



## PROYECTO: ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN COMUNIDADES ANDINASBOLIVIANAS QUE DEPENDEN DE GLACIARES TROPICALES



## ANEXO AL INFORME FINAL

Nordic Climate Facility

La Paz, Bolivia

**ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LOS POTENCIALES IMPACTOS DEL CAMBIO  
CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA EN MICRO CUENCAS SELECCIONADAS  
SITUADAS EN EL PARQUE NACIONAL SAJAMA:**

**PRODUCTO B, C, D, E – INFORME FINAL**

**ESTUDIO DE LA OFERTA DE AGUA  
EN UNA REGIÓN DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA**



**FREDDY SORIA CEPEDAS**  
**Ingeniero civil-ambiental (M Ing., PhD)**  
**CONSULTOR INDEPENDIENTE, ONG AGUA SUSTENTABLE**

**LA PAZ, NOVIEMBRE DE 2012**

## CONTENIDO

	Página
1. ANTECEDENTES E INTRODUCCION.	3
2. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS.	4
Selección del área de estudio.	5
Desagregación del sitio de estudio en subcuencas.	6
Condiciones que definen la respuesta hídrica de la cuenca del Río Sajama.	8
Estructura del modelo matemático semidistribuido precipitación-escorrentía.	9
Esquema de aplicación del modelo.	15
Precipitación y evapotranspiración media.	16
Funciones objetivo para la calibración del modelo de balance hídrico superficial.	17
3. RESULTADOS.	17
Variabilidad espacio-temporal de la oferta de agua.	17
Sensibilidad del modelo a la ETP: comparación de la respuesta de dos sistemas.	19
Sensibilidad del modelo a la ETP y su relevancia en la proyección futura de la oferta de agua.	20
4. CONCLUSIONES.	22
AGRADECIMIENTOS	22
5. REFERENCIAS	23
ANEXO 1. DESARROLLO DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE A TRAVÉS DE EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES UNO-A-LA-VEZ	26
A1-1 Simulación del balance hídrico superficial a través de modelos agregados.	26
A1-2 Simulación del balance hídrico superficial a través de modelos semi distribuidos.	33
A1-3. Simulación del balance hídrico superficial a través de modelos semi distribuidos: Sensibilidad a probables cambios futuros en las variables climáticas.	53
ANEXO 2. PROPUESTA DE ARTÍCULO CIENTÍFICO.	56

**ESTUDIO DE LA OFERTA DE AGUA  
EN UNA REGIÓN DEL PARQUE NACIONAL SAJAMA, BOLIVIA  
Freddy Soria Céspedes**

## **1 ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN.**

El Estudio Hidrológico de los Potenciales Impactos del Cambio Climático en la Oferta de Agua de Micro cuencas Seleccionadas Situadas en el Parque Nacional Sajama es componente importante para el logro de los alcances y objetivos del proyecto titulado Adaptación al Cambio Climático en Comunidades Andinas Bolivianas que Dependen de Glaciares Tropicales, ejecutado por Agua Sustentable. Para el objeto, en cumplimiento de los Objetivos Específicos B, C, D detallados en los Términos de Referencia adjunto al contrato suscrito en fecha 26 de enero de 2012, se realiza el estudio de la oferta de agua en la cuenca piloto y en las microcuencas del área de estudio. Esta parte del estudio se implementa y desarrolla con el apoyo y soporte técnico en gabinete y en campo de los técnicos de Agua Sustentable y de CUSO International a través de Mathieu Beaulieu, y el apoyo y asesoramiento eventual del SENAMHI-Bolivia en el establecimiento de la red de monitoreo hidro climático.

El presente documento constituye el producto de un estudio realizado en cuatro etapas, cada una desarrollada con el objetivo de estudiar la disponibilidad y aprovechamiento del agua en la cuenca del Río Sajama en el tramo Manasaya-Puente Sajama, a escala de cuenca. La primera etapa del estudio tiene el objetivo de proporcionar los medios para entender la heterogeneidad espacial y estudiar la evolución de las principales unidades geomorfológicas en el periodo histórico 1986-2011 (inclusive 2012), proporcionando de esta manera el contexto general para el estudio principal. Luego de una breve descripción del medio geográfico e hidro climático, en esta primera etapa los objetivos del estudio se alcanzan mediante análisis de imágenes capturadas por sensores remotos ópticos. Para el efecto se aplican herramientas de teledetección y una comparación simple con series climáticas históricas. Tomando en cuenta las observaciones y conclusiones definidas en la primera etapa, la etapa siguiente se enfoca en el diseño e implementación de la red hidrológica para el monitoreo de la variabilidad espacio temporal identificada en la primera etapa del estudio. Es parte también de los objetivos del Proyecto la implementación de obras civiles pequeñas para el aprovechamiento del flujo superficial y subsuperficial, como aporte inmediato a las necesidades y demandas de las comunidades del Parque. Los productos de las etapas señaladas se presentan en Soria (2012f), Soria (2012g) y Soria (2012h), respectivamente.

Al haber establecido el marco general para el estudio (Soria, 2012f), habiéndose instaurado la red para el monitoreo de la hidrología superficial y subsuperficial (Soria, 2012g), y al proporcionar una contribución inmediata a través de obras civiles simples instauradas por el Proyecto (Soria, 2012h), la presente etapa se enfoca específicamente en el estudio de la oferta de agua. Este documento presenta los productos obtenidos a través de la aplicación de un modelo semidistribuido de balance hídrico superficial desarrollado bajo la estructura propuesta en Collick et al. (2009), como herramienta para generar series históricas de caudal para el tiempo presente (periodo 1979-2011) y series proyectadas para el tiempo futuro (periodo 2046-2055). Estas series representan la oferta de agua de la cuenca que constituyen los datos de entrada para la generación de una propuesta marco para el análisis del balance oferta-demanda de agua como herramienta para la futura construcción de un esquema de gestión de los recursos hídricos en la región de estudio. Este último constituye uno de los objetivos principales del proyecto "Adapting to Climate Change in

Bolivian Andean Communities Depending on Tropical Glaciers”, y provee la justificación para dar curso a la Consultoría presente.

Para la descripción del balance hídrico superficial es importante la contribución del Estudio Agroclimático de García (2012a, b) debido a que de allí se obtienen las series corregidas, rellenadas y homogeneizadas que constituyen las variables de entrada precipitación y evapotranspiración a nivel mensual para el modelo de balance hídrico. El desarrollo del modelo matemático adopta el concepto de equifinalidad (Beven, 2004) a través de la evaluación de la incertidumbre predictiva (Wagener et al., 2004) y la aplicación de experimentos simples de sensibilidad (Saltelli, 2000); La estructura del modelo se presenta en el cuerpo del presente documento y los detalles del desarrollo del mismo se presentan en el Anexo 1. La validación del estudio se realiza mediante una propuesta de artículo científico cuyo resumen se presenta en el Anexo 2.

Cuando se analizan las limitaciones en la disponibilidad de información de caudales en los ríos como variable representativa de la respuesta hídrica de la cuenca y subcuencas, el comité de evaluación de los productos del Proyecto tiene conocimiento pleno que los resultados a ser descritos denotan un producto ambicioso validado a través de series observadas durante un único año hidrológico 2011-2012 (2012-2013). Es por esta razón que a partir de noviembre de 2012 se decidió mejorar la red correspondiente a través de la instalación de una estación hidrométrica a la salida de la cuenca (Puente Sajama) y continuar con el monitoreo hidrológico durante la fase de subida del hidrograma de caudales del periodo hidrológico 2012-2013. El objetivo es actualizar los resultados publicados en el presente documento debido a la relevancia y al potencial que tiene el conocimiento generado, hacia la planificación del uso de los recursos hídricos de la zona y su área de influencia, el estudio de los potenciales efectos del cambio climático en cuencas Andinas y zonas de montaña. La relevancia del estudio se considera tanto para el tiempo presente como para un eventual tiempo futuro bajo escenarios de cambio climático, hacia la dotación de herramientas para la planificación de eventuales medidas de adaptación y mitigación. Los resultados de esta última etapa serán presentados como un Anexo adicional al Informe Final de Consultoría luego de la fecha de entrega del mismo, dada su relevancia para el fortalecimiento de los resultados del Proyecto.

## **2 DESCRIPCION DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS.**

Como se menciona en los párrafos precedentes, el título de la Consultoría denota un ambicioso producto final, considerando la limitada información disponible de la variable caudal a diferentes escalas y la poca consistencia de las observaciones de las variables climáticas en la región de estudio (vacíos de información, series temporales incompletas), aspectos que definen los actuales retos y limitaciones en el tema de la identificación de señales de cambio climático en zonas remotas de montaña con ausencia o con limitada información hidro climática (Beniston, 2000; Huber et al., 2005; IPCC, 2007). Es en relación a lo ambicioso del título que para describir el análisis de los resultados presentados se coloca el término "potenciales impactos", con el objeto de aislar ambigüedades en la interpretación de los productos del presente estudio, aclarando que los resultados pretenden otorgar una visión general de los impactos de posible ocurrencia (latentes; aún no evidentes) inferidos a partir de la interpretación del conocimiento actual obtenido del análisis de las mediciones de las variables hidro climáticas.

## 2.1 Selección del área de estudio.

El Volcán Sajama es el pico más alto de los Andes en su travesía por Bolivia (altura del pico: 6542 msnm), constituye el símbolo del Parque Nacional Sajama y es el ícono del Proyecto presente. La región donde se desarrolla el Sajama tiene clima semiárido, con precipitación media anual de 350 mm, lluvias concentradas en el periodo diciembre-marzo y evapotranspiración media anual de referencia que sobrepasa la precipitación media ocasionando déficit en el balance (García, 2012a, b). En esta región de Bolivia, el contenido de humedad en la atmósfera durante el invierno es mínimo. Durante esta época de invierno (época de estiaje, entre mayo-junio e inclusive hasta el periodo agosto-septiembre), son comunes las heladas ocasionales y las nevadas ocasionadas por la entrada de masas de aire polares transportadas por vientos del oeste (Vuille, 1999). Durante la época de lluvias, los niveles específicos de humedad se incrementan debido a la masas de humedad transportadas por vientos del este; en este proceso, el transporte de humedad de la zona de la Amazonía y el Chaco hacia la zona del Altiplano es obstaculizado por los vientos secos del oeste.

El estudio de la cuenca Aychuta (la cuenca piloto) fue uno de los principales objetivos del Proyecto desde el inicio de sus actividades. La cuenca Aychuta se sitúa al pié del glaciar Sajama-sudoeste, constituyendo la región que teóricamente mejor se adecuaba al título del Proyecto y a sus objetivos. La cuenca de Aychuta es probablemente la única con orientación este (suroeste) en la que se observa un curso hídrico superficial permanente que fluye por los taludes laterales del Volcán Sajama en dirección a la parte baja de la cuenca; las otras cuencas que se forman en los taludes del Volcán Sajama únicamente presentan cursos hídricos superficiales que aparecen estacionalmente. En enero de 2012 la consulta a profesionales con experiencia en la región de interés y la consiguiente visita al área de estudio, permitió evidenciar que la respuesta hídrica superficial y subsuperficial de la cuenca de Aychuta no representa la enorme heterogeneidad espacio-temporal de la respuesta hídrica del Parque. Por esta razón se decidió ampliar el alcance del monitoreo hacia la cuenca del Río Sajama, en el tramo Manasaya – Puente Río Sajama. Para guiar al lector en la comparación de ambas cuencas, la cuenca Aychuta tiene un área aproximada de 9.2 km<sup>2</sup>, longitud equivalente media del polígono igual a 6.6 km, elevación promedio de 4980 msnm, y pendiente media del curso principal de 42.4%; por otro lado el área de la cuenca del Río Sajama en el tramo estudiado es de 568 km<sup>2</sup>, longitud equivalente media del polígono igual a 37 km, elevación promedio 4576 msnm (más baja que Aychuta), y pendiente media del curso principal de 16.5% notoriamente menor a la calculada para Aychuta.

De acuerdo al Servicio Nacional de Áreas Protegidas, el Parque Nacional Sajama tiene un área estimada de 1002 km<sup>2</sup>. Los ríos que definen la respuesta hídrica del Parque son el Río Sajama por el oeste del Volcán Sajama y el Río Tomarapi por el este del mismo Volcán. Para este estudio se decidió monitorear únicamente la cuenca del Río Sajama en el tramo señalado en el párrafo anterior por dos razones principales. La primera es que las obras piloto instauradas por Agua Sustentable aprovechan la oferta de agua generada en ese tramo del Parque. La decisión de monitorear únicamente esta porción del Parque también responde a razones prácticas: el monitoreo de todo el Parque excede en demasía las capacidades del personal técnico disponible y la capacidad económica del proyecto. El esquema del área de estudio final se presenta en la Figura 1. Los detalles específicos acerca de la red de monitoreo se presentan en la Parte III del Informe Final correspondiente a la presente Consultoría (Soria, 2012h).

## 2.2 Desagregación del sitio de estudio en subcuencas.

Para describir la heterogeneidad espacio-temporal de la respuesta hídrica del Parque en el tramo Manasaya-Puente Río Sajama, el área de monitoreo se desagrega en las subcuencas cuyas características geomorfológicas se resumen en la Tabla 1. El grupo de subcuencas estudiadas está encabezada por la cuenca piloto de Aychuta, situada al sudoeste de la cuenca del Río Sajama, con relevancia adecuadamente explicada en los párrafos precedentes. El grupo restante de subcuencas identificadas explica la configuración de la red de monitoreo presentada en la Parte III del Informe Final de la Consultoría presente (Soria, 2012h), replicada en el presente documento a través de la Figura 2.

La red de monitoreo comprende una configuración de sensores y reglas limnimétricas monitoreadas con periodicidad mensual. En la Figura 2 se observa tres grupos de piezómetros instalados en los bofedales para monitorear las variaciones en los niveles de agua o gradientes hidráulicos (un grupo de piezómetros en Aychuta, otro en la comunidad Lagunas y otro en la parte central de la cuenca del Río Sajama aguas arriba del Puente Sajama); dos grupos de sensores de presión para la medición de las variaciones en los niveles de agua completan la red de piezómetros (un grupo en Aychuta y otro grupo en la parte central de la cuenca del Río Sajama). Esta red de piezómetros la completa la red de estaciones climáticas (Figura 3) constituida por dos estaciones situadas dentro del área de estudio más ocho estaciones de apoyo situadas fuera de la cuenca.

**Tabla 1.** Esquema general del área de estudio. Aguas abajo de la cuenca Aychuta el curso permanente se convierte

Cuenca	Área [km <sup>2</sup> ]	Perímetro [km]	Pendiente promedio del curso principal [%]	Elevación mínima [msnm]	Elevación máxima [msnm]	Elevación promedio [msnm]	Longitud máxima del curso principal [km]	Longitud equivalente [km]
Río Sajama	568	105	16	4120	6543	4576	39	37
Río Pizrrata	118	49	20	4150	6318	4721	26	18
Río Taypijahuirá	72	49	11	4150	5882	4499	22	21
Geiser (aguas arriba de la confluencia con el Río Sajama)	21	30	25	4232	5368	4626	15	13
Manasaya (aguas arriba de la confluencia con el Río Sajama)	42	30	27	4292	4676	4776	14	12
Sajama@Manasaya (aguas arriba de la confluencia con el Río Sajama)	118	49	15	4285	5750	4621	20	18
Aychuta	9	16	42	4492	6377	4980	7	7

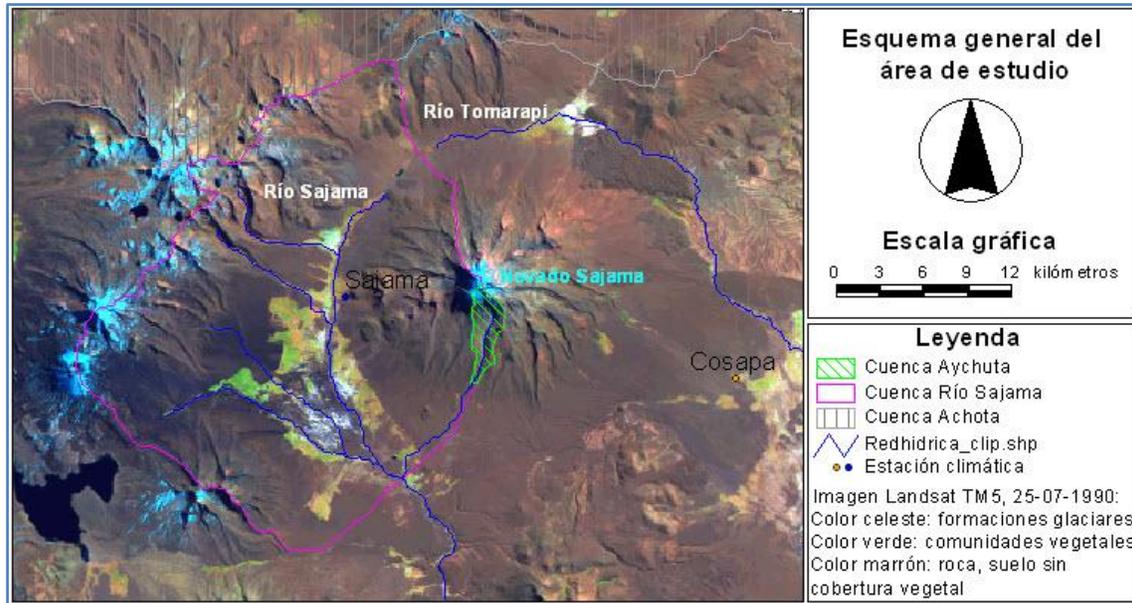


Figura 1. Esquema general del área de estudio. Aguas abajo de la cuenca Aychuta el curso permanente se convierte en un curso transitorio; este curso no es tributario del Río Sajama en el tramo estudiado.

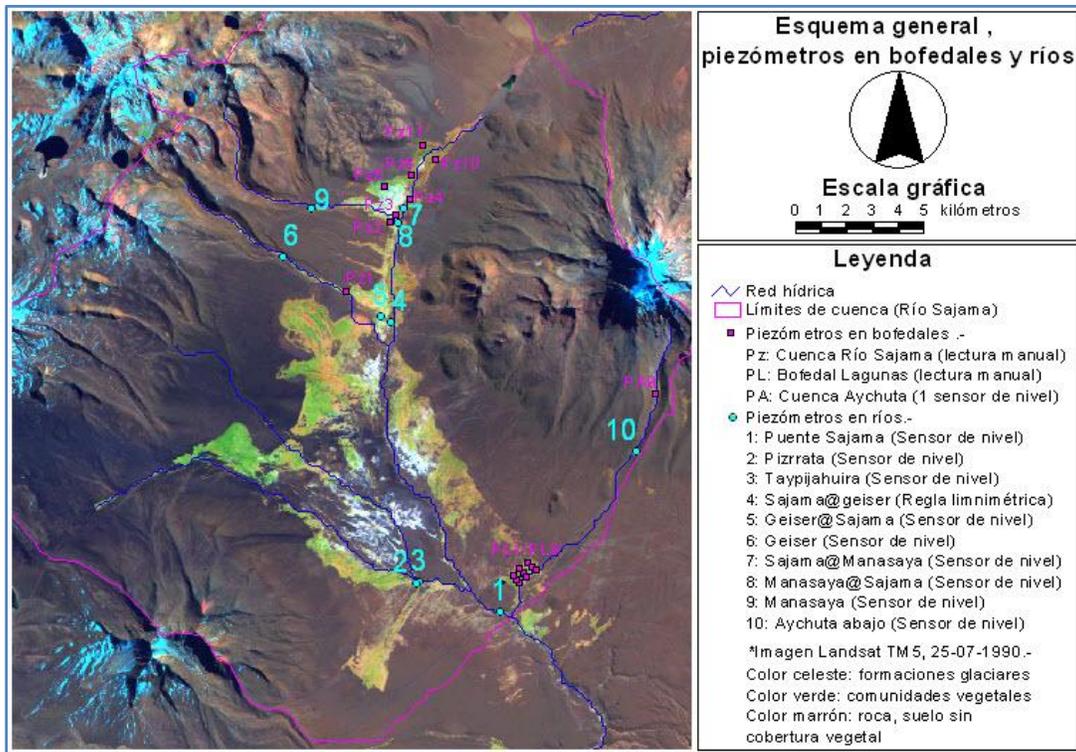
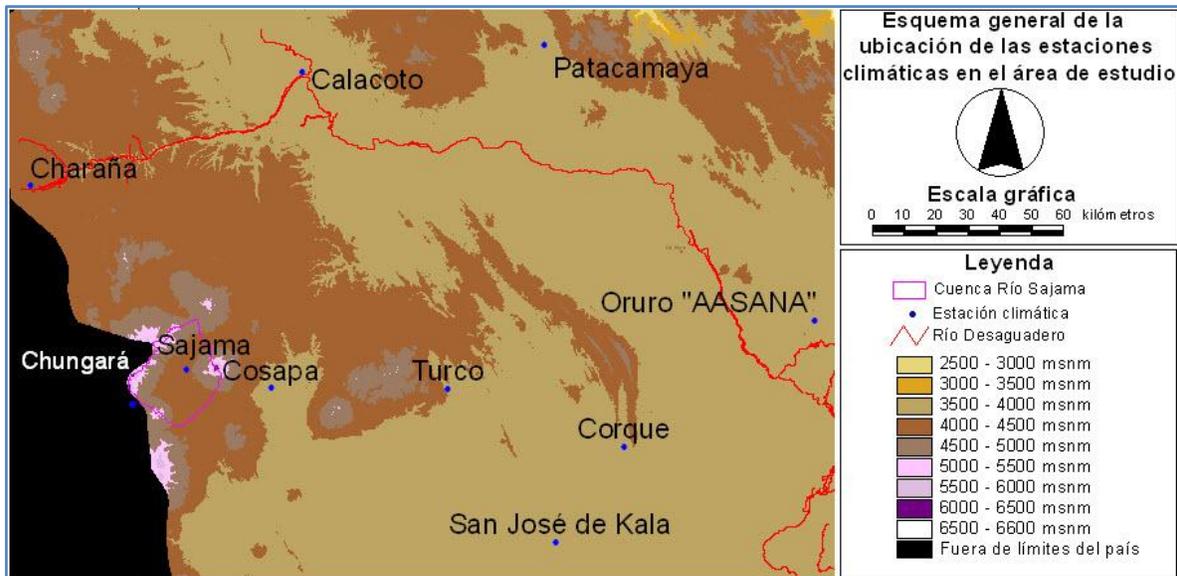


Figura 2. Localización de los piezómetros instalados en bofedales y ríos tributarios de la cuenca del Río Sajama.



**Figura 3.** Situación geográfica de estaciones climáticas con registros consistentes según el criterio de Iriarte (2005). Se muestra también la situación geográfica de la cuenca del Río Sajama. Las estaciones utilizadas en el estudio presente son Sajama y Chungará; esta decisión se apoya en las conclusiones de García (2012a) y García (2012b).

### 2.3 Condiciones que definen la respuesta hídrica de la cuenca del Río Sajama.

La descripción de la heterogénea respuesta hídrica producto de los procesos precipitación-escorrentía en el área de estudio es particularmente interesante por dos razones. La primera es la parcial cobertura glaciaria en la parte alta de la cuenca y la segunda es el carácter dominante del componente escorrentía sub superficial sobre el componente escorrentía total a escala de cuenca, debido a los orígenes volcánicos de las formaciones geológicas que definen el paisaje de la región de estudio.

#### Factor infiltración.

La infiltración es alta en las áreas no cubiertas por bofedales andinos, debido a que el material que compone las capas superficiales de los suelos no está consolidado y es altamente erosionable. Este tipo de formación se observa en los taludes laterales donde no existe presencia de cobertura vegetal, y en los taludes laterales cubiertos por pajonales subniveles, bosques altoandinos y comunidades de tholares (la descripción de la cobertura vegetal se realiza en base a la información de Navarro y Ferreira, 2007).

El factor infiltración es un componente relevante para el estudio porque define la intermitencia observada en los cursos hídricos superficiales que fluyen sobre los taludes laterales situados en las zonas altas donde se desarrollan las morrenas glaciares. Las condiciones hídricas observadas en campo sugieren que la relevancia del factor infiltración se extiende hasta la parte baja de la cuenca, lo cual lo convierte en un componente relevante para la modelación del escorrentía total monitoreado y simulado a la salida de la cuenca del Río Sajama.

**Factor deshielo glaciar.**

Aparte de la infiltración, el segundo componente relevante está constituido por el aporte del deshielo proveniente de las partes altas de la cuenca cubiertas por glaciares. Aunque tal aporte podría ser relevante tal como sugieren los resultados de estudios en otras zonas de los Andes en Bolivia (e.g., Espinoza y Fuchs, 2011), la representación matemática y posterior cuantificación de tales aportes es altamente complejo en esta zona debido a la compleja configuración geológica y principalmente debido a la notablemente limitada información hidrológica e hidrogeológica. Esta última constituye la razón por la cual la relevancia de estos aportes en el presente Proyecto se realiza desde una perspectiva netamente empírica.

