INSTITUTO DE HIDRAULICA E
HIDROLOGIA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

GESTIÓN CONCERTADA DE CUENCAS TRANSFRONTERIZAS; PROMOVIENDO LA PAZ Y LA COLABORACIÓN

USO Y ASIGNACIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DE LOS RIOS MAURI Y DESAGUADERO

INFORME FINAL

JORGE MOLINA CARPIO
BEATRIZ GUTIERREZ CALOIR

LA PAZ – BOLIVIA

Julio de 2011

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS 1
1.2 ALCANCE 3

2. EL ÁREA DE ESTUDIO Y LOS PROYECTOS DE TRASVASE **5**

2.1 EL AREA DE ESTUDIO 5
2.1.1 Clima *7*
2.1.2 Geología y suelos *8*
2.1.3 Vegetación y Uso del Suelo *10*
2.1.4 Hidrología y calidad de aguas *11*
2.1.5 Aspectos socioeconómicos *14*
2.2 LOS PROYECTOS DE TRASVASE 15
2.2.1 Aspectos históricos *15*
2.2.2 Situación actual *19*

3. ASIGNACIÓN DEL AGUA A NIVEL DE CUENCA: REPRESENTACIÓN Y MODELOS **23**

3.1 LA ASIGNACIÓN DEL AGUA Y SU REPRESENTACIÓN 23
3.2 EL MODELO MIKEBASIN 25
3.2.1 Las reglas de asignación y los derechos de agua en MIKE BASIN *27*
3.2.2 Aguas subterráneas y embalses *28*
3.2.3 Simulación y resultados. *30*

4. OFERTA Y CALIDAD DE AGUAS **32**

4.1 OFERTA DE AGUA 32
4.2 CALIDAD DE AGUAS 39
4.2.1 Fuentes de contaminación *39*
4.2.2 Calidad y clasificación de aguas *41*

5. DEMANDA Y DERECHOS DE AGUA **50**

6. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA EL ESCENARIO HISTÓRICO **51**

6.1 EL ESCENARIO HISTÓRICO 51
6.1.1 Datos de entrada *52*
6.1.2 Condiciones de funcionamiento del sistema *55*
6.2 RESULTADOS 61
6.2.1 Ajuste del modelo *61*
6.2.2 Simulación *62*
6.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS 69
6.3.1 Déficit hídrico *69*
6.3.2 Criterios de evaluación y comparación de escenarios *69*

7. LOS ESCENARIOS FUTUROS **76**

8. CONCLUSIONES **77**

REFERENCIAS **78**

ANEXO I: CAUDALES EN CHUQUIÑA Y BOCATOMA UCHUSUMA **80**

ANEXO II: CAUDAL REMANENTE DEL RÍO DESAGUADERO **83**

ANEXO III: CAUDAL DEL RIO MAURI EN FRONTERA SEGÚN ESCENARIO **84**

LISTA DE FIGURAS

2.1: Área de estudio
2.2: Cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero y área de influencia
2.3: Relieve y altitud del área de estudio
2.4: Isoyetas medias anuales en el área de estudio, 1960-2003
2.5: Mapa de isolíneas de ETP media anual, periodo 1960-2003
2.6: Bofedal en la cuenca del río Mauri
2.7: Subcuencas por estaciones hidrométricas de la cuenca del río Mauri.
2.8: El departamento de Tacna y sus cuencas de abastecimiento de agua
2.9: Estación hidrométrica Vertedero Caquena (al centro de la fotografía)
2.10: Proyecto Kovire
2.11: Canal Calachaca-Chuapalca-Patapujo

3.1: Entradas y salidas de un modelo matemático de gestión del agua
3.2: Representación del sistema hídrico en MIKE BASIN
3.3: Interfase en entorno ArcGIS y barra de herramientas MB
3.4: Asignación según proporción de caudal en MIKE BASIN
3.5: Representación conceptual de aguas subterráneas en MIKE BASIN

4.1: Estaciones hidrométricas de la cuenca del Mauri y áreas de aporte
4.2: Hidrogramas medios en Calacoto Mauri y estaciones del río Desaguadero
4.3: Vector regional anual de las estaciones del río Mauri, 1965-08
4.4: Vector regional anual de las estaciones del río Desaguadero, 1965-08
4.5: Relación de caudales anuales de los ríos Mauri y Desaguadero en Calacoto
4.6: Fuentes de Contaminación Potencial Natural y Antrópica (ríos Mauri y Desaguadero)
4.7: Conductividad promedio en los ríos Mauri y Desaguadero
4.8: Concentración promedio de arsénico en los ríos Mauri y Desaguadero
4.9: Concentración promedio de boro en los ríos Mauri y Desaguadero
4.10: Concentración promedio de cadmio en los ríos Mauri y Desaguadero
4.11: Ubicación de puntos de monitoreo

5.1: Tipo, sujeto y expresión del derecho de agua de riego en el río Desaguadero
5.2: Distribución de Bofedales en la cuenca del Río Mauri
5.3: Evapotranspiración potencial y precipitación en la estación de Patacamaya, La Paz
5.4: Demanda media mensual (millones m3) de los sistemas de riego del Desaguadero

6.1: Extracción y trasvase promedio del periodo 2004-2008, cuenca del rio Mauri
6.2: Canales existentes y en construcción en Perú
6.3: Sistemas de riego aguas abajo de Chuquiña
6.4: Sistemas de riego aguas arriba de Chuquiña
6.5: Regla de distribución del caudal en la bifurcación Chuquiña
6.6: Serie de caudales simulados (m3/s) del río Uchusuma en Bocatoma, periodo 1965-08
6.7: Serie de caudales simulados (m3/s) a la salida de la laguna Vilacota, periodo 1965-08
6.8: Situación actual de los (ex)bofedales del río Uchusuma
6.9: Caseta de bombeo y pozo abandonado en el sector de Vilacota
6.10: Modelo MIKE BASIN, representación de la cuenca del Mauri en Kovire

