

BASES HIDROLÓGICAS PARA LA CONSERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES EN LA CUENCA DEL LAGO MOA, BOLIVIA

Hydrological bases for the Natural Resources Conservation in the Lake Moa catchment, Bolivia

Andrés Calizaya Terceros¹; Jovanna Mendoza²; Mario Copa³

RESUMEN

El agua es vida y conocer la disponibilidad de este recurso y más aún en posibles escenarios de cambio climático, es fundamental para garantizar el desarrollo sustentable y en especial la conservación de los recursos naturales de las poblaciones rurales vulnerables y alejadas de centros urbanos, como la región Indígena Originaria Tacana del norte de La Paz y con énfasis de las subcuencas entorno al Jardín Botánico implementado por la DINA/UMSA y en la cuenca del lago Moa, el segundo lago más grande del departamento de La Paz, que tiende a secarse en época de estiaje. Para la evaluación de los recursos hídricos se instalaron dos estaciones meteorológicas y se realizaron aforos de los ríos de las subcuencas a nivel mensual desde octubre 2018 a septiembre 2019 y se aplicaron los modelos hidrológicos SWAT (Soil & Water Assessment Tools) y WEAP (Water Evaluation & Planning). Construidos los modelos de las cuencas, la mayoría se logró calibrar y validar, de manera preliminar, a excepción de tan solo dos cuencas, las cuales obtuvieron un coeficiente de Nash menores a 0,5. Sobre dicha base, se procedió a simular la disponibilidad de agua en escenarios de cambio climático, demostrando una tendencia a disminuir los caudales y a la sensibilidad que presenta esta región al cambio de clima, así como la respuesta hidrológica del propio Lago Moa a dicha oferta temporal. Estos estudios deben permitir declarar dichas cuencas como áreas de protección, para frenar y evitar la explotación forestal y, por el contrario, fomentar las actividades hidro-eco-productivas y de protección del ecosistema, facilitando a corto plazo una Estrategia de Gestión Integrada de Recursos Hídricos con base a los resultados obtenidos en esta investigación.

Palabras clave: Recursos hídricos, cambio climático, gestión del agua.

ABSTRACT

Water is life and knowing the availability of this resource and even more in possible climate change scenarios, is essential to guarantee sustainable development and especially the conservation of natural resources of vulnerable rural populations located really far from urban areas, such as the Tacana Native Indigenous region of the north of La Paz department, with emphasis on the sub-basins around the Botanical Garden implemented by the DINA/UMSA and in the Moa Lake basin, the second largest lake in the department of La Paz, which tends to dry up in dry periods. For the water resources evaluation, two meteorological stations were installed and river flow measurements has been done on a monthly basis from October 2018 to September 2019 and the hydrological models SWAT (Soil & Water Assessment Tools) and WEAP (Water Evaluation & Planning) were applied. Once the hydrological basin models were built, most of them were calibrated and validated, in a preliminary way, except for only two basins, which obtained a Nash coefficient of less than 0,5. On this basis, we proceeded to simulate the availability of water in climate change scenarios, showing a tendency to decrease the flows and the sensitivity of this region to climate change, as well as the hydrological response of Lake Moa itself to temporal inflows. This studies should make it possible to declare the basins as protection areas, to stop and prevent forest exploitation and, on the contrary, to promote hydro-eco-productive activities and ecosystem protection, facilitating in the short term an Integrated Water Resource Management strategy based on the results obtained in this research work.

Keywords: Water resources, climate change, water resources management.

¹ Docente Investigador Emérito, Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. acalizaya@umsa.bo

² Proyecto División de Desarrollo Integral del Norte Amazónico, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. jovanna76@hotmail.es

³ Proyecto División de Desarrollo Integral del Norte Amazónico, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. copamariomamani@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El agua es vida y conocer la disponibilidad de este recurso y más aún en posibles escenarios de cambio climático, es fundamental para garantizar el desarrollo sustentable y en especial la conservación de los recursos naturales de las poblaciones rurales vulnerables y alejadas de los centros urbanos. Por ende, es una prioridad la evaluación de los recursos hídricos a nivel espacial y temporal y la determinación de la oferta hídrica de las cuencas hidrográficas de la región Indígena Originaria Tacana del norte de La Paz y con énfasis de las subcuencas entorno a la Jardín Botánico implementado por la División de Desarrollo Integral del Norte Amazónico (JB/DINA/UMSA) y en la cuenca del lago Moa, el segundo lago más grande del departamento de La Paz. Dichos estudios deben permitir declarar las cuencas y subcuencas como áreas de protección, frenar y evitar la explotación forestal y, por el contrario, fomentar actividades productivas de protección del ecosistema en general. La evaluación de los recursos hídricos es una de las bases fundamentales de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH), como una siguiente fase, para cultivar una cultura de resiliencia frente al cambio climático y desarrollar proyectos relacionados al aprovechamiento de los recursos hídricos, no solo para fines científicos, sino también para un aprovechamiento razonable con miras al futuro de la población creciente del área y en particular de la población de Tumupasa.

La evaluación de la disponibilidad de agua se complementa con los objetivos y metas que se ha trazado la DINA en la región y permitirá conocer las características hídricas incluyendo la cuenca del lago Moa que tiende a secarse en estiaje, para que con mayor énfasis, se proteja dichas áreas tan sensibles a la intervención humana y a la afectación por el cambio climático, y se pueda planificar futuros aprovechamientos para atender las crecientes demandas y también diversificar sus actividades productivas promoviendo el turismo en todo el entorno, como en el Jardín Botánico, las visitas y paseos en bote en el lago Moa, la pesca deportiva, la gastronomía local, la apicultura, la implementación del Centro Integral Productivo en Agroforestería Sustentable (CIPAS), el turismo gastronómico e HidroEcoTurismo Comunitario, y otras actividades y/o emprendimientos productivos que sean llevados a

cabo por propios beneficiarios y que estén relaciones a los recursos hídricos. Con toda la información disponible, se adoptaron modelos hidrológicos basados en el sistema de información geográfica (SIG), como herramienta fundamental de gestión sostenible de las cuencas, la generación de base de datos y para la simulación de la respuesta hidrológica de las cuencas y subcuencas considerando escenarios de cambio climático. La cuenca o subcuenca hidrográfica, sea en forma independiente o interconectada con otras, es la unidad territorial de estudio aceptada para la gestión integrada de los recursos hídricos (Dourojeanni et al., 2002).

Por otro lado, y con fines más didácticos y de interacción con los beneficiarios, se ha promovido su amplia participación, a través de sus organizaciones de base, para apoyar las misiones de campo y la recolección de información cuyos resultados son presentados en sus asambleas o reuniones para conocimiento pleno, no solo de los resultados, sino también de los procesos para alcanzarlos. En esta fase, ha sido vital el involucramiento de los actores y de sus autoridades de la población de Tumupasa en la protección y el cuidado de los equipos meteorológicos instalados y en la recopilación de dicha información. Sin embargo, muchos intentos para implementar la GIRH han fracasado a menudo, debido al uso de herramientas y métodos inadecuados y también debido a la falta de motivación a la participación de los actores (Calizaya, 2009). En este sentido, en el proceso de la evaluación de la oferta preliminar de los recursos hídricos, para generar las bases para un aprovechamiento racional y una adecuada GIRH (GWP, 2006), que contribuyan al desarrollo de la región y a la mejora de la calidad de vida de los habitantes y poblaciones del Consejo Indígena del Pueblo Tacana (CIPTA), se han realizado una serie de actividades de campo de manera conjunta con los comunarios, como parte de la capacitación en el tema de los recursos hídricos.

Bajo ese escenario, el objetivo de la investigación fue determinar la disponibilidad de agua a nivel de cuencas y subcuencas de la tierra comunitaria de origen Tacana utilizando modelos de respuesta hidrológica, que faciliten la simulación en periodo histórico y para escenarios de cambio climático para el fortalecimiento de la toma de decisiones frente a la gestión y planificación futura del recurso hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se ubica en la segunda sección de la provincia Abel Iturralde, en el municipio de San Buenaventura, del departamento de La Paz. Geográficamente se encuentra localizada entre las coordenadas UTM: 610000mE - 845000mS y 660000mE - 8410000mS. La zona de estudio ha sido dividida, inicialmente en dos zonas A y B (Figura 1). La zona A, por la cercanía a la población Tacana de Tumupasa, ha servido para realizar los aforos de caudales de seis subcuencas. La zona B, de la cuenca

del lago Moa, ha sido dividida en dos partes: la parte alta en nueve subcuencas (últimos estribos de la cadena montañosa) y la parte baja o planicie, en cuatro subcuencas. La zona A de 60.87 km² comprende las cuencas Colorado, Siruna, Eshaguay, Ebutudhu, Tumupasa y Mamuque que se caracterizan por un relieve montañoso; la zona B o cuenca del lago Moa tiene una superficie de 706.14 km² y en ella se distinguen dos zonas, una montañosa que son las subcuencas Sayuba, Came, Chanare, Idiria, Moa Alto 1, 2 y 3 y Limón Alto, seguidamente de una zona plana o llanura que se conforma de las subcuencas Moa Bajo 1, 2, 3 y 4 y Limón Bajo (Figura 1).

