

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS CON FINES DE OFERTA HÍDRICA APLICANDO EL MODELO WEAP

MODELING AND PROJECTION OF FUTURE SCENARIOS FOR WATER
SUPPLY PURPOSES APPLYING THE WEAP MODEL

Fecha de recepción: 03/08/2022 | Fecha de aceptación: 02/09/2022

Autor(es):

¹ Lozano Velásquez Moisés Agustín

² Valeriano León Khalil

¹ Ingeniero Civil, docente asesor carrera
Ingeniería en Recursos Hídricos.

² Investigador Junior

Correspondencia del autor(es): ¹ moicoml55@gmail.com - ² kvluajmcivil@outlook.com

Dirección: Departamento de informática y ciencias exactas. Facultad de Ingeniería de Recursos Naturales y Tecnología, campus Lajitas - Barrio Lourdes, C/ SN, entre Av. 11 de febrero y C/ Algarrobal

RESUMEN

En el presente estudio se genera un modelo hidrológico con el software WEAP que debe la oferta y demanda de agua en la cuenca alta del río Guadalquivir, mediante la caracterización de datos climáticos tratados en el BHSB, uso de suelos por medio del ZONISIG, demanda de agua, obras hidráulicas y sanitarias.

Para obtener un modelo hidrológico que simule la respuesta hídrica de la cuenca, mediante el WEAP, es necesario el proceso de calibración que consiste en comparar los caudales medidos con los caudales simulados e ir ajustando los parámetros del método humedad del suelo. Para determinar el grado de relación del modelo con el sistema físico real se utiliza las métricas de BIAS y NASH, donde se obtuvieron resultados óptimos.

Al contar con un modelo calibrado, se puede generar escenarios alternos y alcanzar el objetivo propuesto, que es analizar los escenarios futuros para el escenario húmedo y seco, incorporando información proyectada para el periodo del 2020-2050, y así obtener la oferta y demanda hídrica en los periodos proyectados.

Se aprecia que la oferta hídrica proyectada tiende a disminuir, para un escenario húmedo varía de 1 a 20%. para un escenario seco, se reduce entre un 18 a 40%.

ABSTRACT

In the present study, a hydrological model is generated with the WEAP software that accounts for the supply and demand of water in the upper basin of the Guadalquivir River, through the characterization of climatic data processed in the BHSB, land use through the ZONISIG, demand for water, hydraulic and sanitary works.

To obtain a hydrological model that simulates the hydrological response of the basin, through WEAP, the calibration process is necessary, which consists of comparing the measured flows with the simulated flows and adjusting the parameters of the soil moisture method. To determine the degree of relationship of the model with the real physical system, the BIAS and NASH metrics are used, where optimal results were obtained.

By having a calibrated model, alternative scenarios can be generated and the proposed objective achieved, which is to analyze the future scenarios for the wet and dry scenario, incorporating projected information for the 2020-2050 period, and thus obtain the water supply and demand in the projected periods.

It is appreciated that the projected water supply tends to decrease, for a humid scenario it varies from 1 to 20%. for a dry scenario, it is reduced between 18 to 40%.

Palabras Claves: Calibración, modelo, cuenca, métrica, calibración, escenarios, planes, WEAP.

Keywords: Calibration, model, basin, metric, calibration, scenarios, plans, WEAP.

1. INTRODUCCIÓN

Para la oferta de agua se debe realizar un análisis temporal en el periodo que se pretende calibrar y validar el modelo, procurando que las variables de uso de suelo como cobertura y textura correspondan o se aproximen a dicho periodo. En el caso de la información climática debe ser analizada y verificada realizando pruebas de consistencia y homogeneidad. Para utilizar la información de la grilla climatológica en el modelo WEAP, se tiene que verificar que los datos de la grilla GMET sean próximos a los registrados en las estaciones, de tal manera, que la diferencia entre los registros pluviométricos y la información de la grilla meteorológica del BHSB sea mínima.

El modelo hidrológico debe ser contextualizado en el periodo de calibración, es decir las variables climáticas, uso de suelo, demanda y obras hidráulicas corresponde al periodo de tiempo en el periodo de análisis, en caso contrario realizar una estimación según censos estudios y datos disponibles.

El proceso de calibración debe ir acompañado de la validación del modelo hidrológico, para conocer el comportamiento del modelo en un periodo distinto al de calibración. Dicha validación corrobora si el modelo se está desempeñando de forma adecuada y simula la respuesta hídrica natural de la cuenca en el transcurso del tiempo.

La GIRH (gestión integral de recursos hídricos), es el proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado del agua, de la tierra y de los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social con equidad y sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales. (MMAyA, 2017, p.37).

El MIC (manejo integral de cuencas), es el conjunto de acciones conducentes al aprovechamiento sostenible de los recursos del agua, suelo y cobertura vegetal de la cuenca. (MMAyA, 2017, p.38).

En este sentido, el presente trabajo pretende seguir la misma línea que maneja las políticas nacionales,

considerando que el estudio se focalizará en modelar la oferta de agua actual y la futura en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir. Analizando los recursos hídricos para fines de agua potable y dotación de riego, proyectando dos escenarios alternos seco y húmedo que altera los datos de precipitación y temperatura.

La modelación se realizará con el software Water Evaluation And Planning System (WEAP) Empleado en el BHSB 2016, en la actualidad las entidades del MMAyA genera estudios de PAHL y MIC que requiere el modelado con el WEAP.

La cuenca Alta del río Guadalquivir que según la clasificación nacional pertenece a un nivel 6 en el marco de la aplicación de la metodología de Otto Pfasterter, que se encuentra dentro de la cuenca del río Guadalquivir perteneciente a un nivel 5.

Debido a su importancia socio-económica productiva, e hídrica como la demanda de agua potable, sistemas de riego y en menor escala el consumo ganadero. Así también los problemas que afectan los recursos hídricos de la cuenca cómo el cambio climático, elevando la incertidumbre, ocasionando modificaciones en la cobertura vegetal, variaciones en la precipitación (escases de lluvias o cambios en la distribución temporal), la temperatura, (aumento brusco o eventos extremos de heladas) que ocasionan cambios en el ciclo hidrológico afectando el escurrimiento superficial del agua.

El modelo WEAP es una herramienta eficaz para la planificación y evaluación de los impactos en la gestión del agua. Se trata de una herramienta idónea, para evaluar las acciones de manejo de propuestas hídricas, para abordar la escasez de agua bajo condiciones de cambio climático.