6.11: Curva de duración del déficit hídrico, sistema Chambi Rancho Chuquilaca, 1965-08
6.12: Curva de duración del déficit hídrico, sistema Central El Choro, 1965-08
6.13: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Chambi Rancho Chuquilaca
6.14: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Central El Choro
6.15: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Central Unificada

LISTA DE TABLAS

2.1: Caudal específico y lámina de escurrimiento anual en la cuenca del río Mauri, periodo 1965-08

4.1: Caudales medios mensuales en estaciones de las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero, periodo 1965-2008
4.2: Precipitación media mensual y anual (mm) en estaciones de apoyo, 1965-2008
4.3: Valores Promedio de parámetros físico-químicos en las cuencas de los ríos Mauri y Desaguadero

5.1: Tomas del río Desaguadero, fecha de construcción y número de usuarios
5.2: Épocas de riego de los sistemas del río Desaguadero
5.3: Superficie de bofedales en la cuenca del río Mauri
5.4: Superficie regada (en hectáreas) por cultivos y sistema
5.5: Demanda promedio mensual y anual por comunidad y sistema, en metros cúbicos

6.1: Caudales medios mensuales generados para la cuenca Uchusuma
6.2: Superficie y demanda media de bofedales en la cuenca del río Mauri
6.3: Producción hídrica de la cuenca del río Mauri (m^3/s), periodo 1965-2008
6.4: Caudales medios de extracción y trasvase
6.5: Capacidad y características de canales y tomas de Perú
6.6: Caudales naturalizados y registrados en Chuquiña, periodo 1965-08
6.7: Caudal de salida medio del sistema, periodo 1965-08
6.8: Balance hídrico medio de la laguna de Vilacota, periodo 1965-08
6.9: Consumo medio mensual y anual de los sistemas de riego del río Desaguadero
6.10: Déficit hídrico relativo (%) de los sistemas del brazo izquierdo del río Desaguadero
6.11: Déficit medio anual en volumen y relativo (%) de los sistemas del brazo izquierdo del río Desaguadero

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Son varias las cuencas y ríos internacionales donde existen o se han propuesto proyectos de aprovechamiento hídrico, lo que se explica en parte por la ubicación de Bolivia en el centro de Sudamérica. Entre los existentes están las obras en los ríos Mauri (Perú y Chile), Lauca (Chile) y Cancosa (Chile), las dos últimas ejecutadas sin ningún acuerdo entre países. Entre los proyectos en ejecución o propuestos destacan el megaproyecto hidroeléctrico del río Madera (Brasil), las presas de la cuenca del río Bermejo (Argentina) y los proyectos de control y aprovechamiento del río Pilcomayo (Paraguay y Argentina). Cuando existe negociación,, esta tiende a realizarse de forma individual para cada caso, (ese no fue el caso de los proyectos del Madera, que entrarán en funcionamiento el 2012 como una decisión unilateral del Brasil).

El proyecto de investigación Gestión Concertada de Cuencas Transfronterizas se inició formalmente en 2009 y se planteó apoyar la creación de importantes espacios de deliberación público social, con un fuerte componente de participación de gobiernos, organismos multilaterales y organizaciones sociales, con el propósito de establecer las bases de acuerdos y futuros tratados para beneficio de los pueblos. Este diálogo debería estar basado en información seria y científica provista por la investigación del propio proyecto y fuentes secundarias.

Justamente la presente investigación responde al propósito de proporcionar información confiable y sustentada para apoyar el diálogo y la toma de decisiones. Para ello se recurrirá a herramientas que permiten visualizar, tanto a usuarios como gobiernos, los impactos de diferentes escenarios de aprovechamiento de los recursos hídricos en las cuencas de estudio. Al mismo tiempo, se pretende apoyar el establecimiento de plataformas de deliberación público social que sirvan para que los posibles acuerdos cuenten con la participación y beneficien a los pueblos a ambos lados de la frontera. La investigación contó con el apoyo y fondos concurrentes de Interchurch Organization for Development Co-operation. ICCO, Intermon OXFAM – Junta de Andalucía y el IDRC del Canadá.

El proyecto Gestión Concertada de Cuencas Transfronterizas eligió a la cuenca trinacional (Bolivia, Perú, Chile) del río Mauri como un estudio de caso, permitiendo así continuar con el trabajo desarrollado en estudios anteriores (Molina y Cruz, 2008, Villaroel et al, 2007, Orsag et al, 2007). Un avance importante sobre esos estudios es que la presente investigación se desarrolla en el marco de un acuerdo entre Perú y Bolivia para reiniciar las actividades de la Comisión Técnica Binacional Perú-Bolivia sobre el río Maure-Mauri, alcanzado en 2009 y refrendado a nivel de presidentes de los dos países en 2010. Una de las actividades centrales de la agenda de trabajo de esa Comisión es la implementación en forma conjunta de un modelo matemático de gestión del agua para la cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero, con los siguientes objetivos específicos (Fuente: Memorias de la 1ª Reunión de Puntos Focales, Comisión Técnica Binacional río Mauri):

- Evaluar el funcionamiento actual-histórico del sistema hídrico

- Evaluar el comportamiento del sistema hídrico considerando los proyectos de aprovechamiento de los recursos hídricos de ambos países
- Elaborar una base de datos integral y una herramienta de gestión que sirva de apoyo a la toma de decisión de los actores y autoridades competentes de ambos países.

El presente estudio ayudará a responder las siguientes preguntas de investigación, entre otras planteadas en la propuesta inicial:

- ¿Cuáles son las herramientas, buenas prácticas y modelos de gestión de cuencas transfronterizas que permitirían promover arreglos y acuerdos internacionales entre estados para el beneficio mutuo de los pueblos?