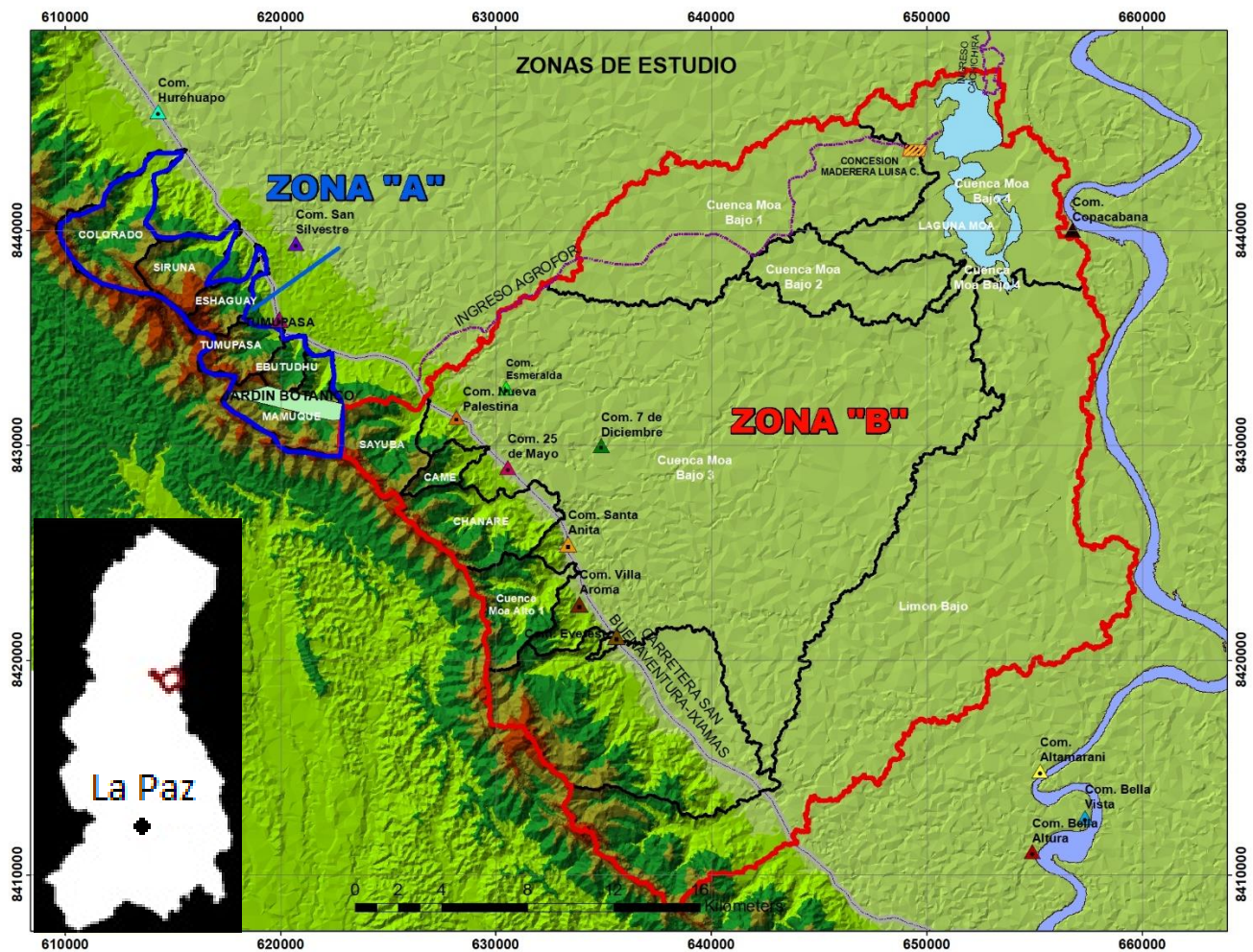


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio, proyección UTM - WGS1984.

Metodología

La población del área, de acuerdo a las encuestas realizadas, asciende a los 2 912 habitantes en su mayoría de origen Tacana, distribuidos en 13

comunidades entorno a la población más importante de Tumupasa con 1 827 habitantes y la más pequeña de Nueva Jerusalén con 22 habitantes. La demanda de agua inventariada para el consumo humano de agua no supera los 1500 L s⁻¹ por día (Tabla 1).

Tabla 1. Poblaciones en la zona de estudio.

Zona de estudio	Comunidad	Población (habitantes)	Consumo (L habitante-día ⁻¹)
Zona A	Río Colorado	27	59.00
Cuencas entorno al Jardín Botánico	Tumupasa	1 827	148.07
	San Silvestre	127	106.30
Zona B	La Esmeralda	242	103.21
cuenca del lago Moa	Santa Ana	198	100.00
	7 de Diciembre	120	106.30
	Everest	86	102.94
	25 de Mayo	82	107.79
	Esmeralda 1	71	59.00
	El Dorado	44	57.10
	Nueva Palestina	27	60.00
	Nueva Jerusalén	22	65.00
	Villa Aroma	39	59.00
Total		2 912	

Se realizaron misiones de aforos en los ríos, la instalación y recolección de datos de los equipos meteorológicos, el reconocimiento y recorrido de las subcuencas. También se realizaron ingresos, aunque muy dificultosos vía terrestre, aérea y fluvial hacia el lago Moa, para conocer y determinar el área de inundación máxima y mínima del espejo agua, la recolección de datos de la estación de Rurrenabaque operada por AASANA Aeropuerto, y de la recopilación y procesamiento de la información existente en el SISMET/SENAMHI (2019).

Instalación de estaciones meteorológicas

En noviembre de la gestión 2018 se instalaron las estaciones meteorológicas Davis HOB0 Vantage Pro2 en San Buenaventura y Tumupasa, ubicadas en las coordenadas y elevación que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas de ubicación de las estaciones meteorológicas Davis HOB0 Vantage Pro2.

Estación	Elevación	Este	Norte	Latitud sud	Longitud oeste
San Buenaventura	211	657480	8403680	14° 25' 44"	67° 32' 20"
Tumupasa	473	619868	8435601	14° 08' 33"	67° 53' 21"

La estación de Tumupasa está a 262 m más alta respecto a la estación de San Buenaventura.

Campaña de aforos

Al no existir registros de caudales de los ríos de interés, se procedió al aforo de los mismos con

molinete y con el apoyo del personal técnico entrenado de DINA y pobladores de Tumupasa. Los aforos fueron realizados solo a nivel mensual y como puntos de control se estableció la intersección de los ríos con la carretera que une las poblaciones de San Buenaventura con Ixiamas, que prácticamente separa la zona montañosa de la planicie o llanura.



Figura 2. Aforos en los ríos Moa (Izq.), Chanare (Cent.) y Came (Der.)

Batimetría y sobrevuelo del lago Moa

El lago Moa es poco profundo $h < 1.8$ m y de 16.5 km² de superficie, formado hace miles de años, resultado de los meandros que el río Beni dejaba a su paso. En mayo del 2019, se realizó una prospección aérea en

avioneta sobre el lago (Figura 3), con el fin de evaluar la configuración de la misma en condiciones máximas de inundación y que, según los pobladores de la zona, en algunos años se interconecta con el río Beni. Con muchas dificultades y de manera conjunta con el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

(SENAMHI) se realizó la batimetría preliminar del lago, determinando las profundidades donde se puede acceder y construir preliminarmente la curva de Elevación (m s.n.m.) con relación al volumen (m³).



Figura 3. Vista aérea del cuerpo principal del lago Moa.

Descripción de los modelos hidrológicos para determinar la oferta hídrica

La evaluación de los recursos hídricos se realiza a nivel de cuencas o subcuencas hidrográficas. Para la generación de dichos modelos de respuesta hidrológica de las cuencas, se han utilizado los modelos WEAP y SWAT, cada uno con sus potencialidades, que ha permitido comparar los resultados obtenidos de ambos modelos y que una vez construidos pueden ser utilizados en la planeación futura del desarrollo de los recursos hídricos y profundizar el análisis de diferentes impactos sobre los recursos hídricos, por falta de información histórica, dichos modelos no pudieron ser calibrados.

El modelo de gestión WEAP Model (Water Evaluation and Planning System (SEI-USA), contiene un componente de hidrología calibrado en el modelo Soil Moisture (SMM). El SMM es un modelo unidimensional, el cual consiste en la noción de transferencia de agua entre dos baldes (buckets) (Figura 4) los cuales representan la dinámica entre la evapotranspiración, escurrimiento superficial, sub superficial, percolación, para un elemento de análisis o cuenca (Yates et al., 2005).

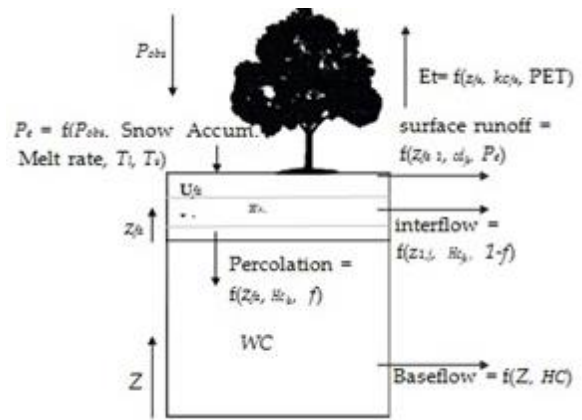


Figura 4. Esquema conceptual del Soil Moisture Model (SMM) (Yates et al., 2005).