Para analizar las situaciones críticas secas, se estima el índice de escasez correspondiente a la relación porcentual entre la demanda y oferta de agua, se analiza el menor gasto de la serie histórica proyectada.

Con el índice de escasez, se escogió la serie de los caudales anuales del año más crítico para ambos escenarios, para el escenario húmedo el año que presenta menor oferta de agua es el 2027 y para un escenario seco es el 2029.

A estos dos años críticos se encontró el índice de escasez, identificando el mes más crítico para un periodo húmedo que es enero, para el caso de Canasmoro presenta un índice de escasez moderado, para Obrajes el índice de escasez alto, finalmente para Erquis, Victoria y Sella, presenta un índice de escasez muy alto.

Para un escenario seco el mes más crítico es marzo, donde se presentó un índice de escasez alto para la UH de Canasmoro y Obrajes, un índice muy alto para Erquis, consumiéndose más del 50% de la oferta; para Victoria y Sella se genera déficit hídrico.

Para la UH (unidad hidrográfica) Sella, la disminución de sus caudales, para un escenario húmedo varía de 0,10 a 20%, siendo los meses más críticos marzo con un 20% y diciembre con un 15,5%. En un escenario seco, la disminución de caudal, es mayor, se observó que varían de 15 a 50%, siendo los meses más críticos, enero con un 47,46% y marzo con 35,21% de disminución.

De igual manera en la UH Obrajes, la disminución del caudal varía de 2,2 a 20% para un escenario húmedo y de 20 a 44% para un escenario seco. La UH Erquis, una de las fuentes de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Tarija, presentó una disminución del caudal de 2,5 a 22% para un escenario húmedo y para un escenario seco, varía de 20 a 45%. Finalmente, la UH Victoria presentan disminuciones variando de 0,3 a 20% para un escenario húmedo y de 10 a 41% para un escenario seco.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación sigue el enfoque cuantitativo, porque se orienta en el análisis de datos y resultados, en el proceso se generaliza los resultados para explicar los fenómenos que suscitan en las variables climáticas y uso de suelos, demanda, respuesta hídrica en la cuenca alta del río Guadalquivir, empleando el modelo hidrológico WEAP.

El tipo de investigación según profundidad es descriptivo, porque se orienta en la descripción del fenómeno, al realizar un análisis profundo de un escenario futuro crítico periodo seco y húmedo, que permite obtener un panorama más preciso de la magnitud de los escenarios futuros, comprendiendo que sucede con los recursos hídricos de la cuenca.

Los métodos teóricos de investigación utilizados son análisis documental, modelación y causal. Los métodos empíricos empleados son la observación y medición.

Para alcanzar las metas propuestas se desarrollan los siguientes pasos:

- a. Desarrollo del esquema y características básicas del modelo.

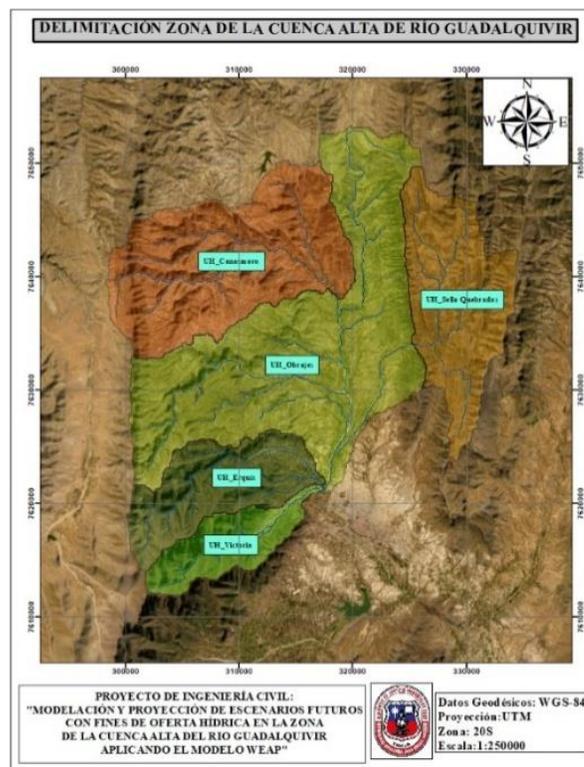


Figura 1 Delimitación de Unidades Hidrológicas

Nota: El gráfico representa, la delimitación de las UH (Unidades Hidrológicas), pertenecientes a la Cuenca Alta del río Guadalquivir. Elaboración propia con apoyo del ArcGIS

- b. Análisis documental, se busca información climática, uso de suelo, demanda de la zona alta de la cuenca del Río Guadalquivir, se recurre a diversas fuentes como: el SENAMHI, inventarios de fuentes hídricas e infraestruc-

tura de riego, proyectos en la zona de estudio, uso de suelos, datos climáticos, oferta y demanda hídrica de la cuenca.

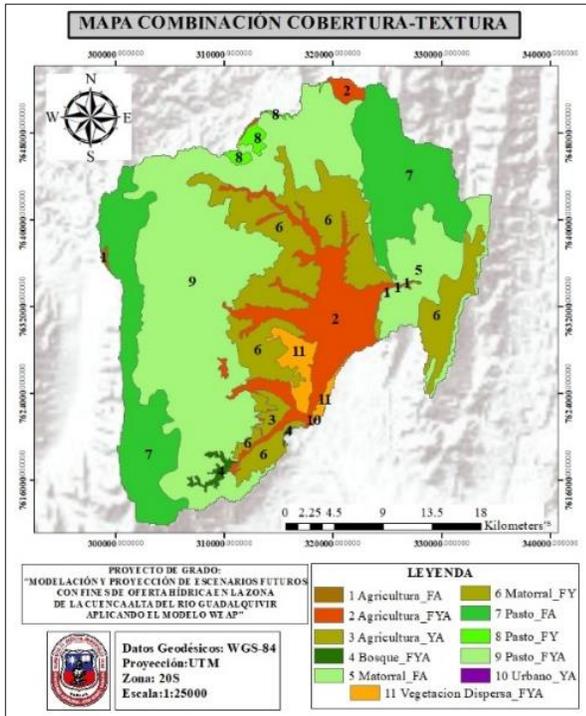


Figura 2 : Mapa de combinación cobertura-textura, para zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir

Nota: Representa la combinación de Cobertura-Textura. Elaboración propia, en base a información SIG del ZONI-SIG.