- ¿Qué procesos de planificación podrían ser utilizados a nivel de cuencas transfronterizas? ¿Cómo designar objetivos comunes y planes de acción?

- ¿Cómo las necesidades de los pobres y del medio ambiente podrían ser reconciliadas frente a las demandas de los sectores industriales, considerando un uso razonable y equitativo entre los estados en relación a los recursos hídricos de cuencas transfronterizas? ¿Cuáles son las implicaciones ambientales y sociales (derechos de agua) de las actuales y futuras obras proyectadas para el aprovechamiento hídrico en la cuenca del río Mauri?

- ¿Qué mecanismos se pueden utilizar para compartir información y datos?

- ¿Qué mecanismos y herramientas de monitoreo serían los más efectivos en un contexto transfronterizo?

La cuenca del río Mauri forma parte de la gran cuenca endorreica del Altiplano sudamericano. Varios proyectos de aprovechamiento y trasvase de las aguas de la cuenca del Mauri hacia la región costera del Pacífico han sido ejecutados y otros están planificados, con frecuencia sin tomar en cuenta a la población local. Excepto el sector chileno, el área de estudio forma parte del acuerdo entre Perú y Bolivia que crea la Autoridad Binacional del sistema hídrico, que incluye a la cuenca del lago Titicaca y cuyas aguas se rigen bajo un régimen de condominio. Los gobiernos de los dos países aceptan que cualquier extracción futura de agua en la cuenca del río Mauri debe analizarse y definirse tomando en cuenta sus impactos ambientales, los derechos de los usuarios aguas abajo y el derecho internacional.

Un aspecto central al presente estudio es la aplicación de un modelo de gestión del agua en cuencas. Este tipo de herramienta permite trabajar con una gran cantidad de información para obtener un diagnóstico del manejo actual del agua en una cuenca y para simular escenarios futuros, tomando en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la oferta y demanda de agua y la competencia entre usuarios. Como ventaja adicional, un modelo de gestión ayuda a transparentar la asignación del agua, a identificar posibles puntos de conflicto, así como condiciones y situaciones críticas. Además este tipo de modelo puede servir a los futuros Comités o Autoridades de cuencas como base para la gestión del recurso.

Por aspectos prácticos y según los acuerdos alcanzados en la Comisión Binacional, los dos países usarán programas (software) diferentes, pero la misma información de entrada, previamente validada por los dos países. El modelo elegido por los investigadores bolivianos fue el MIKE BASIN del Danish Hydraulic Institute, mientras que los puntos focales peruanos de la Comisión decidieron utilizar WEAP (Water Evaluation and Planning, SEI). Las bases de datos implementadas en ambos modelos serán intercambiadas y validadas por los dos países.

Paralelamente y como complemento indispensable del análisis, se usaron herramientas de las ciencias sociales, como el análisis de actores y el mapeo de derechos. Estos temas, así como la demanda de agua de bofedales en Perú y Bolivia y de los sistemas de riego ubicados a lo largo del río Desaguadero, fueron objeto de estudios específicos que se citan en la lista de referencias. Estos estudios proporcionaron información básica de entrada al modelo. Todo este conjunto de estudios responden a la meta de "Producir diversos documentos, bases de datos, sistemas geográficos, modelos de gestión e hidrológicos y publicaciones que contribuyen a través de la ciencia y la investigación a ampliar los conocimientos y la información de las causas de los potenciales conflictos generados por la utilización del recurso por los diferentes usos y usuarios en cuencas internacionales"..

El presente documento es el informe final del estudio de escenarios de uso y asignación del agua, que responde a los siguientes objetivos generales de la propuesta de investigación:

- Promover acuerdos internacionales sobre cuencas transfronterizas de beneficio mutuo de los pueblos, facilitando el diálogo técnico - político entre gobiernos y organizaciones sociales, la resolución de conflictos, la cooperación transfronteriza y la gestión integral y concertada de los recursos hídricos compartidos.

- Sistematizar y contribuir al desarrollo e implementación de herramientas, buenas prácticas y modelos de gestión de aguas en cuencas transfronterizas.

- Identificar las causas de potenciales conflictos relacionados con la competencia por el uso del agua por diferentes usuarios en la cuenca transfronterizas del río Mauri.

1.2 ALCANCE

El estudio comprendió las siguientes actividades:

- Recopilación de información climatológica, hidrológica, cartográfica y de estudios previos
- Revisión y actualización del estudio de oferta de agua
- Actualización del estudio de mapeo de derechos en la cuenca del río Desaguadero
- Análisis de demanda de agua en la cuenca de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero. Incluye un análisis de la demanda de bofedales por subcuencas controladas por estaciones hidrométricas y de los sistemas de riego a lo largo del Desaguadero.
- Intercambio y validación de la información meteorológica, hidrológica y de obras de aprovechamiento y extracción de agua de la cuenca del río Mauri hacia las cuencas costeras del Perú y de los sistemas de riego en Bolivia.

- Implementación del modelo de gestión en la cuenca
- Simulación del escenario actual-histórico. Diagnóstico de uso y manejo del agua.
- Identificación y simulación de escenarios futuros de aprovechamiento.
- Evaluación de los impactos de los escenarios futuros

El informe está estructurado de la siguiente forma:

El capítulo 1 de Introducción incluye la justificación, objetivos y alcance del estudio. El capítulo 2 describa el área de estudio y los proyectos de trasvase de agua hacia la cuenca del Pacífico. El capítulo 3 describe cómo se representa y modela la asignación de derechos y gestión del agua en cuencas, así como la información que se requiere. El capítulo 4 sintetiza los estudios de oferta y calidad de aguas y el capítulo 5 los de demanda y mapeo de derechos.