En base al modelo construido en WEAP, en una segunda fase, se podrá desarrollar una estrategia para la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) muy requerida por los beneficiarios que también, confirma la alta sensibilidad de la región a la intervención humana.

El otro modelo, SWAT (Soil & Water Assessment Tool), es un modelo a escala de cuenca hidrográfica que se utiliza para simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea y predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de gestión de la tierra y el cambio climático. SWAT (Arnold et al., 2012) se usa ampliamente para evaluar la prevención y el control de la erosión del suelo, el control de la contaminación de fuentes difusas y la gestión regional en las cuencas hidrográficas.

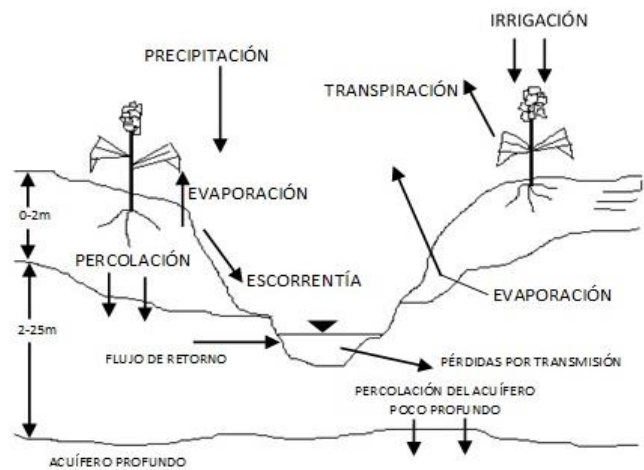


Figura 5. Representación ciclo hidrológico en SWAT (Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT2005, Uribe, 2010).

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la Ecuación 1 del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} + Q_{surf} + E_a + W_{seep} + Q_{gw}) \quad (1)$$

Dónde: SW_t = contenido final de agua en el suelo (mm); SW_0 = contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm); t = tiempo (días); R_{day} = cantidad de precipitación en un día i (mm); Q_{surf} = cantidad de escorrentía de la superficie en un día i (mm); E_a = cantidad de evapotranspiración en el día i (mm); W_{seep} = cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm); Q_{gw} = cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

SWAT cuenta con un motor de clima propio el cual puede cubrir la falta de datos. Este motor de clima esta generado mediante unas ecuaciones empíricas. También, trabaja con la base de datos de tipos de suelo y cobertura los cuales son modificados acorde a la información de la FAO (2009) y del tipo de cobertura existente. La información de cobertura de suelo y tipo de suelo ayuda a realizar la elaboración de las unidades de respuesta hidrológica determinando el

escurrimiento de la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información generada por las estaciones meteorológicas Tumupasa y San Buenaventura

A continuación, en las Tablas 3 y 4, se presenta los datos del año hidrológico octubre/2018 a septiembre/2019 de precipitación y temperatura de las dos nuevas estaciones meteorológicas. De los datos registrados, la precipitación total en la estación de Tumupasa (2 330.9 mm) ha sido algo superior respecto a San Buenaventura (2 293.6 mm). A nivel mensual, la precipitación máxima en la estación de Tumupasa se produjo en el mes de diciembre registrando 328.5 mm, mientras que en San Buenaventura se produjo en el mes de noviembre registrando 410.8 mm. Respecto a la temperatura media, para el periodo registrado, se observa que en la estación de Tumupasa se ha registrado una temperatura media de 24.3 °C, levemente superior a la temperatura media de San Buenaventura que ha registrado 23.9 °C. La distancia entre estaciones, en línea recta es de 49.5 km.

Tabla 3. Datos recolectados de precipitación y temperatura en la estación Tumupasa.

Año	2018				2019							
Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Precipitación (mm)	178.5	291.4	328.5	313.0	324.3	178.4	231.6	183.2	84.1	109.8	13.2	94.9
Temperatura mínima (°C)	18.8	17.3	19.7	21.3	20.1	20.4	16.8	14.1	13.8	12.5	12.7	19.6
Temperatura máxima (°C)	32.7	31.1	33.6	31.5	32.7	31.3	31.8	31.6	31.0	31.4	34.9	37.4
Temperatura media (°C)	24.7	23.6	24.6	24.1	24.6	24.7	24.7	23.2	23.2	22.7	24.3	26.8

Tabla 4. Datos recolectados de precipitación y temperatura en la estación San Buenaventura.

Año	2018				2019							
Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Precipitación (mm)	141.2	410.8	239.7	471.6	267.3	261.5	219.4	110.9	81.4	74.8	0.3	11.1
Temperatura mínima (°C)	17.9	17.6	17.7	17.0	18.2	21.9	19.0	17.6	15.1	14.6	12.1	19.7
Temperatura máxima (°C)	32.5	31.3	30.0	29.0	26.0	25.3	27.0	32.2	31.8	32.4	35.8	38.3
Temperatura media (°C)	25.1	23.5	23.2	22.7	23.8	23.9	23.1	24.1	24.0	23.0	24.3	26.9

Base de datos de caudales aforados

La campaña de aforos se inició en septiembre de 2018 en 10 ríos de interés, de los cuales fueron seis entorno

a la población de Tumupasa y al Jardín Botánico de la zona A (Figura 6) y los otros cuatro ríos de la parte alta (fin de la serranía) de la cuenca del Lago Moa, Moa Alto, Chanare, Came y Sayuba (Figura 7).

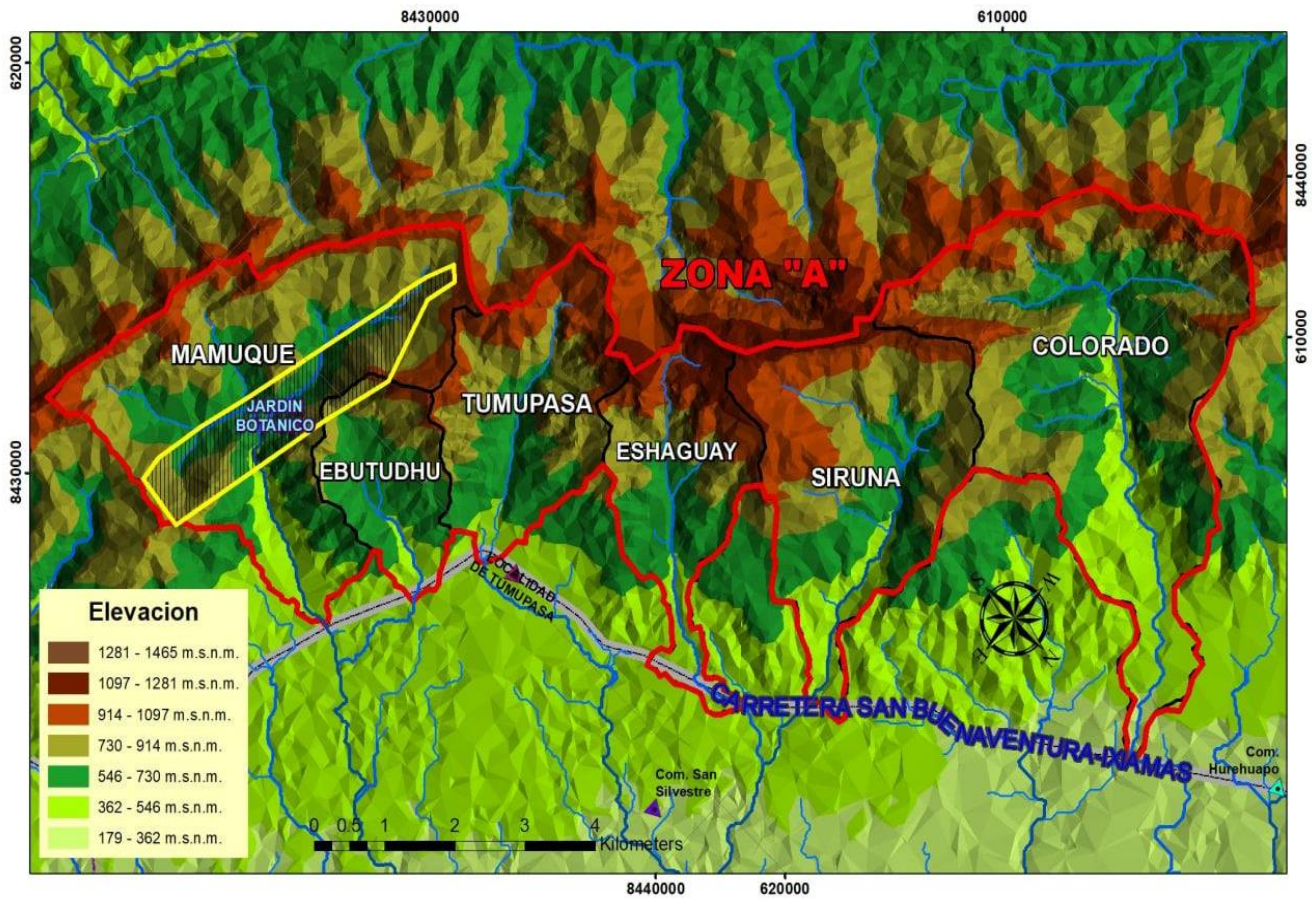


Figura 6. Ubicación geográfica de las seis subcuencas de la zona A y del Jardín Botánico.

