higher than the current demand for water in the Vilcanota-Urubamba basin (VUB). The current annual water demand is estimated at  $254 \text{ hm}^3/\text{year}$ , the main users being the agricultural (86.6%), domestic (12%) and industrial (1.4%). The water supply was estimated at  $4848 \text{ hm}^3/\text{year}$  the main source is precipitation (98%) and the Sibinacocha reservoir (2%). Groundwater is extracted but it was not considered in the study. The water supply is 19 times greater than the demand. For the climate change scenarios *Scenario 1* and *Scenario 2* an increase in precipitation and temperature is expected. For the period 2017-2040, the water demand is covered. As of the year 2050, an increase in unmet demand is detected for each scenario. In the period 2041-2070, an uncovered demand of  $56.72 \text{ hm}^3$  is estimated for *Scenario 1* and for *Scenario 2* of  $42.62 \text{ hm}^3$ . For the period 2071-2099 it is  $477.21 \text{ hm}^3$  in *Scenario 1* and  $445.80 \text{ hm}^3$  for *Scenario 2*. The main unmet demands are population and agriculture. Two new scenarios were generated *Scenario 3* and *Scenario 4* to measure the effect of population control measures and improvement of irrigation infrastructure. These measures proved to have a positive impact on reducing unmet demand. For the period 2041-2070, the uncovered demand of *Scenario 4* is  $34.6 \text{ hm}^3$ , a reduction of 39%. The *Scenario 4* has an uncovered demand of  $26.7 \text{ hm}^3$ , a reduction of 37%. For the period 2070-2099, the uncovered demand of *Scenario 3* is  $252.8 \text{ hm}^3$ , a reduction of 46%. The *Scenario 4* has an unmet demand of  $238.2 \text{ hm}^3$ , which is a reduction of 47%. Currently, the water resources of the VUB basin can be more used for socio-economic development based on the use of water resources. However, measures must be taken into account to properly manage and distribute the water resource throughout the study area. This ensures that the measures are sustainable over time and do not negatively affect the basin. If the current use of the water resource continues, the demands will not be covered by the water supply.

**Key words:** WEAP, water balance, water security, climate change, Vilcanota-Urubamba basin

# I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global está acelerando el deshielo en muchas regiones de montaña en el mundo, generando mucha preocupación acerca del impacto que tendrá en los recursos hídricos (Kaser et al. 2010).

En los andes tropicales existe una compleja interacción entre el hidro-clima y su acelerado deshielo producto del cambio climático tiene impacto fuerte en la dinámica socioeconómica, esto plantea desafíos para la forma de vida local y regional así como en el manejo del recurso hídrico (Kaser et al. 2010). La demanda de agua, impulsada por el crecimiento de la población y otros factores socioeconómicos, como la expansión agrícola y el aumento de las necesidades energéticas (Gain y Wada 2014), pueden provocar una escasez de agua incluso antes de que el cambio climático y la reducción de los glaciares relacionados causen una reducción en los suministros de agua (Vörösmarty et al. 2010).

Lograr un equilibrio sostenible entre la disponibilidad de agua y la demanda es uno de los mayores desafíos socio-ambientales del siglo 21 (Vörösmarty et al. 2010). La problemática entre el agua disponible y la demanda se espera que se incremente por los impactos hidrológicos generados por el cambio climático (Debortoli et al. 2017).

La presente investigación se desarrollará en el marco del proyecto de “WateR security And climate cHange adaptation in PerUvian glacier-fed river basisns” o “Seguridad hídrica y adaptación al cambio climático en cuencas hídricas peruanas alimentadas por glaciares” (RAHU); dicho proyecto tiene como objetivo principal evaluar de forma integral los glaciares y el recurso hídrico para entender el impacto del deshielo glacial en la seguridad hídrica y así ayudar a los tomadores de decisiones políticas.

## **Objetivo general**

- Reconstruir y evaluar la seguridad hídrica actual y futura hasta el año 2099, en la cuenca Vilcanota - Urubamba.

## **Objetivos específicos**

- Analizar el uso actual del agua en la cuenca del Vilcanota – Urubamba, utilizando las siguientes fuentes: licencias de uso de agua, censos nacionales, requerimiento de riego para cultivos e imágenes satelitales.
- Combinar proyecciones de disponibilidad hídrica con estimaciones de demanda de agua para evaluar la seguridad hídrica hasta el año 2099.
- Generar un modelo hidrológico semi distribuido de la cuenca Vilcanota - Urubamba.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. GESTIÓN Y SEGURIDAD HÍDRICA

El agua tiene valor sociocultural, económico y ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio de estos (Ley de recursos hídricos - Ley N° 29338), sin embargo, la gestión de los recursos hídricos se ha convertido últimamente en un desafío debido a las múltiples demandas multisectoriales y a los inminentes efectos del cambio climático que disminuyen la disponibilidad hídrica (Goyal et al. 2018)

Los recursos hídricos desempeñan un papel importante en la mejora de los medios de vida, el desarrollo económico y estabilidad ecológica (Goswami y Bisht 2017). En los últimos años, en el Perú se ha desarrollado un marco normativo e institucional que promueve la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) como medio para dinamizar la economía del país y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales.

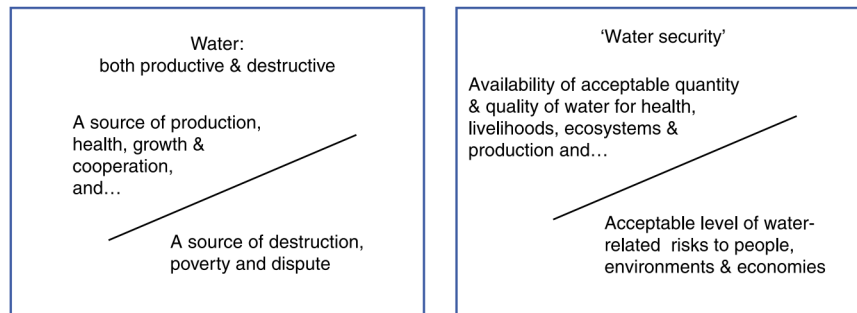
Ante el desafío de integrar la sostenibilidad de los recursos hídricos y lograr la GIRH, surge como principal marco normativo el “Plan Nacional de Recursos Hídricos (*PNRH*)” (ANA 2013), instrumento público que define los lineamientos de acción, que permitirán mejorar la oferta de agua en calidad, cantidad y oportunidad, a administrar o influir sobre las demandas y a mitigar los impactos extremos.

En Julio del 2018, el *ANA*, máximo ente rector y autoridad técnico-administrativa del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, incorporó el concepto de seguridad hídrica en el *PNRH*, debido a que refleja de mejor manera los problemas existentes.

Según Grey y Sadoff (2007) la seguridad hídrica se define como la disponibilidad de una cantidad y calidad aceptables de agua para la salud, medios de vida, ecosistemas



y producción, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua para las personas, el medio ambiente y la economía (Figura 1). La seguridad hídrica siempre ha sido una prioridad social; en su ausencia, las personas y la economía se han mantenido vulnerables y pobres.



**Figura 1: Definición de seguridad hídrica: el agua como fuente de producción y destrucción**  
**Fuente: Grey y Sadoff (2007).**

En el II Foro Mundial del Agua (La Haya, Países Bajos, 17 al 22 de marzo de 2000), se determinó que la seguridad hídrica:

- Enfatiza la importancia del agua en el desarrollo social y económico, y la necesidad y responsabilidad de su priorización por los gobiernos.
- Contribuye a identificar los temas y áreas que son críticos para una adecuada gestión del agua, y las interdependencias que tienen con otras políticas públicas.
- Define criterios para establecer metas y evaluar las políticas públicas a partir del análisis de los riesgos que resultan aceptables y de las disponibilidades que son adecuadas para la población
- Conlleva a identificar las amenazas, vulnerabilidad e incertidumbres que debe enfrentar la gestión del agua y evaluar su capacidad para adaptarse a nuevos escenarios.
- El análisis de la seguridad hídrica es un enfoque que entrega elementos para hacer comparables experiencias y resultados de la gestión del agua en distintos países y realidades, transmitir las lecciones aprendidas y extender las mejores prácticas del sector.

### 2.1.1. Desafíos de la seguridad hídrica en el Perú

En el caso de América Latina y el Caribe, los problemas actuales y futuros relacionados con la gestión de los recursos hídricos están influidos por la gran dinámica de transformaciones sociales y económicas que se observan en la región.

El Perú presenta una gran heterogeneidad en la distribución espacial de los recursos hídricos, de modo que simultáneamente contiene sectores de precipitaciones muy bajas, y áreas con un régimen hiper hídrico. Muchas áreas con gran actividad económica e importantes centros urbanos se localizan en zonas con baja disponibilidad hídrica.

La gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos juegan un papel de gran importancia en el desarrollo social y económico de la región, en especial considerando la relevancia que tiene la explotación de los recursos naturales en su economía.

Al igual que en América Latina, en el Perú los desafíos que debe enfrentar la gestión están fuertemente relacionados con el conjunto de factores exógenos al sector del agua determinados por la dinámica social, económica y política interna y externa a la región, de modo que las incertidumbres que se deben analizar no se restringen a aquellas de carácter hidrológico. Los mayores obstáculos para desarrollar estrategias de gestión relacionadas al agua con visión al futuro son:

- Falta de información oportuna y relevante para la gestión de agua actual y proyectada.
- Comprensión insuficiente de la sensibilidad de los recursos naturales a los cambios en la disponibilidad de agua.

## **2.2. MARCO LEGAL Y POLÍTICO PARA EL USO DEL AGUA EN CUSCO**

La cuenca del río Urubamba – Vilcanota abarca el ámbito de cuatro Autoridades Locales del Agua: ALA Atalaya, ALA La convención, ALA Cusco, ALA Sicuani, todas estas dependen de la Autoridad Administrativa del Agua (AAA) XII Vilcanota – Urubamba, siendo esta última, la encargada de emitir los derechos de uso a través de sus órganos descentralizados ALA's.

Los usuarios en la cuenca más habituales por tipo de uso de agua son:

- Uso poblacional EPS, Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS), comités de agua, Asociaciones vecinales o comunidades campesinas, municipalidades. Entre los principales usuarios con derechos de agua de uso poblacional en la cuenca Urubamba tenemos a la empresa pública de Servicio de Agua Potable y Alcantarillado SEDA Cusco y la Municipalidad Provincial de Atalaya.
- Usos productivos Juntas de Usuarios de Riego, organizadas habitualmente en Sectores de Riego controlados por Comisiones de Usuarios de Riego, empresas privadas (mineras, industrias, etc.). En lo referente al uso energético, las autorizaciones de uso fueron otorgadas para la ejecución de estudios y obras de nuevas centrales hidroeléctricas en la cuenca

## **2.3. BALANCE HÍDRICO**

El agua está generalmente equilibrada y se mueve a través de su ciclo en diferentes formas (Oliver y Oliver 1995). Este ciclo es una continua cadena de movimiento e intercambio de agua entre los océanos, la atmósfera y la superficie e interior del suelo y tiene cuatro componentes básicos: evaporación y transpiración, precipitación, escorrentía y agua subterránea (Raj Rakhecha y Singh 2009).

Para un área determinada, por ejemplo, a escala de cuenca hidrográfica, se requieren

cálculos y análisis para cuantificar la cantidad de agua para cada componente del balance hídrico. Goyal et al. (2018) argumentan que, para gestionar de forma eficaz los recursos hídricos disponibles, es fundamental contar con información precisa sobre el balance hídrico. Un balance hídrico muy simple es que la entrada es igual a la salida más el cambio del almacenamiento (Goyal et al. (2018) y Perrin et al. (2003)).

Hay muchos sub componentes involucrados en la ecuación del balance hídrico dependiendo de diferentes áreas y condiciones. Generalmente, la entrada incluye precipitación (lluvia y nieve), entradas de agua subterránea y superficial (desviación); la salida consiste en la escorrentía de los ríos, extracción y consumo de agua, salida de aguas subterráneas, evaporación (cuerpos de agua, reservorios o tanques), evapotranspiración (de bosques y cultivos); el cambio en el almacenamiento podría explicar el agua almacenada o perdida en suelos, plantas, ríos, humedales y embalses.

Cada componente del balance hídrico está interrelacionado y se afecta entre sí (Goyal et al. 2018). Xu y Singh (1998) sostienen que sólo de tres a cinco parámetros de datos hídricos podrían ser adecuados para estimar otros datos faltantes mediante modelos de balance hídrico mensual en zonas húmedas.

Es de destacar que los modelos de balance hídrico son muy útiles para la gestión integral del agua; sin embargo, algunos modelos deben adaptarse a las condiciones del sitio. Estos modelos son herramientas de simulación para ayudar a cuantificar los componentes del régimen hídrico, como la precipitación, la escorrentía, la evapotranspiración y la infiltración y descarga de acuíferos (Goyal et al. (2018); Saha y Zeleke (2015)). El estudio de Vandewiele y Ni-Lar-Win (1998) demostró que no existe un modelo universal que pueda aplicarse a todas las cuencas hidrográficas. Es necesario modificar un método específico de acuerdo a la escala de las áreas de estudio y las condiciones reales. Goyal et al. (2018) afirman que el concepto de balance hídrico es un intento de gestionar de manera sostenible los recursos hídricos a largo plazo.

## 2.4. CAMBIO CLIMÁTICO

El Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (*IPCC*) anunció que el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero ha cambiado el sistema climático, es decir el calentamiento global afecta a la mayoría de las variables climáticas, lo que conduce al cambio climático.

De acuerdo a la *IPCC* (IPCC 2007), el cambio climático es determinado como “el cambio en el estado de clima que puede ser identificado por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades, y persistir por un extenso periodo de tiempo normalmente décadas o más”.

El clima y el agua están conectados de manera compleja a través de varias variables como la precipitación, la temperatura y la radiación solar, sin embargo, estas condiciones difieren de una región a otra. Los impactos de un cambio en cualquiera de estas variables alteran el ciclo hidrológico al aumentar la escorrentía, intensidad de la lluvia y tasa de evaporación (Kabo-bah et al. (2014); Huang et al. (2014)).

El clima cambiante aumentará fuertemente durante décadas (Figura 2) con temperaturas más altas y precipitaciones extremas, lo que resulta en una disminución del suministro de agua, la calidad del agua y un aumento de la demanda de agua (IPCC 2014).

Por ello, es necesario estudios que investiguen el grado de cambio climático reflejado en el pasado hidrometeorológico observado y estudios que investiguen los impactos futuros del cambio climático en los recursos hídricos (IPCC 2007).

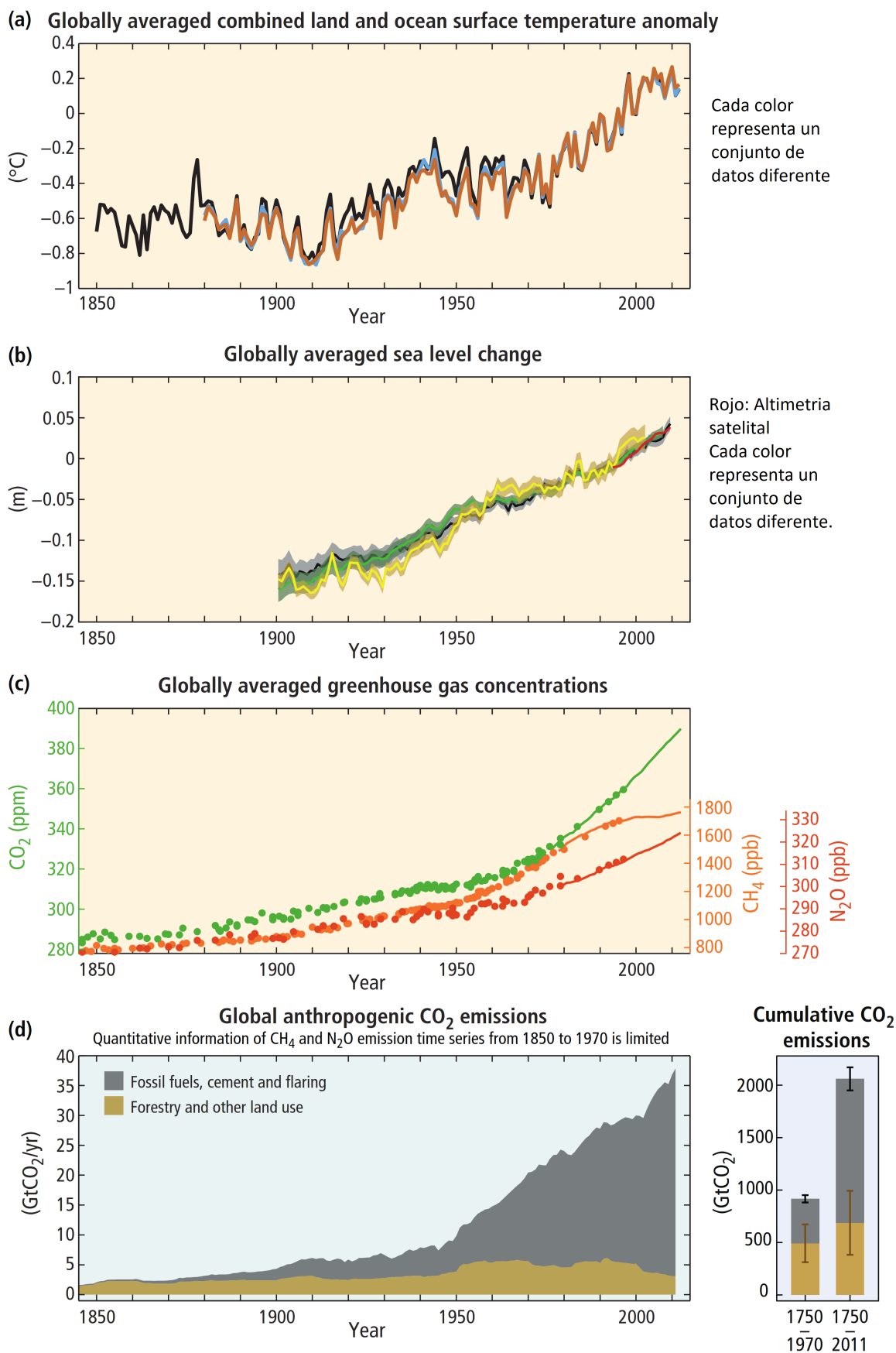
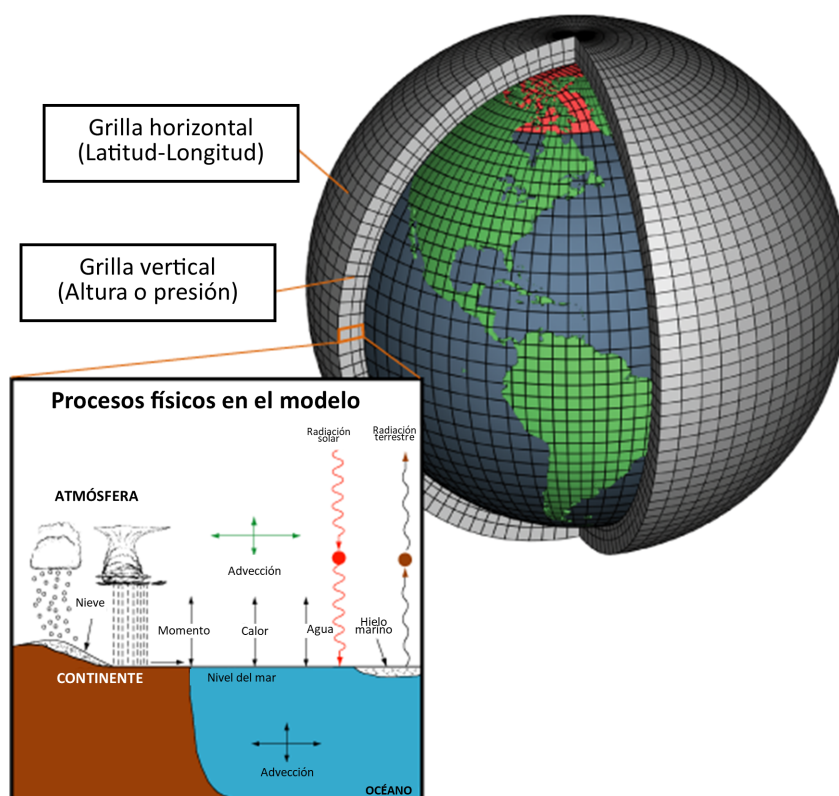


Figura 2: La compleja relación entre las variables observadas (a, b, c) y las emisiones de gases de efecto invernadero (d)  
Fuente: IPCC (2014)

### 2.4.1. Modelos climáticos

Los modelos climáticos globales (*GCM*) se utilizan para simular los climas presentes y futuros (Zhang et al. 2006).