El capítulo 6 describe la situación actual de manejo del agua en la cuenca y presenta los resultados del denominado escenario actual o histórico, así como la validación del modelo para este escenario. Los resultados obtenidos con el modelo de gestión para los escenarios futuros son objeto del capítulo 7. El capítulo 8 presenta las conclusiones sobre los impactos sociales y ambientales de los proyectos de aprovechamiento y los resultados del estudio.

Por cuestiones operativas se presentará un informe parcial y un informe final. El primer informe parcial corresponde al escenario histórico y comprende los capítulos 1, 2, 3, 4 y 6. Para el informe final se completarán los tres capítulos restantes e incluirá por tanto todos los capítulos.

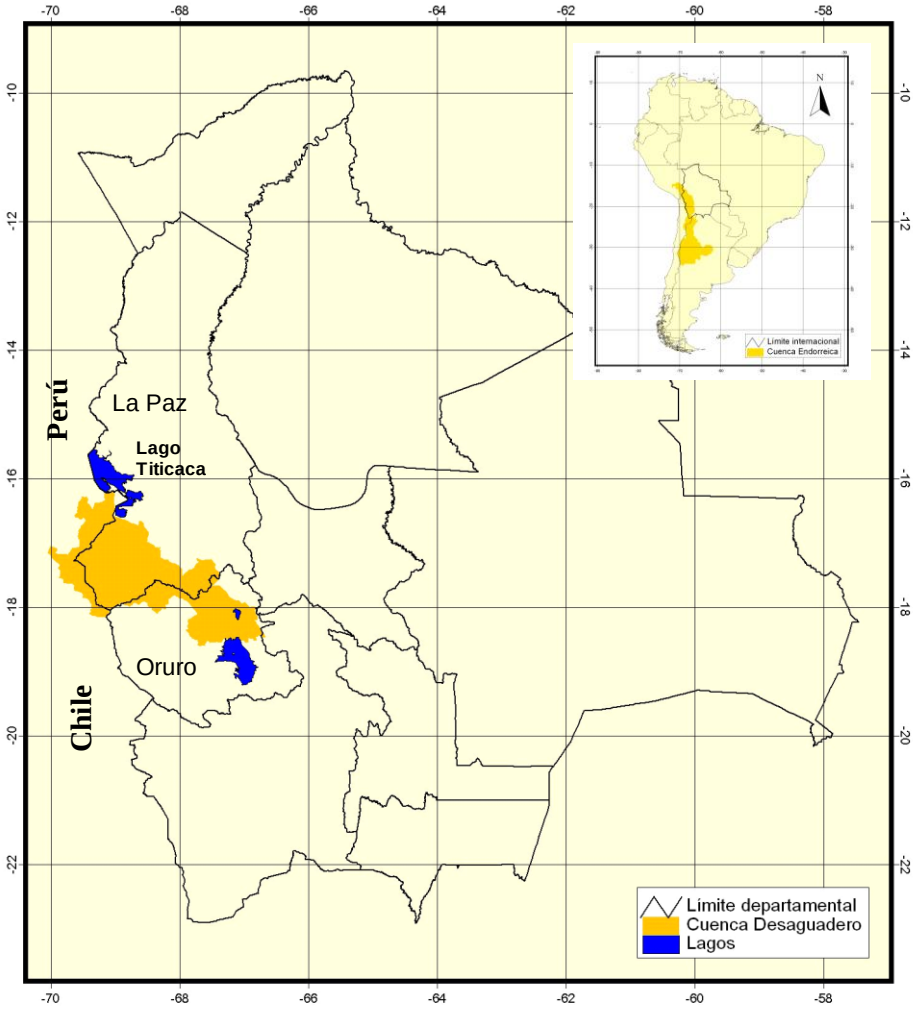
Capítulo 2

EL ÁREA DE ESTUDIO Y LOS PROYECTOS DE TRASVASE

2.1 EL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero. El río Mauri es el principal afluente del río Desaguadero y forma parte del sistema TDPS (Titicaca, Desaguadero, Poopó, Salares), que drena las aguas de la región del Altiplano central de Sudamérica. El área de estudio ocupa parte de los departamentos de Puno y Tacna en Perú, del departamento de La Paz en Bolivia y de la provincia de Parinacota de la I Región de Chile. En Bolivia, ocupa el extremo sur del departamento de La Paz y el noreste del departamento de Oruro (ver figura 2.1).