El escurrimiento superficial en las cuencas alcanza valores máximos en marzo y mínimos en noviembre, mientras que algunos se secan completamente tanto en la zona A (Tabla 5) como en la zona B (Tabla 6).

En la base de datos disponibles, se observa la variación temporal del escurrimiento en función a su propia área de aporte o cuenca cuya variación es notable entre ellas.

Tabla 5. Caudales medidos en las seis subcuencas de la zona A.

Sub cuenca	Área (km ²)	Caudales aforados (m ³ s ⁻¹)											
		Sep 2018	Oct 2018	Nov 2018	Dic 2018	Ene 2019	Feb 2019	Mar 2019	Abr 2019	May 2019	Jun 2019	Jul 2019	Ago 2019
Mamuque	15.13	0.03	0.08	0.03	0.00	0.42	0.97	1.17	0.66	0.42	0.53	0.13	0.07
Ebutudhu	3.93	0.08	0.03	0.05	0.11	0.20	0.40	0.39	0.39	0.29	0.24	0.16	0.21
Tumupasa	7.23	0.03	0.07	0.02	0.17	0.18	0.44	0.51	0.41	0.31	0.19	0.12	0.09
Eshaguay	6.14	0.00	0.04	0.00	0.11	0.11	0.43	0.44	0.31	0.18	0.05	0.00	0.00
Siruna	10.37	0.06	0.02	0.09	0.15	0.68	0.52	0.71	0.52	0.32	0.20	0.13	0.08
Colorado	18.07	0.03	0.06	0.03	0.16	0.24	0.58	0.84	0.58	0.31	0.10	0.09	0.05

De la Tabla 5, se puede observar que, si bien los aforos fueron realizados el mismo día, la respuesta hidrológica en el caso de la cuenca del río Mamuque es superior al río Colorado por tener una superficie inferior. Al respecto se puede mencionar que la cuenca del río Colorado está más intervenida por el hombre en la parte de la serranía, que podría ser la respuesta a dicha diferencia. En la mayor parte de las

cuenca de la serranía se han observado vertientes y en las partes bajas flujos subsuperficiales. El Jardín Botánico prácticamente se encuentra distribuida en un 95% en la cuenca del río Mamuque, que, no obstante, el conservado estado en el que se encuentra, el aforo en diciembre fue nulo con un flujo subsuperficial difícil de cuantificar.

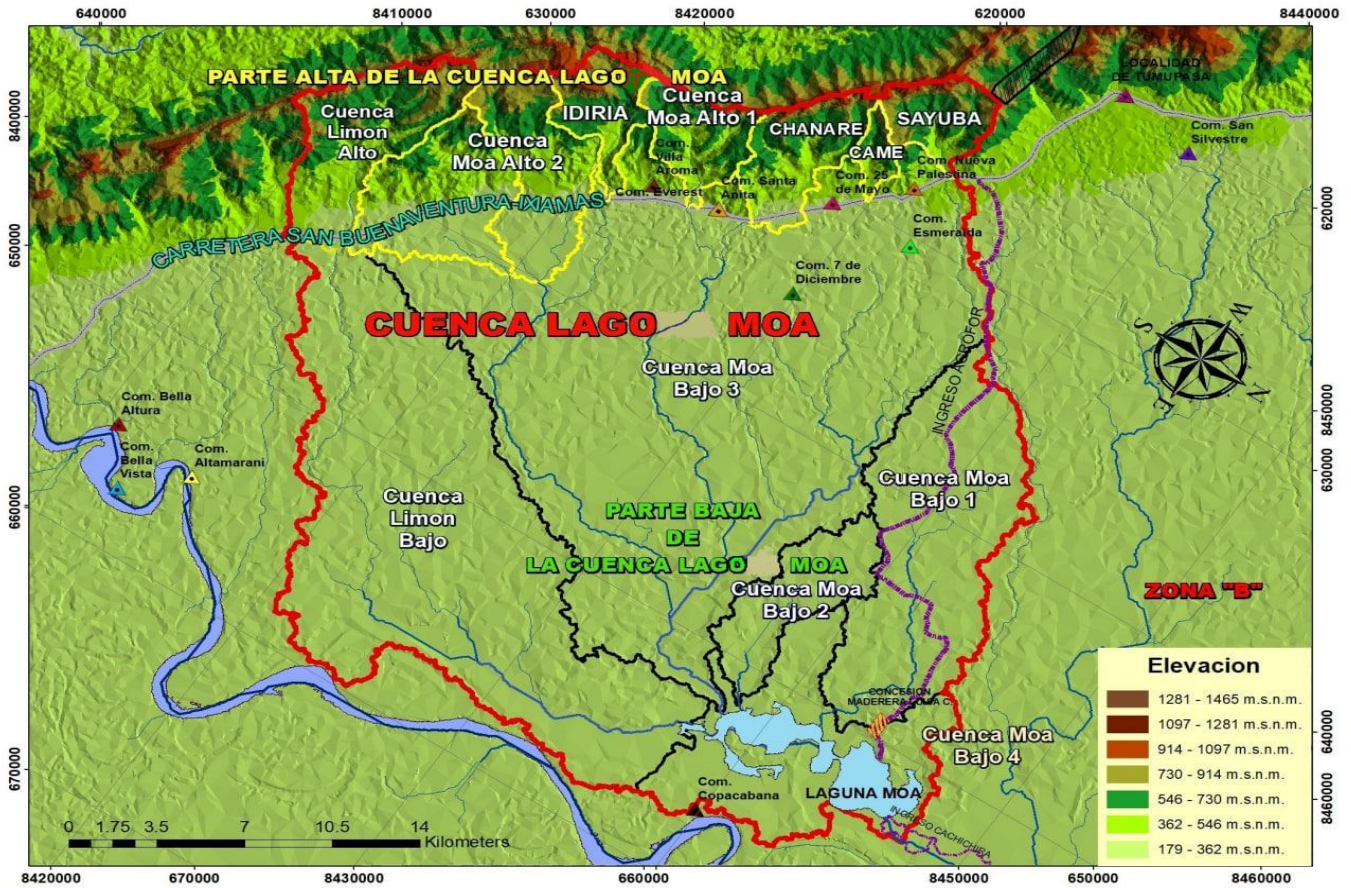


Figura 7. Detalle de la cuenca del lago Moa y de las partes Alta y Baja (zona B).

De acuerdo a los aforos realizados (Tabla 6), existe una semejanza de los aportes en función al área de las subcuencas similar a los caudales de la zona A. De igual manera, en las subcuencas de Chanare y Came se ha podido observar que existen flujos subsuperficiales en dirección del lago Moa, es decir

que, si bien el lecho se encuentra seco, existe un aporte subterráneo que desciende hacia el lago y que aflora aguas abajo debido a las características del terreno gravo-arenoso en la zona de transición de la serranía y la llanura.

Tabla 6. Caudales aforados de la parte montañosa de la cuenca del lago Moa.

Sub cuenca	Área (km ²)	Caudal (m ³ s ⁻¹)											
		Sep 2018	Oct 2018	Nov 2018	Dic 2018	Ene 2019	Feb 2019	Mar 2019	Abr 2019	May 2019	Jun 2019	Jul 2019	Ago 2019
Moa Alto 1	15.55	0.07	0.08	0.01	0.21	0.52	0.96	1.26	0.62	0.53	0.60	0.29	0.10
Chanare	20.15	0.00	0.08	0.00	0.25	0.93	1.48	1.07	0.54	0.40	0.80	0.16	0.20
Came	4.33	0.00	0.00	0.00	0.01	0.13	0.23	0.17	0.05	0.05	0.07	0.01	0.00
Sayuba	13.51	0.07	0.06	0.06	0.30	0.81	1.43	0.90	0.82	0.59	0.79	0.33	0.27

Modelación hidrológica - caudales simulados

Los modelos hidrológicos fueron calibrados con los caudales aforados para cada subcuenca, realizando hasta 10 iteraciones con el fin de obtener un modelo que se ajuste a los caudales observados. Para la calibración y validación se usó los coeficientes

estadísticos como ser el Coeficiente de Eficiencia de Nash y Sutcliffe (Ecuación 2), el sesgo relativo BIAS (Ecuación 3) y el Coeficiente de correlación de Pearson (Ecuación 4).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2} \right] \quad (2)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{OBS}} \times 100 \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - \bar{Q}_i^{SIM}) * (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})}{\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - \bar{Q}_i^{SIM})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2}} \quad (4)$$

Dónde: Q_i = caudal; SIM y OBS = valores simulados y observados respectivamente y la barra superior indica el valor medio en el período de estudio; NSE = coeficiente de Nash; $BIAS$ = sesgo relativo; R = coeficiente de correlación, “ i ” e “ n ” son la cantidad de datos de caudal.

En la Tabla 7 se detallan los rangos de aceptación para cada coeficiente estadístico NSE (Coeficiente de Nash de 0 a 1), $BIAS$ (Sesgo Relativo en porcentaje) y R^2 (Coeficiente de correlación de 0 a 1).

Tabla 7. Rangos de aceptación de los coeficientes estadísticos.

