

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**POSTGRADO**



**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA**

**“Modelación hidrológica de escenarios futuros, con la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la cuenca del Rio Suches- Bolivia”**

**POSTULANTE: Ing. Agr. María Antonia Mamani Mamani**

**TUTOR: Ing. M.Sc. Wily Marco Flores Mancilla**

**La Paz - Bolivia  
2020**

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**  
**POSTGRADO**

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE ESCENARIOS FUTUROS, CON LA  
APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP EN LA CUENCA DEL RIO  
SUCHES- BOLIVIA”**

*Tesis de Maestría presentado como requisito parcial para optar  
el Título de Maestro en Producción Vegetal*

**Ing. Agr. María Antonia Mamani Mamani**

**Asesor:**

Ing. M.Sc. Wily Marco Flores Mancilla .....

**Tribunal Examinador:**

Ing. Ph.D. Bruno Condori Alí .....

Ing. M.Sc. Mario Esteban Ramos Flores .....

Ing. M.Sc. Marcelo Tarqui Delgado .....

Ing. M.Sc. Juan Jose Vicente Rojas .....

**Aprobado**

**Presidente Tribunal Examinador** .....

**La Paz – Bolivia**

**2020**

## **DEDICATORIA.**

“Gracias Dios, gracias por permitirme tener una familia maravillosa como la que tengo”. A mis amados padres Juan Mamani Nina y Máxima Mamani Quispe, mi sobrino Alejandro, mis hermanas Elena y Ruth. Gracias por su esfuerzo y apoyo incondicional brindado, me permitieron llegar al momento hoy vivido.

## **AGRADECIMIENTOS**

La presente investigación pudo realizarse con la ayuda de instituciones y profesionales que contribuyeron con el trabajo aquí presentado. Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a las siguientes instituciones y personas:

A la planta de Docentes del cual tuve el privilegio de cursar sus cátedras que contribuyeron en mi formación profesional. y a la planta de administrativos de la Universidad Mayor de San Andrés.

Al director general meteorólogo Alberto Carrasco Miranda del Servicio Nacional de Meteorología e hidrología (SENAMHI), quien facilito toda la información relacionado a los datos meteorológicos e hidrológicos, además de dar un curso de inducción con los responsables de cada unidad. En especial al Ing. Hugo Cutile Copa, responsable del área de hidrología y al Lic. Nikolay Salazar, del área de monitoreo y control.

Al Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), que me brindo los conceptos y bases fundamentales a través del Dr. Ing. Andrés Callisaya Terceros. En especial al equipo técnico compuesto por Sergio Narvaez y Oscar Cadena, que me brindaron un apoyo incondicional en toda la investigación.

El director de IDR, David Cruz, por el asesoramiento y apoyo brindado en los escenarios de cambio climático. Al Ing. Freddy Cadena, por toda la colaboración brindada.

A Ing. Samuel Huallapa Cusi, por el apoyo técnico y logístico en la tesis.

Un agradecimiento muy especial para el Ing. Nilo Lima del Stockholm Environment Institute (SEI), quien brindo un curso de tres días en la ciudad de Potosí en relación con el software WEAP.

## Índice

|  |           |
|--|-----------|
| 1. Glosario .....  | x         |
| 2. Resumen:.....   | xi        |
| 3. Summary:.....   | xii       |
| <b>Capítulo 1. Introducción .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>Capítulo 2. Planteamiento del problema, objetivos y estrategia metodológica .....</b> | <b>4</b>  |
| 2.1. Pregunta de investigación.....  | 5         |
| 2.2. Hipótesis.....  | 6         |
| 2.3. Objetivo general .....  | 6         |
| 2.4. Objetivos específicos .....   | 6         |
| <b>Capítulo 3. Marco teórico.....</b>  | <b>7</b>  |
| 3.1. Cambio climático y el régimen hídrico .....   | 7         |
| 3.2. Régimen hídrico y cambio del uso de suelos .....                                    | 7         |
| 3.3. Régimen meteorológico .....   | 8         |
| 3.4. Modelos de simulación del régimen hídrico .....                                     | 8         |
| 3.4.1. Oferta .....  | 11        |
| 3.4.2. Demanda .....   | 11        |
| 3.4.3. Demanda de la minería para el suministro de agua.....                             | 12        |
| 3.5. Integración del modelo WEAP.....  | 12        |
| 3.6. Métodos para la determinación de la demanda .....                                   | 14        |
| 3.6.1. Método escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo).....              | 14        |
| 3.6.2. Método MABIA.....   | 14        |
| 3.7. Escenarios de cambio climático .....  | 16        |
| <b>Capítulo 4. Materiales y métodos.....</b>   | <b>17</b> |
| 4.1. Área de estudio .....   | 17        |
| 4.2. Contextos .....   | 19        |
| 4.2.1. Contexto Ambiental .....  | 19        |
| 4.2.2. Contexto Social.....  | 20        |
| 4.2.3. Contexto Económico .....  | 21        |
| 4.2.4. Contexto Institucional .....  | 21        |
| 4.2.5. Contexto Legal.....   | 21        |
| 4.3. Marco general para el análisis de impacto del cambio global y la adaptación..       | 22        |
| 4.4. Modelo de simulación.....   | 23        |
| 4.5. Unidades hidrográficas.....   | 24        |
| 4.5.1. Áreas .....   | 24        |
| 4.5.2. Meteorología.....   | 24        |

|                                     |   |           |
|-------------------------------------|---|-----------|
| 4.5.3.                              | Demanda .....   | 26        |
| 4.5.4.                              | Coeficientes de cultivo .....   | 27        |
| 4.5.5.                              | El crecimiento poblacional .....  | 27        |
| 4.5.6.                              | Método de Lluvia Escorrentía .....  | 28        |
| <b>4.6.</b>                         | <b>Calibración y Validación.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>4.7.</b>                         | <b>Escenarios de cambio climático .....</b>   | <b>32</b> |
| 4.7.1.                              | Construcción de escenarios climatológicos A y B.....  | 33        |
| <b>4.8.</b>                         | <b>Modelos socioeconómicos.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>Capítulo 5. Resultados .....</b> |   | <b>38</b> |
| <b>5.1.</b>                         | <b>Unidades hidrológicas.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>5.2.</b>                         | <b>Estableciendo años y pasos de tiempo.....</b>  | <b>40</b> |
| 5.2.1.                              | Población.....  | 40        |
| <b>5.3.</b>                         | <b>Método “Escurrimiento de Lluvia (Método de la humedad del suelo)” .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>5.4.</b>                         | <b>Áreas de cobertura vegetal y uso de suelo.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>5.5.</b>                         | <b>Oferta de agua en m<sup>3</sup>/s para una probabilidad de excedencia del 75% del tiempo de todas las cuencas.....</b> | <b>42</b> |
| <b>5.6.</b>                         | <b>Análisis de datos Hidrometeorológicos.....</b>   | <b>43</b> |
| 5.6.1.                              | Datos hidrológicos.....   | 44        |
| 5.6.2.                              | Precipitación.....  | 44        |
| 5.6.3.                              | Temperatura .....   | 46        |
| <b>5.7.</b>                         | <b>Calibración .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>5.8.</b>                         | <b>Demanda de agua .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>5.9.</b>                         | <b>Escenarios .....</b>   | <b>51</b> |
| 5.9.1.                              | Planteamiento de escenarios A y B.....  | 51        |
| 5.9.2.                              | Planteamiento de escenario C .....  | 54        |
| 5.9.3.                              | Planteamiento de escenario D, reducción de perdidas .....   | 55        |
| <b>6. CONCLUSIONES .....</b>        |   | <b>60</b> |
| <b>Recomendaciones .....</b>        |   | <b>61</b> |
| <b>Referencias.....</b>             |   | <b>62</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                 |   | <b>69</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del río Suches (UCEP MI RIEGO). .....  | 17 |
| Figura 2. <i>Mapa de ubicación de la cuenca del río Suches (Google Earth, 2018)</i> . .....   | 18 |
| Figura 3. Análisis de impacto del cambio global que combina sistemas de recursos hídricos y los enfoques de simulación.....   | 23 |
| Figura 4. Distribución espacial de la precipitación media anual (isoyetas) en la cuenca Suches. ....  | 25 |
| Figura 5. Distribución espacial de la temperatura media anual (isotermas) en la cuenca Suches. ....   | 26 |
| Figura 6. Análisis de impacto del cambio global que combina sistemas de recursos hídricos y los enfoques de simulación.....   | 29 |
| Figura 7. Valores de Capacidad de agua profunda en series de tiempo mensual.....  | 30 |
| Figura 8. Formula del cálculo de Nash-Sutcliffe y sesgo ( Bias), Donde $Q_{s,i}$ y $Q_{o,i}$ corresponden a caudales simulados y observados para casa paso tiempo $i$ , y $n$ corresponde al número total de pasos de tiempo. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009). .....  | 32 |
| Figura 9. Donde $\delta P_{ip}$ m y $\delta T_{it}$ m son los factores mensuales de ajuste de precipitación y temperatura, ip y it son los índices de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura respectivamente que son usadas en el modelo y Obs y PRECISBL se refieren (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).....                | 34 |
| Figura 10. $\delta P_{ip}$ $\delta T_{it}$ Donde $PS_{ip}$ PRECIS RAW A m _ (2), y $PS_{it}$ PRECIS A m (2), corresponden a las proyecciones directas de PRECIS y escaladas usando el factor de ajuste respectivamente. Estas corresponden a las proyecciones de precipitación del escenario A2. Algo simi (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)..... | 35 |
| Figura 11. Cambio de uso de suelo en la localidad de Escoma .....   | 36 |
| Figura 12. Mapa de distritos y municipios que componen la cuenca del Rio Suches. ....   | 38 |
| Figura 13. Mapa de las unidades hidrológicas en el software WEAP de cuencas del Rio Suches. ....  | 39 |
| Figura 14. Caudal promedio mensual de datos observados y simulados de la cuenca Rio Suches. ....  | 43 |
| Figura 15. Caudales registrados (1970 a 2010) por la unidad de hidrología del SENAMHI-Bolivia .....   | 44 |
| Figura 16. Precipitación Mensual por subcuenca año base de la cuenca Rio Suches Año base (1970 – 1971). .....   | 45 |
| Figura 17. Precipitación Mensual por subcuenca de la cuenca Rio Suches (1989 – 2009).....   | 46 |
| Figura 18. Temperatura mensual por subcuencas de la cuenca Rio Suches periodo 1990 a 2010. ....   | 48 |
| Figura 19. Caudales observados y simulados del periodo 1990 a 2010, la cuenca del Rio Suches. ....  | 49 |
| Figura 20. Caudales observados y simulados de la cuenca del Rio Suches. ....  | 50 |
| Figura 21. Demanda no cubierta en la cuenca Rio Suches.....   | 51 |
| Figura 22. Demanda de suministro en la cuenca Rio Suches comparación RCP 4.5 con el de referencia. .  | 52 |
| Figura 23. Requerimiento de suministro en la cuenca Rio Suches de incremento porcentual con relación a la referencia. ....  | 53 |
| Figura 24. Demanda no cubierta RCP 4.5, en comparación a la referencia.....   | 54 |
| Figura 25. Demanda no Cubierta en el escenario de cambio de uso de suelo y la referencia.....   | 55 |
| Figura 26. Demanda no Cubierta en el escenario de reducción de pérdidas y la referencia. ....   | 56 |
| Figura 27. Comparación de escenarios (1990– 2010) del Rio Suches. ....  | 57 |
| Figura 28. Caudales observados y simulados en promedio mensual cuenca Rio Suches. ....  | 57 |
| Figura 29. Comparación de escenarios de Cambio climático cuenca Rio Suches.....   | 58 |
| Figura 30. Comparación de la proporción de escenarios de Cambio climático cuenca Rio Suches. ....   | 59 |





## Índice de cuadros

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Cuadro 1. Estaciones, hidrológica y meteorológicas cuencas Suches.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>Cuadro 2. Coeficientes de cultivo para superficies agrícola, forestal, pastizal y humedales (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).....</b> | <b>27</b> |
| <b>Cuadro 3. Coeficientes de conductividad de la zona radicular Ks (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016). .....</b>                           | <b>31</b> |
| <b>Cuadro 4. Coeficientes de conductividad de la zona radicular Ks (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016). .....</b>                           | <b>31</b> |
| <b>Cuadro 5. Descripción de las cuatro familias de RCP (Navarro et al., 2018).....</b>  | <b>33</b> |
| <b>Cuadro 6. Tenencia de tierras (Has.), (Gobierno Autonomo Municipal de Escoma, 2016) .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>Cuadro 7. Población de demanda de agua en las comunidades de la Cuenca Río Suches y Escoma, Bolivia, 2016.....</b>                               | <b>40</b> |
| <b>Cuadro 8. Resumen de las unidades hidrológicas por cobertura y uso de suelo del Río Suches. ....</b>   | <b>42</b> |
| <b>Cuadro 9. Variación de la Precipitación por Estaciones Registros Año base (1970 – 1971) del Río Suches. ....</b>                                 | <b>45</b> |
| <b>Cuadro 10. Variación de la temperatura promedio mensual por subcuenca del Río Suches, año base 1990.....</b>                                     | <b>47</b> |

## **Abreviaturas**

VRHR: Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego  
MMAyA: Ministerio de Medio Ambiente y Agua  
UOB: Unidad Operativa Boliviana  
GAD: Gobierno Autónomo Departamental  
ANA: Autoridad Nacional del Agua  
GCM: Modelo de Circulación Global  
SSP: Trayectorias o vías Socioeconómicas Compartidas  
PIB: Producto interno bruto  
Dw: Capacidad de agua profunda  
Ks: Conductividad zona radicular  
Kd: Conductividad zona profunda  
Z1: Valor inicial balde superior  
Z2: Valor inicial balde inferior  
Sw: Capacidad de agua de suelo  
F: Dirección preferencia de flujo  
RRF: Factor De Resistencia a la Escorrentía

## 1. Glosario

**Balance Hídrico.** Es un término que se refiere a la relación entre la ganancia y pérdida de agua en forma de precipitación, evapotranspiración y escorrentía (Flujo superficial y subterráneo) que ocurre en una región en particular.

**Catchment.** Son los que contienen las unidades homogéneas de una banda altitudinal que contiene datos meteorológicos relativamente homogéneos, así como también muestras de cobertura correspondiente a cada banda.

**Cuenca Hidrográfica.** Es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de agua, tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido.

**DEM.** Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

**Escenario.** Es una situación probable que puede ocurrir en el futuro.

**MCG** – Modelo de circulación General

**MINAGRI.** Ministerio de Agricultura y Riego.

**RCP:** Trayectoria de concentración representativa (Representative Concentration's Path), representan nuevos escenarios de emisión de cambio climático. **PC:** Punto de Control

**DOWNSCALING:** Metodología de regionalización

**SEI** (Stockholm Environment Institute). Instituto Ambiental de Estocolmo.

**SENAMHI.** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Bolivia.

**Unidades Homogéneas.** Áreas delimitadas por bandas altitudinales que contienen datos meteorológicos relativamente homogéneos.

**WEAP.** Sistema de Evaluación y Planificación del Agua.

# **MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE ESCENARIOS FUTUROS, CON LA APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WEAP EN LA CUENCA DEL RIO SUCHES- BOLIVIA**

Maria Antonia Mamani Mamani

## **2. Resumen:**

El bienestar humano y la sostenibilidad dependen de los sistemas de recursos hídricos. A su vez, la disponibilidad de agua está condicionada por diferentes factores: población, ambiente y alimento; generalmente, los estudios analizan estos independientemente existiendo una brecha de desarrollo. Esta investigación modela la cuenca del río Suches, con el fin de determinar los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico y la demanda de agua, se estimaron índices de Nash de 0.791 y Bias de 0.058 en la calibración del software de simulación WEAP. Se obtuvieron los caudales para las proyecciones de climas futuros bajo escenarios RCP 4.5 y 8.5, para los años 2030 y 2050, también se evaluó el cambio de uso de suelo, donde se analiza medidas de adaptación en las eficiencias de riego de la demanda en Escoma con el fin de garantizar la seguridad hídrica en esta cuenca. Como resultado para los dos escenarios se espera, se presente una disminución en el caudal respecto a las condiciones actuales, de entre 8% y 15% para el RCP 4.5 y entre 4.8% y 8.6% para el RCP 8.5, la simulación evidencia que solo se presenta demanda insatisfecha en los nodos de los acueductos de Humanata y Pto. Acosta. Además, se planteó como medida de adaptación la reducción de las pérdidas a 30% en los sistemas de abastecimiento con el fin de garantizar la seguridad hídrica en la cuenca.

**Palabras clave:** Agua, déficit, demanda, modelación. RCP, simulación, WEAP, MABIA.

# **HYDROLOGICAL MODELING OF FUTURE SCENARIOS, WITH THE APPLICATION OF THE WEAP HYDROLOGIC MODEL IN THE BASIN OF THE SUCHES- BOLIVIA RIVER**

Maria Antonia Mamani Mamani

### **3. Summary:**

Human well-being and sustainability depend on water resources systems. In turn, water availability is conditioned by different factors: population, environment and food; Generally, studies analyze these independently with a development gap. This research models the Suches river basin, in order to determine the potential impacts of climate change on the hydrological regime and water demand, Nash rates of 0.791 and Bias of 0.058 were estimated in the WEAP simulation software calibration. Flow rates were obtained for the projections of future climates under RCP scenarios 4.5 and 8.5, for the years 2030 and 2050, the change in land use was also evaluated, where adaptation measures are analyzed in the demand irrigation efficiencies in Escoma in order to guarantee water security in this basin. As a result for both scenarios, it is expected that there will be a decrease in the flow rate with respect to the current conditions, between 8% and 15% for RCP 4.5 and between 4.8% and 8.6% for RCP 8.5, the simulation shows that only unsatisfied demand is presented in the nodes of the aqueducts of Humanata and Pto. Acosta. In addition, the reduction of losses to 30% in supply systems was proposed as an adaptation measure in order to guarantee water security in the basin.

**Keywords:** Water, deficit, demand, modeling, RCP, simulation, WEAP, MABIA.

## **Capítulo 1. Introducción**

La sostenibilidad, entendida como la característica del desarrollo que garantiza las actividades de las generaciones futuras, es un concepto relativo que debe aplicarse en un entorno que experimenta múltiples cambios que se producen en diferentes escalas temporales y espaciales (Ban, 2012). Dependemos, entre otras cosas, de nuestros sistemas de recursos hídricos para nuestra supervivencia y bienestar (Loucks, 2000), sin embargo, la reducción de precipitación en las regiones áridas, el retroceso de los glaciares y los conflictos sobre el suministro de agua para el consumo humano, la agricultura y la energía hidroeléctrica en zonas con escasez de agua y el crecimiento demográfico, son los principales problemas relacionados con el agua y el cambio climático en la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC), según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) (Escobar et al., 2011).

Como resultado del crecimiento desmedido de la población, los sistemas de energía actual y los sistemas de uso de agua se están expandiendo, lo que aumenta la presión sobre las tierras existentes y las aguas interiores utilizadas para la producción de alimentos (Cai et al., 2018), que a su vez genera preocupación por la seguridad alimentaria, la escasez de agua y tierra. Estos aspectos distan mucho de ser independientes para promover los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (González et al., 2017);, para lograr alcanzarlos, en la agenda 2030 de la 70ª Asamblea General de las Naciones Unidas, se aprobó el vínculo entre energía, alimentos y agua conocido como el Índice que relacionan agua-alimentos-energía (Moioli et al., 2018).

Para hacer frente a esta problemática agua-alimentos-energía, a nivel mundial se están tomando medidas que aplican mejoras en la gestión hídrica, entre las que se encuentran el uso creciente de energías renovables, mejoras en el manejo de los recursos naturales (Biggs et al., 2015), como la utilización del agua verde (el agua de lluvia contenida en el perfil del suelo), evitando el agotamiento de la humedad residual del suelo, en el campo después de la cosecha de cultivos al reducir el período de barbecho y al reducir el uso de agua a través de un cambio a cultivos de bajo consumo (Ariza, 2016) .

La implementación de modelos de simulación en la gestión del agua puede ayudar a explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación (Salinas & Paz, 2011). Los mismos autores indican que el uso de modelos puede influir en los cambios provocados por variaciones de la demanda y el suministro, impactos en el cambio de políticas futuras y clima, compatibilidad con objetivos ambientales y costos, en función al analizar “el mejor uso posible del recurso agua y su correcta administración” en la permanente búsqueda de un desarrollo sostenible de la región.

La mitigación y adaptación al cambio climático, en EE. UU. la implementación de la reasignación de almacenamiento para grandes reservorios (en coordinación de las instituciones federales y estatales) en el uso del agua para la producción de alimentos y energía; en Texas, se evita que los productores de gas natural compitieran con el uso de agua de riego por parte de los agricultores durante la sequía; y en China, se trabaja en políticas que evite el conflicto reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Cai et al., 2018). De esta manera, si se toma en cuenta las ideas y acciones de las diferentes partes interesadas (sectores involucrados), para lograr los ODS relacionados con el clima para reducir la vulnerabilidad a largo plazo, los desastres provocados por el cambio climático y la degradación ambiental (Bieber et al., 2018).

América Central es una zona muy vulnerable a los cambios en el clima, factor muy determinante en la gestión del agua, porque modifica el régimen hidrológico y la distribución de la precipitación en el tiempo y espacio. Los eventos hidro-meteorológicos extremos como depresiones, tormentas tropicales y huracanes ocasionan impactos severos a la región y han tenido consecuencia en la dieta del segmento más pobre de la población centroamericana, afectando la producción de los granos básicos, como el maíz y el frijol. Así mismo, la cobertura universal con servicios de agua potable de buena calidad, caso de Guatemala, Honduras y Nicaragua, es de suma importancia y urgen, vincular estas iniciativas con los programas de seguridad alimentaria y erradicación de la pobreza. En estos países, se deben fortalecer las capacidades de planificación; aumentar la inversión del subsector; y cumplir con el acceso al agua y al saneamiento como derecho humano, que es

tarea de los Estados para el desarrollo local y promover la implementación de medidas de adaptación que reduzcan sus impactos (Colom & Artiga, 2017).

El sur de Honduras es la zona más vulnerable ante el cambio climático, según los escenarios proyectados (Colom & Artiga, 2017). El efecto de reducción de lluvias y los aumentos en las temperaturas, “podrían alcanzar un carácter de desastre si no se toman las medidas de adaptación necesarias” (Navarro et al., 2018). Por estas razones, durante el periodo del 2012-2013, se actualizó la base de datos meteorológicos y un balance hídrico teórico en el que no contempla aspectos como la demanda y las salidas o extracciones de agua para diferentes usos, desconociendo el balance hídrico real del país (Guillén & Tabora, 2015).

Bolivia es uno de los países más pobres de América Latina, donde 39% de la población aún vive por debajo de la línea de pobreza. La lucha contra la pobreza extrema y el hambre, así como el acceso a agua potable y a energía, están planteados como objetivos prioritarios en la Agenda Patriótica 2025. hasta el año 2025, Bolivia quiere poner fin a la extrema pobreza, asegurando que el 100% de la población tenga acceso a agua potable, saneamiento y energía, y que el hambre y la desnutrición hayan sido eliminados (Calero, 2019).



## **Capítulo 2. Planteamiento del problema, objetivos y estrategia metodológica**

La problemática de recursos hídricos se incrementa en los países en desarrollo debido a las desigualdades, falta de políticas públicas relacionadas con el manejo de los recursos naturales y en especial del agua para riego, para producción de alimentos que suplen necesidades básicas, falta de tecnología y personal capacitado. (Guillén & Tabora, 2015). En la realidad regional para Bolivia, los porcentajes de extracción de agua por usos al riego son 52.40% de la disponibilidad anual existente en el país; el consumo humano es el 14.32 %; el rubro de producción de energía hidroeléctrica se estima un 13.63% y un 5.18% para la producción Industrial; y se estima que en el proceso de minería se consume un 0.01% y el 14.45% restante corresponde a otros usos.