Figura 2.1: Área de estudio

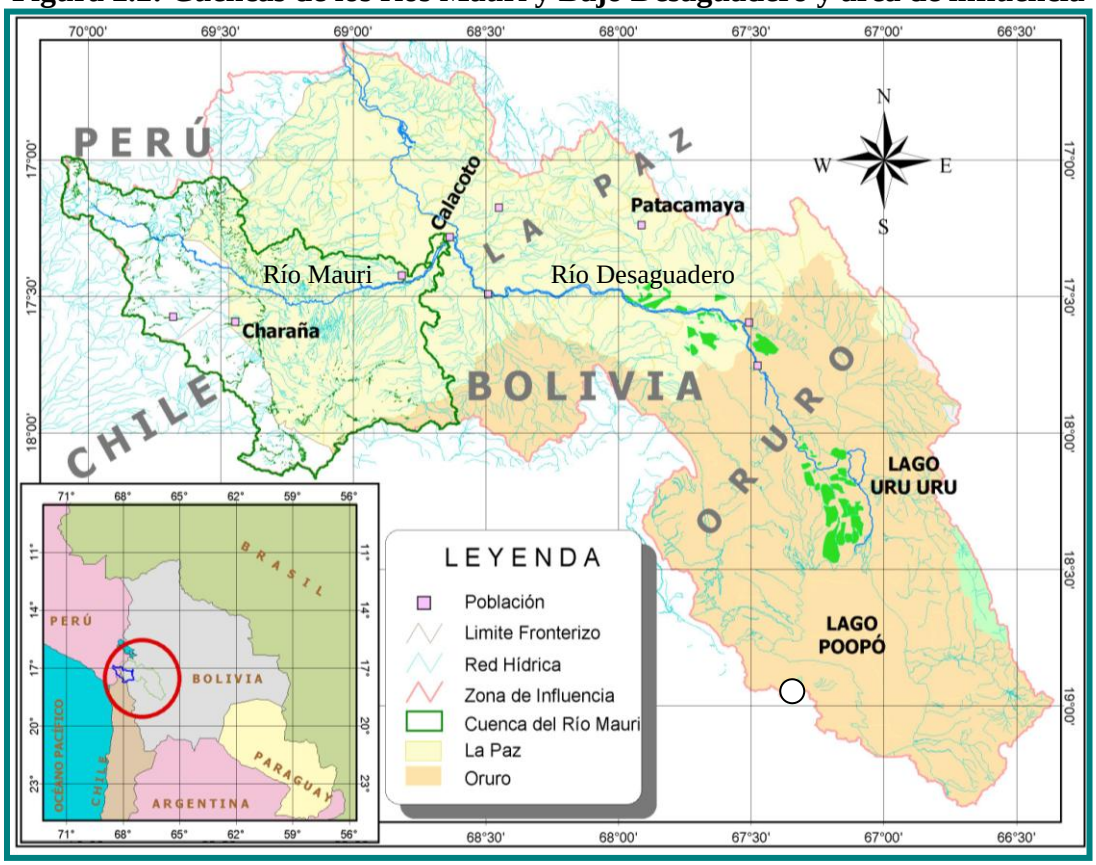


Fuente: Villaroel y Pérez (2007)

El río Mauri nace en la cordillera occidental, en Perú, para luego ingresar a Bolivia. Sigue un curso oeste-este (figura 2.2), y en las cercanías de la población de Abaroa recibe al río Caquena, que nace en Chile. Confluye con el Desaguadero en las cercanías de la población de

Calacoto, después de drenar una subcuenca de 9802 km2 de extensión. La población es en su gran mayoría de origen aymará. La densidad poblacional es baja, aproximadamente 3 hab/km2. En el sector boliviano (provincia Pacajes) de la cuenca, la población era de 8892 habitantes el año 1992, que se estima se ha reducido en la actualidad, al tener una tasa negativa de crecimiento (ALT, 2003). La tasa de analfabetismo estaba alrededor del 15% (ALT, 2003), pero se redujo fuertemente en los últimos años.

Figura 2.2: Cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero y área de influencia

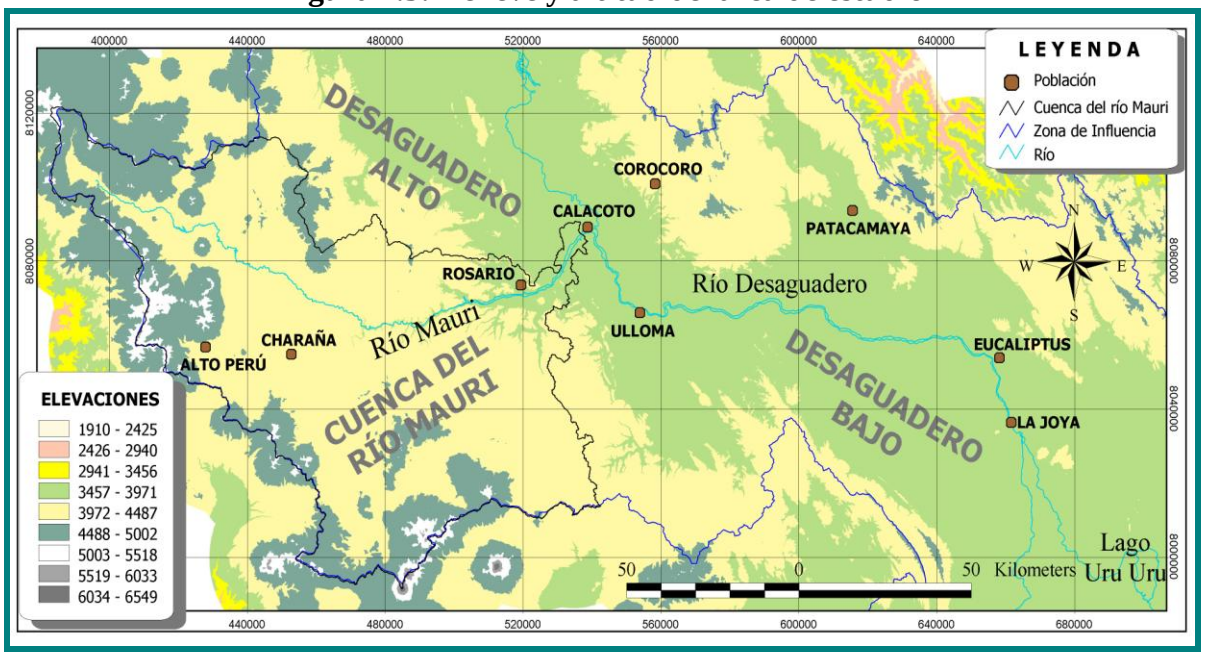


Fuente: Elaboración propia

La densidad poblacional es considerablemente más alta a lo largo del río Desaguadero aguas abajo de la confluencia con el Mauri, donde están situados los principales sistemas de riego (en color verde claro en la figura 2.1) que usan las aguas de ese río.