**Factor retención superficial y subsuperficial: rol de los bofedales**

El tercer componente relevante al estudio de la respuesta hídrica está definido por el factor retención superficial y subsuperficial definido por el rol de los bofedales. Estas formaciones se presentan en los valles donde el escurrimiento superficial se desarrolla sobre pendientes suaves, en los pequeños valles desarrollados en la parte alta de la cuenca, al pié de formaciones glaciares y al pié de taludes donde en la actualidad únicamente se observa nieve estacional. La mayor superficie de bofedales se desarrolla en la parte baja de la cuenca del Río Sajama (ver Figura 2).

A diferencia de los suelos que forman los taludes, los bofedales están constituidos por suelos consolidados por efecto de la superposición de capas sucesivas de material fino con propiedades cohesivas que producto de la humedad dio lugar al crecimiento de materia orgánica. Estas propiedades dan lugar a formaciones con bajas tasas de infiltración y condiciones cercanas a la saturación que proveen condiciones adecuadas para que el agua se almacene superficialmente (condiciones óptimas para el encharcamiento). La observación del sitio sugiere que el agua allí almacenada eventualmente escurrirá superficialmente, aún en época de estiaje, a través de los taludes que forman las riberas de los ríos (por rebalse del agua almacenada), constituyendo una fuente de aporte al caudal total para los cursos principales. Por las características de los bofedales, es también probable que los aportes de los volúmenes del agua contenida en las capas de suelo saturadas alcancen la relevancia sugerida para los volúmenes aportados por escurrimiento superficial desde los bofedales hacia los cursos principales.

De esta manera por las razones expresadas, la mayor complejidad del estudio radica en contabilizar los volúmenes de agua aportados o regulados por los bofedales y la evolución estacional e histórica del aporte del deshielo de los glaciares utilizando información limitada, razón por la cual en la presente consultoría se propone realizar el estudio de la oferta de agua de manera global, a la escala de cuenca, en pasos de tiempo amplios (escala mensual). Debido al gran interés que la temática despierta, debido a la importancia de entender los procesos físicos que definen la respuesta hídrica, y principalmente debido al limitado conocimiento que existe en la comunidad científica e ingenieril respecto a los temas citados, es que se considera que los resultados a ser generados tienen un nivel de relevancia que justifica que en el futuro otros emprendimientos continúen con el estudio iniciado en el presente Proyecto.

**2.4 Estructura del modelo matemático semidistribuido precipitación-escurrimiento.**

El esquema general para el modelo de balance hídrico superficial está basado en la expresión general del balance de humedad en el suelo (Ojha y Singh, 2002). El esquema se presentó en el Anexo de Soria (2012c) y en el Tercer Informe de Avance, pero debido a su relevancia en los alcances del presente documento se resumen a continuación.

a) **Modelo perceptual.**- El modelo conceptual está basado en un esquema de reservorios horizontalmente discretizados en unidades geomofológicas agrupadas en cordones altitudinales (Collick et al., 2009). Se asume que el escurrimiento superficial ocurre por exceso de saturación del suelo.

b) **Balance de humedad en el suelo.**- La expresión general es (Ojha and Singh, 2002):

$$dS / dt = (P - AET - Q) \quad (1),$$

donde el volumen de almacenamiento de agua por unidad de área  $S$  [L] durante un paso de tiempo  $t$ , está determinado por la precipitación  $P$  [ $L T^{-1}$ ], la evapotranspiración actual  $AET$  [ $L T^{-1}$ ], y el escurrimiento total de la cuenca  $Q$  [ $L T^{-1}$ ].

c) **Balance hídrico del reservorio vertical.**- La respuesta de cada reservorio horizontal depende del contenido efectivo de humedad del suelo  $S_{max}$  (Soria y Kazama, 2011). El parámetro  $S_{max}$  se entiende como la diferencia entre el contenido de agua en el suelo al momento que el escurrimiento superficial ocurre  $S_{SE}$  y la capacidad mínima de almacenamiento de agua en el suelo  $S_{min}$ . El balance hídrico del reservorio vertical se explica mediante la siguiente, donde  $Q_{SE}$  [ $L T^{-1}$ ] es el escurrimiento superficial por exceso de saturación, y  $Perc$  [ $L T^{-1}$ ] es la percolación.

$$dS / dt = (P - AET - Perc - Q_{SE}) \quad (2),$$

En condiciones áridas o con tasas de infiltración altas,  $Q_{SE}$  es inexistente. En condiciones húmedas-saturadas ( $S$  igual o mayor a  $S_{max}$ ), el exceso de agua que se convertirá en  $Q_{SE}$  o  $Perc$  se determina a través de un coeficiente  $Cse$ .

d) **Evapotranspiración actual AET.**- Se asume que los números de días con lluvia observados en el periodo de cálculo  $t$  (*lluviad* [days]) determinan la relación entre  $AET$  y la evapotranspiración potencial  $PET$  [ $L T^{-1}$ ]. Considerando que el balance es a nivel mensual, aún para periodos sin lluvia en la siguiente se sugiere asumir que *lluviad* es por lo menos 1.

$$AET = ETP \left( \frac{lluviad}{t} \right) \quad (3).$$

e) **Contribución de Perc al reservorio subterráneo:  $S_{GW}$ .**- El  $S_{GW}$  [L] se estima a través de la relación presentada a continuación, donde  $Q_{GW}$  [ $L T^{-1}$ ] es el flujo subterráneo por unidad de área. Debido al limitado conocimiento del régimen del flujo sub superficial, para una simulación inicial se asume que  $Q_{GW}$  tiene un valor constante.

$$dS_{GW} / dt = (Perc - Q_{GW}) \quad (4).$$

## 2.5 Parámetros del modelo.

Para cuencas donde existe mayor certidumbre de los procesos que definen la respuesta hídrica de la cuenca, los parámetros  $S_{SE}$  y  $S_{min}$  para el cálculo de  $S_{max}$  se podrán calcular utilizando información inferida de mapas temáticos de uso y cobertura de suelo y cobertura vegetal (Soria y Kazama, 2011). En el presente caso, dada la incertidumbre existente en la respuesta hídrica producto de los limitados registros de la variable caudal en campo (a varias escalas) y debido a la

esperada heterogeneidad de la respuesta hídrica, la primera inferencia del parámetro mencionado se realiza a partir de valores referenciales de abstracciones calculadas mediante el método empírico del SCS. El método conoce en el ámbito ingenieril como el método del número de curva  $CN$ , y su cálculo se describe en la literatura (e.g., ver Chow et al., 1998). Para el estudio presente, los parámetros para el cálculo de abstracciones se representan mediante valores de retención potencial máxima  $S'_{max}$  que se estiman utilizando la información de Navarro y Ferreira (2007). La distribución altitudinal de las comunidades de vegetación, así como una descripción adicional de las mismas se presentan en las Tablas 2 y 3; en base a esta información, la Tabla 4 presenta los grupos hidrológicos y los valores referenciales de transmisividad; la Tabla 5 presenta los valores referenciales del  $CN$ . En las tablas se observa, que el modelo considera que existe menor potencial de escurrimiento directo en los taludes laterales y en las áreas con pendientes bajas que no están cubiertas por bofedales; por otro lado, en la zona cubierta por bofedales el modelo considera que la superficie es poco permeable y con mayor potencial a escurrimiento. Finalmente, el parámetro  $Cse$  regula la recarga a los acuíferos subterráneos, y define la porción del exceso de humedad en el suelo que se convierte en escurrimiento superficial (eventualmente, retención superficial). De esta manera al asumir que los valores iniciales del parámetro  $S_{max}$  a través de  $S'_{max}$  pueden inferirse a partir de información obtenida de mapas temáticos, y el parámetro  $Cse$  constituye el único parámetro a calibrar.

**Tabla 2.** Descripción detallada de las unidades de las comunidades vegetales presentes en el área de estudio. La descripción se realiza a escala 1:250 000, en base a la información y nomenclatura presentada en Navarro y Ferreira (2007).

Unidad principal	Sub-unidad	Variación de la sub-unidad
<i>CORDILLERA OCCIDENTAL, ALTIPLANO CENTRO-SUR Y CORDILLERA ORIENTAL CENTRO-SUR</i>		
<b>p10=</b> Vegetación subnival de la Puna xerofítica.	<b>p10a=</b> Pajonal subnival de la Puna xerofítica noroccidental.	<b>p10a´=</b> Vegetación geliturbada subnival de la Puna Xerofítica noroccidental.
<b>p11=</b> Bosques, arbustales y cardonales altoandinos de la Puna y Altiplano xerofíticos.	<b>p11a=</b> Bosque altoandino de Polylepis de la Cordillera Occidental norte: 3900 a 4000m a 4700m.	
<b>p12=</b> Pajonales, matorrales y herbazales altoandinos de la Puna y altiplano xerofíticos sobre suelos bien drenados.	<b>p12a=</b> Tholar pajonal altoandino noroccidental: 3900 a 4300 a 4400m.	<b>p12a´=</b> Tholar pajonal altoandino noroccidental: 3900 a 4300 a 4400m.
<b>p13=</b> Matorrales higrofíticos altoandinos de la Puna y Altiplano xerofíticos (Tholares).	<b>p13b=</b> Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: Suelos húmedos eurotróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.	
	<b>p13c=</b> Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: suelos húmedos eutróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.	
<b>p14=</b> Vegas y humedales de la Puna y Altiplano xerofíticos.	<b>p14a=</b> Pajonales hidrofíticos de la Puna xerofítica: pajonales exclusivos de suelos mal drenados a estacionalmente anegados de vegas o depresiones, donde ocupan márgenes de arroyos, lagunillas.	
	<b>p14b=</b> Bofedales altoandinos de la Puna xerofítica: especies perennes, morfología compacta, plana o almohadillada; sobre suelos turbosos saturados.	
	<b>p14c=</b> Vegetación acuática altoandina de la Puna xerofítica: Plantas acuáticas, sobre aguas mineralizadas y no mineralizadas, aguas salinas o salobres.	

**Tabla 3.** Descripción de las comunidades vegetales a escala 1:250 000, en base a la información presentada en Navarro y Ferreira (2007). La nomenclatura corresponde también a la referencia citada. La información está ordenada en función a la magnitud de la superficie cubierta por cada comunidad vegetal.

Unidad dominante	Sub-unidad 1	Sub-unidad 2	Rango altitudinal (msnm)	Otras observaciones
<i>CORDILLERA OCCIDENTAL, ALTIPLANO CENTRO-SUR Y CORDILLERA ORIENTAL CENTRO-SUR</i>				
<b>p12a</b> = Tholar pajonal altoandino noroccidental: 3900 a 4300 a 4400m.	<b>p11a</b> = Bosque altoandino de Polylepis de la Cordillera Occidental norte.	<b>p14</b> = Vegas y humedales de la Puna y Altiplano xerofíticos.	En general de 3900m a 4000m, a 4300m, a 4700m (en nuestra área de estudio: 4100m a 4600m).	Area 218.53km <sup>2</sup> ; en la parte de la cuenca con pendientes longitudinales bajas.
<b>p10a</b> = Pajonal subnival de la Puna xerofítica noroccidental.	<b>p11a</b> = Bosque altoandino de Polylepis de la Cordillera Occidental norte.	<b>p14</b> = Vegas y humedales de la Puna y Altiplano xerofíticos.	En general de 3900m a 4000m, a 4700m, a 5200m (en nuestra área de estudio: 4470m a 5050m).	Area 173.98km <sup>2</sup> ; en las laderas de las principales montañas.
<b>p27r</b> = Sin vegetación; roca.	<b>p10a'</b> = Vegetación geliturbada subnival de la Puna Xerofítica noroccidental.		En general a alturas mayores a 4600m (en nuestra área de estudio: 4900m a 6400m).	Area 72.47km <sup>2</sup> ; en la parte más alta de la cuenca.
<b>p14b</b> = Bofedales altoandinos de la Puna xerofítica: especies perennes, morfología compacta, plana o almohadillada; sobre suelos turbosos saturados.			En general de 3900m a 4900m (en nuestra área de estudio: 4100m a 4350m).	Area 69.59km <sup>2</sup> ; aguas abajo de la cuenca del Río Sajama (área extendida a lo largo de la zona de pendientes bajas).
<b>p14</b> = Vegas y humedales de la Puna y Altiplano xerofíticos.			En general de 4100m a 4280m (en nuestra área de estudio: 4100m a 4280m).	Area 39.74km <sup>2</sup> ; aguas abajo de la cuenca del Río Sajama (zona con pendientes bajas).
<b>p12a'</b> = facies de suelos profundos (glacis y piedemontes). Volcanes, altas mesetas y serranías.	<b>p13b</b> = Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: Suelos húmedos eutróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.		En general de 3900m a 4300m, a 4400m (en nuestra área de estudio: 4150m a 4460m).	Area 19.48km <sup>2</sup> ; aguas abajo de la cuenca del Río Sajama (a la salida de la cuenca).
<b>p12a'</b> = facies de suelos profundos (glacis y piedemontes). Volcanes, altas mesetas y serranías.	<b>p13c</b> = Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: suelos húmedos eutróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.		En general de 3900m a 4300m, a 4400m (en nuestra área de estudio: 4320m a 4390m; 4470m 4580m).	Area 5.89km <sup>2</sup> ; aguas arriba de la cuenca del Río Sajama (en el nacimiento del Río Sajama).
<b>p13b</b> = Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: Suelos húmedos eutróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.			En general de 3900m a 4300m, a 4400m (en nuestra área de estudio: 4320m a 4490m).	Area 4.42km <sup>2</sup> ; aguas arriba de la cuenca del Río Sajama (en el nacimiento del Río Sajama).
<b>p14a</b> = Pajonales hidrofíticos de la Puna xerofítica: pajonales exclusivos de suelos mal drenados a estacionalmente anegados de vegas o depresiones, donde ocupan márgenes de arroyos, lagunillas.			En general de 4100m a 4200m (en nuestra área de estudio: 4150m a 4200m).	Area 4.29km <sup>2</sup> ; aguas abajo de la cuenca del Río Sajama (zona con pendientes bajas; cerca de la salida de la cuenca).
<b>p14c</b> = Vegetación acuática altoandina de la Puna xerofítica: Plantas acuáticas, sobre aguas mineralizadas y o minerañizadas, aguas salinas o salobres.			4350m	Area 1.31km <sup>2</sup> ; aguas arriba de la cuenca del Río Sajama (zona de pendientes medias).
<b>p13c</b> = Tholar de Romero Thola del Altiplano centro sur: suelos húmedos eutróficos calcáreos y algo salobres; bioclima xérico seco y semiárido.	<b>p12a'</b> = facies de suelos profundos (glacis y piedemontes). Volcanes, altas mesetas y serranías.		3900m a 4300m, a 4400m (en nuestra área de estudio: 4560m a 4590m).	Area 0.31km <sup>2</sup> ; aguas arriba de la cuenca del Río Sajama (en las pendientes laterales del nacimiento del Río Sajama).

**Tabla 4.** Valores referenciales de transividad del suelo para los grupos hidrológicos de la región de estudio.

Grupo Hidrológico			
Tip o	Descripción	Suelos tipo asociado	Transmisitividad promedio del suelo
A	Bajo potencial de escurrimiento y alta tasa de infiltración aún en condiciones cercanas a la saturación.	Suelos profundos. Arenas y gravas con alta tasa de transmisividad.	Mayor a 7.6 mm/h
B	Moderado potencial de escurrimiento en condiciones cercanas a la saturación.	Suelos moderadamente profundos a profundos. Textura moderadamente fina a moderadamente gruesa.	3.8 a 7.6 mm/h
C	Bajo potencial de infiltración en condiciones cercanas a la saturación.	Suelos con una capa que obstruyen el movimiento del agua en dirección vertical.	1.3 a 3.8 mm/h
D	Alto potencial de escurrimiento. Muy baja infiltración en condiciones cercanas a la saturación.	Suelos arcillosos con alto potencial de expansión. Suelos con alto nivel freático (permanente). Suelos con una capa arcillosa sobre o muy cerca de la superficie. Suelos muy poco profundos situados sobre o muy cerca de capas de suelo impermeables.	0.0 a 1.3 mm/h

**Tabla 5.** Valores referenciales de retención potencial máxima del suelo  $S'_{max}$  para los grupos hidrológicos de la región de estudio y tres condiciones antecedentes de humedad (condiciones antecedentes de humedad normales *CN II*, secas *CN I* y húmedas *CN III*).

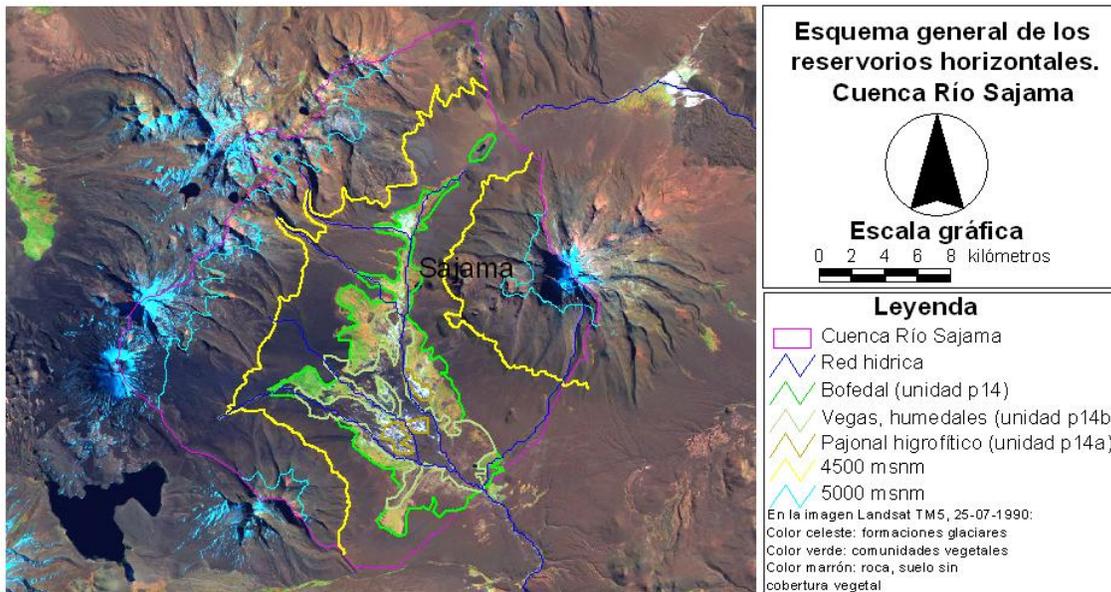
LEYENDA. Grande zona biogeográfica de vegetación: p (puna, cordilleras y altiplano).

DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva <i>CN II</i> (condiciones normales)			<i>CN I</i> (condiciones secas)	<i>CN III</i> (condiciones húmedas)	$S'_{max}$ mm para <i>CN II</i>	$S'$ mm para <i>CN I</i>	$S'$ mm para <i>CN III</i>	Area [ $km^2$ ]	<i>CN II</i> *Area [ $km^2$ ]
		promedio	mínimo	máximo							
		Unidad compleja de mapeo									
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	47	83	120	285	52	171.18	11640
p10a+p10a'+p14	C	58	78	68	47	83	120	285	52	2.95	200
p27r+p10a'	C	58	68	63	42	80	149	355	65	72.43	4563
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	47	83	120	285	52	197.78	13449
p12a'+p13b	B	61	71	66	45	82	131	312	57	12.07	797
p12a'+p13c	B	61	71	66	45	82	131	312	57	5.89	389
p13b	B	71	71	71	51	85	104	247	45	4.42	314
p13c+p12a'	B	61	71	66	45	82	131	312	57	0.31	20
p14	C	78	78	78	60	89	72	171	31	36	2808
p14a	B	71	71	71	51	85	104	247	45	4.29	305
p14b	D	89	89	89	77	95	31	75	14	59.01	5252
p14c	D	89	89	89	77	95	31	75	14	1.31	117
Suma:										567.64	39853

## 2.6 Esquema de aplicación del modelo.

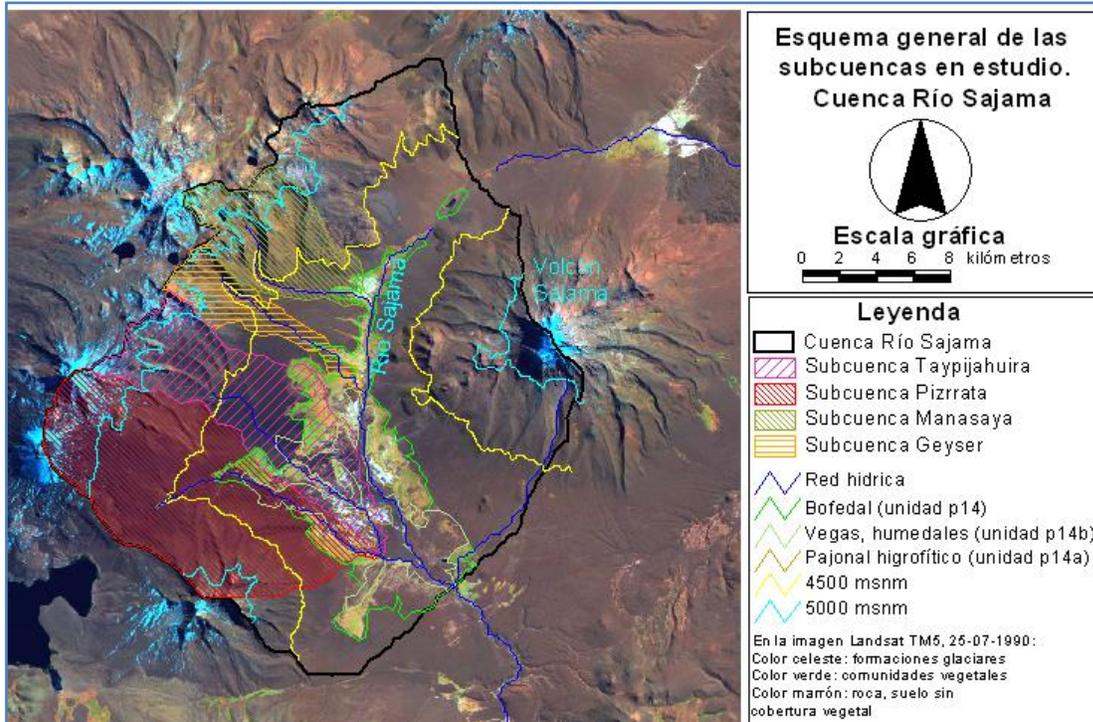
El modelo se aplica a la cuenca del Río Sajama a través de un esquema semidistribuido de cuatro reservorios horizontales, con tres cordones altitudinales. Los reservorios horizontales se desarrollan de la siguiente manera:

- **Reservorio 4:** De 5001 msnm a 6543 msnm. Para este Reservorio se calculó una retención potencial máxima  $S'_{max}$  de 149 mm (unidad de vegetación p27r+p10a').
- **Reservorio 3:** De 4501 msnm a 5000 msnm. Para este Reservorio se calculó un  $S'_{max}$  de 120 mm (valor medio ponderado de los valores correspondientes a las unidades de vegetación p10a+p10a'+p14, p10a+p11a+p14 y p13c+p12a').
- **Reservorio 2:** De 4120 msnm a la salida de la cuenca hasta 4500 msnm. Para este Reservorio se calculó un  $S'_{max}$  de 120 mm (valor medio ponderado de 131 mm y 120 mm inferidos para las unidades p12a'+p13b, p12a'+p13c y p12a+p11a+p14, respectivamente).
- **Reservorio 1:** Sobre la región de la cuenca con bajas pendientes donde se desarrollan las unidades de vegetación bofedales alto andinos y vegas y humedales. Este Reservorio se desarrolla sobre las unidades de vegetación p14, p14b y p14a (según la nomenclatura de las Tablas 1 y 2), respectivamente, desde la salida de la cuenca a 4120 msnm en dirección aguas arriba hasta una cota de aproximadamente 4340 msnm (Figura 4). No se consideran parte del Reservorio 1 a las superficies de bofedales que se desarrollan en la parte alta perimetral de la cuenca al pie de formaciones glaciares. Los valores de  $S'_{max}$  varían de 31 mm, 72 mm a 104 mm para la época de estiaje en las unidades p14, p14a, p14b, p14c, p13b respectivamente; en este Reservorio se calculó un valor agregado de  $S'_{max}$  de 51 mm para la época húmeda (valor medio ponderado para las unidades p14, p14a, p14b, p14c, p13b asumiendo condiciones de saturación y valores bajos de retención potencial máxima).



**Figura 4.** Distribución espacial de los reservorios horizontales para la modelación de la cuenca del Río Sajama. Reservorio 1: dentro de los límites del bofedal; Reservorio 2: fuera de los límites del bofedal, hasta la cota 4500 msnm; Reservorio 3: desde la cota 4500 msnm hasta la cota 5000 msnm; Reservorio 4: desde la cota 5000 hasta los límites de la cuenca Río Sajama (cota máxima 6543 msnm).

Bajo el esquema de aplicación de cuatro reservorios horizontales, el modelo se aplica para la descripción de la oferta de agua en la cuenca del Río Sajama. En las subcuencas bajo el esquema descrito en la Figura 5, el modelo se aplica a la descripción de la variabilidad espacial de las fuentes de aporte de agua a la cuenca.



**Figura 5.** Ubicación geográfica de las subcuencas este para el estudio de la oferta de agua en la cuenca del Río Sajama.