También llamados *GCM*, son modelos numéricos que representan los procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criósfera y superficie terrestre (Figura 3). Consideradas como las herramientas más avanzadas, actualmente disponibles para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Los modelos climáticos serán fidedignos sólo en la medida en que sean capaces de proporcionar simulaciones de los patrones de circulación a gran escala y de las variables climáticas, a un nivel diario, anual y estacional (Avalos et al. 2012).



**Figura 3: Esquema de los procesos físicos y la resolución espacial que se utilizan para los GCM.**  
Fuente: NOAA (2017).

Para establecer proyecciones de las frecuencias de ocurrencias de eventos extremos, se utilizan como herramienta a los modelos climáticos de alta resolución espacial.

Los *GCM* se utilizan para comprender cómo responde la dinámica climática global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (Dhakal et al. 2018). Las proyecciones climáticas realizadas por los *GCM* son excelentes herramientas para evaluar los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos, sin embargo, su resolución espacial aproximada es insuficiente para soportar aplicaciones hidrológicas a escala de cuenca. Por ello, se han creado diversas técnicas de reducción de escala (downscaling).

#### **2.4.2. Downscaling**

Para el estudio del clima de una región y sus impactos a partir de simulaciones globales, es necesario una reducción de escala o downscaling, cuya resolución debe estar en el orden de 10 a 50 km (Junquas et al. 2014).

Las distribuciones de las variables climáticas procedentes del GCM pueden diferir de las distribuciones observadas de dichas variables. Estas diferencias pueden ser importantes y pueden afectar a determinados índices climáticos utilizados. Para minimizar este efecto se utilizan técnicas dirigidas a la corrección de estas diferencias, los métodos de corrección de sesgo (Amblar Francés et al. 2018), como, por ejemplo, la técnica del Quantile Mapping que permite realizar cambios en la distribución de las observaciones.

Quantile Mapping nos permite encontrar una función que luego de ser aplicada a los datos obtenidos con downscaling, genere una corrección de su distribución haciéndola semejante a la de los datos observados (Gudmundsson et al. 2012).

### **2.5. SIMULACIÓN HIDROLÓGICA CON WEAP**

Dado que los recursos hídricos se han visto amenazados y estas amenazas han aumentado los desafíos de gestión en muchas regiones durante las últimas décadas, se han desarrollado muchas herramientas y modelos para apoyar la toma de decisiones en la planificación de la gestión del agua, sin embargo, los modelos convencionales no son



adecuados para una simulación compleja de escenarios hídricos porque hay muchas cuestiones que preocupan, como la cantidad limitada de agua que se debe asignar entre usuarios competidores, el cambio climático, las consideraciones ecológicas y las políticas para el uso sostenible (Sieber y Purkey 2015). Por esta razón, ha surgido un enfoque integrado en la gestión y el desarrollo de los recursos hídricos para abordar los problemas de la calidad del agua, la asignación equitativa y la preservación de los ecosistemas.

El Sistema de Evaluación y Planificación del Agua, o *WEAP* (“Water Evaluation and Planning”), es una herramienta que provee un enfoque integral para la planificación de los recursos hídricos (SEI 2019).

Según el SEI (2019), *WEAP* (“Water Evaluation and Planning”), desarrollado por Stockholm Environment Institute’s U.S. Center (SEI), es un software que toma un enfoque integrado para la realización de evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.

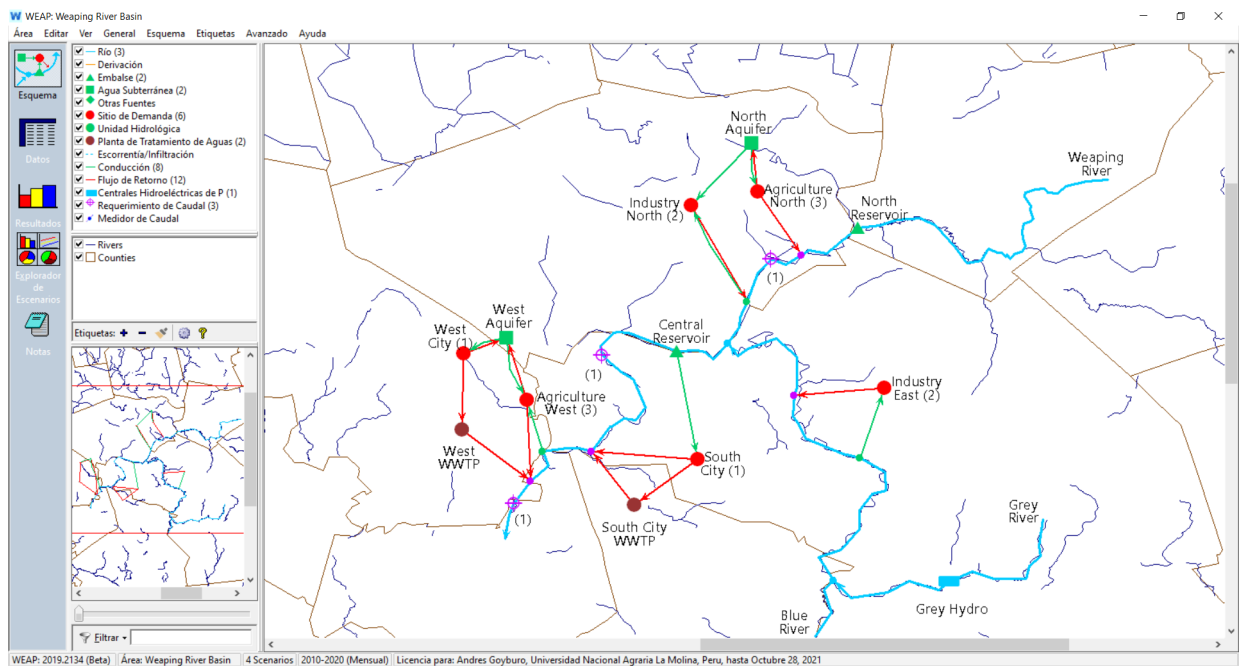
### **2.5.1. Aplicación**

Los pasos generales para la aplicación de *WEAP* incluyen, según la definición del estudio, el límite espacial, los componentes del sistema y la configuración del problema. Según Sieber y Purkey (2015), el desarrollo consta de las siguientes etapas:

- Definición del estudio: establecimiento del marco temporal, los límites espaciales, diagrama esquemático o componentes del sistema (Figura 4) y la configuración del problema.
- Búsqueda de información: el cual se da de acuerdo con el tipo de estudio definido, y si una vez montado el modelo hay necesidad de agregar información adicional con datos específicos.
- Desarrollo del modelo: construcción del esquema conceptual, entrada de datos y simulaciones iniciales del modelo para observar su comportamiento preliminar

ante posibles inconsistencias y errores.

- Calibración y validación.
- Uso del modelo / generación de escenarios: Explorar los impactos que tendría una serie de supuestos lógicos alternativos como políticas futuras, costos, planes de desarrollo, clima, tendencias hidrológicas y tecnológicas y otros factores relacionados.
- Evaluación: Evaluar los escenarios respecto a la disponibilidad de agua, los costos y beneficios, compatibilidad con los objetivos ambientales, y la incertidumbre en las variables dominantes.



**Figura 4: Interfaz de WEAP, diagrama esquemático.**  
Fuente: Sieber y Purkey (2015).

*WEAP* calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, generación, tratamiento y descarga de contaminantes más de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas.

### 2.5.2. Limitaciones

Aunque WEAP es una herramienta poderosa en la planificación integrada de los recursos hídricos, existen algunas limitaciones asociadas con este software (WEAP versión 2019.0). Por ejemplo, WEAP no considera la forma y pendiente de los ríos. Se supone que el sistema de drenaje es una superficie plana, lo cual no es realista y esto puede dar lugar a imprecisiones en el cálculo del caudal. Adicionalmente, WEAP no modela la calidad del agua en embalses y aguas subterráneas (Sieber y Purkey 2015).

Por tanto, es necesario combinarlo con otros modelos, como MODFLOW, MODPATH y QUAL2K, para simular el flujo de agua subterránea y la calidad del agua.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al sur del Perú en el departamento de Cuzco. Abarca la parte alta de la cuenca Urubamba. El área de estudio se denominó Vilcanota-Urubamba, ya que el principal afluente se le llama río Vilcanota en la parte más alta y en la parte media se le llama río Urubamba hasta la estación hidrométrica Pisac. Desde ahora en adelante al área de estudio se le denominará como “VUB”. En la Figura 5 se muestra el área de estudio.

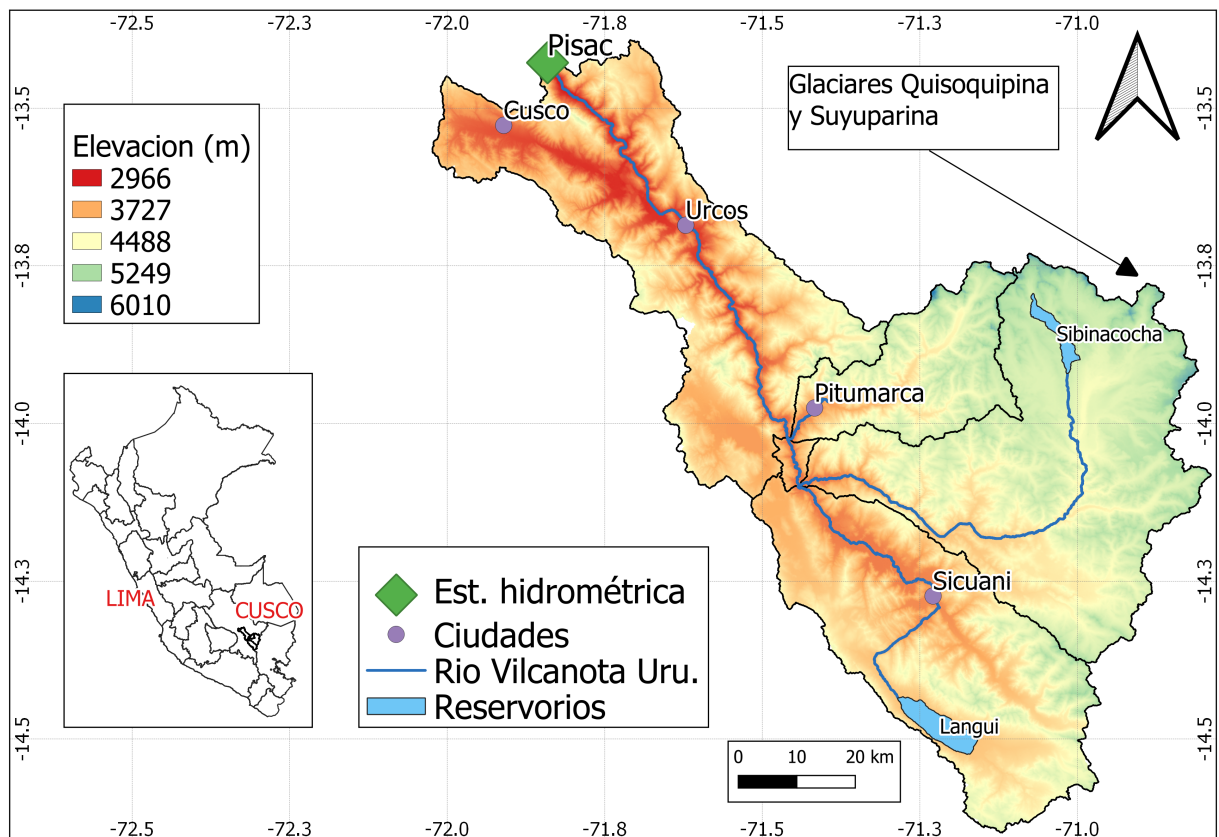


Figura 5: Área de estudio cuenca Vilcanota - Urubamba.

El área de estudio se dividió en subcuencas mediante la herramienta TauDEM 5.3 de

Tarboton et al. (2015). Para la ejecución del proceso se utilizó imágenes satelitales de elevación del satélite SRTM (Farr et al. 2007) de una resolución espacial de 30 metros. Esta herramienta utiliza algoritmos predeterminados para delimitar subcuencas tomando un punto de captación, en este caso se utilizó la estación de Pisac. En la Figura 6 se muestra las 5 subcuencas que forman el sistema de la cuenca VUB las que serán utilizadas en el modelo *WEAP*.

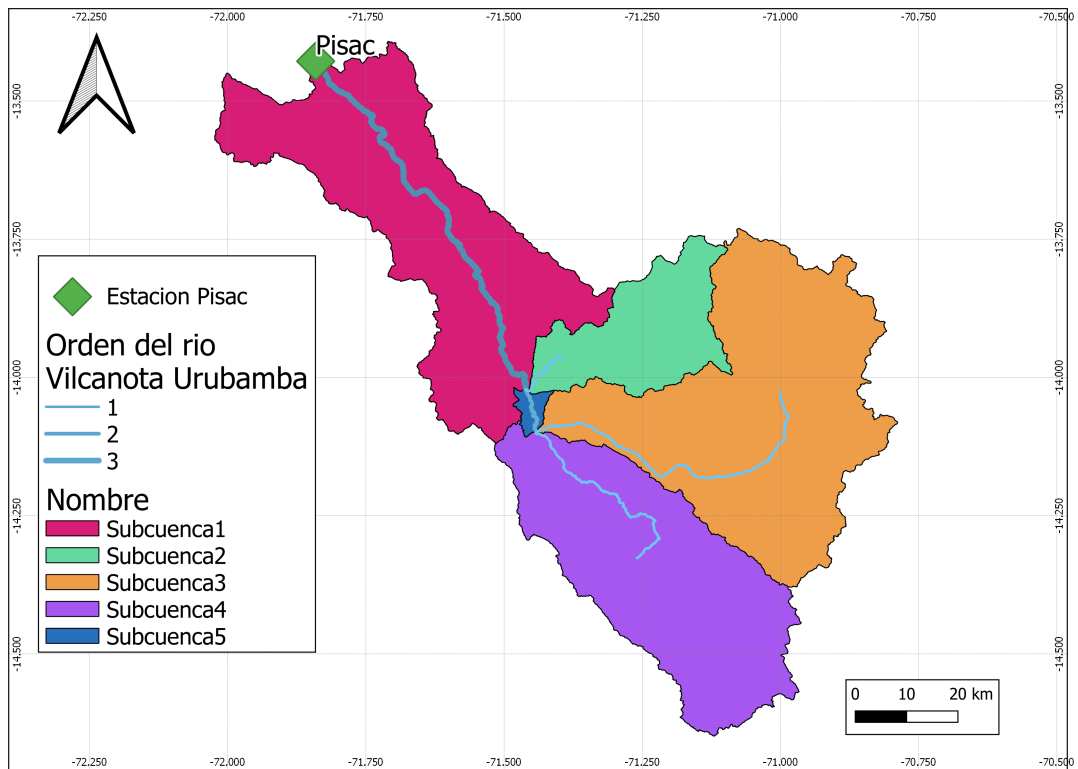


Figura 6: Mapa de las subcuencas que forman el sistema de la cuenca VUB

## 3.2. MATERIALES

### 3.2.1. Equipos

- 01 Ordenador personal - Lenovo ThinkPad P52.
- 01 Impresora.

### 3.2.2. Programas de computo

- L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2020 - <https://texstudio.org/>.
- R v4.0 - <https://cran.r-project.org/>.
- Rstudio v1.25 - <https://rstudio.com/>.
- CROPWAT v8.0 - <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>.
- WEAP v2019.2.1.30 - <https://www.weap21.org/>.

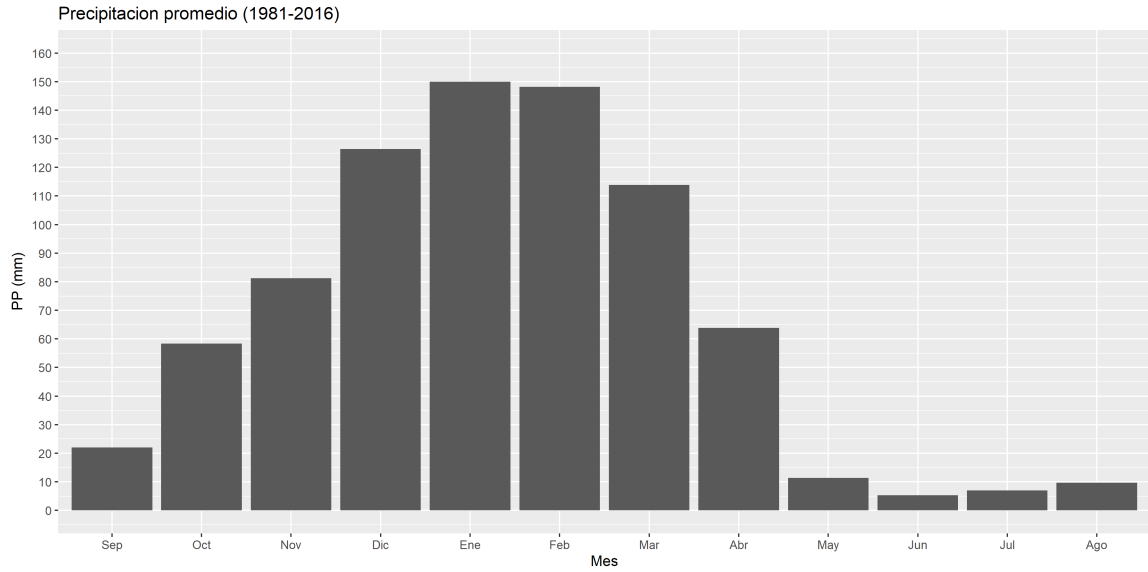
### 3.2.3. Análisis y descripción de datos

Este estudio de balance hídrico necesita información hidrológica, climática y social como insumos para el modelo *WEAP*. En los siguientes puntos se explicara cada uno de ellos.

#### 3.2.3.1. Precipitación

Es la variable determinante para el modelamiento hidrológico ya que es la principal fuente del recurso hídrico. En la cuenca VUB se presenta precipitación líquida y sólida (nieve o granizo). Para este estudio se considero solo la precipitación líquida. Los datos fueron obtenidos del producto grillado *PISCO<sub>pm2.1</sub>* (Aybar et al. 2019) a nivel mensual del año 1981 al 2016. En la Figura 7 se muestra el comportamiento estacional de la precipitación. Entre los meses de noviembre a marzo corresponde a la época húmeda donde se dan las mayores precipitaciones de 120 a 150 *mm*. La época seca corresponde a los meses de abril a octubre con valores de 70 a 0 *mm*. La precipitación anual promedio es de 797 *mm*.

La *P* correspondiente a los años 2017-2099 fue obtenida de la base de datos *NEX – GDDP*. Esta base de datos esta conformada por el downscaling de escenarios climáticos

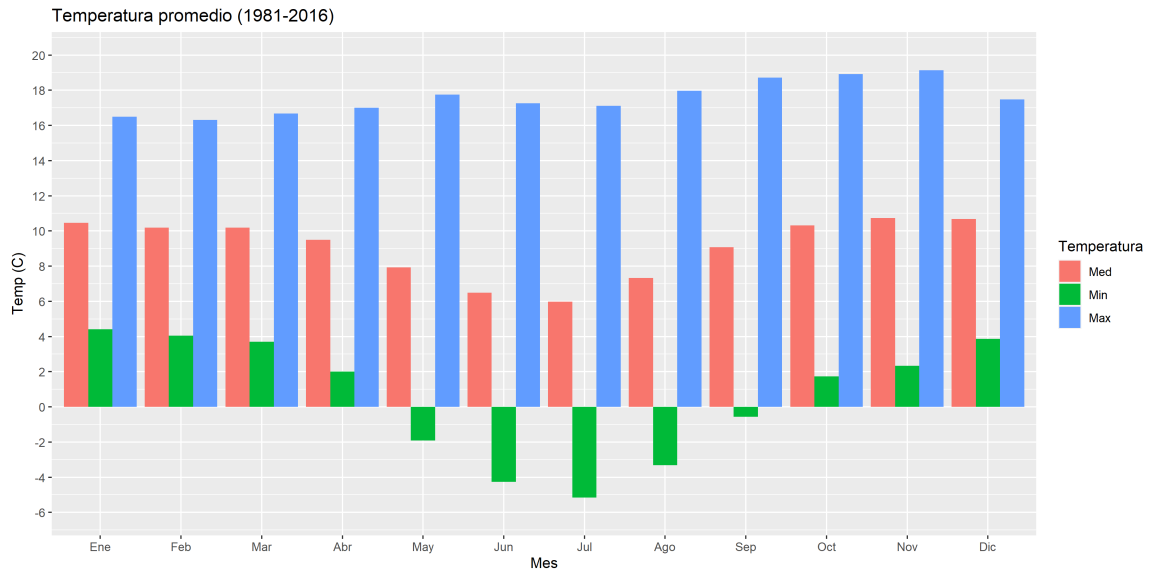


**Figura 7: Precipitación promedio mensual para los años 1981-2016**

de los *GCM* corridos por el *CMIP5* y para los *RCP* 4.5 y 8.5. Los modelos utilizados son: ACCESS1-0, bcc-csm1-1, BNU-ESM, CanESM2, CCSM4, CESM1-BGC, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-CM3, GFDL-ESM2G, GFDL-ESM2M, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MIROC5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, NorESM1-M.