- c. Se analiza la información recabada, a su vez se verifica si es consistente y fiable para trabajar.

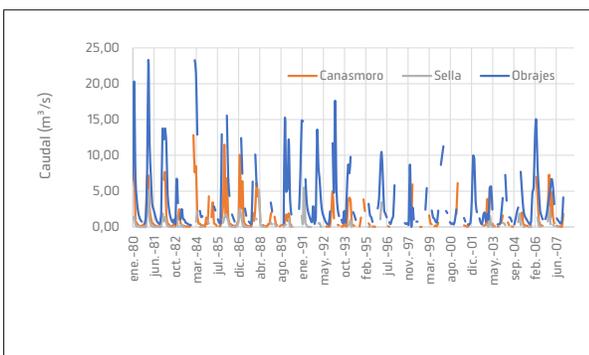


Figura 3 Comparación de caudales para el periodo de ene. de 1980 a dic. del 2007

Nota: El gráfico muestra datos de caudales, de las UH, Canasmoro, Sella y Obrajés. Elaboración propia en base a los datos de estaciones hidrométricas.

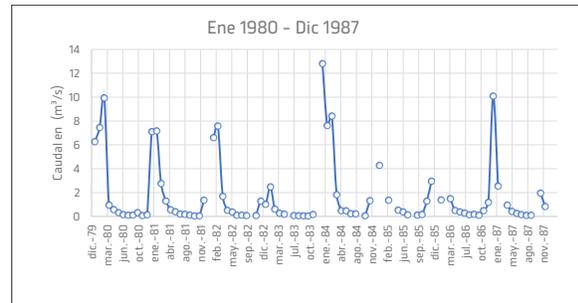


Figura 4: Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Canasmoro.

Nota: En la figura se observa los caudales aforados en la estación hidrométrica de Canasmoro. Elaboración propia, en base a la estación hidrométrica de Canasmoro.

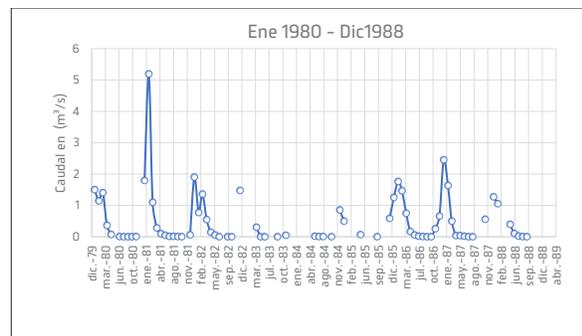


Figura 5 : Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Sella.

Nota: El gráfico representa, los datos de caudales para el periodo de 1980 a 1988. Elaboración propia, en base a la estación hidrométrica de Sella.

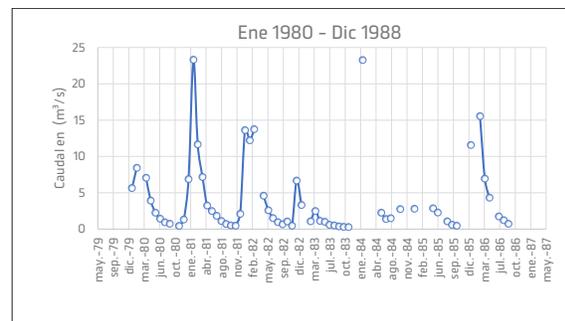


Figura 6: Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Obrajés

Nota: El gráfico representa, los datos de caudales para el periodo de 1980 a 1988. Elaboración propia, en base a la estación hidrométrica de Obrajés.

- d. Se consideró la información de demanda de agua para riego, de la cual se obtuvo un total de 3500,37 ha.

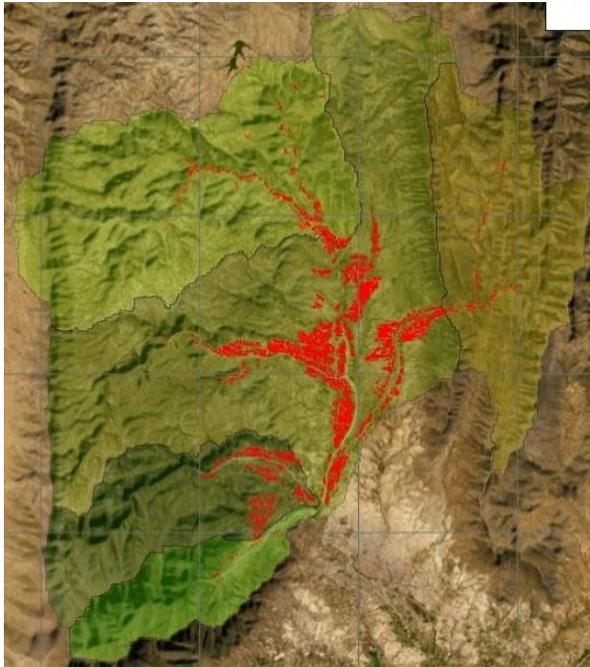


Figura 7: Mapa de áreas de cultivos de la zona Alta del río Guadalquivir

Nota: El gráfico representa, las áreas de cultivo en toda la cuenca Alta del Río Guadalquivir. Elaboración propia, en base a los shapefiles del PAHL San Lorenzo.

- e. Una vez seleccionada la información se procede a ingresar los datos y conceptualizar el modelo teórico en WEAP, para el modelo base.

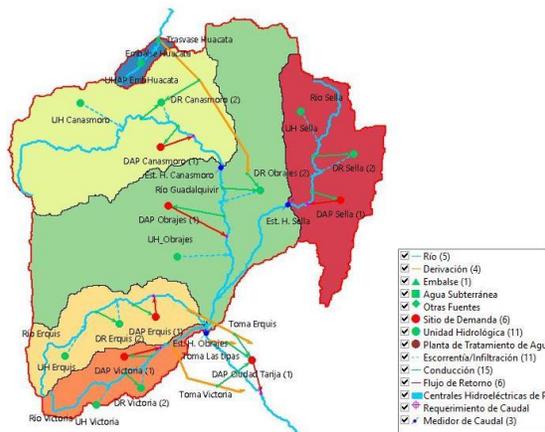


Figura 8: Elementos de modelación incorporados a la cuenca en estudio

Nota: En la figura se muestra el esquema idealizado para correr el modelo. Elaboración propia, con apoyo de WEAP.

- f. Se calibra y valida el modelo hidrológico, comparando los caudales simulados con los caudales aforados.