## 2.7 Precipitación y evapotranspiración media.

Las principales entradas al modelo son series de precipitación total mensual  $P$  y de evapotranspiración potencial media mensual  $ETP$  para las estaciones Sajama y Chungará. Se omite la consideración de registros de otras estaciones debido a las lagunas de información presentes, principalmente (García, 2012 a, b). Estas series fueron previamente procesadas mediante control de las condiciones de homogeneidad y consistencia a través de métodos estadísticos descritos en detalle en la Consultoría de Agroclimatología (García 2012a, b). Se remite al lector a la referencia citada por consultas de detalles acerca de las técnicas empleadas para el control de calidad de la información, así como las razones que llevan a la consultora a concluir que para estudios Agroclimáticos se sugiere el uso de las series de las estaciones Sajama y Chungará omitiendo los registros de otras estaciones.

La  $P$  se estima directamente a través de valores mensuales medidos en las estaciones Sajama y Chungará. La  $ETP$  se calcula mediante la ecuación de FAO Penman-Monteith en la Consultoría de Agroclimatología (García, 2012 a, b), a través de la cual se obtienen los valores utilizados en la modelación presente. Los valores de  $ETP$  se calcularon para las estaciones Chungará en el periodo 1986-2011 y Sajama en el periodo 2005-2011. El parámetro  $lluviad$  se obtiene de las series mensuales de  $P$  de la estación Sajama (en la estación Chungará no se cuenta con tal información). Para la distribución altitudinal de ambas variables se asume una distribución lineal.

## 2.8 Funciones objetivo para la calibración del modelo de balance hídrico superficial.

Las funciones objetivo son el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*ENS*) y la raíz cuadrada de la varianza de los residuales *RMSE* (e.g., Wagener et al., 2004). El *ENS* Enfatiza el desempeño alcanzado durante picos y caudales altos, debido a que está basado en una forma normalizada de residuales al cuadrado (diferencias entre valores observados  $O_t$  y valores calculados  $C_t$ ) y medidas ordinarias de errores. *ENS* se calcula con la expresión (5), donde  $O_m$  es la media de las observaciones. El *RMSE* evalúa la concordancia entre valores calculados ( $C_t$ ) y valores observados ( $O_t$ ) (expresión 6).

$$ENS = 1 - \frac{\sum (O_t - C_t)^2}{\sum (O_t - O_m)^2} \quad (5),$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_t - C_t)^2} \quad (6).$$

Las funciones objetivo se aplicarán para la evaluación de los resultados de la modelación luego de introducir los resultados de los aforos del periodo hidrológico 2012-2013.

## 3 RESULTADOS.

### 3.1 Variabilidad espacio-temporal de la oferta de agua.

La variabilidad que se observa en la respuesta hídrica de la cuenca del Río Sajama no es común a otras cuencas de montaña. Tal variabilidad se origina en los diversos tipos de fuentes (fuentes superficiales y fuentes subsuperficiales provenientes de manantiales y géiseres), que alimentan los tributarios de la cuenca del Río Sajama. Considerando tal particularidad y dada la ausencia de estaciones hidrométricas en la cuenca, el camino más lógico para estudiar la respuesta hídrica es mediante la realización de aforos. Es por esta razón que para iniciar la descripción de la respuesta hídrica se considera los datos de la Figura 6 donde se presenta los caudales puntuales aforados (en unidades de caudal específico, L/s/km<sup>2</sup>). Los datos de la Tabla 6 donde se presentan los datos publicados en SERNAP (2001), luego de ser comparados con los resultados de aforos puntuales realizados a través de la presente Consultoría en las campañas 2011-2012, se omiten al considerarse poco útiles debido a la aparente alta incertidumbre contenida en los resultados de los aforos realizados mediante el método del flotador.

Los datos recolectados confirman la heterogeneidad de la respuesta hídrica observada en el campo y sugiere que debido a la diferencia que existe entre los caudales medidos a la salida de la cuenca en el Puente Sajama y aquellos caudales medidos aguas arriba en las subcuencas, debe existir una fuente adicional que aporta el remanente. Según lo observado en el sitio de estudio, estos aportes son los volúmenes de agua almacenados en los bofedales y un probable aporte subsuperficial proveniente de las laderas situadas al este.

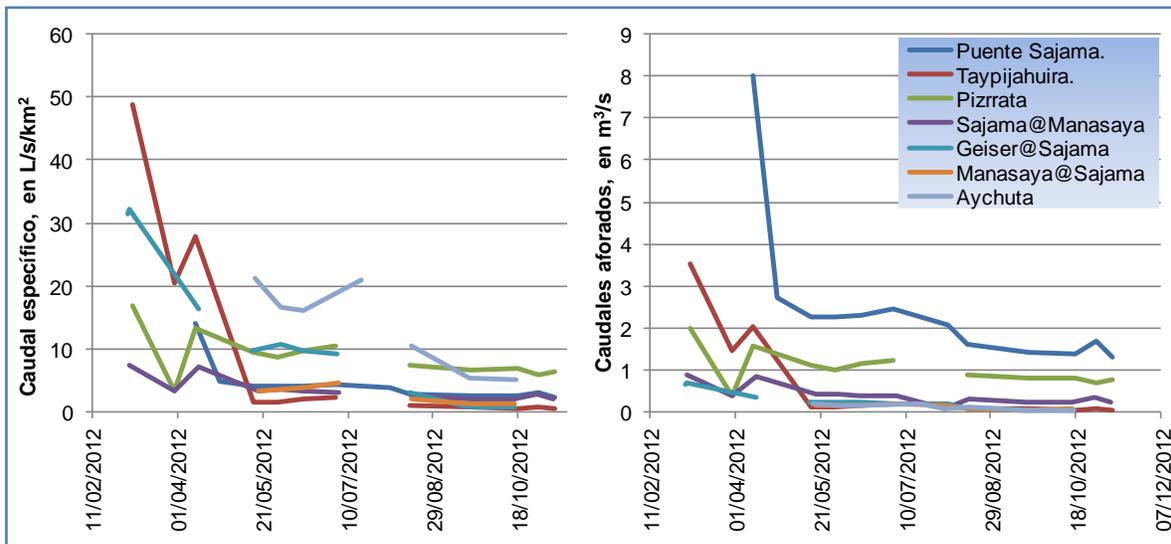
En referencia a las cuencas tributarias del oeste donde se desarrollan cursos de agua permanentes a diferencia de los cursos que nacen en el este que fluyen superficialmente de manera estacional, la que aporta mayor caudal es la cuenca del Río Pizrrata, que se desarrolla a partir de la cabecera que acoge los nevados Payachatas. Aquella cuenca, se desarrolla en un entorno geográfico interesante que es comparable al entorno en el que se desarrolla la cuenca piloto Aychuta. El efecto de ambos entornos en la producción hídrica de la cuenca es más

interesante al comparar sus respectivos caudales específicos en la Figura 6, pues ambas cuencas tienen los valores más altos entre las subcuencas estudiadas. Para la cuenca Pizrrata, los caudales específicos promedio en época de estiaje son de 7 L/s/km<sup>2</sup> correspondiente a caudales aforados de 0.8 m<sup>3</sup>/s. Estos valores altos principalmente en unidades de caudal específico, son indicadores de los aportes de los glaciares, claramente mayores para el caso de la cuenca Pizrrata en comparación a los caudales medidos en Aychuta que no superan los 60 L/s en la época de estiaje donde se espera que los volúmenes de aporte por derretimiento de los glaciares sean los mínimos de todo el periodo hidrológico. De manera similar, los aportes de la cuenca Geiser@Sajama en cuya cabecera existen géiseres, no dejan de ser relevantes al alcanzar altos valores apreciables de 9 L/s/km<sup>2</sup> registrados en julio de 2012; a partir de esta fecha, los aportes de esta cuenca decrecen notoriamente debido a desviaciones que hacen los comunarios para mitigar el déficit hídrico de la época de estiaje. En el caso de esta última cuenca, la visita a la cabecera sugiere que una parte importante del volumen de agua que fluye en dirección aguas abajo proviene de los géiseres mientras que el remanente constituye el aporte de los volúmenes de agua regulados por los bofedales que se desarrollan en el trayecto. Algo similar es posible afirmar para el caso de la cuenca Aychuta; sin embargo, para el caso de la cuenca del Río Pizrrata, tal afirmación es más difícil de defender, debido a que el Río nace a partir de manantiales aislados cuyo origen puede ser diverso.

Es también relevante el aporte de los manantiales distribuidos en la zona de la cuenca con pendientes suaves. Entre aquellos, se considera relevante el aporte de los manantiales situados aguas arriba del sitio Sajama@Manasaya, cuyo caudal promedio de 240 L/s (caudal específico mínimo de 1.98 L/s/km<sup>2</sup>) supera al de las otras subcuencas monitoreadas.

**Tabla 6.** Comparación de caudales aforados en el periodo 2011-2012 con valores aforados publicados en la literatura. Nótese el aparente (enorme) sobredimensionamiento de los valores calculados mediante el método del flotador.

Sitio	Fecha	Area sección [m <sup>2</sup> ]	Profundidad media [m]	Velocidad media [m/s]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]	Observaciones
Puente Sajama	21/03/1996	2.96	0.18	0.55	1.62	Plan de Manejo Parque Nacional Sajama (1997), citado en SERNAP (2001)
	04/03/2012	---	0.68	---	---	Agua Sustentable. Medición con molinete.
	15/08/2000	3.50	0.35	1.30	4.55	SERNAP (2001). Medición con flotador.
	15/08/2012	3.02	0.25	0.57	1.59	Agua Sustentable. Medición con molinete.
Río Pizrrata	23/03/1996	1.34	0.40	0.65	0.87	Plan de Manejo Parque Nacional Sajama (1997), citado en SERNAP (2001). Confluencia con el Río Taypijahuirá.
	04/03/2012	0.74	0.56	0.67	0.39	Agua Sustentable. Confluencia con el Río Taypijahuirá. Medición con molinete.
	15/08/2000	2.40	0.6	1.00	2.40	SERNAP (2001). Confluencia con el Río Sajama. Medición con flotador.
	15/08/2012	1.18	0.22	0.78	0.86	Agua Sustentable. Medición con molinete.
Río Taypijahuirá	23/03/1996	0.79	0.43	0.19	1.47	Plan de Manejo Parque Nacional Sajama (1997), citado en SERNAP (2001). Confluencia con el Río Pizrrata.
	30/03/2012	0.92	0.573	1.45	1.46	Agua Sustentable. Confluencia con el Río Pizrrata. Medición con molinete.
	15/08/2000	---	---	---	---	
	15/08/2012	0.45	0.32	0.15	0.07	Agua Sustentable. Medición con molinete.



**Figura 6.** Aforos puntuales realizados en la cuenca del Río Sajama y en las subcuencas consideradas.

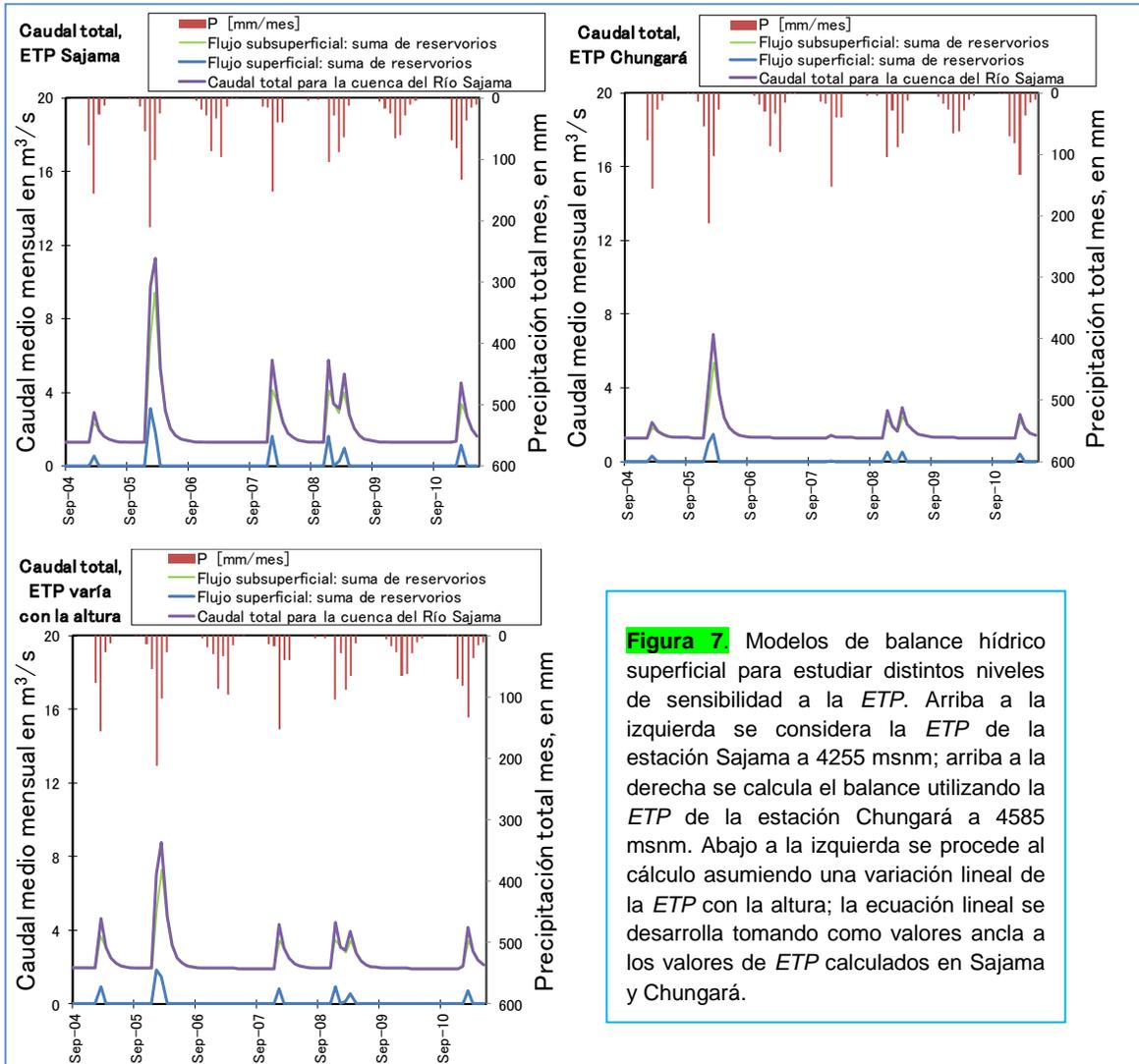
Los aforos realizados en las subcuencas estudiadas tienen el potencial de proporcionar herramientas para estimar algunas diferencias entre los aportes en volumen provenientes de glaciares y los aportes proveniente de cuencas sin cobertura glaciar. El objetivo es inferir valores referenciales para la calibración del modelo precipitación-escorrimento. Para el efecto se compararon los aportes de la cuenca aguas arriba del sitio Sajama@Manasaya, cuya fuente está constituida por aguas subterráneas que fluyen hacia la superficie a través de manantiales y también a través del lecho del río (caudal base), además de los volúmenes de agua regulados por los bofedales cuya fuente proviene de las lluvias. Asumiendo que el caudal de los cursos superficiales en las cuencas Aychuta y Pizrrata se alimentan de los mismos tipos de fuentes de agua que alimentan la cuenca Sajama@Manasaya, con una fuente de aporte adicional constituida por las contribuciones del deshielo glaciar, la hipótesis planteada sugiere que la comparación entre ambas cuencas, una sin aporte de deshielo glaciar y otra con aporte de deshielo glaciar, podría permitir inferir la relevancia de los glaciares en la oferta total de agua de la cuenca. La comparación se realiza para el periodo donde los valores de caudales específicos para las cuencas Pizrrata y Aychuta son similares (agosto de 2012-noviembre de 2012), resultando en una diferencia de  $4.8 \text{ L/s/km}^2$  entre los caudales específicos de una cuenca sin glaciar y una cuenca con aporte glaciar. En ausencia de mejores herramientas, el valor producto de tal comparación se toma como referencia para el proceso de modelación.

### 3.2 Sensibilidad del modelo a la *ETP*: comparación de la respuesta de dos sistemas.

La aplicación del análisis de sensibilidad, como herramienta para el desarrollo del modelo utilizado en la descripción de los procesos que generan la oferta de agua en el sitio de estudio (ver Anexo 1) sugiere alta sensibilidad a variaciones en la *ETP*, a un nivel que no había sido identificado al aplicar el modelo a cuencas de montaña Andinas donde los suelos tiene menor conductividad hidráulica. Para ilustrar este hecho, se compararon las respuestas del sistema estudiado con la respuesta hídrica estudiada en una cuenca con orientación noreste, situada aguas abajo de la Cordillera Real, en Bolivia (Soria y Kazama, 2011).

Las gráficas que muestran la alta sensibilidad a las variaciones de la *ETP* en el sistema estudiado se presentan en la Figura 7 (Figura A1-10 en el Anexo 1). Por otro lado, las gráficas que

demuestran que en cuencas semi cubiertas por glaciares situadas al noreste de la Cordillera Real, la sensibilidad del modelo a variaciones en la *ETP* es menor a la sensibilidad a la variable *P* mensual y aún menos sensible a variaciones en el parámetro *Cse*, se presentan en Soria y Kazama (2011). El contraste de ambos casos tiene implicaciones desde varias perspectivas, una de las cuales se presenta en los resultados de la Figura 7 donde el modelo sugiere que tal sensibilidad podría dar lugar a pérdidas o déficit hídrico, que en términos de oferta total de agua podría implicar una incertidumbre predictiva de hasta  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  en los resultados. Otra implicación puede analizarse desde una perspectiva de cambio climático, tema que es estudiado en el siguiente subtítulo.

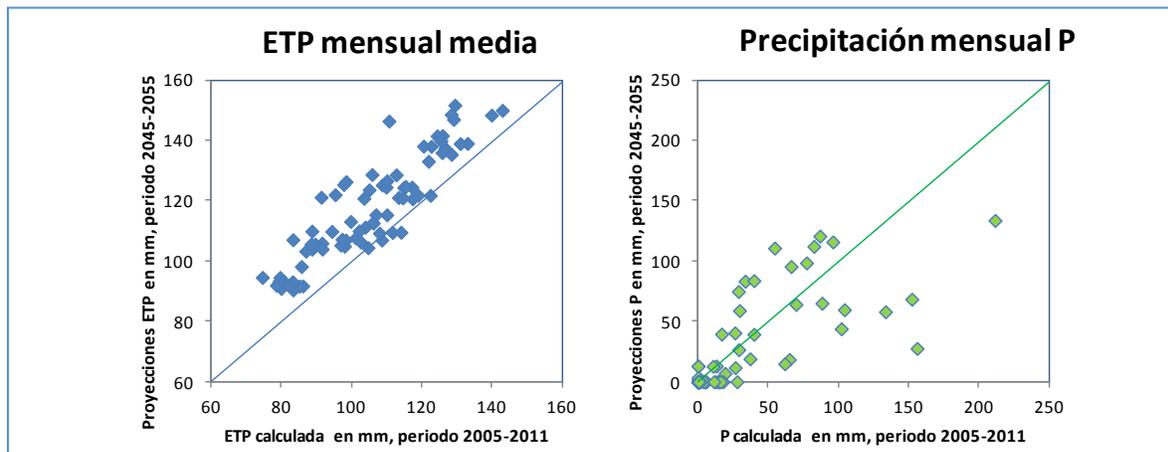


### 3.3 Sensibilidad del modelo a la *ETP* y su relevancia en la proyección futura de la oferta de agua.

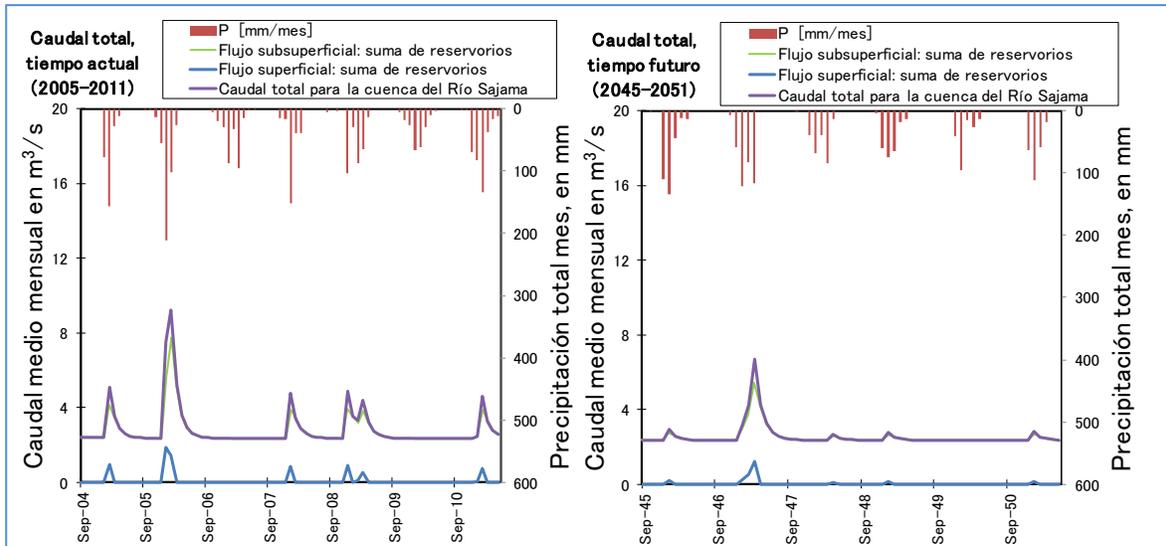
El análisis de sensibilidad que identifica al factor *ETP* como el más sensible tiene relevancia desde una perspectiva de cambio climático, tal como sugieren las Figuras 8 y 9 (en el Anexo, Figuras A1-

25, A1-26). En la primera Figura se presenta la incertidumbre contenida en las proyecciones de precipitación, tal como observa García (2012 c). En contraste, es interesante y a la vez preocupante la certidumbre aparente en la tendencia de las proyecciones de la *ETP* comparadas con las *ETP* del tiempo presente, que sugieren un incremento promedio de 10 mm en la variable medida a escala mensual. Lo interesante y a la vez preocupante de tal incremento es que el mismo no está acompañado de un incremento en la precipitación, tal como sugiere el modelo aplicado por García (2012c).

En caso de que la hipótesis expresada en el párrafo precedente sea aceptada, la consecuencia es un incremento en el déficit hídrico, el cual puede expresarse a través de términos de oferta de agua, tal como sugiere la Figura 9. Allí la consecuencia es una disminución del escurrimiento superficial medio mensual en un máximo de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . A pesar de lo preocupante de esta afirmación, la correcta interpretación de este resultado debe considerar que la inferencia realizada no consideró ni los aportes provenientes de los glaciares, los cuales al menos en el tiempo presente deberían mitigar el incremento en el déficit hídrico en rangos cercanos a los  $4.8 \text{ L/s/km}^2$  sugeridos en el subtítulo precedente donde se evaluó el probable aporte de los glaciares a la oferta de agua de la cuenca. De igual manera, la interpretación del eventual escenario de déficit hídrico sugerido en la Figura 9 debe considerar que la simulación no incluyó el rol de los bofedales como fuente adicional de agua. En tal caso, es probable que el déficit sugerido se considere sobreestimado, y se reduzca en una magnitud equivalente al gradiente hidráulico observado en los piezómetros instalados en el sitio de estudio.



**Figura 8.** Comparación de series del periodo actual (2005-2011) y serie de datos proyectadas para la estación Sajama mediante el modelo LARS. Los datos fueron generados en García (2012c).



**Figura 9.** Comparación de los resultados preliminares del cálculo agregado (semidistribuido) de la respuesta de la cuenca del Río Sajama con resultados futuros del mismo esquema (misma cuenca). Las variables de entrada se generan mediante el modelo LARS en la Consultoría de Agroclimatología (García, 2012c).

#### 4 CONCLUSIONES.

Entre todos los aspectos estudiados, probablemente los aspectos con mayor trascendencia se concentran en la alta relevancia de los aportes de las cuencas Pizrrata y Aychuta expresados en términos de caudal específico, la alta sensibilidad del modelo a variaciones en la variable *ETP* mensual, y la implicación práctica de la alta sensibilidad bajo escenarios de cambio climático.

En referencia a la relevancia de los aportes de las cuencas Pizrrata y Aychuta, los resultados sugieren que las cuencas con aporte de deshielo glaciar tienen el potencial de aportar en promedio  $4.8 \text{ L/s/km}^2$  más que sus contrapartes sin cobertura glaciar. Estos resultados se obtienen a partir de datos obtenidos en campañas de monitoreo de caudales realizados en el periodo hidrológico 2011-2012 iniciado en el mes de marzo de 2011 (al final de la época de lluvias) y podrían variar en función a la selección de las cuencas utilizadas para comparación, y al periodo para el cual se propone el análisis. Para validación de la inferencia señalada, trabajos futuros proponen el monitoreo de cuencas de alta montaña, sin cobertura glaciar, con aspecto, orientación y características geomorfológicas similares a las de la cuenca piloto.