Criterio	Valor	Clasificación
NSE	0.75 < NSE ≤ 1.00	Muy bueno
	0.65 < NSE ≤ 0.75	Bueno
	0.50 < NSE ≤ 0.65	Satisfactorio
	NSE ≤ 0.5	Insatisfactorio
BIAS	BIAS < ±10	Muy bueno
	±10 ≤ BIAS ≤ ±15	Bueno
	±15 < BIAS ≤ ±25	Satisfactorio
	BIAS > ±25	Insatisfactorio
R ²	0.75 < R ² ≤ 1.00	Muy bueno
	0.65 < R ² ≤ 0.75	Bueno
	0.50 < R ² ≤ 0.65	Satisfactorio
	R ² ≤ 0.5	Insatisfactorio

En la Tabla 8, se presentan los coeficientes estadísticos obtenidos de las iteraciones realizadas en cada subcuenca. Se puede observar que hay subcuencas donde los modelos SWAT (Soil and Water Assessment Tools) y WEAP (Water Evaluation And Planning) se ajustan muy bien, aunque también hay cuencas en las cuales los modelos no llegan a ajustarse o tienen coeficientes de Nash en el límite de validación. La cuenca Ebutudhu no llega a tener un coeficiente de Nash aceptable, en el modelo SWAT llega a tener un valor de 0.35 y en el modelo de WEAP un valor de 0.48. En el caso de la cuenca río Colorado el modelo WEAP tiene un valor límite de Nash de 0.52 mientras que en el modelo SWAT alcanza un valor 0.69, validando la modelación. En la subcuenca Moa Bajo 4 el modelo SWAT llega a tener un valor bajo de Nash de 0.43, mientras que en WEAP tiene un Nash de 0.77 el cual valida la modelación. Los valores bajos del coeficiente de Nash en las cuencas de Ebutudhu y Moa Bajo 4 se debería a ciertas fallas de medición. En el caso la cuenca Ebutudhu se debe a que los caudales aforados no eran representativos de las cuencas y que tal vez se los tomaron justo después de un evento inesperado.

Respecto al coeficiente de correlación R^2 , se puede notar que todas las subcuencas están en el rango de aceptación, y que el menor valor de R^2 es 0.74 que corresponde a la subcuenca del río Came en la modelación de WEAP. Respecto al sesgo de $BIAS$ todas las cuencas se encuentran en el rango adecuado a excepción de las cuencas de Ebutudhu, Eshaguay y Moa Bajo 4, las cuales presentan valores de $BIAS$ de 23 % (SWAT), 21 % (WEAP) y 23 % (SWAT) respectivamente, encontrándose al límite de la aceptación del coeficiente de $BIAS$.

Tabla 8. Coeficientes estadísticos para las cuencas de estudio.

Sub cuenca	Modelo	NSE	R ²	BIAS (%)	NSE	R ²	BIAS
Iridia	WEAP	0.69	0.83	0	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.64	0.84	- 12	Satisfactorio	Muy bueno	Bueno
Moa Alto 1	WEAP	0.73	0.89	- 12	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.61	0.80	- 8	Satisfactorio	Muy bueno	Muy bueno
Chanare	WEAP	0.75	0.87	3	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.63	0.81	- 6	Satisfactorio	Muy bueno	Muy bueno
Came	WEAP	0.50	0.74	11	Satisfactorio	Bueno	Bueno
	SWAT	0.73	0.86	4	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Sayuba	WEAP	0.73	0.91	- 16	Bueno	Muy bueno	Satisfactorio
	SWAT	0.71	0.85	- 4	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Mamuque	WEAP	0.81	0.91	0	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.74	0.87	-2	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Ebutudhu	WEAP	0.48	0.83	- 11	Insatisfactorio	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.35	0.88	- 23	Insatisfactorio	Muy bueno	Satisfactorio

Tumupasa	WEAP	0.74	0.89	- 13	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.86	0.93	1	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno
Eshaguay	WEAP	0.75	0.92	21	Bueno	Muy bueno	Satisfactorio
	SWAT	0.75	0.89	10	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Siruna	WEAP	0.63	0.92	0	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.64	0.84	- 12	Bueno	Muy bueno	Bueno
Colorado	WEAP	0.52	0.94	15	Satisfactorio	Muy bueno	Satisfactorio
	SWAT	0.69	0.83	5	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Alto 2	WEAP	0.72	0.89	- 13	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.69	0.83	0	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Alto 3	WEAP	0.72	0.89	- 13	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.73	0.86	- 1	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Limon Alto	WEAP	0.72	0.89	- 13	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.73	0.86	- 3	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Bajo 1	WEAP	0.75	0.89	- 10	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.66	0.84	- 2	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Bajo 2	WEAP	0.75	0.89	- 11	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.65	0.82	- 1	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Bajo 3	WEAP	0.76	0.89	- 10	Muy bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.58	0.77	1	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno
Limon Bajo	WEAP	0.75	0.89	- 10	Bueno	Muy bueno	Bueno
	SWAT	0.71	0.85	- 3	Bueno	Muy bueno	Muy bueno
Moa Bajo 4	WEAP	0.77	0.89	- 8	Muy bueno	Muy bueno	Muy bueno
	SWAT	0.43	0.80	23	Insatisfactorio	Muy bueno	Satisfactorio

Los caudales obtenidos producto de la aplicación de los modelos, en una comparación de resultados para las zonas de estudio A (Figura 8 y Tabla 9) y B cuenca del lago (Figura 9 y Tabla 10), se puede observar que los valores de SWAT son más elevados que los resultados del WEAP, esto debido a que los datos faltantes en el modelamiento de SWAT fueron

reemplazados por su motor climático los cuales son valores empíricos, a comparación de WEAP que con la función ciclo rellena los datos faltantes. No obstante, el comportamiento y la secuencia son semejantes en ambos modelos, producto de la respuesta a la precipitación.

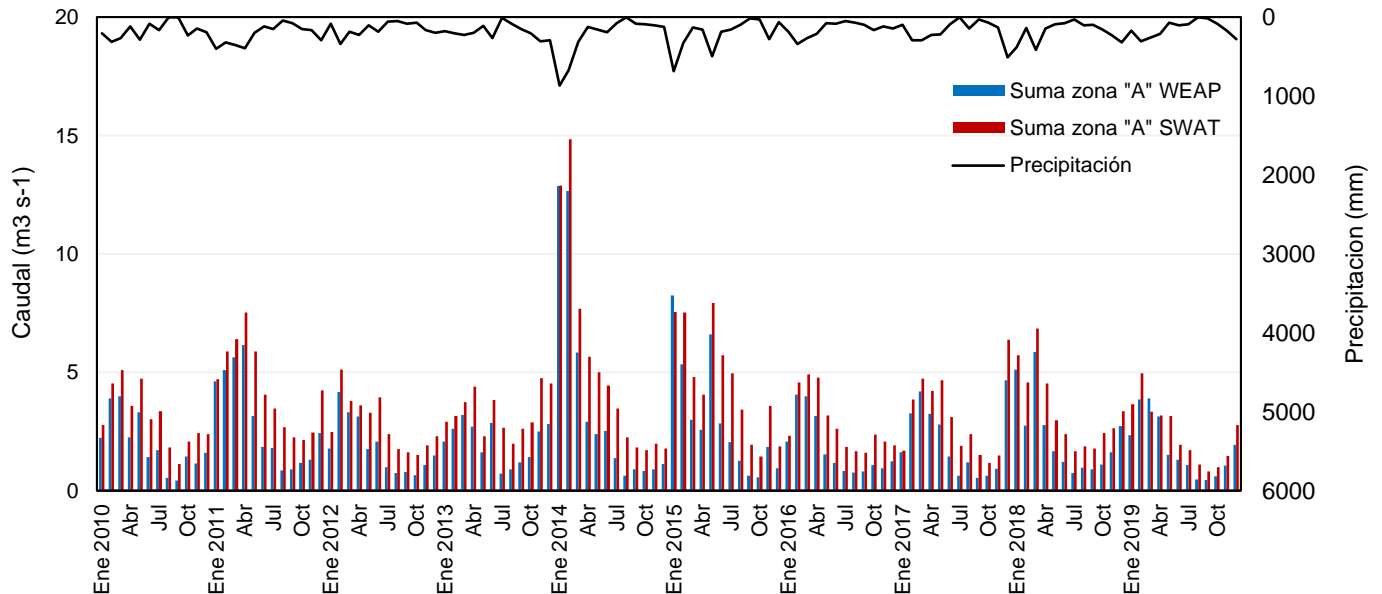


Figura 8. Resultados de los programas SWAT y WEAP, caudales totales zona A (2010-2019).

Tabla 9. Caudales simulados por cuencas en SWAT y WEAP (2010-2019), zona A, en m³ s⁻¹.