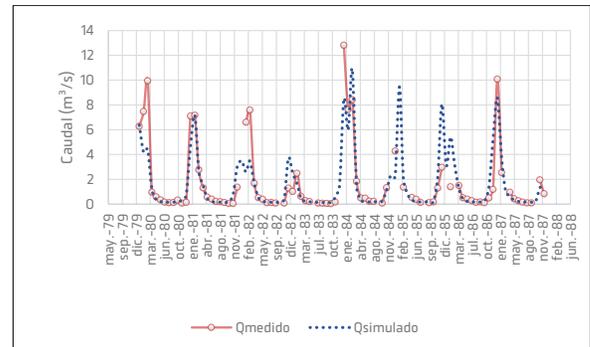


Figura 9 Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de UH Canasmoro

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 1979-1988. Elaboración propia.

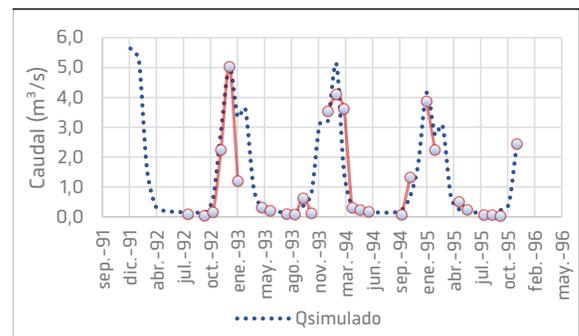


Figura 10: Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Canasmoro

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 1991-1996. Elaboración propia.

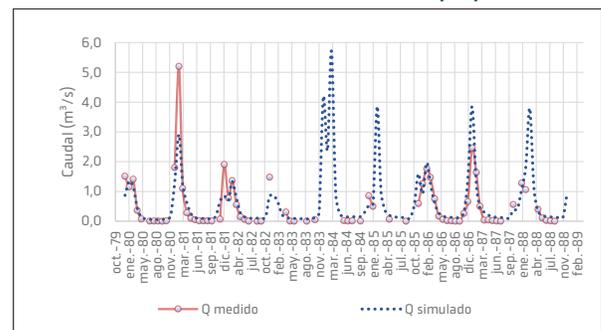


Figura 11 : Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de la UH Sella

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 1979-1989. Elaboración propia.

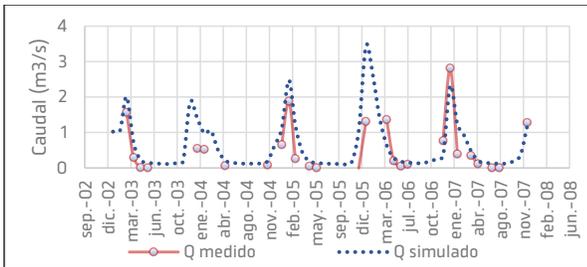


Figura 12: Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Sella

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 2002-2008. Elaboración propia.

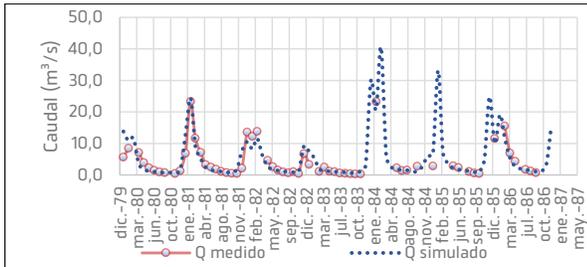


Figura 13 Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de la UH Obrajes

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 1979-1987. Elaboración propia.

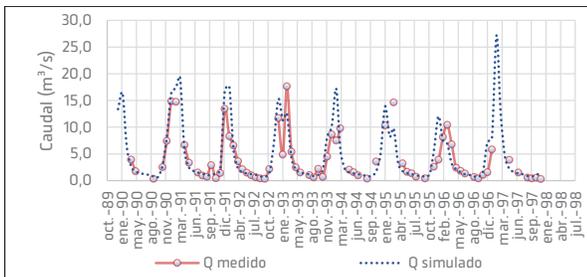


Figura 14: Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Obrajes

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para el periodo de 1980-1998. Elaboración propia.

- g. Proyección de precipitación y temperatura para periodo condiciones secas y húmedas.
- h. Generar escenarios futuros.

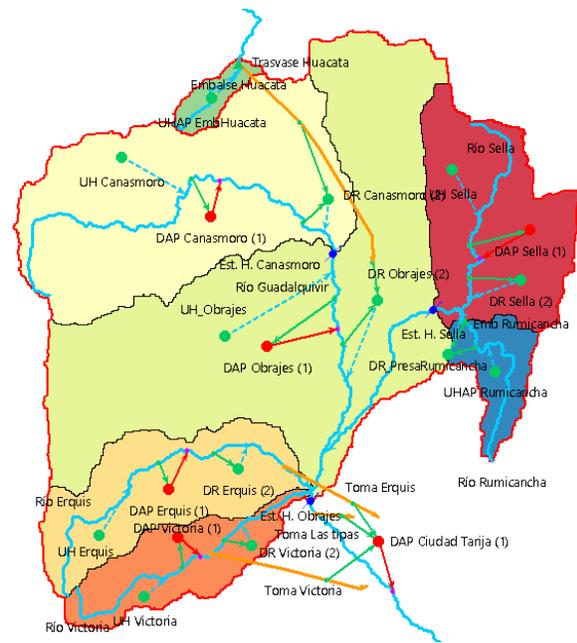


Figura 15: Modelo de escenarios futuros para la cuenca Alta del río Guadalupe

Nota. El gráfico muestra el esquema completo para la modelación de escenarios futuros. Elaboración propia, con apoyo de WEAP.