### 3.2.3.2. Temperatura

La  $T$  media es una variable necesaria para el modelamiento en *WEAP*. Los datos de temperatura máxima y mínima fueron obtenidos del producto grillado *PISCOtn.v1.1* y *PISCOtx.v1.1* de Huerta et al. (2018) del año 1981 al 2016. En la Figura 8 la temperatura mínima va de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $4^{\circ}\text{C}$ , mientras que la máxima esta en el rango de  $16^{\circ}\text{C}$  a  $19^{\circ}\text{C}$ . El mes más cálido es el de enero y el más frío es julio. El promedio de las temperaturas máximas y mínimas fue usado en el *WEAP*. La  $T$  del 2017-2099 fue obtenida del *NEX – GDDP*.



**Figura 8: Temperatura promedio mensual para los años 1981-2016**

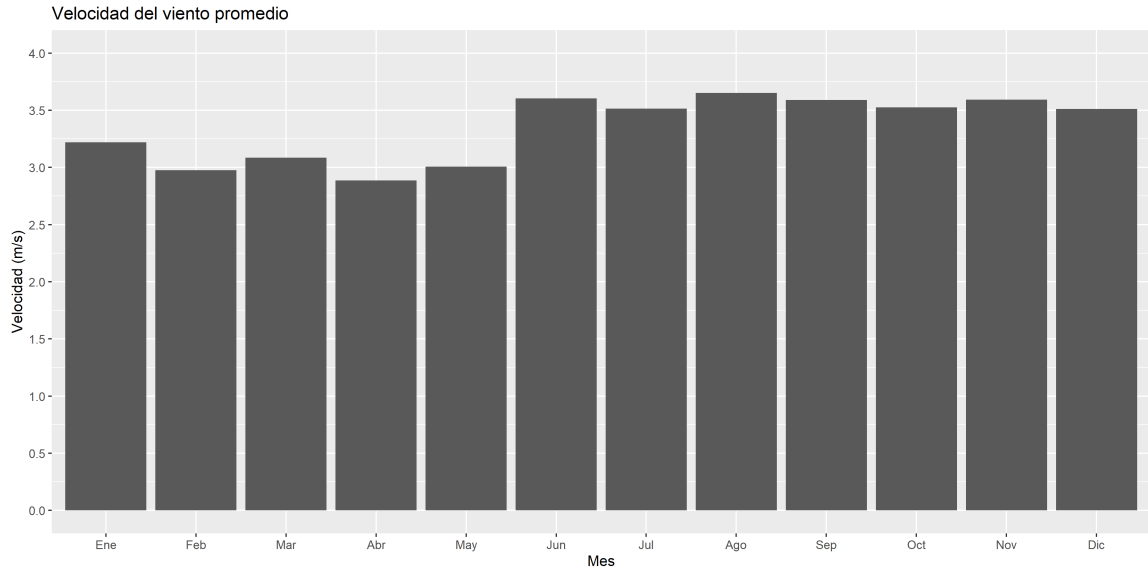
### 3.2.3.3. Humedad relativa

La humedad es necesaria para la ejecución del método "Soil moisture" en el *WEAP*. Los datos de humedad fueron obtenidas de las estaciones meteorológicas llamadas Pisac, Sicuani y Sibinacocha, las cuales son parte de la red del *SENAMHI*. En la Figura ?? se muestra que la humedad varía de 52.11% a 70.3%, los mayores valores se dan en febrero y los menores en julio.

### 3.2.3.4. Velocidad del viento

La velocidad del viento también se requiere para el método "Soil moisture". Los datos de velocidad fueron obtenidas de las estaciones meteorológicas llamadas Pisac, Sicuani y Sibinacocha, las cuales son parte de la red del *SENAMHI*. En la Figura 9 se muestra que la velocidad varía de  $2.88 \text{ m.s}^{-1}$  a  $3.65 \text{ m.s}^{-1}$ , los mayores valores se dan en agosto y los menores en abril.

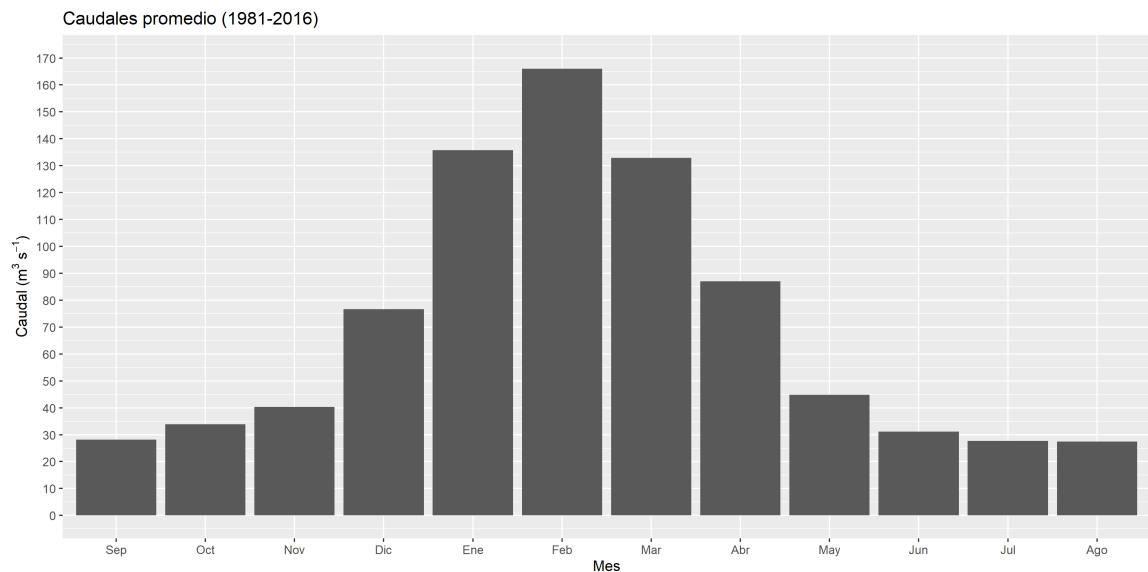




**Figura 9: Velocidad de viento promedio mensual**

### 3.2.3.5. Caudales

Los datos provienen de la estación hidrométrica Pisac, perteneciente al *SENAMHI*, la cual se encuentra en la salida de toda la cuenca VUB (Figura 6). Se obtuvieron caudales observados diarios entre los años 1987 y 2016. En la Figura 10 se puede observar que el mayor caudal de  $166 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en el mes febrero y el menor de  $27.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en agosto. El caudal observado en la estación Pisac fue agregado a nivel mensual y usado para la calibración y validación del modelo.



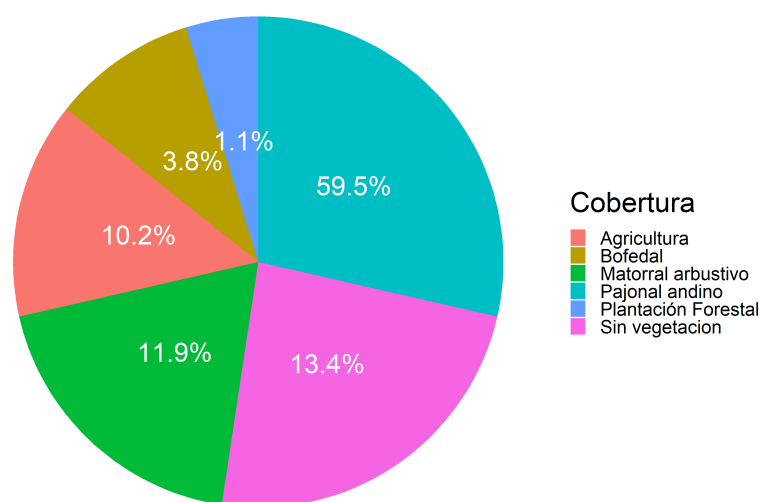
**Figura 10: Caudal promedio mensual en la estación Pisac (1981-2016)**

### 3.2.3.6. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal fue obtenida del “Mapa nacional de ecosistemas” realizado por MINAM (2019). Se optó por este mapa debido a que utilizaron imágenes satelitales con 1.5 m de resolución espacial pertenecientes a los satélites Spot, Radipeye y Google Earth. Además de haber sido realizado entre los años 2015-2018, siendo el más actual comparado con otros mapas realizados. Se agruparon las coberturas en 6 tipos las cuales se muestran en la Tabla 1 con sus respectivos valores para cada subcuenca. En la Figura 11 se muestra que el mayor porcentaje de área está cubierto por pajonal andino (59.5%), seguido por suelo desnudo (13.4%), matorral arbustivo (11.9%) y agricultura (10.2%).

**Tabla 1: Área correspondiente a cada cobertura según la subcuenca.**

Cobertura	Área de subcuenca ( $km^2$ )				
	1	2	3	4	5
Agricultura	327.8	15.9	18.0	300.7	8.9
Sin vegetación	26.0	172.1	559.2	129.4	
Bofedal	26.0	32.7	157.1	36.0	
Matorral arbustivo	584.3	21.4	25.9	136.0	16.5
Pajonal andino	1015.0	414.7	1445.2	1036.1	16.9
Plantación Forestal	53.4			22.4	



**Figura 11: Porcentaje de cobertura en la cuenca VUB**

### 3.2.3.7. Población

El número de habitantes es clave para estimar la demanda poblacional en las subcuencas. La Tabla 2 los datos obtenidos de los CENSOS Nacionales de 1981, 1993, 2005, 2007 y 2017 del INEI. Los censos recolectan información por distritos entonces se eligieron los que se encuentran dentro de la subcuenca 1 y 4. Se eligieron estas por que en ellas se concentra la mayor cantidad de población en las ciudades de Cusco y Sicuani respectivamente.

**Tabla 2: Poblacion en el subcuenca 1 y 4**

Año	Subcuenca	
	1	4
1981	272749	10467
1993	344500	11844
2005	420925	13650
2007	439939	11951
2017	525140	11890

### 3.2.3.8. Licencias de uso del Agua

Las distintas demandas hídricas de la población son variable necesarias para determinar el balance hídrico. De la  $AAA - UV$  se obtuvo el  $RADA$ , todas las licencias de uso de agua del los años 2010 al 2018. Estas se agruparon en 4 tipos: poblacional, agrícola, industrial y energética además de acuerdo a la subcuenca que pertenece. Se tomaron en cuenta las licencias activas y con fuente de agua superficial. En la Tabla 3 se muestra el volumen en  $hm^3$  al año acumulado para el año 2018.

**Tabla 3: Demandas totales anuales en VUB (2018)**

Licencia	Demanda ( $hm^3.año^{-1}$ )				
	1	2	3	4	5
Poblacional	26.4	0.02	0.2	18	0.03
Agrícola	167.4	12.8	25.2	78.4	2.6
Industrial	5.1	1.7	0.02	2.7	
Energético	12.6		110	145.3	

### 3.3. METODOLOGÍA

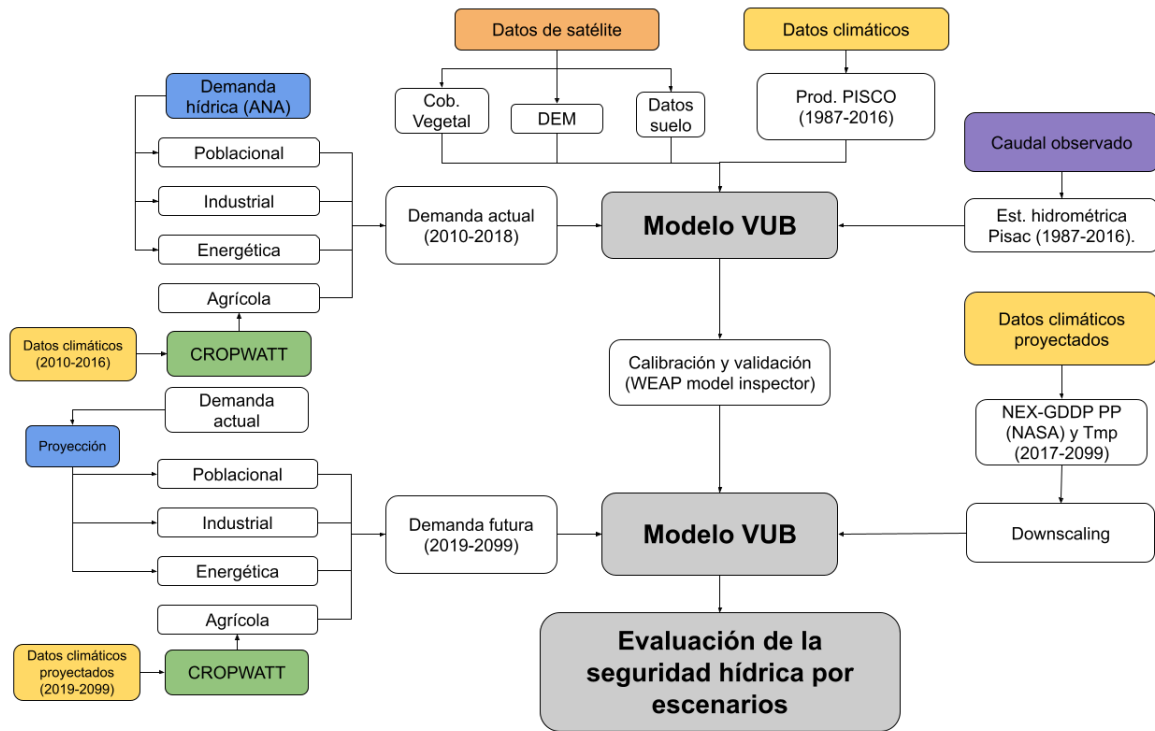
#### 3.3.1. Esquema metodológico

Para evaluar la seguridad hídrica pasada, presente y futura en la cuenca VUB se generó un modelo con el software *WEAP* (Figura 12). Para generar el modelo se utilizaron las siguientes fuentes de datos: satelitales, climáticos, caudales observados, demanda hídrica y modelos climáticos globales *GCM*. Todos los datos de teledetección utilizados son de fuente primaria correspondientes a la cobertura vegetal, mapa de elevación, climáticos y *GCM*

De los datos satelitales se obtiene la forma y tamaño de la cuenca. Se descargó y procesó un DEM para delimitar la cuenca y sus respectivas subcuencas. Con esto es posible determinar el área correspondiente a cada cobertura (MINAM 2019) y tipo de suelo. Estos datos permiten obtener las características físicas para el modelo. Los datos climáticos provinieron de los productos *PISCO* de precipitación (Aybar et al. 2019) y temperatura (Huerta et al. 2018), así como de estaciones meteorológicas. Las demandas de agua fueron consideradas como poblacional, agrícola, industrial y energética. La demanda presente se consideró del 2010 al 2018 y la pasada fue estima mediante métodos interpolación implementadas en el *WEAP*. Con esta data en el modelo se genero los caudales simulados antro pisados usando la aproximación de “humedad del suelo” (Soil Moisture Scheme).

Para la calibración se utilizo caudales observados provenientes de la estación hidrométrica Pisac para el periodo 1987-2016. Se utilizo el software “WEAP model inspector” (Angarita y Mehta 2016) para realizar la calibración de los parámetros físicos en el modelo.

A este modelo calibrado se agregó demandas de agua y datos climáticos proyectados al 2099. Para proyectar las demandas hasta el 2099, utilizaron factores sociales para poblacional, climáticos para agrícola y regresión lineal para la industrial. Con el fin de evaluar el cambio climático en la generación de caudales se utilizo los datos de precipitación y temperatura procedentes de los modelos climáticos globales para los



**Figura 12: Esquema metodológico de la investigación.**

escenarios Rcp 4.5 y 8.5. Estos datos fueron procesados con el método de downscaling “quantile mapping” (Gudmundsson et al. 2012). Se evaluó la seguridad hídrica futura en 4 escenarios diferentes.

En la Figura 13 se muestra un esquema de los periodos de tiempo correspondientes a las tres etapas de la metodología y los datos que se utilizan. La calibración y validación del modelo se realizó para el periodo 1987 al 2016, utilizando los datos de caudales, demandas y climáticos correspondientes. La seguridad hídrica actual se tomó desde el 2010 al 2018 y la futura para el periodo 2019 al 2099.

### 3.3.2. Modelo WEAP

Después de la recolección y análisis de datos, se utilizó el modelo *WEAP* para determinar el balance hídrico. En la Figura 14 se muestra el esquema de la cuenca VUB con el rango de años del 1987 al 2099. El año con las condiciones iniciales es el 1987-2018, luego se realizó la simulación desde el año 2019-2099. El periodo de calibración con los datos observados son desde el 1987 al 2016.

Datos	1981	...	1987	...	2010	...	2016	2017	2018	2019	...	2099
Caudal			Observado				Simulado					
Demandas			Pasada		Aactual				Futura			
Climaticos			PISCO				GCM (downscaled)					

Calibración y validación modelo   
 Seguridad hídrica actual   
 Seguridad hídrica futura

Figura 13: Periodos de tiempo para los datos utilizados y etapas del modelamiento.

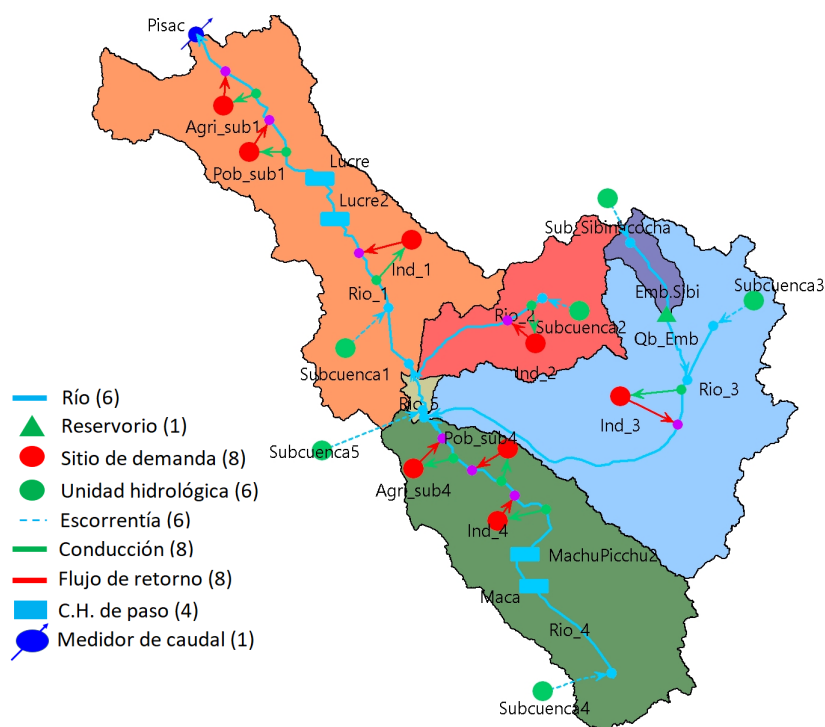


Figura 14: Esquema del modelo WEAP de la cuenca VUB

Supuestos claves para el modelamiento futuro:

- La cobertura vegetal se mantiene constante hasta el año 2099
- Área agrícola se mantiene constante 2099
- El embalse de Sibinacocha funciona hasta el año 2099 con sus reglas de operación
- Las demandas energéticas son centrales de paso con su respectivo caudal de funcionamiento hasta el año 2099

### 3.3.3. Caudal de entrada

El caudal de entrada es la cantidad de agua que pasa por el primer nodo de un río específico (Sieber y Purkey 2015) también se le llama caudal de cabecera. En la Figura 14 se puede apreciar que para el modelo se consideraron cinco caudales correspondiente a cada subcuenca y 1 para el embalse de Sibinacocha. Los caudales fueron generados con datos de climáticos y utilizando el método “humedad del suelo” (Soil Moisture Scheme).