	Cuenca Mamuque		Cuenca Ebutudhu		Cuenca Tumupasa		Cuenca Eshahuay		Cuenca Siruna		Cuenca Colorado	
	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP
Ene	1.36	0.95	0.41	0.42	0.55	0.43	0.43	0.41	0.99	1.07	1.26	0.92
Feb	1.53	1.11	0.48	0.48	0.65	0.51	0.49	0.48	1.13	0.99	1.46	1.40
Mar	1.35	0.91	0.46	0.38	0.64	0.42	0.47	0.38	1.00	1.02	1.45	1.36
Abr	1.08	0.71	0.38	0.31	0.58	0.34	0.41	0.30	0.77	0.70	1.33	0.86
May	0.86	0.58	0.30	0.25	0.51	0.27	0.36	0.24	0.56	0.46	1.19	0.51
Jun	0.76	0.53	0.26	0.23	0.45	0.25	0.34	0.22	0.47	0.33	1.11	0.28
Jul	0.51	0.38	0.21	0.17	0.37	0.19	0.29	0.16	0.34	0.20	0.99	0.16
Ago	0.43	0.35	0.16	0.16	0.31	0.17	0.25	0.15	0.28	0.15	0.86	0.10
Sept	0.31	0.32	0.13	0.15	0.25	0.15	0.21	0.13	0.20	0.10	0.75	0.05
Oct	0.46	0.42	0.15	0.19	0.25	0.19	0.22	0.18	0.29	0.08	0.75	0.10
Nov	0.71	0.54	0.22	0.26	0.30	0.26	0.26	0.25	0.47	0.19	0.84	0.16
Dic	1.02	0.72	0.29	0.32	0.42	0.34	0.34	0.33	0.69	0.35	0.99	0.49

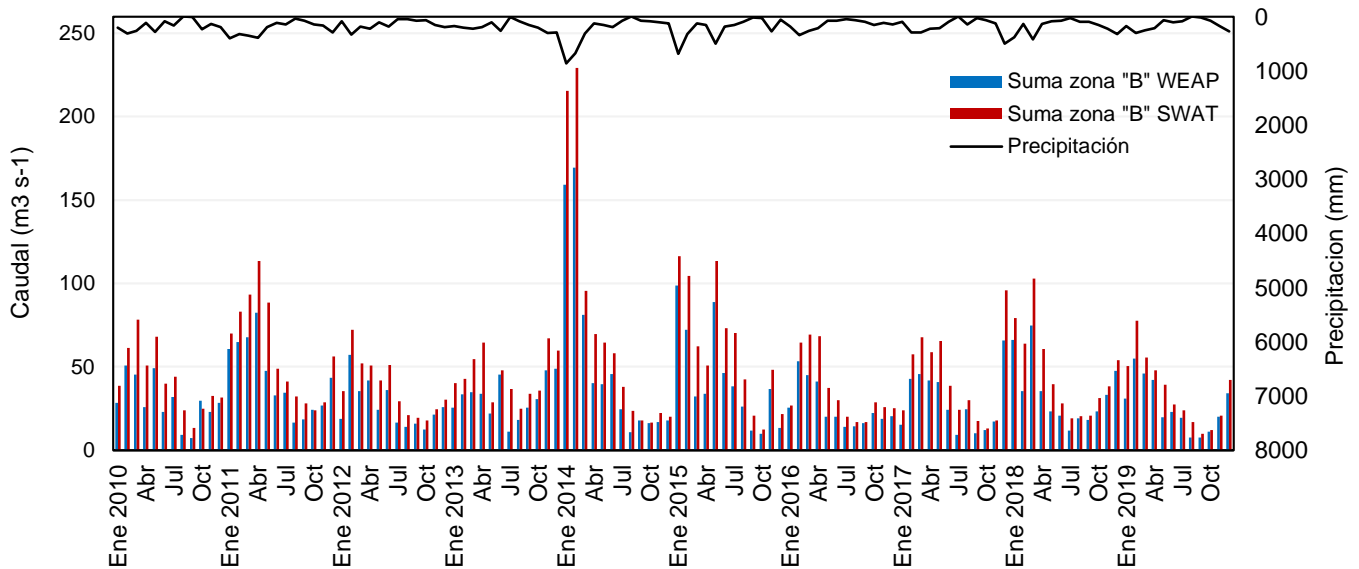


Figura 9. Caudales simulados en SWAT y WEAP (2010-2019), zona B cuenca lago Moa, en m³ s⁻¹.

Tabla 10. Caudales simulados por subcuencas 2010-2019, cuenca lago Moa parte montañosa, en m³ s⁻¹.

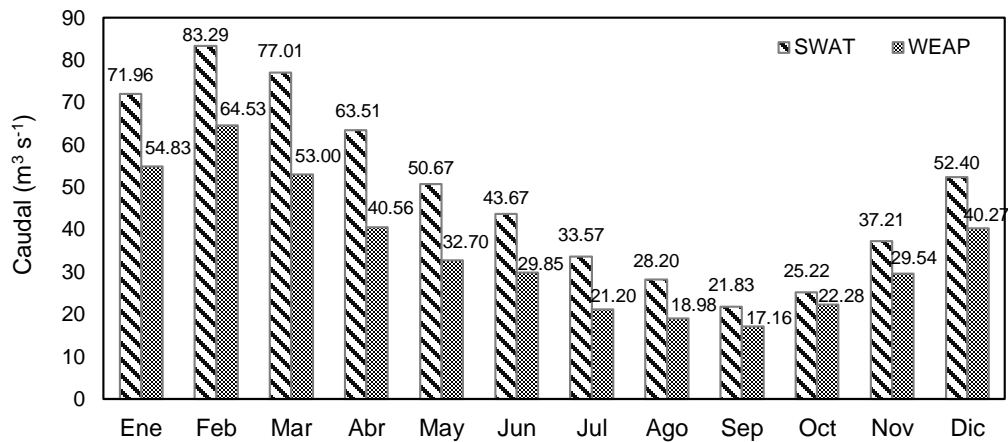
	Cuenca Iridia		Cuenca Moa Alta 1		Cuenca Chanare		Cuenca Came		Cuenca Sayuba		Cuenca Moa Alta 2		Cuenca Moa Alta 3		Cuenca Limon Alto	
	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP
Ene	1.30	0.90	1.08	0.92	1.74	1.24	0.35	0.15	1.28	1.10	2.19	1.75	1.85	1.95	2.67	2.02
Feb	1.49	1.06	1.27	1.09	2.04	1.46	0.39	0.20	1.50	1.24	2.66	2.07	1.95	2.31	2.97	2.40
Mar	1.32	0.88	1.27	0.91	1.85	1.21	0.37	0.18	1.43	1.00	2.72	1.72	1.31	1.92	2.74	1.99
Abr	1.10	0.69	1.18	0.71	1.51	0.94	0.32	0.15	1.18	0.77	2.53	1.35	0.87	1.49	2.18	1.56
May	0.89	0.57	1.07	0.59	1.18	0.76	0.28	0.13	0.95	0.63	2.20	1.10	0.68	1.22	1.79	1.28
Jun	0.72	0.53	0.99	0.54	0.95	0.70	0.26	0.12	0.84	0.58	1.88	1.01	0.62	1.12	1.63	1.18
Jul	0.51	0.39	0.85	0.40	0.70	0.51	0.22	0.09	0.65	0.42	1.54	0.74	0.37	0.81	1.29	0.86
Ago	0.41	0.35	0.73	0.36	0.57	0.46	0.19	0.08	0.51	0.39	1.28	0.67	0.38	0.73	1.20	0.78
Sept	0.29	0.32	0.61	0.33	0.37	0.42	0.16	0.07	0.41	0.37	0.99	0.61	0.31	0.66	1.04	0.71
Oct	0.40	0.41	0.58	0.41	0.48	0.54	0.17	0.07	0.48	0.50	0.91	0.75	0.57	0.82	1.21	0.88
Nov	0.64	0.52	0.66	0.53	0.80	0.70	0.21	0.09	0.67	0.66	1.14	0.97	0.94	1.06	1.56	1.12
Dic	0.94	0.69	0.84	0.70	1.22	0.94	0.27	0.12	0.92	0.85	1.58	1.28	1.40	1.42	2.06	1.48

Tabla 11. Caudales simulados por subcuencas 2010-2019, cuenca lago Moa parte baja o llanura, en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

	Cuenca Moa Baja 1		Cuenca Moa Baja 2		Cuenca Moa Baja 3		Cuenca Limon Bajo		Cuenca Moa Baja 4	
	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP	SWAT	WEAP
Ene	8.04	5.14	2.06	1.59	28.82	21.45	15.46	12.18	5.13	4.46
Feb	9.28	6.00	2.48	1.87	33.60	25.30	17.62	14.32	6.03	5.20
Mar	8.06	4.94	2.48	1.53	31.67	20.71	15.99	11.76	5.82	4.25
Abr	6.41	3.82	2.19	1.17	26.02	15.68	13.29	8.99	4.75	3.23
May	4.97	3.12	1.78	0.93	20.65	12.50	10.51	7.25	3.73	2.61
Jun	4.32	2.88	1.44	0.85	17.77	11.34	9.03	6.62	3.23	2.39
Jul	3.34	2.07	1.14	0.60	13.59	7.94	6.79	4.70	2.57	1.68
Ago	2.67	1.88	0.95	0.53	11.17	7.02	6.09	4.21	2.04	1.52
Sept	1.93	1.74	0.69	0.47	8.34	6.26	5.04	3.81	1.66	1.39
Oct	2.31	2.25	0.68	0.62	9.61	8.22	5.94	4.96	1.87	1.85
Nov	3.84	2.93	0.99	0.83	14.66	11.10	8.35	6.58	2.74	2.46
Dic	5.57	3.87	1.48	1.15	20.71	15.50	11.64	8.96	3.76	3.32

Por los resultados obtenidos de la simulación y en comparación con los aforos realizados en los ríos de interés, se puede indicar que existe cierta correspondencia no muy alejada de la realidad, lo que significa que de manera preliminar los modelos están reflejando la respuesta hidrológica adecuada de las

cuenca estudiadas, pero confirman también, la necesidad de continuar con el monitoreo de la medición de los caudales, sin interrupción, para realizar una mejor la validación y calibración posterior de los modelos utilizados.