La cuenca del Lago Titicaca es un importante centro biodiversidad, que constituye un valioso recurso ambiental a nivel global, en ese sentido todas las actividades, obras o proyectos, monitoreo, sistematización que contribuyan a conservar los cuerpos de agua que la conforman, entre estos el río Suches que se constituye en uno de los afluentes más importantes del Lago Titicaca, favorecen al medio ambiente global (Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2015).

Actualmente, el desarrollo socioeconómico de las ciudades, zonas industriales y agrícolas ejercen una fuerte presión sobre los recursos hídricos, influyendo sobre su periodicidad y cantidad. A esto se suman, los contaminantes generados por las diferentes actividades antrópicas que están deteriorando la calidad de las masas de agua superficial y subterránea, limitando así su disponibilidad y calidad.

Ante la situación expuesta en el párrafo anterior el problema central radica en la falta de información periódica y sistemática sobre la calidad y cantidad del agua del Río Suches que no permite adoptar medidas de prevención, mitigación y/o remediación de impactos ambientales negativos generados por el vertido tanto de aguas residuales y residuos sólidos domésticos, así como residuos generados por la actividad minera en la cabecera de la cuenca del río Suches (Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego, 2015).

De los nevados de la cordillera de Apolobamba en Bolivia, nació el río Suches, con sus aguas cristalinas que parecían un espejo donde los pastores se miraban sus rostros. A consecuencia de la minería, se instaló la Red de Monitoreo Binacional del río Suches, ambos países carecen de un presupuesto para remediar la contaminación ambiental; porque la población afectada de esa zona ya no puede esperar más para solucionar las dificultades y hechos derivados de dicha actividad. Existe un nivel medio a alto de contaminación con respecto a los parámetros del Hierro y el Arsénico, seguidos por el Zinc y Manganeseo. El precio del oro es un factor determinante para el incremento de la minería (Quispe, 2011). Pero, hasta el momento sigue la contaminación del río con relaves mineros (Radioteca, 2015). Es necesario realizar estudios en territorio como cuenca, que por la bilateralidad no está siendo posible un avance sustancial en el monitoreo, siendo que debería partir de la cuantificación de los principales aportantes.

El balance hídrico a nivel de la cuenca Suches (Perú-Bolivia) no se ha realizado por falta de la información de las demandas hídricas correspondiente a la zona de Bolivia (Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané, 2010). Se requiere de instrumentos de decisión con base científica que refleje los posibles escenarios futuros, e índices de sostenibilidad, provocado por las constantes variaciones climáticas (Escobar et al., 2011). Los modelos de simulación permiten modelar sistemas de gestión de agua de uso agrícola bajo escenarios futuros potenciales, en donde pueda crecer la población, la demanda de agua, la energía y calidad.

El objetivo de este estudio es implementar un modelo de simulación que ayude en el análisis de escenarios futuros y que sirva de base para la toma de decisiones.

## **2.1. Pregunta de investigación**

¿De qué manera la gestión de agua afecta la sostenibilidad en la cuenca del Río Suches bajo escenarios futuros?

## **2.2. Hipótesis**

La sostenibilidad de la cuenca se verá comprometida por la gestión hídrica continuando con el modelo de gestión hídrica actual, porque se limitará el acceso al recurso hídrico de ciertos sectores se verá comprometida por los escenarios futuros.

## **2.3. Objetivo general**

- Evaluar la gestión hídrica considerando los escenarios futuros de cambio climático, utilizando modelos de simulación e indicadores que sirvan para garantizar la sostenibilidad de las actividades en la Cuenca del río Suches.

## **2.4. Objetivos específicos**

- Caracterizar el régimen hídrico en la cuenca del río Suches.
- Analizar el efecto del cambio climático en la cuenca al año 2030 y 2050.
- Analizar escenarios futuros de cambio de uso de suelo y eficiencias que determinen medidas de adaptación en la cuenca.

## **Capítulo 3. Marco teórico**

### **3.1. Cambio climático y el régimen hídrico**

El cambio climático se ha convertido en una preocupación importante en todo el mundo y para adaptarse a sus impactos, primero se deben entender los cambios esperados. Las comunicaciones nacionales son la principal fuente de información sobre el posible comportamiento del cambio climático a futuro, y fuente obligada de consulta para el desarrollo de acciones nacionales, regionales y locales. (Navarro et al., 2018).

América es una zona muy vulnerable a los cambios en el clima, factor muy determinante en la gestión del agua, porque modifica el régimen hidrológico y la distribución de la precipitación en el tiempo y espacio. Ocasionan impactos severos a la región y han tenido consecuencia en la dieta del segmento más pobre de la población afectando la producción. Así mismo, la cobertura universal con servicios de agua potable de buena calidad en Bolivia es de suma importancia y urgen, vincular estas iniciativas con los programas de seguridad alimentaria y erradicación de la pobreza. Se deben fortalecer las capacidades de planificación; aumentar la inversión del subsector; y cumplir con el acceso al agua y al saneamiento como derecho humano, que es tarea de los Estados para el desarrollo local y promover la implementación de medidas de adaptación que reduzcan sus impactos (Colom & Artiga, 2017).

### **3.2. Régimen hídrico y cambio del uso de suelos**

Desde el punto de vista específico, la FAO promueve el uso y manejo de los recursos de suelo y agua bajo los siguientes principios:

- a) El suelo y el agua son recursos vitales para la producción agropecuaria y forestal y, por lo tanto, son recursos vitales también para alcanzar los niveles requeridos de seguridad alimentaria y desarrollo del sector rural a nivel mundial;
- b) Todo ser humano tiene el derecho fundamental de acceso al agua de buena calidad, lo cual conduce a promover su utilización con criterios de equidad;

c) El suelo y el agua deben ser utilizados y manejados siempre con criterios técnicos de sustentabilidad (eficiencia técnica y económica, equidad social y sanidad ambiental);

d) Todo usuario del suelo y agua debe garantizar su uso racional y limpio, y entregarlos con una calidad que permita su uso posterior con eficiencia, sin dañar los sistemas de producción, el medio ambiente, ni tampoco al ser humano. (Vieira & van Wambeke, 2002)

Para hacer frente a esta problemática agua-alimentos, a nivel mundial se están tomando medidas que aplican mejoras en la gestión hídrica, entre las que se encuentran el uso creciente de energías renovables, mejoras en el manejo de los recursos naturales (Villalobos A et al., 2017), como la utilización del agua verde (el agua de lluvia contenida en el perfil del suelo), evitando el agotamiento de la humedad residual del suelo, en el campo después de la cosecha de cultivos al reducir el período de barbecho y al reducir el uso de agua a través de un cambio a cultivos de bajo consumo (Morillo, 2015).

Un suelo bien cubierto por vegetales vivos y muertos puede mantener una buena estructura superficial, favorecer la infiltración y almacenar más agua. La materia orgánica en permanente descomposición por una biota diversificada crea mejores condiciones físicas para el crecimiento radicular de las plantas. (Vieira & van Wambeke, 2002)

### **3.3. Régimen meteorológico**

Existen además algunas limitaciones en el trabajo con información de estaciones meteorológicas, a saber: (1) existen zonas donde no es posible ubicar una estación; (2) las estaciones no siempre están bien administradas, por lo que los datos solo están disponibles durante un corto período o contienen espacios vacíos; (3) los datos recopilados no se almacenan adecuadamente en formatos estándares; (4) los datos no superan los controles de calidad básicos y (5) el acceso a los datos está restringido por las instituciones poseedoras de las información. Todas estas restricciones afectan los análisis de clima y destacan la importancia de hacer públicos los datos (Ramirez Villegas & Challinor, 2012).

### **3.4. Modelos de simulación del régimen hídrico**

La implementación de modelos de simulación en la gestión del agua puede ayudar a explorar los impactos que tendría una serie de supuestos alternativos sobre las políticas

futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación (Salinas & Paz, 2011). Los mismos autores indican que el uso de modelos puede influir en los cambios provocados por variaciones de la demanda y el suministro, impactos en el cambio de políticas futuras y clima, compatibilidad con objetivos ambientales y costos, en función al analizar “el mejor uso posible del recurso agua y su correcta administración” en la permanente búsqueda de un desarrollo sostenible de la región.

La aproximación a la modelización hidrológica, mediante métodos más propios de la simulación hidrodinámica, permite plantearse de forma realista la simulación integrada hidráulico-hidrológica en una única herramienta que englobe los distintos procesos involucrados en la transformación lluvia escorrentía, en la propagación de avenidas, y en la descripción del flujo de agua en un cauce fluvial (Caro Camargo, 2015)

El modelo del Sistema WEAP ("Water Evaluation And Planning" según la sigla en inglés) fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute, es una herramienta computacional amigable que provee un enfoque integral a la planificación de los recursos hídricos, incorporando valores para la planificación de recursos hídricos y el análisis de políticas del uso del agua (Okungu et al., 2017; Arranz & McCartney, 2007).

El modelo WEAP tiene dos funciones principales (Yates et al., 2005):

- Simulación de procesos hidrológicos naturales (por ejemplo, evapotranspiración, escorrentía e infiltración) para permitir la evaluación de la disponibilidad de agua dentro de una cuenca.
- Simulación de actividades antropogénicas superpuestas en el sistema natural para influir en los recursos hídricos y su asignación (es decir, demandas de agua consuntivas y no consuntivas) para permitir la evaluación del impacto del uso humano del agua. Para permitir la simulación de la asignación de agua, los elementos que comprenden el sistema de demanda y suministro de agua y su relación espacial se caracterizan por la cuenca en consideración. El sistema está representado en términos de sus diversas fuentes de agua (por ejemplo, agua superficial, agua subterránea, desalinización y elementos de

reutilización de agua); extracción, transmisión, embalses e instalaciones de tratamiento de aguas residuales y demandas de agua (es decir, sectores definidos por el usuario, pero que generalmente comprenden industria, minas, riego, suministro doméstico, etc.) La estructura de datos y el nivel de detalle se pueden personalizar (por ejemplo, combinando sitios de demanda) para que se correspondan con los requisitos de un análisis particular y las restricciones impuestas por datos limitados. Una interfaz gráfica facilita la visualización de las características físicas del sistema y su diseño dentro de la cuenca. (Arranz & McCartney, 2007)

WEAP posiciona las condiciones del lado de la demanda de agua, tales como patrones de uso del agua, eficiencias de equipos, estrategias de la reutilización, costos, y esquemas de asignación del agua en una misma línea con los temas del lado de la oferta de agua tales como caudal, recursos de agua subterránea, embalses, y transferencia de agua. WEAP también se distingue por su enfoque integral al simular tanto los componentes naturales (ej. las demandas por evapotranspiración, escorrentía, flujo base, etc.) como los componentes humanos (ej. embalses, bombeo de agua subterránea, plantas hidroeléctricas y otros) de los sistemas de agua, permitiendo el acceso del planificador a una vista más comprensiva de la amplia gama de factores que deben ser considerados en el manejo de los recursos hídricos para el uso presente y futuro. El resultado es una herramienta eficaz para examinar opciones alternativas del desarrollo y manejo del agua (Salinas & Paz, 2011).

WEAP se ha identificado como un sistema de apoyo a la decisión con capacidades para crear una imagen inclusiva e integrada de las fuentes y usos del suministro de agua a través del análisis de escenarios (Okungu et al., 2017). El modelo WEAP se inserta como una excelente herramienta para el apoyo a la toma de decisión en la gestión integral de los recursos hídricos ante los desafíos del clima futuro. Las potencialidades de su uso para el trazado de estrategias de adaptación del sector agropecuario al cambio climático, apuntan a su robustez para resolver problemas concretos de la planificación de los recursos hídricos y la posibilidad de su implementación en otras cuencas del país (Hervis Granda et al., 2018)

Las principales funciones de WEAP son la **Base de datos de balance de agua**: WEAP proporciona un sistema para mantener información de oferta y demanda de agua.

**Herramienta de generación de escenarios:** WEAP simula la demanda, oferta, escorrentía, caudal, almacenaje, generación, tratamiento y descarga de contaminantes y calidad del agua en los ríos. **Herramienta de análisis de políticas:** WEAP evalúa una gama completa de las opciones del desarrollo y manejo del agua, y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos (Laqui Vilca, 2010).

### **3.4.1. Oferta**

Es la disponibilidad hídrica de un río en estado natural, se puede obtener a partir del registro histórico ó generación de las descargas medias utilizando un modelo de precipitación-escorrentía. En la cuenca Suches (Perú) el balance hídrico se ha desarrollado en tres subcuencas que disponen de información básica, los resultados muestran que en la subcuenca Chueña Huata Jahuirá no existe déficit hídrico y las demandas están satisfechas al 100%, en la subcuenca Caylloma el déficit hídrico existe en los meses de agosto y setiembre con ligera variación y exceso hídrico en los meses de octubre a julio con cobertura de las demandas al 100%, en la subcuenca Trapiche el déficit hídrico existe en los meses de agosto a octubre y el superávit en los meses de noviembre a julio con las demandas atendidas al 100% (Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané, 2010).

### **3.4.2. Demanda**

El análisis de la demanda es fundamental para el análisis integrado de la planificación del agua con WEAP21, ya que todos los cálculos de suministro y recursos son conducidos por la rutina de asignación que determina la entrega final a cada nodo de demanda, en función de las prioridades especificadas por el usuario.

El modelo WEAP se puede aplicar tanto a los sistemas municipales como a los agrícolas y puede abordar una amplia gama de problemas, incluidos los análisis de la demanda sectorial, la conservación del agua, los derechos de agua y las prioridades de asignación, la simulación del flujo de agua, la operación del embalse, los requisitos del ecosistema y los análisis de costo-beneficio del proyecto (Arranz & McCartney, 2007).



WEAP21 proporciona flexibilidad en cómo se estructuran los datos y puede variar desde estructuras orientadas al uso final altamente desagregadas hasta análisis altamente agregados. Por lo general, un escenario de demanda comprende varios sectores, incluidos los hogares, la industria, los ecosistemas y la agricultura, y cada uno puede desglosarse en diferentes subsectores, usos y dispositivos que utilizan el agua (Yates et al., 2005).

### **3.4.3. Demanda de la minería para el suministro de agua**

En la última década, la minería del cobre del norte de Chile ha debido buscar nuevas alternativas de abastecimiento de agua. Los recursos hídricos de ríos y acuíferos en su gran mayoría ya están siendo explotados; además, las salvaguardas ambientales y la oposición de las comunidades hacen difícil aprovechar los no utilizados. En este escenario, las empresas mineras han comenzado a abastecer las nuevas demandas recurriendo a la desalación del agua de mar. Ocasionalmente es posible abastecer la demanda minera mediante fuentes naturales cordilleranas, actualmente utilizadas por empresas sanitarias, compensando la demanda doméstica localizada en la zona costera con agua desalinizada. Esta alternativa que, desde el punto de vista de la eficiencia económica del sistema resulta altamente ventajosa y es neutra desde la perspectiva social y ambiental, no ha sido posible hacerla efectiva por oposición de los pobladores (Peña, 2018)

### **3.5. Integración del modelo WEAP**

El modelo WEAP, se puede integrar a una diversidad de herramientas con otras las cuales permite complementar los análisis de la gestión del agua, las posibles integraciones y sus potencialidades son:

Modelo CROPWAT: La integración con este modelo permitiría evaluar el balance disponibilidad demanda para la variación las normas netas de los cultivos esperados por los efectos del cambio climático, principalmente el aumento de la temperatura (Adgognon et al., 2016; Heng et al., 2002).

Modelo DSSAT (Jame & Cutforth, 1996): La integración con este modelo permitiría simular las necesidades de riego de un cultivo agrícola y al mismo tiempo conocer si desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso es posible suplir esta demanda.

Plataforma BioMa (Holzworth et al., 2015): La integración con este modelo permitiría evaluar el rendimiento potencial de cultivos agrícolas bajo riego ante diferentes escenarios climáticos y estimar los volúmenes de agua disponibles para suplir las necesidades de estos cultivos.

Integración con modelos de agua subterránea, por ejemplo:

Modelo Modflow (Hadded et al., 2013): La integración con este modelo permite el análisis de la interacción del agua superficial y subterránea, además de mejorar los resultados del balance de aguas subterráneas en la gestión del agua.

Integración con modelos de calidad del agua, por ejemplo:

Modelo QUAL2K (Silva, 2015): La integración con este modelo permite analizar la calidad del agua en la gestión de los recursos hídricos, su implicación para otros usuarios y el rastreo de contaminantes en el área. Una aplicación de gran valor práctico de la integración de estos modelos resulta la repercusión que tienen las aguas residuales de las labores agrícolas en los ecosistemas acuáticos (por ejemplo: manglares) o en otros usuarios aguas debajo de éstas.

Integración con otros modelos hidrológicos y de gestión de los recursos hídricos, por ejemplo:

Modelo hidrológico SWAT: Aunque ambos modelos se emplean para el planeamiento de los recursos hídricos, SWAT posee mayor fortaleza como modelo espacial y permite simular mejor la relación lluvia-escorrentía a nivel de subcuencas que el modelo hidrológico de WEAP (Adgolign et al., 2016).

Sin embargo, SWAT no tiene en cuenta la gestión del agua, pues no es un modelo de optimización, por tanto, la integración permite emplear las fortalezas de este y emplearlas en WEAP de forma indirecta .

- Modelo de gestión HEC-PRM (Rozos, 2019): Este posee altas prestaciones para la optimización de la operación de embalses simples con la posterior simulación de la

operación en el modelo HEC-ResSIM. Aunque WEAP de igual forma permite analizar la operación de embalses simples, el modelo HEC-PRM es más completo en este tipo de análisis por ser un modelo especializado en estos temas. Los resultados del modelo HEC-PRM pueden ser integrados en WEAP de forma indirecta (Hervis Granda et al., 2018).

### **3.6. Métodos para la determinación de la demanda**

Entre los métodos que se utilizan están los siguientes:

#### **3.6.1. Método escurrimiento de Lluvia (método de la humedad del suelo)**

El método de la Humedad del Suelo, el cual es el más complejo de los tres, ha sido empleado para simular los caudales de interés de este estudio. Su principal característica es que utiliza dos capas de suelo para representar a la cuenca. En la capa superior se simula la evapotranspiración considerando los parámetros meteorológicos (precipitación y temperatura) y características del suelo de la cuenca (espesor zona radicular, espesor zona profunda, tasa de conductividad, saturación del suelo), mientras que en la capa inferior se simula el flujo base del río y los cambios en la humedad del suelo (Mena Pardo, 2009).

#### **3.6.2. Método MABIA**

El Método MABIA es una simulación diaria de transpiración, evaporación, requisitos de riego y programación, crecimiento y rendimiento de cultivos, e incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua del suelo. Se deriva del conjunto de herramientas de software MABIA, desarrollado en el Institut National Agronomique de Tunisie por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun. Los algoritmos y descripciones aquí contenidos son para el procedimiento combinado de cálculo MABIA-WEAP (Moreira Barradas et al., 2015).

El Método MABIA utilizo el 'dual' K<sub>c</sub> método, como se describe en Irrigación FAO y Drenaje Paper No. 56 (versión española de la FAO 56), mediante el cual el K<sub>c</sub> valor se divide en un coeficiente de cultivo 'basal', K<sub>cb</sub>, y un componente separado, K<sub>e</sub>, que representa la evaporación de la superficie del suelo. El coeficiente de cultivo basal representa las condiciones reales de ET cuando la superficie del suelo está seca, pero hay

suficiente humedad en la zona de la raíz para soportar la transpiración completa. De esta manera, MABIA es una mejora con respecto a CROPWAT, que utiliza un solo  $K_c$  método, y por lo tanto, no separa la evaporación y la transpiración. Este método se puede utilizar para modelar cultivos agrícolas, así como clases de tierras no agrícolas, como bosques y praderas (Agarwal et al., 2019).

Aunque el paso de tiempo para MABIA es diario, el paso de tiempo para el resto de su análisis WEAP no necesita ser diario (aunque puede ser diario). Para cada paso de tiempo WEAP (p. Ej., Mensual), MABIA correría por cada día en ese paso de tiempo y agregaría sus resultados (evaporación, transpiración, requisitos de riego, escorrentía e infiltración) a ese paso de tiempo. Por ejemplo, en enero, MABIA correría del 1 al 31 de enero y resumiría sus resultados como totales de enero, incluyendo lo más importante, el requisito de suministro para riego. WEAP luego resolvería sus asignaciones de suministro, utilizando este requisito de riego mensual de las cuencas de MABIA. En el caso de que el suministro entregado a las cuencas fuera inferior al requerido, MABIA volvería a ejecutar su simulación diaria (Agarwal et al., 2019).

Los pasos en los cálculos de MABIA son los siguientes (Moreira Barradas et al., 2015):

- Evapotranspiración de referencia ( $ET_{ref}$ )
- Capacidad de agua del suelo
- Coeficiente de cultivo basal ( $K_{cb}$ )
- Coeficiente de evaporación ( $K_e$ )
- Evapotranspiración del cultivo potencial y real ( $ET_c$ )
- Balance hídrico de la zona radicular
- Irrigación
- Rendimiento

Se utilizó el modelo WEAP-MABIA, donde la evapotranspiración de referencia Penman – Monteith diaria (ET<sub>o</sub>), la precipitación efectiva (PE), el requerimiento de agua del cultivo (CWR), la evapotranspiración real del cultivo (ET<sub>a</sub>) y el requerimiento de agua de riego (IWR) se estima para todos los predios de la cuenca irrigados utilizando parámetros distribuidos espacialmente en clima, cultivo, características del suelo, sistema de riego y prácticas básicas de gestión del riego durante la temporada de cultivo 2017/2018, irrigados y sus granjas y parcelas relacionadas; representando el uso actual de la tierra, el consumo de agua a nivel de granja; el requerimiento de agua de cultivo (CWR) y el requerimiento de agua de riego (IWR) en pasos diarios, mensuales y anuales (Moreira Barradas et al., 2015).

### **3.7. Escenarios de cambio climático**

En la mayoría de los escenarios de cambio climático se puede distinguir la disminución de las precipitaciones en los meses de julio a octubre en el régimen Pacífico y aumento en el régimen Caribe. Disminución de los caudales en los meses de la temporada lluviosa en la vertiente del Caribe y aumento en la vertiente del Caribe (Rodríguez, 2017) Un escenario de emisión es un resultado plausible y consistente que ha sido construido para explicar las consecuencias potenciales de la influencia de las emisiones humanas de gases de efecto invernadero sobre el clima. Es, por tanto, una representación de futuras emisiones de sustancias que son activamente radioactivas (por ejemplo, gases de efecto invernadero) que van en función de supuestos o hipótesis acerca de factores externos, tales como demografía, desarrollo socio-económico y cambio tecnológico a futuro (Perez, 2011).

Nunca se sabrá exactamente como las emisiones antropogénicas cambiarán el futuro, sin embargo, el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) ha desarrollado cuatro familias de escenarios para el Quinto Reporte de Evaluación (IPCC, 2013) denominadas Caminos Representativos de Concentración (RCP, siglas en inglés), denominados así: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 y RCP 2.6. Los números se refieren a los valores de forzamiento radiativo al 2100 relativos a los valores preindustriales.(Navarro et al., 2018).



Por otro lado, las relaciones entre los usos del agua en la parte alta, media y baja de la cuenca representan un desafío para el logro de una adecuada Gestión Integral de los Recursos Hídricos y el Manejo Integral de la Cuenca.