El relieve (figura 2.3) está definido por la Cordillera Occidental al oeste y la planicie altiplánica al este. La Cordillera Occidental es volcánica y separa a la cuenca del Altiplano de las pequeñas cuencas costeras del Pacífico. La altitud varía desde los 6300 msnm hasta 3795 msnm en la cuenca del río Mauri. El punto más alto está situado en los nevados de Parinacota, donde se origina el río Caquena. A partir de Calacoto, el río Desaguadero corre por la amplia planicie del Altiplano Central, cuyo relieve se caracteriza por la presencia de terrazas, colinas y cerros aislados (Orsag, et al. 2006).

Figura 2.3: Relieve y altitud del área de estudio



Fuente: Elaboración propia en base a SRTM

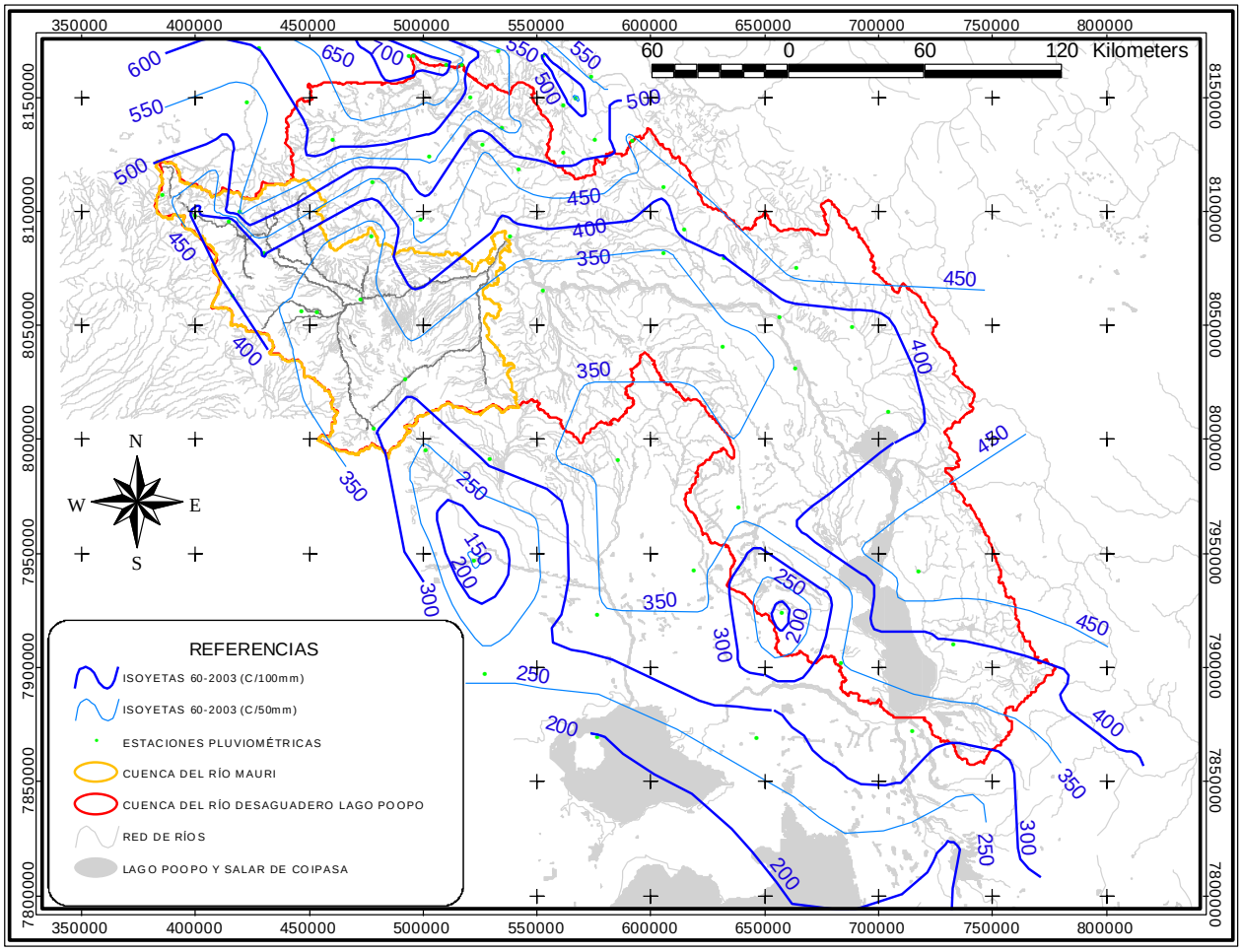
2.1.1 Clima

En la región del Altiplano predominan condiciones semiáridas (la evapotranspiración potencial anual supera ampliamente a la precipitación) y un clima frío. La pluviometría media anual en la cuenca del río Mauri está en el rango de 300 a 500 mm/año. A lo largo del río Desaguadero aguas abajo de Calacoto, la precipitación media anual es del orden de 300 a 400 mm/año. La variación interanual es muy grande y el riesgo de sequías es alto. La figura 2.4 muestra el mapa de isoyetas anuales para el periodo 1960-2003. El régimen de precipitaciòn es monomodal, con una época lluviosa entre diciembre y marzo. En un estudio anterior (Molina et al, 2007), se puede encontrar una descripción amplia del comportamiento de las principales variables climáticas.

En la parte poblada de la cuenca del río Mauri, entre los 3800 y 4500 m, la temperatura media anual varía en el rango de 2 a 8° C, con valores máximos medios de 5 a 17° C y mínimos medios anuales de -10 a –3° C. La principal variable que influye sobre la temperatura es la altitud. En las cumbres más altas, que superan los 6000 m, la temperatura media anual puede caer por debajo de -12° C. El gradiente térmico altitudinal está en el rango de 0.85 a 0.9° C por cada 100 m, un valor alto y por encima de la media regional. En la zona habitada de la cuenca del río Mauri la frecuencia de heladas es superior a 150 días al año.

