

MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS DE SUMINISTRO DE AGUA DE LAS CIUDADES LA PAZ Y EL ALTO, BOLIVIA

HYDROLOGIC MODELING AND SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE ON WATER SUPPLY CATCHMENTS OF THE CITIES LA PAZ AND EL ALTO, BOLIVIA

Marisa Escobar¹, Nilo Lima¹, David Purkey¹, David Yates² y Laura Forni¹

Resumen

En este artículo se presenta un enfoque útil para la modelación hidrológica de cuencas de suministro de agua potable incluyendo incertidumbres como el cambio climático. La modelación se realizó bajo la plataforma Water Evaluation And Planning System (WEAP) y comprende aporte de glaciares, precipitación-escorrentía, infraestructura hidráulica y demanda urbana.

El estudio caso está referido a los sistemas de agua de las ciudades de La Paz y El Alto que están ubicadas en la región Occidental de Bolivia. Estas ciudades son abastecidas de agua por pequeñas cuencas glaciares de la Cordillera Real. Por el crecimiento acelerado de la población especialmente en la ciudad de El Alto existen problemas en el abastecimiento de agua, y esto podría exacerbase por los impactos negativos del cambio climático por ejemplo el retroceso de los glaciares. Existe una necesidad urgente de conocer los posibles impactos del cambio climático, para esto es necesario tener un mayor conocimiento del potencial hídrico de las cuencas. Sin embargo, existen bastantes limitaciones respecto a la disponibilidad y calidad de los datos hidro-climáticas. Asimismo, no se cuenta con datos de escenarios de clima futuro a la escala de las cuencas que permitan modelar los posibles cambios esperados. En ese sentido en esta investigación se desarrolló una herramienta útil para la planificación de recursos hídricos bajo la incertidumbre de datos históricos y futuros. Los resultados para un horizonte de tiempo 2010-2050 muestran que los glaciares podrían desaparecer en los próximos 30 años, y esto podría tener implicaciones en la respuesta hidrológicas de las cuencas con la reducción de la oferta de agua. La ciudad de El Alto sería la más afectada, ya que se advierten serios problemas en el abastecimiento de agua. Se debe pensar en estudiar estrategias de nuevo almacenamiento de agua como medidas de adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático, modelación hidrológica, retroceso glaciar, planificación de recursos hídricos, Cordillera Real

Abstract

In this paper we present a useful approach for modeling watershed hydrological water supply including uncertainties such as climate change. The modeling was carried out under the platform Water Evaluation And Planning System (WEAP) and includes contribution of glaciers, rainfall-runoff, hydraulic infrastructure and urban demand.

The study case framework focuses on water systems in La Paz and EL Alto cities in the Westside region of Bolivia. These cities have as water sources, small basins with glacier influence because of the "Cordillera Real" (The Andean Mountains). The fast population growth rate in these cities, especially El Alto City creates problems in drinking water availability, and it could increase because of negative effects of climate change. For these reasons is necessary to develop knowledge about the potential availability in these basins, however there is a lack of reliable weather data which make hard an ideal analysis. Information about future climatic sceneries in micro scale is not available also (at level of basins in our study area). In that sense this study has developed useful tools for water resource planning policies under the uncertainty of projected and historical data.

The results for threshold in time of 2010 to 2050 shows that glaciers could disappear in the next 30 years, and this could have implications in water resource availability, with the consequently reduction of water supply volume, El Alto city would be the most affected. Policy makers must to define new water sources to deal with climate change effects in long term.

Keywords: Climate change, hydrologic modeling, glacier retreat, water resources planning, Cordillera Real

INTRODUCCIÓN

El documento técnico del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC según sus siglas en el idioma inglés) (Bates et al., 2008) indica que el cambio climático podría afectar de manera notable

al ciclo hidrológico, alterando la intensidad y la distribución temporal y espacial de la precipitación, de la escorrentía de superficie y de la recarga de agua, produciendo impactos diversos sobre diferentes

¹ Stockholm Environment Institute—US Center, Davis, California, Water Group; marisa.escobar@sei-us.org

² National Center for Atmospheric Research; yates@ucar.edu

ecosistemas naturales y actividades humanas. En el quinto informe del IPCC se reporta que la temperatura mundial se ha incrementado en 0.8 °C desde principios del siglo XX y se estima que a mediados del presente siglo de continuar las emisiones de CO₂ como viene aconteciendo en la actualidad habrá un aumento adicional de temperatura de 1.4 a 2.6°C. La principal conclusión del mencionado informe es que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y desde 1950 son muchos los cambios observados en todo el sistema climático que no tienen precedentes en los últimos decenios a milenios (IPCC, 2013). El *Cuarto Informe de Evaluación* del IPCC muestra que durante el siglo XX, los cambios en la precipitación en Latinoamérica fueron irregulares, con disminuciones en zonas tales como el flanco occidental de Los Andes y aumentos en otras zonas como el Cono Sur y en algunas zonas geográficas de la Región Andina en Ecuador, Bolivia y Argentina (IPCC, 2007). Las temperaturas medias por década muestran una tendencia ascendente en el Cono Sur y en la Región Andina, y también las temperaturas mínimas, mientras que las temperaturas máximas no muestran una tendencia uniforme.

La consecuencia más importante del aumento de las temperaturas en los últimos 30 años ha sido el retroceso crítico de glaciares en Bolivia, Perú, Colombia y Ecuador. Esto ha aumentado la escorrentía, pero los glaciares son importantes depósitos de agua, y se han disminuido e inclusive agotado en algunos lugares. Los estudios indican que en los próximos 15 años, los pequeños glaciares andinos podrían desaparecer, afectando la disponibilidad de agua y la generación de energía hidroeléctrica, mientras que

los glaciares más grandes van a seguir contrayéndose (Ramirez et al., 2001; Francou et al., 2003; Bates et al., 2008). Los cambios en las contribuciones de agua de los glaciares afectarán al suministro de agua para múltiples usos, incluyendo la agricultura a pequeña y gran escala, los servicios urbanos de agua y la energía hidroeléctrica.

A lo largo de la región Andina existen además otros agentes de cambio y presiones sobre los sistemas hidrológicos que proveen agua, como la urbanización y explosión demográfica por migración del campo a la ciudad, por ejemplo las ciudades de La Paz y El Alto (Figura 1); las mismas están ubicadas en la Provincia Murillo del Departamento de La Paz del Estado Plurinacional de Bolivia (Figura 2).