3. RESULTADOS.

3.1. COMPARACIÓN DE CAUDALES DE OFERTA ENTRE EL ESCENARIO BASE Y FUTURO

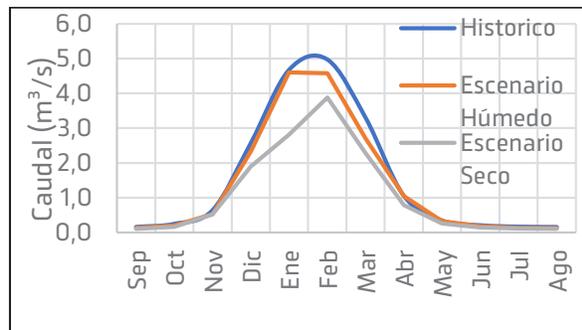


Figura 16: Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Canasmoro

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario histórico y futuro. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

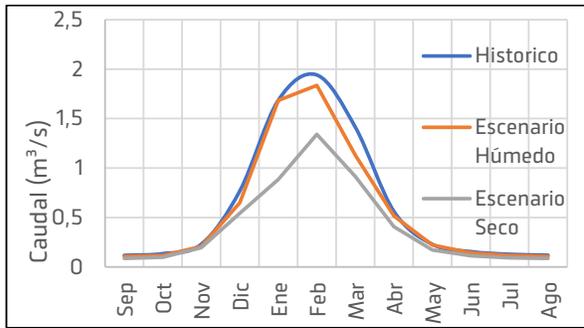


Figura 17

Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Sella

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario histórico y futuro. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

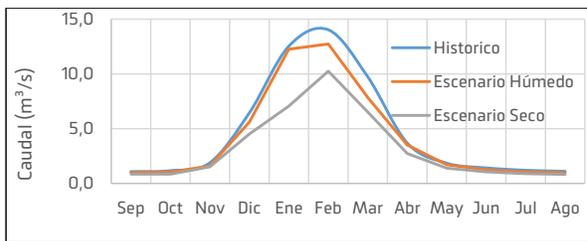


Figura 18

Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Obrajes

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario histórico y futuro. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

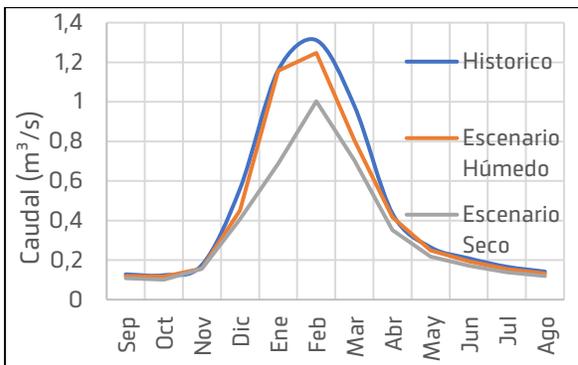


Figura 19

Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Victoria

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario histórico y futuro. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

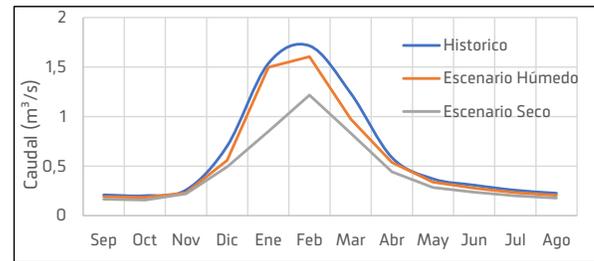


Figura 20

Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Erquis

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario histórico y futuro. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

Este análisis, muestra como los caudales proyectados para el periodo 2020–2050, disminuyen en relación al histórico de 1980 y 2016, tanto para un escenario húmedo como para un seco.

Índice de escasez

El índice de escasez o uso de agua, es la relación porcentual entre la demanda de agua con la oferta hídrica disponible, considerando la reducción del caudal ecológico (IDEAM, 2010).

Donde:

$$I_{ua} = \frac{Dh}{Oh} 100 \quad (5.1)$$

I_{ua} : Índice de escasez o uso de agua

Dh: Demanda hídrica

Of: Oferta hídrica

Índice de Escasez o uso de agua	Calificación cualitativa	Descripción
> 50%	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20 – 50%	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10 – 20%	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 – 10%	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
< 1%	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Tabla 1 Índice de escasez

Nota. El cuadro muestra la clasificación del índice de escasez. Elaboración propia, en base al documento de IDEAM, 2010.

Antes de realizar el índice de escasez, se consideró restar a la oferta total el caudal ecológico, considerando que se debe mantener una conservación ambiental.

Para el cálculo del caudal ecológico, se consideró utilizar dos metodologías: la primera consiste en calcular el 10% del caudal anual con una probabilidad de ocurrencia del 90% (Endesa, 2011, p.56). Para este método se trabajó con los volúmenes mensuales (m^3) simulados para el periodo del 2020 al 2050, de los cuales se saca una media mensual y se aplica el 90% de probabilidad de ocurrencia, luego se suma para obtener el volumen anual y este dato se lo transforma a caudal (m^3/s), luego se lo multiplica por un 10% y se obtiene el caudal ecológico.

El segundo método, es el que se maneja en la "Guía para la elaboración de EDTP (Estudio de diseño técnico de pre-inversión) para proyectos de riego", implementada por el MMAyA, donde se establece que se debe considerar el caudal ecológico mínimo el 10% del caudal medio de cada mes. Considerando las dos metodologías, se estableció un criterio que consiste en seleccionar el valor mínimo de ambas metodologías.

Si el 10% del caudal anual a una probabilidad de ocurrencia del 90%, es menor al 10% del caudal medio mensual, se considera ese dato para el respectivo mes, sino se adopta el dato del 10% del caudal medio mensual.

Se analiza el índice de escasez más crítico de toda la serie de caudales a la salida de cada UH, para el periodo proyectado del 2020-2050, tanto para el escenario húmedo como para el escenario seco.

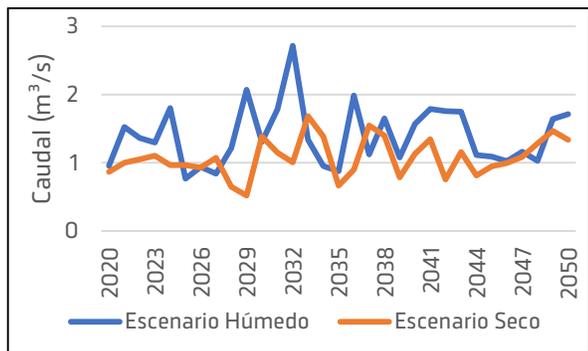


Figura 21 Análisis de los caudales anuales para la UH Canasmoro

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario húmedo y seco. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

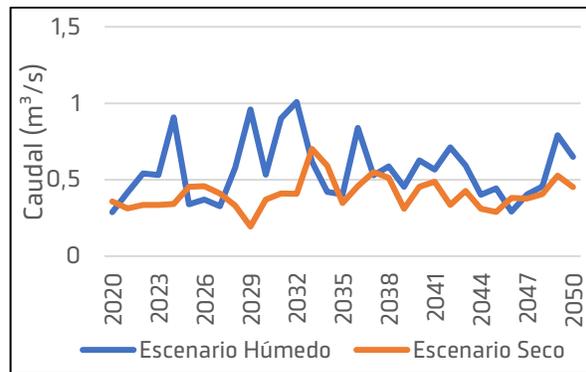


Figura 22 Análisis de los caudales anuales para la UH Sella

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario húmedo y seco. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