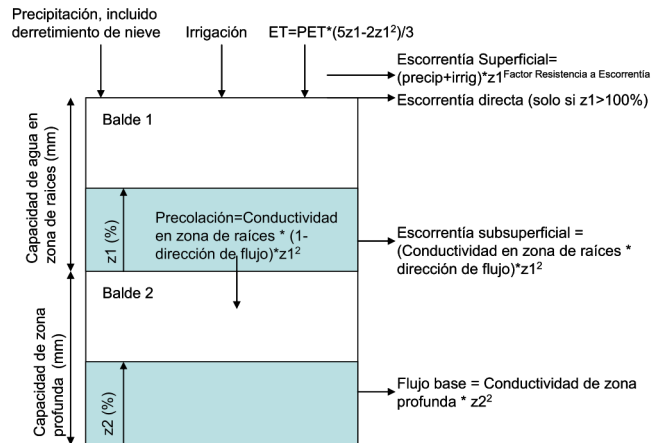
En el área de estudio se presenta el caso especial de ubicarse las demandas aguas arriba con respecto a la estación hidrométrica. Tener un solo punto de calibración tiene la desventaja que solo permite realizar un balance hídrico de forma total para toda la subcuenca. Debido a esto se dividió la cuenca de estudio en subcuencas, permitiendo modelar la oferta y demanda hídrica.

Investigaciones como las de Touch et al. (2020); Sithiengtham (2019); Amin et al. (2018); Olsson et al. (2017) realizan el modelamiento con estaciones de calibración aguas arriba y abajo con respecto a la demandas de agua. Este casos presentan la ventaja de que la oferta hídrica antes de las demandas este calibrada, así como un modelo que representa mejor a la cuenca.

### 3.3.4. Método de modelamiento

Existen cinco métodos diferentes para la simulación de cuencas en *WEAP*. Son los siguientes: Esguerramiento de lluvia (método del coeficiente simplificado), Solo demandas de riego (método del coeficiente simplificado), Esguerramiento de lluvia (método de la humedad del suelo), MABIA (FAO56) y Desarrollo de plantas. En la investigación se utilizó el método de humedad del suelo para estimar la escorrentía producto de las precipitaciones. Esta metodología divide el suelo en dos laminas (Figura 15). A la lámina superior del suelo se le denomina Balde 1 y simula la escorrentía, flujo sub-superficial, evapotranspiración y humedad el suelo. La lamina inferior llamada Balde 2 simula la percolación y el flujo base, el cual puede ser transmitido a una acuífero o a un

río (Sieber y Purkey 2015). En la Figura 15 se muestra el esquema de la metodología.



**Figura 15: Esquema conceptual y ecuaciones del método humedad del suelo**

**Fuente: Sieber y Purkey (2015).**

Se tomaron como valores iniciales de cada parámetro los utilizados en ANA (2015) para luego ser calibrados.

**Conductividad en zona de raíces (Ks):** Esta conductividad determina la capacidad de transmitir el agua como flujo sub-superficial y percolación.

**Conductividad en zona profunda (Kd):** Esta variable representa la capacidad del agua para convertirse en flujo base.

**Factor de resistencia a la escorrentía (Rf):** Este factor afecta directamente el caudal en los ríos, varía entre 0-1.0 donde a mayor valor reduce el caudal.

**Dirección de flujo (F):** Este parámetro determina el porcentaje de agua que percola para un acuífero profundo o como flujo sub-superficial.

**Coefficiente (Kc):** El Kc es la variable más importante para la estimación de la evapotranspiración.

**Capacidad de agua en zona de raíces (SW):** Es la cantidad de agua que puede retener el Balde 1.

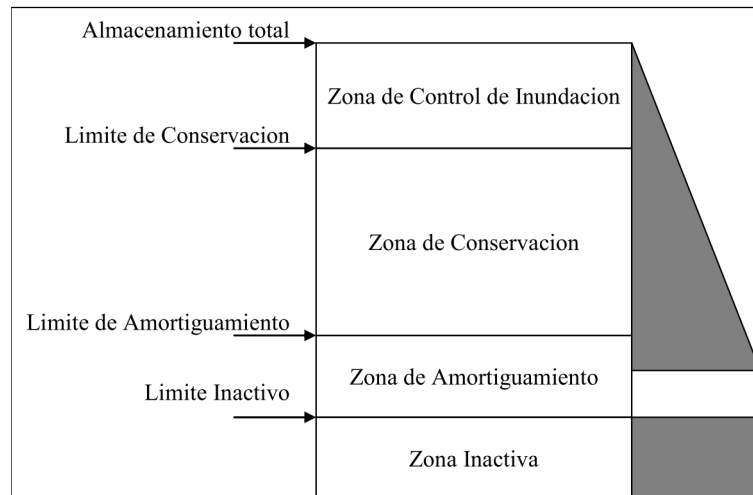


**Capacidad de agua en zona profunda (DWC):** Es la cantidad de agua que puede retener el Balde 2.

**Z1 y Z2:** Es el porcentaje del almacenamiento de cada Balde al inicio de la simulación.

### 3.3.5. Embalse

La representación de embalses en *WEAP* está dividida en cuatro zonas (Figura 16). Estas incluyen, la zona de control de inundación, la zona de conservación, la zona de amortiguamiento y la zona inactiva. Las zonas de conservación y amortiguamiento constituyen el agua disponible para manejo. *WEAP* se asegura que siempre la zona de control de inundación esta vacante y permite la liberación de agua de la zona de conservación para cumplir con requerimientos aguas abajo, ya sea para generación hidroeléctrica o demandas. Una vez el nivel de almacenamiento baja hasta la zona de amortiguamiento, la liberación de agua esta controlada de acuerdo con el coeficiente de amortiguamiento. El agua de la zona inactiva no esta disponible (Sieber y Purkey 2015).



**Figura 16: Zonas de simulación de embalses**  
**Fuente: Sieber y Purkey (2015).**

En el área de estudio se localiza el embalse de Sibinacocha. Los datos del embalse fueron obtenidos de la pagina web GEOHIDRO (ANA 2020). La capacidad máxima de almacenamiento es de 120 millones de  $m^3$  y un volumen aprovechable de 110 millones

de  $m^3$ . El embalse cubre la demanda de agua para la hidroeléctrica Machupicchu por lo se le asignó en el modelo *WEAP* esta demanda como regla de operación.

### 3.3.6. Central hidroeléctrica de paso

Las demandas energéticas que no están relacionadas a un embalse representativo se simularon mediante Central hidroeléctricas de paso. Estos funcionan asignando un valor máximo de caudal para la generación de energía, como valor máximo se utilizó las demandas correspondientes a cada estación. En la subcuenca 4 están las estaciones de Machupicchu 2 y Maca; en la subcuenca 1 se localizan las llamadas Lucre1 y Lucre2.

### 3.3.7. Demandas de agua

Se determinaron 4 tipos de demandas en el estudio. Las cuales son poblacional, agrícola, industrial y energética. Estas demandas fueron estimadas a una escala anual y asignadas a cada subcuencas.

- Poblacional: Se estimó utilizando las licencias de uso de agua poblacional en las correspondientes subcuencas y en el número de habitantes en los distritos dentro las subcuencas. La tasa de crecimiento poblacional se estimó utilizando la Eq.1. De la relación entre demandas de agua y número de habitantes se puede reconstruir la demanda pasada y proyectar la hasta el año 2099.

$$r = \frac{\sqrt[t]{P_t}}{P_o} - 1 \quad (1)$$

Donde:

- $r$ : tasa de crecimiento
- $t$ : número de años
- $P_t$ : población final
- $P_o$ : población inicial

- Agrícola: Debido a que no se cuenta con datos confiables de demandas en las licencias. La demanda se estimó utilizando la Eq.2. Se utilizó el software CROPWAT para estimar el  $RHC$  y la eficiencia de riego es igual a 0.5 según GRC (2020). El área agrícola para cada subcuenca se obtuvo del mapa de ecosistemas (MINAM 2019) para maximizar las demandas se consideró que toda el área agrícola está en uso y se mantiene constante hasta el año 2099. En el estudio del ANA (2015) se obtuvieron los datos de las cédulas de cultivo. Para la demanda futura se utilizaron las variables climáticas obtenidas de los  $GCM$ .

$$DA = \frac{RHC}{Efc} \times A \quad (2)$$

Donde:

- $DA$ : Demanda agrícola ( $m^3/año$ )
  - $RHC$ : Requerimiento hídrico del cultivo ( $m^3/Ha.año$ )
  - $Efc$ : Eficiencia de riego
  - $A$ : Área del cultivo ( $Ha$ )
- Industrial: En el  $RADA$  se encontraron estos tipos de licencias: industrial, recreativo, minería, acuícola y otros usos. Estos tipos de uso se convirtieron de tipo industrial debido que son actividades económicas. Del mismo modo que las demandas anteriores se agruparon de acuerdo a su ubicación en cada subcuenca.
  - Energético: Esta demanda corresponde a la cantidad de agua otorgada a las empresas generadoras de energía para su funcionamiento. La principal fuente de agua para la generación es el embalse de Sibinacocha.

### 3.3.7.1. Estimación del intervalo de confianza (IC)

El intervalo de confianza se tomará como el par de números entre los cuales se estima que estará el valor proyectado de demanda respecto a toda la serie, con un nivel de

confianza del 95%. Para estimar este intervalo se utilizó la siguiente ecuación Eq.(3):

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Donde:

- $\bar{x}$ : media
- $z_{\alpha/2}$ : 1.96 para IC del 95%
- $\sigma$ : desviación estándar
- $n$ : número de valores

### 3.3.8. Calibración y validación

El modelo *WEAP* fue calibrado y validado utilizando datos de caudales observados procedentes de la estación hidrométrica PISAC ubicada en el valle de Urubamba. Los datos fueron recolectados por el *SENAMHI*, siendo esta estación parte de su red de monitoreo. Los datos de caudales son desde el año 1987 al 2016 a escala de tiempo mensual. El periodo del 1987-2006 se uso para calibración y el 2007-2016 se utilizó para validación. También fueron las demandas observadas del *RADA* y sus respectivas proyecciones hasta el 1987.

**Calibración:** Se utilizó la herramienta *WEAP Model Inspector* (Angarita y Mehta 2016). Es una hoja de cálculo Excel que se enlaza mediante un MACROS con el *WEAP* para controlarlo y así realizar la ejecución de varias corridas con diferentes valores de los parámetros hidrológicos. De cada corrida se extrae el resultado de los caudales simulados, con que se realiza en análisis de sensibilidad con respecto a los caudales observados. La calibración se realiza para los parámetros que intervienen en el método de humedad del suelo como capacidad de agua en el suelo (SW), factor de resistencia a la escorrentía (Rf), conductividad en la zona de raíces (Ks), conductividad en la zona profunda (Kd), dirección de flujo (f), Z1 y Z2.

En el análisis de sensibilidad se utilizaron dos métricas para cuantificar que tan bien representan los datos simulados a los observados. La primera es el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ) Eq.4 y la segunda el porcentaje de desviación ( $PBIAS$ ) Eq.5. En la Tabla 4 se muestra los rangos de valores utilizados para la clasificación de las métricas utilizadas en cada corrida según Moriasi et al. (2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_i^o} \quad (5)$$

Donde:

- $Q_i^o$ : es caudales observados
- $Q_i^s$ : es caudales simulados
- $Q_i^m$ : es promedio de caudales observados
- $n$ : numero de caudales observados

**Tabla 4: Rango de valores para la clasificación de las métricas según Moriasi et al. (2007)**

Clasificación	PBIAS (%)	NSE
Muy buena	$< \pm 10$	0.75 - 1.00
Buena	$\pm 10 - \pm 30$	0.65 - 0.75
Satisfactorio	$\pm 30 - \pm 50$	0.50 - 0.65
No satisfactorio	$\geq \pm 50$	$\leq 0.5$

**Validación:** Se realizó después del proceso de calibración. Los caudales observados en la estación Pisac desde el 2007 al 2016 fue usado como referencia. Las métricas  $NSE$  y  $PBIAS$  también fueron usadas para cuantificar la precisión del proceso de validación.

### 3.3.9. Escenarios a evaluar

El modelo va hasta el año 2099. Se estableció el año 2018 de condiciones iniciales de oferta y demanda hídrica. Desde el 1987 al 2006 se realizó la calibración y desde el 2007 al 2016 la validaciones. Se evaluaron cuatro escenarios diferentes Tabla 5. El *Escenario 1* utiliza los datos climáticos del escenario *RCP4.5*, el *Escenario 2* con los datos climáticos del *RCP8.5*, *Escenario 3* con datos climáticos del *RCP4.5* y con cambios socioeconómicos y *Escenario 4* con datos climáticos del *RCP8.5* y con cambios socioeconómicos.

**Tabla 5: Características de los escenarios a evaluar**

Nombre	Escenario GCM	Cambio socioeconómico
Escenario 1	RCP 4.5	No
Escenario 2	RCP 8.5	No
Escenario 3	RCP 4.5	Si
Escenario 4	RCP 8.5	Si

#### 3.3.9.1. Proyección de variables climáticas (2017-2099)

Se realizó el proceso de ensamble multi-modelo promedio para reducir la incertidumbre inherente de cada modelo *GCM* (Pierce et al. 2009). Según Gleckler et al. (2008) y Dhakal et al. (2018) el ensamble multi-modelo tiene mejores resultados que el uso individual de cada modelo. El ensamble multi-modelo es el resultado del promedio de todos los modelos *GCM* descargado para cada variable *P* y *T*. Para las variables de velocidad del viento y humedad relativa, se repitieron los ciclos estacionales de las variables por año hasta el 2099.

#### 3.3.9.2. Proceso de downscaling con “Quantile mapping”

Debido a la gran escala de la resolución espacial de los *GCM* no es posible su uso directamente en menores escalas (Rauscher et al. 2010). Para superar este problema se

utilizó el procedimiento de downscaling estadístico. Se utilizó el proceso de “quantile mapping” detallado por Gudmundsson et al. (2012) de la siguiente forma:

Quantile mapping (también llamado como quantile matching, cumulative distribution function matching, quantile-quantile transformation) trata de encontrar la transformada de la variable modelada  $P_m$  de tal forma que la nueva distribución es igual a la distribución de la variable dependiente  $P_o$ . En la investigación  $P_o$  y  $P_m$  serán precipitación y temperatura observada y modelada respectivamente. Esta transformación es generalmente expresada como Eq.(6):

$$P_o = h(P_m) \quad (6)$$

Las transformaciones estadísticas son una aplicación de la transformada integral de probabilidad (Angus 1994). y si la distribución de la variable de interés es conocida, la transformación es definida como Eq.(7):

$$P_o = F_o^{-1}(F_m(P_m)) \quad (7)$$

Donde:

- $P_o$ : es variable observada
- $P_m$ : es variable modelada
- $F_o^{-1}$ : inversa de quantile function de  $P_o$
- $F_m$ : quantile function de  $P_m$

Para el downscaling se utilizaron datos climáticos de los productos *PISCOpd* y *PISCOdtn<sub>v</sub>1.1* y *PISCOdtx<sub>v</sub>1.1* como los datos observados del periodo 1981-2016 para el ajuste de los datos del ensamble promedio de los años 2017-2099. En la Figura 17 se muestra el ajuste a nivel mensual de la  $P$  del ensamble con los datos observados.

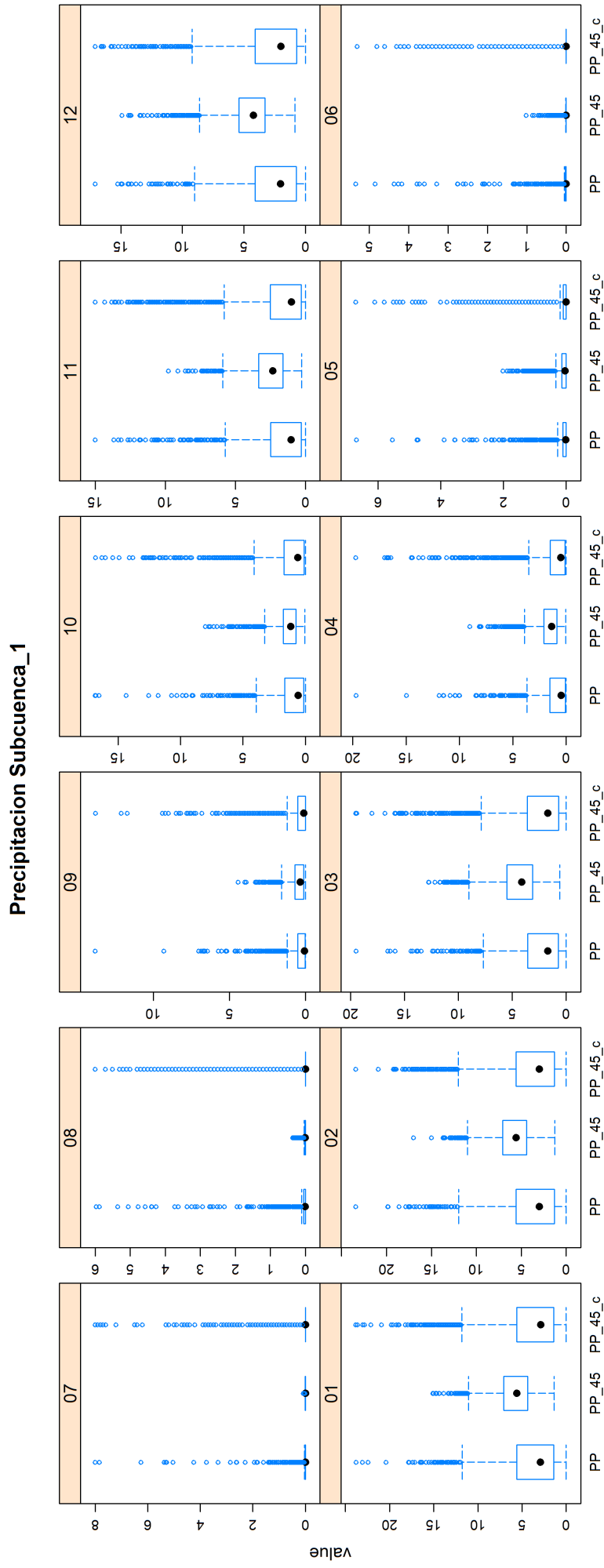


Figura 17: Resultado del proceso de empírico cuantiles para la variable de precipitación en la subsecuencia 1. Donde  $PP_{45}$ : representa la  $P$  sin corregir del escenario Rcp45;  $PP_{45c}$ : corresponde a la serie corregida;  $PP$ : es la serie de dato observados.



## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DEL PRODUCTO PISCO

En la Figura 18 se muestran los resultados de la comparación entre los datos obtenidos del producto *PISCO* y observados de la estación meteorológica Granja Kcayra. Se ubica en las coordenadas Lat:  $-13.5^\circ$  y Long:  $-71.8^\circ$ , cercana a la ciudad del Cusco a 3214 m.s.n.m. Se utilizó la correlación de Pearson, obteniendo los siguientes resultados: para la precipitación se obtuvo un valor  $r^2=0.96$  y temperatura de  $r^2=0.98$ . En ambos casos se obtienen un p valor menor al nivel de significancia  $\alpha=0.05$ . Con esto se puede concluir que los datos de *PISCO* y los observados están significativamente correlacionados (Anexo 2). Se mantuvo el uso de los datos grillados debido que existen áreas donde no se tiene con datos climáticos observados. Se debe tener en cuenta que el producto PISCO en toda la extensión de la cuenca VUB, puede presentar comportamientos de sobrestimación y subestimación, sin embargo, el objetivo es homogeneizar la información en zonas sin medición y representar la variabilidad en periodos húmedos y secos.