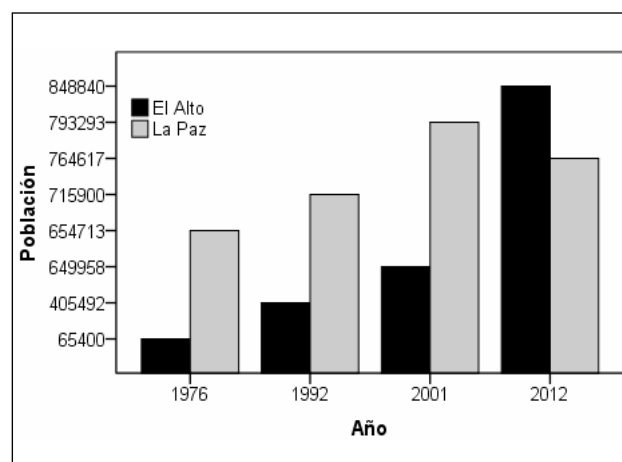


Figura 1. Crecimiento de población en las ciudades de La Paz y El Alto (Fuente: Instituto Nacional de Estadística)

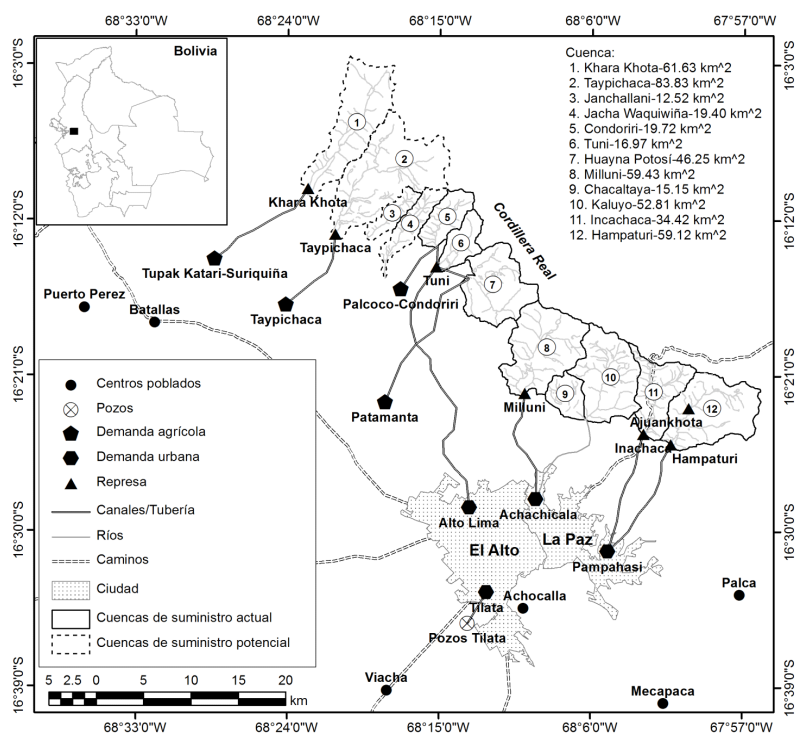


Figura 2. Área de estudio de la modelación hidrológica del sistema de agua de La Paz y El Alto (Fuente: Elaboración propia)

En la actualidad operan cuatro sistemas de agua potable en La Paz y El Alto: Achachicala, Pampahasi, El Alto y Tilata (Figura 2). La fuente de suministro de agua de los tres primeros son pequeñas cuencas hidrográficas ubicadas en la Cordillera Real; el aporte de estas cuencas se almacena en represas y se conduce a las plantas de tratamiento. El sistema Tilata aprovecha aguas subterráneas mediante 32 pozos de una profundidad promedio de 90 metros. Desde el 2007, el abastecimiento de agua a ambas ciudades ha estado a cargo de la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento (EPSAS).

Las cuencas de suministro de El Alto cuentan con una importante presencia de glaciares, el derretimiento acelerado de glaciares debido a los cambios globales podrían tener implicaciones en la respuesta hidrológica de las cuencas (Ramírez, 2008). El análisis multitemporal de los glaciares de la Cordillera Real sobre restitución de fotografías aéreas muestra que los glaciares perdieron el 43% de su volumen entre 1963 y 2006 (Soruco et al., 2009). En el caso específico de las cuencas Condoriri ha perdido 44% de su superficie glaciar y la cuenca Tuni el 55% entre 1956 y 2006 y las tendencias indican que desaparecerían en los próximos 30 años (Ramírez 2008). Un análisis para el periodo 1939-1998 determinaron que la temperatura en los Andes tropicales ha aumentado en 0.1 a 0.11 °C/década desde 1939 (Vuille & Bradley, 2000).

Existe una necesidad urgente de comprender los impactos del cambio climático sobre el suministro de agua, de manera que esto permita tomar acciones para garantizar la cobertura de los requerimientos de agua futuros. Para evaluar el potencial hidrológico de las cuencas existen limitaciones referentes a la disponibilidad y calidad de los datos. El monitoreo de variables climáticas como temperatura y precipitación es muy deficiente, ya sea a nivel temporal y espacial. Por iniciativa del programa GREAT-ICE del Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD) y el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés (IHH-UMSA) en el año 1991 se inició el monitoreo de algunos glaciares tropicales en la Cordillera Real (Zongo), y posteriormente instalaron sensores para el monitoreo de niveles de agua en las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí (sistema El Alto). Por otro lado, la EPSAS en el año 2000 instaló pluviómetros cerca de los embalses. Sin duda estas acciones fueron un gran avance para poder comprender el ciclo hidrológico de las cuencas, es así que en base a estos esfuerzos se han realizado una serie de trabajos que permitieron generar datos y conocimiento inicial sobre el comportamiento de la hidrología regional. La otra limitación es la falta de datos de escenarios de clima futuro a la escala de cuencas pequeñas, que permitan modelar los aportes de agua futuro y estimar las pérdidas probables (Ramírez, 2008).

En este contexto, la pregunta de investigación es ¿qué tipo de herramientas se pueden desarrollar

para contribuir a la planificación del recurso hídrico de la región bajo el contexto de incertidumbre de datos históricos y futuros? Para responder a esta pregunta, en esta investigación se realizó una modelación hidrológica bajo la plataforma Water Evaluation And Planning System (WEAP) en las cuencas de actual suministro de las ciudades La Paz y El Alto, y en las posibles cuencas alternativas planteadas en el Plan Maestro de Agua Potable del año 1994. Asimismo se buscó evaluar cuales podrían ser las implicaciones del cambio del clima futuro en el abastecimiento de agua en un horizonte de tiempo 2011-2050 bajo un ambiente de incertidumbres. El enfoque y el tipo de modelo desarrollado podrían ser útiles en el proceso de toma de decisiones en la planificación de recursos hídricos y adaptación al cambio climático.

METODOLOGÍA

Modelo WEAP

La plataforma WEAP como herramienta para la planificación de recursos hídricos incluye un modelo de balance hídrico para representar los procesos hidrológicos dentro de un sistema de cuencas (Yates et al., 2005a, 2005b). Este algoritmo permite representar el comportamiento del balance hídrico desde las precipitaciones en la cuenca alta con características fisiográficas de montaña con pendientes escarpadas a muy escarpadas y valles en forma de V, y cómo estas contribuyen al flujo base de las aguas subterráneas. Segundo, en la cuenca baja, zona de llanura, contribuyen a los acuíferos aluviales y estos pueden contribuir a los ríos o pérdidas por filtraciones, es decir existe una interacción.

Se trata de un modelo cuasi físico unidimensional que puede utilizarse a diferentes pasos de tiempo. En el caso de este estudio, se planteó el uso de un paso de tiempo mensual que permite una mirada hacia las proyecciones de cambio climático futuras. El algoritmo requiere datos de entrada como precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento de nieve, latitud, y cobertura vegetal; además se debe delimitar las unidades básicas de modelación, *catchments*, en base a las cuencas y cobertura vegetal (CCG-UC & SEI, 2009). De esta manera se estiman los componentes del balance hidrológico como evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial y flujo base. Los datos de caudales observados permiten la calibración del modelo. En la zonificación de las unidades básicas de modelación en zonas montañosas se debe incluir la altitud, lo cual permite una mejor representación de los procesos hidrológicos (CCG-UC & SEI, 2009).