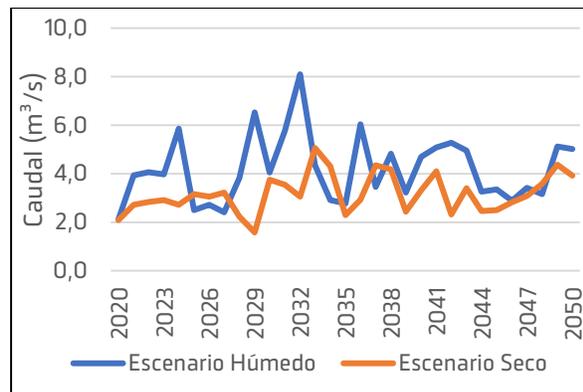


Figura 23

Análisis de los caudales anuales para la UH Obrajes

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario húmedo y seco. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

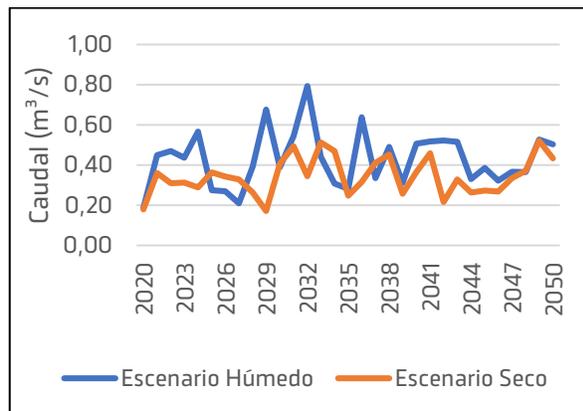


Figura 24

Análisis de los caudales anuales para la UH Victoria

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario húmedo y seco. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

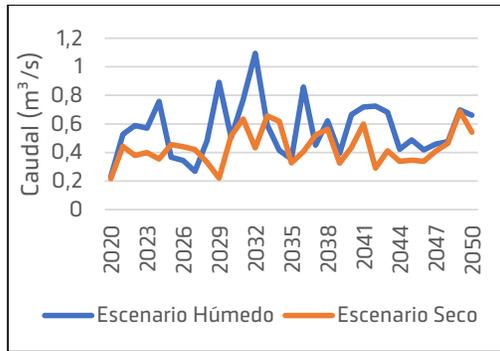


Figura 25

Análisis de los caudales anuales para la UH Erquis

Nota. El gráfico muestra la serie de caudales para un escenario húmedo y seco. Elaboración propia, con apoyo de resultados del WEAP.

Los caudales para el periodo de análisis del 2020-2050 en un escenario húmedo y seco, tienden a disminuir en comparación con el escenario histórico 1980-2016.

Del análisis de caudales anuales en las diversas UH mostradas en la figura se aprecia que los años más críticos son:

- ☐ 2027 para un escenario húmedo.
- ☐ 2029 para un escenario seco.

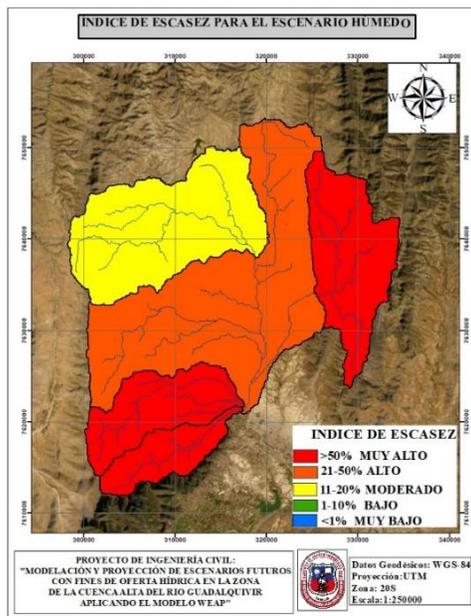


Figura 26 Índice de escasez para el mes de enero del 2027

Nota. El gráfico muestra el índice de escasez que presenta cada unidad Hidrológica. Elaboración propia, con apoyo de ArcGIS.

Donde para un escenario húmedo en las cuencas de Erquis, Victoria, Sella y Obrajes, los meses más críticos son diciembre y marzo, disminuyendo su caudal entre un 12 a 21% y en Canasmoro 17 a 20%.

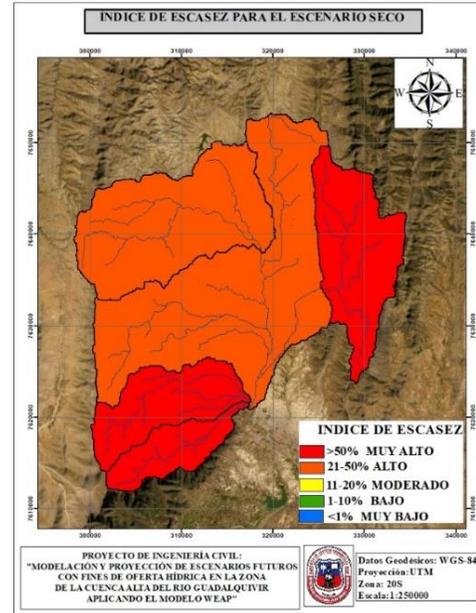


Figura 27

Índice de escasez para el mes de marzo del 2029

Nota. El gráfico muestra el índice de escasez que presenta cada unidad Hidrológica. Elaboración propia, con apoyo de ArcGIS.

Para Canasmoro se presenta una disminución de 30 a 37 % en los meses de octubre y marzo y Sella un 29 a 35% en los meses de diciembre y marzo.

4. DISCUSIÓN

- ☐ Se utilizó las grillas meteorológicas de precipitación y temperatura para el periodo de 1980-2016. Además, se realizó la validación de estas grillas donde se obtuvo un coeficiente de determinación de (R^2) 0,999 que representa un buen ajuste.
- ☐ Se generó una cobertura de suelo que combina cobertura vegetal-textura, en base a la información del ZONISIG, se valida a través de una imagen satelital siendo de gran utilidad para diversos estudios.