La relevancia de la *ETP* en el balance hídrico superficial es también un tema analizado en el presente estudio. Al respecto, el uso del modelo matemático desarrollado se constituye en pieza importante para el estudio, al sugerir que bajo la estructura matemática considerada la *ETP* es probablemente la variable ante la cual el balance hídrico superficial tiene mayor sensibilidad. La consecuencia práctica es evidente, al sugerir que la alta sensibilidad del modelo identificada tiene el potencial de causar variaciones en el escurrimiento superficial que podrían dar lugar a una disminución del caudal total de oferta que podrían llevar a una situación de estrés hídrico.

#### AGRADECIMIENTOS.

El presente trabajo fue realizado a solicitud de Agua Sustentable. En la ejecución participó todo su personal técnico, al cual se dirigen los presentes agradecimientos. También se agradece el valioso apoyo técnico de CUSO-Canadá a través del voluntario Mathieu Beaulieu, quien participó

activamente en la implementación y diseño de la red de monitoreo, el monitoreo en campo y el procesamiento de información.

## 5 REFERENCIAS.

Arnaud, 2000. La influencia de la oscilación sur de el Niño (ENSO) en un glaciar del Volcán Sajama (Bolivia) de 1963 a 1998 observada a través de imágenes Landsat e imágenes aéreas. *Journal of Geophysical Research*.

Beniston, M., 2000. Cambio medioambiental en montañas y tierras altas. Problemas clave en cambio medioambiental, Routledge: Londres.

Beven, K. 2004. Modelación precipitación escurrimiento - Referencia general. John Wiley: Chichester; 235.

Buitrón, C. y Fernández, J., 2012. Estudio Espacial Multitemporal de Variaciones en Superficie Observadas a través de Imágenes Satelitales Landsat en una Región del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Informe Final de Consultoría, Agua Sustentable, La Paz. 29 p (con anexos).

Chan, K., Tarantola, S., Saltelli, A., Sobol, I., 2000. Métodos basados en el análisis de varianza. En: Análisis de sensibilidad, Saltelli A, Chan K, and Scott E (eds). John Wiley: Chichester.

Chow, V., Maidment, D., Mays, L. 1998. Hidrología aplicada. McGraw-Hill: Nueva York.

Climate Impact Studies - User Manual. Tech. rep., Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, AL5 2JQ, UK, 2002.

Collick, A., Easton, Z., Ashagrie, T., Biruk, B., Tilahun, S., Adgo, E., Awulachew, S., Zeleke, G., Steenhuis, T., 2009. Un modelo semi distribuído de balance hídrico para las tierras altas de Etiopía. *Hydrological Processes* (23), pp. 3718-3727.

Espinoza, D. y Fuchs, P., 2011. Oferta de agua histórica en la cuenca del Río Sajhuaya. Agua Sustentable, La Paz. 153 p.

García, M., Raes, D., Allen, Herbas, C., 2004. Dinámicas de la evapotranspiración de referencia en las tierras altas de Bolivia (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology* (125) 67–82.

García, M., 2012a. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Primer Informe Técnico de Consultoría de Agroclimatología – Evaluación de la información agroclimática de la zona. Agua Sustentable, La Paz. 19p.

García, M., 2012b. Caracterización agroclimática del Parque Sajama. Segundo Informe Técnico de Consultoría de Agroclimatología – Evaluación de la información agroclimática de la zona. Agua Sustentable, La Paz. 19p.

Huber, U., Bugmann, H., Reasoner, M., 2005. Cambio global y regiones de montaña: Una visión general del conocimiento actual. *Avances en Investigación del Cambio Global*, Springer: Amsterdam.

Iriarte, J., 2005. Balance Hídrico microregional de las cuencas Mauri, Bajo Desaguadero, y los lagos Poopó y Uru Uru. Proyecto de Grado, UMSA, La Paz.

Laboratorio de Investigación del Sistema Terrestre (ESRL), 2012. Índice multivariado del ENSO MSI. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/mei.html> (última visita: mayo de 2012).

MESI (Ministry of Environment, Science and Information), 2009. Estándar hidrométrico de British Columbia. Resources Information Standards Committee, British Columbia.

Navarro, S. y Ferreira, W., 2007. Mapa de vegetación de Bolivia a escala 1:250000, The Nature Conservancy: La Paz.

Ojha, C. y Singh, V., 2002. Modelos de balance hídrico en cuencas pequeñas. En: Aplicaciones y modelos matemáticos de la hidrología de cuencas pequeñas, Singh, V., Frevert, D.K. (eds.), Publicaciones en Recursos Hídricos, LLC, Colorado.

OMM (Organización Meteorológica Mundial), 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Quinta edición, WMO-No. 168.

Saltelli, A. 2000. ¿Qué es un análisis de sensibilidad? En: Análisis de sensibilidad, Saltelli A, Chan K, and Scott E. (eds). John Wiley: Chichester; 3-12.

Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., Ratto, M. 2004. Análisis de sensibilidad en la práctica: Guía para el asesoramiento de modelos científicos. John Wiley: Chichester.

Semenov, M. y Barrow, E., 2002. LARS-WG: Un generador de clima estocástico para uso en estudios de impacto climático. - Manual del usuario. Tech. rep., Rothamsted Research, Harpenden, Hertfordshire, UK.

SERNAP, 2001. Evaluación de recursos hídricos dentro del estudio de sistemas de producción en el área del Parque Nacional Sajama y zonas de amortiguación. (Sin referencias adicionales).

Singh, P., y Singh, V., 2001. Hidrología de nieve y glaciares. Springer.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., Miller, H. (eds.), 2007. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Reporte de Asesoramiento del Panel Intergubernamental en Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, USA, 996 pp.

Soria, F., y Kazama, S., 2011. Análisis de incertidumbre de un modelo de balance hídrico en una cuenca desarrollada aguas abajo de la Cordillera Real en Bolivia. Actas de la Conferencia Tohoku Shibu, JSCE. Sendai.

Soria, F., 2012a. Primer Informe Técnico de Avance correspondiente a la consultoría "Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama". Agua Sustentable, La Paz. 57p.

Soria, F., 2012b. Segundo Informe Técnico de Avance correspondiente a la consultoría "Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama". Agua Sustentable, La Paz. 22p.

Soria, F., 2012c. Tercer Informe Técnico de Avance correspondiente a la consultoría "Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama". Agua Sustentable, La Paz. 13p.

Soria, F., 2012d. Cuarto Informe Técnico de Avance correspondiente a la consultoría “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”. Agua Sustentable, La Paz. 39p.

Soria, F., 2012e. Quinto Informe Técnico de Avance correspondiente a la consultoría “Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama”. Agua Sustentable, La Paz. 35p.

Soria, F., 2012f. Estudio de variaciones históricas de áreas con cobertura glacial y áreas cubiertas por bofedales andinos en un sector del Parque Nacional Sajama, Bolivia, a través del análisis de imágenes Landsat. Parte I del Informe Final del Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz. 26p.

Soria, F., 2012g. Asesoramiento y diseño en la construcción de obras civiles en un sector del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Parte II del Informe Final del Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz. 33p más anexos.

Soria, F., 2012h. Establecimiento de la red de monitoreo hidrológico en micro cuencas del Parque Nacional Sajama, Bolivia. Parte III del Informe Final del Estudio hidrológico de los potenciales impactos del cambio climático en la oferta de agua en micro cuencas seleccionadas situadas en el Parque Nacional Sajama. Agua Sustentable, La Paz. 9p más anexos.

Strahler, A., 1964. Geomorfología cuantitativa de cuencas de drenaje y redes hídricas. En: Chow, V. T. (ed), Manual de hidrología aplicada. McGraw Hill, Nueva York, Sección 4-11.

Tang, Y., Reed, P., Wagener, T., van Werkhoven, K. 2006. Comparando métodos para análisis de sensibilidad para el avance en la identificación y evaluación de modelos de cuenca agregados. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 3, 3333-3395.

Vincent, C., Ribstein, P., Favier, V., Wagnon, P., Francou, B., 2005. Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes, C.R. Geoscience 337, 97-106.

Wagener, T., Wheeler, H., Gupta, H., 2004. Modelación precipitación-escorrentía en cuencas monitoreadas y no monitoreadas. Imperial College, Londres.

Yapo, P., Gupta, H., Sorooshian, S., 1996. Calibración automática de modelos conceptuales precipitación-escorrentía: sensibilidad a los datos de calibración. Journal of Hydrology 181, 23-48.

## **ANEXO 1. DESARROLLO DEL MODELO DE BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL: ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE A TRAVÉS DE EXPERIMENTOS COMPUTACIONALES UNO-A-LA-VEZ.**

El modelo se desarrolla adoptando el concepto de equifinalidad (Beven, 2004). Bajo este paradigma, el concepto mencionado se desarrolla a través de la evaluación de la incertidumbre predictiva (Wagener et al., 2004) la cual a su vez es evaluada mediante la aplicación de experimentos simples de sensibilidad del tipo uno-a-la-vez (Saltelli, 2000), para evaluar efectos de primer orden con un costo computacional igual al número de factores  $r$ . Estos experimentos evalúan el impacto de cambiar los valores nominales de una factor dentro de un rango de variación, aislando los factores relevantes. Para consultar detalles acerca del concepto del método y detalles acerca de los procedimientos de cálculo, se sugiere consultar Saltelli, 2000, entre otros.

El análisis de sensibilidad es una herramienta para analizar modificaciones a la estructura inicial propuesta con el objeto de encontrar cuál podría constituir el modelo más adecuado (modelo parsimonioso) para representar la respuesta hídrica de la cuenca a la escala de estudio. Ejemplos que demuestran la efectividad de la técnica en el desarrollo de modelos matemáticos se presentan en publicaciones de alto impacto (e.g., Wagener et al., 2004). Para el estudio presente, la estructura base del modelo pertenece a Collick et al. (2009); las ecuaciones respectivas y la descripción de las variables se presentan en el cuerpo del presente documento. Los experimentos numéricos se realizan en la cuenca del Río Sajama y sus subcuencas. Los experimentos computacionales se desarrollan siguiendo las siguientes etapas:

Etapa 1) La simulación base de los experimentos computacionales se aplica sobre la cuenca del Río Sajama, modelando el sistema como una unidad agregada. En esta etapa las variables de entrada  $P$  y  $ETP$  a escala mensual se describen a través de las series observadas en la estación Sajama (4255 msnm).

Etapa 2) El modelo se aplica bajo un esquema semi distribuido, donde se compara la respuesta del modelo introduciendo más de un reservorio lineal vertical en la estructura, e introduciendo luego reservorios horizontales delimitados a través de cinturones altitudinales. Para la descripción de las variables de entrada  $P$  y  $ETP$  se toman los valores históricos registrados en la estación Sajama.

Etapa 3) El desarrollo del modelo mantiene la aplicación del modelo bajo un esquema semi distribuido, con la diferencia de que para la descripción de las variables de entrada  $P$  y  $ETP$  se introduce la variabilidad altitudinal contenida en la información histórica registrada en las estaciones Sajama (4255 msnm) y Chungará (4585 msnm). En estas tres etapas la serie de caudal base se genera asumiendo un valor inicial igual al valor de caudal aforado en época de estiaje.

Etapa 4) La etapa final toma en cuenta las lecciones aprendidas en las tres etapas precedentes, e introduce variabilidad en las tasas de recarga inferidas a través de la observación de la variabilidad registrada en el gradiente hidráulico mediante el monitoreo periódico de niveles piezométricos instalados en la superficie de los bofedales.

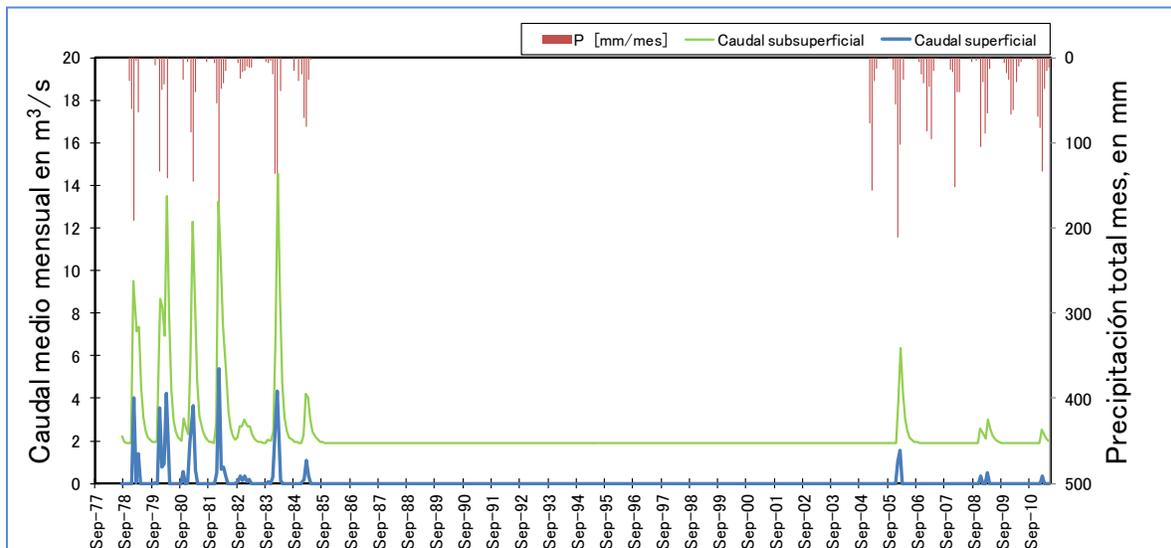
### **A1-1. SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL A TRAVÉS DE MODELOS AGREGADOS.**

La simulación base de los experimentos computacionales se aplica sobre la cuenca del Río Sajama (área 568 km<sup>2</sup>), modelando el sistema como una unidad agregada. Los valores iniciales de la simulación toman como valor medio un caudal igual a 2.0 m<sup>3</sup>/s medido a la salida de la cuenca en época de estiaje (Puente Río Sajama). Se asume que a lo largo del año el 20% del caudal total se convierte en escurrimiento superficial ( $Cse=0.2$ ), que  $S_{max}$  es el producto entre el restante 80%

del volumen total y que la capacidad máxima de almacenamiento del suelo calculada mediante información temática  $S_{max}'$  ( $S_{max} = (1-Cse)S_{max}'$ ). Las series de precipitación y el número de días de lluvia corresponden a la estación Sajama.

### 1.1 Incertidumbre introducida por la variabilidad espacial de la evapotranspiración.

Para enfatizar la variación espacial y en altitud de la evapotranspiración potencial, en la Figura A1-1 se calcula el balance hídrico con las series de dos estaciones distintas: en el periodo 1978-1984 se considera la serie de evapotranspiración potencial *ETP* de la estación Chuquiña, a 3755 msnm, situada a 170 km al este de la cuenca sobre una zona climática con características similares a las del área de estudio; por otro lado, para el periodo 2004-2011 se considera las series de *ETP* de la estación Chungará, a 4585 msnm. La Figura A1-2 compara ambas series. Los resultados proporcionan interesante evidencia en el periodo 2004-2011, al sugerir que a escala media mensual existe un aparente déficit en el balance hídrico debido a que los valores de evapotranspiración potencial son mayores a los de precipitación total. Para el desarrollo del modelo es importante estudiar si aquel déficit es menor a escalas mayores (diaria, horaria, etc), en cuyo caso será posible afirmar que la estructura sugerida describe adecuadamente la respuesta del sistema; caso contrario, la consecuencia sería sugerir la modificación de la estructura del modelo propuesta inicialmente.



**Figura A1-1.** Experimento base para el estudio de sensibilidad. La simulación se aplica a la cuenca del Río Sajama (área 568 km<sup>2</sup>), asumiendo un caudal base inicial de 2 m<sup>3</sup>/s, una porción del exceso de humedad en el suelo que se convierte en escurrimiento superficial igual a 20%, capacidad máxima de almacenamiento de agua en el suelo igual a 108 mm, y contenido efectivo de humedad del suelo igual a 86 mm. Los datos de precipitación y número de días de lluvia se obtienen de la estación Sajama; la ETP se obtiene de la estación Chuquiña para el periodo 1978-1984 y de la estación Chungará para el periodo 2005-2011. No existen observaciones para el periodo 1985-2004.

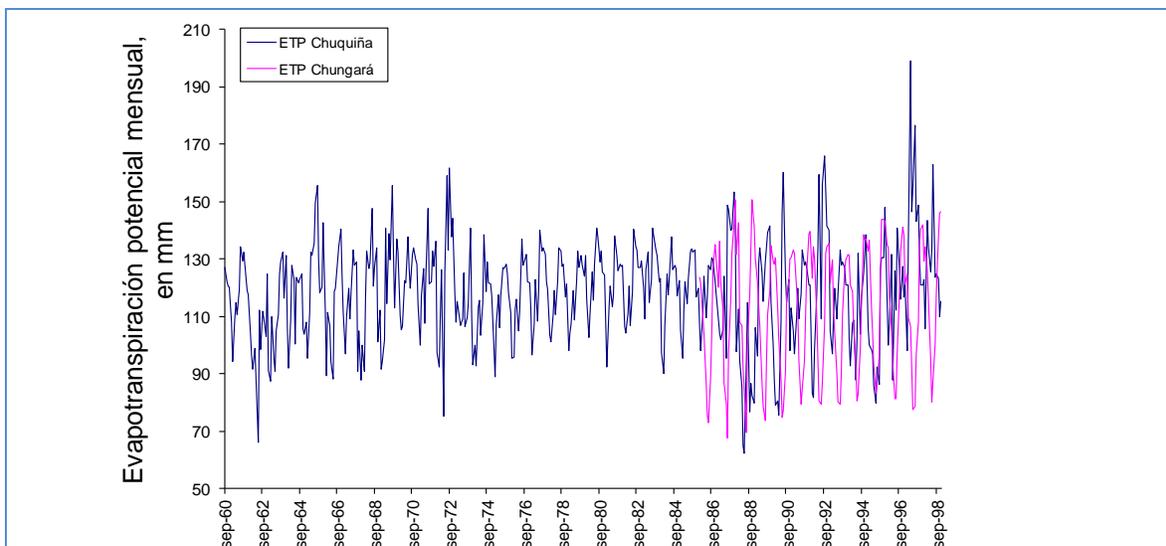


Figura A1-2. Comparación entre las series de ETP calculadas para las estaciones Chuquiña (3735 msnm, a 170 km al este de Sajama) y Sajama (dentro de los límites de la cuenca del Río Sajama).

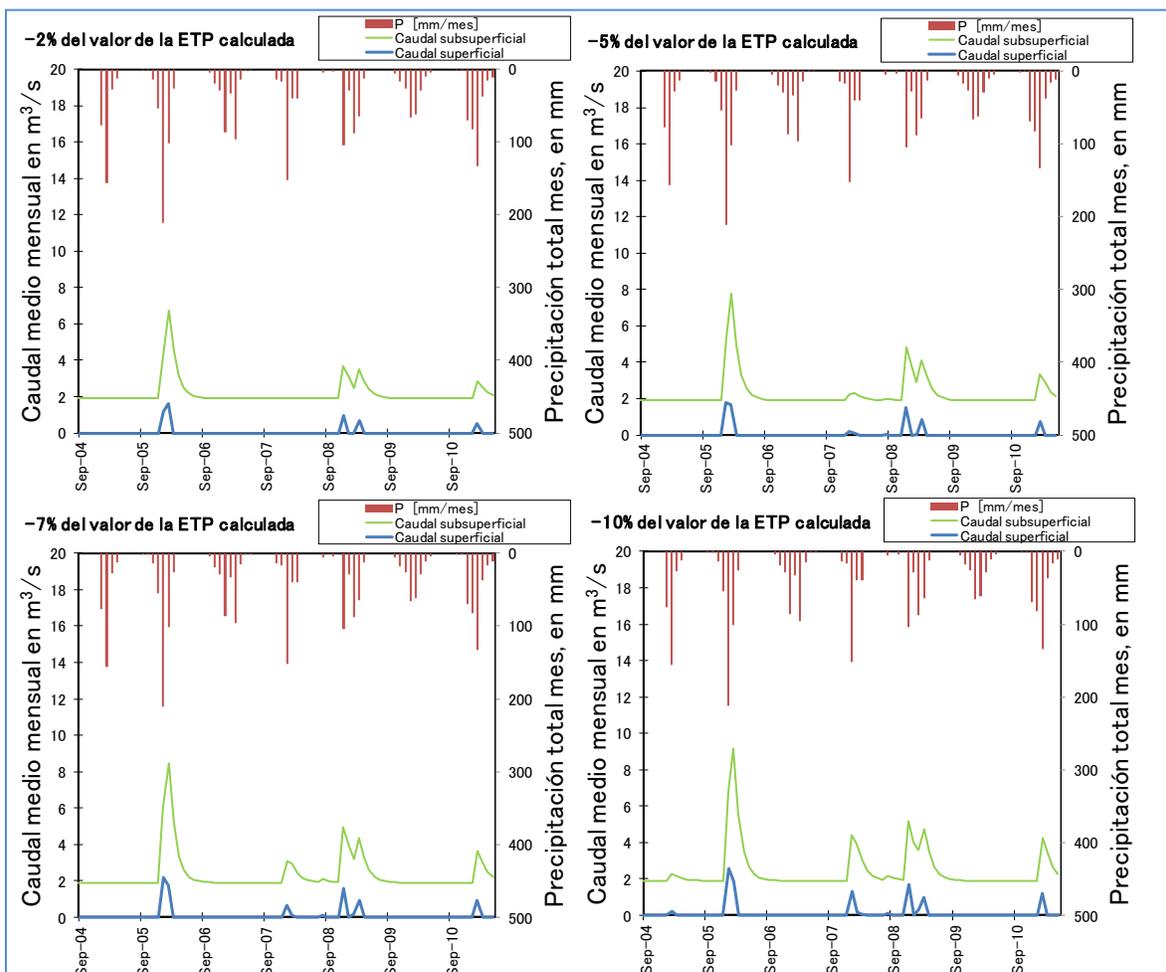


Figura A1-3. Experimentos uno-a-la-vez para el estudio de la sensibilidad a la ETP. La simulación se aplica a la cuenca del Río Sajama, en el periodo donde el factor se calcula utilizando información de la estación Chungará. El rango de variabilidad asumido es de -2% a -10%.

## 1.2 Incertidumbre introducida por el factor precipitación.

Los experimentos se realizan para dos situaciones: i) asumiendo que la *ETP* está adecuadamente representada por los valores calculados para Chungará, y ii) asumiendo que la *ETP* es menor en un 10%, con el objetivo de incrementar la sensibilidad del sistema (Yapo et al., 1996). Para el factor precipitación, el rango de variabilidad asumido es aquel observado entre los picos con mayor magnitud durante el periodo 2004-2011. Aquel rango se sitúa en enero de 2006, y la magnitud es de 50 mm (valor total mensual), equivalente a una reducción del 20% del valor pico de la precipitación observada en la estación Sajama.

Al comparar los casos i) y ii) mediante las Figuras A1-4 y A1-5, se observa el déficit a escala mensual identificado en los experimentos del subtítulo precedente; adicionalmente se evidencia mayor sensibilidad de primer orden del modelo al factor *ETP* que hacia el factor precipitación *P*. Este hecho marca una diferencia entre el comportamiento de la cuenca estudiada con el comportamiento de cuencas en las cabeceras de la Cordillera Real de los Andes (Bolivia) en la parte alta de la cuenca del Amazonas, donde en general el factor evapotranspiración potencial no es factor dominante de la respuesta hídrica del sistema, desde la perspectiva de un estudio de balance hídrico superficial a escala media mensual (e.g., ver Soria y Kazama, 2011). Por supuesto, la observación realizada en este párrafo también tiene implicaciones prácticas, al demostrar que debido a la sensibilidad del balance hídrico superficial del sistema a la variabilidad de *P* y *ETP*, se debe prestar especial cuidado al manejo y análisis de los datos hidro climáticos adquiridos, y a la selección de la estación hidro climática que se utilizará para describir la respuesta del sistema.