En las cuencas de suministro de La Paz y El Alto existen glaciares tropicales, por tanto existe la necesidad de evaluar el aporte de los mismos, el WEAP no cuenta con un modelo hidroglaciológico. Sin embargo se han desarrollado algunos metodologías en la cuenca del río Santa-Perú modificando el modelo

grado-día a grado-mes (Condom et al., 2012), otro en los glaciares de Himalaya con modificación al anterior usando la radiación neta en vez del factor grado-mes (Mehta et al., 2010) y en la cuenca Paute-Ecuador simplificando la representación del modelo grado-mes, denominándolo Ice-KISS (Pouget, 2011). Estos algoritmos son acoplados al modelo de precipitación-escurrimiento en WEAP. En esta investigación se utilizó modelo desarrollado en la cuenca del río Santa.

El modelo glaciar grado mes modela la dinámica de la extensión de la superficie del glaciar y el aporte de agua a la salida de la cuenca glaciar (Condom et al., 2012). Cada banda de elevación en cada cuenca se divide en zonas glaciares y no glaciares, los glaciares son conceptualizados por el modelo grado-mes. El área inicial del glaciar que puede ser obtenido de imágenes satelitales o fotografías aéreas es usada para el cálculo del volumen glaciar inicial mediante una ecuación empírica (Bahr et al., 1997). Para cada mes del año hidrológico el volumen de escurrimiento superficial en la cuenca es la suma de la fusión de nieve, y glaciar y el escurrimiento modelado por *Soil Moisture (modelo hidrológico de WEAP)* en zonas no glaciares. Al final del año hidrológico calcula el balance de masas para evaluar los cambios en el volumen total del glaciar (Condom et al., 2012). El modelo glaciar utiliza solo tres parámetros: T_0 que es la temperatura crítica para la fusión glaciar, a_{ice} y a_{sonw} , factor grado-mes de hielo y nieve respectivamente.

Disponibilidad y procesamiento de datos de entrada

En las cuencas de suministro de agua potable (vertiente Oeste de la Cordillera Real) existe una deficiencia en el monitoreo de las variables de base climática. EPSAS cuenta con un base de datos de pluviometría desde el año 2000, pero esta red está ubicada en las represas (zona baja). En general, no existe información en la zona alta, sin embargo existen datos en la cuenca glaciar Zongo desde el año 1991, la cual queda en la vertiente Este de la Cordillera Real. En las ciudades La Paz y El Alto existen datos extensos de precipitación, temperatura, humedad relativa y vientos en las estaciones meteorológicas San Calixto, Laykacota y El Alto-Aeropuerto desde el año 1917, 1945 y 1942 respectivamente. De las cuatro posibles nuevas cuencas de suministro ubicadas al Norte del área de modelación, en tres no existe ninguna información climática. En la cuenca Khara Khota donde si existen datos, se encuentra información sobre precipitación, humedad relativa, temperatura y viento.

Respecto a la información sobre caudales medidos, en la mayoría de las cuencas de suministro actual especialmente en Tuni, Condoriri y Huayna Potosí existen base de datos del programa GREAT ICE-IRD. Estos puntos de medición son de mucha importancia ya que están ubicados a una altitud por encima de 4500 m donde existe poca intervención humana que en general es la característica de todas las cuen-

cas en estudio. Por otro lado, el SENAMHI cuenta con puntos de medición en la zona aguas abajo de las cuencas Hampaturi y Kaluyo, pero debido a su ubicación estos puntos son más representativos de zonas donde existe bastante intervención humana, como agricultura y zonas peri-urbanas.

Los datos de precipitación fueron procesados para el análisis de homogeneidad por el método Vector Regional (Hiez, 1977; Brunet-Moret, 1979) que está incorporado en el software *Hydraccess (Vauchel, 2005)*. Las estaciones Hichucota, Tuni, Milluni, Alto Achachicala, Incachaca y Hampaturi fueron seleccionadas como estaciones base para la modelación en WEAP, ya que estas se encuentran ubicadas al interior de las cuencas. Los vacíos de datos en los registros fueron rellenados por correlación múltiple con estaciones con registros extensos y continuos como San Calixto, Laykacota y El Alto-Aeropuerto. Con base en la información procesada se generaron isoyetas mediante interpolación con funciones de base radial (Figura 3). Por otra parte, para el cálculo de la temperatura a diferentes altitudes se usó un gradiente térmico vertical de 0.800°C/100 m, estimado después de analizar las estaciones Achumani, Laykacota, El Alto-Aeropuerto, Alto Achachicala, Hichucota y Mevis (Zongo).

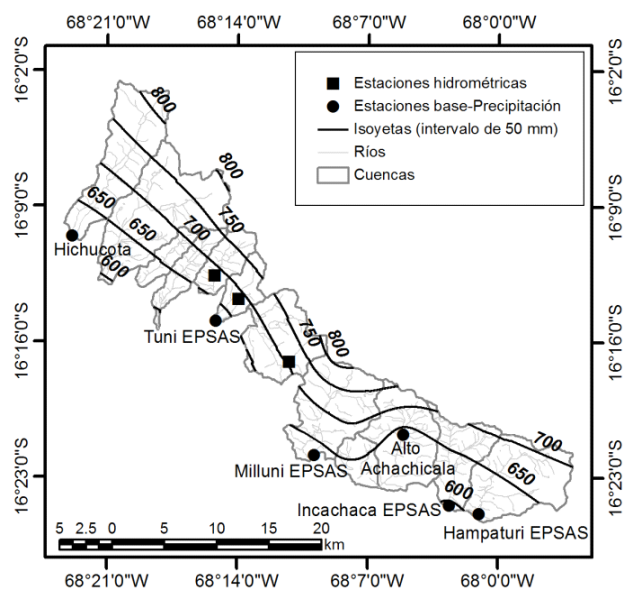


Figura 3. Isoyetas interpoladas para las cuencas de estudio (Fuente: Elaboración propia)

Para delimitar las unidades básicas de modelación, se utilizó un modelo numérico de elevación con resolución espacial de 20 m elaborado con la Carta Nacional escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM-Bolivia); el modelo permitió delimitar las cuencas y realizar una clasificación de bandas de elevación con intervalos iguales de 300 m. La cobertura y uso de la tierra se obtuvo mediante interpretación visual y digital sobre una imagen Landsat TM 5 de fecha septiembre/1994, donde se definieron cinco categorías: glaciares, vegetación dispersa de gramíneas y arbustos, bofedales, cuerpos de agua y aflo-

ramientos rocosos. La intersección de cada banda de elevación con los límites de la cuenca y la cobertura de la tierra, permitió definir las unidades básicas de modelación.

Escenarios de cambio climático

El dominio de la modelación hidrológica es muy pequeño, ya que el área de las cuencas modeladas es menor a 100 km². El enfoque utilizado para desarrollar los escenarios de cambio climático fue el uso directo de GCMs, en este caso la probabilidad de condiciones futuras con *Regional Climate-Change Projection from Multi-Model Ensembles (RCPM, <http://rcpm.ucar.edu/>)*, que son resultados de un análisis estadístico de proyecciones de diferentes

modelos climáticos, utilizando un modelo estadístico Bayesiano para sintetizar la información de varios GCMs en una función de densidad de probabilidad de cambio en la temperatura y precipitación (Tebaldi et al., 2005).

Primero se realizó un análisis estadístico de la estructura de datos históricos de la estación meteorológica con registro más extenso, que en este caso es la estación San Calixto con datos desde el año 1917 (Figura 4), la cual está ubicada a una altitud de 3.658 msnm. A partir de esto se generó una matriz de transición de dos estados de probabilidad (Tabla 1). Con base en este análisis se realizó la extensión de series de tiempo para las estaciones base usada en WEAP.