La evapotranspiración potencial (ETP) media en la cuenca del río Mauri está en el orden de 1100 a 1500 mm/año. A lo largo del río Desaguadero, la ETP medial anual es de 1300 a 1400 mm/año, pero en algunos sectores de la cuenca de este río alcanza valores de 1800 mm/año. La figura 2.5 muestra el mapa de isolíneas de ETP media anual del área de estudio.

Figura 2.4: Isoyetas medias anuales en el área de estudio, 1960-2003

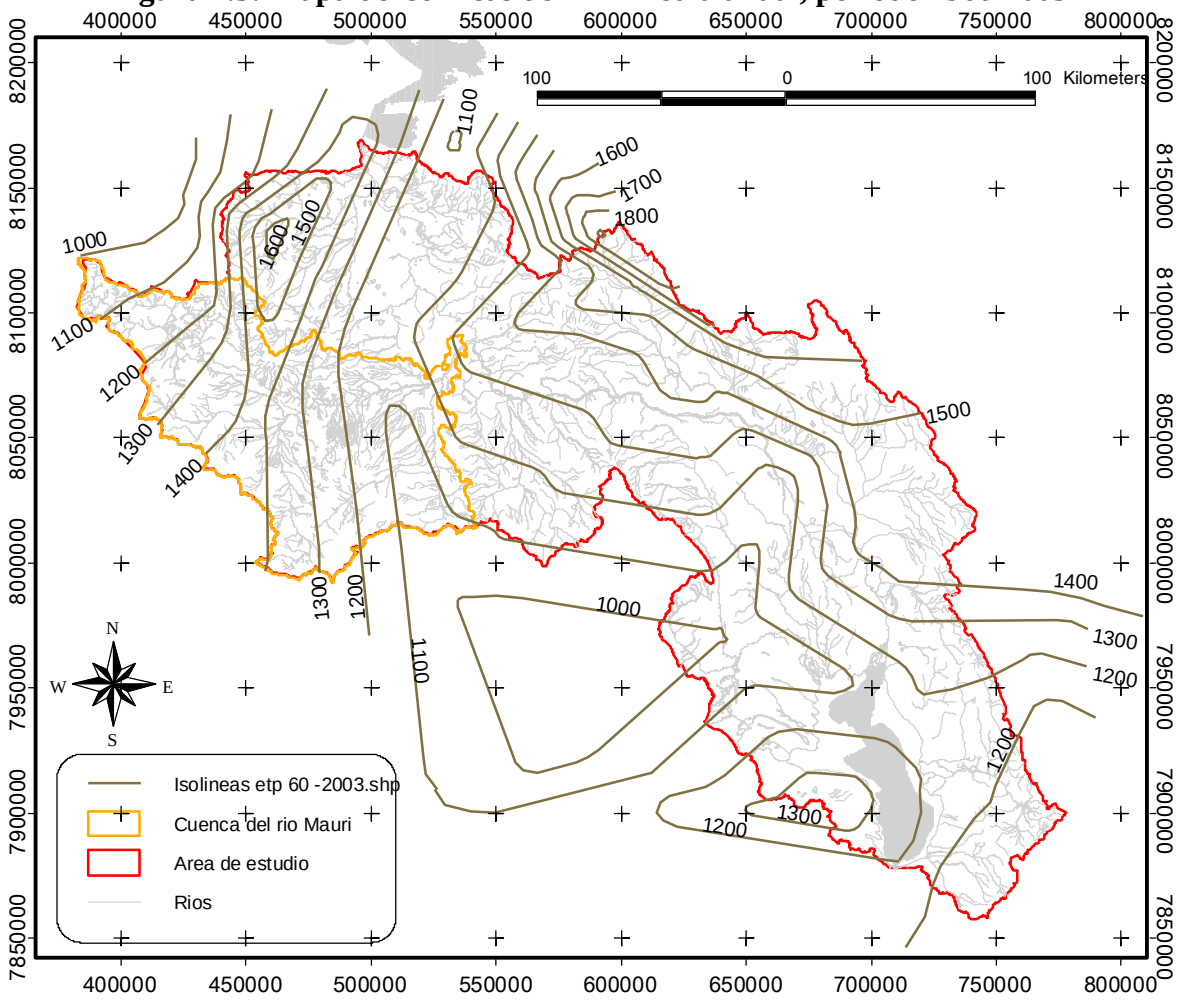


Fuente: Molina et al (2007) Proyección: UTM, Datum: WGS 1984-Bolivia, Zona 19 S

2.1.2 Geología y suelos

El Altiplano es una unidad fisiográfica resultado del relleno de una fosa tectónica, cuyos orígenes se remontan al cretácico. La evolución de la cuenca del Altiplano ha sido muy dinámica, con cambios asociados al clima y el vulcanismo. Durante el cuaternario, la evolución del altiplano estuvo ligada fundamentalmente a los cambios de clima. La alternancia de períodos húmedos y secos, cálidos y fríos, se asocia al desarrollo de lagos más grandes o más reducidos que los actuales según la época. A estas situaciones hidrológicas corresponden diferentes depósitos que van desde morrenas glaciares en las cordilleras, a sedimentos fluviales entre el pie de monte y la planicie, y a formaciones lacustres y evaporíticas en la parte central de la llanura altiplánica (ALT, 2001).

Figura 2.5: Mapa de isolíneas de ETP media anual, periodo 1960-2003



Fuente: Molina et al (2007) Proyección: UTM, Datum: WGS 1984-Bolivia, Zona 19 S

La Cordillera Occidental que forma el límite oeste del Altiplano y donde está situada la cuenca del río Mauri es volcánica. Se observa que en esta cuenca predominan rocas volcánicas, con pequeños sectores con presencia de depósitos cuaternarios no consolidados y al noreste, areniscas y arcillas. En cambio, a lo largo del río Desaguadero predominan depósitos cuaternarios. Desde el punto de vista geomorfológico, en la cuenca del río Mauri predominan las montañas volcánicas de formas redondeadas y las mesetas de lavas e ignimbritas. En cambio, a lo largo del río Desaguadero predominan las terrazas y llanuras fluvio-lacustres.