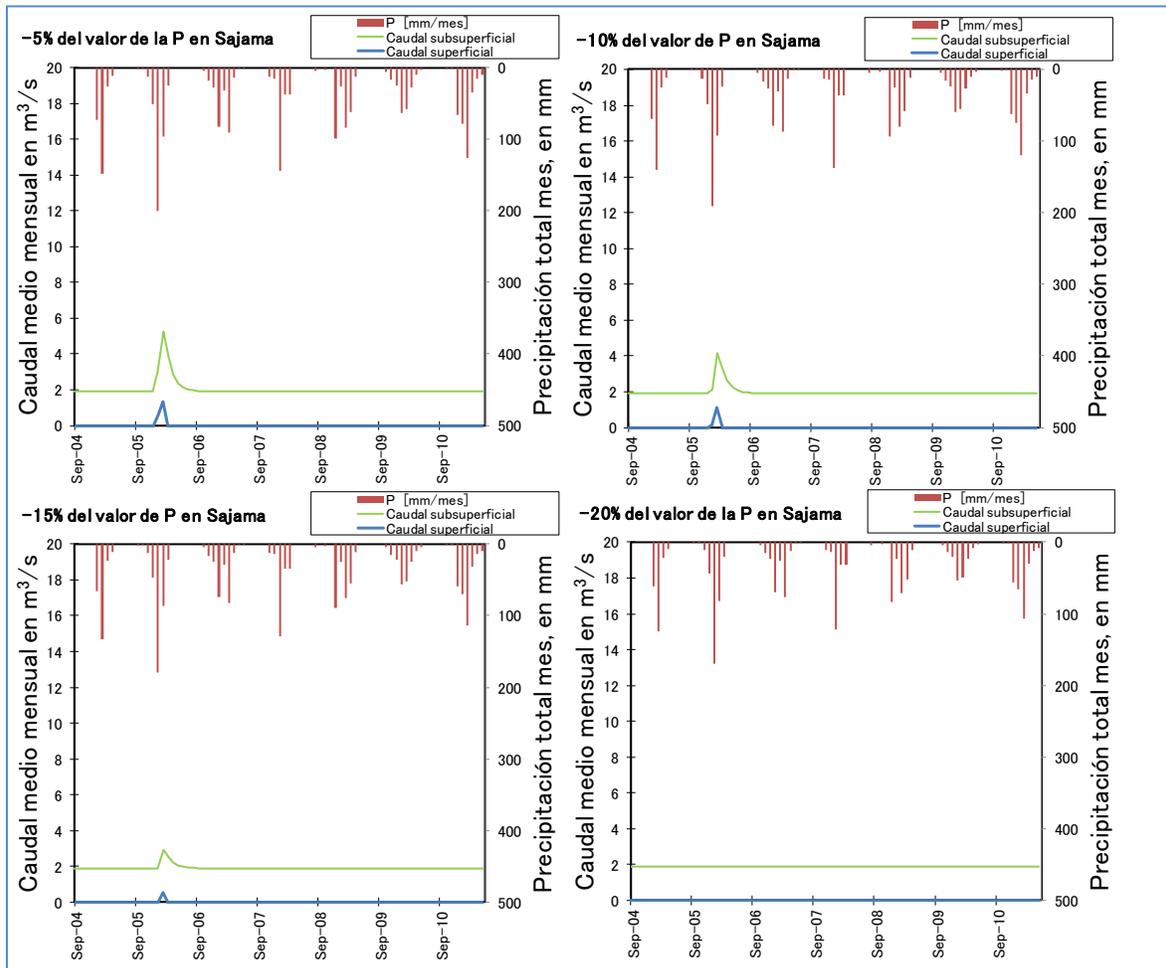
## 1.3 Incertidumbre introducida por los parámetros del modelo.

Para estudiar la incertidumbre introducida por los parámetros del modelo se seleccionó el factor *Cse*, el cual en teoría constituye el único parámetro calibrable del modelo (Soria y Kazama, 2011). Para el diseño de los experimentos se considera fijos a los valores de precipitación observados en Sajama. Para incrementar la sensibilidad del modelo se reduce en 10% a los valores de *ETP* calculados para Chungará.

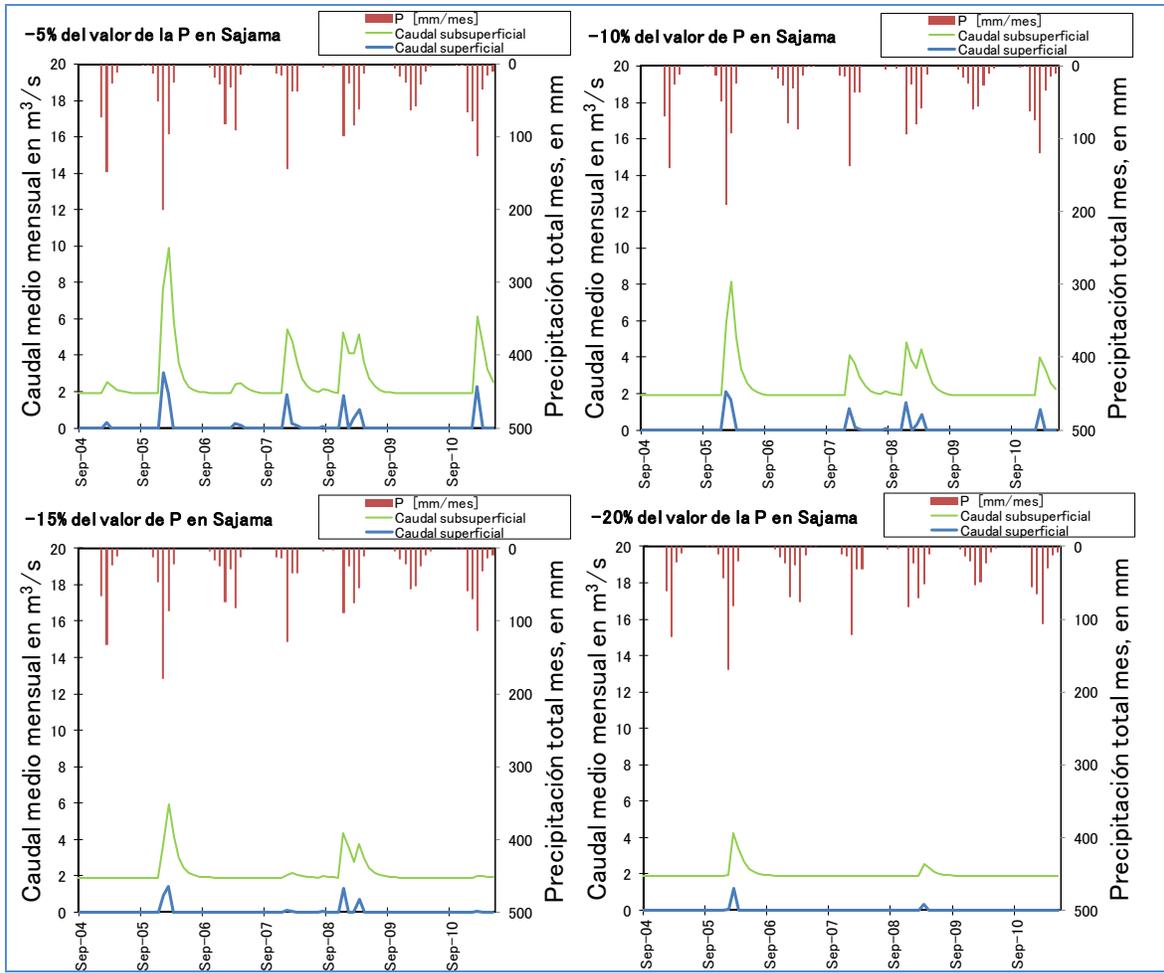
La heterogénea geografía de la cuenca del Río Sajama está constituida por laderas y zonas de alta pendiente donde desarrollan suelos con alta tasa de infiltración, y zonas con planicies y áreas de pendientes suaves cubiertas en gran parte por capas de suelos compactadas y poco permeables (bofedales, en condición de saturación durante ciertas épocas del año). Debido a tal heterogeneidad espacial, en esta etapa de desarrollo del modelo no se conoce cuál unidad es dominante de la respuesta hídrica del sistema, por lo cual el rango de variabilidad de *Cse* es amplio. Para los experimentos, se asume un rango de variación de *Cse* entre 0.2 y 0.8, que denota una respuesta hídrica de la cuenca dominada respectivamente por la respuesta de las unidades con alta tasa de infiltración (*Cse* igual a 0.2) y de las unidades con baja tasa de infiltración y suelos saturados (*Cse* igual a 0.8).

El aspecto más relevante de los productos es que la comparación de los caudales totales simulados con el caudal puntual de 10 m<sup>3</sup>/s medido en la campaña de aforo de marzo de 2012, al final de la época húmeda (ver Figura A1-6), sugiere la posibilidad de que las zonas con bajas tasas de infiltración (*Cse*=0.6) sean dominantes de la respuesta hídrica a escala de cuenca. Aunque los resultados sugieren que el escurrimiento que fluyen e infiltra a través de las laderas constituidas por suelos altamente permeables (*Cse*<0.2) no sean dominantes durante la ocurrencia de caudales altos, aquello no descarta la posible relevancia del flujo proveniente de la alta montaña; sin embargo, el estudio de tal relevancia es compleja a la escala del estudio presente. En comparación

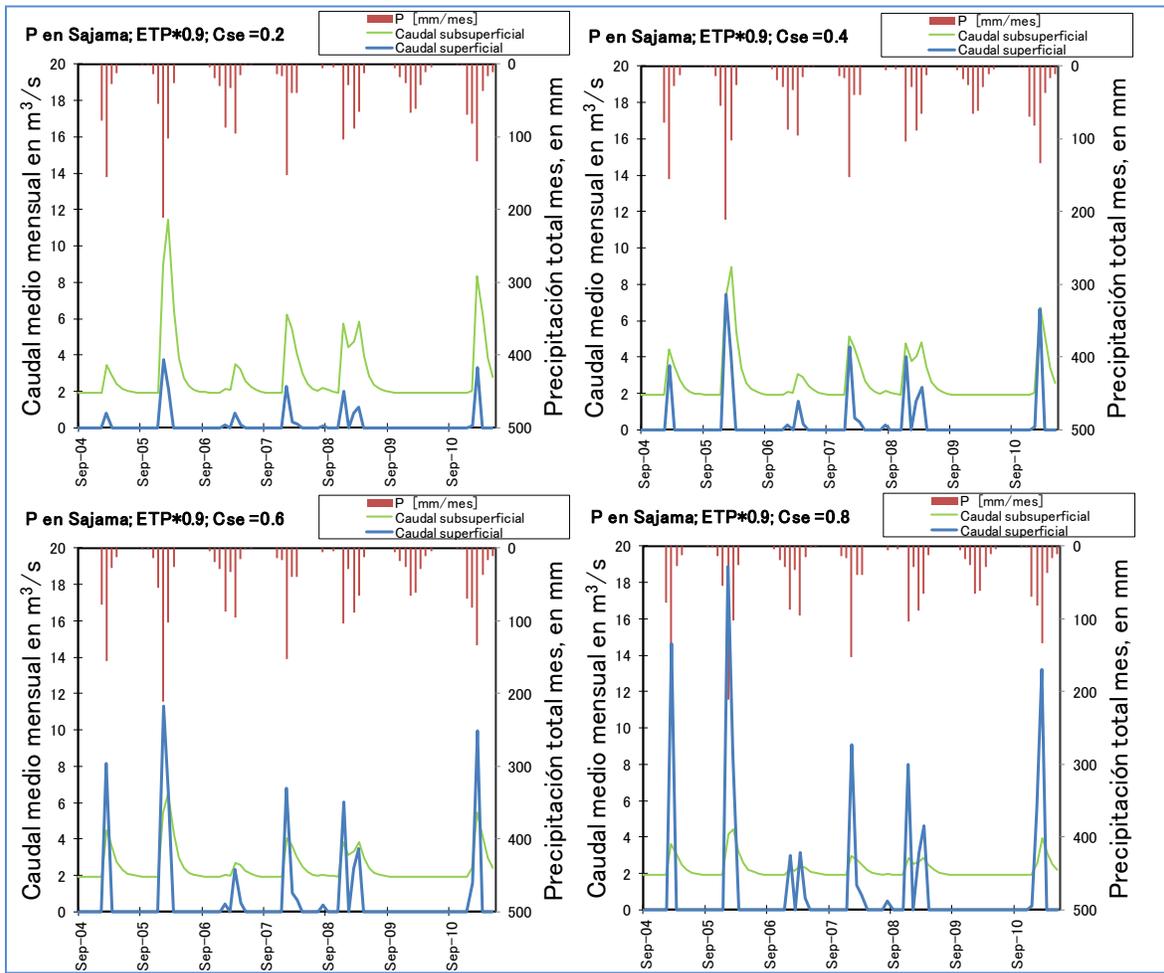
a los resultados obtenidos por los experimentos de los dos subtítulos precedentes, los resultados de los experimentos presentados en la Figura A1-6 son más complejos debido a la ausencia de valores de calibración de la variable caudal medio mensual.



**Figura A1-4.** Experimentos uno-a-la-vez para el estudio de la sensibilidad a la precipitación. La simulación es para la cuenca del Río Sajama. El factor se mide en la estación Sajama; el rango de variabilidad asumido para  $P$  es de -5% a -20%; este último corresponde a los valores aproximados medidos en la estación Chungará. Se mantienen los valores de  $ETP$  calculados para la estación Chungará.



**Figura A1-5.** Experimentos uno-a-la-vez para el estudio de la sensibilidad a la precipitación, más un decremento de 10% en los valores de  $ETP$ . La simulación se aplica a la cuenca del Río Sajama. El rango de variabilidad asumido para el factor  $P$  medido en la estación Sajama es de -5% a -20%. La  $ETP$  corresponde a los valores calculados para la estación Chungará.



**Figura A1-6.** Experimentos uno-a-la-vez en la cuenca del Río Sajama para el estudio de la sensibilidad al parámetro Cse. El rango de variabilidad asumido para el factor Cse es 0.2 a 0.8 asumiendo diferentes componentes dominantes de la respuesta hídrica a escala de cuenca. La precipitación se obtiene de la estación Sajama. A objeto de incrementar la sensibilidad del sistema se redujo en 10% el valor calculado de la *ETP* en Chungará.

## **A1-2. SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL A TRAVÉS DE MODELOS SEMIDISTRIBUIDOS.**

La anterior etapa del desarrollo del modelo consideró un análisis de sensibilidad simple del tipo uno-a-la-vez como herramienta para estudiar la incertidumbre predictiva del modelo en dos etapas. La primera estudió la incertidumbre predictiva mediante el análisis de la sensibilidad introducida por la variabilidad espacial de la precipitación, mientras que la segunda estudió la incertidumbre predictiva debido a la incertidumbre en los parámetros del modelo. En la presente etapa se estudia la incertidumbre predictiva introducida por cambios en el número de reservorios constituyentes de la estructura del modelo. Para todos los casos la descripción de los procesos en las capas verticales es a través de reservorios lineales.

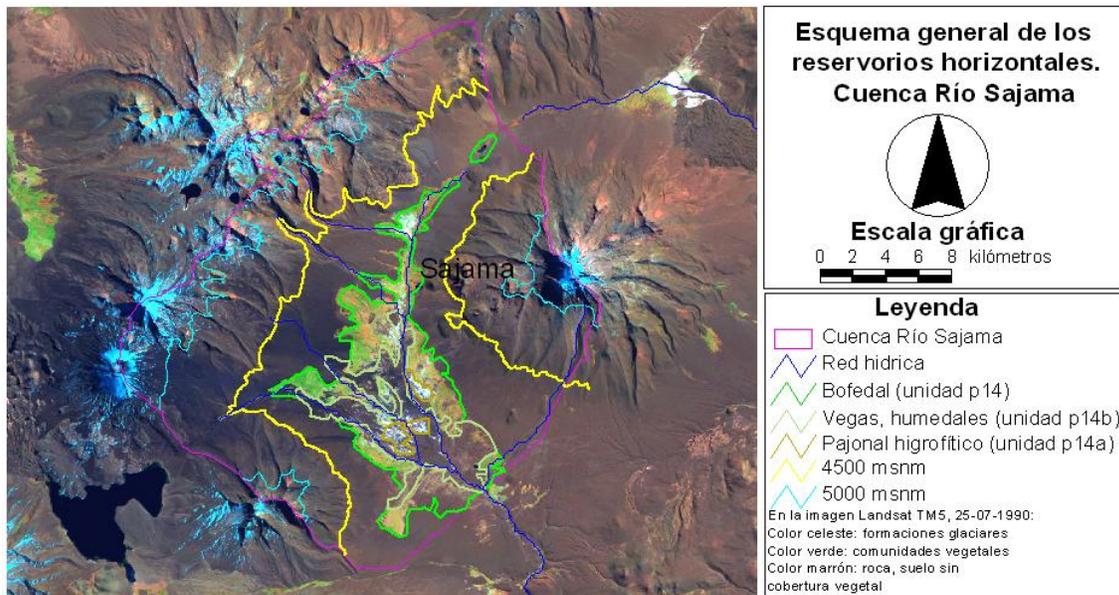
### **2.1 Esquema con cuatro reservorios horizontales y dos reservorios subsuperficiales.**

Un aspecto que hace que la descripción de la respuesta de la variable caudal medio mensual del sistema de la cuenca del Río Sajama sea compleja es la alta conductividad hidráulica de los suelos en las zonas que no tienen cobertura de bofedales, vegas o humedales. Esta propiedad permite la infiltración de una gran parte del volumen de agua que escurre por los taludes. Tal afirmación se evidencia en las visitas al sitio de estudio, donde se observa la ausencia de cursos de agua superficiales perennes al pie de los taludes. Por otro lado, el alto grado de compactación de las capas de los suelos que componen la parte central de la cuenca (en la zona con bajas pendientes longitudinales) origina que las tasas de infiltración sean muy bajas, debido al alto contenido de materia orgánica de los suelos que dan lugar a la formación de bofedales, vegas y humedales. En este último sitio, la superficie de los bofedales almacena volúmenes de agua a niveles notorios hasta el final de la época de estiaje (septiembre) después de lo cual el almacenamiento se reduce notoriamente a pesar que al pie de los glaciares se evidencia derretimiento permanente que alimenta los cursos superficiales observables en la alta montaña. En este contexto, las preguntas lógicas se reúnen alrededor de la verdadera relevancia del agua que escurre subsuperficialmente a través de los taludes de las montañas que rodean la cuenca, para la oferta de agua de la cuenca del Río Sajama. Aunque es conocido que las respuestas a tal pregunta no será respondida de manera explícita debido a los limitados recursos para su desarrollo y dado que el estudio del régimen de los reservorios subterráneos está fuera de los alcances del presente trabajo, el desarrollo del modelo debe pasar por las etapas que a continuación se describen en la búsqueda por una respuesta coherente.

Bajo el panorama descrito, se construyó el modelo sugerido para el estudio del balance hídrico superficial mediante cuatro reservorios horizontales (ver Figura A1-7 o Figura 4 en el cuerpo del documento) y dos reservorios subsuperficiales. Al esquema del modelo propuesto por Collick et al (2009) se añadió un reservorio subsuperficial para contabilizar el caudal base constante observado en época de estiaje en el Río Sajama. Para calibrar los resultados, únicamente se conoce que los caudales en el Río Sajama podrían alcanzar los 10 m<sup>3</sup>/s en época húmeda (aforo de marzo de 2012) y que en época de estiaje el caudal a la salida de la cuenca del Río Sajama alcanza los 2 m<sup>3</sup>/s.

Los resultados del cálculo presentados en la Figuras A1-8 muestran el carácter dominante esperado del caudal base sobre la respuesta hídrica a escala de cuenca. En las Figura A1-8 (abajo) se considera dos estaciones diferentes para el cálculo de la *ETP* para poner énfasis en la incertidumbre introducida por la variabilidad espacial y altitudinal de la misma. Las dos estaciones consideradas son: estación Sajama (4255 msnm) y estación Chungará (4585 msnm). Para todos

los casos, se considera que los efectos del valor inicial no se extienden a periodos mayores a un año. Los datos de precipitación y número de días de lluvia para todo el periodo se obtienen de la estación Sajama. No existen observaciones para el periodo 1985-2004. Como resultado de la comparación mencionada (Figura A1-8, abajo), los resultados obtenidos al aplicar el modelo semidistribuido sugerido indica que los efectos de considerar la variabilidad de la *ETP* con la altitud es relevante y es considerada en los experimentos computacionales presentados en los párrafos siguientes.



**Figura A1-7.** Distribución espacial de los reservorios horizontales para la modelación de la cuenca del Río Sajama. Reservorio 1: dentro de los límites del bofedal; Reservorio 2: fuera de los límites del bofedal, hasta la cota 4500 msnm; Reservorio 3: desde la cota 4500 msnm hasta la cota 5000 msnm; Reservorio 4: desde la cota 5000 hasta los límites de la cuenca Río Sajama (cota máxima 6543 msnm).

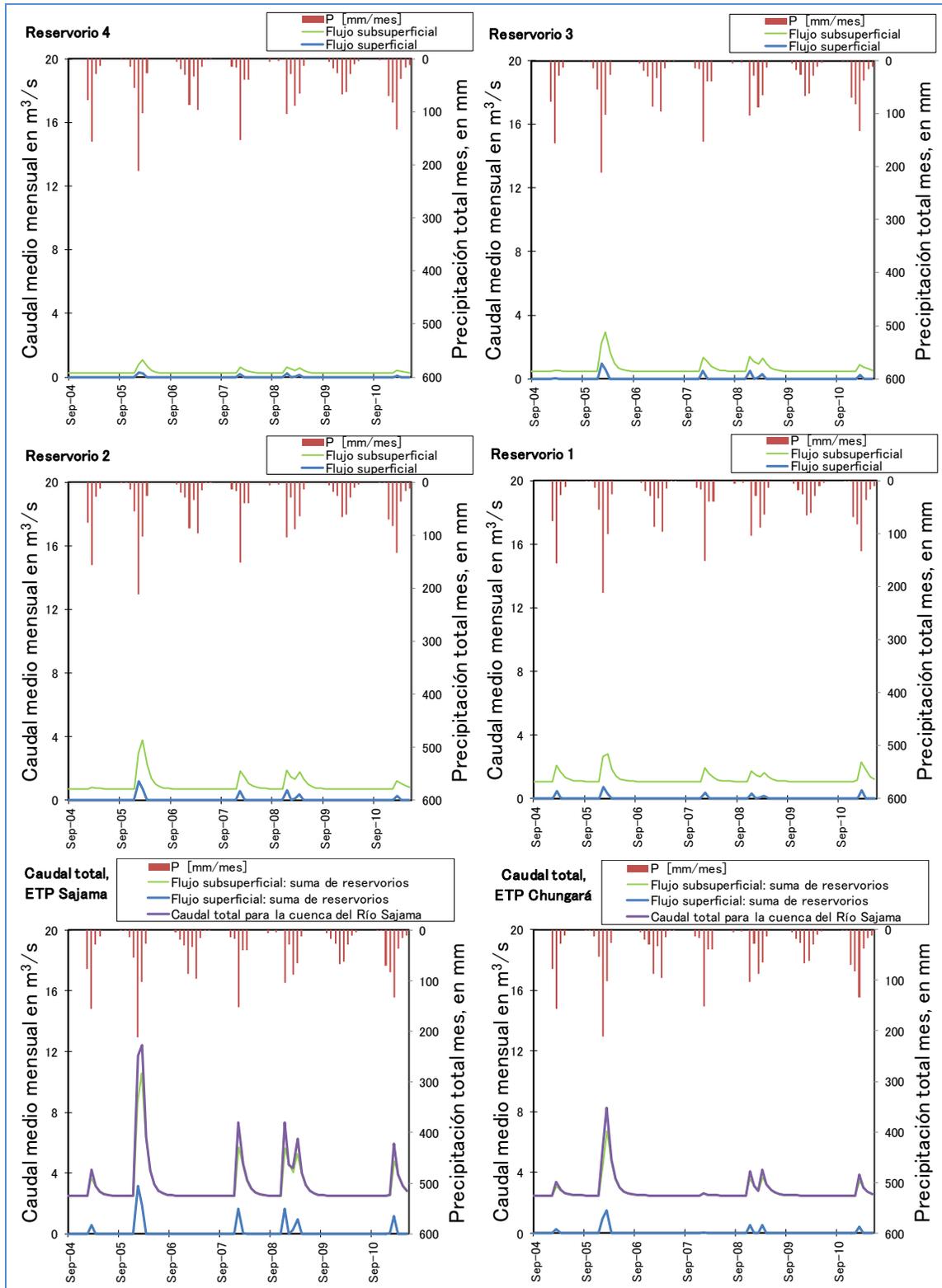
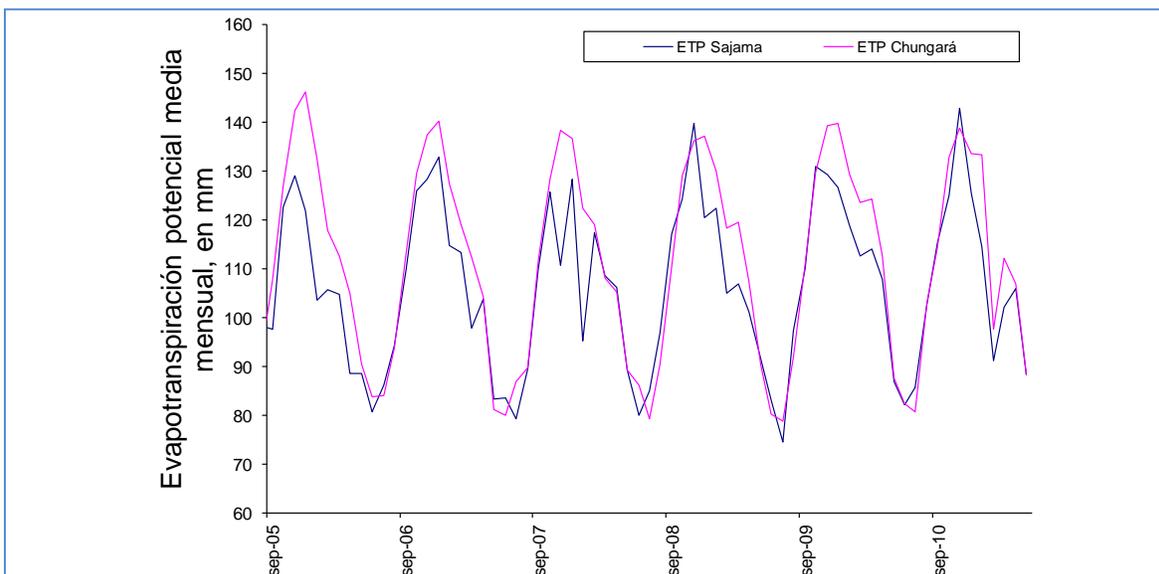


Figura A1-8. Modelos de balance hídrico superficial con esquemas que consideran cuatro reservorios horizontales y dos reservorios verticales subsuperficiales. El gráfico titulado Caudal total (abajo-izquierda) representa los valores medios mensuales totales calculados para la cuenca del Río Sajama.