Figura 10. Caudales simulados de ingreso al lago Moa ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación de la cuenca del lago Moa (Figura 7), con datos de un año de aforos, solo confirma la necesidad de tener más datos hidrométricos para generar modelos que sean de mayor representación de las cuencas. Los caudales representados en la Figura 10, muestran una sobrestimación a lo largo del año por parte del modelo SWAT, mientras que los resultados del WEAP son más conservadores. Empero y de acuerdo a las observaciones visuales de los tres ingresos más importantes hacia el lago Moa, hidráulicamente se ha estimado que el caudal que ingresa en la época húmeda está en torno a $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ aproximadamente, lo que significa que el modelo SWAT posiblemente simula de mejor manera la época húmeda, mientras que el modelo WEAP simula mejor la época de estiaje,

por cuanto se ha verificado que el caudal mínimo que ingresa al lago Moa en estiaje no supera los $2.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ que fueron aforados en el mes de octubre del 2019 en el río Limón, que es el único tributario en la época seca. El lago Moa, cuya dinámica preliminarmente evaluada, requiere investigarse más aún, para esclarecer el compartimiento de regulación temporal que posee y su estrecha relación con la fluctuación de los niveles del río Beni. En época seca el lago drena hacia el río Beni, mientras que en época húmeda el río Beni tributa al lago, no se sabe en qué medida, según los comunarios de la población Cachichira, ubicada en la ribera del río Beni. El fondo del lago se encuentra en la cota de 171.83 m s.n.m. y el espejo de agua llega a los 172.73 m s.n.m. normalmente en época de seca, mientras que la cota del espejo de agua en el río Beni es de 170 258

m s.n.m. En época de lluvias el nivel del lago llega a los 173.59 m s.n.m. aproximadamente, mientras que el nivel de aguas del río Beni llega a ser de 175.03 m s.n.m. (según los pobladores a ser investigadas) generando un desnivel de 1.44 m, lo que indica que el río Beni se encuentra por encima del lago en dicha época.

Resultados de la batimetría - curva elevación - volumen del lago Moa

De manera preliminar, se ha realizado el mapa batimétrico del lago (Figura 11) y se ha construido la curva elevación-volumen, que se presente a continuación en Tabla 12 y Figura 12.

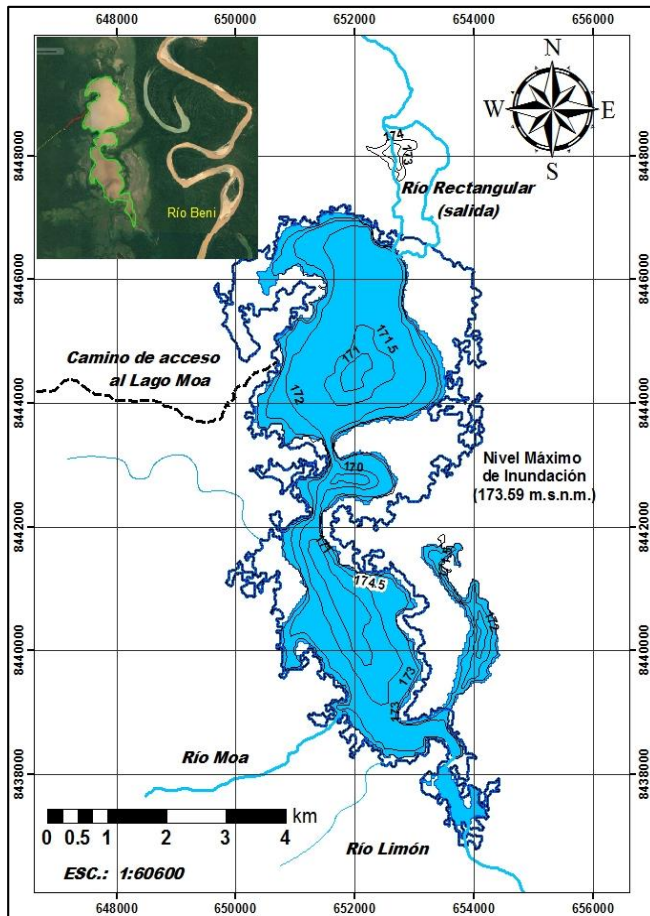


Figura 11. Batimetría del lago Moa.

En la Tabla 12 se muestra los niveles de medición que se llegaron a registrar en los ingresos al lago Moa, en los cuales se registró los niveles de agua más bajo, normal y de inundación. Siendo H la profundidad de agua registrada en metros.

Tabla 12. Medición de niveles de agua aforados en el lago Moa.

Fecha	H (m)	Cota (m s.n.m.)	Volumen (hm ³)
Oct/2019	0.14	171.97	1.47
Sep/2018	0.90	172.73	12.09
Nivel máximo inundación	1.76	173.59	29.57

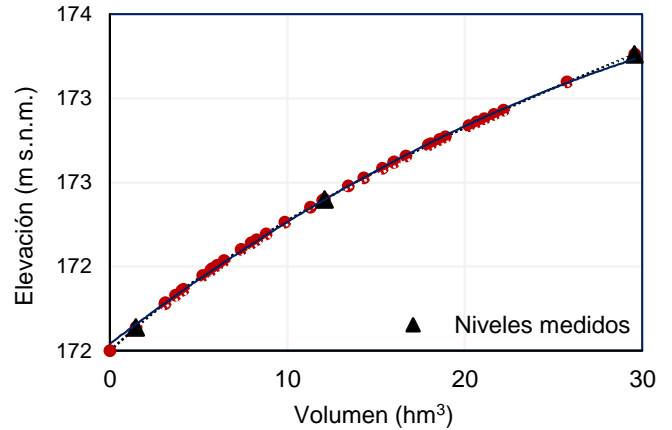


Figura 12. Curva Elevación - Volumen del lago Moa, (hm³).

Al realizar la batimetría preliminar se pudo determinar la profundidad media, en época de lluvias puede sobrepasar el 1.5 m con un espejo aproximado de 16 km², mientras que en época de estiaje puede descender hasta los 15.0 cm de profundidad formando tan solo pequeñas lagunas en su parte central de acceso totalmente dificultoso por el pantano que se forma. Por ende, el lago Moa es completamente sensible a la variabilidad climática y en periodos de estiaje prolongados puede secarse afectando de sobremanera la fauna y toda actividad productiva que se pretenda desarrollar, por lo que es de suma urgencia plantear alternativas de solución para evitar este “desastre ambiental”.

Evaluación en escenarios del cambio climático

La mayoría de los modelos climáticos para proyecciones futuras en Bolivia no concuerdan en sus resultados en lo referente a estimados de lluvias en términos de cambio en láminas totales, intensidad y distribución geográfica, dando situaciones plausibles de escenarios “secos” y escenarios “húmedos” donde las incertidumbres conciernen a la cantidad total, los ciclos y la intensidad de lluvia (PMM, 2010). Para todo el territorio boliviano en promedio, los escenarios húmedos predicen un incremento promedio en la

temperatura de 1.5 °C y un incremento promedio de la precipitación anual de un 22 % hasta el año 2050, según el Banco Mundial (2010). Los escenarios secos muestran un incremento promedio de 2.4 °C en la temperatura y un decremento de la precipitación anual del 19 % hasta dicho año (Escenarios de Cambio Climático 2050 para Bolivia, Banco Mundial, 2010).

Considerando los escenarios climáticos propuestos por el Banco Mundial, se han obtenido los resultados de la modelación hasta el año 2050, mismas que son estimaciones preliminares, que requieren profundizar la investigación para mejorar la resolución y reducir la incertidumbre de los resultados.

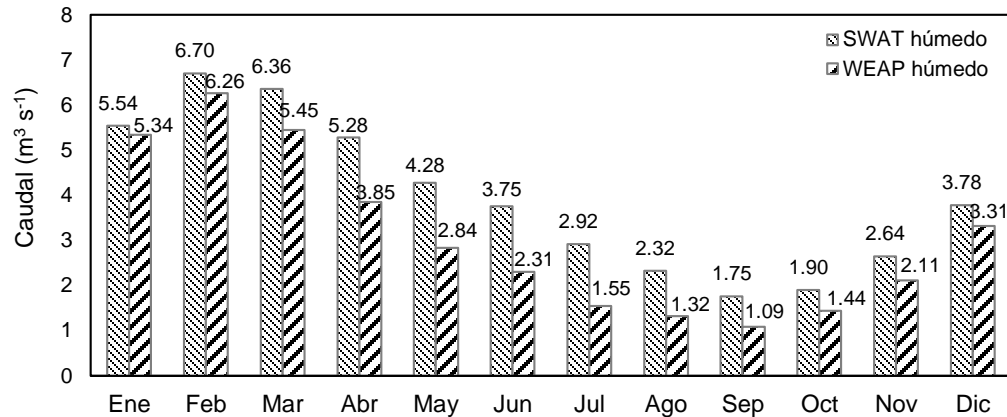


Figura 13. Comparación de escenarios húmedos de caudales totales de las subcuencas de la zona A.