- Para las estaciones hidrométricas de Sella, Canasmoro y Obrajes, en los meses que no cuenten con datos de caudales medios mensuales, pueden ser reemplazados con los caudales simulados en WEAP para posteriores estudios, debido a la óptima calibración que se obtuvo.
- Las proyecciones de un escenario húmedo y seco producto del cambio climático, dieron como resultado que la oferta hídrica disminuya en comparación al escenario histórico. Como conclusión se observó que la precipitación tiende a disminuir y las temperaturas a elevarse, lo que produjo que la oferta sea desfavorable en el periodo del 2020-2050. Por lo cual se debe tomar medidas de resiliencia antes estos fenómenos que pueden llegar a ocasionar escasez.
- Para un escenario seco, se observa que en las UH de Erquis, Victoria y Obrajes los meses más críticos son enero y marzo disminuyendo entre 28 a 45%.

Analizando el año 2027 para el periodo húmedo, se observó que el mes de enero es el más desfavorable y se ven afectadas las UH de Sella, La Victoria con un índice de escasez muy alto produciéndose un DÉFICIT. La UH de Obrajes presentó un índice de escasez de 41,66% clasificado como alto y Erquis de 57,49% clasificado como muy alto y por último se observó que la UH de Canasmoro, presenta un índice de escasez de 13,33% clasificándose como moderado.

Para el año 2029, en el periodo húmedo se observó que el mes más desfavorable es marzo, con un índice de escasez muy alto en las UH de Sella de 172,65% y la Victoria de 121,28%, produciendo DÉFICIT. La UH de Obrajes presentó un índice de escasez de 36,70% en Erquis de 55,66% y Canasmoro 26,05% clasificándose el índice de escasez como alto.

Se realizó una comparación de los resultados para el año 2038 con el estudio del SEDEGIA.

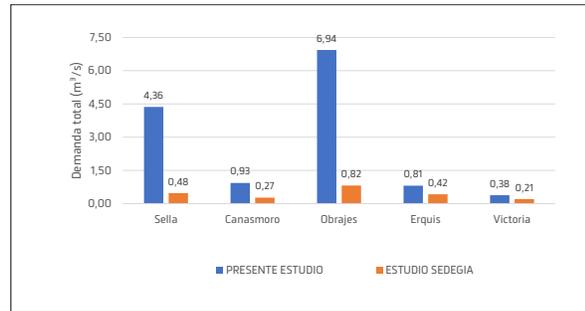


Figura 28 Comparación de la demanda total entre el presente estudio y el de SEDEGIA

Nota: El gráfico muestra la comparación de resultados del estudio con el de SEDEGIA. Elaboración propia, en base a resultados del modelo WEAP y el estudio del SEDEGIA.

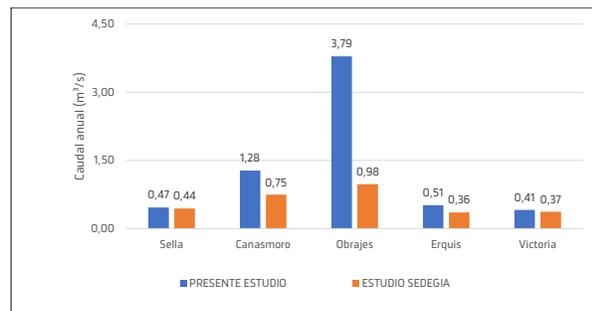


Figura 29 Comparación de la oferta total entre el presente estudio y el de SEDEGIA

Nota: El gráfico muestra la comparación de resultados del estudio con el de SEDEGIA. Elaboración propia, en base a resultados del modelo WEAP y el estudio del SEDEGIA.

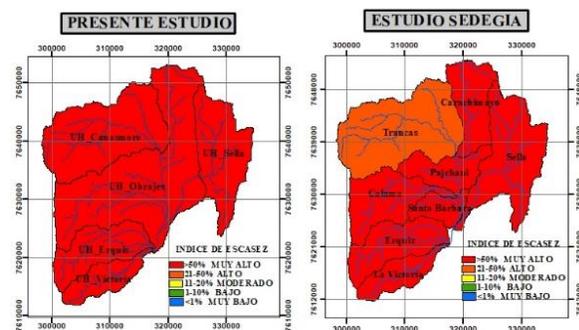


Figura 30 Análisis del índice de escasez para el año 2038

Nota: El gráfico muestra la comparación de resultados del estudio con el de SEDEGIA. Elaboración propia, en base a resultados del modelo WEAP y el estudio del SEDEGIA.

Los resultados generados con el modelo WEAP, a la escala espacial que se trabajó, genera una confiabilidad de los mismos,

puesto que se consideró datos climatológicos grillados a ese nivel espacial. Además, se toma en cuenta las demandas tanto de agua potable como riego, al nivel de escala espacial. Por otro lado, los resultados de caudales ofertados al ser comparados con el estudio del SEDEGIA, tienen una cierta similitud, lo cual nos indica que los resultados con el modelo WEAP, son confiables a esa escala de delimitación.

- ❑ Se debe volver a realizar aforos hidrométricos a la salida de la UH Canasmoro, Sella y Obrajes, mediante sensores que otorguen datos diarios completos y consistentes y aumentar dos aforos más en la UH de Erquis y Victoria y de esta manera obtener una nueva base actual que vayan a servir para propósito de estudios posteriores.
- ❑ De acuerdo a los resultados obtenidos, se debe realizar una planificación hídrica, para disminuir el índice de escasez, sobre todo en las UH de Sella y la Victoria.
- ❑ Como la UH de la Victoria se deriva la mayor parte de agua a la población Tarijeña, se debe analizar si es factible realizar reservorios de agua para regular los caudales.
- ❑ Para poder disminuir las demandas, se debe planificar un calendario cultivos donde exista rotación de los mismo, es decir que tal vez en los periodos de escasez no se deba seleccionar los cultivos, siempre y cuando esto de lugar a un desarrollo productivo para que los comunarios accedan al pedido.
- ❑ Se deben priorizar obras hidráulicas de almacenamiento, como presas y atajados en toda la cuenca Alta del Río Guadalquivir, sobre todo en las UH de mayor índice de escasez.
- ❑ Generar una planificación hídrica para el consumo de agua potable, donde exista una

racionalización de la misma y se derive el agua de manera equitativa para todos los barrios de la población Tarijeña.