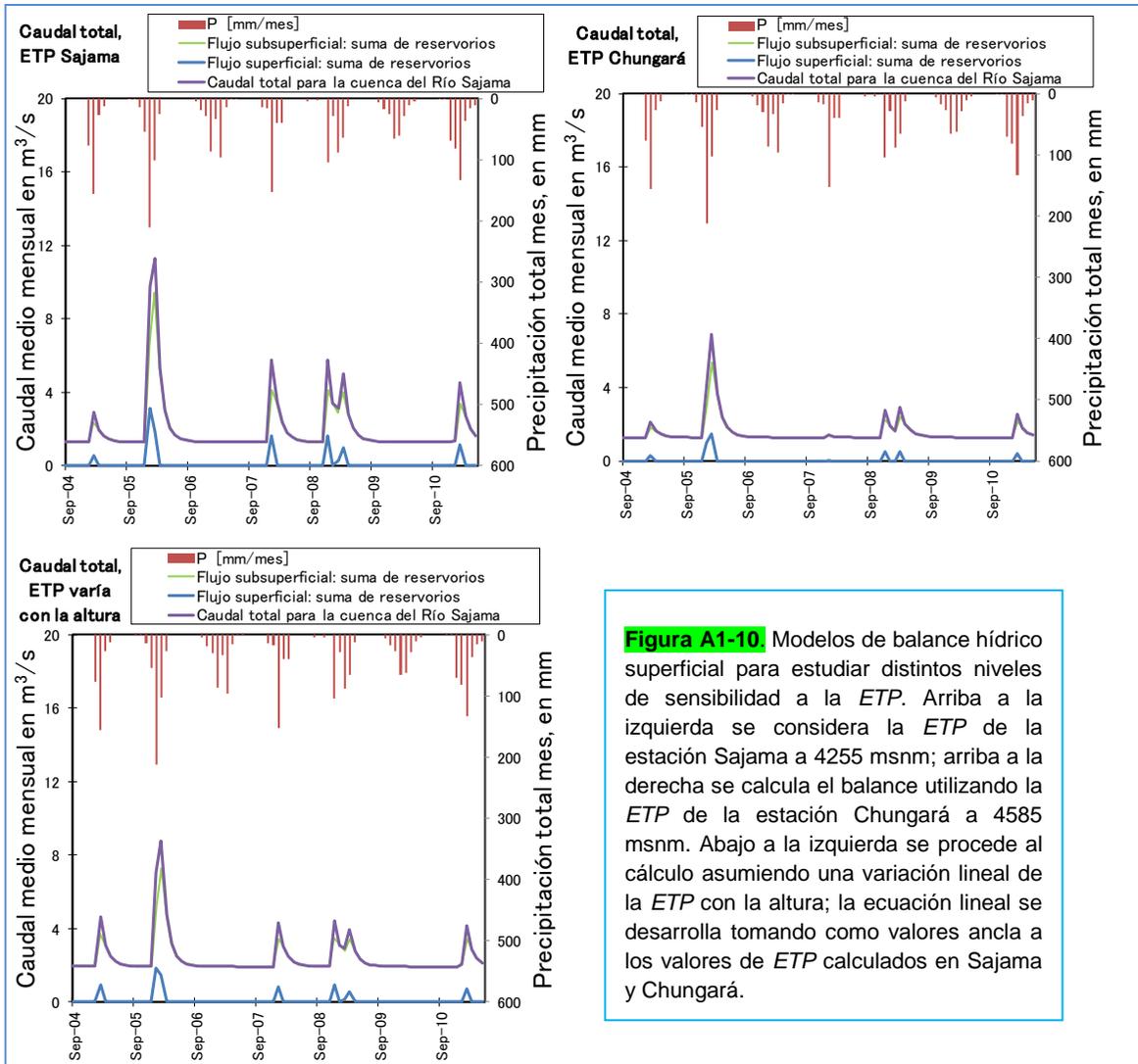
## 2.2 Esquema con cuatro reservorios horizontales y dos reservorios verticales; *ETP* con variación altitudinal.

Para continuar con el estudio se introdujo a la *ETP* una variación altitudinal lineal en el rango de las cotas de las estaciones Sajama (4255 msnm) y Chungará (4585 msnm), es decir, el valor de *ETP* para una fecha dada en el sitio de interés situado a una elevación cualquiera en msnm donde no existe una estación climática, se obtiene a través de interpolación lineal del valor de *ETP* calculado para Sajama y Chungará para la misma fecha, considerando las elevaciones respectivas las dos estaciones mencionadas. Para definir la tasa de variación particular se asume como representativa la altitud media de cada reservorio horizontal: 5772 msnm para el Reservorio 4, 4751 msnm para el Reservorio 3, 4310 msnm para el Reservorio 2, y 4230 msnm para el Reservorio 1. Nótese que hasta el momento no se consideró en ningún caso el aporte al Reservorio 4 proveniente del deshielo del glaciar; en otras palabras, los resultados hasta el momento presentados representan la respuesta hídrica superficial de una cuenca no cubierta por glaciares, por lo cual los valores de escurrimiento superficial están subestimados en una magnitud a ser determinada mediante los resultados de los aforos medidos en el sitio de estudio.

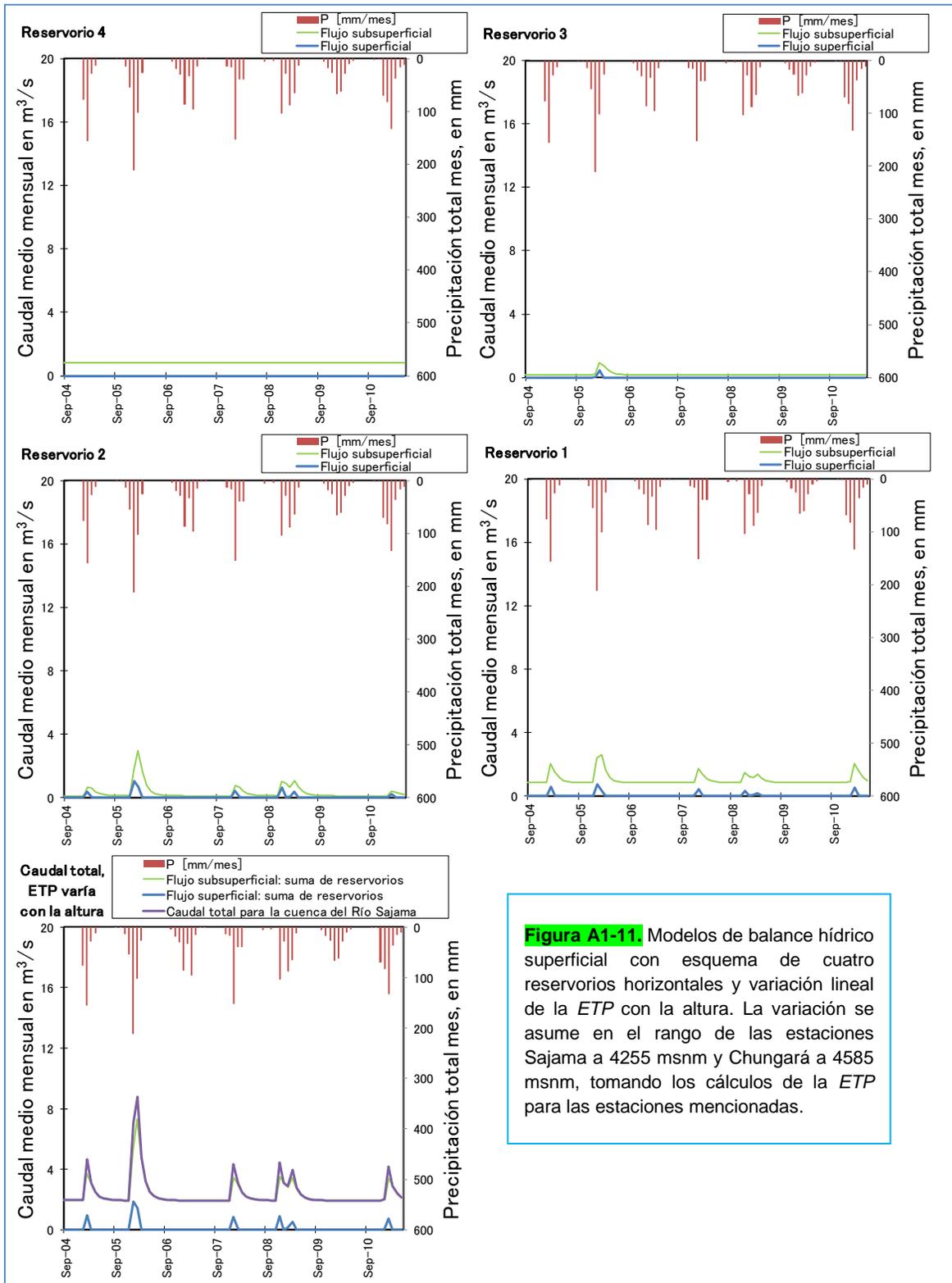
En una zona donde el modelo matemático propuesto sugiere que el balance entre la precipitación y las abstracciones es altamente sensible (comparar las Figuras A1-10 y A1-11), la variabilidad de la respuesta a variaciones aparentemente pequeñas en la variable *ETP* medida a diferentes altitudes (Figura A1-9) tiene implicaciones interesantes, que son relevantes al análisis de la incertidumbre predictiva asociada al modelo, así como para el análisis de los potenciales efectos en el balance hídrico superficial y la oferta de agua que un incremento en la evapotranspiración en el futuro, asumiendo en este último caso relación directa de la *ETP* con el incremento esperado en la variable temperatura media del aire sugerido en los resultados presentados en García (2012a,b). Un breve análisis al respecto se presenta en el subtítulo siguiente.



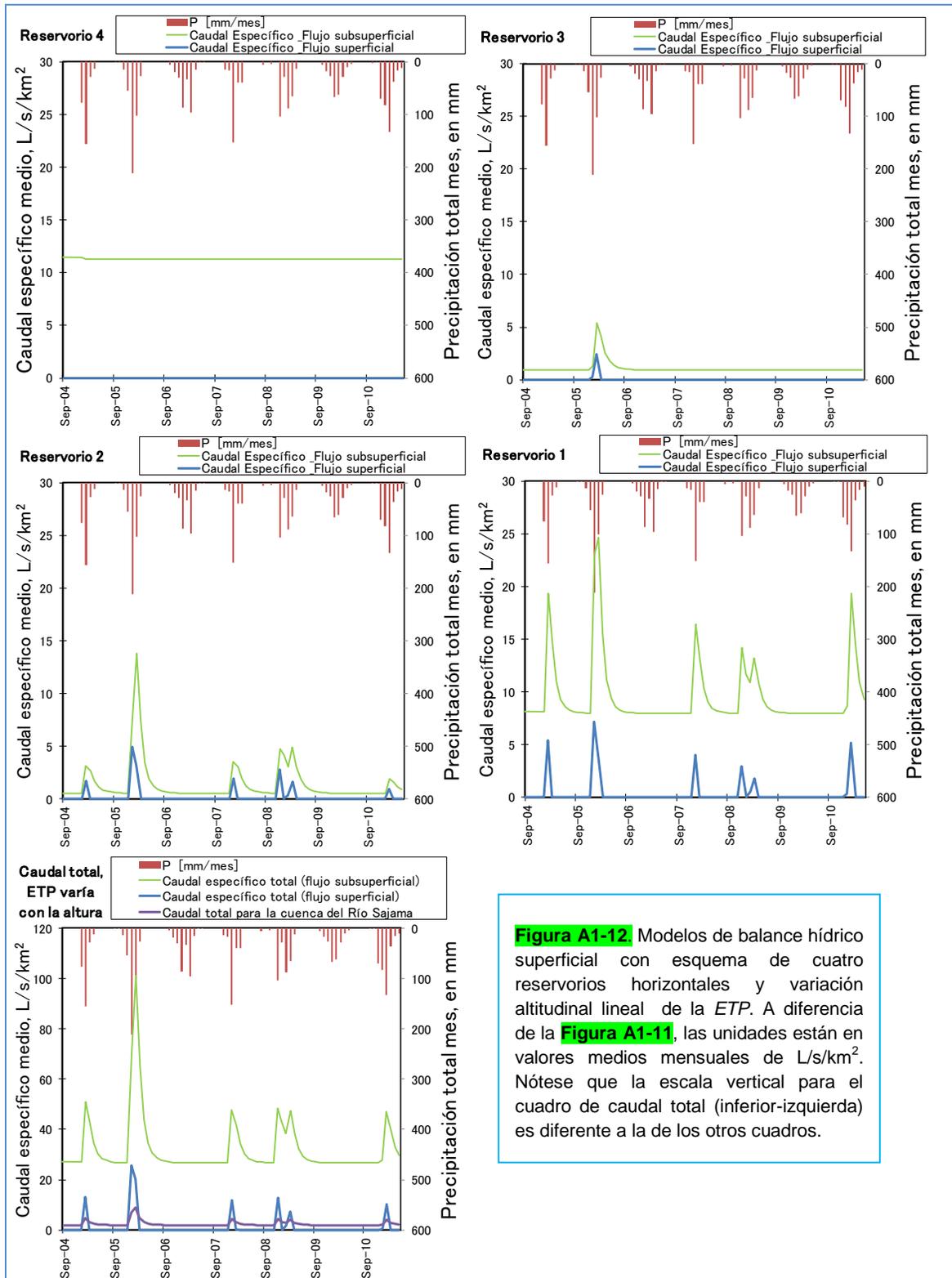
**Figura A1-9.** Variabilidad altitudinal de la *ETP* en el área de estudio. Para el efecto se comparan las series de *ETP* calculadas para las estaciones Sajama (4255 msnm) y Chungará (4585 msnm). Para los años donde las series se comportan diferente, la diferencia en los picos es en promedio de 80 mm.



**Figura A1-10.** Modelos de balance hídrico superficial para estudiar distintos niveles de sensibilidad a la ETP. Arriba a la izquierda se considera la ETP de la estación Sajama a 4255 msnm; arriba a la derecha se calcula el balance utilizando la ETP de la estación Chungará a 4585 msnm. Abajo a la izquierda se procede al cálculo asumiendo una variación lineal de la ETP con la altura; la ecuación lineal se desarrolla tomando como valores ancla a los valores de ETP calculados en Sajama y Chungará.



**Figura A1-11.** Modelos de balance hídrico superficial con esquema de cuatro reservorios horizontales y variación lineal de la ETP con la altura. La variación se asume en el rango de las estaciones Sajama a 4255 msnm y Chungará a 4585 msnm, tomando los cálculos de la ETP para las estaciones mencionadas.



**Figura A1-12** Modelos de balance hídrico superficial con esquema de cuatro reservorios horizontales y variación altitudinal lineal de la ETP. A diferencia de la **Figura A1-11**, las unidades están en valores medios mensuales de L/s/km<sup>2</sup>. Nótese que la escala vertical para el cuadro de caudal total (inferior-izquierda) es diferente a la de los otros cuadros.

### 2.3 Estudio de la oferta de agua en subcuencas de la ladera este.

Para estudiar la variabilidad espacial de la oferta de agua de la cuenca del Río Sajama, el esquema general propuesto para la modelación semidistribuida del sistema se aplicó a cuatro subcuencas que reúnen los aportes de los tributarios que se desarrollan en las laderas al este de la cuenca. En adelante estas subcuencas podrán denotarse como "subcuencas este". El esquema de aplicación y los parámetros del modelo matemático siguen los lineamientos considerados para los cómputos en la cuenca del Río Sajama presentados en los subtítulos previos.

Para la evaluación de la eficiencia de la representación matemática, los datos para calibración corresponde a datos puntuales de caudales de aforo obtenidos en campañas realizadas dos veces al mes a partir de marzo de 2012 (al final de la época húmeda). De la misma manera que ocurrió con los cálculos realizados para la cuenca del Río Sajama, el producto final de la Consultoría presente será ampliado mediante al complementar los datos de calibración con los resultados de registros del ascenso del hidrograma de caudal total a ser obtenidos al inicio de la temporada de lluvias del año hidrológico 2012-2013. En este contexto, debido a limitaciones en el tiempo de ejecución del proyecto, se asumirá que la recesión del hidrograma medida a partir de marzo de 2012 es representativa de la curva de recesión del hidrograma que podría ser observado al final de la temporada de lluvias del año hidrológico 2012-2013.

Bajo las consideraciones expresadas en los dos párrafos precedentes, los parámetros considerados en los modelos construidos para cada subcuenca se resumen en la Tabla A1-1. La situación geográfica de las subcuencas de la ladera este se ilustran en la Figura A1-13 (Figura 5 del cuerpo del documento). La misma Figura confirma lo descrito en los subtítulos precedentes, en referencia a la ausencia de cursos superficiales permanentes con nacientes en las caras oeste del Volcán Sajama que desemboquen en el Río Sajama. También en la Figura A1-13 nótese que el único curso superficial de agua permanente identificado se sitúa al extremo sudeste de la cuenca y define la cuenca piloto Aychuta actualmente monitoreada en la parte alta. El último curso superficial mencionado nace al pie de los glaciares del Volcán Sajama, no confluye directamente con el Río Sajama. La explicación del régimen hídrico observado en la cuenca piloto se realiza a través de métodos empíricos indirectos debido a la complejidad que un estudio hidroglaciológico demandaría<sup>1</sup>.

Los resultados de los cálculos en las subcuencas este se presentan en las Figuras A1-14, A1-15, A1-16 y A1-17. Los valores calculados corresponden a los probables caudales naturales, sin considerar contribuciones extraordinarias efusiones de manantiales puntuales o contribuciones por derretimiento de glaciares. Para su evaluación la referencia está dada por los aforos puntuales obtenidos en la época de invierno del año 2012 (Tabla A1-2) y la Figura A1-18 que presenta una comparación entre los resultados por los cálculos agregados (semidistribuidos) en toda la cuenca del Río Sajama y la suma algebraica de los aportes de las subcuencas este. Parcialmente, el caudal base coincide con la suma algebraica de aforos subcuencas este (Tabla A1-2).

<sup>1</sup>Entender la complejidad del sistema de la cuenca piloto demandaría varios años de monitoreo. La decisión de describir aquel sistema piloto desde una perspectiva empírica y no exclusivamente hidroglaciológica fue un área discutida dentro del proyecto y mediante consulta a expertos externos al Proyecto (e.g., Jean-Emmanuel Sicart del IRD); sin embargo, la conclusión fue en todo momento la sugerida en la presente Consultoría dada la alta complejidad del sistema.

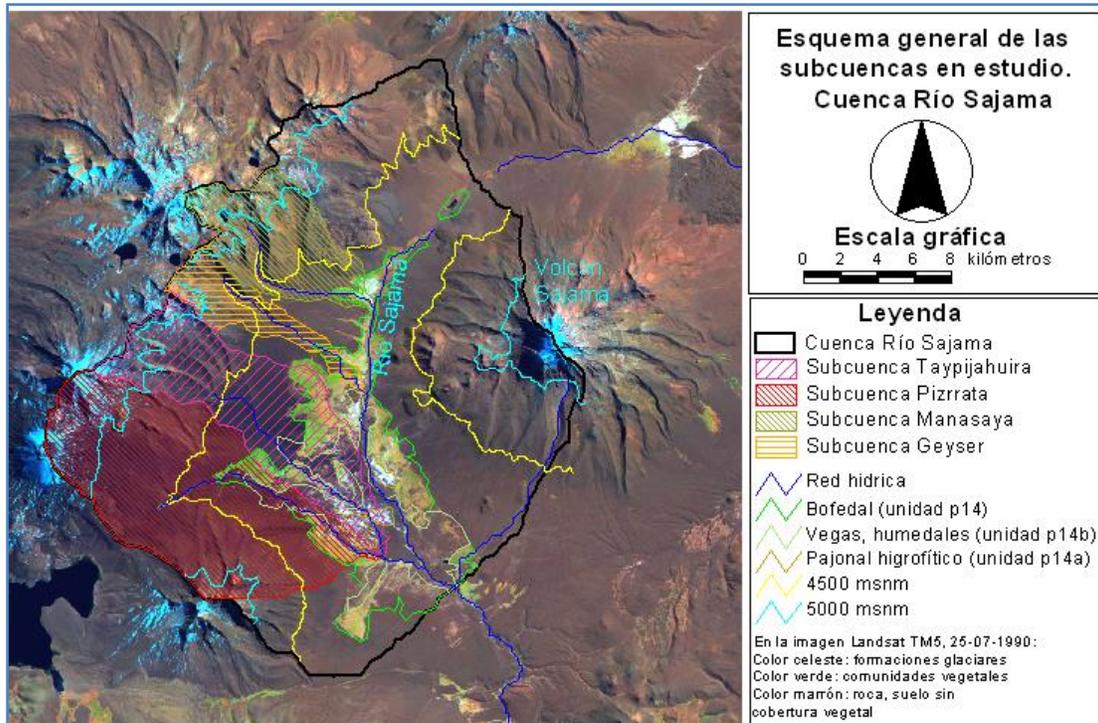


Figura A1-13. Ubicación geográfica de las subcuencas este para el estudio de la oferta de agua en la cuenca del Río Sajama.

Tabla A1-1a. Valores referenciales de retención potencial máxima del suelo  $S'_{max}$  para los grupos hidrológicos y condiciones antecedentes de humedad normales  $CN II$ , correspondientes a cada subcuenca de estudio. R denota el identificador del reservorio correspondiente.

a) Subcuenca Manasaya

DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva $CN II$ (condiciones normales)			$S'_{max}$ mm para $CN II$	Area [ $km^2$ ]	Reservorio	Elevación media del reservorio (msnm)
		Unidad compleja de mapeo						
		promedio	mínimo	máximo				
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	120	17.38	R3	4750
p27r+p10a'	C	58	68	63	149	11.06	R4	5338
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	120	11.63	R2	4423
p14b	D	89	89	89	31	1.37	R1	4319
Suma =					41.44			

**Tabla A1-1b** (continuación). Valores referenciales de retención potencial máxima del suelo  $S'_{max}$  para los grupos hidrológicos y condiciones antecedentes de humedad normales *CN II*, correspondientes a cada subcuenca de estudio. R denota el identificador del reservorio correspondiente.