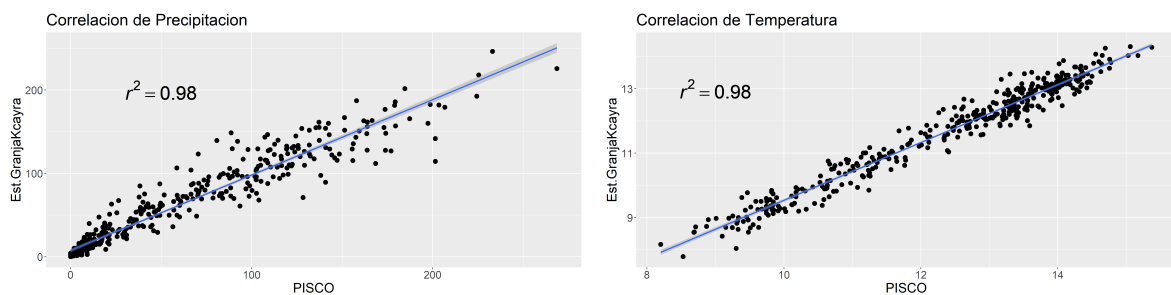


Figura 18: Correlación de la precipitación y temperatura entre el producto PISCO y observada en la estación Granja Kcayra (1981-2016)

## 4.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

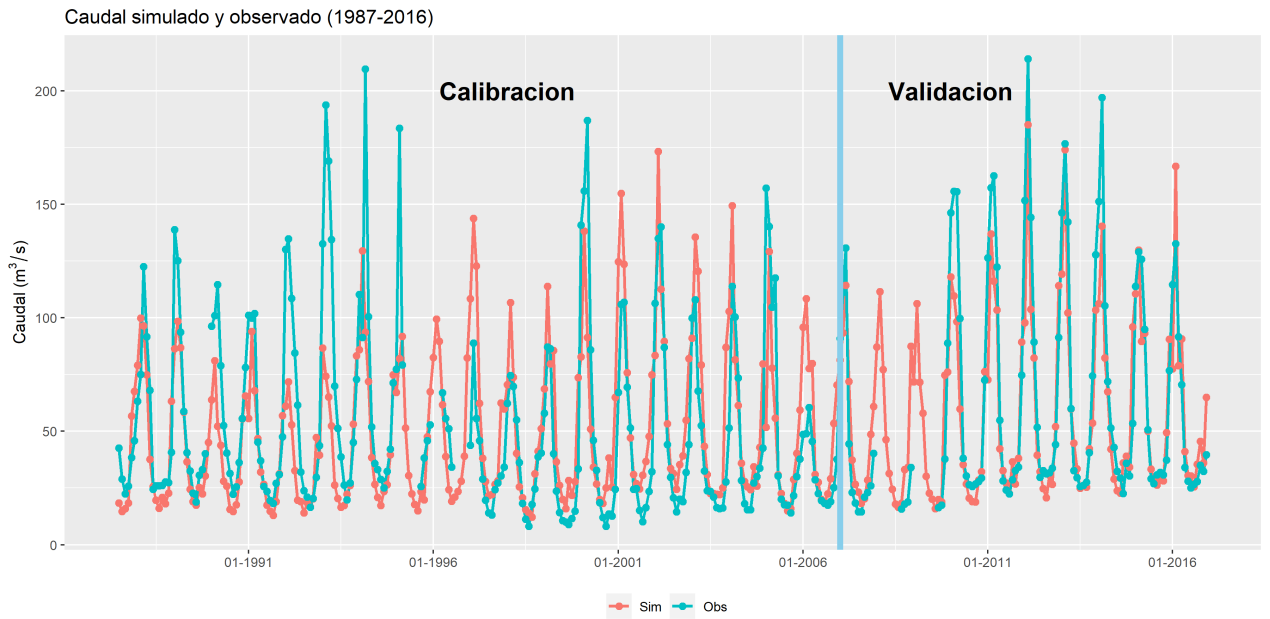
El modelo calibrado genera caudales que son muy cercanos a los observados. Se calibraron nueve valores y sus resultados están en la Tabla 6. Con estos valores se obtuvieron caudales simulados parecidos a los observados en la estación Pisac (Figura 19). Durante la calibración, el caudal simulado es menor y en la validación es mayor. En el periodo de calibración (1987-2006), el caudal observado promedio es de  $52.3 \text{ m}^3/s$  mientras que en el simulado es de  $59 \text{ m}^3/s$ . Para el periodo de validación (2007-2016) el caudal observado es de  $64.2 \text{ m}^3/s$  y en el simulado es de  $69.7 \text{ m}^3/s$ .

**Tabla 6: Parámetros calibrados para el modelo**

Parámetro	Valores calibrados						Unidad
	Agri - cultura	Bofedal	Matorral Arbustivo	Pajonal Andino	Plantación Forestal	Sin Vegetación	
Kc	1.08	0.55	0.51	0.69	0.69	0	-
SW	748.8	701.39	950.27	1293.74	485.77	705.36	mm
Rf	1.31	3.69	2.91	3.51	2.52	7.38	-
Ks	344.38	280	187.62	183.82	329	0	mm/mes
Kd				1.25			mm/mes
F				0.53			-
Z1				44.07			-
Z2				33.54			-
DWC				5000			mm

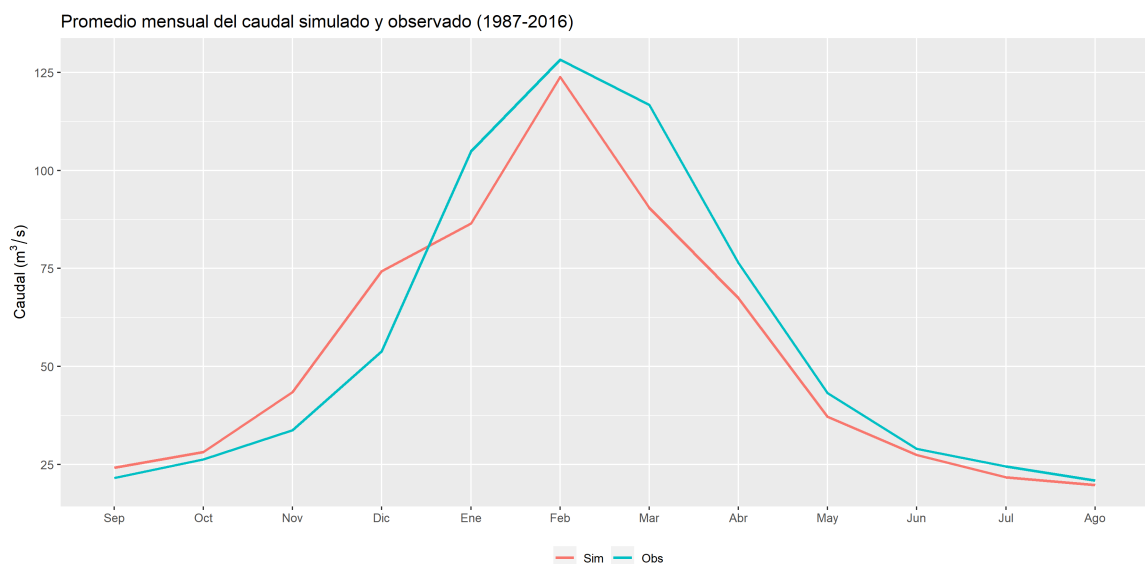
En la Figura 19 se puede observar que la serie de caudales observados se utilizó sin completar para la calibración. Según Hamzah et al. (2020) para los métodos de completación o generación de datos hidrológicos basados en modelos determinísticos se utilizan los valores completos de la variable de interés, que en este caso es el caudal.

En el periodo de calibración (1987-2006) el modelo tiende a subestimar el caudal durante la época húmeda pero en el periodo de validación (2007-2016) el modelo sobreestima el caudal durante la época húmeda. Por otra parte los caudales simulados en la época de estiaje están bien representados en el periodo de calibración pero en la época de validación se sobrestiman. En la Figura 20 se puede observar que el caudal simulado replica la estacionalidad de los caudales observados también son bien replicados los caudales mínimos siendo estos los de más interés para el balance hídrico. Estas difer-



**Figura 19: Caudal simulado y observado (1987-2016)**

encias se pueden deber a dos causas. La primera es que las precipitaciones utilizadas son estimaciones, por lo que no serian 100% representativas del área de estudio. En segundo lugar, el modelo no considera la recarga y descarga de los acuíferos presentes en el área de estudio. Es conocido que se realiza la explotación del agua subterránea para uso poblacional e industrial.



**Figura 20: Promedio mensual del caudal simulado y observado (1987-2016)**

Sin embargo el modelo produce valores razonables para el *NSE* y *PBIAS* (Tabla

7). El valor de  $NSE$  para el periodo de calibración y validación es de 0.60 y 0.84 respectivamente. El  $PBIAS$  es de 12.8% para el periodo de calibración y 8.5% para el periodo de validación. Según con los rangos de clasificación para las métricas utilizado (Moriasi et al. 2007) mostrados en la Tabla 7, los valores de  $NSE$  se clasifican como “muy bueno” para el periodo de calibración y “bueno” para el periodo de validación; los valores  $PBIAS$  se clasifican como “muy bueno” para el periodo de calibración y “bueno” para el periodo de validación.

Esto demuestra que el modelo es capaz de simular la hidrología del área de estudio en forma acertada. Lo que da la confianza de que la predicción del caudal futuros sea acertada manteniendo los parámetros calibrados hasta el año 2099. Esta metodología es utilizada en múltiples investigaciones: Ougougdal et al. (2020) ,Sithiengtham (2019),Amin et al. (2018),Olsson et al. (2017),Mourad y Alshihabi (2016),Purkey et al. (2007).

**Tabla 7: Valores de las métricas para los caudales observados y simulados**

<b>Simulación</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS (%)</b>	$\frac{Q_o}{m^3/s}$	$\frac{Q_s}{m^3/s}$
Calibración (1987 - 2006)	0.60	12.8	52.3	59
Validación (2007 - 2016)	0.84	8.5	64.2	69.7

### 4.3. DEMANDA Y SEGURIDAD HÍDRICA INICIAL

La demanda actual estimada se puede ver en la Tabla 8. En total se estimó una demanda de  $274.25 \text{ hm}^3/\text{año}$  (2018). La demanda agrícola es la mayor con  $223.75 \text{ hm}^3/\text{año}$  equivalente al 81.6%. El uso poblacional tiene una demanda de  $40.97 \text{ hm}^3/\text{año}$  representado el 14.9%. El menor uso es el industrial con  $9.53 \text{ hm}^3/\text{año}$  representando solo el 3.5%. La demanda energética es de  $266.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  pero al ser de uso “no consuntivo” no se consideró en para la sumatoria de demanda total.

**Tabla 8: Demandas actuales estimadas en el área de estudio**

<b>Demanda</b>	<b>Volumen anual (<math>hm^3</math>)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Poblacional	40.97	14.9
Agrícola	223.75	81.6
Industrial	9.53	3.5

#### 4.3.1. Demanda agrícola

La demanda agrícola es el mayor uso de agua en el área de estudio. En total se determinó una área agrícola aproximada total de  $420 km^2$  (MINAM 2019) y con una demanda estimada de  $223.75 hm^3/año$ . Para la subcuenca 1 se determinó una área agrícola de  $320 km^2$  y un demanda estimada de  $155.9 hm^3/año$  representando el 69.7% del consumo total. La subcuenca 4 tiene una área de  $100 km^2$  y un demanda estimada de  $67.85 hm^3/año$ , equivalente a 30.3%.

Esta alta demanda se debe a la deficiente estructura de riego en el área de estudio representada mediante una eficiencia de riego igual a 0.5 (GRC 2020). Una baja eficiencia de riego implica que se agregue más agua de la necesaria para el cultivo. Este exceso de agua se pierde mediante percolación, evaporación y escorrentía (Sithiengtham 2019).

Según ANA (2015) actualmente en el área de estudio existen dos organismos que realizan trabajos, proyectos y estudios relacionados con las necesidades hídricas y las eficiencias de los sistemas de suministro para riego. Estos son el “Proyecto Especial Regional Plan de Mejoramiento de Riego de la Sierra y Selva de la Región Inka” (PER PLAN MERISS) y gobiernos regionales. Sin embargo no se tiene un solo criterio para estimar la demanda agrícola. Esto es evidenciado por la disparidad de criterios utilizados para el cálculo de las demandas en cada uno de los estudios realizados por los organismos antes mencionados.

Esto lleva que se recurran a métodos indirectos mediante el uso del software CROP-WAT. Actualmente se viene desarrollando investigaciones para estimar la demanda agrícola mediante el usos de imágenes satelitales e información climatología de modelos climáticos como por ejemplo Choudhury y Bhattacharya (2020).

En la Tabla 9 se muestra que el maíz amiláceo es el de mayor demanda con  $127.9 \text{ hm}^3/\text{año}$  seguido por la papa con  $15.79 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Siendo estos cultivos los más representativos en el área de estudio.

**Tabla 9: Demanda agrícola estimada por cultivo en el área de estudio**

Cultivo	Subcuenca1		Subcuenca4	
	Área (Ha)	Demanda ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )	Área (Ha)	Demanda ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )
Maíz Amiláceo	21306.7	92.6	6013.2	35.3
Papa	983.4	5.39	1503.3	9.8
Hortalizas	6883.7	2.9	-	-
Legumbres	1311.2	3.8	1202.6	6.2
Cereales	1639	1.8	1503.1	18
Tomates	327.8	2.2	-	-

#### 4.3.2. Demanda poblacional

Esta demanda depende directamente del número de habitantes (Sithiengtham 2019). Para el año 2018 se estimo una población de 641,286 y consumen  $40.97 \text{ hm}^3/\text{año}$  de agua. La subcuenca 1 tiene una población de 534,519 con un consumo de  $26.7 \text{ hm}^3/\text{año}$  representando el 65.2% del consumo total. La subcuenca 4 tiene una población 106767 con un consumo de  $14.27 \text{ hm}^3/\text{año}$  equivalente al 34.8%.

En la subcuenca 1 se ubica la capital del departamento de Cusco, la ciudad de Cusco, la cual concentra la mayor cantidad de población por lo cual tienen la mayor demanda hídrica y administrado por la EPS SEDACUSCO. En la subcuenca 4 se ubica la ciudad de Sicuani, también concentra una importante densidad poblacional. Según el ANA (2015) existen organizaciones locales, como por ejemplo Comités de Agua Potable o Juntas Administradores de Servicios de Saneamiento, que realizan el suministro de agua potable a poblaciones de menor tamaño por ejemplo la ciudad de Sicuani.

Las principales fuentes para la extracción del recurso hídrico son de tipo superficial (ríos, quebradas, manantiales y laguna). También se hace uso del agua subterránea, este uso aun es muy poco en comparación de las fuente superficial. Además no se considero la dinámica del agua subterránea en el modelamiento.

### 4.3.3. Demanda industrial

La demanda industrial es el menor consumo. En las subcuenca 1 se estimó una demanda de  $5.12 \text{ hm}^3/\text{año}$  para el año 2018 y en la subcuenca 4 es de  $2.64 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el mismos año. Las actividades que comprendes esta demanda son las de manufactura, empresas de explotación de recursos naturales para generación de energía (petroleras, fundamentalmente), recreativo y acuícola.

### 4.3.4. Demanda energética

En el área de estudio se ubican tres empresas generadoras de energía con demandas de caudales mínimos. Además se encuentra el embalse de Sibinacocha que provee de agua para la generación de energía en la Hidroeléctrica Machupicchu, la cual se encuentra fuera del área de estudio. En la Tabla 10 se muestran las demandas y su ubicación. Estas se mantendrán constantes para la proyección hasta el 2099.

**Tabla 10: Empresas generadoras de energía en el área de estudio**

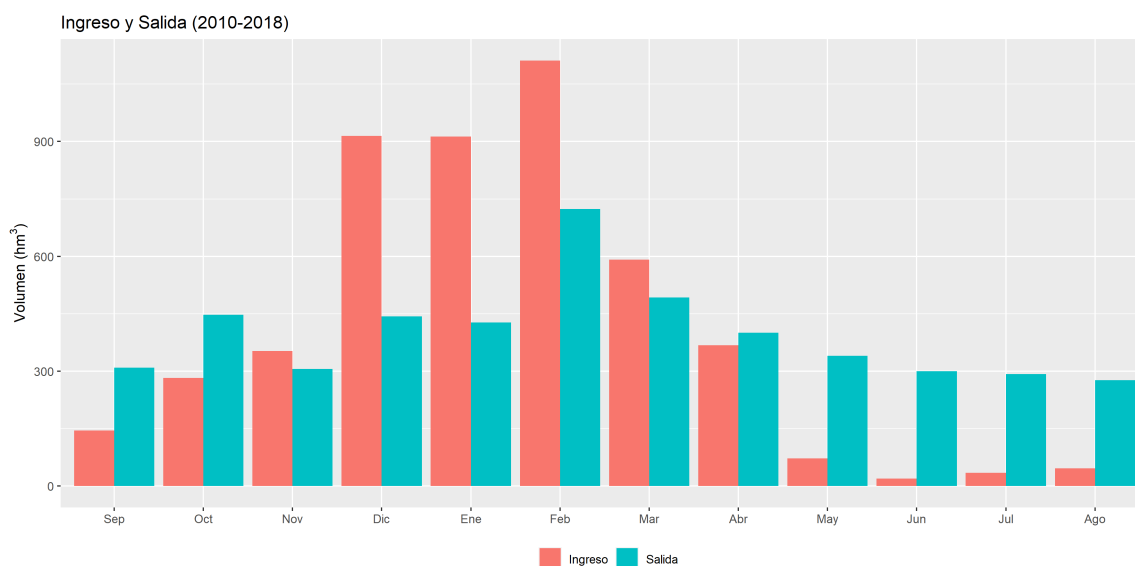
Central Hidroeléctrica	Demanda ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )		
	Subcuenca1	Subcuenca3	Subcuenca4
Lucre S.A.C	12.5		
Machupichu		110	34
Maca		110.3	

### 4.3.5. Seguridad hídrica en el periodo 2010-2018

De acuerdo al análisis de disponibilidad hídrica existe un superávit de agua con el que se cubren las demandas en su totalidad. El modelo muestra que un promedio de  $2237 \text{ hm}^3/\text{año}$  escurren por la estación Pisac cada año. La Figura 21 muestra la cantidad de agua que entre y sale del área de estudio. Se puede observar que la cantidad de agua entrando es mucho mayor durante la época húmeda de  $572 \text{ hm}^3$  y en la época de estiaje es  $42 \text{ hm}^3$ . La cantidad de agua saliendo es mayor durante la época húmeda con  $338 \text{ hm}^3$  y en la época de estiaje  $210 \text{ hm}^3$ . Durante la época de estiaje la salida de

agua es mayor debido que la principal fuente de ingreso, la precipitación, disminuye y toda el agua contenida en suelo es liberada como escorrentía superficial.

Existe un gran superávit de agua para los usos. Si comparamos la cantidad de agua precipitada y la escorrentía con las demandas son respectivamente 19 y 8 veces mayores. Lo que en porcentaje correspondería solo al 5.3% con respecto a la precipitación y al 13% con referencia a la escorrentía. Este superávit permitiría que las demandas aumenten o se intensifiquen, por ejemplo 10 a 15 veces. Sin embargo, la disponibilidad no está igualmente distribuida en la cuenca Vilcanota-Urubamba. La mayor disponibilidad se encuentra en el río Vilcanota en la subcuenca 1, ya que se ubica a menor altitud por lo que recibe la escorrentía de las demás subcuencas.



**Figura 21: Promedio mensual de los ingresos y salidas de agua al área de estudio (2010-2018)**

#### 4.3.5.1. Ingresos de agua

Existen dos ingresos de agua la cuenca VUB: la precipitación y el volumen entregado por el embalse de Sibinacocha lo que suman  $4848 \text{ hm}^3/\text{año}$  (Tab.11). En la Figura 22 se puede apreciar el mayor ingreso es proveniente de la precipitación. El promedio de  $P$  anual es de  $704.9 \text{ mm}$ , la cual se convierte en promedio  $4747 \text{ hm}^3/\text{año}$  ( $\cong 95\%$ ) en toda el área de estudio. La mayoría de este aporte se de en los meses de la época húmeda mes pico de noviembre a marzo. La segunda fuente es el aporte de embalse



Sibinacocha siendo significativamente menor. Se encuentra en funcionamiento desde el año 1997 y esta administrada por “Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.” (EGEMSA). El aporte anual es de  $100 \text{ hm}^3/\text{año}$  ( $\cong 5\%$ ). Debe mencionarse los ingresos de aguas subterránea no fueron consideradas en el presente estudio.