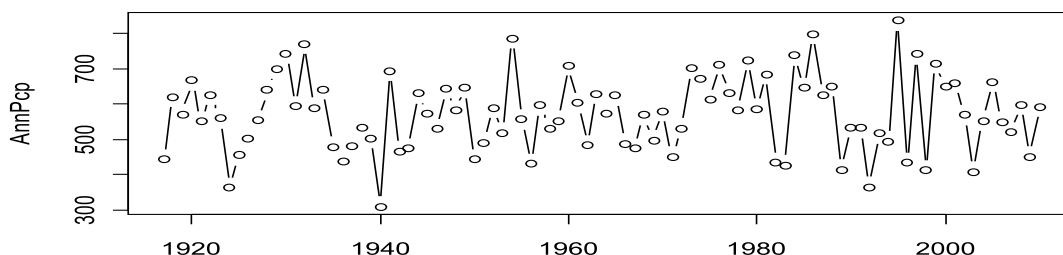


Figura 4. Precipitación histórica de la estación San Calixto (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 1. Matriz de transición de estados de probabilidad en la estación meteorológica San Calixto

AÑO ACTUAL	PROBABILIDAD SIGUIENTE AÑO DEBAJO DE PROMEDIO (1)	PROBABILIDAD SIGUIENTE AÑO ENCIMA DE PROMEDIO (2)
DEBAJO DE PROMEDIO	55%	45%
ENCIMA DE PROMEDIO	43%	56%

Fuente: Elaboración propia

Segundo, se usó el RCPM para la región de interés (Figura 5). Esta es una técnica estadística para calcular los cambios esperados del clima en el futuro para una región determinada sobre la base de datos de observación y los resultados de un conjunto de Modelos Climáticos Globales (GCM) y suposiciones sobre emisiones futuras. Finalmente se aplicaron los cambios esperados del análisis probabilístico del RCPM a las series sintéticas mensuales de precipitación. Se realizó una combinación de gamas de opciones, desde escenarios secos y muy calientes (Figura 6), que en adelante se denominan como pesimistas, hasta escenarios húmedos y calientes (Figura 7), denominados como optimistas de acuerdo con la forma en que estos escenarios podrían beneficiar al sistema al generar mayor disponibilidad de agua.

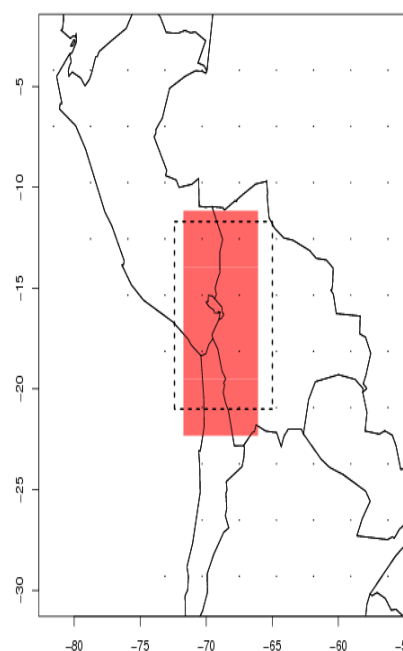


Figura 5. Dominio del análisis en RCPM (Fuente: Elaboración propia)

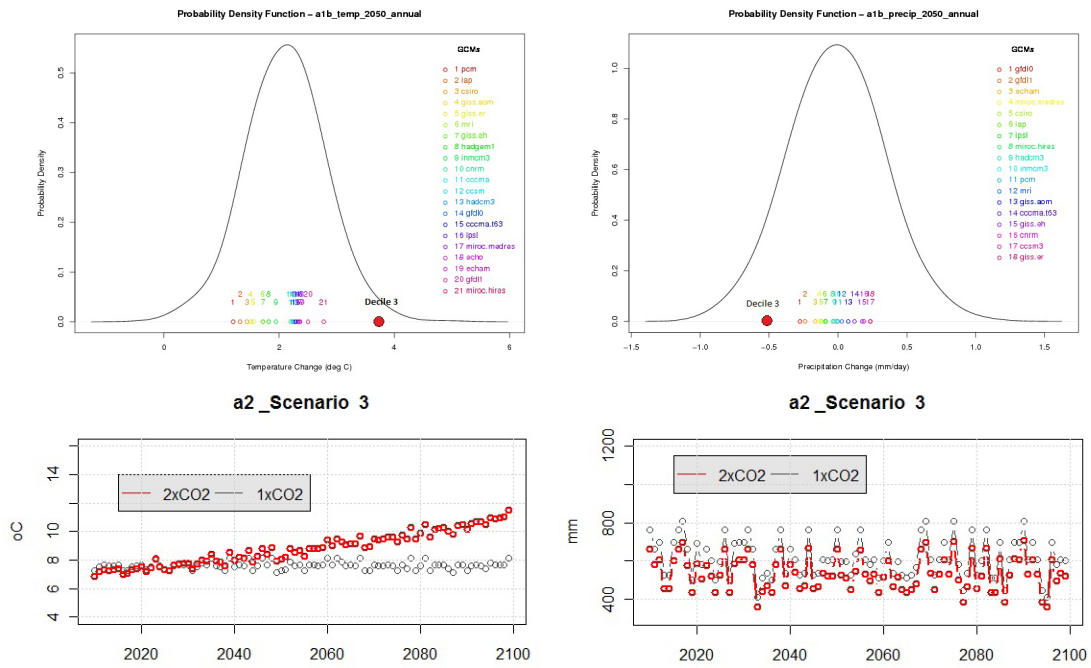


Figura 6. Combinación de escenario seco y muy caliente (Fuente: Elaboración propia)

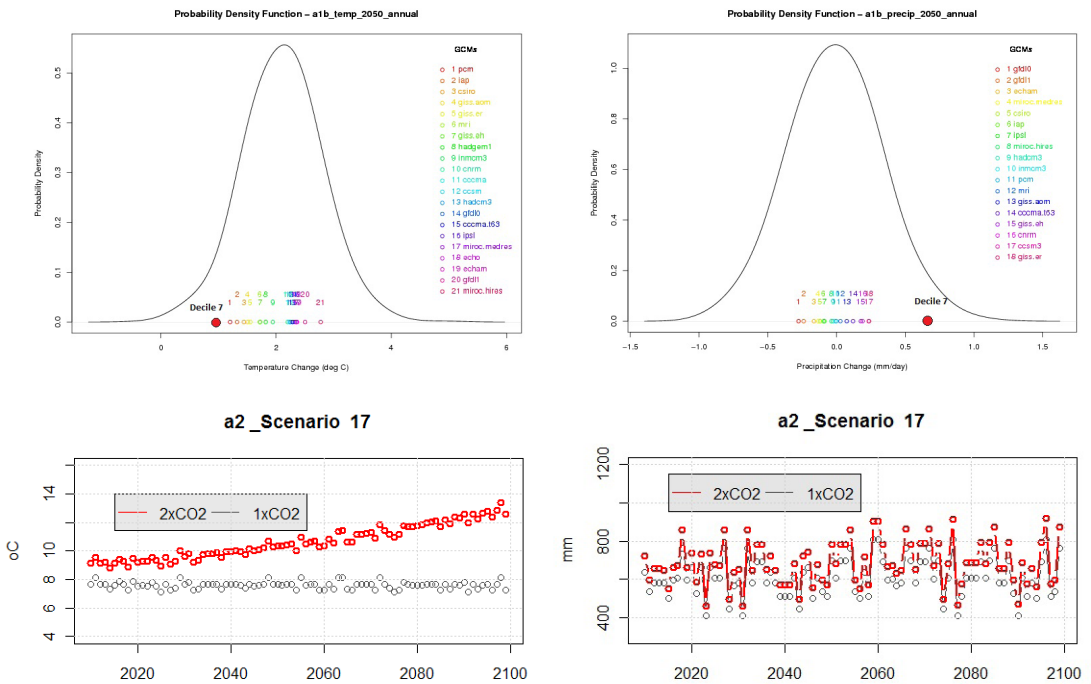


Figura 7. Combinación de escenario húmedo y caliente (Fuente: Elaboración propia)