La cuenca alta se caracteriza por la presencia de actividades mineras auríferas, que presenta distintas formas de explotación y grado de complejidad, las cuales inciden en los ecosistemas afectando e impactando los factores agua y suelo. El área de la cuenca del río Suches se halla ubicada al occidente del Departamento de La Paz y limita al norte y este con los Valles Interandinos del Departamento de La Paz, al sur con el Lago Titicaca y al oeste con la República de Perú (**Figura 2**). Comprende las provincias fisiográficas Altiplano y Cordillera Oriental, hasta sus respectivas divisorias de aguas, excepto en la zona sur oriental del área que va hasta el pie de monte.



**Figura 2.** Mapa de ubicación de la cuenca del río Suches (Google Earth, 2018).

La cuenca Suches se encuentra ubicada en coordenadas UTM (WGS84):

Altitud : 4,250 - 5,829 msnm

**Cuenca Suches (transfronteriza)** (Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané, 2010).

Lado Bolivia

Lado Perú

Departamento: La Paz

Región: Puno

Provincia:

Provincia:

Franz Tamayo, Camacho y Saavedra.

Huancané y San Antonio de Putina

Distrito: Cojata, Ananea, Quilcapuncu e Inchupalla.

La cuenca tiene una extensión (Bolivia) aproximada 1.875 Km<sup>2</sup>, las altitudes varían en las áreas cordilleranas entre 4.200 m.s.n.m. y más de 5.500 m.s.n.m., mientras que en el Altiplano las altitudes oscilan entre 3.810 m.s.n.m. (llanura aluvial del río, próximo a la desembocadura) y 4.600 m.s.n.m. en las serranías.

## **4.2. Contextos**

### **4.2.1. Contexto Ambiental**

Agua: Deterioro de la calidad del agua por la actividad minera desarrollada en la cabecera, alteración de la dinámica fluvial, alteraciones en el régimen hidrológico, vertido de sustancias tóxicas. Contaminación por aguas residuales domésticas y residuos sólidos de las poblaciones ribereñas, especialmente aquellas con poblaciones importantes (v.g. Escoma).



Aire: En general el aire en la cuenca tiene buena calidad, sin embargo en las zonas de explotación minera se evidencia emisiones sólidas, emisión de gases por funcionamiento de maquinaria pesada y uso de mercurio; y emisiones de ruido.

Suelo: Deforestación, erosión, modificación del relieve, desestabilización de las laderas, en los lugares de explotación minera.

#### **4.2.2. Contexto Social**

##### **Actividad agrícola**

La cuenca del río Suches, el uso de agua en riego de pastos naturales se focaliza en la parte baja, media y alta de la cuenca. Los factores que afectan generalmente a los cultivos en las cuencas de estudio, son las ocurrencias de las inclemencias del clima (heladas y sequías). Los cultivos principales, son: Papa, Cebada (grano y forrajera), Avena (grano y forrajera), Habas, Quinoa, Cañahua, Trigo, Olluco, Oca, Alfalfa, Pastos Cultivados y otros. La mayor parte de los cultivos son para consumo humano y subsistencia de los mismos y un mínimo porcentaje lo llevan al mercado para la venta o intercambio de alimentos (Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané, 2010).

##### **Actividad pecuaria**

La existencia de pastos naturales, cultivos de forrajes y pastos cultivados favorecen la crianza del ganado, siendo los vacunos de doble propósito (carne y leche), los ovinos para carne, porcinos (carne) y en cuanto a los camélidos (fibra). La problemática del productor andino es la escases de alimentos para los ganados en épocas de estiaje, (abril a noviembre), esto hace que los productores se dediquen a la siembra de forraje en la época de lluvia, para almacenar y alimentarlos en la época de estiaje. (Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané, 2010).

Seis Municipios y comunidades de las zonas media y baja de la cuenca afectados por el deterioro de la calidad del agua y disminución de los caudales.

Cada uno de los 6 Municipios cuenta con recursos humanos y logísticos para apoyar la ejecución del proyecto. Las varias comunidades indicadas, a su vez cuentan con su Organización Comunitaria con capacidad de legitimación de las acciones del Proyecto.

#### **4.2.3. Contexto Económico**

Minería, Sistemas agropecuarios.

#### **4.2.4. Contexto Institucional**

##### **Bolivia**

Conformación de una Plataforma Interinstitucional, Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA), Unidad Operativa Boliviana (UOB), Gobierno Autónomo Departamental (GAD) La Paz, Municipios involucrados y representantes de las Organizaciones campesinas-indígenas-originarias de las Municipios que son parte del proyecto.

##### **Perú**

La Intendencia de Recursos Hídricos (Dirección General de Aguas y Suelos) del ex Instituto Nacional de Recursos Naturales, actualmente la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos en el país, viene desarrollando estudios hidrológicos en diversas cuencas del Perú.

#### **4.2.5. Contexto Legal**

Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, Promulgada en febrero de 2009, respecto a:

- ✓ Principios valores y fines del estado (Artículo 9 Inciso 6).

- ✓ Derechos fundamentales (Art. 16, Art. 33, Art. 108)
- ✓ Medio Ambiente (Art. 342, Art. 343, Art. 346, Art. 347)
- ✓ Recursos Hídricos (Art.373, Art.376)
- ✓ Competencias conferidas a los tres niveles del Estado en materia de medio ambiente (Art. 299, Art. 302, Art. 410)

Ley N° 1333 de Medio Ambiente, promulgada el 27 de abril de 1992 en lo que respecta a:

- ✓ Prevención y control del Medio Ambiente (Art 1, Art 3, Art 5)
- ✓ Planificación Ambiental (Art. 12)
- ✓ Calidad Ambiental (Art 17, Art 18)
- ✓ Control de la Calidad Ambiental (Art. 19)

#### Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica

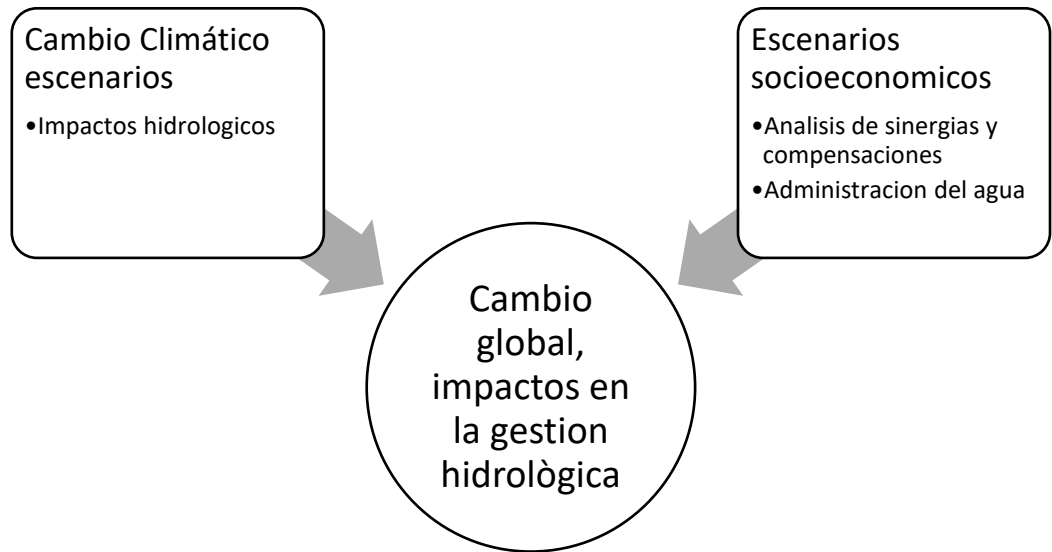
Dentro del ámbito jurisdiccional en Perú, la Administración Local de Agua Huancané, cuya dependencia técnica, funcional y administrativa es de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), con sede en la ciudad de Lima. La ANA, como ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, está adscrito en el Ministerio de Agricultura. La sede administrativa se encuentra ubicado en la ciudad de Huancané, del distrito y provincia de Huancané en la región Puno.

### **4.3. Marco general para el análisis de impacto del cambio global y la adaptación**

Se evaluaron:

- El rango de los impactos del cambio climático en la hidrología bajo varios escenarios climáticos futuros.

- También se analizó la gama de impactos del cambio global mediante la combinación de los escenarios de cambio climático que generen las condiciones hidrológicas más extremas (más seco y húmedo), al igual que las condiciones socioeconómicas.
- Los indicadores resultantes se evaluaron para descubrir las sinergias y compensaciones entre los sectores relacionados con el agua, y proponer qué medidas de adaptación de gestión del agua son necesarias.



**Figura 3. Análisis de impacto del cambio global que combina sistemas de recursos hídricos y los enfoques de simulación.**

#### **4.4. Modelo de simulación**

Para predecir los cambios de abastecimiento y demanda de agua en la cuenca del Río Suches, se utilizó el modelo Evaluación y Planificación del Agua (WEAP, siglas en inglés de Water Evaluation And Planning) que es una herramienta robusta y práctica para simulación de la administración del agua y la distribución de recursos limitados (Escobar et al., 2011).

## 4.5. Unidades hidrográficas

### 4.5.1. Áreas

Se delimitaron diez subcuencas dentro de la cuenca Suches, las cuales se nombraron de la siguiente manera: Cuenca\_4, Cuenca\_Alkahamari, Cuenca\_7, Cuenca\_Suches\_Alto, Cuenc\_Suches, Cuenca\_3, Cuenca\_2, Cuenca\_6, Cuenca\_1 y Cuenca\_5

El área de las subcuencas de acuerdo con la cobertura y/o uso de suelo y nivel fueron designadas por: Agricultura, bosques, praderas, humedales, urbanos, matorrales, vegetación estéril o escasa, aguas abiertas, nieve y hielo y Desconocido.

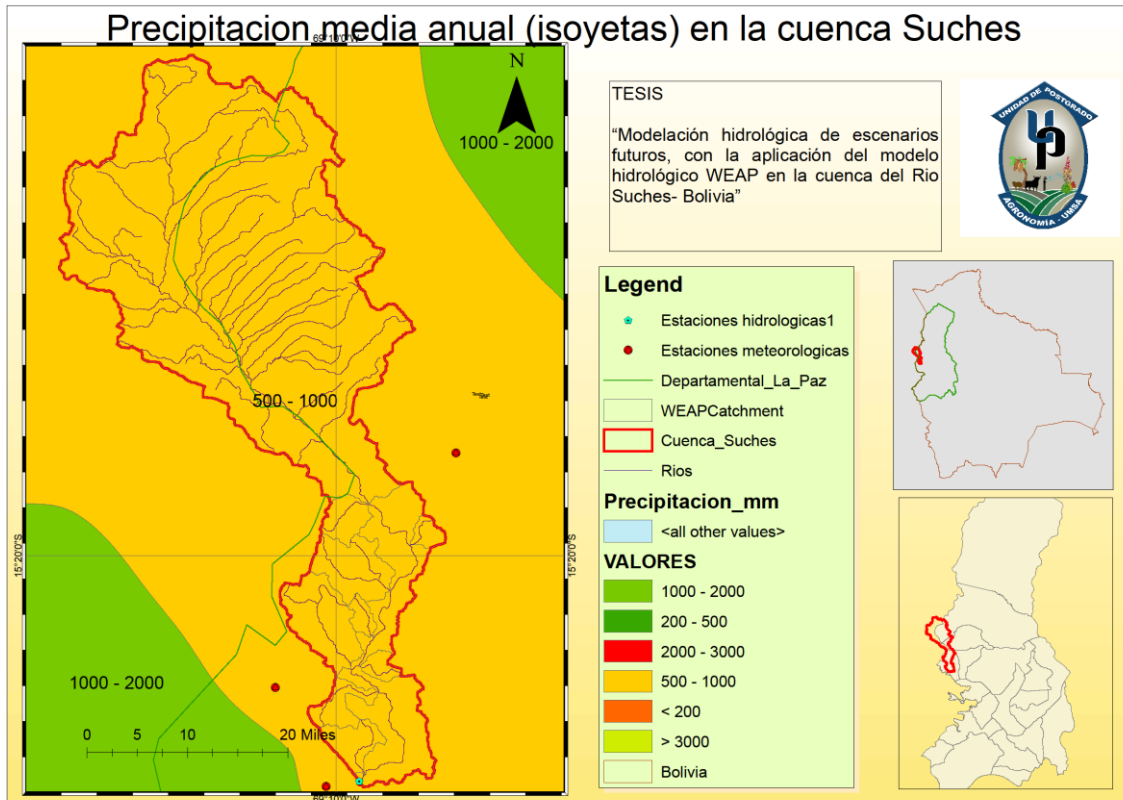
Estos datos fueron introducidos y utilizados en la calibración para el cálculo de la disponibilidad de los recursos hídricos, de las diez subcuencas.

### 4.5.2. Meteorología

Los datos meteorológicos mensuales incluyendo la precipitación, temperatura, humedad relativa y viento. Estos datos fueron recopilados de la estación meteorológica de las estaciones de Escoma y Cojata.

| N° | Estación | Tipo | Código | Ubicación Política |              |                        | Ubicación Geográfica |                   |                   | Propiedad       |
|----|----------|------|--------|--------------------|--------------|------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
|    |          |      |        | Dpto.              | Provincia    | Municipio/<br>Distrito | Latitud Sur          | Longitud<br>Oeste | Altitud<br>(msnm) |                 |
| 1  | Escoma   | PLU  | ESC    | La Paz             | Camacho      | Escoma                 | 15°39'00"            | 69°07'00"         | 3826              | Senamhi-Bolivia |
| 2  | Cojata   | CO   | 827    | Puno               | Huancané     | Cojata                 | 15°00'42.4"          | 69°21'40.5"       | 4327              | Senamhi-Puno    |
| 3  | Suches   | PLU  | SUC    | La Paz             | Franz Tamayo | Escoma                 | 14°47'27.0"          | 69°19'07.0"       | 4655              | Senamhi-Bolivia |

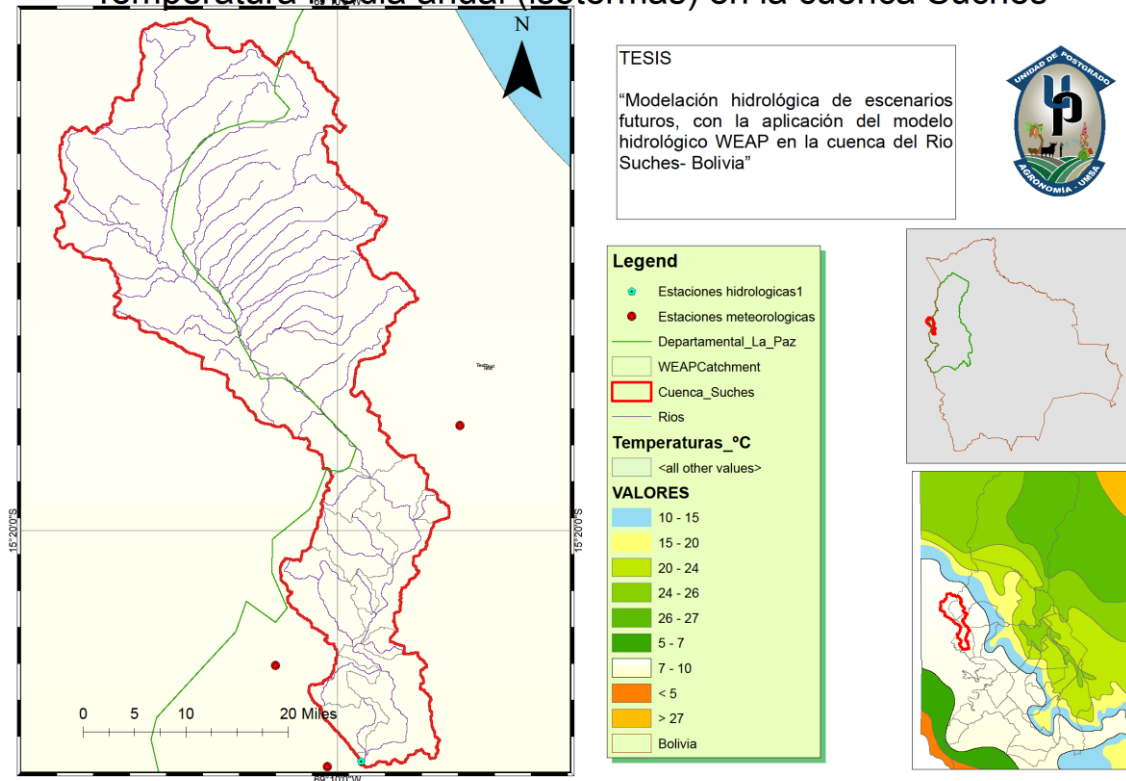
**Cuadro 1. Estaciones, hidrológica y meteorológicas cuencas Suches.**



**Figura 4. Distribución espacial de la precipitación media anual (isoyetas) en la cuenca Suches.**

La distribución espacial de la precipitación media anual (isoyetas) a nivel de las cuencas del río Suches. En la cuenca Suches se observa que los valores de la precipitación varían de 400 a 925 mm.

## Temperatura media anual (isotermas) en la cuenca Suches



**Figura 5. Distribución espacial de la temperatura media anual (isotermas) en la cuenca Suches.**

La cuenca Suches es la zona de las estaciones Puerto Acosta 9.1°C y Escoma 8.6°C; lo que demuestra la gran capacidad de almacenamiento de energía y posterior efecto de regulación termal. El gradiente térmico de la temperatura media la cuenca Suches es de 0.70°C por cada 100 m de altitud.

### 4.5.3. Demanda

Para la demanda de agua se tomó como base el agua de uso doméstico, uso industrial y agua para la producción agrícola, siendo para todos los casos 14,6 m<sup>3</sup>/persona.

Estos datos se obtuvieron por cálculo de crecimiento de población del censo tanto de Bolivia como de Perú.

Para conocer el número de habitantes por distritos o municipio, se usó los datos del censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en el 2012 en Bolivia. En el caso de Perú se utilizó los datos del censo 2015.

La base de datos es de libre acceso y se encuentra en el portal de estadísticas y censos en las páginas web de las instituciones, así como el consumo de agua per cápita rural y urbano.

La demanda de las cuencas que contienen tierra agrícola basado en la humedad del suelo. Las transferencias de agua y los depósitos principales fueron estimadas.

Se utilizará una tasa de crecimiento anual, según el Censo Nacional de Población y Vivienda (Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya, 2012b; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya, 2012d; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya, 2012c; Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya, 2012a). Cabe señalar que ésta es similar a la tasa de crecimiento de 1.99% a nivel nacional.

#### **4.5.4. Coeficientes de cultivo**

Coeficiente de cultivo promedio “Kc” de 0.65, umbral inferior de humedad 20%, umbral superior de humedad 70%.

| <b>Tipo de suelo</b> | <b>Kc</b> |
|----------------------|-----------|
| Agricultura          | 0.65      |
| Bosque               | 1.1       |
| Pradera              | 0.78      |
| Humedal              | 0.2       |

**Cuadro 2. Coeficientes de cultivo para superficies agrícola, forestal, pastizal y humedales (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).**

#### **4.5.5. El crecimiento poblacional**

Se calculará el valor de la población en un año determinado utilizando el método de progresión geométrica, cuya ecuación es la siguiente:



$$Pf = Pa \times \left(1 + \left(\frac{r}{100}\right)\right)^n$$

Donde:

Pf = es la población futura

Pa = es la población actual

r = es la tasa de crecimiento anual

n = es el periodo de la proyección

Datos las ciudades, Población inicial se calcula con (año 2015) igual a 4239 habitantes, índice de crecimiento poblacional “i” igual a 2%, dotación igual a 40 lt/hab\*día (14.6 m<sup>3</sup>/año), agua consumida igual a 20% (caudal de retorno del 80%), pérdidas de agua no contabilizada del 30% y el índice de perdidas en la aducción es igual a un 40%. Además, considerar a la ciudad como prioridad 1 de demanda y el rio Suches también tiene la prioridad 1 de suministro a las comunidades.

Para cuantificar los usuarios, se realizó una estimación porcentual con respecto a la población y superficie ocupada.

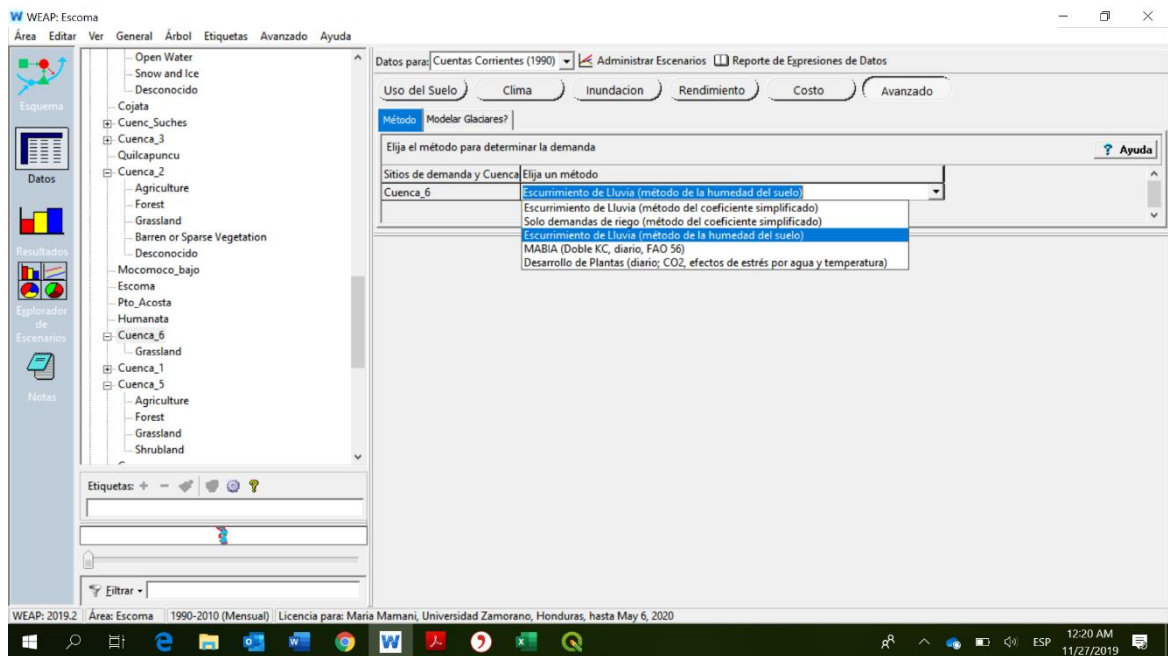
Periodo de Análisis y pasos de tiempo. - Considerar 20 años de análisis año inicial 1990, año final 2010 y pasos de tiempo igual a un mes.

#### **4.5.6. Método de Lluvia Escorrentía**

El método de Lluvia Escorrentía es un método simple que calcula la escorrentía como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración de las plantas. Una parte de la precipitación se puede configurar para omitir el proceso de evapotranspiración y entrar directamente en la escorrentía para asegurar caudal base (a través del parámetro “Precipitación Efectiva”). La evapotranspiración se estima primero en entrando la evapotranspiración (valor referencia) y luego se define los coeficientes de cultivos para cada tipo de uso de la tierra (el coeficiente de Kc) que multiplican el valor referencia de evapotranspiración para reflejar las diferencias que las plantas diferencias producen. Se puede obtener más información de este método del papel de FAO: Irrigation and Drainage

Paper 56, “Crop Evapotranspiration.” Es disponible en la página [www.fao.org](http://www.fao.org). Se puede utilizar un valor de precipitación efectiva menos que 100% para reconocer el hecho que parte de la lluvia no se presenta a la evapotranspiración durante eventos de precipitación intensos. Por lo tanto, se generó de poca escorrentía al río. Otra solución es cambiar a modelos más desarrollados, como el modelo de la humedad del suelo de los dos baldes junto con una interacción modelado de aguas superficiales y aguas subterráneas.