- ❑ En base al trabajo realizado, se puede realizar un estudio, a un nivel más sectorial, añadiendo datos de caudales de riego, a través de los aforos que se deban realizar a las tomas principales que extraen agua de los ríos y de esta manera añadir nuevas delimitaciones hidrológicas al modelo, que ayuden a realizar una planificación hídrica de manera más local.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ❑ Cahuana Andia A. y Yugar Morales W. (2009). Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de Hidrología CIV 233. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
- ❑ Centro de cambio Global-Universidad Católica de Chile y Stockholm Environment Institute. (2009). Guía Metodológica - Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Ecuador.
- ❑ Dorenbos, J. y W.O. Pruitt (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Riego y Drenaje N° 24. FAO. Roma, Italia. (Este trabajo a sido actualizado por la FAO mediante el de Allen et al. 1998).
- ❑ Empresa Nacional de Electricidad "Endesa" (2011). Introducción al cálculo de caudales ecológicos. Santiago, Chile.
- ❑ FAO (Food and Agriculture Organization) N° 56. (2006). Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia.
- ❑ Foro Nacional Ambiental. (2009). Cambio climático: lo que está en juego. Bogotá, Colombia. Dupligráficas.
- ❑ Gobernación del Departamento de Tarija y Se-

- cretaría de Medio Ambiente y Agua. (2013). Plan departamental del agua de Tarija "Agua para todos y para siempre". Tarija.
- ◻ Gobierno Autónomo Municipal de San Lorenzo. (2016). Plan Territorial de Desarrollo Integral San Lorenzo 2016-2020. San Lorenzo, Tarija.
 - ◻ Gobierno Autónomo del Departamento de Tarija. (2014). Plan Departamental de gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (2014-2018). Tarija.
 - ◻ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. (2014). Informe de síntesis del Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.
 - ◻ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, Colombia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2016). Guía metodológica para la elaboración de balances hídricos superficiales y análisis de la variabilidad climática de oferta y demanda hídrica. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2018). Guía para la elaboración de estudios de diseño técnico de preinversión para proyectos de riego. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2010). Delimitación y codificación de unidades hidrográficas de Bolivia metodología pfaftetter. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos hídricos y Riego. (2017). Elaboración del diagnóstico integral y formulación de la propuesta de los lineamientos estratégicos e institucionales del Plan Director de la Cuenca del río Guadalquivir. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2017). Lineamientos Estratégicos e Institucionales del Plan Director de la cuenca del río Guadalquivir y su visión Estratégica. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego. (2017). Programa Plurianual de Gestión Integrada de Recursos Hídricos y Manejo Integral de Cuencas (2017-2020). La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua. (2018). Balance Hídrico Superficial de Bolivia. La Paz, Bolivia. SIGRAF.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y UCEP Mi Riego. (2017). Balance Hídrico Superficial de Bolivia, Anexo Metadocumento. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable, GIZ. (2016). Propuesta metodológica de balance hídrico de oferta y demanda para cuencas nivel 4 y aplicación en la cuenca del río Grande.
 - ◻ Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación y Gobierno Autónomo del Departamento de Tarija. (2001). Zonificación Agroecológica y Socioeconómica Departamento de Tarija. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Desarrollo Sostenible y Planificación. (2001). Procedimientos metodológicos de la zonificación agroecológica y socioeconómica. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Medio Ambiente y Agua y Helvetas. (2016). Balance Hídrico Integral para la cuenca del río Guadalquivir.
 - ◻ Ministerio de Servicios y Obras Públicas y Viceministerio de Servicios Básicos. (2004). Norma Boliviana NB 689 Instalaciones de agua – Diseño para Sistemas de Agua Potable. La Paz, Bolivia.
 - ◻ Ministerio de Servicios y Obras Públicas y Viceministerio de Servicios Básicos. (2007). Norma Boliviana NB 688 Diseño de sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial. La Paz, Bolivia.

- 🔖 Morasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Binger R. L., Harmel R. D. y Veith T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. doi: 10.13031/2013.23153.
- 🔖 Plan Maestro Integral de Agua Potable y Saneamiento del Valle Central de Tarija Bolivia (2015). Antecedentes y diagnóstico de la situación actual del servicio. Tarija, Bolivia.
- 🔖 Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable, GIZ. (2011). Cálculo del área bajo riego óptimo en proyectos de riego. Cochabamba, Bolivia.
- 🔖 Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua. (2018). Mapeo temático de la oferta, uso actual y disponibilidad de los recursos hídricos del valle central de Tarija, en el marco del sistema de información hídrica del valle central de Tarija-Sihita. Tarija, Bolivia.
- 🔖 Stockholm Environment Institute. (2017). Tutorial de una colección de modelos independientes para enseñar el software WEAP. Estocolmo, Suecia.
- 🔖 Tacusi Calla C. y Hacha Chuctaya E. (2015). Modelación hidrológica en la subcuenca de pitumarca con la aplicación del modelo WEAP. Cusco, Perú
- 🔖 Villón Béjar M. (2002). Hidrología Estadística. Lima, Perú. Edición: Villón.
- 🔖 Villón Béjar M. (2002). Hidrología. Lima, Perú. Edición: Villón.

5.1. WEBGRAFÍA

- 🔖 <http://www.aumentaty.com/community/es/pin/ficha/evaporacion-2/>. (2018). Fecha consulta: 07/06/2020.
- 🔖 https://www.ecured.cu/Transpiraci%C3%B3n_en_las_plantas. (2011). Fecha de consulta: 08/06/2020.
- 🔖 <http://etapasciclodelagua.blogspot.com/2013/12/escorrentia.html>. (2013). Fecha consulta: 08/06/2020.
- 🔖 <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>. (1998). Fecha consulta: 01/07/2020.
- 🔖 <https://www.facebook.com/diarioelpais.tarija.7/posts/1912125379029997/>. (2017). Fecha consulta: 29/05/2020.
- 🔖 <https://geologicalmanblog.wordpress.com/2015/10/11/ciencia-ciclo-agua/>. (2015). Fecha consulta: 05/06/2020.
- 🔖 <https://images.app.goo.gl/rtVnenwrURZuxuLJ9>. (2011). Fecha consulta: 09/06/2020.
- 🔖 <https://images.app.goo.gl/c3rT5tsk9u4mrnUNA>. (2014). Fecha consulta: 10/06/2020.
- 🔖 <https://www.mindomo.com/es/mindmap/escurremientosc50f14e63f2426fb87a81bc46ab3c8c>. (2018). Fecha consulta: 09/06/2020.