Se generaron 18 escenarios de temperatura y 18 escenarios de precipitación, de los cuales se seleccionaron seis combinaciones de temperatura y precipitación, excluyendo los más extremos. Con este procedimiento se generaron las proyecciones climáticas para el futuro.

RESULTADOS

Calibración y validación del modelo

La estrategia de calibración para el área de estudio consistió primero en la calibración del módulo glaciar grado-mes para la cuenca glaciar Zongo y se-

gundo la calibración de la precipitación-escorrentía para las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí. La cuenca glaciar Zongo tiene un área de 3.5 km² con cobertura glaciar del 65% y el resto conformada por afloramientos rocosos constituidos de granodiorito impermeable, por tanto casi la totalidad de agua de fusión transita por la estación limnométrica ubicada sobre una altitud de 4830 m (Leonardini, 2010). Para el periodo de tiempo de calibración (2004-2010) los parámetros de calibración obtenidos fueron: T_0 en 0.5 °C, a_{ice} en 350 mm mes⁻¹ °C⁻¹ y a_{sonw} en 550 mm mes⁻¹ °C⁻¹. Para evaluar la bondad de ajuste del modelo se utilizó el índice de eficiencia de Nash-

Sutcliffe, que es una medida estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de datos de medición (Nash & Sutcliffe, 1970). Cuando el índice de eficiencia es igual a 1 el ajuste es perfecto entre los datos modelados y observados. El valor de índice de calibración obtenido es 0.6 que corresponde a un nivel adecuado de calibración considerando las limitaciones en datos. Por otro lado, la desviación relativa de los caudales o el sesgo fue estimado en 3.7%, demostrando una adecuada calibración. En la Figura 8 se muestra la distribución mensual de caudales calibrados, donde se evidencia que existe una adecuada representación de los patrones temporales.

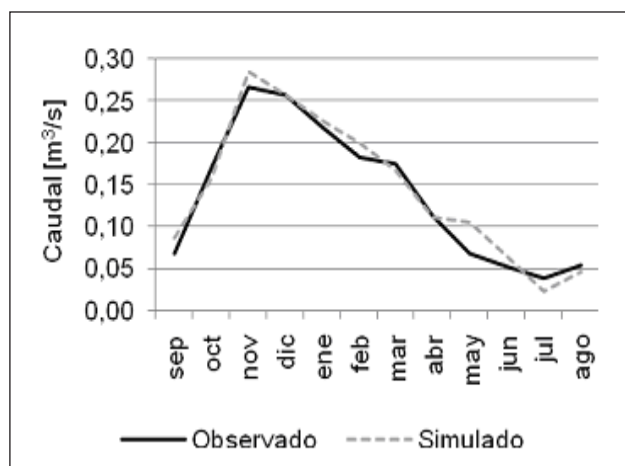


Figura 8. Caudal observado y simulado medio mensual en la cuenca glaciar Zongo durante el periodo 2004-2010 (Fuente: Elaboración propia)

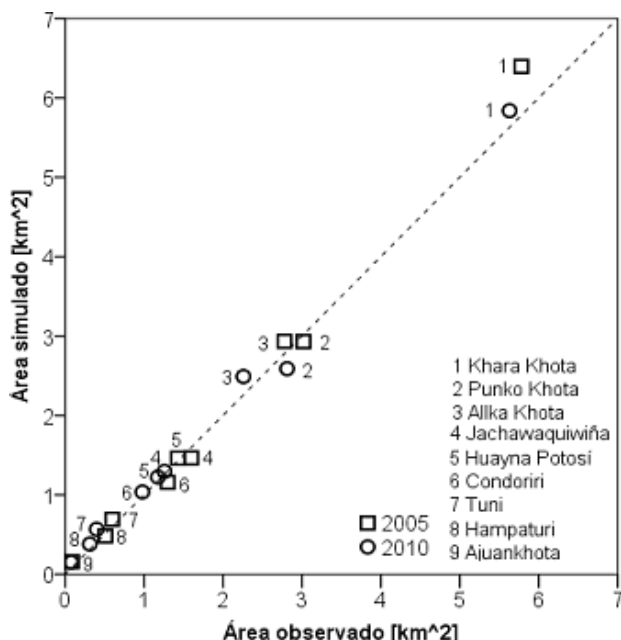


Figura 9. Diagrama de dispersión de áreas glaciares observados y simulados para el año 2005 y 2010 (Fuente: Elaboración propia).

Los parámetros de calibración de Zongo fueron extrapolados a los glaciares donde no se cuenta con

datos. Para verificar su representación adecuada el área modelada se comparó con el área digitalizada sobre una imagen del satélite Landsat TM 5. En la Figura 9 se puede observar dicha comparación en un diagrama de dispersión para el año 2005 y 2010, donde los resultados tienden a alinearse a una línea 1:1 indicando una buena correspondencia. Sin embargo, considerando la resolución espacial de la imagen usada que es 30 m, pueden existir errores en el cálculo del área digitalizada u observada. La evolución del área glaciar indica que la cuenca Condoriri ha perdido 36% de su superficie glaciar y la cuenca Tuni el 47% entre 1995 y 2010.

Tabla 2. Parámetro de calibración en las cuencas Condoriri, Tuni y Huayna Potosí.

Parámetro	Roca	Vegetación dispersa	Bofedales
Coefficiente de cultivo, Kc	0.95	0.9	0.9
Capacidad de almacenamiento en la zona de raíces, Sw [mm]	500	800	1000
Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda, Dw [mm]	500	500	500
Factor de resistencia a la escorrentía, RRF	5, 1	5, 1	5, 1
Conductividad de zona de raíces, Ks [mm/mes]	400, 50	400, 50	400, 50
Conductividad de zona profunda, Kd [mm/mes]	50	50	50
Dirección preferencial de flujo, f	0.9	0.7	0.3
Z1 [%]	10	10	10
Z2 [%]	30	30	30

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de calibración de precipitación-escorrentía se recomienda primero entender todos los parámetros que intervienen en *Soil Moisture Model* de WEAP y segundo conceptualizar las características hidrológicas particulares de las cuencas asociadas a la cobertura y uso del suelo, así también a otras características fisiográficas. En el caso de las cuencas en estudio se realizaron algunos ajustes en la Conductividad en la Zona de Raíces (Ks) y Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF). En el primer caso, Ks, es un parámetro no lineal que puede definirse en función de la precipitación ya que en estas cuencas el suelo al inicio del año hidrológico (septiembre)

se encuentra muy seco. Cuando existe precipitación esta no escurre directamente sino que el escurrimiento empieza una vez el suelo está lo suficientemente saturado para liberarlo. Entonces para la calibración de este parámetro se planteó la siguiente hipótesis: menos conductividad en la época seca (50 mm/mes) y mayor conductividad en la húmeda (400 mm/mes). Asimismo para el RRF, cuando el suelo está seco existe baja escorrentía (RRF=5), ya que gran parte de la precipitación se infiltra y en la época húmeda debido a que el suelo se encuentra saturado existe mayor escorrentía (RRF=1). El umbral de precipitación calibrado para realizar estos ajustes en las cuencas fue 100 mm. Los restantes parámetros se pueden observar en la Tabla 2.