Se utilizó este método en la modelación de las cuencas.



**Figura 6. Análisis de impacto del cambio global que combina sistemas de recursos hídricos y los enfoques de simulación.**

#### 4.6. Calibración y Validación

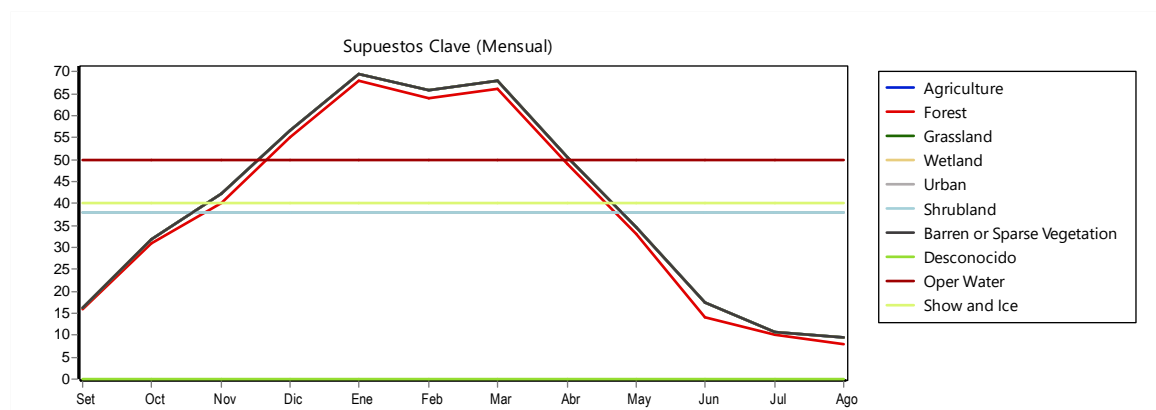
Generalmente se busca ajustar caudales pico y caudales base. Por ejemplo, si se busca aumentar la respuesta de caudales pico, se debe ajustar la escorrentía superficial la cual es directamente afectada por el RRF y  $K_s$ , los cuales afectan la reactividad de los *catchments*. Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se debe ajustar  $f$  y  $K_d$ . Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y por lo tanto al afectar un

termino, se afectan los otros de forma indirecta. Por ejemplo, otro factor de calibración como la conductividad hidráulica de la zona profunda,  $K_d$ , puede ser incrementado, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los perfiles profundos, y el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior,  $S_w$ , se logra un mayor flujo sub-superficial, y por tanto un aumento de los caudales máximos. Finalmente, para el parámetro de capacidad de retención de humedad en el perfil profundo ( $D_w$ ), regula la transmisión de los flujos a los caudales base. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)

El Caudal de aforo (Para calibración). - Los datos de caudal del río Suches se encuentran en el archivo adjunto, Anexo 2, los mismos permitirán realizar la calibración de las Unidades Hidrológicas.

Los parámetros de calibración fueron los siguientes:

Capacidad de agua profunda “ $D_w$ ”, para un año base, se utilizó el asistente mensual para series de tiempo, los datos fueron extraídos del Geovisor del balance hídrico de Bolivia (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2019).



**Figura 7. Valores de Capacidad de agua profunda en series de tiempo mensual.**

Conductividad zona radicular “ $K_s = \text{mm/mes}$ ”

| <b>Uso de suelo</b>         | <b>Conductividad zona radicular Ks</b> |
|-----------------------------|--|
| Agricultura                 | 30                                     |
| Bosque                      | 35                                     |
| Prado                       | 45                                     |
| Humedal                     | 20                                     |
| Urbano                      | 13                                     |
| Fregar                      | 15                                     |
| Vegetación estéril o escasa | 10                                     |
| Desconocido                 |  |
| Agua de operación           | 70                                     |
| Nieve y hielo               | 70                                     |

**Cuadro 3. Coeficientes de conductividad de la zona radicular Ks (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).**

Estos valores están en los rangos utilizados en el manual de balances hídricos (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016)

Conductividad zona profunda “Kd=20 mm/mes”, Valor inicial balde superior “Z1=0.7 mm”, Valor inicial balde inferior “Z2=0.30 mm”, se detallan en el Anexo 3.

El factor de resistencia a la escorrentía RRF

| <b>Uso de suelo</b>         | <b>El factor de resistencia a la escorrentía RRF</b> |
|-----------------------------|--|
| Agricultura                 | 4.4  |
| Bosque                      | 4.3  |
| Prado                       | 4  |
| Humedal                     | 3.6  |
| Urbano                      | 1.3  |
| Fregar                      | 1.2  |
| Vegetación estéril o escasa | 1.8  |
| Desconocido                 |  |
| Agua de operación           | 0.4  |
| Nieve y hielo               | 0.3  |

**Cuadro 4. Coeficientes de conductividad de la zona radicular Ks (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2016).**

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados, se pueden utilizar dos índices/métricas utilizadas normalmente en la

calibración de modelos hidrológicos: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y sesgo (Bias) o desviación relativa de los caudales (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009)

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \text{ y}$$

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o]$$

**Figura 8. Formula del cálculo de Nash-Sutcliffe y sesgo ( Bias), Donde  $Q_{s,i}$  y  $Q_{o,i}$  corresponden a caudales simulados y observados para cada paso tiempo  $i$ , y  $n$  corresponde al número total de pasos de tiempo.** (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

Se realizará en estaciones de medición y de almacenamiento de agua medido en depósitos, usando la ecuación de Nash-Sutcliffe Eficiencia (NSE) y el porcentaje de polarización (PBIAS) como indicadores de rendimiento para diferentes períodos dependiendo de la disponibilidad de datos.

El criterio para interpretar las estadísticas es el siguiente:

Nash-Sutcliffe: entre más cerca de 1 mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados.

Bias: entre menor el porcentaje de *Bias*, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un *Bias* positivo indica sobre estimación y un *Bias* negativo indica sub-estimación de caudales. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

#### 4.7. Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático, disponibles en su página web de IPCC (<https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>), fueron necesarios para determinar el efecto en los valores de

incremento o reducción del caudal, además de estimar las zonas con mayor demanda de agua en las poblaciones.

“Nunca se sabrá exactamente como las emisiones antropogénicas cambiarán el futuro, sin embargo, el IPCC ha desarrollado cuatro familias de escenarios para el Quinto Reporte de Evaluación (2013) denominadas Vías o Trayectorias de Concentraciones Representativas (VCR o RCP, Representative Concentration Pathway), denominados así: RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 y RCP 2.6. Los números se refieren a los valores de forzamiento radiativo (es la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio) al 2100 relativos a los valores preindustriales.” (Navarro et al., 2018).

| <i>RCP</i> | <i>Descripción</i>  |
|------------|---|
| RCP 8.5    | Aumento del forzamiento radiativo que conduce a 8.5 W/m <sup>2</sup> en 2100.               |
| RCP 6.0    | Estabilización sin exceder de 6 W/m <sup>2</sup> y estabilización después de 2100.          |
| RCP 4.5    | Estabilización sin exceder de 4.5 W/m <sup>2</sup> y estabilización después de 2100.        |
| RCP 2.6    | Pico en forzamiento radiativo a ~ 3 W/m <sup>2</sup> antes de 2100 y disminución posterior. |

**Cuadro 5. Descripción de las cuatro familias de RCP (Navarro et al., 2018)**

Se considero los escenarios para el RCP 4.5 y 8.5, para la gestión a futuro del año 2030 y 2050.

#### **4.7.1. Construcción de escenarios climatológicos A y B**

Se explica en esta sección una metodología propuesta para el desarrollo de escenarios climatológicos futuros. Esta metodología asume como punto de partida la existencia de proyecciones de escenarios de cambio climático bajadas a una escala regional. Para el caso del Bolivia dichos escenarios han sido generados por el proyecto PACC usando el modelo de clima regional PRECIS. Estos escenarios se encuentran disponibles en la página web del proyecto en el siguiente link <https://esg-dn1.nsc.liu.se/search/cordex/>.

Escenarios equivalentes también existen para otros países en Latinoamérica. Los pasos en esta metodología se describen a continuación:

1. Una primera etapa consiste en relocalizar las proyecciones climatológicas históricas (de control) provenientes del modelo de cambio climático regional (ej. PRECIS) a la ubicación de las estaciones índice tanto de temperatura como de precipitación. En esta relocalización se deben interpolar linealmente los valores de las proyecciones climáticas regionales ubicadas en las esquinas de la grilla de modelación considerando la ubicación geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas índices usadas en el modelo.

2. Una vez relocalizadas estas proyecciones se debe realizar una comparación mensual de los valores de acuerdo a la simulación y observación histórica. De esta comparación se derivan factores de ajuste mensuales para temperatura y precipitación. En el caso de la temperatura, este factor de ajuste consiste en la diferencia entre los promedios mensuales de temperatura simulado y observado para el periodo histórico. En el caso de la precipitación, este factor de ajuste considera la división entre los promedios mensuales de precipitación simulado y observado. Esto deber ser realizado para cada una de las estaciones meteorológicas. A continuación se describen matemáticamente estos algoritmos: (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

$$\delta P_m^{ip} = \frac{\bar{P}_{PRECISBL,m}^{ip}}{\bar{P}_{Obs,m}^{ip}}, \quad \delta T_m^{it} = \bar{T}_{PRECISBL,m}^{it} - \bar{T}_{Obs,m}^{it}$$

**Figura 9.** Donde  $\delta P_m^{ip}$  y  $\delta T_m^{it}$  son los factores mensuales de ajuste de precipitación y temperatura,  $ip$  y  $it$  son los índices de las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura respectivamente que son usadas en el modelo y  $Obs$  y  $PRECISBL$  se refieren (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

3. Posteriormente es necesario relocalizar las proyecciones climatológicas futuras a la ubicación de las estaciones índice siguiendo la misma metodología descrita en el paso 1.

4. Finalmente estas proyecciones son modificadas tomando en cuenta el factor de ajuste mensual obtenido para cada estación. (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

$$\begin{aligned}
 PS_{PRECIS(A2),m}^{ip} &= PS_{PRECIS\_RAW(A2),m}^{ip} / \delta P_m^{ip} \\
 TS_{PRECIS(A2),m}^{it} &= TS_{PRECIS\_RAW(A2),m}^{it} + \delta T_m^{ip}
 \end{aligned}$$

**Figura 10.  $\delta P$   $\delta T$  Donde  $PS_{ip}^{PRECIS\_RAW(A2),m}$  (2), y  $PS_{ip}^{PRECIS(A2),m}$  (2), corresponden a las proyecciones directas de PRECIS y escaladas usando el factor de ajuste respectivamente. Estas corresponden a las proyecciones de precipitación del escenario A2. Algo simi** (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & Stockholm Environment Institute, 2009).

Una vez reducida la escala del Modelo de Circulación Global (GCM), para las variables meteorológicas posibles para la cuenca Suches, esta se utiliza solo para el RCP 4.5 y 8.5, para la gestión a futuro del año 2030 y 2050, los cuales son los de mejor y peor caso de influencia en la gestión del manejo de agua.

#### 4.8. Modelos socioeconómicos

Las trayectorias o vías Socioeconómicas Compartidas (SSP, Shared Socioeconomic Pathways) se utilizarán junto con los RCP para analizar las respuestas entre el cambio climático y los factores socioeconómicos, como el crecimiento de la población mundial, el desarrollo económico y el progreso tecnológico, con el modelo SSP específicamente se analizarán:

SSP1 (sustentabilidad, pocos cambios), SSP2 (a mitad del camino, continúan las tendencias o corrientes), SSP3 (fragmentación, mundo fragmentado), SSP4 (inequidad, mundo desigual o mundo dividido) y SSP5 (desarrollo convencional). Específicamente, para los siguientes elementos están disponibles las cuantificaciones: población por edad, sexo y educación, urbanización y desarrollo económico PIB (Producto interno bruto).

Establecer este enlace es importante ya que permitirá determinar los impactos de adaptación y vulnerabilidad (IAV), impactos, adaptación y mitigación (IAM), y utilizar la información de los SSP junto con las proyecciones climáticas de RCP (Riahi et al., 2017).



Par este aspecto solo se considero el SSP1, la sustentabilidad con pocos cambios sonde la sociedad esta estable y no tiene cambios bruscos en la tasa de crecimiento poblacional.

#### 4.8.1. Construcción de escenarios cambio de uso de suelos

El escenario de cambios de uso de suelo se consideró en específico para la sub cuenca donde se encuentra el municipio de Escoma (cuenca 1), que considera los sistema de riego de la subcuenca, con la variación de Uso agricultura incrementando en 20km<sup>2</sup>, el mismo es reducido del área de los pastizales.

| Factor de Resistencia a la Escorrentía.  | Conductividad de la Zona Radicular |           | Conductividad Profunda       |                 |
|--|------------------------------------|-----------|------------------------------|-----------------|
| Área   | Coeficiente de Cultivo.            |           | Capacidad de Agua del Suelo. |                 |
| Ingrese el área correspondiente a una ramificación, o la proporción del área cubierta por la ramificación anterior |                                    |           |                              |                 |
| Rango: 0 y superior  |                                    |           |                              |                 |
| Sitios de demanda y Cuenca   | 1989                               | 1990-2010 | Escala                       | Unidad          |
| Cuenca_1   |                                    |           |                              | N/D             |
| Agriculture  | 0.98                               | 20.98     |                              | km <sup>2</sup> |
| Forest   | 1.43                               | 1.43      |                              | km <sup>2</sup> |
| Grassland  | 41.14                              | 21.14     |                              | km <sup>2</sup> |
| Shrubland  | 1.99                               | 1.99      |                              | km <sup>2</sup> |
| Barren or Sparse Vegetation  | 0.77                               | 0.77      |                              | km <sup>2</sup> |
| Desconocido  | 1.06                               | 1.06      |                              | km <sup>2</sup> |

**Figura 11. Cambio de uso de suelo en la localidad de Escoma**

En el plan de desarrollo Municipal de Escoma de menciona las siguientes superficies con riego secano y tecnológico por goteo, además de las superficies de descanso, cultivables y no cultivables, este caso extremo de cambio de uso de suelos se da cuando hay proyectos de gran inversión.

| Superficie Cultivable (Has) |             |             |             |                     |                          |                   |                          |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| Comunidad                   | Bajo Riego  | A Escano    | Sub Total   | Sup.                | Sub Total Cultivable (A) | No Cultivable (B) | Total Familiar (A) + (B) |
|                             |             |             |             | Pastoreo De Escanso |                          |                   |                          |
| Escoma                      | 0,70        | 1,48        | 2,18        | 3,14                | 5,33                     | 0,20              | 5,53                     |
| Península de Challapata     | 0,00        | 0,96        | 0,96        | 1,04                | 2,00                     | 11,93             | 13,93                    |
| Collasuyo                   | 0,35        | 1,74        | 1,57        | 2,09                | 3,66                     | 6,06              | 9,73                     |
| Villa Puní                  | 0,00        | 1,74        | 1,74        | 0,65                | 2,39                     | 0,21              | 2,60                     |
| <b>TOTAL</b>                | <b>0,26</b> | <b>1,48</b> | <b>1,61</b> | <b>1,73</b>         | <b>3,35</b>              | <b>4,60</b>       | <b>7,95</b>              |

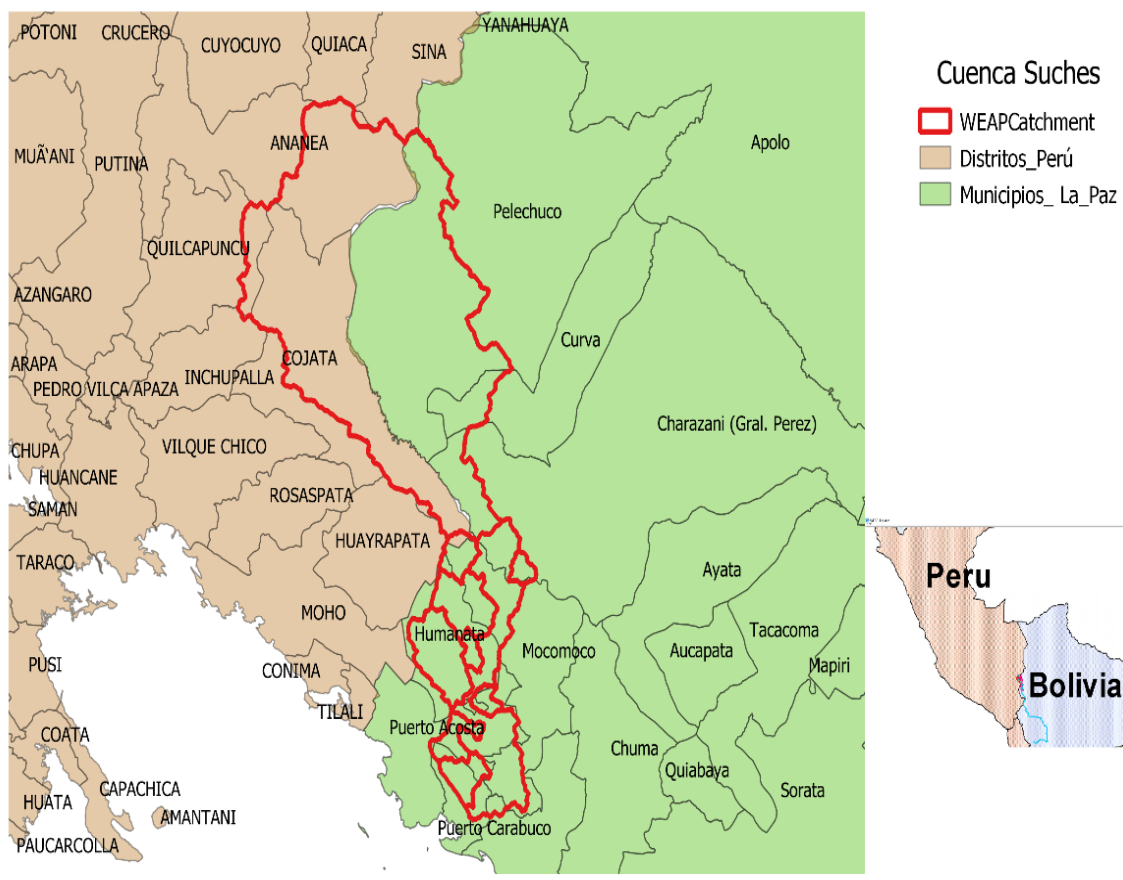
**Cuadro 6. Tenencia de tierras (Has.), (Gobierno Autonomo Municipal de Escoma, 2016)**

#### **4.8.2. Construcción de escenarios de las reducciones de perdidas**

Finalmente, como medida de adaptación, se considera un escenario de sistema de riego CUENCA 1, Área de riego igual al 100% del Uso Agrícola (0.98 km<sup>2</sup>) Coeficiente de cultivo promedio “Kc” de 0.65, umbral inferior de humedad 20%, umbral superior de humedad 70%, el índice de pérdidas (obra de toma, aducción, almacenamiento y aplicación) es de 80%. Además, considerar al sistema de riego como prioridad 2 de la demanda, donde se reducen las perdidas a 30%

## Capítulo 5. Resultados

Los municipios de La Paz, Bolivia que son parte de la cuenca delimitada están: Pelechuco, curva, Charazani, Mocomoco, Escoma, Humanata y Puerto Acosta (**Figura 12**). En los distritos de Puno Perú se encuentran Ananea, Quilcapuncu y Cojata.



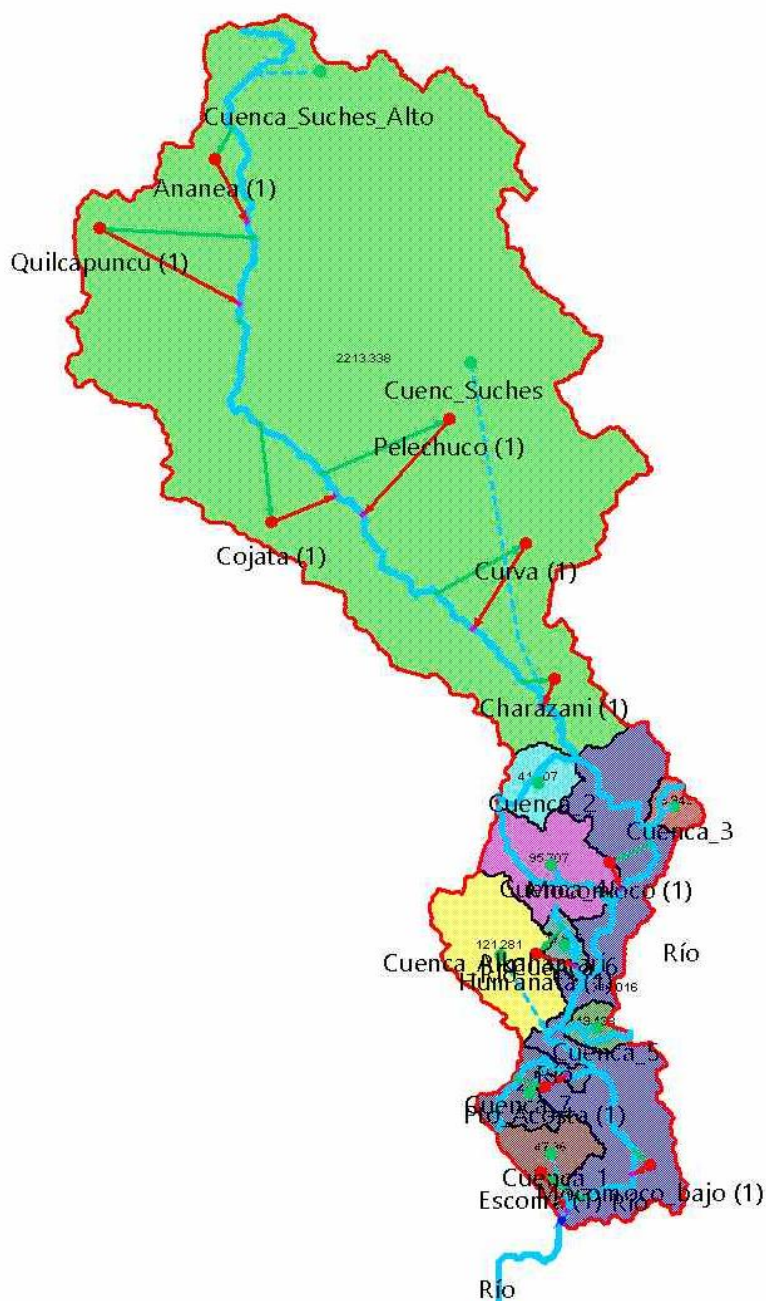
**Figura 12. Mapa de distritos y municipios que componen la cuenca del Río Suches.**

### 5.1. Unidades hidrológicas

Al igual que los ríos, se inserta las unidades hidrológicas o las cuencas del área de estudio, en el presente caso, diez unidades hidrológicas, es importante indicar que dentro de las unidades hidrológicas se realizara el balance correspondiente.

Para insertar las unidades con la delimitación automática. Las unidades hidrológicas de la cuenca correspondiente del esquema e inserta el nombre de la unidad, el elemento debe

estar activo en cuentas corrientes y por ahora desactivar las áreas regadas que se analizara posteriormente. De la misma forma se inserta las diez unidades hidrológicas. En la imagen aparecen puntos en color verde.



**Figura 13. Mapa de las unidades hidrológicas en el software WEAP de cuencas del Río Suches.**

## 5.2. Estableciendo años y pasos de tiempo

En esta parte se establece, el periodo de análisis como también los tiempos de paso los cuales dependen principalmente de los datos a utilizados en el modelo, en nuestro caso los datos fueron con un paso de tiempo mensual y periodo de análisis desde 1990 a 2010.