## b) Subcuenca geiser

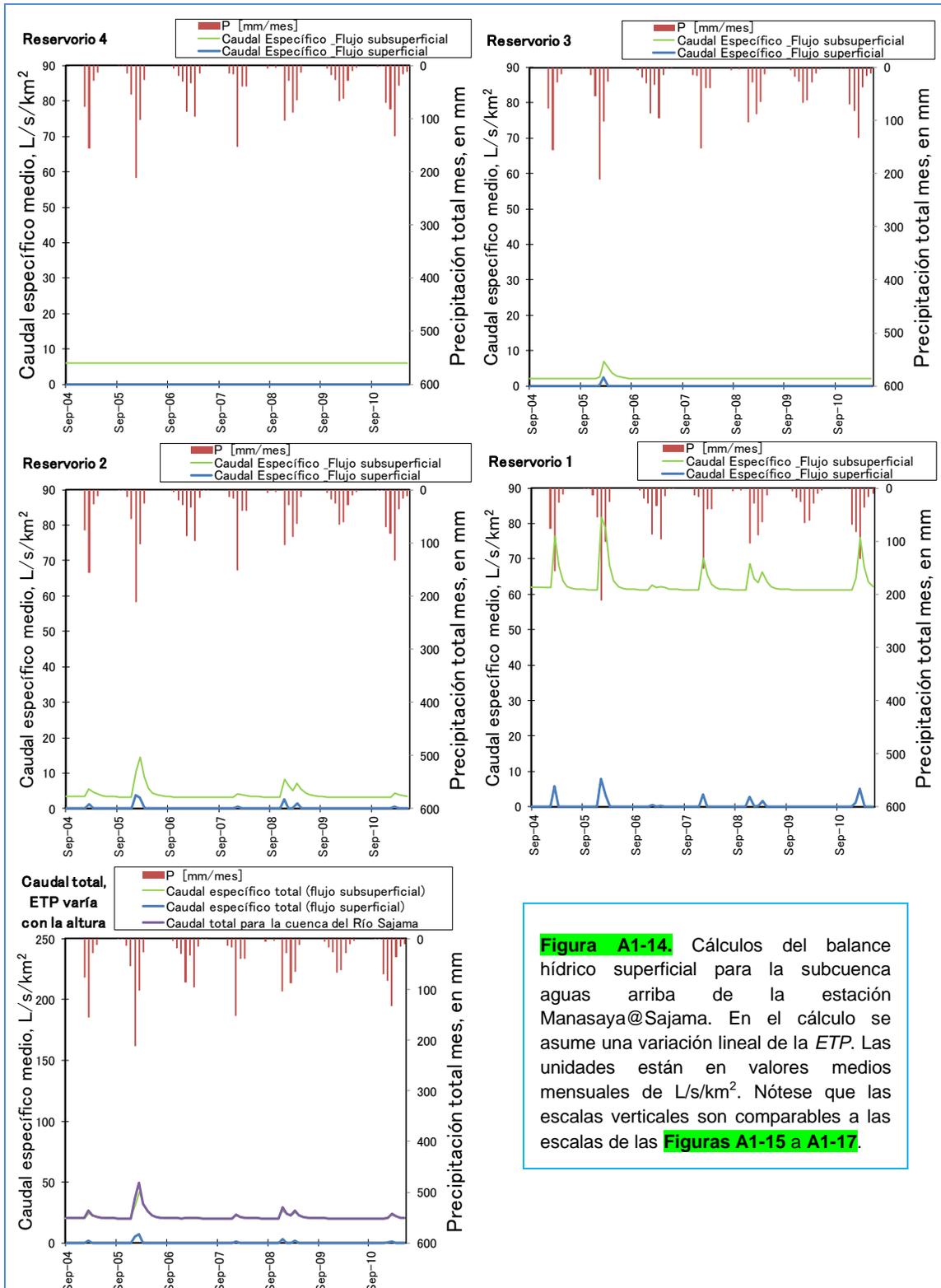
DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva <i>CN II</i> (condiciones normales)				$S'_{max}$ mm para <i>CN II</i>	Area [ $km^2$ ]	Reservorio	Elevación media del reservorio (msnm)	
		Unidad compleja de mapeo								
		promedio	mínimo	máximo	promedio					promedio
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	120	9.42	R3	4750		
p27r+p10a'	C	58	68	63	149	2.1	R4	5184		
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	120	7.91	R2	4401		
p14	C	78	78	78	72	0.077	R1	4267		
p14b	D	89	89	89	31	1.33	R1			
Suma =						20.84				

## c) Subcuenca Pizrata

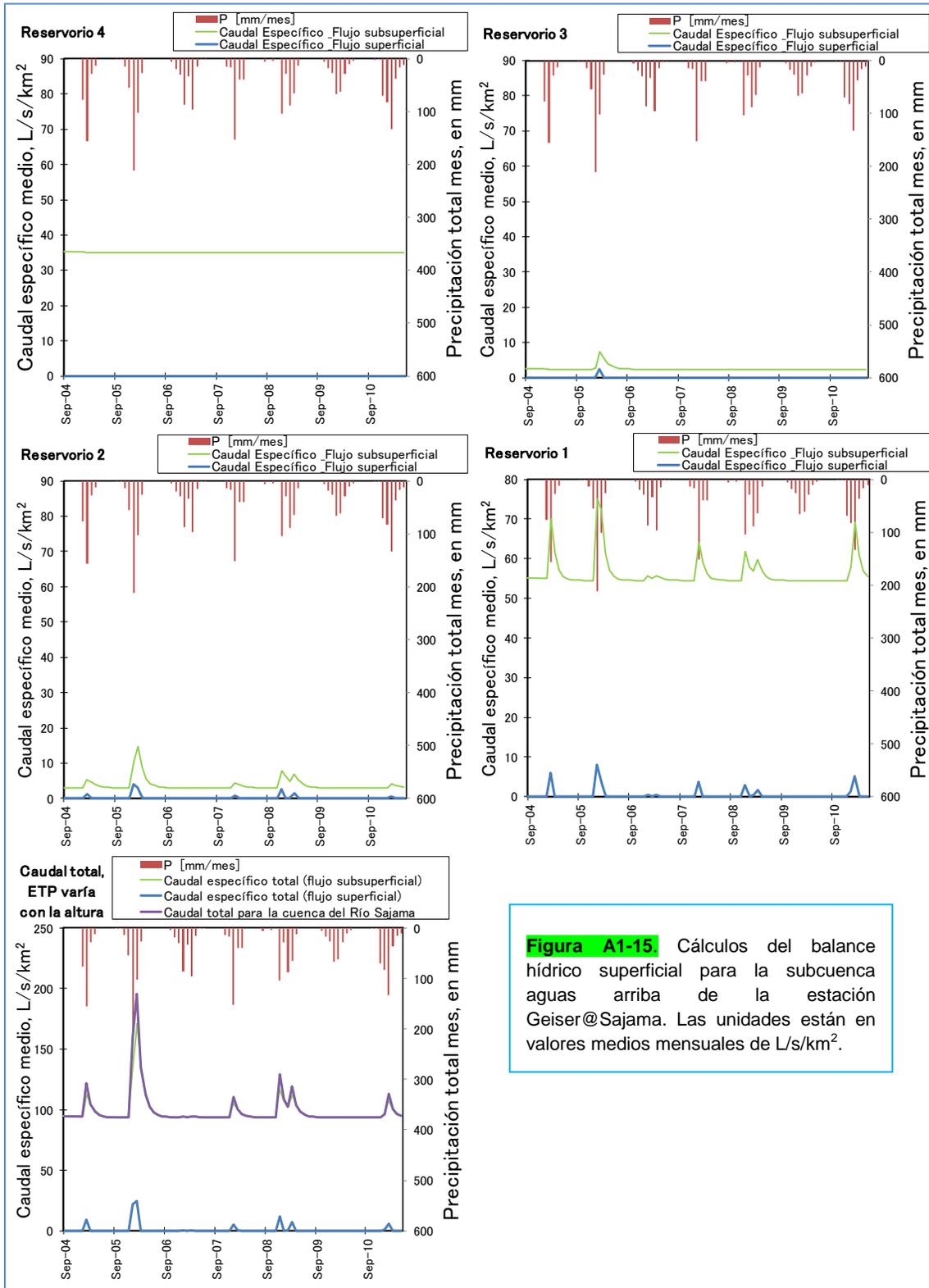
DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva <i>CN II</i> (condiciones normales)				$S'_{max}$ mm para <i>CN II</i>	Area [ $km^2$ ]	Reservorio	Elevación media del reservorio (msnm)	
		Unidad compleja de mapeo								
		promedio	mínimo	máximo	promedio					promedio
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	120	60.43	R3	4750		
p27r+p10a'	C	58	68	63	149	23.38	R4	5659		
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	120	21.65	R2	4421		
p14	C	78	78	78	72	5.61	R1	4246		
p14a	B	71	71	71	104	0.71	R1			
p14b	D	89	89	89	31	6.64	R1			
Suma =						118.42				

## d) Subcuenca Taypijahuirá

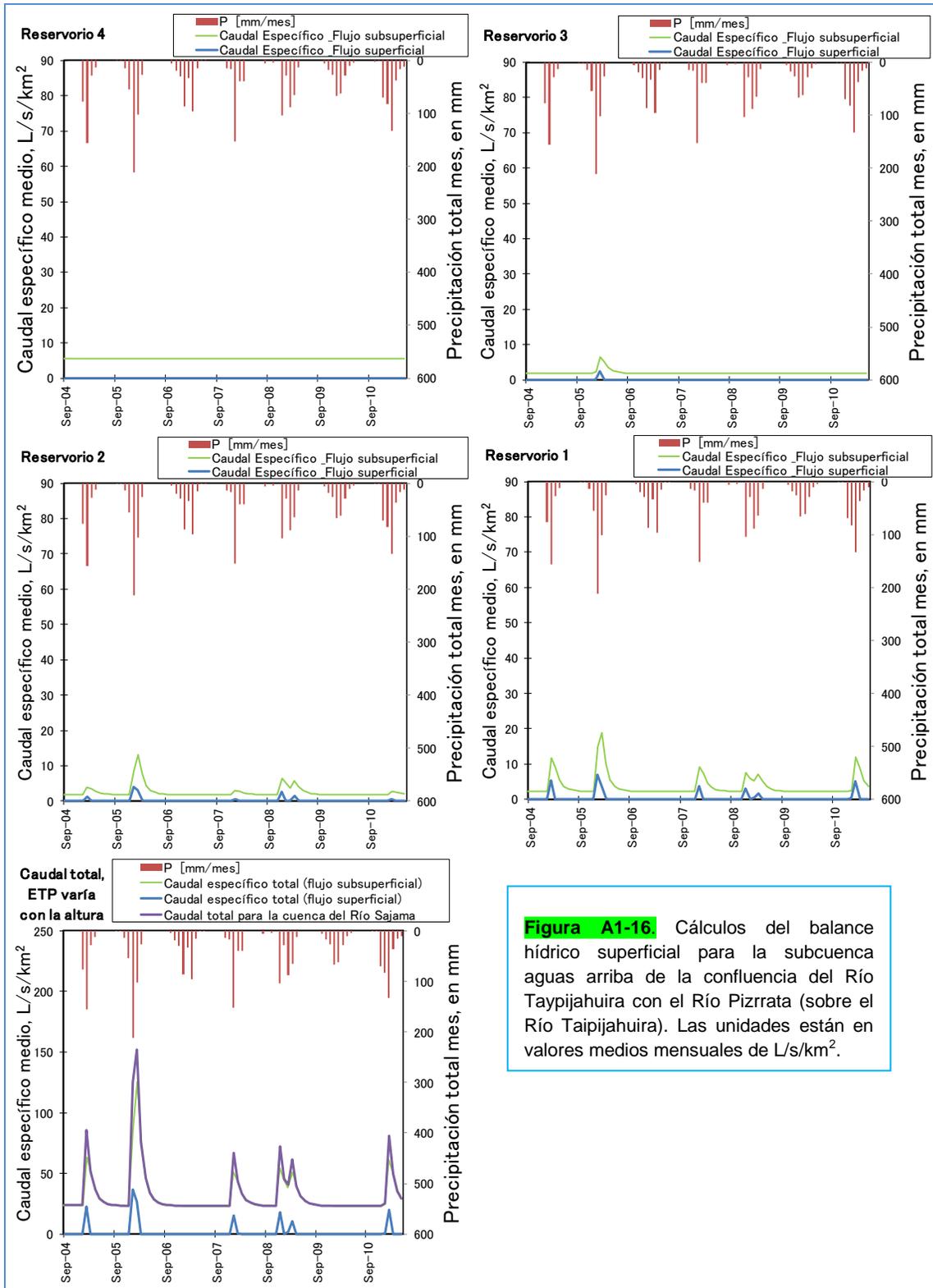
DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva <i>CN II</i> (condiciones normales)				$S'_{max}$ mm para <i>CN II</i>	Area [ $km^2$ ]	Reservorio	Elevación media del reservorio (msnm)	
		Unidad compleja de mapeo								
		promedio	mínimo	máximo	promedio					promedio
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	120	19.45	R3	4750		
p27r+p10a'	C	58	68	63	149	7.31	R4	5441		
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	120	18.92	R2	4412		
p14	C	78	78	78	72	11.33	R1	4237		
p14a	B	71	71	71	104	1.64	R1			
p14b	D	89	89	89	31	13.47	R1			
Suma =						72.12				



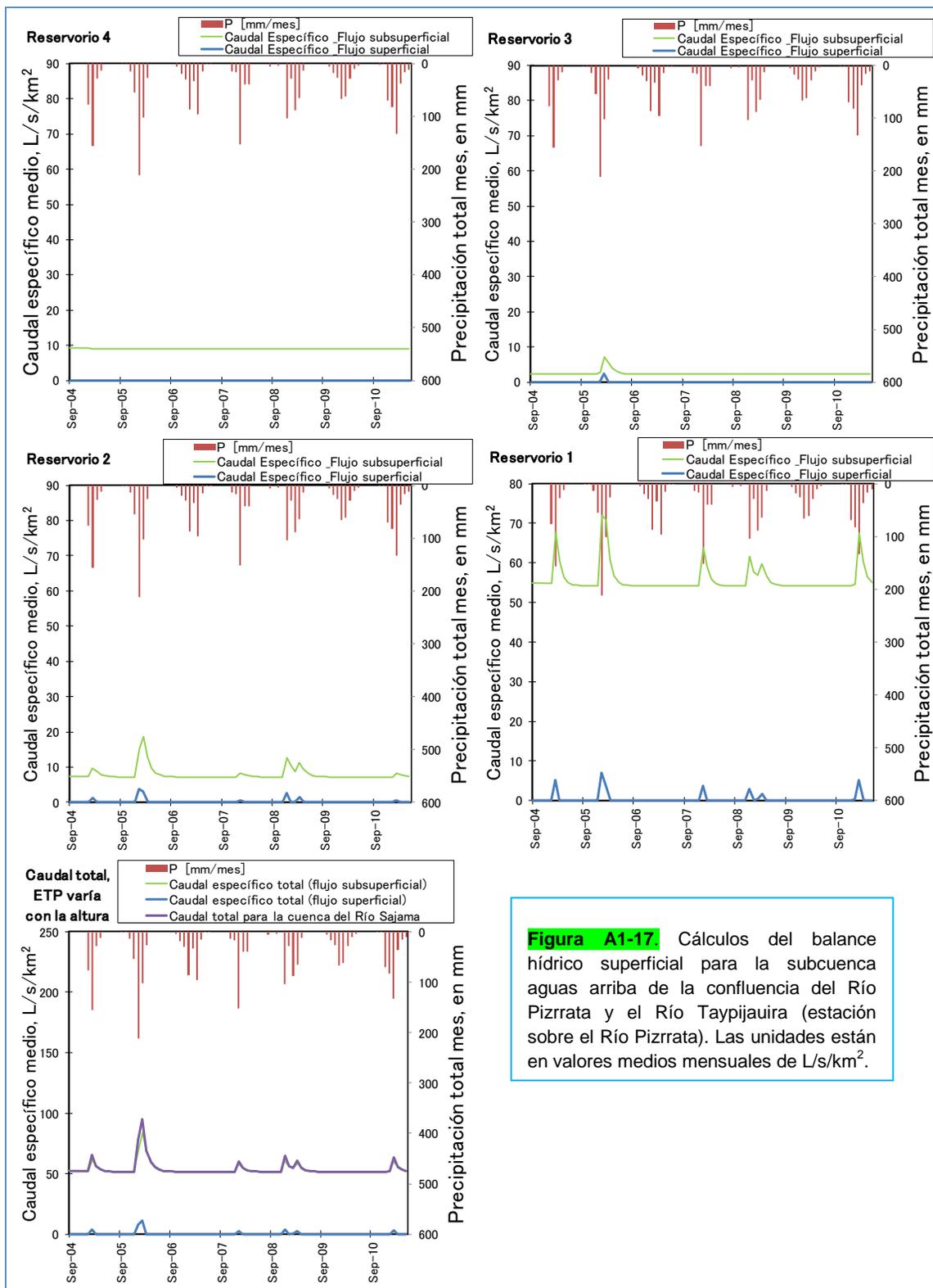
**Figura A1-14.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca aguas arriba de la estación Manasaya@Sajama. En el cálculo se asume una variación lineal de la ETP. Las unidades están en valores medios mensuales de L/s/km<sup>2</sup>. Nótese que las escalas verticales son comparables a las escalas de las Figuras A1-15 a A1-17.



**Figura A1-15.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca aguas arriba de la estación Geiser@Sajama. Las unidades están en valores medios mensuales de  $L/s/km^2$ .



**Figura A1-16.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca aguas arriba de la confluencia del Río Taypijahura con el Río Pizrrata (sobre el Río Taipijahura). Las unidades están en valores medios mensuales de L/s/km<sup>2</sup>.



**Figura A1-17.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca aguas arriba de la confluencia del Río Pizrrata y el Río Taypijaurá (estación sobre el Río Pizrrata). Las unidades están en valores medios mensuales de  $L/s/km^2$ .

**Tabla A1-2.** Valores de caudales aforados en la época de invierno, año 2012.

Sitio	Puente Sajama	Pizrrata@ Taypijahuir	Taypijahuir @Pizrrata	Geiser@ Sajama	Manasaya @Sajama	Sajama@ Manasaya	Sajama@ Geiser
Aforos julio de 2012, en m <sup>3</sup> /s	2.44	1.24	0.17	0.18	0.19	0.07	0.69

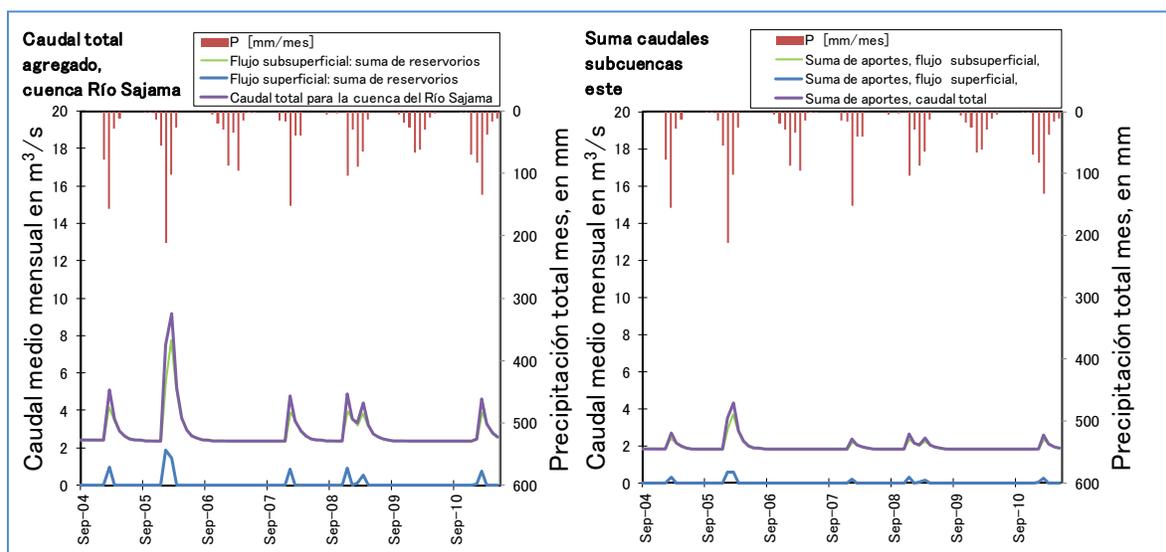
Caudal en la confluencia Sajama-Manasaya en m<sup>3</sup>/s = 0.257719

Caudal subcuencas este en m<sup>3</sup>/s = 1.78

Caudal en la confluencia Sajama-Geiser en m<sup>3</sup>/s = 0.87

\*Caudal en la confluencia Pizrrata-Taypijahuir-Río Sajama en m<sup>3</sup>/s = 2.27

\*Se debe asumir que existe un cierto volumen de aporte no aforado en el tramo entre la mencionada confluencia y la confluencia Sajama-Geiser.

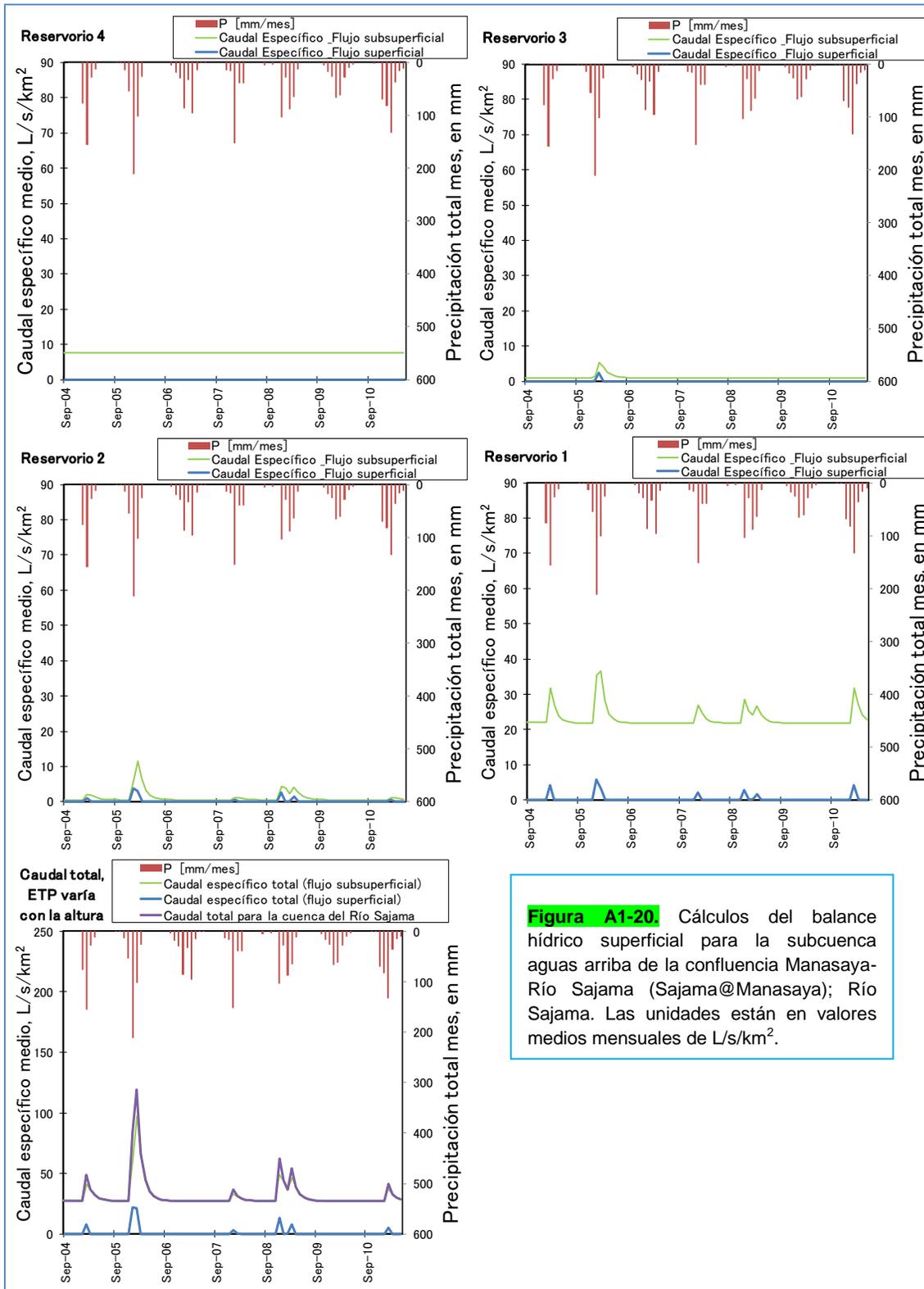


**Figura A1-18.** Comparación de los resultados preliminares del cálculo agregado (semidistribuido) de la respuesta de la cuenca del Río Sajama con la suma algebraica de las contribuciones de las subcuencas de los principales tributarios al este de la cuenca.

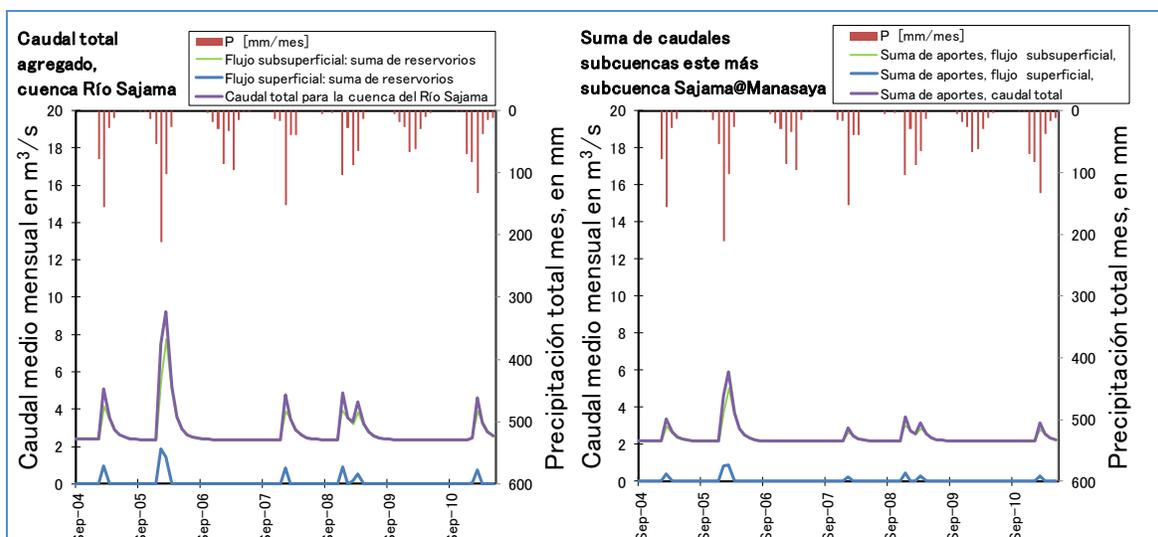
#### 2.4 Evaluación de la oferta de agua en la subcuenca aguas arriba de la estación Sajama@Manasaya: Resultados preliminares.

Para continuar con los cálculos, dejando aparte por el momento el aporte de las pequeñas áreas no cubiertas por el área de aporte de las subcuencas este, se procede a contabilizar el aporte del área que se desarrolla aguas arriba de la confluencia Río Sajama-Manasaya. Los valores de retención potencial máxima considerados en la modelación se presentan en la Tabla A1-3. En esta área se espera que el aporte de los manantiales que dan lugar a los bofedales de la subcuenca sean dominantes en la respuesta hídrica en el sitio de monitoreo; también se espera que los aportes provenientes del deshielo del glaciar al este sean poco relevantes. De manera similar se espera que los aportes por deshielo glaciar desde el oeste de la cuenca sean mínimos. La configuración geográfica de la Figura A1-19 proporciona la evidencia en la que se basan estas presunciones, mientras que la comparación entre el caudal total calculado para esta subcuenca y el caudal total calculado para toda la cuenca del Río Sajama presentado en la Figura A1-21 entrega una medida cualitativa acerca de la relevancia esperada para la subcuenca Sajama@Mansaya.