Los resultados de la calibración son aceptables. El parámetro de eficiencia Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) en las tres cuencas oscila entre 0.6 y 0.73, pero en Tuni hay una subestimación del 17.57% según la medida del sesgo (Tabla 3). Los parámetros de calibración del fueron extrapolados para las cuencas sin caudales observados bajo los siguientes criterios: las cuencas son de régimen natural, es decir no existe mucha intervención humana y por tanto la cobertura y uso de la tierra es prácticamente similar en todos; están sobre una altitud mayor a 4300 m; tienen características geológicas similares, donde se observan rocas sedimentarias del Silúrico y Ordovícico, batolitos del Triásico y depósitos de morrena del Cuaternario (GEOBOL, 1995); contienen formación de suelos in situ de textura franco arenoso y franco arcillo arenoso. Según los criterios anteriores, se consideró que era posible extrapolar la calibración de las cuencas con información a aquellas cuencas exploradas como nuevas fuentes. Aunque esto puede generar fuentes de incertidumbre en las predicciones, esta incertidumbre no se ignora, sino que se asume de forma que los datos obtenidos constituyen estimados y no datos precisos.

Tabla 3. Índices/métricas de la calibración del modelo hidrológico

Estación hidrométrica	Nash-Sutcliffe	Bias [%]
Tuni	0.73	-17.57
Condoriri	0.60	-0.44
Huayna Potosí	0.65	6.42

Fuente: Elaboración propia

Comparación de caudales modelados por WEAP y AguAAndes

El AguAAndes es un modelo sofisticado de balance hídrico distribuido espacialmente que ha sido desarrollado para cuencas con escasos de datos y características muy heterogéneas. Además provee herramientas para el análisis de escenarios de cambio climático y uso de la tierra; asimismo es posible el análisis de opciones de políticas o intervención. El

modelo está basado en el modelo hidrológico FIES-TA (Mulligan & Burke, 2005; Bruijnzeel et al., 2011) y procesos físicos; además no requiere calibración. Los componentes que utiliza son la distribución de la precipitación a través de la interacción con el viento, radiación solar, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y cubierta vegetal (<http://www.policysupport.org/aguaandes>). El modelo opera sobre una plataforma WEB y a una resolución espacial de 1 km² o 1 ha. Cuando se procesa para alguna región de la Cordillera de Los Andes el sistema se denomina AguAAndes, ahora si se aplica en otras partes del mundo se conoce como WaterWorld (Mulligan, 2012).

Los caudales modelados por AguAAndes corresponden al periodo 1950-2000, mientras que la modelación en WEAP se realizó para el periodo 1995-2010. Los resultados para algunas cuencas estudiadas podemos ver en la Tabla 4. En el caso de cuencas con datos de caudales observados (El Alto) los resultados de comparación son relativamente aceptables, al igual que en las cuencas potenciales; pero en las cuencas de suministro de La Paz AguAAndes sobreestima los caudales. Sin embargo no es correcto dicha comparación, ya que la oferta calculada corresponde a distintos periodos de tiempo. A objeto de validar se efectuó la prueba de U Mann Whitney, que es un test no paramétrico que permite comparar la distribución de dos poblaciones.

El test considera que la hipótesis alterna (H_a) establece que las distribuciones son distintas, mientras que la hipótesis nula (H_0) que las poblaciones tienen la misma distribución. En base a los resultados mostrados en la Tabla 5, el valor U adoptado es 44.5 el cual es más grande que el nivel de significancia por tanto se rechaza la H_0 y se acepta la H_a , es decir que las poblaciones provienen de distribuciones idénticas. Esta técnica de comparación puede ser una forma de validación de la extrapolación de los parámetros de calibración.

Tabla 4: Comparación entre caudales modelados por WEAP y AguAAndes

Fuente	Ciudad	Cuenca	AguAAndes [m ³ /s]	WEAP [m ³ /s]
Actual	El Alto	Tuni	0.26	0.29
		Condoriri	0.33	0.36
		Huayna Potosí	0.73	0.70
	La Paz	Milluni	0.93	0.74
		Chacaltaya	0.21	0.12
		Kaluyo	0.95	0.43
Potencial	El Alto	Incachaca	0.72	0.32
		Khara Khota	1.01	1.10
		Taypichaca	1.37	1.33
		Jachawaquiwiña	0.30	0.33

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Resultados del Test U Mann Whitney

Modelo	N	R	U	$\alpha=0.05$
AguAAndes	10	110.5	44.5	Se acepta H_0
WEAP	10	99.5	55.5	Se rechaza H_a

N: Tamaño de la muestra

R: Suma de rangos

U: Valor de Mann Whitney

Oferta y demanda de agua

Para la modelación de la demanda se utilizó la base de datos de EPSAS que incluye: población, consumo per cápita y volúmenes de embalses observados. Los datos finales de entrada al modelo se pueden observar en la Tabla 6. La oferta de agua determinada con el modelo WEAP para las cuencas en estudio para el periodo 1995-2010 se muestra en la Tabla 7. En el caso de las cuencas de suministro El Alto la oferta oscila de 0.29 a 0.70 m³/s donde el aporte glaciar representa entre 20 a 28%. En la época de lluvia el caudal máximo medio está entre 0.77 y 1.83 m³/s; mientras en la época seca 0.04 y 0.11 m³/s (Figura 10). El caudal de ingreso al embalse Tuni en el año 2010 fue de 1.3 m³/s.

Tabla 6: Datos para modelación de la demanda de los sistemas de agua de la Paz y El Alto

Sistema	Ciudad	Población [hab]	Consumo per cápita [m ³ /año]	Perdidas [%]
Achachicala	La Paz	195,000	81	33
Pampahasi		300,000	52	33
El Alto	El Alto	1'150,000	19	38

Fuente: en base a base de datos EPSAS

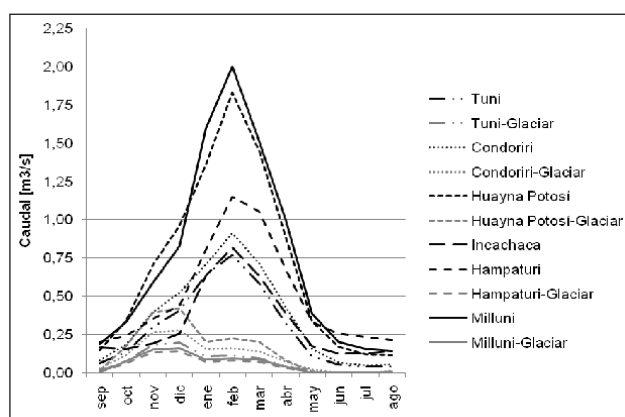


Figura 10. Caudal de aporte de las cuencas de suministro de agua de las ciudades de La Paz y El Alto (Fuente: Elaboración propia)

La demanda de agua modelada para el sistema El Alto en el año 2010 fue del 1.11 m³/s, del cual el 38% corresponde a pérdidas en el sistema. Si bien la oferta en las cuencas es mayor que la demanda, pero

existen pérdidas por evaporación en los embalses. Además la capacidad máxima de la infraestructura de conducción del embalse hasta la planta de tratamiento es de 0.968 m³/s. Es así que la cobertura modelada es solo del 87%. El sistema está al límite de su capacidad de producción, por esta razón se extrae agua del embalse Milluni (sistema Achachicala) en un total de 0.055 m³/s y ésta se inyecta al sistema El Alto.