### 5.2.1. Población

La determinación de la población base se calculó según la fórmula de crecimiento geométrico.

| Municipio     | Población 1990 |
|---------------|----------------|
| Ananea        | 3936           |
| Charazani     | 927            |
| Cojata        | 2196           |
| Curva         | 212            |
| Escoma        | 2324           |
| Humanata      | 3110           |
| Mocomoco      | 1520           |
| Mocomoco bajo | 1013           |
| Pelechuco     | 1316           |
| Pto. Acosta   | 2556           |
| Quilcapuncu   | 175            |

**Cuadro 7. Población de demanda de agua en las comunidades de la Cuenca Rio Suches y Escoma, Bolivia, 2016.**

La población con mayor cantidad para este año base 1990 son: Ananea (3936 habitantes) y Humanata (3110 habitantes).

## 5.3. Método “Esguerrimiento de Lluvia (Método de la humedad del suelo)”

En esta opción se realiza el llenado de todos los datos a emplear en el modelo, la ventana adjunta muestra los diferentes datos que se puede insertar entre ellos: Supuestos claves, Sitios de demanda y cuencas, Hidrología, Recursos y Suministro y Otros supuestos. Al seleccionar Sitios de demanda y cuencas, automáticamente se despliega la venta adjunta,

en ella se muestra las alternativas de los métodos para calcular la escurriente y demandas de riego el cual es escurrimiento de lluvia.

#### 5.4. Áreas de cobertura vegetal y uso de suelo

Los datos de cobertura vegetal y/o uso de suelo se asignaron en función a su área para cada unidad hidrológica, para cada cuenca asignamos los tipos de cobertura, tales como:

| <b>Unidad Hidrológica</b> | <b>Cubierta vegetal y uso del suelo</b> | <b>Unidad</b> | <b>Expression</b> | <b>Unidad</b>   | <b>Expresión</b> |
|---------------------------|---|---------------|-------------------|-----------------|------------------|
| Cuenca_4                  | Agricultura                             | ha            | 17                | km <sup>2</sup> | 0.17             |
| Cuenca_4                  | Bosque                                  | ha            | 80                | km <sup>2</sup> | 0.8              |
| Cuenca_4                  | Pradera                                 | ha            | 9292              | km <sup>2</sup> | 92.92            |
| Cuenca_4                  | Matorral                                | ha            | 167               | km <sup>2</sup> | 1.67             |
| Cuenca_4                  | Desconocido                             | ha            | 15                | km <sup>2</sup> | 0.15             |
| Cuenca_Alkahamari         | Agricultura                             | ha            | 133               | km <sup>2</sup> | 1.33             |
| Cuenca_Alkahamari         | Bosque                                  | ha            | 71                | km <sup>2</sup> | 0.71             |
| Cuenca_Alkahamari         | Pradera                                 | ha            | 11776             | km <sup>2</sup> | 117.76           |
| Cuenca_Alkahamari         | Humedal                                 | ha            | 17                | km <sup>2</sup> | 0.17             |
| Cuenca_Alkahamari         | Matorral                                | ha            | 72                | km <sup>2</sup> | 0.72             |
| Cuenca_Alkahamari         | Desconocido                             | ha            | 60                | km <sup>2</sup> | 0.6              |
| Cuenca_7                  | Agricultura                             | ha            | 97                | km <sup>2</sup> | 0.97             |
| Cuenca_7                  | Bosque                                  | ha            | 23                | km <sup>2</sup> | 0.23             |
| Cuenca_7                  | Pradera                                 | ha            | 4078              | km <sup>2</sup> | 40.78            |
| Cuenca_7                  | Vegetación estéril o escasa             | ha            | 13                | km <sup>2</sup> | 0.13             |
| Cuenca_7                  | Desconocido                             | ha            | 19                | km <sup>2</sup> | 0.19             |
| Cuenca_Suches_Alto        | Agricultura                             | ha            | 3075              | km <sup>2</sup> | 30.75            |
| Cuenca_Suches_Alto        | Bosque                                  | ha            | 1773              | km <sup>2</sup> | 17.73            |
| Cuenca_Suches_Alto        | Pradera                                 | ha            | 156879            | km <sup>2</sup> | 1568.79          |
| Cuenca_Suches_Alto        | Humedal                                 | ha            | 23                | km <sup>2</sup> | 0.23             |
| Cuenca_Suches_Alto        | Urbano                                  | ha            | 7                 | km <sup>2</sup> | 0.07             |
| Cuenca_Suches_Alto        | Matorral                                | ha            | 32138             | km <sup>2</sup> | 321.38           |
| Cuenca_Suches_Alto        | Vegetación estéril o escasa             | ha            | 12641             | km <sup>2</sup> | 126.41           |
| Cuenca_Suches_Alto        | Agua abierta                            | ha            | 4824              | km <sup>2</sup> | 48.24            |
| Cuenca_Suches_Alto        | Nieve y hielo                           | ha            | 9765              | km <sup>2</sup> | 97.65            |
| Cuenca_Suches_Alto        | Desconocido                             | ha            | 208               | km <sup>2</sup> | 2.08             |
| Cuenc_Suches              | Agricultura                             | ha            | 842               | km <sup>2</sup> | 8.42             |
| Cuenc_Suches              | Bosque                                  | ha            | 860               | km <sup>2</sup> | 8.6              |
| Cuenc_Suches              | Pradera                                 | ha            | 28283             | km <sup>2</sup> | 282.83           |

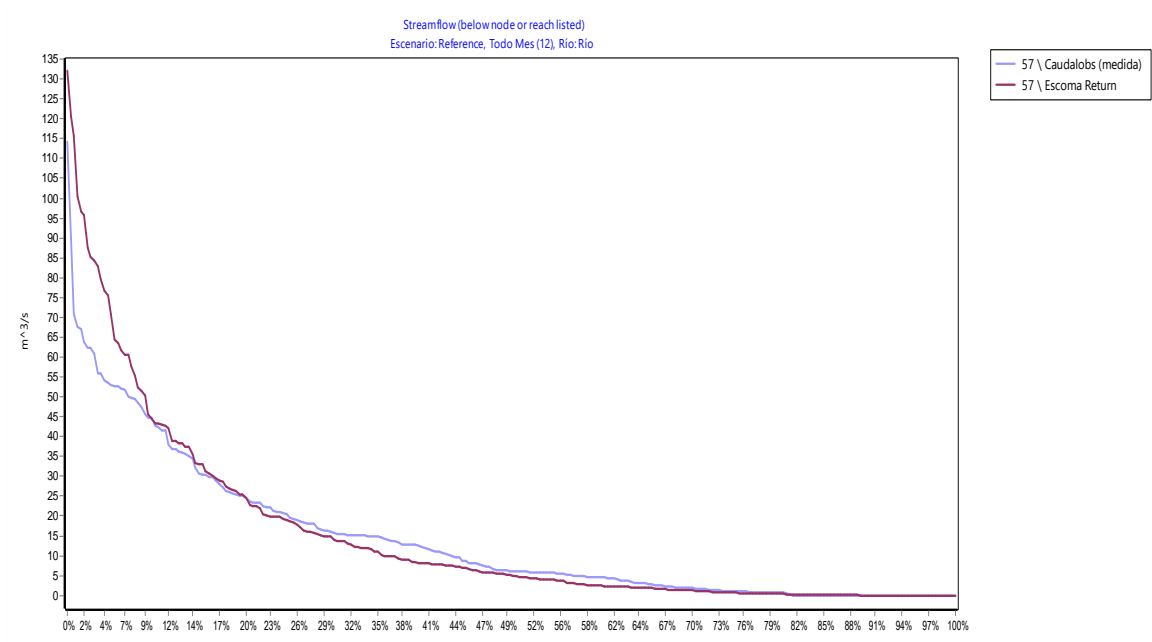
|              |                             |           |               |                       |                |
|--------------|-----------------------------|-----------|---------------|-----------------------|----------------|
| Cuenc_Suches | Urbano                      | ha        | 13            | km <sup>2</sup>       | 0.13           |
| Cuenc_Suches | Matorral                    | ha        | 625           | km <sup>2</sup>       | 6.25           |
| Cuenc_Suches | Vegetación estéril o escasa | ha        | 613           | km <sup>2</sup>       | 6.13           |
| Cuenc_Suches | Desconocido                 | ha        | 564           | km <sup>2</sup>       | 5.64           |
| Cuenca_3     | Bosque                      | ha        | 34            | km <sup>2</sup>       | 0.34           |
| Cuenca_3     | Pradera                     | ha        | 1820          | km <sup>2</sup>       | 18.2           |
| Cuenca_3     | Matorral                    | ha        | 40            | km <sup>2</sup>       | 0.4            |
| Cuenca_2     | Agricultura                 | ha        | 106           | km <sup>2</sup>       | 1.06           |
| Cuenca_2     | Bosque                      | ha        | 18            | km <sup>2</sup>       | 0.18           |
| Cuenca_2     | Pradera                     | ha        | 3942          | km <sup>2</sup>       | 39.42          |
| Cuenca_2     | Vegetación estéril o escasa | ha        | 56            | km <sup>2</sup>       | 0.56           |
| Cuenca_2     | Desconocido                 | ha        | 17            | km <sup>2</sup>       | 0.17           |
| Cuenca_6     | Pradera                     | ha        | 1789          | km <sup>2</sup>       | 17.89          |
| Cuenca_1     | Agricultura                 | ha        | 98            | km <sup>2</sup>       | 0.98           |
| Cuenca_1     | Bosque                      | ha        | 143           | km <sup>2</sup>       | 1.43           |
| Cuenca_1     | Pradera                     | ha        | 4114          | km <sup>2</sup>       | 41.14          |
| Cuenca_1     | Matorral                    | ha        | 199           | km <sup>2</sup>       | 1.99           |
| Cuenca_1     | Vegetación estéril o escasa | ha        | 77            | km <sup>2</sup>       | 0.77           |
| Cuenca_1     | Desconocido                 | ha        | 106           | km <sup>2</sup>       | 1.06           |
| Cuenca_5     | Agricultura                 | ha        | 22            | km <sup>2</sup>       | 0.22           |
| Cuenca_5     | Bosque                      | ha        | 45            | km <sup>2</sup>       | 0.45           |
| Cuenca_5     | Pradera                     | ha        | 1825          | km <sup>2</sup>       | 18.25          |
| Cuenca_5     | Matorral                    | ha        | 52            | km <sup>2</sup>       | 0.52           |
| <b>Total</b> |                             | <b>ha</b> | <b>293566</b> | <b>km<sup>3</sup></b> | <b>2935.66</b> |

**Cuadro 8. Resumen de las unidades hidrológicas por cobertura y uso de suelo del Rio Suches.**

En el caso de las diferentes áreas de cobertura vegetal y/o uso de suelos, fue necesario asignar las áreas y su unidad a cada uno de ellos, área de la opción uso de suelo y se asigna las siguientes áreas, con unidad en ha.

**5.5. Oferta de agua en m<sup>3</sup>/s para una probabilidad de excedencia del 75% del tiempo de todas las cuencas.**

La curva que se presenta nos indica que es una cuenca madura, intermedia o en equilibrio con un gran potencial erosivo y se encuentra en una fase de madurez.



**Figura 14. Caudal promedio mensual de datos observados y simulados de la cuenca Río Suches.**

Se observa que existe una probabilidad del 75% de alcanzar un volumen de 18.72 m<sup>3</sup>/s en simulados y 19.49 m<sup>3</sup>/s en observados, la misma tienen posibilidad (ocurrencia) de generarse durante el periodo de análisis. Por encima del 75% se alcanzará volúmenes mayores a 18.72 m<sup>3</sup>/s y por debajo de 75% se presentarán volúmenes menores a 18.72 m<sup>3</sup>/s.

Estos resultados coinciden con los obtenidos en el balance hídrico de Bolivia donde los meses de mayor precipitación reportan caudales de 28.7 m<sup>3</sup>/s y 32.3 m<sup>3</sup>/s (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2019).

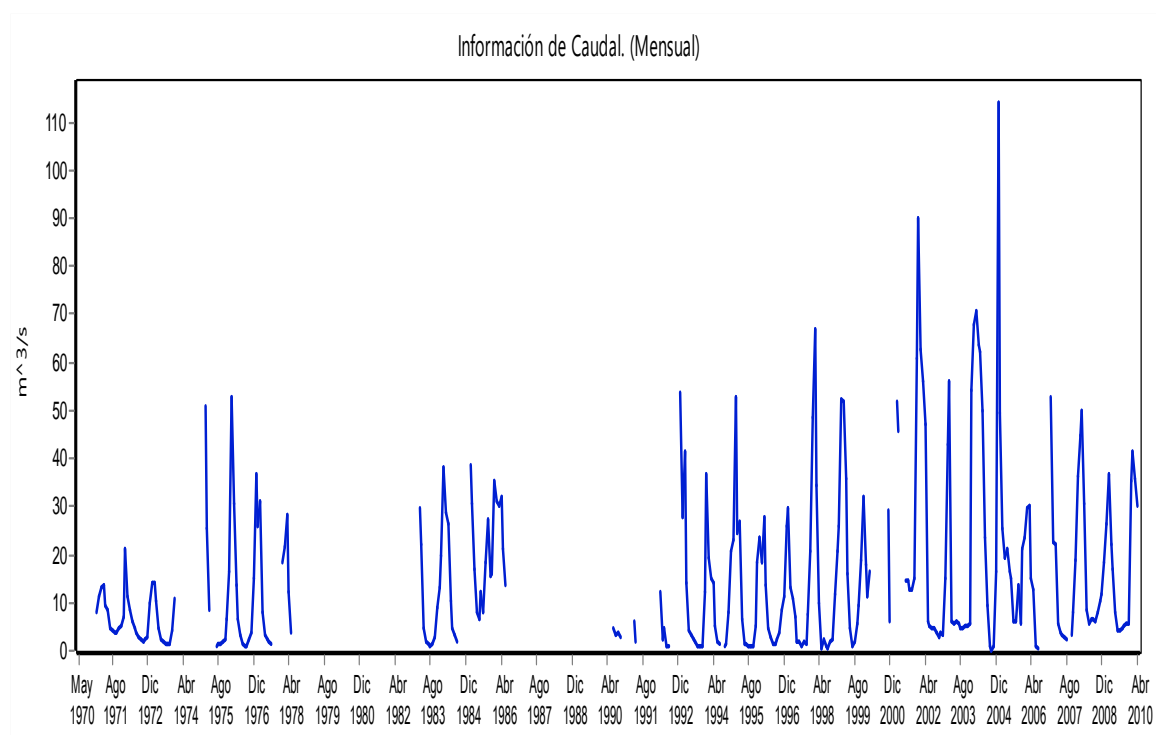
### 5.6. Análisis de datos Hidrometeorológicos.

Por la falta de series históricas se utilizó como herramienta principal para la meteorología de la cuenca Suches, datos de ESSA Environmental Science Services Administration = Administración de servicios científicos del medio ambiente.

Los datos hidrológicos fueron los emitidos por la unidad de Hidrología del SENAMHI Bolivia.



### 5.6.1. Datos hidrológicos



**Figura 15. Caudales registrados (1970 a 2010) por la unidad de hidrología del SENAMHI-Bolivia**

La información general se puede observar en la **Figura 15**, donde se puede apreciar los datos faltantes y eventos extremos que provocan incremento en la cantidad de los caudales registrados por la unidad hidrológica.

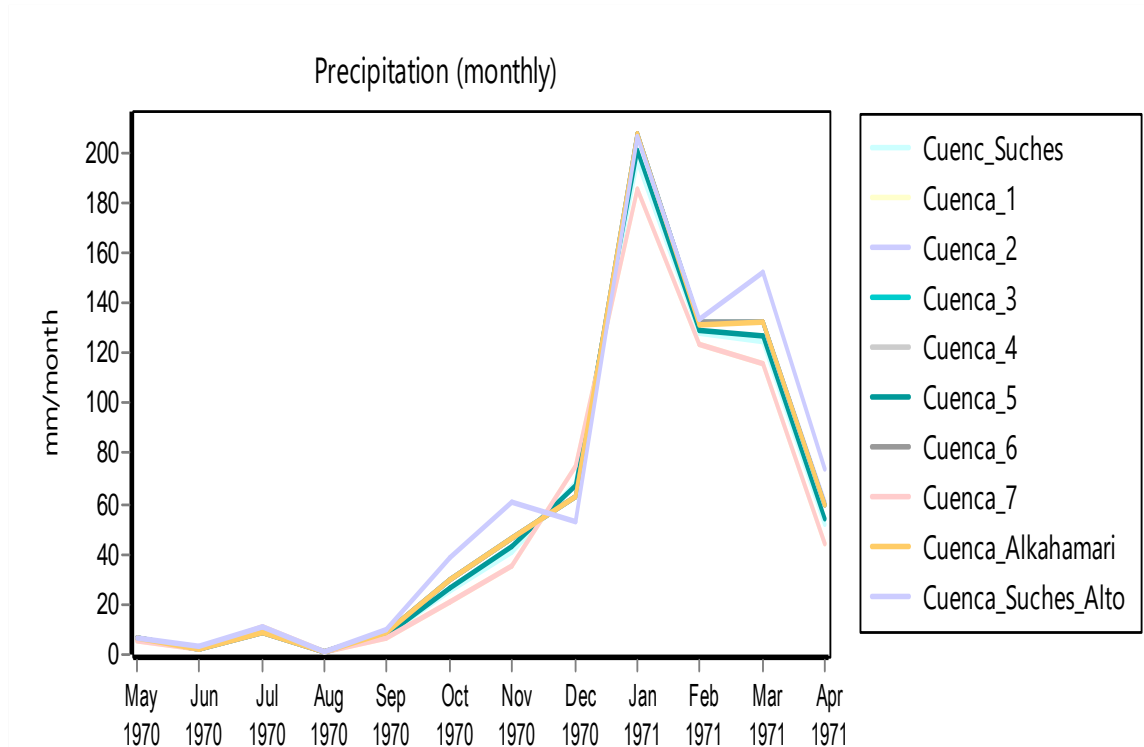
### 5.6.2. Precipitación

La precipitación pluvial tiene una variación espacial según la altitud sobre el nivel del mar, y en el tiempo, para el presente estudio se cuentan con 2 estaciones ubicadas dentro del área de estudio y seleccionadas de acuerdo con la altura y relieve que presentan. Se generó en base a estas la precipitación para cada subcuenca.

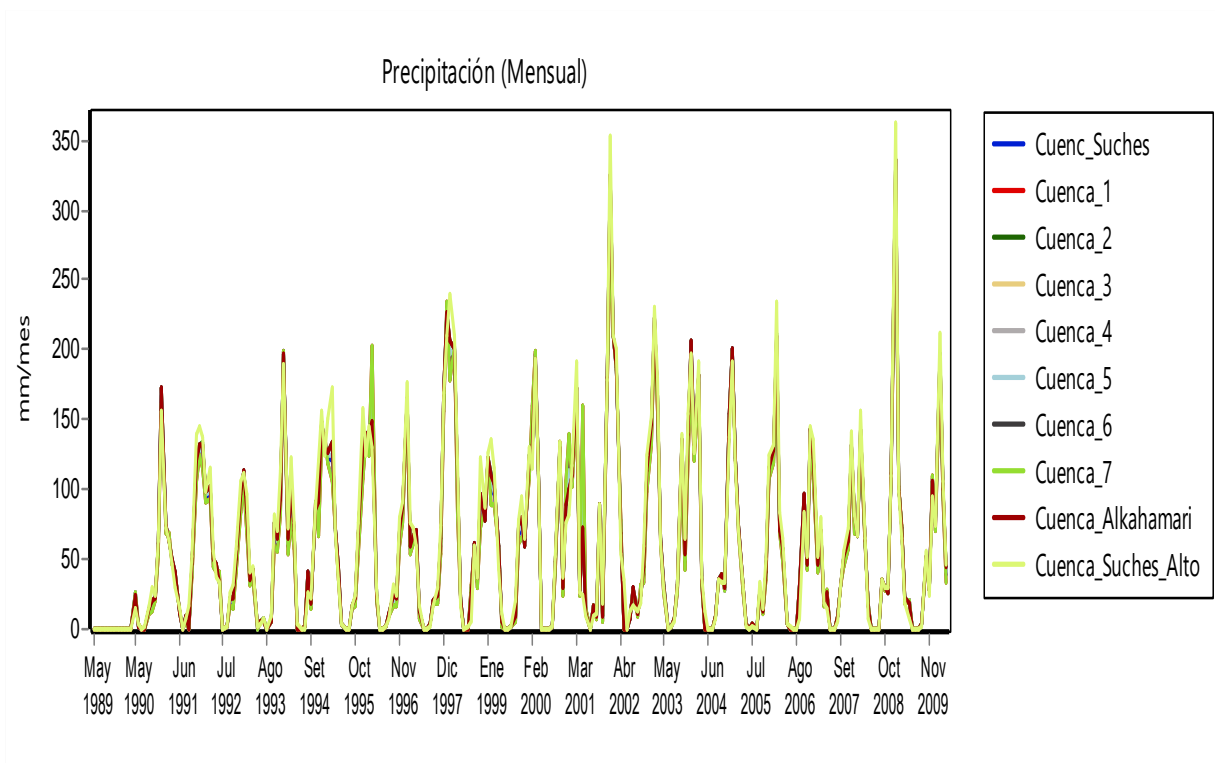
| Precipitation (monthly) (mm/month) | May-70 | Jun-70 | Jul-70 | Aug-70 | Sep-70 | Oct-70 | Nov-70 | Dec-70 | Jan-71 | Feb-71 | Mar-71 | Apr-71 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cuenc_Suches                       | 6.345  | 2.687  | 10.26  | 1.408  | 7.466  | 25.4   | 41.12  | 68.69  | 196.8  | 128.1  | 124.3  | 52.08  |
| Cuenca_1                           | 6.062  | 2.661  | 11.39  | 1.365  | 6.596  | 20.77  | 35.66  | 75.16  | 185.5  | 124.1  | 115.7  | 43.72  |
| Cuenca_2                           | 6.607  | 2.67   | 9.041  | 1.445  | 8.309  | 29.85  | 46.32  | 62.39  | 207.9  | 132    | 132.6  | 60.18  |
| Cuenca_3                           | 6.588  | 2.638  | 8.983  | 1.441  | 8.281  | 29.68  | 46.07  | 62.57  | 207.6  | 131.9  | 132.2  | 59.9   |
| Cuenca_4                           | 6.588  | 2.638  | 8.983  | 1.441  | 8.281  | 29.68  | 46.07  | 62.57  | 207.6  | 131.9  | 132.2  | 59.9   |
| <b>Cuenca_5</b>                    | 6.413  | 2.646  | 9.785  | 1.416  | 7.72   | 26.71  | 42.6   | 66.76  | 200.3  | 129.3  | 126.7  | 54.51  |
| Cuenca_6                           | 6.588  | 2.638  | 8.983  | 1.441  | 8.281  | 29.68  | 46.07  | 62.57  | 207.6  | 131.9  | 132.2  | 59.9   |
| Cuenca_7                           | 6.062  | 2.661  | 11.39  | 1.365  | 6.596  | 20.77  | 35.66  | 75.16  | 185.5  | 124.1  | 115.7  | 43.72  |
| Cuenca_Alkahamari                  | 6.586  | 2.638  | 8.992  | 1.441  | 8.275  | 29.64  | 46.03  | 62.61  | 207.6  | 131.8  | 132.2  | 59.84  |
| <b>Cuenca_Suches_Alto</b>          | 6.153  | 3.769  | 10.85  | 1.179  | 10     | 38.42  | 60.82  | 53.01  | 206.2  | 134    | 152.6  | 73.69  |

**Cuadro 9. Variación de la Precipitación por Estaciones Registros Año base (1970 – 1971) del Rio Suches.**

Para la verificación de la correlación media alta de 78% de los datos de la estación ESSA y los de las estaciones de Cojata y Escoma. Que indican que las base de datos puede ser utilizada como datos de entrada.