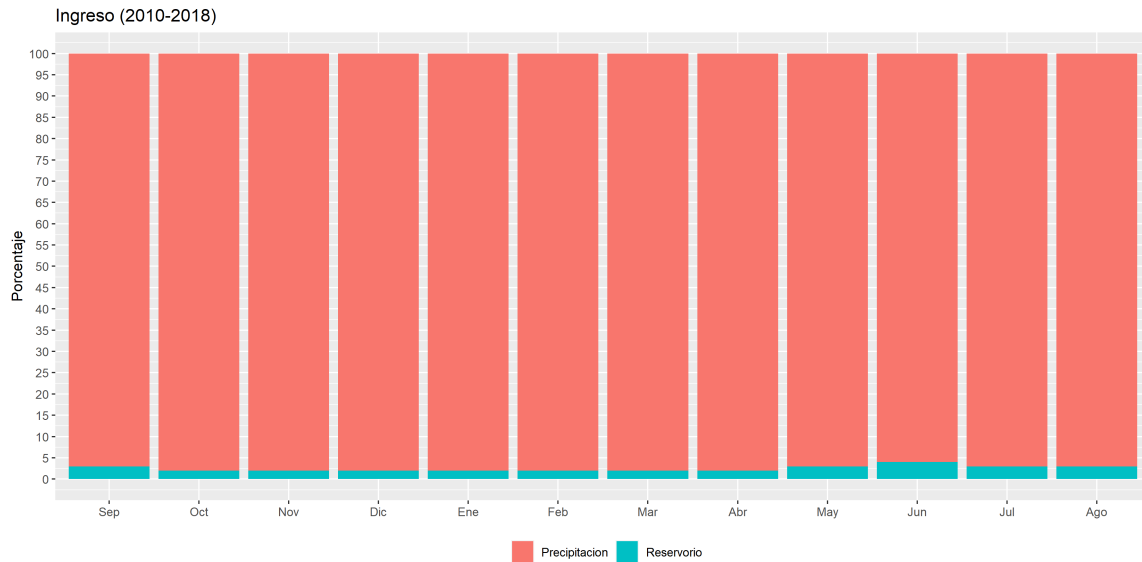


Figura 22: Promedio mensual de los ingresos al área de estudio (2010-2018)

Tabla 11: Ingreso total anual promedio al área de estudio

Ingreso	Volumen ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )	Proporción (%)
Precipitación	4747	98
Sibinacocha	100	2
<b>Total</b>	<b>4848</b>	<b>100</b>

#### 4.3.5.2. Salidas de agua

El agua sale del área de estudio mediante tres mecanismos (Figura 23). En la Tabla 12 se muestra el volumen total anual promedio de estas salidas. La escorrentía superficial es la de mayor cantidad con  $1984 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Seguido por la evapotranspiración real (Eto) simulada por el modelo *WEAP*, la cual tiene su valor promedio de  $1305 \text{ hm}^3/\text{mes}$ . Las demandas son de menor volumen con  $253 \text{ hm}^3/\text{año}$ . El agua es usada para uso poblacional, agrícola e industrial por lo que mucha de ella no es regresada al sistema. Adicionalmente existe agua que sale del área de estudio como agua subterránea

la cual llega a las menores altitudes como flujo base. Sin embargo, este movimiento del agua no ha sido incluido en el modelamiento.

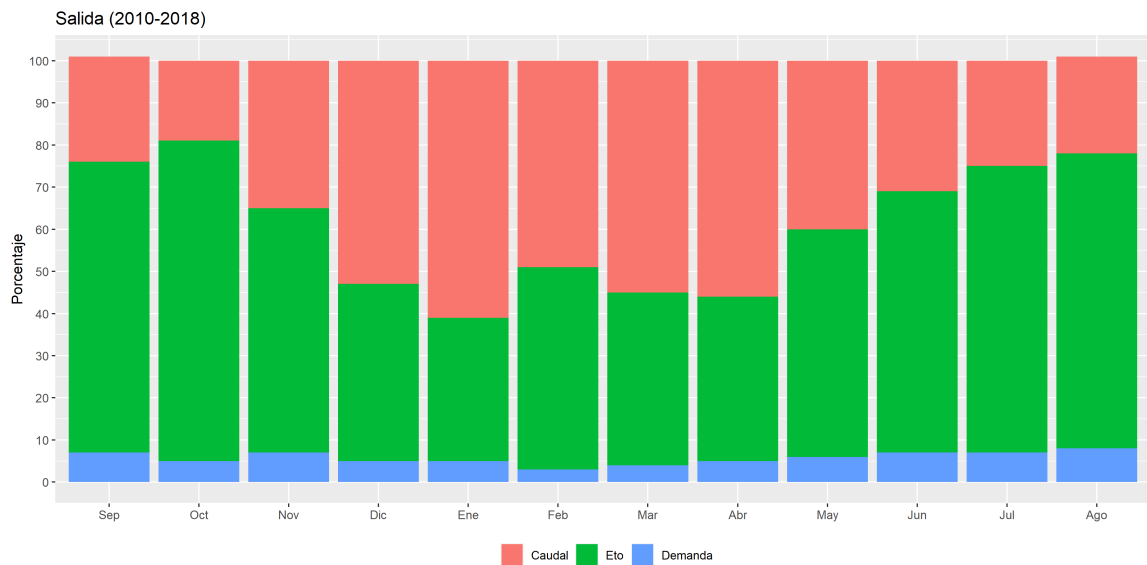


Figura 23: Promedio mensual de las salidas al área de estudio (2010-2018)

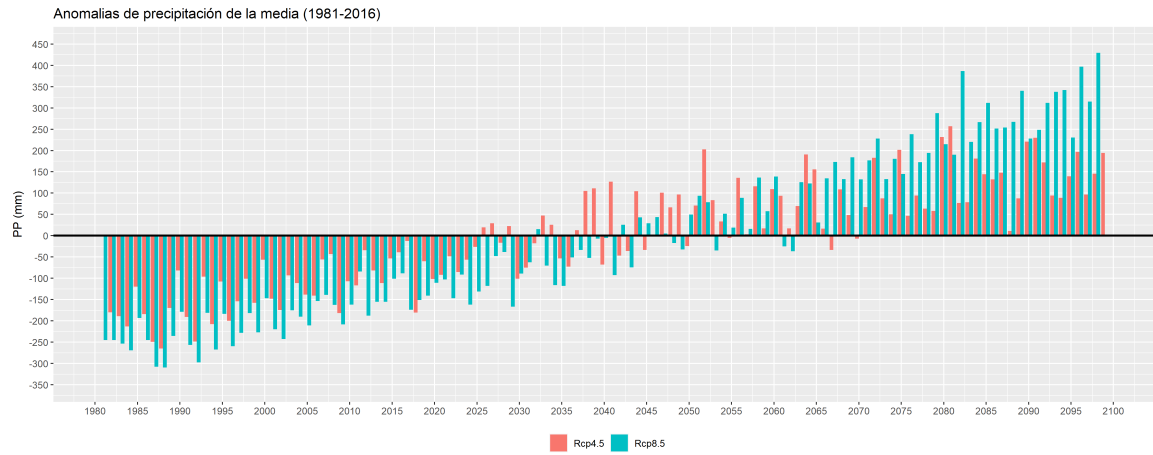
Tabla 12: Salida total anual promedio al área de estudio

Salida	Volumen ( $hm^3/año$ )	Proporción (%)
ETR	1305	37
Escorrentía	1984	56
Demandas	253	7
<b>Total</b>	<b>3542</b>	<b>100</b>

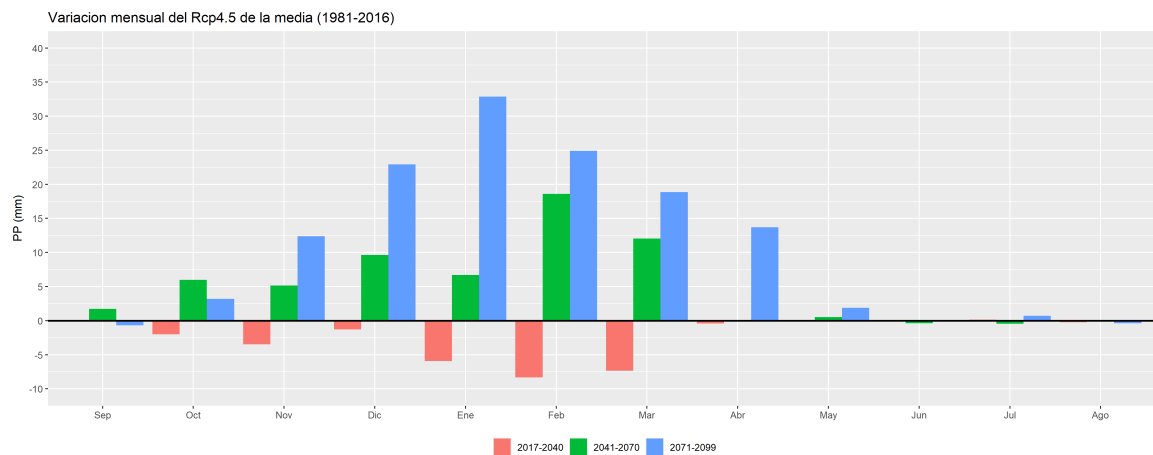
#### 4.4. ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático tiene un efecto directo en los recursos hídricos, principalmente en la disponibilidad del mismo en el futuro. Para la estimación de la oferta y disponibilidad futura se generaron dos escenarios a partir de datos climáticos obtenidos del producto *NEX – GDDP*. En la Figura 24 se puede observar las anomalías de la precipitación anual con respecto a la media de los años 1981-2016. El incremento de la  $P$  podría aumentar el agua disponible en el área y la escorrentía superficial. Al mismo tiempo, la temperatura se proyecta que aumentara, esto podría aumentar la evapotranspiración y cambios en los patrones de precipitación (Sithiengtham 2019). El aumento de la temperatura también tiene como principal efecto el derretimiento de los glaciares (Drenkhan et al. 2015). Esto generaría la pérdida de la capacidad de

almacenamiento de los glaciares y el incremento de la escorrentía. Estos cambios en el clima podrían incrementar la ocurrencia de inundaciones o sequías en la cuenca de Vilcanota-Urubamba.



**Figura 24:** Anomalías de la precipitación anual (con respecto a la media de los años 1981-2016) para el periodo 1981-2099, para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



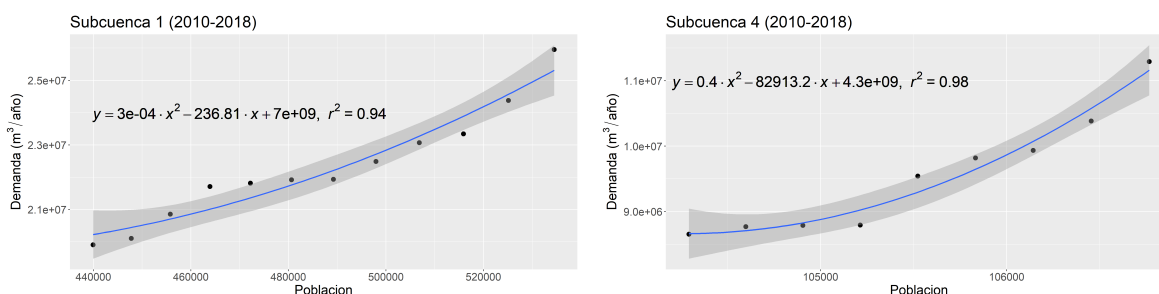
**Figura 25:** Cambio de la media mensual de la precipitación para los años 2040, 2070 y 2099 para el escenarios RCP 4.5 con respecto a la media del periodo (1981–2016).

## 4.5. DEMANDA Y SEGURIDAD HÍDRICA FUTURA

Las demandas futuras fueron proyectadas hasta el año 2099, de acuerdo a su propio comportamiento en el periodo 2010-2018. A continuación, se explicará cada una de ellas.

### 4.5.1. Demanda poblacional

Se determinó una relación polinomial de segundo grado entre número de habitantes y la demanda anual según las licencias del *RADA*. Utilizando la Eq.1 se estimó que la población en subcuenca 1 crece a una tasa de 1.8% y en la subcuenca 4 de 0.2%. Existe una alta migración de los habitantes de mayores altitudes (subcuenca 4) hacia menores (subcuenca 1), viéndose reflejado en sus tasas de crecimiento. En la Figura 26 se puede observar que la ecuación polinomial de segundo grado es la que mejor se ajustan a la relación entre demanda y población. Además, el sombreado gris representa la variabilidad (Ec.3) de los valores que se podrían obtener con la ecuación.

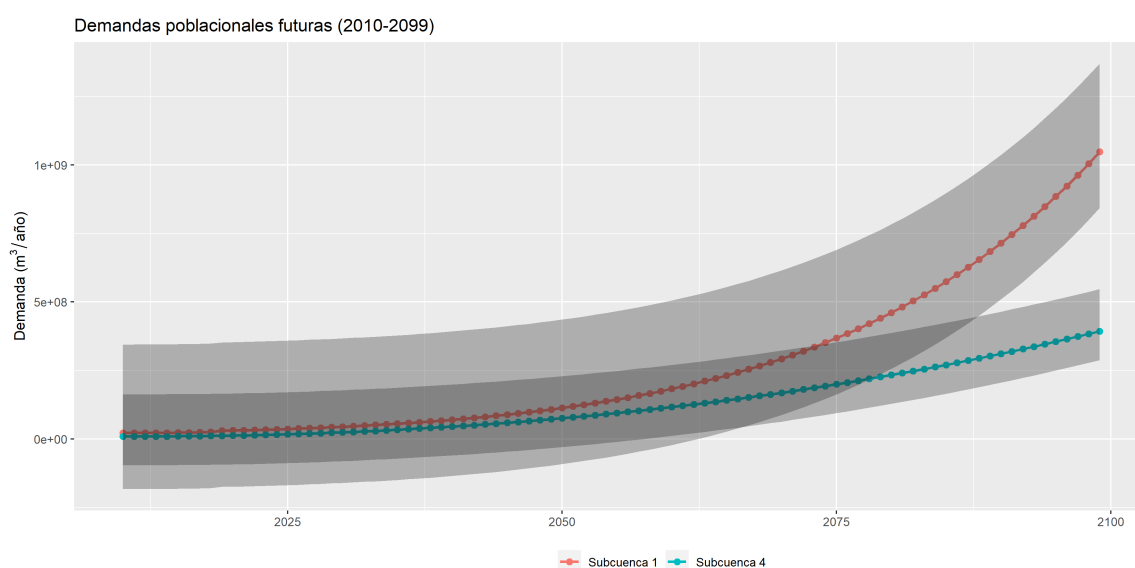


**Figura 26: Relación entre la demanda de agua y el número de habitantes**

El mayor crecimiento en la demanda lo tiene la subcuenca 1 (Figura 27). Como se muestra en la Tab.13 para el año 2099 se estima una población de 2.2 millones con una demanda de  $1047 \text{ hm}^3$  para la subcuenca 1 y 135,375 habitantes con  $393 \text{ hm}^3$  de demanda en la subcuenca 4. Estas demandas pueden ser mayores si se toman en cuenta los valores máximos de los IC determinados. Para la subcuenca 1 en el 2099 podría llegar como máximo  $1370 \text{ hm}^3$  y mínimo  $842 \text{ hm}^3$ . Para la subcuenca 4 en el 2099 podría llegar como máximo  $546 \text{ hm}^3$  y mínimo  $288 \text{ hm}^3$ .

**Tabla 13: Demanda poblacional futura anual en el área de estudio**

Año	Pob	Subcuenca 1			Subcuenca 4			
		Min	Dem ( $hm^3$ )	Max	Pob	Min	Dem ( $hm^3$ )	Max
2030	661032	6	44.5	366.1	110589	2.22	24.2	177.8
2040	789051	6	69.9	392.3	113878	2.22	45	198.6
2050	941863	6	113	435.5	117265	2.22	75.5	229
2060	1124270	6	182.9	505.3	120753	11.27	116.4	269.9
2070	1342002	87.6	292.4	614.9	124345	63.4	168.6	328
2080	1601901	255.5	460.4	782.8	128043	127.9	233.1	386.6
2090	1912134	509.1	714	1036.4	131851	205.7	310.8	464.4
2099	2242398	842.5	1047.4	1370	135375	287.9	393.1	546.6

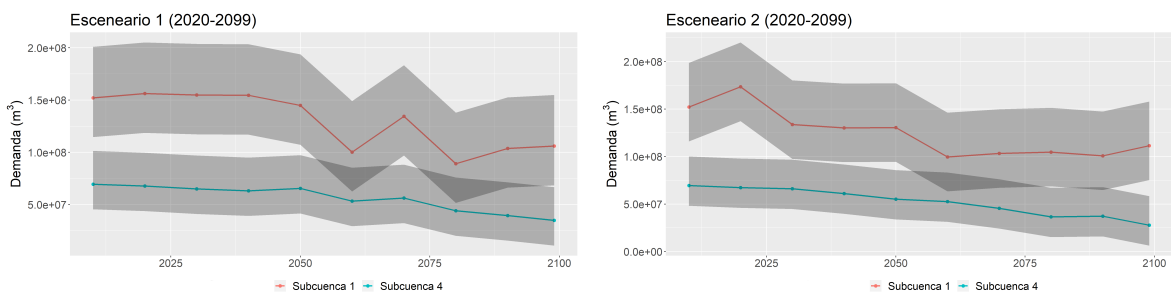


**Figura 27: Demanda poblacional proyectada (2010-2099)**

El consumo promedio de agua estimado por habitante para el periodo 2030-2099 se estimó de  $743.6 \text{ l/hab.dia}$  (Subcuenca 1) y  $3650.4 \text{ l/hab.dia}$  (Subcuenca 4) siendo estos valores sobrestimaciones con respecto a lo determinado por MVCS (2014) de  $100 \text{ l/hab.dia}$ . Esta sobrestimación se debe a la regresión polinomial de segundo grado utilizada, utilizar una regresión lineal representaría más adecuadamente los valores futuros. Sin embargo, según MINAGRI (2021) el consumo por persona en la sierra es de  $1000 \text{ l/hab.dia}$ . Considerando lo anterior, el valor obtenido en la Subcuenca 4 se consideraría como una sobrestimación. En la Subcuenca 4 se podría dar el caso de que actualmente las licencias de para uso poblacional también se estén utilizando para actividades económicas principales, las que incrementan el consumo de agua poblacional.

#### 4.5.2. Demanda agrícola

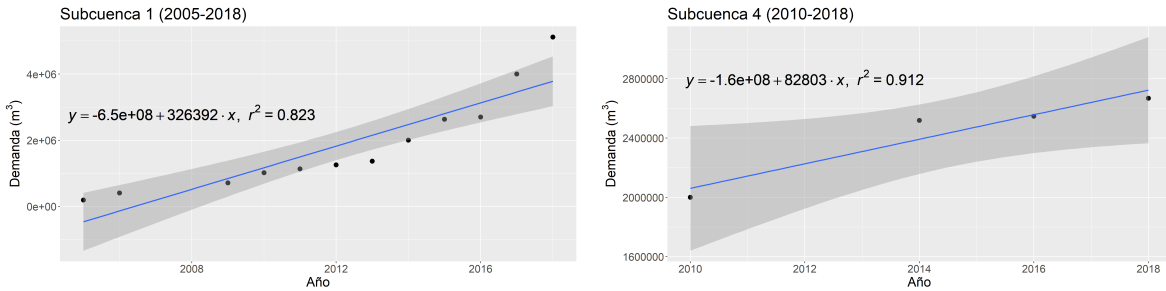
En la Figura 28 se puede observar que las demandas disminuyen hasta el año 2099. Al mantenerse la eficiencia constante (0.5) lo que disminuye es el *RHC*. Esta disminución se debe a que según el ensamble multimodelo la *P* aumenta en todos los escenarios así como la *T*. En Subcuenca 1 la *P* aumentará en promedio 1.1% para el año 2099 para ambos escenarios. Con respecto a Subcuenca 4 aumentará en promedio 1.5%. Al incrementar la *P* el requerimiento actual del cultivo disminuye. Según la Tabla (Anexo 3) la demanda agrícola en Subcuenca 1 para el año 2099 será de  $106 \text{ hm}^3$  y  $111 \text{ hm}^3$  con máximo de  $154.8 \text{ hm}^3$  y  $157.9 \text{ hm}^3$  para el *Escenario 1* y *Escenario 2*. En la Subcuenca 4 para el año 2099 será de  $34 \text{ hm}^3$  y  $27 \text{ hm}^3$  con máximo de  $66.7 \text{ hm}^3$  y  $58.3 \text{ hm}^3$  para los escenarios *Escenario 1* y *Escenario 2*.