Considerando la demanda actual, es necesario y urgente la inversión en nueva infraestructura hidráulica en otras cuencas planteadas en el Plan Maestro de Agua Potable del año 1994, como Khara Khota y Taypichaca, donde el caudal estimado fue de 1.10 y 1.33 m³/s respectivamente. En estas cuencas la presencia de glaciares es mucho más importante en términos de área, y por tanto el aporte glaciar esta en el orden del 49 y 43% respectivamente.

En las cuencas de suministro del sistema Pampahasi, Hampaturi e Incachaca, el caudal es de 0.49 y 0.32 m³/s respectivamente, haciendo un total de 0.81 m³/s (Tabla 7). El aporte glaciar modelado en la cuenca Hampaturi es del orden del 10%. La demanda modelada para el año 2010 fue de 0.74 m³/s. La cobertura modelada considerando todas las pérdidas en el sistema es del 100%.

En el sistema Achachicala la oferta de la cuenca Milluni es de 0.74 m³/s. La demanda calculada para el 2010 es 0.75 m³/s (Tabla 7). Además existe una aducción en la cuenca baja del río Kaluyo (Choqueyapu) con una capacidad máxima de 0.2 m³/s cerca a la planta de tratamiento, es así que se logra una cobertura del 100%.

Tabla 7: Oferta de agua en las cuencas de suministro de agua actual y potencial de las ciudades La Paz y El Alto para el periodo 1995-2010.

Sistema	Abastece la ciudad de	Cuenca	Caudal total [m ³ /s]	Aporte Glaciar [m ³ /s]
El Alto	El Alto	Tuni	0.29	0.07 (24%)
		Condoriri	0.36	0.10 (28%)
		Huayna Potosí	0.70	0.14 (20%)
Achachicala	La Paz	Milluni	0.74	0.06 (8%)
Incachaca		0.32		
Pampahasi	La Paz	Hampaturi	0.49	0.05 (10%)
Nuevas cuencas		El Alto	Khara Khota	1.10
	Taypichaca		1.33	0.57 (43%)
	Janchallani		0.14	
	Jachawaquiwiña		0.33	0.14 (42%)

Fuente: Elaboración propia

Impacto del cambio climático en el abastecimiento de agua

El análisis del impacto del cambio climático en el abastecimiento de la demanda se realizó para un periodo de tiempo a mediano plazo 2011-2026 y a largo plazo 2035-2050. Los cambios de precipitación y temperatura son variables para cada estación base usada en WEAP. En la Tabla 8 se muestran los cambios esperados en el clima respecto al periodo histórico 1995-2010, en el caso de la temperatura a mediano plazo se espera un incremento hasta 1.1 °C y a largo plazo 1.8 °C. Respecto a la precipitación, en la estación base Tuni se esperan reducciones hasta 11.4% y 8.7% para los respectivos periodos de análisis.

Tabla 8: Cambios de precipitación (estación base Tuni) y temperatura a mediano y largo plazo.

Clima	Periodo			
	2011-2026		2035-2050	
	P [%]	T [°C]	P [%]	T [°C]
1	+0.8	+0.0	+6.3	+0.8
2	+1.1	+0.4	+8.7	+1.1
3	-4.9	+0.5	+3.1	+1.2
4	-5.5	+0.6	-0.4	+1.4
5	-4.8	+0.8	-8.1	+1.7
6	-11.4	+1.1	-8.7	+1.8

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la demanda de agua se realizaron proyecciones de población en base a los datos históricos y tendencias del Instituto Nacional de Estadística (INE). Donde para El Alto se estimó una población de 1'600.000, para Pampahasi 360.000 y para Achachicala 197.000 hasta el año 2050. Respecto al consumo per cápita y pérdidas se consideraron los mismos datos del periodo 1995-2010. Los cambios probables en la oferta de agua por el cambio climático en las cuencas de suministro de agua se muestran en la Tabla 9 y Tabla 10.

Los resultados indican que las reducciones de caudales son más críticos en las cuencas de suministro del sistema El Alto. Estos cambios marcados están directamente relacionados con el aporte de los glaciares, ya que las cuencas son pequeñas en comparación de otras cuencas de suministro como Incachaca, Hampaturi y Milluni. Para el periodo histórico según la modelación hubo un retroceso acelerado especialmente en las bandas de altitud 4700-5000 m y 5000-5300 m, según la reclasificación de la altitud para la modelación. Asimismo el año hidrológico 1997-1998 fueron los más cálidos de los últimos seis décadas (Vuille & Bradley, 2000). Considerando que el periodo histórico de modelación es simplemente dieciséis años, el aporte glaciar es mayor en comparación a los aportes modelados hacia el futuro, y por ende se dan cambios notables en los caudales.

En la Figura 11 se muestra la evolución del retroceso glaciar de la cuenca Tuni bajo escenarios de cambio climático, donde los resultados indican que los glaciares en dicha cuenca desaparecerían en los próximos 30 años. Esto definitivamente podría tener implicaciones en el abastecimiento de agua en el sistema El Alto, donde la demanda modelada hasta el año 2026 fue en 1.29 m³/s y hasta el año 2050 en 1.55 m³/s. Con la actual infraestructura la cobertura de la demanda para el escenario de clima pesimista a mediano y largo plazo sería del 71% y 51% respectivamente; y para el caso del clima futuro optimista 75% y 62% para ambos casos.

Tabla 9. Cambios probables en la oferta de agua para el periodo 2011-2026 respecto al periodo de referencia 1995-2010.

Cuenca	Escenario de Cambio Climático					
	1	2	3	4	5	6
Tuni	-21%	-17%	-24%	-24%	-21%	-28%
Condoriri	-19%	-14%	-19%	-19%	-17%	-22%
Huayna Potosi	-14%	-9%	-14%	-16%	-13%	-19%
Milluni	+5%	0%	-3%	-14%	-12%	-14%
Incachaca	+3%	-6%	-9%	-16%	-16%	-28%
Hampaturi	+6%	0%	-6%	-12%	-16%	-22%
Khara Khota	-28%	-15%	-15%	-13%	-7%	-7%
Taypichaca	-27%	-17%	-17%	-17%	-13%	-14%

Fuente: Elaboración propia

Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8.

Tabla 10. Cambios probables en la oferta de agua para el periodo 2035-2050 respecto al periodo de referencia 1995-2010.

Cuenca	Escenario de Cambio Climático					
	1	2	3	4	5	6
Tuni	-14%	-14%	-21%	-24%	-38%	-31%
Condoriri	-14%	-17%	-22%	-25%	-36%	-33%
Huayna Potosi	-6%	-6%	-14%	-17%	-30%	-27%
Milluni	+9%	+24%	11%	-14%	-15%	-15%
Incachaca	+9%	+3%	+0%	-13%	-25%	-28%
Hampaturi	+8%	+8%	+6%	-10%	-20%	-27%
Khara Khota	-11%	-18%	-22%	-28%	-35%	-33%
Taypichaca	-14%	-21%	-25%	-32%	-38%	-35%

Fuente: Elaboración propia

Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8.