**Figura 16. Precipitación Mensual por subcuenca año base de la cuenca Rio Suches Año base (1970 – 1971).**



**Figura 17. Precipitación Mensual por subcuenca de la cuenca Rio Suches (1989 – 2009).**

La ventaja al utilizar estos sistemas son: una mejor descripción espacial de la distribución de la lluvia, al tener en cada celda un valor de precipitación, el cálculo del volumen de lluvias se hace de manera sencilla a partir de la lámina de precipitación sobre un área conocida equivalente al tamaño de la retícula y por lo tanto el cálculo del volumen de precipitación.

### 5.6.3. Temperatura

Debido a las diferencias de altitud, exposición a los vientos y al sol e influencia del lago Titicaca, existen algunas variaciones en la distribución de la temperatura media del aire en la cuenca. En toda la región las temperaturas medias más bajas se producen en el mes de Julio, mientras que las más elevadas se registran en los meses de noviembre a marzo, por lo general centradas en enero.

| <b>Temperatura<br/>(Centígrados)</b> | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Set  | Oct  | Nov  | Dic   | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Cuenc_Suches                         | 7.53 | 6.09 | 6.30 | 7.05 | 8.22 | 9.45 | 9.62 | 9.81  | 9.35 | 9.59 | 9.46 | 9.28 |
| Cuenca_1                             | 7.80 | 6.24 | 6.44 | 7.16 | 8.52 | 9.73 | 9.92 | 10.19 | 9.80 | 9.98 | 9.87 | 9.65 |
| Cuenca_2                             | 7.34 | 6.01 | 6.25 | 7.02 | 8.00 | 9.26 | 9.40 | 9.51  | 8.99 | 9.29 | 9.14 | 8.99 |
| Cuenca_3                             | 7.40 | 6.07 | 6.31 | 7.08 | 8.06 | 9.32 | 9.46 | 9.58  | 9.06 | 9.36 | 9.21 | 9.06 |
| Cuenca_4                             | 7.40 | 6.07 | 6.31 | 7.08 | 8.06 | 9.32 | 9.46 | 9.58  | 9.06 | 9.36 | 9.21 | 9.06 |
| Cuenca_5                             | 7.54 | 6.13 | 6.35 | 7.10 | 8.21 | 9.46 | 9.62 | 9.78  | 9.30 | 9.56 | 9.43 | 9.26 |
| Cuenca_6                             | 7.40 | 6.07 | 6.31 | 7.08 | 8.06 | 9.32 | 9.46 | 9.58  | 9.06 | 9.36 | 9.21 | 9.06 |
| Cuenca_7                             | 7.80 | 6.24 | 6.44 | 7.16 | 8.52 | 9.73 | 9.92 | 10.19 | 9.80 | 9.98 | 9.87 | 9.65 |
| Cuenca_Alkahamari                    | 7.41 | 6.07 | 6.31 | 7.08 | 8.07 | 9.32 | 9.46 | 9.58  | 9.06 | 9.36 | 9.21 | 9.06 |
| Cuenca_Suches_Alto                   | 4.58 | 3.27 | 3.29 | 4.30 | 5.17 | 6.51 | 6.38 | 6.47  | 5.88 | 6.11 | 6.02 | 5.96 |

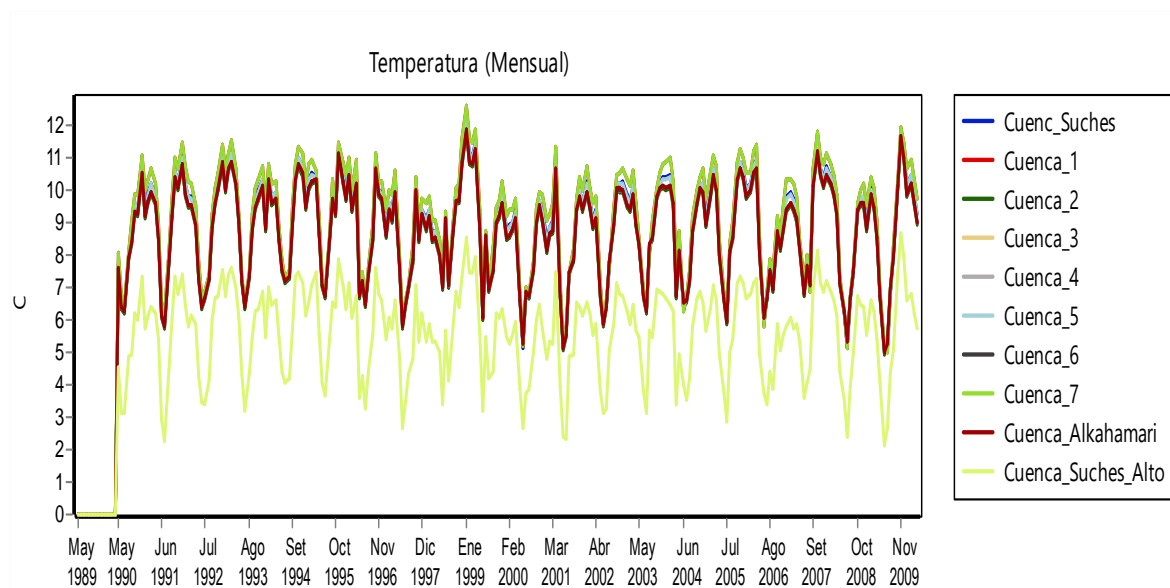
**Cuadro 10. Variación de la temperatura promedio mensual por subcuenca del Río Suches, año base 1990.**

Debido a la carencia de estadísticas de temperatura media en algunas estaciones han sido estimados por ESSA

| <b>Municipio</b> | <b>Población 1990</b> |
|------------------|-----------------------|
| Ananea           | 3936                  |
| Charazani        | 927                   |
| Cojata           | 2196                  |
| Curva            | 212                   |
| Escoma           | 2324                  |
| Humanata         | 3110                  |
| Mocomoco         | 1520                  |
| Mocomoco bajo    | 1013                  |
| Pelechuco        | 1316                  |
| Pto. Acosta      | 2556                  |
| Quilcapuncu      | 175                   |

**Cuadro 7. Población de demanda de agua en las comunidades de la Cuenca Río Suches y Escoma, Bolivia, 2016.**

Los valores de temperatura media de las estaciones resaltadas en color canela han sido estimados mediante un análisis de regresión lineal de los datos de las estaciones con registros existentes, relacionándolo con la altitud de ubicación de cada estación respectiva.



**Figura 18. Temperatura mensual por subcuencas de la cuenca Rio Suches periodo 1990 a 2010.**

Los cinco años récord de altas temperaturas se registraron los años 1999, 2009 y 2007 y tres con récords de bajas temperaturas (2009 y 1991).

### 5.7. Calibración

Para el Rio Suches, el índice de Nash Sutcliffe resultó en 0.42 y el índice de Bias en  $-49.06\%$ . Éste último demuestra una subestimación moderada de los caudales simulados, ya que los datos históricos no presentan registros de los caudales en algunos periodos se trabajos con los que disponía de tiempo (**Figura 19**).

$$PBIAS = 0.058$$

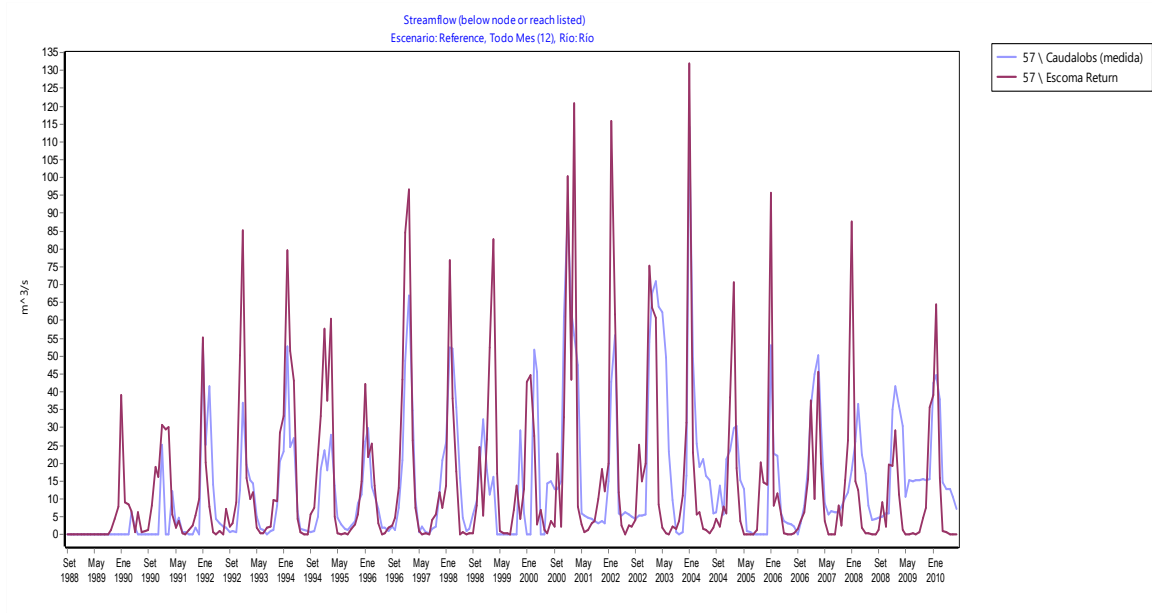
Este valor indica que el modelo sobreestima los valores en un 0.058, mientras más cerca a cero se encuentre este valor el modelo es aplicable.

$$NSE = 0.791$$

Este índice mientras mas se acerca a 1, indica que el modelo es mas certero y aplicable, son considerados validos desde un valor de 0.5, si en la región no hay datos meteorológicos o de caudales en la calibración.

$$R2 = 0.466$$

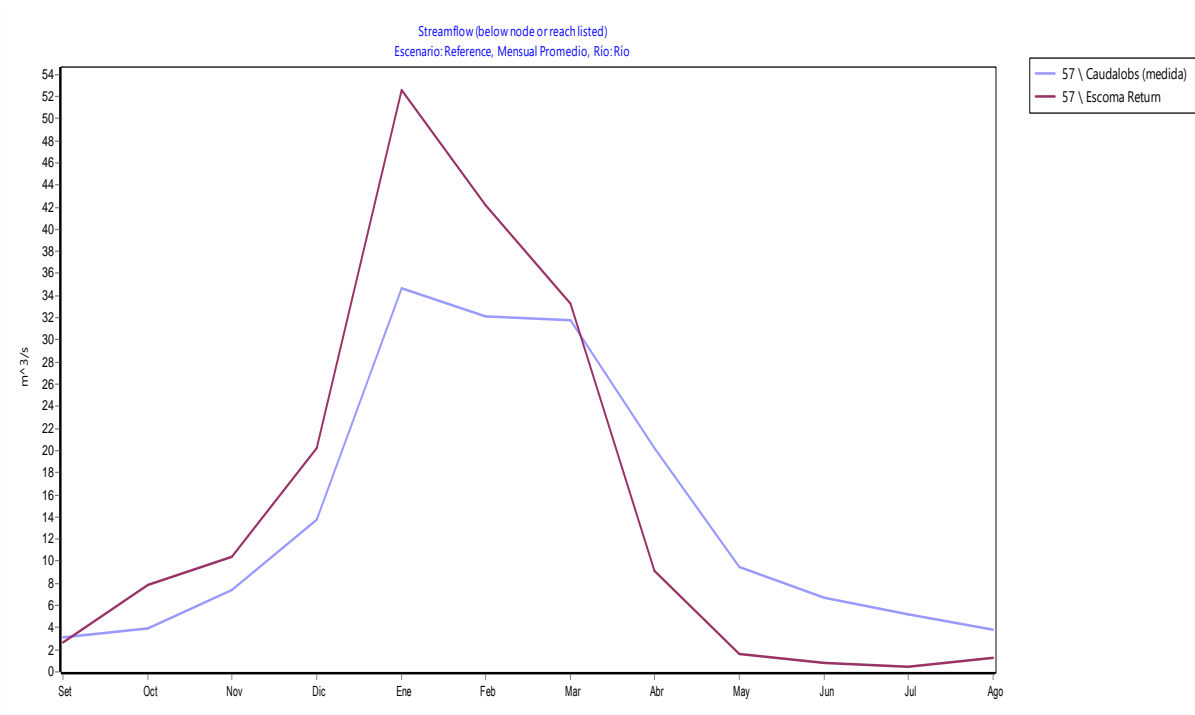
Existe una relación baja en la distribución temporal del caudal observado y simulado.



**Figura 19. Caudales observados y simulados del periodo 1990 a 2010, la cuenca del Rio Suches.**

Los promedios mensual de los caudales son: 15.31 m<sup>3</sup>/s del caudal observado (medido) y 15.19 m<sup>3</sup>/s del caudal simulado. Existe un 99% de similitud a los caudales observados.

Esto signific que los escenarios ya pueden altamente probables de ocurrencia.

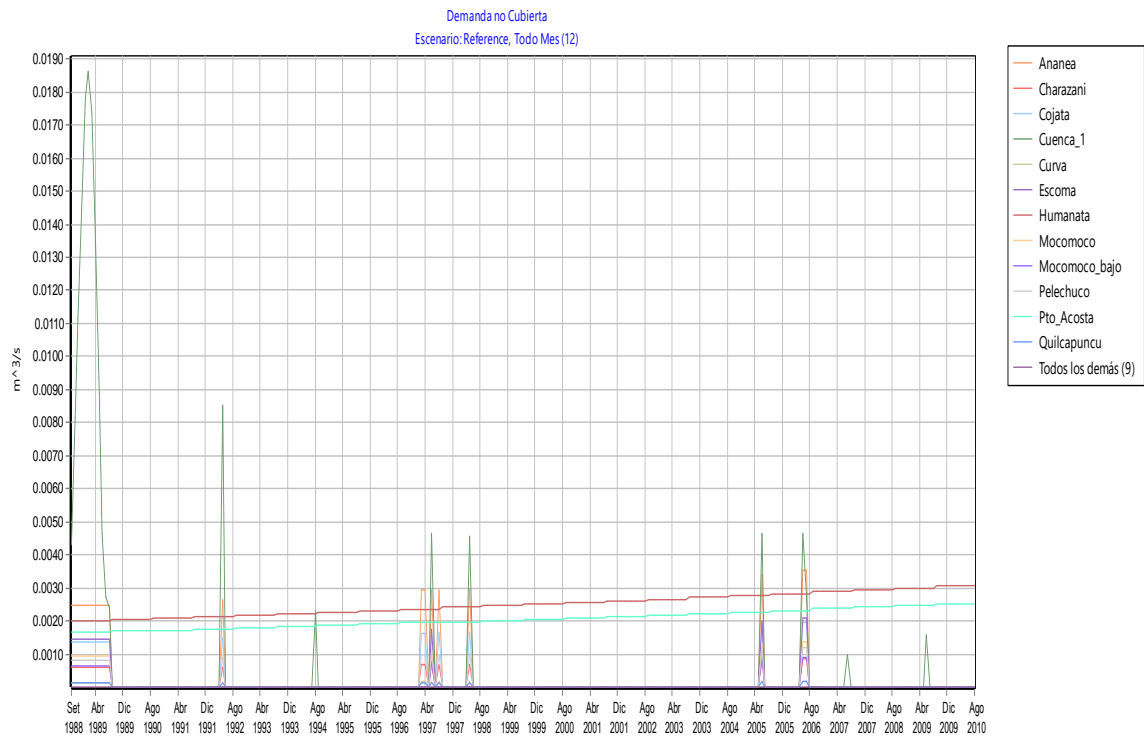


**Figura 20. Caudales observados y simulados de la cuenca del Rio Suches.**

### 5.8. Demanda de agua

El mayor demandante de agua histórica se registra, para las subcuencas del Rio Suches, en el municipio de Humanata, con 0.0025 m<sup>3</sup>/s promedio por mes y Puerto Acosta 0.00205 m<sup>3</sup>/s; sin embargo, se prevé el incremento de uso de agua en a largo plazo para consumo doméstico sin que se incremente el caudal.

La cuenca de escoma con requerimiento de riego de 0.00063 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 21. Demanda no cubierta en la cuenca Rio Suches.**

De lo anterior se infiere que existe una relación estrecha entre el número de usuarios y la demanda. Por otro lado, los municipios de Curva y Quillacapuncu es el sector que menos demanda agua promedio, ocupando solamente 36.58 m<sup>3</sup>/mes y 30.13 m<sup>3</sup>/mes respectivamente. En comparación con el año 2010 la demanda para uso doméstico en este sitio (**Figura 21**).

## 5.9. Escenarios

### 5.9.1. Planteamiento de escenarios A y B

Se presentan los comportamientos de abastecimiento y demandas de agua en los diez afluentes de la Cuenca Rio Suches durante los escenarios de los años 2030 y 2050. Los valores están expresados en promedios mensuales y anuales.

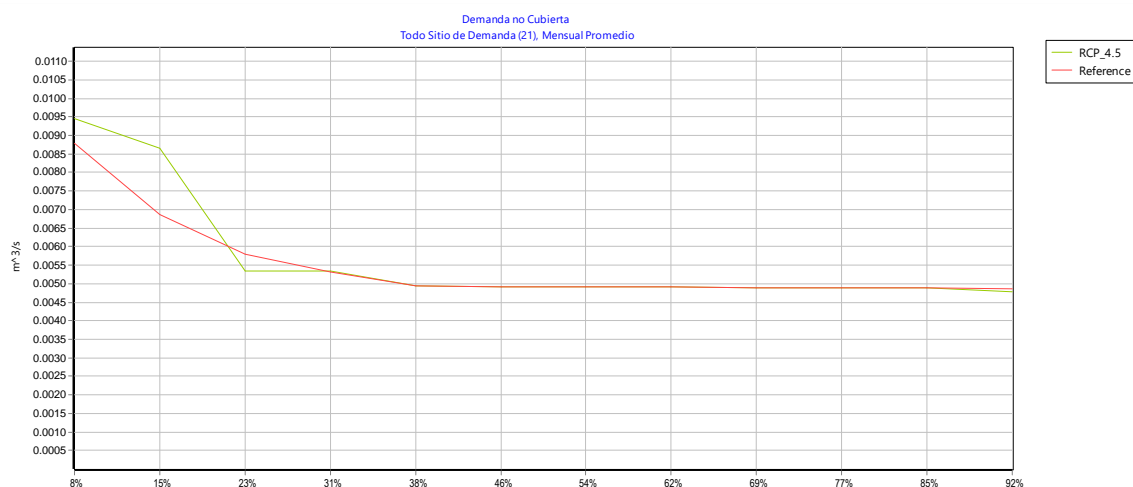
Los escenarios conservadores indican una disminución anual de 18 a 52 mm (2.2 %) de la precipitación (GDFL\_CM3 RCP 4.5) un aumento en temperatura media anual entre 1.55 a 1.67 °C (15.3 %) en 79 % del área para el 2030-2050 (MCG CRNMCM5 RCP 4.5).



Los escenarios extremos predicen una disminución en precipitación anual de 47 a 76 mm (3.1 %) en 91.8 % del ANP (CRNMCM5 RCP 8.5), y un incremento entre 2.07 a 2.18 °C (20 %) en temperatura media anual en 66.8 % para 2030-2050 (CRNMCM5 RCP 8.5).

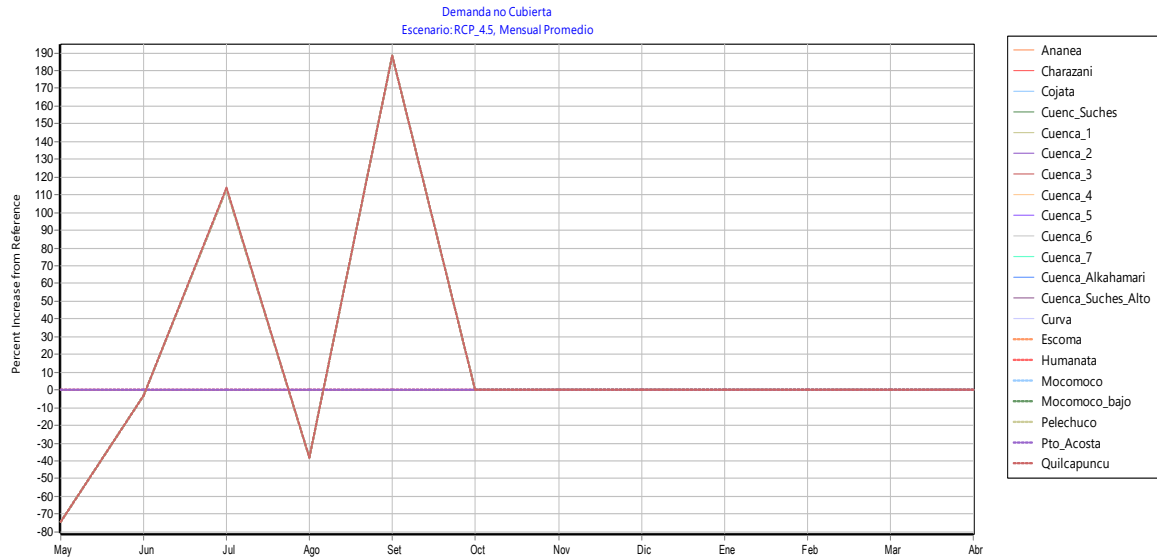
### Escenario A.

Como se explicó anteriormente, en este escenario se asumió que los caudales se mantienen constantes durante los años de evaluación. La cuenca del Rio Suches es una de las principales aportantes al Lago Titicaca, razón importante para tomar en cuenta que la precipitación tiene una relación directa con la escorrentía y que la temperatura influye de gran manera en la evaporación, entonces este escenario posiblemente tenga una menor cantidad de oferta de agua en comparación con el escenario original.



**Figura 22. Demanda de suministro en la cuenca Rio Suches comparación RCP 4.5 con el de referencia.**

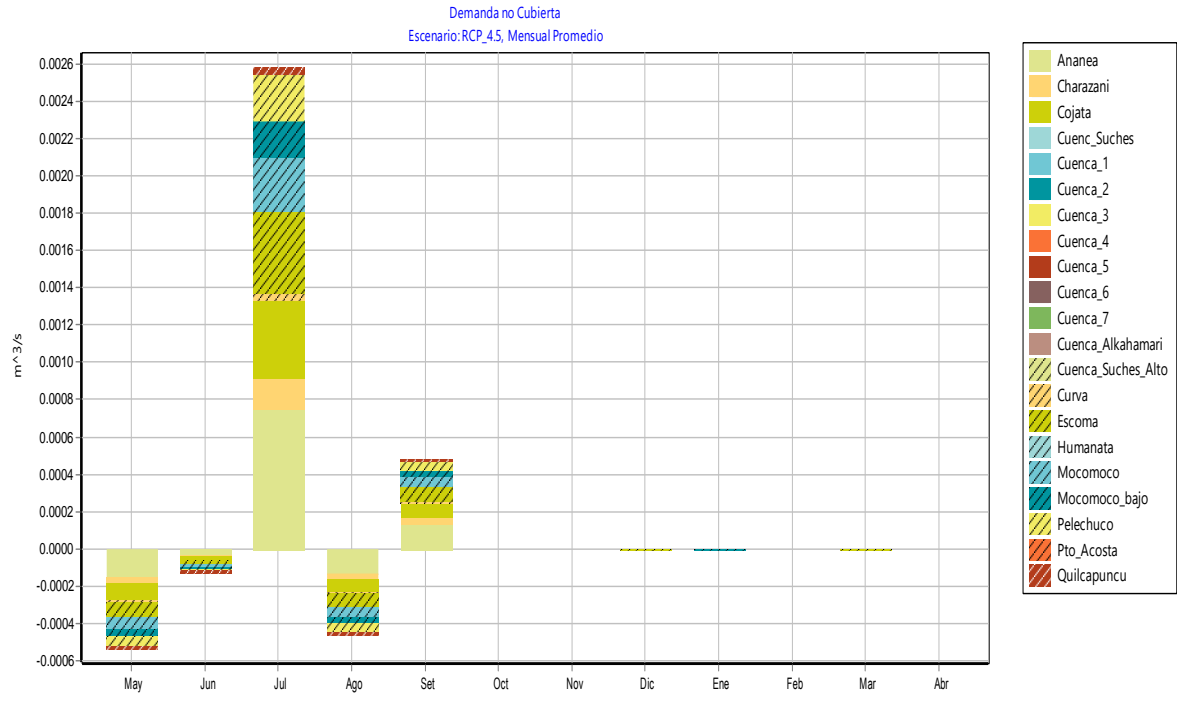
El RCP 4.5, muestra la mayor necesidad de agua en un 15 % a 28 % que el escenario de referencia.