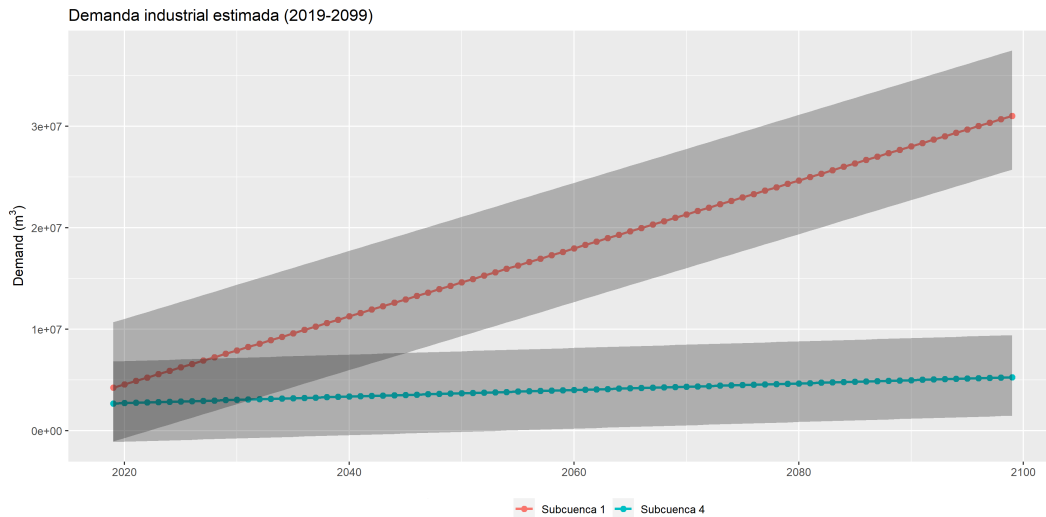
**Figura 28: Demandas agrícolas estimadas para el Escenario 1 y Escenario 2 (2020-2099)**

#### 4.5.3. Demanda industrial

Se determinó que existe una tendencia lineal en el crecimiento de las demandas industriales según el *RADA*. En la Figura 29 se puede observar que Subcuenca 1 tiene un crecimiento mayor que Subcuenca 4. Esto debido que la mayor población se concentra en Subcuenca 1. Se proyecta alcanzar, en el año 2099, una demanda de  $31 \text{ hm}^3$  y máxima de  $37.5 \text{ hm}^3$  para Subcuenca 1 y  $5 \text{ hm}^3$  y máxima de  $9.4 \text{ hm}^3$  para Subcuenca 4 (Anexo 4).



**Figura 29: Tendencia lineal positiva de las demandas industriales**



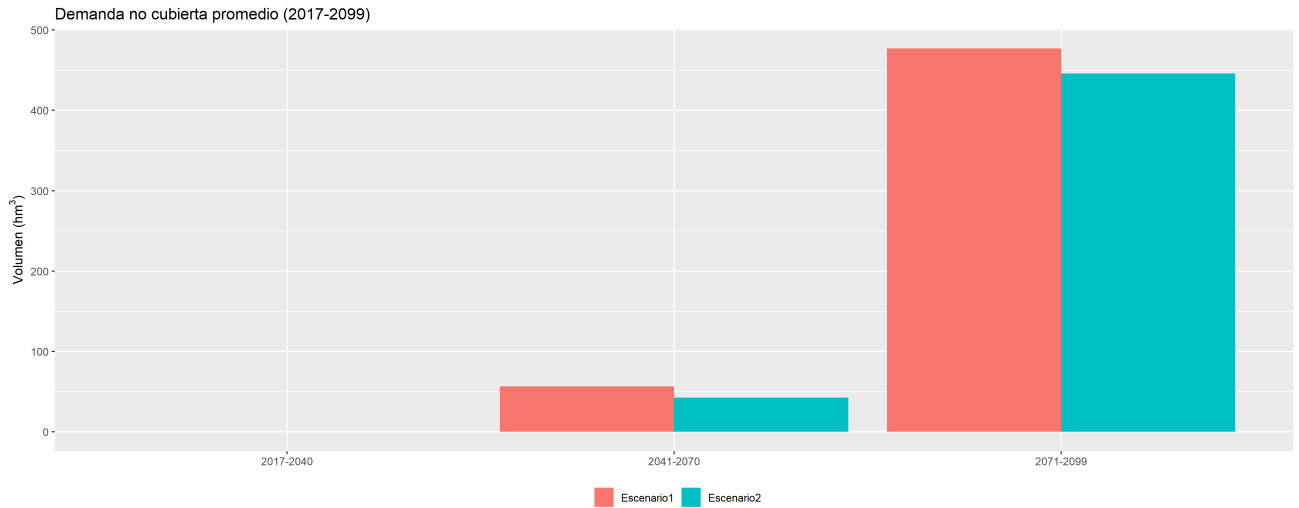
**Figura 30: Demanda industrial proyectada (2019-2099)**

#### 4.5.4. Escenario futuro con el cambio climático

En la Figura 31 se puede observar la demanda no cubierta promedio para los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2099 para el *Escenario 1* y *Escenario 2*. La demandas no cubiertas serían mayores de tomarse en cuenta las demandas máximas estimados en los intervalos de confianza.

Para el periodo 2017-2040 la oferta hídrica logra cubrir todas demandas, por lo que no existe demanda no cubierta en ambos escenarios. En el periodo 2041-2070 se estima una demanda no cubierta de  $56.72 \text{ hm}^3$  para el Escenario 1 y para el Escenario 2 de  $42.62 \text{ hm}^3$ . Para el periodo 2071-2099 es de  $477.21 \text{ hm}^3$  en el Escenario 1 y  $445.80 \text{ hm}^3$  para el Escenario 2. En periodo de 2071-2099 es el más crítico ya que aumenta la demandan no cubierta 8 y 10 veces con respecto al periodo anterior. En ambos escenarios las Subcuencas 1 y 4 tienen los mayores volúmenes de demanda no cubierta.

Los principales tipos de demandas no cubiertas para ambas subcuencas son la agrícola y poblacional. La demanda poblacional siempre esta aumentando debido a la tasas de crecimiento positiva en ambas cuencas.

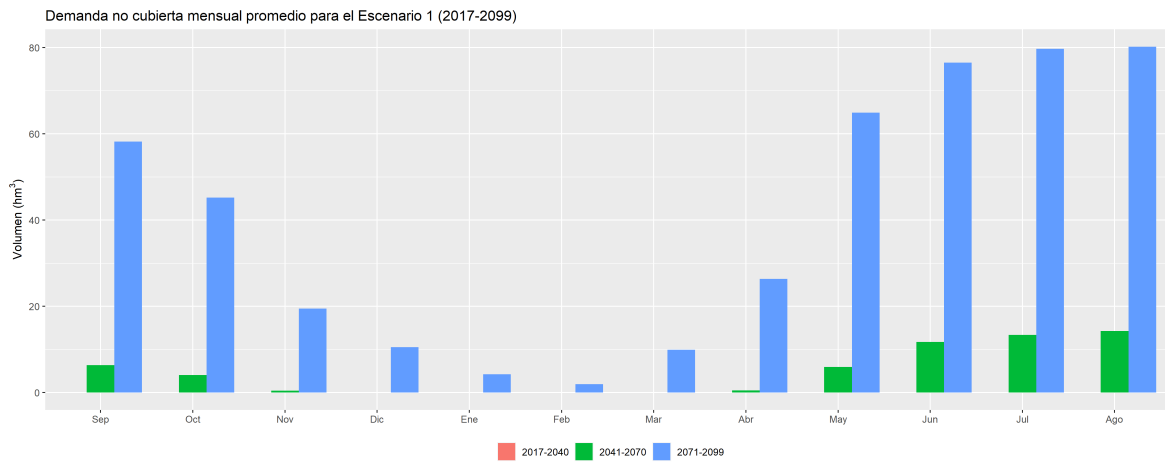


**Figura 31: Demanda no cubierta anual para el Escenario 1 y 2 para el periodo 2017-2099**

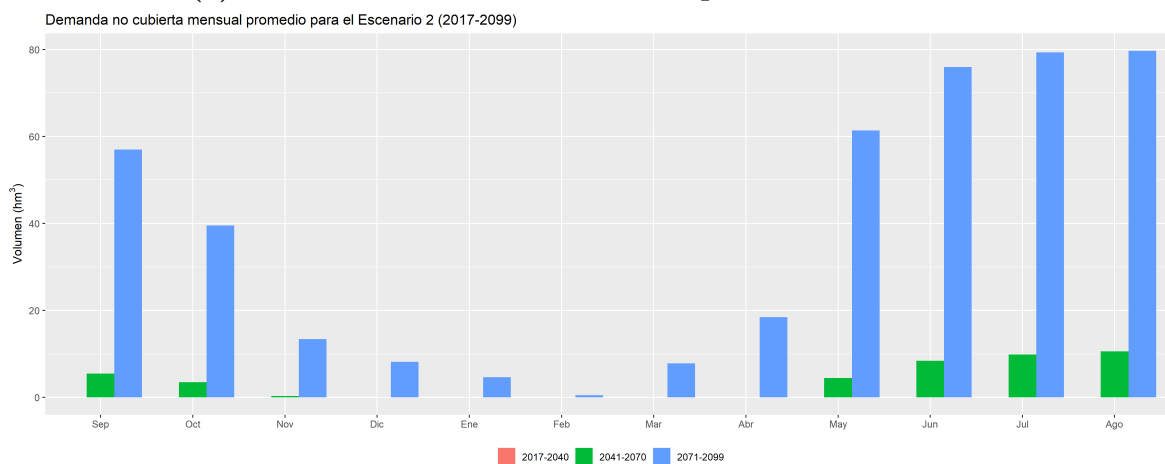
En la Figura 32 se muestra el promedio mensual de la demanda no cubierta para los periodos 2017-2040, 2041-2070 y 2071-2099. En ambos escenarios la mayor demanda no cubierta se da en los meses correspondientes a la época seca de mayo a octubre, con picos en julio y agosto. Debido a la falta de precipitaciones.

Para el escenario *Escenario 1* y el periodo 2041-2070 la mayor demanda no cubierta es de  $14.28 \text{ hm}^3$ ; para el periodo de 2071-2099 de  $80.21 \text{ hm}^3$  ambos en el mismo mes de agosto. Para el escenario *Escenario 2* y el periodo 2041-2070 la mayor demanda no cubierta es de  $10.61 \text{ hm}^3$ ; para el periodo de 2071-2099 de  $79.69 \text{ hm}^3$ , igualmente en el mes agosto. En el periodo 2040-2070 existe demanda no cubierta solo en los meses de la época seca en cambio para el periodo 2071-2099 se da durante todo el año, siendo mucho menor en la época húmeda.





(a) Demanda no cubierta mensual para el Escenario 1.



(b) Demanda no cubierta mensual para el Escenario 2.

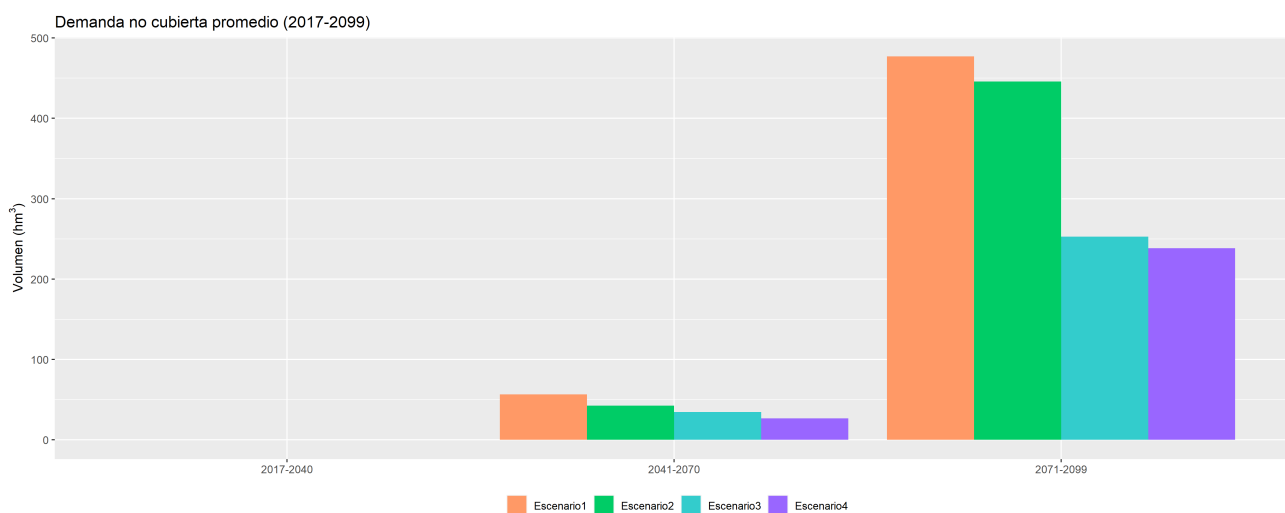
**Figura 32: Demanda no cubierta mensual para los Escenario 1 y 2 en la cuenca Vilcanota-Urubamba para el periodo (2017-2099)**

#### 4.5.5. Escenario de CC con cambios socio-económicos

Debido a que la demanda poblacional y agrícola son las de mayor impacto en la seguridad hídrica, se plantea 2 nuevos escenarios: el *Escenario 3* toma como base el *Escenario 1* y *Escenario 4* el *Escenario 2* y cada uno con respectivos cambios en la estimación de las demandas futuras. Para disminuir la demanda poblacional se aplicará una política de migración planificada a la ciudad del Cusco (Subcuenca 1) además de incentivar el consumo responsable del recurso hídrico. Esta política de migración reduciría la tasa de crecimiento a 0.3% (INEI 2018) desde el año 2050. En la Subcuenca 4 la tasa de crecimiento se mantuvo constante ya que es de 0.2%, no es posible reducirla más. Para el año 2050 la infraestructura de riego ha aumentado permitiendo alcanzar eficiencias

de riego iguales a 0.8 en todas las áreas de cultivo.

En la Figura 33 se muestra la comparación de los 4 escenarios modelados para los periodos 2017-2070, 2041-2070 y 2071-2099. Se puede observar la reducción de la demanda no cubierta para el *Escenario 3* y *Escenario 4*. Para el periodo 2041-2070 la demanda no cubierta del *Escenario 3* es de  $34.6 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 39%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $26.7 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 37%. Para el periodo 2070-2099 la demanda no cubierta del *Escenario 3* es de  $252.8 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 46%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $238.2 \text{ hm}^3$ , siendo una reducción del 47%.

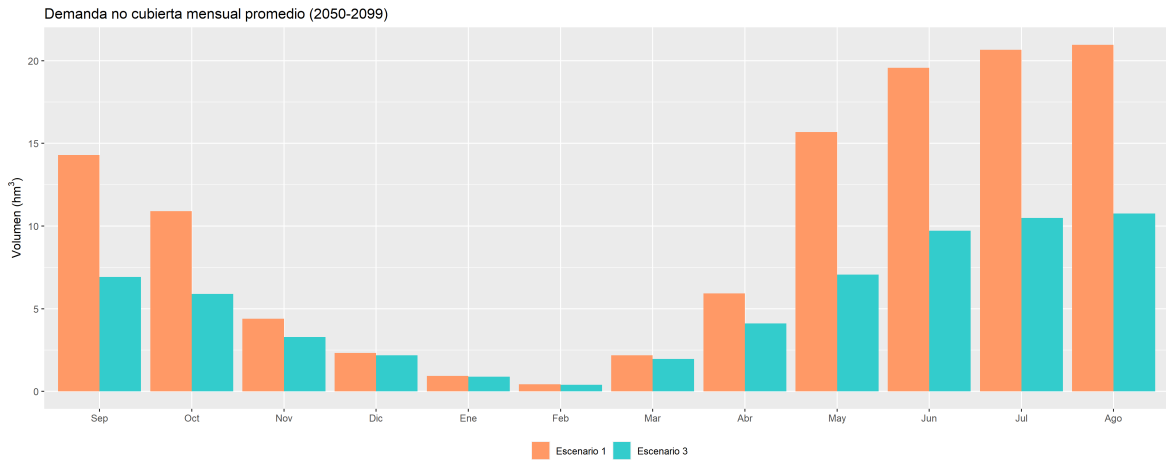


**Figura 33: Demanda no cubierta anual con cambios socio-económicos en los Escenarios 1,2,3 y 4 para el periodo 2050-2099**

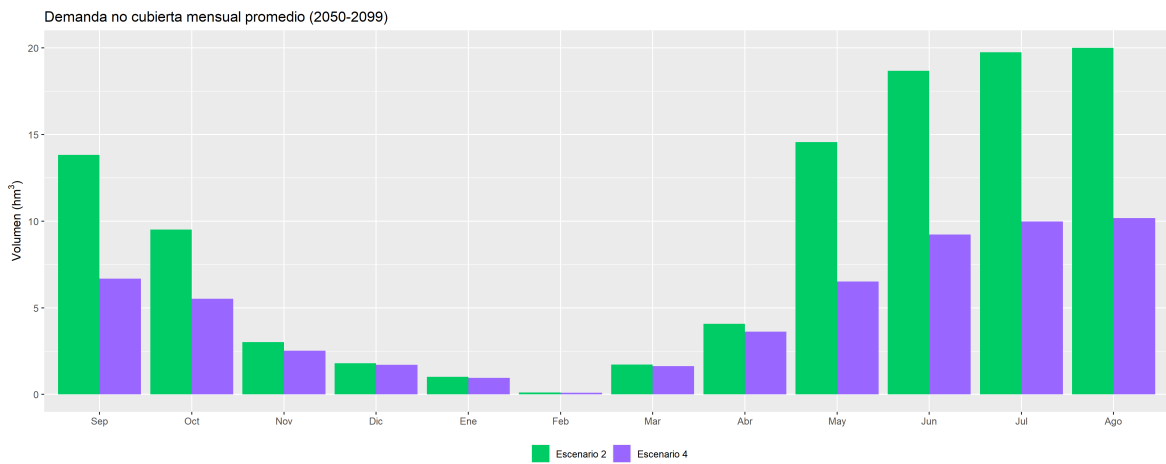
Las acciones para reducir la tasa de crecimiento e incrementar la eficiencia de riego tienen un impacto positivo en la reducción de la demanda no cubierta. Sin embargo, aun hay una gran cantidad de déficit hídrico. La Subcuenca 4 es donde se da la mayor demanda no cubierta debido que se encuentra en la cabecera de la cuenca VUB por lo que no recibe el aporte de resto. La demanda no cubierta es menor en la Subcuenca 1 debido a que recibe todo el aporte de las demás.

En la Figura 34 se muestra el promedio mensual de la demanda no cubierta para el periodo 2050-2099. Con las acciones propuestas la demanda no cubierta, durante los meses de la época seca, se reducen un 50%. Para el escenario *Escenario 3* .En época humedad la reducción es de menos del 5%. La época seca sigue siendo más critica de todo el año.

Ademas de la aplicación de medidas socio económicas, es necesario la búsqueda de fuentes extras de agua para ser introducidas en el sistema de al cuenca. Dentro de estas medidas es posible la construcción de reservorios, explotación de aguas subterráneas o el transvase de agua de otras cuencas. Para el escenario *Escenario 3* se requiere adicionar en agosto  $11.21 \text{ m}^3/\text{s}$  y en enero  $0.89 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con respecto al escenario *Escenario 4* se requiere adicionar  $10.69 \text{ m}^3/\text{s}$  y para el mes de enero  $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ .



(a) Demanda no cubierta mensual para el Escenario 1 y 3.



(b) Demanda no cubierta mensual para Escenario 2 y 4.

Figura 34: Demanda no cubierta mensual para todos los escenarios con cambios socio económicos en la cuenca Vilcanota-Urubamba para el periodo (1981-2099)

## V. CONCLUSIONES

- Se realizó el estudio de balance hídrico en la cuenca Vilcanota-Urubamba para estimar la seguridad hídrica presente y futura. En la investigación se utilizó el modelo *WEAP* como herramienta principal para realizar el balance hídrico. Las demandas presentes que se determinaron son poblacional, agrícola, industrial y energética. Para las proyecciones futuras se usó el crecimiento poblacional, requerimiento actual del cultivo y desarrollo industrial. Adicionalmente, la oferta hídrica futura fue simulada basados en *GCM* para datos climáticos futuros. En la investigación se determinó que existe un superávit de oferta hídrica para satisfacer las demandas.
- Los ingresos de agua a la cuenca VUB: la precipitación y el volumen entregado por el embalse de Sibinacocha lo que suman  $4848 \text{ hm}^3/\text{año}$ , el mayor ingreso es proveniente de la precipitación equivalente a  $4747 \text{ hm}^3/\text{año}$  y el embalse aporta  $100 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Debe mencionarse que existen múltiples ingresos de aguas subterráneas, pero no fueron consideradas en el presente estudio.
- Se estimó una demanda de  $254 \text{ hm}^3/\text{año}$  (2010). La demanda agrícola es la mayor con  $220 \text{ hm}^3/\text{año}$  equivalente al 86.6%. El uso poblacional tiene una demanda de  $30.3 \text{ hm}^3/\text{año}$  representado el 12%. El menor uso es el industrial con  $3.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  representando solo el 1.4%. La demanda energética es de  $266.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  pero al ser de uso “no consuntivo” no se consideró en para la sumatoria de demanda total.
- La demanda agrícola es el mayor uso de agua en el área de estudio. Se tiene una área agrícola de  $420 \text{ km}^2$  y una demanda estimada de  $220 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Considerando el área agrícola y la eficiencia constante además los efectos del cambio climático se estimo que en la Subcuenca 1 para el año 2099 sera de  $106 \text{ hm}^3$  y  $111 \text{ hm}^3$  para el *Escenario 1* y *Escenario 2*. En la Subcuenca 4 para el año 2099 sera de  $34 \text{ hm}^3$  y  $27 \text{ hm}^3$  para el *Escenario 1* y *Escenario 2*. Lo que ocasiona la dis-

minución de la demanda es la reducción del *RHC* debido al aumento proyectado de las precipitaciones.