Con base en la demanda modelada tanto para los sistemas de Pampahasi y Achachicala y los cambios esperados en los caudales de las cuencas, la cober-

tura de la demanda para el escenario de clima futuro pesimista a mediano plazo sería de 97% y 78% para ambos casos. A largo plazo las coberturas se reducirían a 94% y 68% respectivamente.

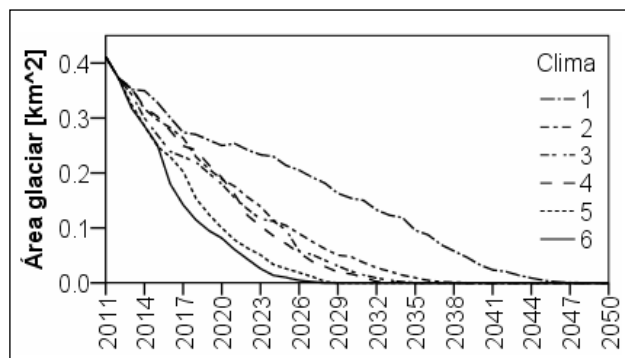


Figura 11. Retroceso glaciar en la cuenca Tuni para diferentes escenarios de clima futuro (Fuente: Elaboración propia)

Nota: la descripción de los seis escenarios de clima se puede ver en la Tabla 8

CONCLUSIONES

En esta investigación se desarrolló una herramienta que permite la modelación de los recursos hídricos incluyendo incertidumbres como cambio climático que puede ser útil en la planeación. Sin embargo, se deben hacer algunas consideraciones. El módulo glaciar usado es simple debido a las limitaciones en datos, sería adecuado usar un modelo basado en el balance energético.

La modelación hidrológica en zonas de montaña como el área estudiada es bastante compleja, debido a la escasez de datos y a la alta variabilidad climática. En las cuencas de suministro de La Paz y El Alto, existen escasos datos climáticos, y en el caso de los glaciares fue necesario extrapolar datos del glaciar Zongo. Con estas consideraciones los resultados presentados de los aportes glaciares deben ser usados como referencia y no como valores exactos. En el caso de la extrapolación de los parámetros de calibración del modelo hidrológico a las posibles cuencas de suministro, fue validado con el balance hídrico en AguAAndes. Los resultados modelados tanto en WEAP como AguAAndes son aceptables. De esta manera esta herramienta puede ser útil en cuencas donde no se cuenta con datos suficientes.

El sistema El Alto en el futuro podría sufrir serios problemas en el abastecimiento de debido al incremento de la demanda y la reducción de la oferta de agua por los cambios esperados en el clima futuro. Asimismo, el sistema Pampahasi también podría presentar problemas pero menos preocupantes que en el caso de El Alto. Finalmente en el caso del sistema Acha-chicala, si bien las cuencas podrían sufrir cambios en la disponibilidad de agua ésta no presentaría problemas en la cobertura de la demanda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AguAAndes. <http://www.policysupport.org/aguaandes>
- Bahr, D.B., M.F. Meier and S.D. Peckham. 1997. The physical basis for glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research* 102 (B9): 20355–20362.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof, Eds. 2008. *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Bruijnzeel, L. A., M. Mulligan & F.S.Scaterna. 2005. Hydrometeorology of tropical montane cloud forests: emerging patterns. *Hydrological Processes* 25: 465–498.
- Brunet-Moret, Y.1979. Homogénéisation des précipitations. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie* 16: 3–4
- Centro de Cambio Global, Universidad de Chile & Stockholm Environment Institute. 2009. *Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos Con El Modelo WEAP*. Santiago, Chile, y Somerville, MA, EEUU. http://weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf
- Condom, T., M. Escobar, D. Purkey, J.C. Pouget, W. Suarez, C. Ramos, J. Apaestegui, A. Tacsí & J. Gomez. (2012): Simulating the implications of glaciers' retreat for water management: a case study in the Rio Santa basin, Peru. *Water International* 37 (4): 442-459
- Francou, B., M. Vuille, P. Wagnon, J. Mendoza & J.E. Sicart. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D5). DOI:10.1029/2002JD002959.
- GEOBOL. 1995. *Carta Geologica Hoja 5945 - Milluni*. La Paz, Bolivia.
- Hiez, G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie* 14: 129–172.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, y C. E. Hanson (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Leonardini G. 2010. Análisis mensual de los balances de masa glaciológico e hidrológico del glaciar tropical Zongo (Bolivia). Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. Bolivia.
- Mehta, V., M. Escobar & D. Decondapa. 2010. UNDERSTANDING GLACIATED HIMALAYAN HEADWATERS - An Integrated Climate-Energy-Water Assessment Framework. White Paper.
- Molina, F. & R. Pereira. 2005. Crecimiento demográfico y el problema del agua en El Alto. La Prensa. 310 ed. Bolivia.
- Mulligan, M. 2012. WaterWorld: a self-parameterising, physically-based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. Hydrology Research, in press. DOI: 10.2166/nh.2012.217
- Mulligan, M. & S. M. Burke. 2005. FIESTA: Cloud water interception for the Enhancement of Streamflow in Tropical Areas. Report to UK DfID, 174 pp.
- Nash, J. E. & J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282–90. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Pouget, J. C. 2011. Propuesta del modelo Ice KISS como un componente de un sistema de apoyo a la planificación de los recursos hídricos. Quito-Ecuador.
- Ramírez, R., E. 2008. Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. *Revista Virtual REDESMA* 2 (3) Ramírez, E., B. Francou, P. Ribstein, M. Descloitres, R. Guérin, J. Mendoza, R. Gallaire, B. Pouyaud & E. Jordan. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: a case-study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16° S). *Journal of Glaciology* 47(157): 187–94. DOI:10.3189/172756501781832214.
- Soruco, A., C. Vincent, B. Francou & J.F. Gonzalez. 2009. Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters* 36: L03502. DOI:10.1029/2008GL036238
- Tebaldi, C., R. Smith, D. Nychka & L. Mearns. 2005. Quantifying Uncertainty in Projections of Regional Climate Change: A Bayesian Approach to the Analysis of Multimodel Ensembles. *J. Climate* 18: 1524–1540. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3363.1>
- Vauchel, P., 2005. HYDRACCESS: Software de procesamiento de datos hidro-meteorológico. Disponible en: <http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels.htm>.
- Vuille, M. & R. Bradley. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27 (23): 3885–3888.
- Yates, D., J. Sieber, D. Purkey & A. Huber-Lee. 2005a. WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water International* 30 (4): 487–500. DOI:10.1080/02508060508691893.
- Yates, D., D. Purkey, J. Sieber, A. Huber-Lee & H. Galbraith. 2005b. WEAP 21—A Demand, Priority, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 2, Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation. *Water International* 30 (4): 501–2.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación forma parte del apoyo técnico al “Programa de Resiliencia Climática para los Sistemas de Agua y Saneamiento de las Áreas Metropolitanas de La Paz y El Alto” (PPCR/SPCR). Agradecemos el apoyo del personal del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en Washington y Bolivia, especialmente a Alfred Grunwaldt, Alejandro Deeb, Ana Iju, Martin Kerres, y Prem Jai Vidaurre de la Riva.