**Figura 23. Requerimiento de suministro en la cuenca Rio Suches de incremento porcentual con relación a la referencia.**

La figura muestra el requerimiento de agua en los casos del escenario original o de referencia y el escenario RCP 4.5, podemos apreciar que el distrito de Ananea, incrementa su requerimiento, en los meses de julio y septiembre.

El comportamiento del caudal promedio mensual para las diez unidades hidrográficas es muy variable durante el año.

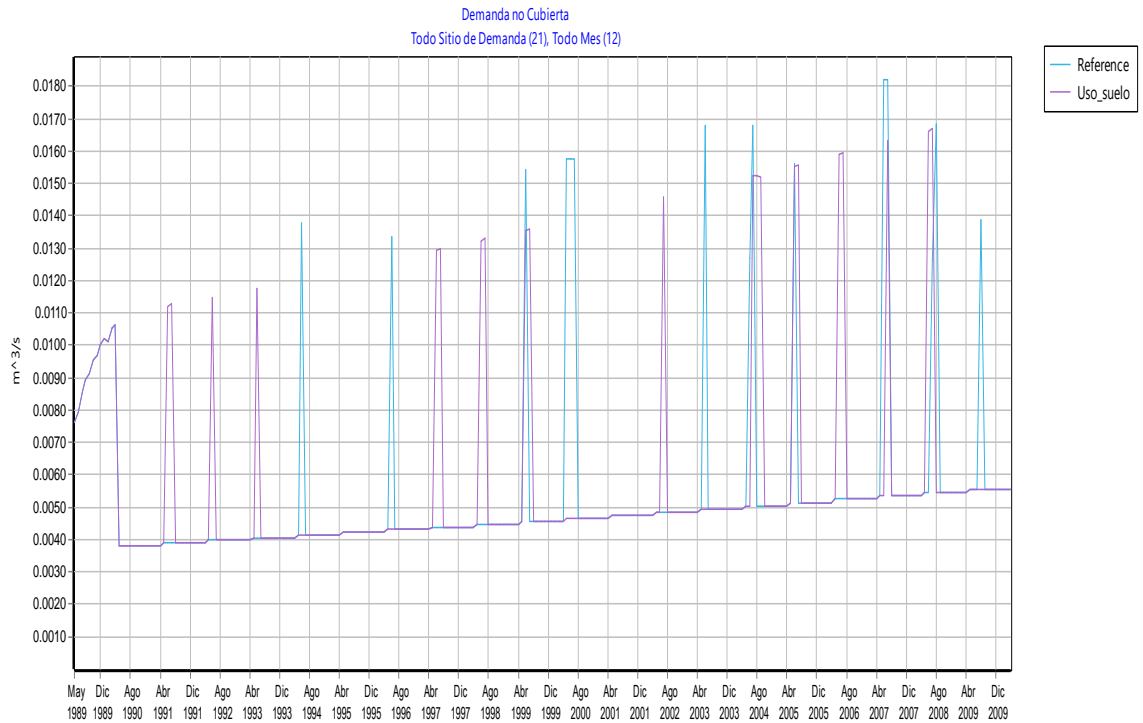


**Figura 24. Demanda no cubierta RCP 4.5, en comparación a la referencia.**

Se presentan niveles máximos variables durante los meses de mayo a septiembre. Se presenta una demanda en los meses de julio y septiembre. Existe una disminución de los caudales de requerimiento de agua para los meses de mayo junio y agosto.

### 5.9.2. Planteamiento de escenario C

Cambio de uso de suelos, está dado por la necesidad agrícola, cambiando el área de pastos a agricultura.



**Figura 25. Demanda no Cubierta en el escenario de cambio de uso de suelo y la referencia.**

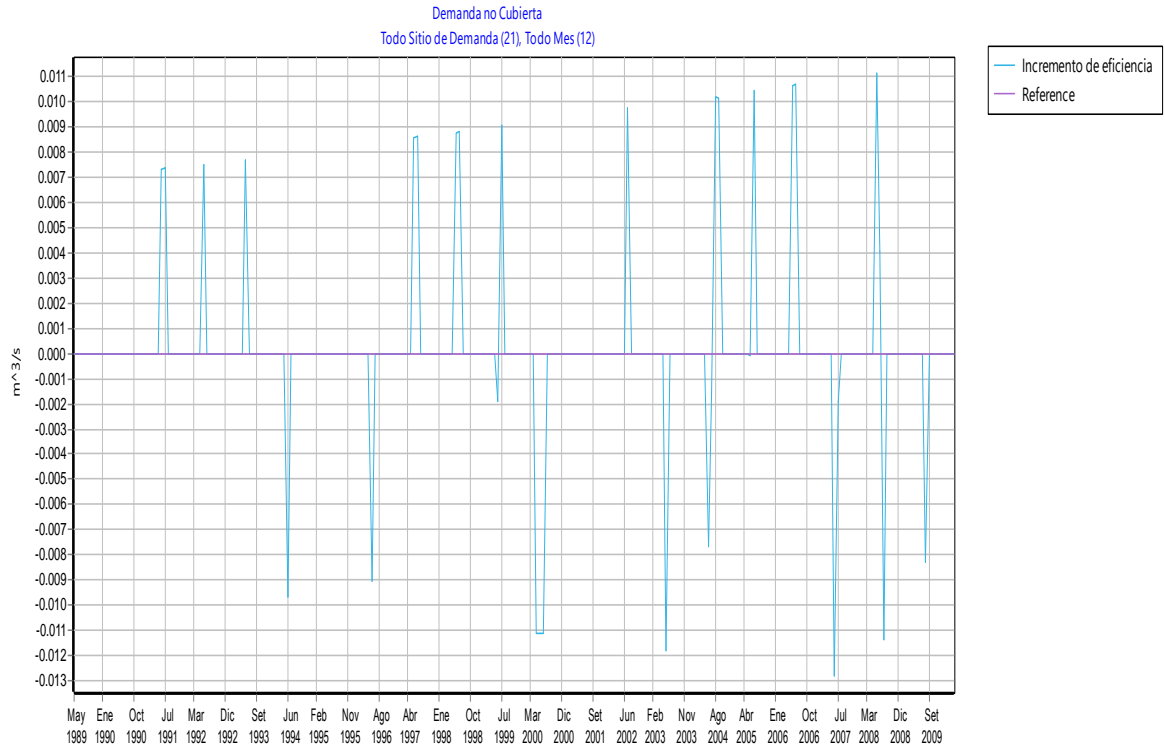
Se puede apreciar en la **Figura 25**, que se incrementa la necesidad de agua para los diferentes años, en relación con la referencia de año base. Si se incrementara la frontera agrícola podría incrementar también la necesidad de agua.

### 5.9.3. Planteamiento de escenario D, reducción de pérdidas

Reducción de las pérdidas en los sistemas para una mejor gestión de agua

#### Volúmenes de riego

Máximo volumen del caudal a tomar del río Suches 800 lt/s (0.80  $m^3/s$ ), el índice de pérdidas (obra de toma, aducción, almacenamiento y aplicación) es de 80%. Además, considerar al sistema de riego como prioridad 2 de la demanda y el río Suches también tiene la prioridad 1 de suministro al sistema de riego.



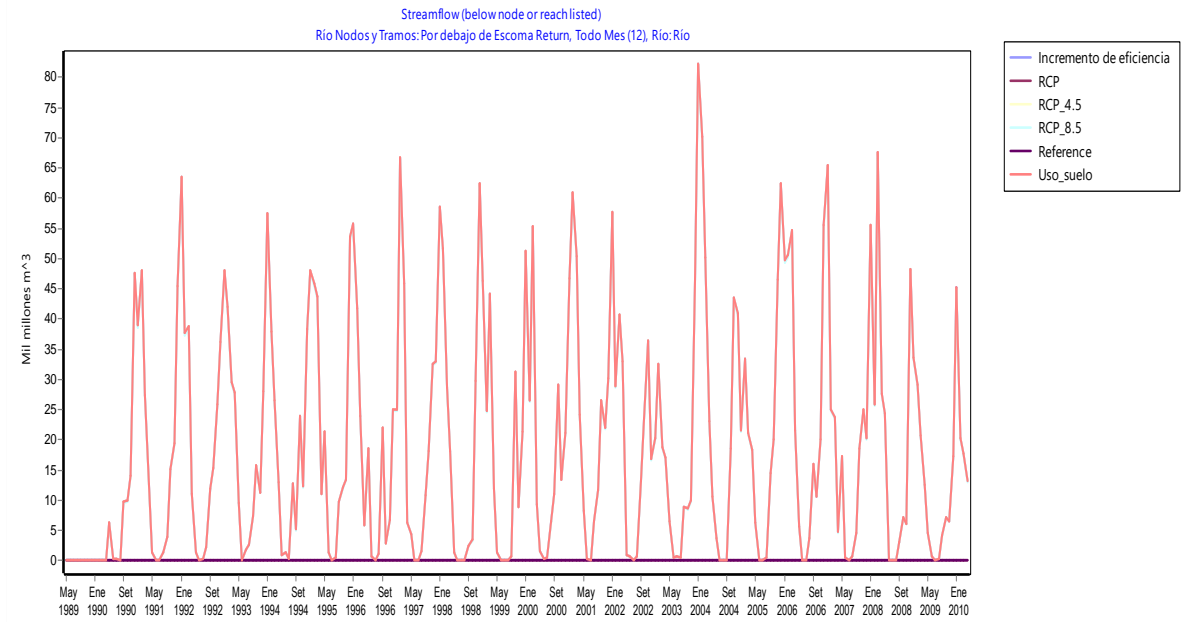
**Figura 26. Demanda no Cubierta en el escenario de reducción de pérdidas y la referencia.**

En la **Figura 26**, se puede apreciar como la eficiencia hace que paulatinamente se vaya disminuyendo en el tiempo las necesidades o demandas de agua.

#### **5.9.4. Comparación de los escenarios**

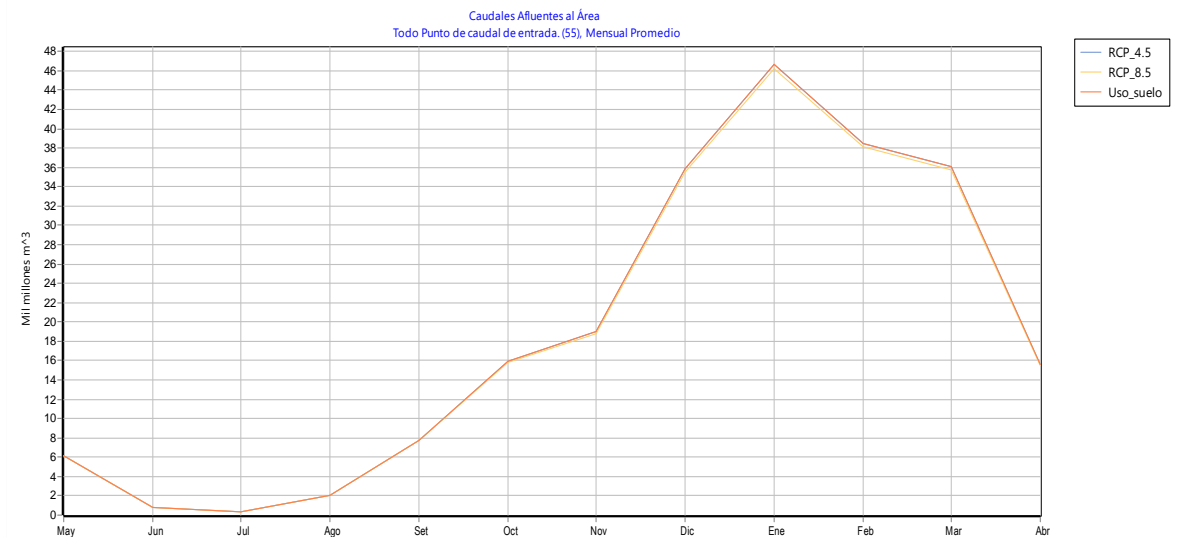
Si comparamos los escenarios planteados podemos observar que el que mayor influencia es el cambio de uso de suelo.

Si bien los RCP 4.5 y 8.5 son los mas probables en ocurrir con respecto al incremento de la temperatura y disminución en la precipitación , la forma de manejo es la que mayor impacto tiene en los volúmenes de la cuenca, afectando también la demanda en los diferentes nodos de las poblaciones.



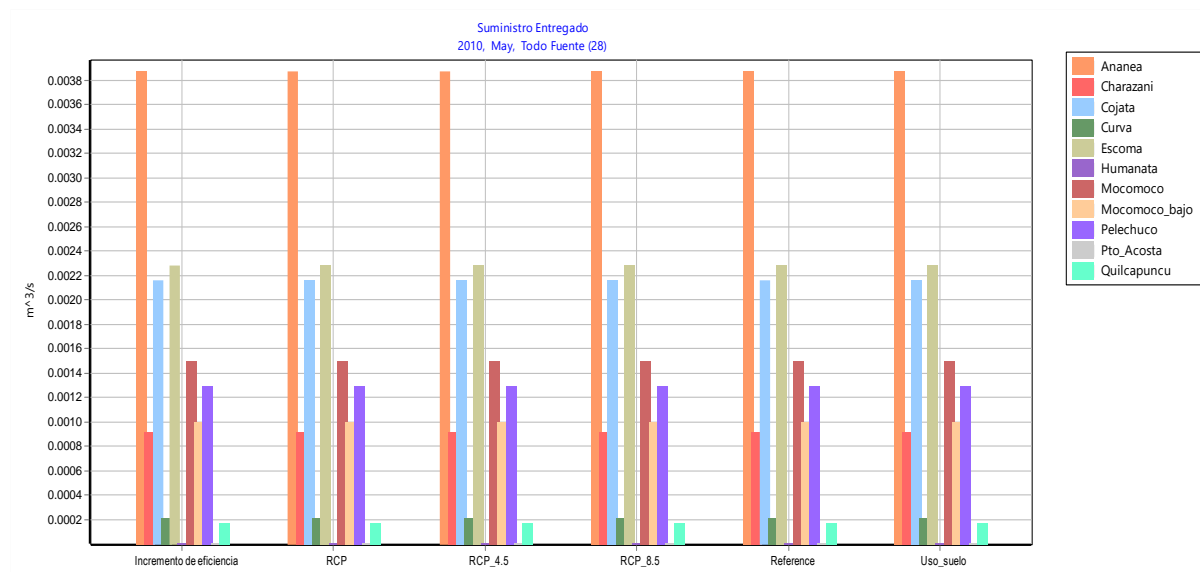
**Figura 27. Comparación de escenarios (1990– 2010) del Rio Suches.**

El afluente Rio Suches aporta en promedio 18709130266 m<sup>3</sup>/s mensuales con el escenario de RCP 4.5; 18536960355 m<sup>3</sup>/s mensuales, con el escenario de RCP 8.5 y 18709130266 m<sup>3</sup>/s mensuales con el escenario de cambio de uso de suelo



**Figura 28. Caudales observados y simulados en promedio mensual cuenca Rio Suches.**

Con caudales picos en el mes de enero ( $46.19 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mínimos en el mes de junio y julio ( $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

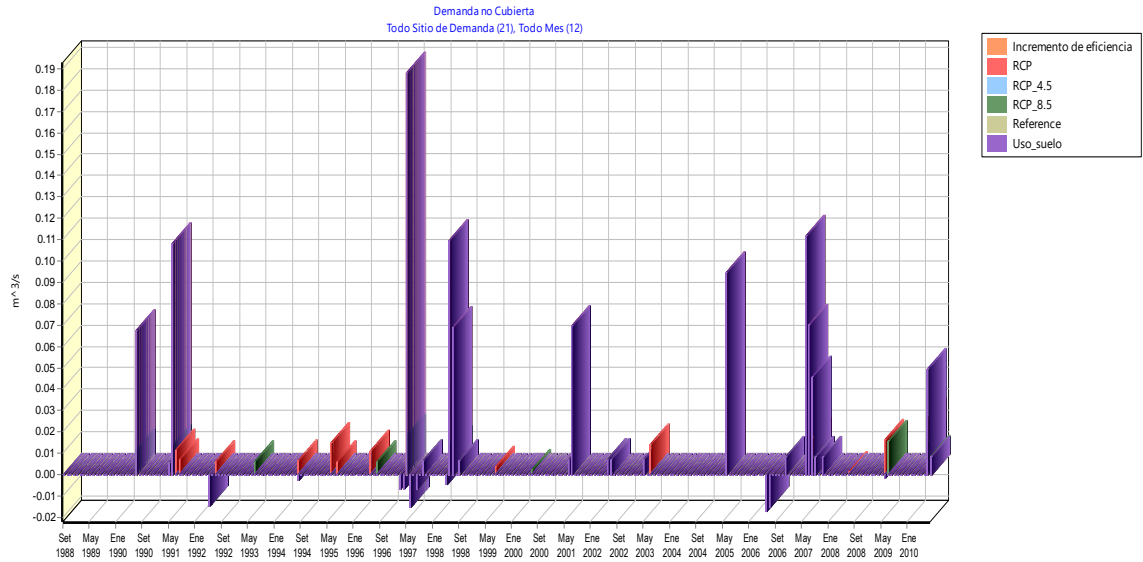


**Figura 29. Comparación de escenarios de Cambio climático cuenca Rio Suches.**

Comparado con la precipitación promedio mensual de Bolivia para al año 2010, existe una relación directa con el patrón de distribución del caudal mensual en la Cuenca (INE, 2015).

En todos los escenarios, el suministro entregado para el distrito de Ananea esta cubierto, al igual que Cojata y el Municipio de Charazani.

Existe un déficit de suministro en los municipios de Puerto Acosta y Pelechuco, y la influencia de los diferentes escenarios no es muy diferenciada.



**Figura 30. Comparación de la proporción de escenarios de Cambio climático cuenca Rio Suches.**

Comparado con todos los escenarios entre si varían de entre 11% a 15 % entre todos los escenarios propuestos.

El escenario que tiene mas demanda insatisfecha de agua, se da donde se realizo el cambio de uso de suelo, con esto se puede indicar que las decisiones de las poblaciones, gobiernos u otro ente con respecto al uso de suelos puede causar gran demanda de agua.



## 6. CONCLUSIONES

- De la gestión hídrica de la cuenca del río Suches donde se puede decir que tiene un aporte de 15.31 m<sup>3</sup>/s de agua de toda la cuenca observada y 15.19 m<sup>3</sup>/s simulados, en promedio por mes.
- Se caracterizó las unidades hidrológicas de la cuenca del río Suches, en relación con las características demográficas, áreas, usos de suelo, hidroclimatología.
- Los eventos atípicos de precipitación y la creciente demanda de agua, uso doméstico y los cambios en el uso de suelo en la Cuenca provocarían una disminución del caudal lo que resultaría en demandas no cubiertas durante períodos secos a partir del año 2024. Hasta el momento, no se observan prácticas que conlleven al uso eficiente del agua, siendo urgente la ejecución de proyectos de manejo y gestión encaminados al uso racional de este recurso y el cuidado de la calidad de esta, en esta modelación se estimó los caudales aportados, que en su mayor parte son de aguas contaminadas con metales pesados.
- La aplicación del modelo hidrológico WEAP reportó una sobreestimación de caudales en el Río Suches, pues se encontraron correspondencias entre los caudales simulados y observados. Aunque la base de caudales observados en los datos históricos fue obtenidos con datos faltantes, la representación del modelo es eficiente para simular escenarios futuros.
- La modelación de escenarios el cambio de uso de suelo causa mayor demanda de agua por la necesidad de riego las parcelas, que las demandas en uso doméstico.

## RECOMENDACIONES

- Contar con un sistema de monitoreo hídrico con la participación activa de las gobernaciones, municipios y comunidades, en la que se cuente con una red de monitoreo departamental y otra municipal e incluso comunal, la modelación tiene una alta probabilidad de ser replicada en cualquier cuenca, además que puede adicionar la temática de calidad de agua y su efecto en la población.
- Las gobernaciones y municipios puedan adquirir equipos hidrometeorológicos de monitoreo y en un futuro implementar también sus laboratorios de calidad de agua en vista que la mayor parte está afectada por la minería.
- Validar la aplicación del modelo hidrológico WEAP en la Cuenca del Rio Suches una vez se tenga los datos históricos y se conozcan las demandas futuras específicas de diferentes usuarios dentro y fuera de la Cuenca.
- Capacitar y brindar asistencia técnica a los habitantes de las Cuencas del Rio Suches sobre el uso eficiente del agua y prácticas de conservación y manejo de suelo para reducir las alteraciones en cantidad y calidad de agua en los tributarios de la Cuenca.
- Debido a la creciente presión y al incremento de extracciones se recomienda hacer estudios específicos sobre caudales ecológicos en los tributarios de la Cuenca que sirvan de modelo para regular extracciones en el corto plazo.
- Se debe buscar alternativas en la gestión de agua con un panorama más holístico y multidisciplinario que enlace las variables: alimento, agua, energía y ambiente, en la gestión de los recursos hídricos, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad.

## REFERENCES

- Adgolign, T. B., Rao, G. V. R. S., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 55–70.
- Agarwal, S., Patil, J. P., Goyal, V. C., & Singh, A. (2019). Assessment of Water Supply–Demand Using Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Ur River Watershed, Madhya Pradesh, India. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 100(1), 21–32.
- Ariza, C. (2016). The climate change, migration and economic development nexus in North Africa: An overview: Thematic input paper prepared for the Thematic Regional Meeting of the Swiss Agency for Development and Cooperation on ‘Climate Change, Disaster Risks, Migration and Economic Development, held in Agadir North Africa.
- Arranz, R., & McCartney, M. P. (2007). *Application of the water evaluation and planning (WEAP) model to assess future water demands and resources in the Olifants Catchment, South Africa*. Working paper / International Water Management Institute, 116. Colombo: International Water Management Institute.
- Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, & Autoridad Nacional del Agua. Autoridad Administrativa del Agua Titicaca. Administración Local de Agua Huancané (2010). *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Huancané y Suches: estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches*, 1.
- Ban, K.-m. (2012). *Agua para la Promoción y la Agua para la Promoción de la Comunicación en el marco del Decenio: Preguntas y respuestas acerca del Agua en Río+20*: Programa de ONU.
- Bieber, N., Ker, J. H., Wang, X., Triantafyllidis, C., van Dam, K. H., Koppelaar, R. H.E.M., & Shah, N. (2018). Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools. *Energy Policy*, 113, 584–607.

- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, J. M.A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S., & Imanari, Y. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389–397.
- Cai, X., Wallington, K., Shafiee, M. J., & Marston, L. (2018). Understanding and managing the food-energy-water nexus – opportunities for Water Resources Research. *Advances in water resources*, 111, 259–273.
- Calero, J. P. (2019). Nexo – Agua, Energía y Seguridad Alimentaria para Bolivia. *GIZ*.
- Caro Camargo, C. A. (2015). Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, & Stockholm Environment Institute (2009). *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP*. <http://www.weap21.org/>. Santiago, Boston.
- Colom, E., & Artiga, R. (2017). La situación de los recursos hídricos en Centro America: Hacia una gestion integrada.
- Escobar, M., Flores, F., & Clark, V. (2011). Planificación de Energía, Agua y Clima para el desarrollo sin Carbono en Latinoamérica y el Caribe. Stockholm Environment Institute-Centro E.E.U.U.
- Gobierno Autonomo Municipal de Escoma (2016). Plan de Desarrollo Municipal de Escoma.
- González, M., Embid, A., & Martín, L. (2017). El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe: Planificación, marco normativo e identificación de interconexiones prioritarias. *CEPAL*.
- Guillén, R., & Tabora, F. (2015). Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica Series title or type of document: Asociación Mundial para el Agua. *Global Water Partnership Central America*.

- Hadded, R., Nouri, I., Alshihabi, O., Maßmann, J., Huber, M., Laghouane, A., Yahiaoui, H., & Tarhouni, J. (2013). A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW Framework. *Water Resources Management*, 27(7), 1981–2000.
- Heng, L. K., Moutonnet, P., & Smith, M. (2002). *Deficit irrigation practices*. Water reports, 22. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hervis Granda, G., Geler Roffe, T. G. R., Díaz García, R., Amestoy, I., & Cretaz, E. (2018). El modelo WEAP: una herramienta para la planificación hidrológica en la adaptación al cambio climático. *Revista Ingeniería Agrícola.*, 8(3), 40–47.
- Holzworth, D. P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I. N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J. W., & Thorburn, P. (2015). Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. *Environmental Modelling & Software*, 72, 276–286.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya. ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Charazani.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya. ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Curva.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya. ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Puerto Acosta.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya (2012a). ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Escoma.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya (2012b). ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Humanata.
- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya (2012c). ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Mocomoco.

- Jacqueline Miriam Callisaya Callisaya (2012d). ficha Resumen Censo de Población y Vivienda 2012 Resultados: Pelechuco.
- Jame, Y. W., & Cutforth, H. W. (1996). Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76(1), 9–19.
- Laqui Vilca, W. F. (2010). Análisis de Sistemas Complejos de Recursos Hídricos con AcquaNet.
- Loucks, D. P. (2000). Sustainable Water Resources Management. *Water International*, 25(1), 3–10.
- Mena Pardo, D. I. (2009). Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del río Teno, usando el modelo WEAP: UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2016). Guia metodologica para la elaboracion de Balance hidrico superficial.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2019). Geovisor balance hidrico de Bolivia. <http://vibh.mmaya.gob.bo/vibh/database/geovisor?base=9>.
- Moioli, E., Salvati, F., Chiesa, M., Siecha, R. T., Manenti, F., Laio, F., & Rulli, M. C. (2018). Analysis of the current world biofuel production under a water-food-energy nexus perspective. *Advances in water resources*, 121, 22–31.
- Moreira Barradas, J. M., Abdelfattah, A., Matula, S., & Dolezal, F. (2015). Effect of Fertigation on Soil Salinization and Aggregate Stability. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(4), 5014010.
- Morillo, J. G. (2015). *Hacia el riego de precisión en el cultivo de fresa en el entorno de Doñana.: ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS Y MONTES DEPARTAMENTO AGRONOMÍA ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.*

- Navarro, C. E., Monserrate, F. A., Obando, D., Llanos, L., & Córdoba, J. M. (2018). Desarrollo de los Escenarios Climáticos de Honduras y Módulo Académico de Capacitación. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD); Dirección Nacional de Cambio Climático de MiAmbiente.
- Okungu, J., Josiah, A., & Fredrick, O. (2017). *Scenario Analysis of Water Supply and Demand using WEAP Model: A Case of Yala Catchment, Kenya*.
- Peña, H. (2018). Agua, producción de alimentos y energía. La experiencia del Nexo en Chile: CEPAL; Unidas, Naciones.
- Perez, A. (2011). *La Vía para el futuro de la humanidad*.
- Quispe, E. F. (2011). Nivel de impacto de la parte media de la cuenca del Rio Suches. <https://es.slideshare.net/elfer1411/impactos-en-la-cabecera-cuenca-suches>.
- Radioteca (2015). El río Suches, llora: Red Social de radios. <https://radioteca.net/audio/el-rio-suches-llora/>.
- Ramirez Villegas, J., & Challinor, A. (2012). Assessing relevant climate data for agricultural applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 161, 26–45.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378016300681>. Accessed 15.02.2019.

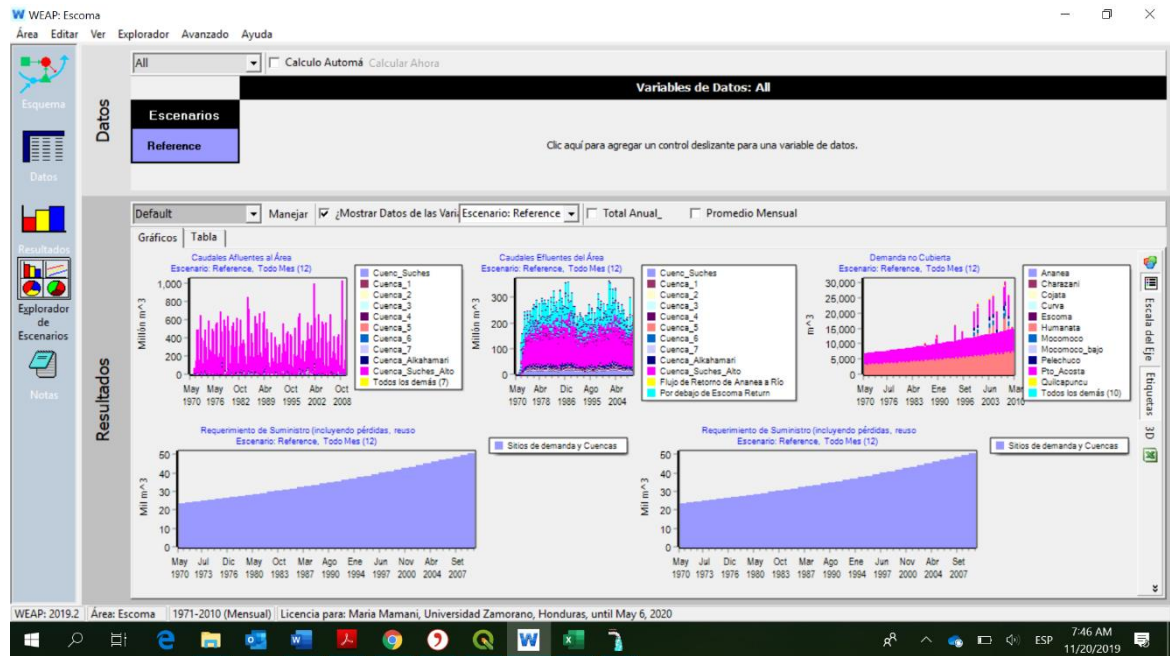
- Rodriguez, A. (2017). El Nexa agua, energía, alimentación En América Latina y el Caribe: El enfoque Nexa Agua – Energía – Alimentación, Nexa y la Agenda 2030 Diálogo Nexa. *Foro regional del agua Tegucigalpa*.
- Rozos, E. (2019). An assessment of the operational freeware management tools for multi-reservoir systems. *Water Supply*, 19(4), 995–1007.
- Salinas, A., & Paz, O. (2011). Aplicación del Modelo de Planificación Hídrica de Cuencas Weap al Proyecto: Aducción de Recursos Hídricos Mururata. *Revistas Bilibianas en línea*.
- Silva, T. D. d. (2015). *Integração dos modelos QUAL2K e WEAP para modelagem da qualidade da água em corpos de água receptores de efluentes de ETEs em áreas de adensamento urbano no Distrito Federal*.
- UCEP MI RIEGO. Balance hídrico integral (cantidad y calidad) de la cuenca del río Suches y elaboración del diagnóstico integral y formulación de la propuesta de lineamientos estratégicos e institucionales del plan director de la cuenca del río Suches.
- Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (2015). SISTEMA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RIO SUCHES” (PARTE BOLIVIA).
- Vieira, M. J., & van Wambeke, J. (2002). Planificación del uso de la tierra enfocada al suelo y el agua: la experiencia de la FAO en América Latina y el Caribe. XIV Reunião Brasileira de Manuseamento e Conservação de Solos e Água, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 21.
- Villalobos A, V. M., García, M., & Ávila, F. (Eds.) (2017). *El agua para la agricultura de las Américas*. Biblioteca Básica de Agricultura, #1. México: IICA; Colegio de Postgraduados; Fundación COLPOS.



Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21-A la demanda, de prioridades, y Preferencia-Driven Modelo de Planificación de agua: Parte 1: Características de modelos: Agua Internacionales: Vol 30, No 4 // WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02508060508691893?needAccess=true>. Accessed 09.02.2019.

# ANEXOS

## Anexo 1. Esquema del modelo hidrológico WEAP y Explorador de escenarios del modelo hidrológico WEAP.



Anexo 2. El Caudal de aforo (Para calibración)

| Fecha     | Caudal<br>m3/s |
|-----------|----------------|
| Abr 1990  | 6.20749992     |
| 1/5/1990  | 1.87800002     |
| Ene 1991  | 25.0600002     |
| Abr 1991  | 12.11425       |
| 1/5/1991  | 2.47999997     |
| 1/6/1991  | 4.73000002     |
| 1/7/1991  | 0.824          |
| Ago 1991  | 0.87099999     |
| 1/11/1991 | 1.96000004     |
| Ene 1992  | 53.5499992     |
| 1/2/1992  | 25.2222222     |
| 1/3/1992  | 41.4249997     |
| Abr 1992  | 14.0425001     |
| 1/5/1992  | 4.39000007     |
| 1/6/1992  | 3.12666667     |
| 1/7/1992  | 2.41499996     |
| Ago 1992  | 2.00433335     |
| Set 1992  | 0.86212501     |
| 1/10/1992 | 1.07379999     |
| 1/11/1992 | 0.711          |
| Dic 1992  | 12.4666664     |
| Ene 1993  | 36.933334      |
| 1/2/1993  | 19.4862503     |
| 1/3/1993  | 15.1875        |
| Abr 1993  | 14.3262501     |
| 1/5/1993  | 5.02888894     |
| 1/6/1993  | 1.74875        |
| 1/7/1993  | 1.21675        |
| Set 1993  | 0.89985712     |
| 1/10/1993 | 1.41066666     |
| 1/11/1993 | 8.02999994     |
| Dic 1993  | 20.5211112     |
| Ene 1994  | 23.288889      |
| 1/2/1994  | 52.7874999     |
| 1/3/1994  | 24.5624999     |

|           |            |
|-----------|------------|
| Abr 1994  | 27.0777779 |
| 1/5/1994  | 6.48888897 |
| 1/6/1994  | 1.59450001 |
| 1/7/1994  | 1.26644446 |
| Ago 1994  | 0.96366665 |
| Set 1994  | 0.79024999 |
| 1/10/1994 | 0.99244446 |
| 1/11/1994 | 5.1677778  |
| Dic 1994  | 18.2944445 |
| Ene 1995  | 23.6875    |
| 1/2/1995  | 18.1574998 |
| 1/3/1995  | 28.0375004 |
| Abr 1995  | 13.7700001 |
| 1/5/1995  | 4.76142859 |
| 1/6/1995  | 2.84250002 |
| 1/7/1995  | 1.51125002 |
| Ago 1995  | 1.22       |
| Set 1995  | 2.56499997 |
| 1/10/1995 | 3.88125005 |
| 1/11/1995 | 8.61124998 |
| Dic 1995  | 11.3300001 |
| Ene 1996  | 25.9571432 |
| 1/2/1996  | 29.8499999 |
| 1/3/1996  | 13.3087502 |
| Abr 1996  | 11.0374999 |
| 1/5/1996  | 7.13875011 |
| 1/6/1996  | 1.88250001 |
| 1/7/1996  | 1.84250002 |
| Ago 1996  | 1.14125    |
| Set 1996  | 2.11587501 |
| 1/10/1996 | 1.31900001 |
| 1/11/1996 | 7.47500002 |
| Dic 1996  | 20.8306246 |
| Ene 1997  | 48.575     |
| 1/2/1997  | 66.9336262 |
| 1/3/1997  | 34.6104284 |
| Abr 1997  | 10.0289999 |

|           |            |
|-----------|------------|
| 1/5/1997  | 0.69687499 |
| 1/6/1997  | 2.27550003 |
| 1/7/1997  | 0.785875   |
| Ago 1997  | 0.40800001 |
| Set 1997  | 1.736375   |
| 1/10/1997 | 2.36812501 |
| 1/11/1997 | 11.7351249 |
| Dic 1997  | 20.93275   |
| Ene 1998  | 25.8499997 |
| 1/2/1998  | 52.5437491 |
| 1/3/1998  | 52.0537496 |
| Abr 1998  | 35.8150001 |
| 1/5/1998  | 15.9782497 |
| 1/6/1998  | 4.65637505 |
| 1/7/1998  | 1.02795    |
| Ago 1998  | 1.69374999 |
| Set 1998  | 5.69687504 |
| 1/10/1998 | 9.45550007 |
| 1/11/1998 | 18.6300004 |
| Dic 1998  | 32.1675005 |
| Ene 1999  | 17.9550004 |
| 1/2/1999  | 11.13925   |
| 1/3/1999  | 16.3000002 |
| 1/11/1999 | 29.0508335 |
| Dic 1999  | 5.94924998 |
| 1/3/2000  | 51.715714  |
| Abr 2000  | 45.6457138 |
| 1/7/2000  | 14.4666669 |
| Ago 2000  | 14.84      |
| Set 2000  | 12.8479998 |
| 1/10/2000 | 12.875     |
| 1/11/2000 | 14.9725001 |
| Dic 2000  | 60.9949999 |
| Ene 2001  | 90.0124989 |
| 1/2/2001  | 62.4862867 |
| 1/3/2001  | 55.8733343 |
| Abr 2001  | 47.3550005 |

|           |            |
|-----------|------------|
| 1/5/2001  | 5.98062491 |
| 1/6/2001  | 5.40887499 |
| 1/7/2001  | 4.64875013 |
| Ago 2001  | 4.51928582 |
| Set 2001  | 3.84514284 |
| 1/10/2001 | 3.05374998 |
| 1/11/2001 | 3.74399999 |
| Dic 2001  | 3.09687495 |
| Ene 2002  | 14.8887501 |
| 1/2/2002  | 42.6857142 |
| 1/3/2002  | 55.855999  |
| Abr 2002  | 5.94814287 |
| 1/5/2002  | 5.45799994 |
| 1/6/2002  | 6.34700005 |
| 1/7/2002  | 5.67283336 |
| Ago 2002  | 4.92557151 |
| Set 2002  | 4.53028563 |
| 1/10/2002 | 5.25328575 |
| 1/11/2002 | 5.39416671 |
| Dic 2002  | 5.70871428 |
| Ene 2003  | 54.0666656 |
| 1/2/2003  | 67.644001  |
| 1/3/2003  | 70.9224997 |
| Abr 2003  | 63.7299995 |
| 1/5/2003  | 62.3425007 |
| 1/6/2003  | 49.7199993 |
| 1/7/2003  | 23.3575001 |
| Ago 2003  | 9.54650021 |
| Set 2003  | 0.79454999 |
| 1/10/2003 | 0.22615    |
| 1/11/2003 | 0.775575   |
| Dic 2003  | 16.5822496 |
| Ene 2004  | 114.187498 |
| 1/2/2004  | 49.3199997 |
| 1/3/2004  | 25.4100003 |
| Abr 2004  | 19.1199999 |

|           |            |
|-----------|------------|
| 1/5/2004  | 21.1233336 |
| 1/6/2004  | 16.3499999 |
| 1/7/2004  | 15.1600003 |
| Ago 2004  | 6.04875004 |
| Set 2004  | 6.21133328 |
| 1/10/2004 | 13.7450001 |
| 1/11/2004 | 5.80475009 |
| Dic 2004  | 21.2600002 |
| Ene 2005  | 23.4666672 |
| 1/2/2005  | 29.8179997 |
| 1/3/2005  | 30.2749996 |
| Abr 2005  | 15.175     |
| 1/5/2005  | 12.8550003 |
| 1/6/2005  | 0.99231999 |
| 1/7/2005  | 0.68166    |
| Ene 2006  | 52.8700002 |
| 1/2/2006  | 22.5887501 |
| 1/3/2006  | 22.1233333 |
| Abr 2006  | 5.88560004 |
| 1/5/2006  | 3.6592     |
| 1/6/2006  | 3.14819999 |
| 1/7/2006  | 2.97333332 |
| Ago 2006  | 2.39825004 |
| 1/10/2006 | 3.34750003 |
| 1/11/2006 | 8.0002501  |
| Dic 2006  | 19.0366669 |
| Ene 2007  | 36.113334  |
| 1/2/2007  | 44.8249998 |
| 1/3/2007  | 50.0950012 |
| Abr 2007  | 30.7128001 |
| 1/5/2007  | 8.71199989 |
| 1/6/2007  | 5.76875007 |
| 1/7/2007  | 6.52174997 |
| Ago 2007  | 6.39375007 |
| Set 2007  | 6.34250009 |
| 1/10/2007 | 7.94375002 |

|           |            |
|-----------|------------|
| 1/11/2007 | 10.3225002 |
| Dic 2007  | 11.8899999 |
| Ene 2008  | 18.1805005 |
| 1/2/2008  | 26.2400007 |
| 1/3/2008  | 36.7500006 |
| Abr 2008  | 22.2699998 |
| 1/5/2008  | 17.0499997 |
| 1/6/2008  | 8.11000001 |
| 1/7/2008  | 4.26049995 |
| Ago 2008  | 4.27724999 |
| Set 2008  | 4.7105     |
| 1/10/2008 | 4.96025002 |
| 1/11/2008 | 5.84124994 |
| Dic 2008  | 5.82624996 |
| Ene 2009  | 35.1666667 |
| 1/2/2009  | 41.4633344 |
| 1/3/2009  | 35.9866664 |
| Abr 2009  | 30.3800004 |
| 1/5/2009  | 10.7       |
| 1/6/2009  | 15.263333  |
| 1/7/2009  | 15.1033332 |
| Ago 2009  | 15.3700002 |
| Set 2009  | 15.1633329 |
| 1/10/2009 | 15.6566668 |
| 1/11/2009 | 15.3233334 |
| Dic 2009  | 15.5100002 |
| Ene 2010  | 42.5133324 |
| 1/2/2010  | 44.7750006 |
| 1/3/2010  | 37.9099998 |
| Abr 2010  | 14.7875001 |
| 1/5/2010  | 12.7675002 |
| 1/6/2010  | 12.8625    |
| 1/7/2010  | 10.5020003 |
| Ago 2010  | 7.26225007 |

### Anexo 3

### Valores de la calibración

| Parametros de calibracion | Uso de suelo                | Expresión  |
|---------------------------|-----------------------------|--|
| SW                        |                             |  |
| SW                        | Agriculture                 | MonthlyValues( Set, 16.3, Oct, 31.8, Nov, 42.2, Dic, 56.5, Ene, 69.6, Feb, 65.7, Mar, 67.9, Abr, 50.6, May, 34.7, Jun, 17.6, Jul, 10.7, Ago, 9.4 ) |
| SW                        | Forest                      | MonthlyValues( Set, 16, Oct, 31, Nov, 40, Dic, 55, Ene, 68, Feb, 64, Mar, 66, Abr, 49, May, 33, Jun, 14, Jul, 10, Ago, 8 )                         |
| SW                        | Grassland                   | MonthlyValues( Set, 16.3, Oct, 31.8, Nov, 42.2, Dic, 56.5, Ene, 69.6, Feb, 65.7, Mar, 67.9, Abr, 50.6, May, 34.7, Jun, 17.6, Jul, 10.7, Ago, 9.4 ) |
| SW                        | Wetland                     | MonthlyValues( Set, 16.3, Oct, 31.8, Nov, 42.2, Dic, 56.5, Ene, 69.6, Feb, 65.7, Mar, 67.9, Abr, 50.6, May, 34.7, Jun, 17.6, Jul, 10.7, Ago, 9.4 ) |
| SW                        | Urban                       | 38   |
| SW                        | Shrubland                   | 38   |
| SW                        | Barren or Sparse Vegetation | MonthlyValues( Set, 16.3, Oct, 31.8, Nov, 42.2, Dic, 56.5, Ene, 69.6, Feb, 65.7, Mar, 67.9, Abr, 50.6, May, 34.7, Jun, 17.6, Jul, 10.7, Ago, 9.4 ) |
| SW                        | Desconocido                 |  |
| SW                        | Oper Water                  | 50   |
| SW                        | Show and Ice                | 40   |
| RRF                       |                             |  |
| RRF                       | Agriculture                 | 4.4  |
| RRF                       | Forest                      | 4.3  |
| RRF                       | Grassland                   | 4  |
| RRF                       | Wetland                     | 3.6  |
| RRF                       | Urban                       | 1.3  |
| RRF                       | Shrubland                   | 1.2  |
| RRF                       | Barren or Sparse Vegetation | 1.8  |
| RRF                       | Desconocido                 |  |
| RRF                       | Oper Water                  | 0.4  |
| RRF                       | Show and Ice                | 0.3  |
| Ks                        |                             |  |
| Ks                        | Agriculture                 | 30   |
| Ks                        | Forest                      | 35   |
| Ks                        | Grassland                   | 45   |
| Ks                        | Wetland                     | 20   |
| Ks                        | Urban                       | 13   |
| Ks                        | Shrubland                   | 15   |
| Ks                        | Barren or Sparse Vegetation | 10   |
| Ks                        | Desconocido                 |  |
| Ks                        | Oper Water                  | 70   |
| Ks                        | Show and Ice                | 70   |
| Dw                        |                             | 15   |
| Z2                        |                             | 0.3  |
| Kd                        |                             | 20   |
| Z1                        |                             |  |
| Z1                        | Agriculture                 | 0.7  |
| Z1                        | Forest                      | 0.7  |
| Z1                        | Grassland                   | 0.7  |
| Z1                        | Wetland                     | 0.7  |
| Z1                        | Urban                       | 0.7  |
| Z1                        | Shrubland                   | 0.7  |
| Z1                        | Desconocido                 | 0.7  |
| Z1                        | Oper Water                  | 0.7  |
| Z1                        | Barren or Sparse Vegetation | 0.7  |
| Z1                        | Show and Ice                | 0.7  |
| F                         |                             | 0.1  |
| F                         | Agriculture                 | 0.1  |
| F                         | Forest                      | 0.2  |
| F                         | Grassland                   | 0.1  |
| F                         | Wetland                     | 0.1  |
| F                         | Urban                       | 0.1  |
| F                         | Shrubland                   | 0.09   |
| F                         | Barren or Sparse Vegetation | 0.09   |
| F                         | Desconocido                 |  |
| F                         | Oper Water                  | 0.09   |
| F                         | Show and Ice                | 0.09   |
| Kc                        |                             |  |
| Kc                        | Agriculture                 | 0.65   |
| Kc                        | Forest                      | 1.1  |
| Kc                        | Grassland                   | 0.78   |
| Kc                        | Wetland                     | 0.2  |
| Kc                        | Urban                       |  |
| Kc                        | Shrubland                   |  |
| Kc                        | Barren or Sparse Vegetation |  |
| Kc                        | Desconocido                 |  |
| Kc                        | Oper Water                  |  |
| Kc                        | Show and Ice                |  |