- Para el año 2010 se estimó una población de 568,228 y consumen  $30.3 \text{ hm}^3/\text{año}$  de agua. La subcuenca 1 tiene una población de 463,935 con un consumo de  $21.7 \text{ hm}^3/\text{año}$  representando el 71.5% del consumo total. La subcuenca 4 tiene una población 104,293 con un consumo de  $8.6 \text{ hm}^3/\text{año}$  equivalente al 28.5%. Para el año 2099 se estima una población de 2.2 millones con una demanda de  $1047 \text{ hm}^3$  para la subcuenca 1 y 135,375 habitantes con  $393 \text{ hm}^3$  de demanda en la subcuenca 4.
- La demanda industrial es el menor consumo. En las subcuenca 1 se estimó una demanda de  $2.4 \text{ hm}^3/\text{año}$  para el año 2010 y en la subcuenca 4 es de  $1.2 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el mismo año. Las actividades que comprenden esta demanda son las de manufactura, hidroeléctricas, empresas de explotación de recursos naturales para generación de energía (petroleras, fundamentalmente), recreativo, minero y acuícola. Se proyecta alcanzar, en el año 2099, una demanda de  $31 \text{ hm}^3$  para Subcuenca 1 y  $5 \text{ hm}^3$  para Subcuenca 4.
- Para el periodo 2010-2016 existe un superávit de agua para los usos. Si comparamos la cantidad de agua precipitada y la escorrentía con las demandas son respectivamente 19 y 8 veces mayores. Lo que en porcentaje correspondería solo al 5.3% con respecto a la precipitación y al 13% con referencia a la escorrentía. Este superávit permitiría que las demandas aumenten o se intensifiquen, por ejemplo 10 a 15 veces. Sin embargo, la disponibilidad no está igualmente distribuida en la cuenca Vilcanota-Urubamba. La mayor disponibilidad se encuentra en el río Vilcanota en la Subcuenca 1, ya que se ubica a menor altitud por lo que recibe la escorrentía de las demás subcuencas.
- Para los escenarios de cambio climático se espera un incremento de las precipitaciones y de la temperatura. Para el periodo 2017-2040 la oferta hídrica es suficiente para cubrir las demandas estimadas para cada subcuenca. A partir del año 2050 se detecta un incremento en la demanda no cubierta para cada escenario. En el periodo 2041-2070 se estima una demanda no cubierta de 56.72

$hm^3$  para el *Escenario 1* y para el *Escenario 2* de  $42.62 hm^3$ . Para el periodo 2071-2099 es de  $477.21 hm^3$  en el Escenario 1 y  $445.80 hm^3$  para el *Escenario 2*.

- Tomar medidas para el control del crecimiento poblacional y mejorar la infraestructura de riego tienen un impacto positivo en la reducción de la demanda no cubierta. Para el periodo 2041-2070 la demanda no cubierta del *Escenario 3* es de  $34.6 hm^3$ , siendo una reducción del 39%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $26.7 hm^3$ , siendo una reducción del 37%. Para el periodo 2070-2099 la demanda no cubierta del *Escenario 3* es de  $252.8 hm^3$ , siendo una reducción del 46%. El *Escenario 4* tiene una demanda no cubierta de  $238.2 hm^3$ , siendo una reducción del 47%.

## VI. RECOMENDACIONES

### Para gestión del recurso hídrico

- Se debe incrementar el uso de estructuras hidráulicas y el desarrollo de nuevas tecnologías para garantizar que la disponibilidad del recurso hídrico sea igual en toda el área de estudio.
- Es necesario desarrollar planes de gestión del recurso hídrico que involucren a todos los usuarios y tomadores de decisiones para poder hacer frente ante el incremento de la demanda de agua y los conflictos generados por la escasez.
- La extracción y calidad del agua debe ser constantemente monitoreada, tanto superficial como subterránea. La calidad del agua también determinaría la cantidad de agua disponible.
- Generar un mecanismo único para la determinación de la demanda agrícola. El cual debe ser usado para el otorgamiento de licencias de agua así como en la construcción de sistemas de riego tecnificado.
- Implementar intervenciones de infraestructura natural para la regulación del recurso hídrico. Estas intervenciones serían ideales ya que pueden ser iniciadas y desarrollarse durante el periodo de superávit hídrico. De tal forma que durante la época de déficit hídrico reduzcan las demandas no cubiertas.
- Debería fomentarse más la participación ciudadana y la conciencia local sobre los problemas del agua. Por ejemplo, la oferta hídrica así como los datos de monitoreo del agua, deben ser accesibles para que los pobladores aumenten su conocimiento y participación en una gestión más eficaz del agua.



## Para siguientes investigaciones

- La calidad del agua debe ser incluido en los estudios de seguridad hídrica. Durante la época donde se estima no exista déficit hídrico es importante considerar si la calidad del agua esta dentro de lo permitido. Si no es así, la cantidad de agua no puede ser considerada dentro de lo disponible para el uso.
- Como se logró determinar en la investigación, se pueden dar grandes caudales por la estación Pisac durante las temporada lluviosa, es necesario incluir estudios para determinar y mitigar los daños producidos por inundaciones.
- Como la disponibilidad del recurso hídrico no se distribuye uniformemente en el área, algunas zonas pueden experimentar escasez de agua. Por lo que estudios a menor escala deben ser realizados para ubicar estas áreas.
- La data histórica utilizada para el modelamiento hidrológico debe ser mas larga para así reducir la incertidumbre de los resultados lo que aumenta la eficacia en la proyección de escenarios futuros. Las principales variables son el caudal, precipitación y temperatura.
- Se debe incluir en el modelamiento el aporte de los glaciares Quisoquipina y Suyuparina además, la interacción del agua superficial y el agua subterránea. Siendo esta una fuente reguladora del recurso hídrico durante la época de estiaje.
- Realizar investigaciones que evalúen las variables de precipitación y temperatura obtenidas de modelos GCM en las zonas alto andinas. Determinar que modelo representa mejor los andes permitiría tener una base de datos común para futuras investigaciones.
- Los datos de demanda hídrica generada por la investigación podrían ser utilizados para desarrollar productor grillados georeferenciados en el área de estudio. Estos productos tendrían una alta resolución espacial y temporal.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amblar Francés, M. P., Ramos-Calzado, P., Pastor-Saavedra, A., y Rodríguez-Camino, E. 2018. Comparación entre métodos de corrección de sesgo para las proyecciones de cambio climático en los Pirineos. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 1(35):362–367.
- Amin, A., Iqbal, J., Asghar, A., y Ribbe, L. 2018. Analysis of current and future water demands in the Upper Indus Basin under IPCC climate and socio-economic scenarios using a hydro-economic WEAP Model. *Water (Switzerland)*, 10(5).
- ANA. 2013. *Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú: Memoria 2013*.
- ANA. 2015. Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Urubamba. *Evaluación de recursos hídricos en las cuencas del Perú*, page 684.
- ANA. 2020. GEOHIDRO - Herramienta de consulta sobre información hídrica del Sistema Nacional de Información de Recursos hídricos (SNIRH).
- Angarita, H. y Mehta, V. 2016. WEAP Model inspector Version 1.0.
- Angus, J. E. 1994. The probability integral transform and related results. *SIAM Review*, 36(4):652–654.
- Avalos, G., Oria, C., Jácome, G., Acuña, D., Llacza, A., y Cubas, F. 2012. Cambio climático en la cuenca del Río Urubamba. page 94.
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., y Felipe-Obando, O. 2019. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to present day. *Hydrological Sciences Journal*.
- Choudhury, I. y Bhattacharya, B. K. 2020. A Baseline Estimate of Regional Agricultural Water Demand from GEO-LEO Satellite Observations. *Geocarto International*, pages 1–23.

- Debortoli, N. S., Camarinha, P. I. M., Marengo, J. A., y Rodrigues, R. R. 2017. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, 86(2):557–582.
- Dhakal, K., Kakani, V. G., y Linde, E. 2018. Climate Change Impact on Wheat Production in the Southern Great Plains of the US Using Downscaled Climate Data. *Atmospheric and Climate Sciences*, 08(02):143–162.
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., y 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.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., y Alsdorf, D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45.
- Gain, A. K. y Wada, Y. 2014. Assessment of Future Water Scarcity at Different Spatial and Temporal Scales of the Brahmaputra River Basin. *Water Resources Management*, 28(4):999–1012.
- Gleckler, P. J., Taylor, K. E., y Doutriaux, C. 2008. Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(6):1–20.
- Goswami, K. y Bisht, P. 2017. The Role of Water Resources in the Arab-Israeli Conflict. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 5(7):1669–74.
- Goyal, V. C., Thomas, T., Goyal, S., y Kale, R. V. 2018. *Water Supply–Demand Assessment in Ur River Watershed in Tikamgarh District*, volume 78. Springer, Singapore.
- GRC.2020. *Plan estrategico del sector agrario 2009-2021*.
- Grey, D. y Sadoff, C. W. 2007. Sink or Swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6):545–571.

- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., y Engen-Skaugen, T. 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9):3383–3390.
- Hamzah, F. B., Mohd Hamzah, F., Mohd Razali, S. F., Jaafar, O., y Abdul Jamil, N. 2020. Imputation methods for recovering streamflow observation: A methodological review. *Cogent Environmental Science*, 6(1).
- Huang, S., Chang, J., Huang, Q., y Chen, Y. 2014. Monthly streamflow prediction using modified EMD-based support vector machine. *Journal of Hydrology*, 511:764–775.
- Huerta, A., Aybar, C., y Lavado-Casimiro, W. 2018. PISCO temperatura v.1.1. *Senamhi - Dhi-2018*, 1:1–15.
- INEI.2018. Perú. Crecimiento y distribución de la población, 2017. Primeros Resultados.
- IPCC.2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC.2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical report, Geneva, Switzerland.
- Junquas, C., Takahashi, K., y Espinoza, J. C. 2014. Modelación y cambio climático. In *Foro Internacional Cambio Climático*.
- Kabo-bah, A. T., Anornu, G. K., Ofosu, E., Andoh, R., y Lis, K. J. 2014. Spatial-temporal estimation of evapotranspiration over Black Volta of West Africa. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 6(12):295–302.
- Kaser, G., Grosshauser, M., y Marzeion, B. 2010. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(47):20223–20227.

- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L., Lamarque, J., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J., y van Vuuren, D. P. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1):213–241.
- MINAGRI.2021. Ministerio de desarrollo agrario y riego - uso y manejo de agua.
- MINAM.2019. Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú. page 63.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., y Veith, T. 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3):885–900.
- Mourad, K. A. y Alshihabi, O. 2016. Assessment of future Syrian water resources supply and demand by the WEAP model. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2):393–401.
- MVCS. 2014. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento - parametros de diseño de infraestructura de agua y saneamiento para centros poblados rurales.
- NOAA.2017. [https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate\\_model](https://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model)
- Oliver, H. R. y Oliver, S. A. 1995. *The role of water and the hydrological cycle in global change*, volume 31.
- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., y Lavado-Casimiro, W. 2017. Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13(May):26–42.
- Ougougdal, H. A., Khebiza, M. Y., Messouli, M., y Lachir, A. 2020. Assessment of futurewater demand and supply under IPCC climate change and socio-economic scenarios, using a combination of models in Ourika watershed, High Atlas, Morocco. *Water (Switzerland)*, 12(6).
- Perrin, C., Michel, C., y Andréassian, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4):275–289.
- Pierce, D. W., Barnett, T. P., Santer, B. D., y Gleckler, P. J. 2009. Selecting global climate models for regional climate change studies. *PNAS*, 106(21).

- Purkey, D. R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M. W., Dale, L. L., Yates, D., y Dracup, J. A. 2007. Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: A case study in the Sacramento Valley. *Climatic Change*, 87(1 SUPPL).
- Raj Rakhecha, P. y Singh, V. P. 2009. *Applied Hydrometeorology*. Springer, New Delhi.
- Rauscher, S. A., Coppola, E., Piani, C., y Giorgi, F. 2010. Resolution effects on regional climate model simulations of seasonal precipitation over Europe. *Climate Dynamics*, 35(4):685–711.
- Saha, P. P. y Zeleke, K. 2015. 'Ecohydrology: Understanding and maintaining ecosystem services for iworm', in *SG Setegn & MC Donoso (eds)*. Springer.
- SEI, S. E. I. 2019. WEAP - Water Evaluation And Planning System, Version 2019.2134.
- Sieber, J. y Purkey, D. 2015. Water Evaluation And Planning System User Guide.
- Sithiengtham, P. 2019. *Projecting Water Demand and Availability Under Climate Change Through the Application of WEAP in the Nam Ngum Downstream Area, Laos*. PhD thesis.
- Tarboton, D. G., Sazib, N., y Dash, P. 2015. QUICK START GUIDE TO USING THE TAUDEM ARCGIS TOOLBOX October 2015 David G . Tarboton Nazmus Sazib Pabitra Dash. (October).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., y Meehl, G. A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4):485–498.
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., y Duffy, P. B. 2012. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9):3309–3314.
- Touch, T., Oeurng, C., Jiang, Y., y Mokhtar, A. 2020. Integrated Modeling of Water Supply and Demand Under Climate Change Impacts and Management Options in Tributary Basin of Tonle Sap Lake, Cambodia. *Water (Switzerland)*, 12(9):25.
- Vandewiele, G. L. y Ni-Lar-Win 1998. Monthly water balance models for 55 basins in 10 countries. *Hydrological Sciences Journal*, 43(5):687–699.

- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Liermann, C. R., y Davies, P. M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315):555–561.
- Xu, C. Y. y Singh, V. P. 1998. A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. *Water Resources Management*, 12(1):20–50.
- Zhang, Y., Xu, Y., Dong, W., Cao, L., y Sparrow, M. 2006. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model. *Geophysical Research Letters*, 33(24):2–7.

## VIII. ANEXOS

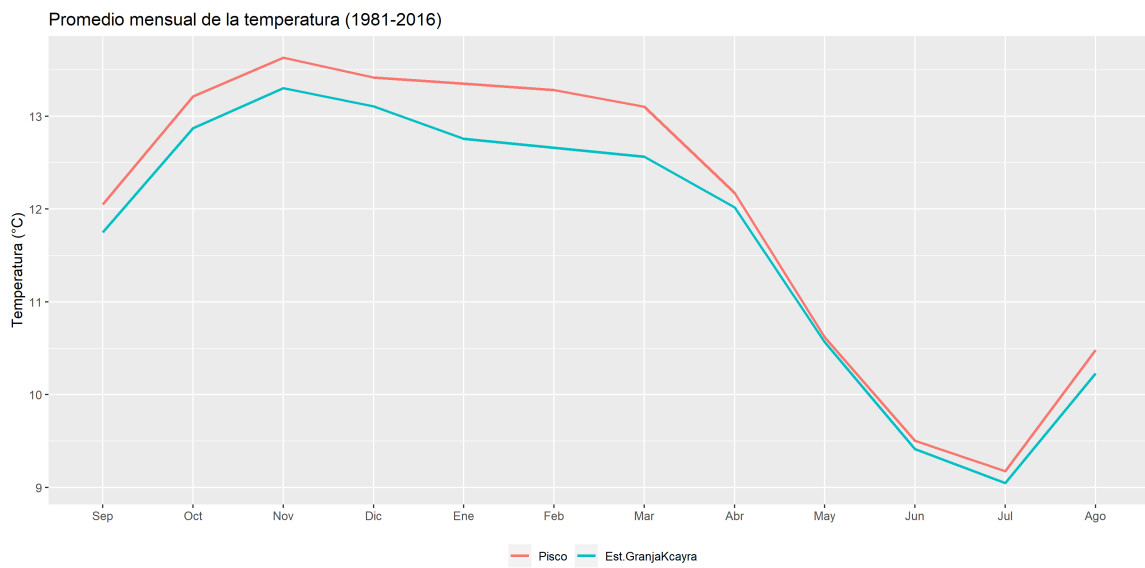
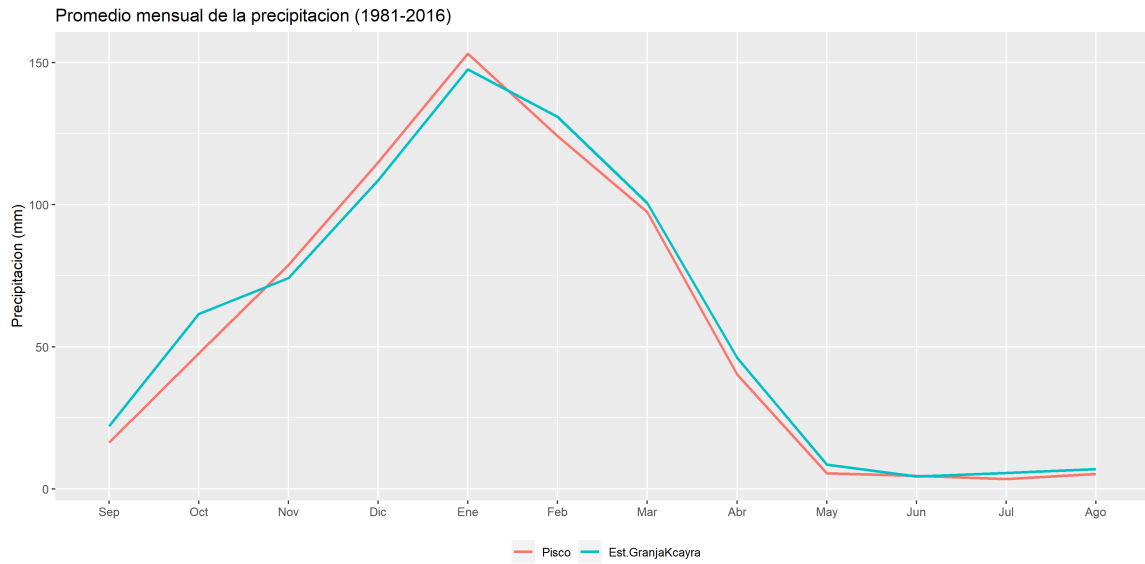
### Anexo 1: Modelo hidrológico en WEAP.

El modelo hidrológico junto con los datos utilizados para su ejecución se pueden  
descargar de:

<https://github.com/AGoyburo/WEAP-VUB.git>



## Anexo 2: Promedio mensual de la precipitación y temperatura.



### Anexo 3: Demanda agrícola futura.

Año	Subcuenca 1 ( $hm^3$ )					
	Min	Escenario 1	Max	Min	Escenario 2	Max
2020	118.6	156.2	205	137.4	173.5	220
2030	117.3	154.8	203.7	97.6	133.7	180.2
2040	116.9	154.5	203.4	94.1	130.2	176.8
2050	107.3	144.8	193.7	94.5	130.6	177.2
2060	62.5	100.1	149	63.5	99.6	146.1
2070	96.9	134.4	188.3	67.2	103.2	149.8
2080	51.6	89.1	138	68.6	104.7	151.3
2090	66.2	103.7	152.5	64.7	100.8	147.4
2099	68.4	106	154.8	75.2	111.3	157.9

Año	Subcuenca 4 ( $hm^3$ )					
	Min	Escenario 1	Max	Min	Escenario 2	Max
2020	43.7	67.7	99.6	45.9	67.3	97.9
2030	41	64.9	96.9	44.7	66.1	96.7
2040	39.1	63.1	95	39.7	61	91.6
2050	41.4	65.4	97.3	33.9	55.2	85.8
2060	29.4	53.3	85.2	31.4	52.7	83.3
2070	32.3	56.2	88.2	24.2	45.5	76.1
2080	20.1	44.1	76	15.3	36.6	67.2
2090	15.5	39.4	71.4	15.8	37.2	67.8
2099	10.8	34.8	66.7	6.4	27.7	58.3

#### Anexo 4: Demanda industrial futura.

Año	Subcuenca 1			Subcuenca 4		
	Min	Dem ( $hm^3$ )	Max	Min	Dem ( $hm^3$ )	Max
2030	2.28	7.9	14.4	0.1	3	7.2
2040	5.9	11.3	17.7	0.1	3.4	7.5
2050	9.3	14.6	21	0.1	3.7	7.8
2060	12.6	17.9	24.4	0.2	4	8.2
2070	21.3	16	27.8	0.6	4.3	8.5
2080	19.7	24.6	31.1	0.8	4.6	8.8
2090	22.7	28	34.4	1.2	4.9	9.1
2099	25.7	31	37.5	1.4	5.3	9.4