**Figura A1-20.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca aguas arriba de la confluencia Manasaya-Río Sajama (Sajama@Manasaya); Río Sajama. Las unidades están en valores medios mensuales de L/s/km<sup>2</sup>.



**Figura A1-21.** Comparación de los resultados preliminares del cálculo agregado (esquema semidistribuido) de la respuesta de la cuenca del Río Sajama con la suma algebraica de las contribuciones de las subcuencas de los principales tributarios al este de la cuenca más la contribución de la subcuenca aguas arriba del punto Sajama@Manasaya.

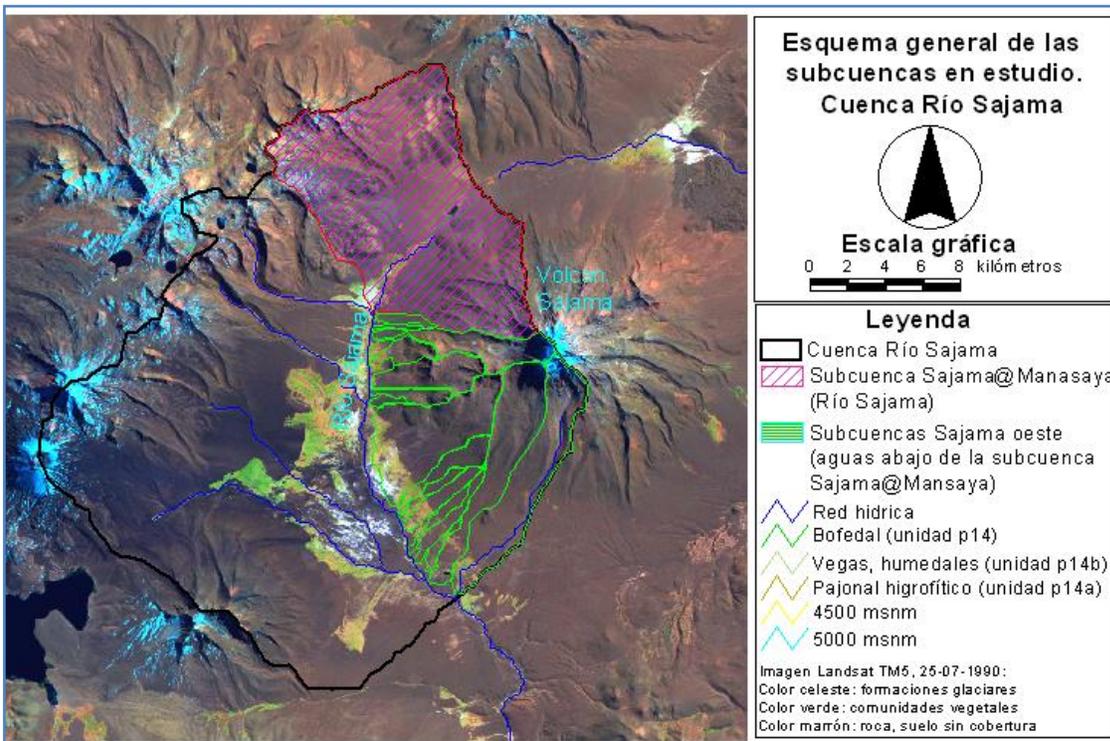
## 2.5 Evaluación de los aportes al margen oeste del Río Sajama (aguas abajo de la subcuenca Sajama@Manasaya).

La distribución espacial de las áreas de aporte al este de la cuenca representada a partir de información topográfica a escala horizontal de 30 m, asume que la configuración de las cuencas subsuperficiales tienen similar configuración a las cuencas superficiales (Figura A1-22). La Tabla A1-4 presenta parámetros de la subcuenca Sajama oeste. Para los cálculos, a diferencia de lo ocurrido en las subcuencas hasta este momento estudiadas, es complejo definir el volumen de flujo esperado durante la época de estiaje (caudal base) debido a que se espera que debido a la naturaleza de los suelos una gran parte del volumen que escurre por las laderas lo hace a través de las capas subsuperficiales. Por esta razón, los valores de caudal base se infieren a través de comparación con el caudal total calculado para la cuenca del Río Sajama. Como resultado, la Figura A1-24 presenta un remanente entre el caudal total calculado para la cuenca del Río Sajama (esquema agregado-semidistribuido) y la suma algebraica de los caudales calculados para todas las subcuencas presentadas en los subtítulos anteriores, asumiendo que tal volumen podría ser aportado por las áreas que escurren subsuperficialmente desde el margen este del Río Sajama. La falta de coincidencia entre los picos es un tema que pretende ser evaluado una vez se obtenga datos de niveles de agua altos en los ríos de la cuenca estudiada del periodo lluvioso 2012-2013.

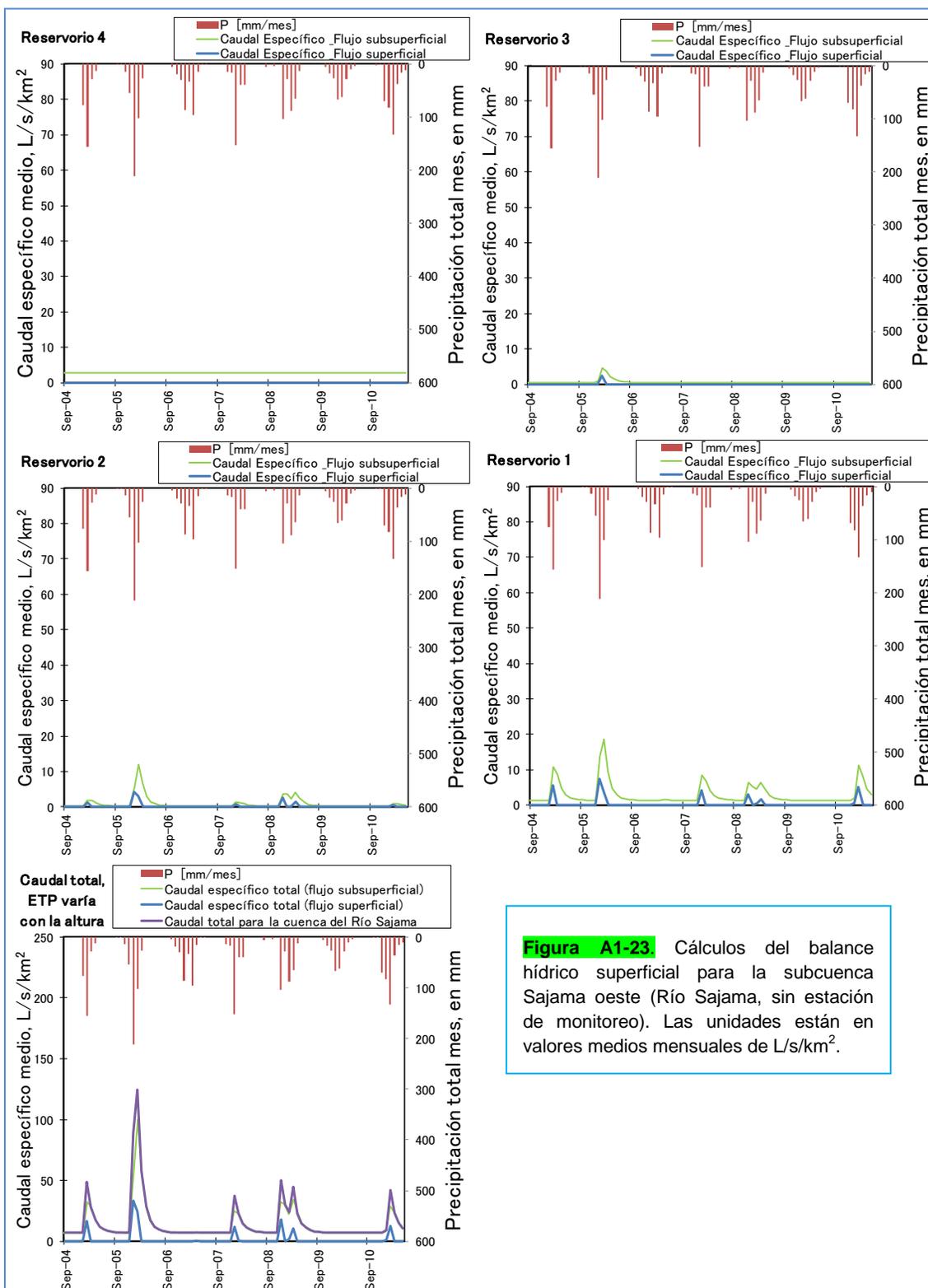
**Tabla A1-4.** Valores referenciales de retención potencial máxima del suelo  $S'_{max}$  para los grupos hidrológicos y condiciones antecedentes de humedad normales  $CN II$  correspondientes a los reservorios R de la subcuenca aguas abajo del sitio Sajama@Manasaya, margen oeste del Río Sajama.

Subcuenca Sajama Oeste, aguas abajo de Sajama@Manasaya (Río Sajama).

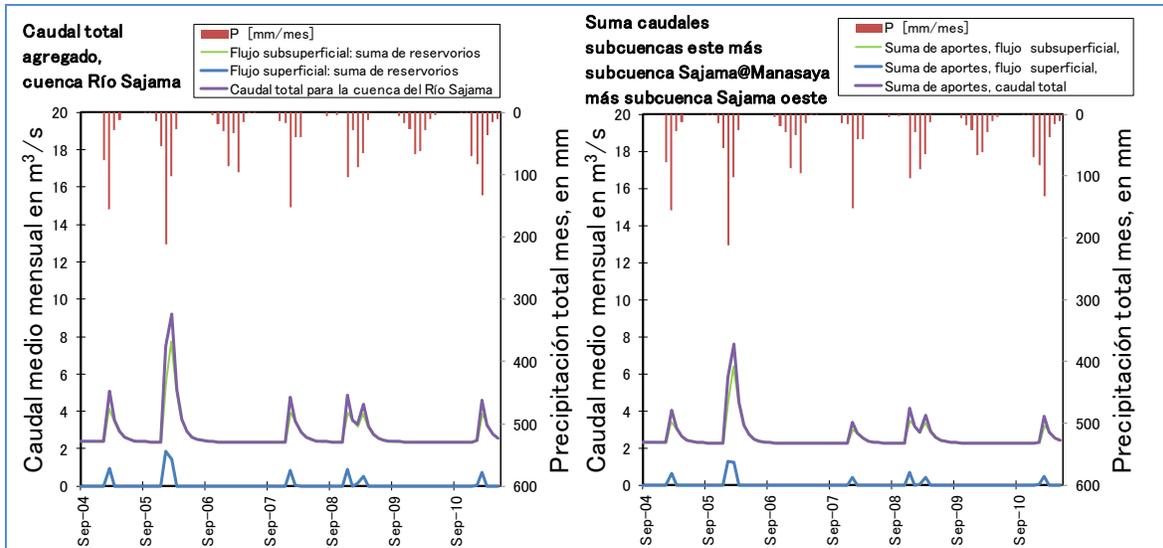
DESCRIPCION	Grupo Hidrológico	Número de curva $CN II$ (condiciones normales)		$S'_{max}$ mm para $CN II$	Area [ $km^2$ ]	Reservorio	Elevación media del reservorio (msnm)	
		Unidad compleja de mapeo						
		promedio	mínimo máximo promedio					
p27r+p10a'	C	58	68	63	149	13.44	R4	5768
p10a+p11a+p14	C	58	78	68	120	23.68	R3	4750
p12a+p11a+p14	C	58	78	68	120	61.29	R2	4395
p14	C	78	78	78	72	9.82	R1	4206
p14a	B	71	71	71	104	1.37	R1	
p14b	D	89	89	89	31	14.23	R1	
Suma =					123.83			



**Figura A1-22.** Esquema general de las áreas de aporte desde el margen oeste del Río Sajama.



**Figura A1-23.** Cálculos del balance hídrico superficial para la subcuenca Sajama oeste (Río Sajama, sin estación de monitoreo). Las unidades están en valores medios mensuales de L/s/km<sup>2</sup>.



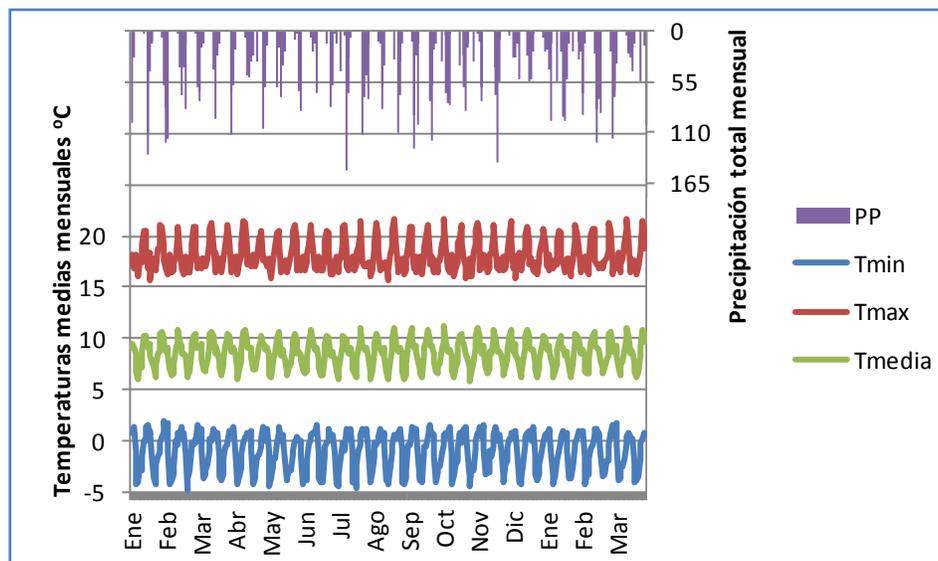
**Figura A1-24.** Comparación de los resultados preliminares del cálculo agregado (semidistribuido) de la respuesta de la cuenca del Río Sajama con la suma algebraica de las contribuciones de subcuencas de los principales tributarios al este de la cuenca, más la contribución de la subcuenca aguas arriba del punto Sajama@Manasaya, más la contribución del escurrimiento desde los taludes al oeste de la cuenca, aguas abajo de la subcuenca Sajama@Manasaya (subcuenca Sajama oeste).

### A1-3. SIMULACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL A TRAVÉS DE MODELOS SEMIDISTRIBUIDOS: SENSIBILIDAD A PROBABLES CAMBIOS FUTUROS EN LAS VARIABLES CLIMATICAS.

Para finalizar el análisis de sensibilidad se presentan los resultados de las inferencias de potenciales impactos de posibles cambios en las variables climáticas sobre la oferta de agua en la cuenca del Río Sajama, como herramienta para cuantificar la sensibilidad global del modelo. En el análisis se asume como plausibles los cálculos de la modelación de la cuenca del Río Sajama a través del esquema de cuatro reservorios horizontales, dos reservorios verticales y *ETP* con variación altitudinal. En ausencia de evidencia que sugiera lo contrario, se asume que la cobertura del suelo se mantiene tal como fue considerada en las simulaciones del tiempo presente (2005-2011). Las proyecciones de la *ETP* futura se obtienen de los productos de la Consultoría de Agroclimatología (García, 2012c). En aquella Consultoría el criterio empleado para los cálculos respectivos se basa el generador de clima LARS (Semenov y Barrow, 2002), bajo el escenario A2 del IPCC (Solomon et al., 2007). A diferencia de la estrategia tradicional ingenieril para la estimación de impactos potenciales futuros, utilizando por ejemplo las salidas de modelos de circulación global GCM, el uso de las salidas del generador LARS demanda el análisis estocástico de los resultados debido a que las series generadas si bien son series de tiempo correlativas, no implican necesariamente la continuación de una serie inicial obtenida mediante la introducción de forzantes; más bien, para el caso presente, implican una serie futura para el periodo 2045-2055 (10 años) constituida por una serie generada de 30 años de datos (mayor número de años al que el periodo 2045-2055 implicaría), con variación estacional, pero que no se refieren específicamente a un año en particular. La Figura A1-24 presenta lo que se quiere decir. La consecuencia de incluir aquella muestra de series estacionalmente variable en un experimento de predicción de potenciales impactos sobre la oferta de agua a escala de cuenca implica que, a objeto de continuar la lógica del análisis agroclimático de la consultoría de García (2012c), se deba analizar las salidas del modelo hidrológico siguiendo la misma lógica. A objeto de mantener la lógica del análisis hasta

este punto presentado, no se pretende reformular el modelo de balance hídrico superficial propuesto ni sustituirlo mediante otro similar de tipo estocástico. El objetivo del presente Quinto Informe de Avance es introducir las series generadas por el modelo LARS y analizar superficialmente las salidas generadas por el modelo hidrológico. En el Informe Final se presentará un análisis estocástico en congruencia con los productos de la Consultoría en Agroclimatología, concluyéndose los productos deseados.

Para esta primera prueba de simulación se considera un periodo de 5 años, asumiendo que los efectos por valores iniciales tienen influencia durante el primer año de la simulación. Las variables de entrada corresponden a la precipitación proyectada para la estación Sajama, y la *ETP* proyectada para la estación Sajama. En ausencia de la *ETP* para la estación Chungará, se asume que la *ETP* de Sajama se incrementa altitudinalmente mediante las tasas observadas en el periodo presente (2005-2011). Como resultado, el incremento en los valores futuros esperado de la *ETP* como la variable cuya tendencia positiva es clara (Figura A1-25), la cual constituye a su vez la variable más sensible del sistema de acuerdo a los experimentos computacionales presentados en el Cuarto Informe de Avance (Soria, 2012d), se observa un probable decremento en la oferta de agua disponible, bajo los parámetros considerados en la modelación (Figura A1-26). Esta conclusión sugiere que se requiere un incremento mayor al esperado en las tasas de lluvia para mantener el volumen actualmente observado.



**Figura A1-24.** Serie de 30 años generados por el modelo LARS, correspondientes al periodo 2045-2055, escenario A2 del IPCC (Solomon et al., 2007). El modelo no genera datos para una fecha específica, a diferencia de los productos generados por modelos climáticos globales. Los datos fueron generados en García (2012c).

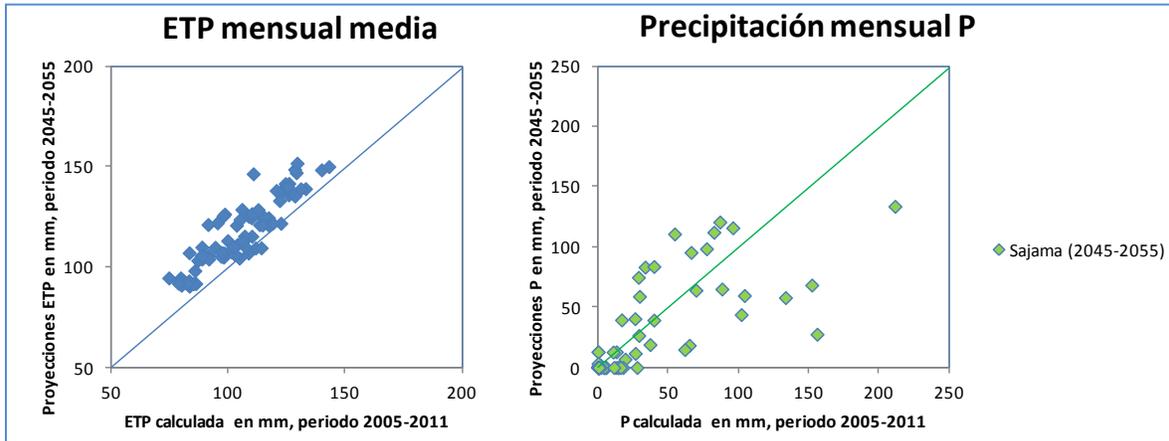


Figura A1-25. Comparación de series del periodo actual (2005-2011) y serie de datos proyectadas para la estación Sajama mediante el modelo LARS. Los datos fueron generados en García (2012c).

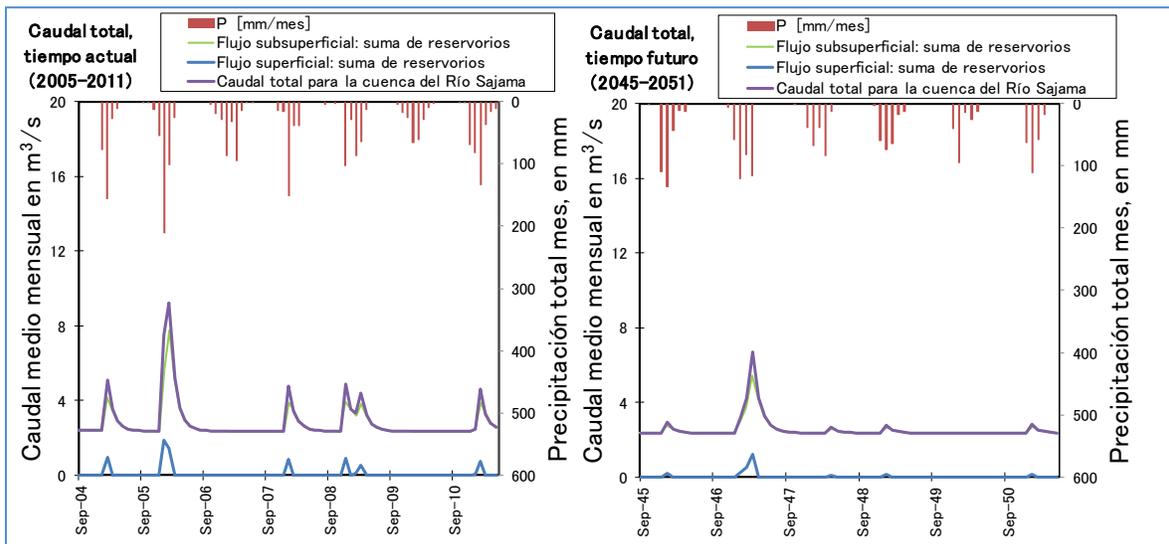


Figura A1-26. Comparación de los resultados preliminares del cálculo agregado (semidistribuido) de la respuesta de la cuenca del Río Sajama con resultados futuros del mismo esquema (misma cuenca). Las variables de entrada se generan mediante el modelo LARS en la Consultoría de Agroclimatología (García, 2012c).

## **ANEXO 2. PROPUESTA DE ARTÍCULO CIENTÍFICO.**

El resumen de artículo científico a continuación presentado forma parte de la propuesta de la presente Consultoría. Su relevancia es alta, debido a que constituye herramienta importante para la validación de los productos generados. El artículo pretende ser publicado dentro de la serie de publicaciones Red Book de la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas IAHS, una de las más importantes asociaciones de la comunidad científica en esta rama del conocimiento. La razón principal de haber elegido esta publicación es que los artículos enviados pasan por un proceso de revisión antes de su publicación (peer-reviewed papers). El nivel de impacto de estas publicaciones, aunque sin llegar a tener el nivel de una publicación en una revista de divulgación científica internacionalmente reconocida, tiene mucha mayor calidad que cualquier publicación regional, local, o que cualquier publicación que podría ser presentada en una conferencia internacional regular, razón que justifica su elección. El simposio en el cual el artículo se pone a consideración se denomina IAHS Symposia, H02 Cold and mountain region hydrological systems under climate change: towards improved projections. El título del artículo es On the practical relevance of evapotranspiration inferences in mountainous catchments for surface water balance projections. El mismo se envió a revisión el 25 de noviembre de 2012. Su resumen se transcribe a continuación.

### **Relevance of the uncertainty in evapotranspiration inferences for surface water balance projections in mountainous catchments**

**Freddy Soria**

The objective of this paper is to draw attention on the practical relevance of the predictive uncertainty range contained in evapotranspiration ETP calculations in remote high elevation mountainous regions towards improved surface water balance studies. The study develops in Bolivia and it compares the results from two surface water balance studies carried in two branches of the Andes. A particular feature in both study sites is the high altitudinal gradient, which was calculated to determine variations in altitude of 5500 masl. within horizontal distances of 50 km in average. Having understood that such altitudinal gradient directly influences the components of the water balance equation, at the first stage of the study were identified the most sensitive model factors under a variance based sensitivity analysis. In the basin that faces to the east and develops in the headers of the Amazon basin, which is not subject to water deficit conditions, the results of the sensitivity analysis has shown that the dominant component in the surface water balance is likely to be the precipitation. On the other hand on the semiarid basin located 250 km to the south of the former, facing to the south on the headers of the Uyuni basin, it was observed that the water deficit observed would lead the ETP to become the dominant component in the surface water balance. Under the latter environment, it was interesting to observe that within an altitudinal ratio of 6.5 m per km the ETP would vary at a ratio of 1 mm per month per km, which translating in terms of catchment discharge would be 8.8 liter per second per km. Results demonstrate that regionalization approaches in high elevation mountains is a complex task. The implications of the spatial variability of the surface water balance suggest that regional policies in mountainous areas are not applicable, demanding that in such kind of environments the establishment of site specific policies should be encouraged.