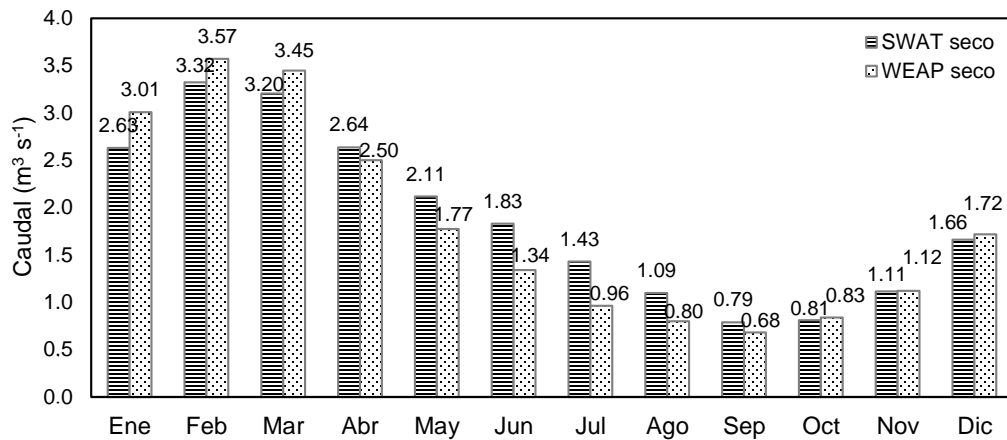


Figura 14. Comparación de escenarios secos de caudales totales de las subcuencas de la zona A.

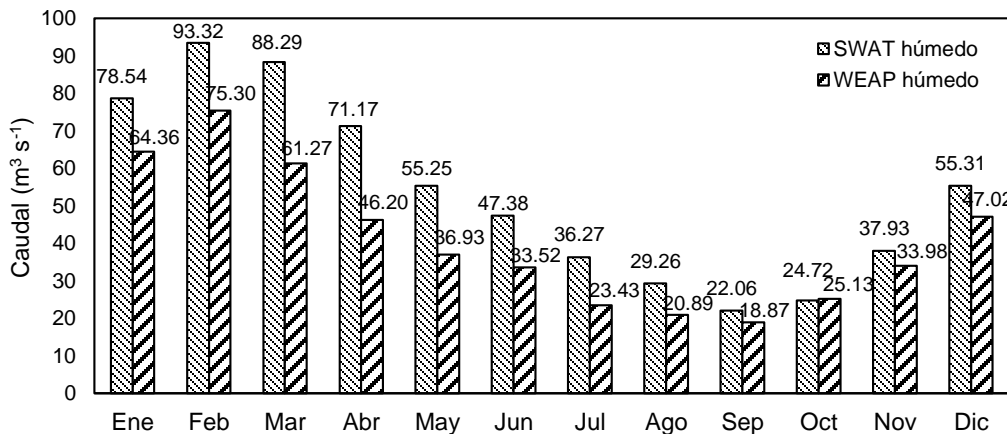


Figura 15. Comparación de escenarios húmedos de caudales de la cuenca del lago Moa de la zona B.

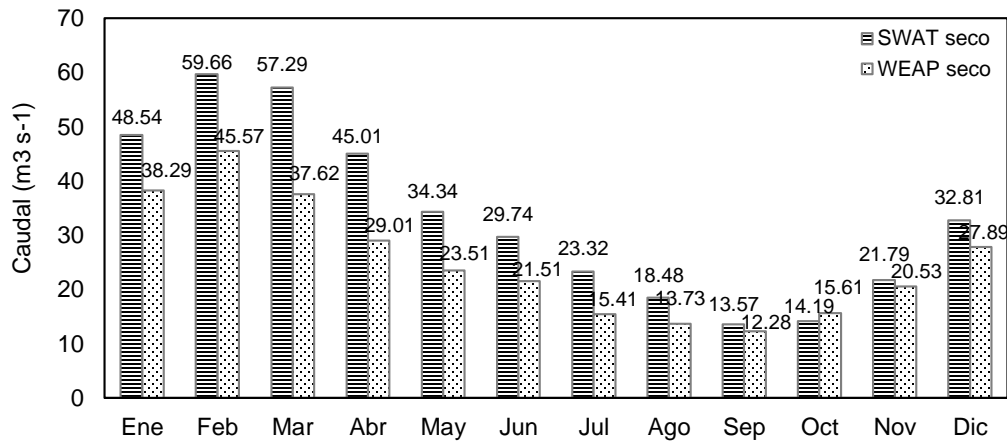


Figura 16. Comparación de escenarios secos de caudales de la cuenca del lago Moa de la zona B.

No obstante que los resultados son preliminares, se evidencia que existe una disminución importante en la oferta hídrica de las seis subcuencas estudiadas de la zona A, entorno a la población de Tumupasa y del Jardín Botánico al igual que en la cuenca del lago Moa, que la convierte en un sistema muy sensible y frágil, cuya disminución sustancial puede convertir al lago en un pantano obligando a las especies acuáticas a migrar y otras a desaparecer.

CONCLUSIONES

Se ha logrado generar y construir los modelos hidrológicos preliminares de todas las 14 subcuencas (6 subcuencas de la serranía (zona A) y 8 subcuencas de la serranía y de las 5 subcuencas de la planicie que tributan hacia el lago Moa (zona B), en los modelos hidrológicos WEAP y SWAT.

Las simulaciones preliminares realizadas, muestran que existe suficiente recurso hídrico para satisfacer la demanda de consumo humano de todas las poblaciones del área, pero también confirma que, la influencia del cambio climático, tiende a disminuir la disponibilidad de agua que a su vez depende de gran manera de la cobertura vegetal convirtiendo el área en muy sensible a la afectación humana. En este sentido, se debe evitar la tala del bosque y la deforestación inducida. Y como ejemplo, tenemos a la subcuenca del río Colorado que, está más intervenida por el hombre en la parte de la serranía, y siendo más grande presenta caudales menores.

El lago Moa es muy sensible a la oferta hídrica de su cuenca de 706.14 km² y más aún a la variabilidad climática. En mayo y octubre del 2019, se comprobó el cambio muy brusco de niveles, confirmando el análisis del escenario seco en la simulación de cambio

climático, donde el lago Moa llegaría a secarse en periodo de sequía muy prolongado y por consiguiente se debería regular el caudal de salida, para evitar este desastre ecológico.

La oferta anual, estimada del área de la cuenca, hacia el lago Moa oscila entre los Qm=49.1 m³ s⁻¹ del modelo SWAT y Qm=35.4 m³ s⁻¹ del Modelo WEAP. Pero en los hechos se ha comprobado que el caudal que ingresaba octubre del 2019 no superaba los 2.0 m³ s⁻¹ que fueron aforados en el río Limón, único tributario en la época seca.

Se debe coordinar con las autoridades locales (Sub Alcaldía, CIPTA, CIMTA) y comunarios que tienen parcelas entorno al lago, garantizar el acceso controlado al mismo en cualquier época del año y, por lo tanto, instrumentar o equipar el lago con sensores de nivel, con evaporímetro y también con una estación meteorológica en el cuerpo del lago. Información que será muy valiosa para determinar con precisión la dinámica del lago y su interacción con el río Beni y con los aportes de las aguas subterráneas.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, J; Moriasi, D; Gassman, P; Abbaspour, K; White, M; Srinivasan, R; Kannan, N. 2012. SWAT: Model use calibration and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491-1508.
- Banco Mundial. (2010). Economics of Adaptation to Climate Change, a Synthesis Report. Escenarios de Cambio Climático al 2050 para Bolivia, s.e.
- Calizaya Terceros, A. 2009. Water resources management efforts for best water allocation in the Lake Poopo basin, Bolivia. 112 p. ISSN:1101-9824, Suecia.

- Dourojeanni, A; Jouravlev, A; Chávez, G. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: Teoría y Práctica, editorial CEPAL. Publicación de las Naciones Unidas LC/L.1777-P ISBN: 92-1-322070-7 ISSN versión impresa: 1680-9017 ISSN versión electrónica: 1680-9025 Copyright © Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Global Water Partnership (GWP), 2006. Reducción de la pobreza y gestión integrada de los recursos hídricos, ISBN: 1652-5396, Suecia. 125 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2009). Guía para la descripción de suelos. Traducido y adaptado al castellano por Ronald Vargas Rojas (Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia). Cuarta edición. Roma, Italia.
- Proyecto Múltiple Misicuni (PMM). 2010. Estudios y Diseños Complementarios del PMM (Diseño para Construcción de la presa de 85 m). Estudio Hidrológico TAMS – INGETEC. 450 p.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI/SISMET). 2019. Datos climáticos de la estación Rurrenabaque. Beni, Bolivia.
- Uribe, N. 2010. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT2005. Recuperado de <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>.
- Yates, DD; Purkey, J; Sieber, A; Huber-Lee; Galbraith, H. 2005. WEAP-21 A Demand, Priority and Preference driven Water Planning Model, Water International, 30:4, 501–512.

Artículo recibido en: 07 de octubre 2020

Aceptado en: 16 de diciembre 2020