Los suelos en general son poco desarrollados debido a que se han formado sobre laderas de colinas y serranías, donde los procesos de remoción son continuos, y no permiten la formación de horizontes; por consiguiente son poco profundas. Así mismo, en los fondos de valles o planicies, los suelos no han tenido tiempo de desarrollar, debido a su edad (Formado sobre materiales recientes del cuaternario), o en algunos casos están afectados por problemas de inundaciones o aportes coluviales. El clima frío reinante y la escasez de lluvias, tampoco favorecen la evolución de estos (Orsag et al. 2007).

En las montañas y serranías con laderas empinadas, los suelos pertenecen en su mayoría a las Tierras no Arables y Marginales con limitaciones de uso (Poca profundidad, presencia de piedras y afloramientos rocosos y baja fertilidad natural), clima (Heladas y déficit hídrico) y erosión (Por textura y pendiente). Por consiguiente los suelos son más aptos para forestación, pasturas y áreas de recreación y conservación o en caso de utilizarse para la producción de alimentos, requieren la implementación de prácticas de conservación de suelos como terrazas, barreras muertas y vivas, etc. (Orsag et al. 2007).

A lo largo del río Desaguadero, la geomorfología ha influido en las características de los suelos, lo que a su vez se relaciona con los patrones de cultivo. Según el informe de Fund–Eco (citado por Villaroel y Pérez, 2007), en la zona de estudio se pueden distinguir 3 unidades:

- Suelos desarrollados sobre depósitos aluviales, se encuentran en su mayor parte en las márgenes del río Desaguadero, entre las localidades de Calacoto y Chuquiña donde el cauce del río está limitado a su lecho. Suelos con bajo contenido de materia orgánica (< 1.8%), un alto porcentaje de arena y mediana a fuertemente alcalinos.
- Suelos desarrollados sobre llanuras de inundación. Se encuentran a partir de Chuquiña, donde el río se divide en dos brazos. Varían de neutro a fuertemente alcalinos en tanto que los valores de salinidad son muy altos en la llanura de inundación comprendida entre los brazos del río. La textura es arcillo limosa.
- Suelos desarrollados sobre depósitos aluvio lacustres, deben su origen a depósitos aluviales, pero a diferencia de los suelos de la categoría anterior, subyacen sobre material con enriquecimiento de materia orgánica. Las zonas representativas de esta unidad se encuentran en las localidades de Challacollo, Toledo, Pumanchalla, Choro y Huancaroma, en las que predominan las clases texturales franco arcillosas con aptitud para labores agrícolas. Se trata de un área con fuertes problemas de salinidad donde prosperan especies vegetales tolerantes.

A lo largo del río Desaguadero se puede encontrar suelos afectados por la acumulación paulatina de sales/sodio, debido al clima semiárido, baja precipitación, evapotranspiración, suelos formados sobre sedimentos fluvio-lacustre finos y salinos (Lago Ballivián), que favorecen por capilaridad la acumulación de sales o sodio en las capas superficiales del suelo y su escaso lavado hacia las capas inferiores. Actualmente y debido a los procesos mencionados, los suelos de amplias áreas del Altiplano Central (Cuenca media y baja del Desaguadero), se están degradando y las praderas nativas están siendo reemplazadas por otras especies como el antobrium y kotales, especies que no son aptas para el ganado o se están convirtiendo en eriales (Orsag et al. 2007).

2.1.3 Vegetación y Uso del Suelo

En la cuenca del río Mauri por debajo de los 4500 m, se presenta una vegetación rala de pastos y arbustos alto-andinos. En las cumbres existen bosques ralos de Polylepis. Gran parte de la cuenca comprende de paisajes predominantes de afloramientos rocosos (ALT, 2001). Los bofedales representan del 1.2 a 2% de la superficie de esa cuenca. Es una vegetación importante para la ganadería camélida como llamas y alpacas. Un bofedal (ver figura 2.6) es un humedal de altura, ecosistema presente en zonas agroecológicas de puna seca. “Es

considerado una pradera nativa poco extensa con humedad permanente, vegetación siempre verde y de elevado potencial productivo" (Alzérreca, 2001, citado por Flores, 2002). La importancia de este ecosistema radica en que posee vegetación durante todo el año y se constituye en la base de la ganadería de la zona. También alberga una variedad de aves, otros animales y especies vegetales típicas del área.

Figura 2.6: Bofedal en la cuenca del río Mauri

Fuente: Equipo de proyecto

Existen otros tipos de ecosistemas como la puna húmeda, puna seca, praderas naturales, chillihuares y tolares, que albergan diferentes variedades de plantas, entre las que se pueden citar: Stipa sp, Festuca sp, Calamagrostis sp, Muhlenbergia sp, Bouteluoa sp, "garbancillo" Astragalus sp, "kishuara" Budleia sp, la "kehuiña" Polylepis sp y Selaginella sp. Con la excepción de los bofedales, esos ecosistemas se encuentran también en la cuenca del Bajo Desaguadero.

En las provincias Aroma y Gualberto Villarroel de La Paz y Cercado, Tomas Barrón y Saucarí del departamento de Oruro, existen varios sistemas de riego tradicional que utilizan las aguas del río Desaguadero para riego de forrajes (alfalfa), papa, cebolla, haba y otros cultivos. El riego es ante todo complementario. El área bajo riego ya supera las 9000 hectáreas y continúa expandiéndose.

2.1.4 Hidrología y calidad de aguas

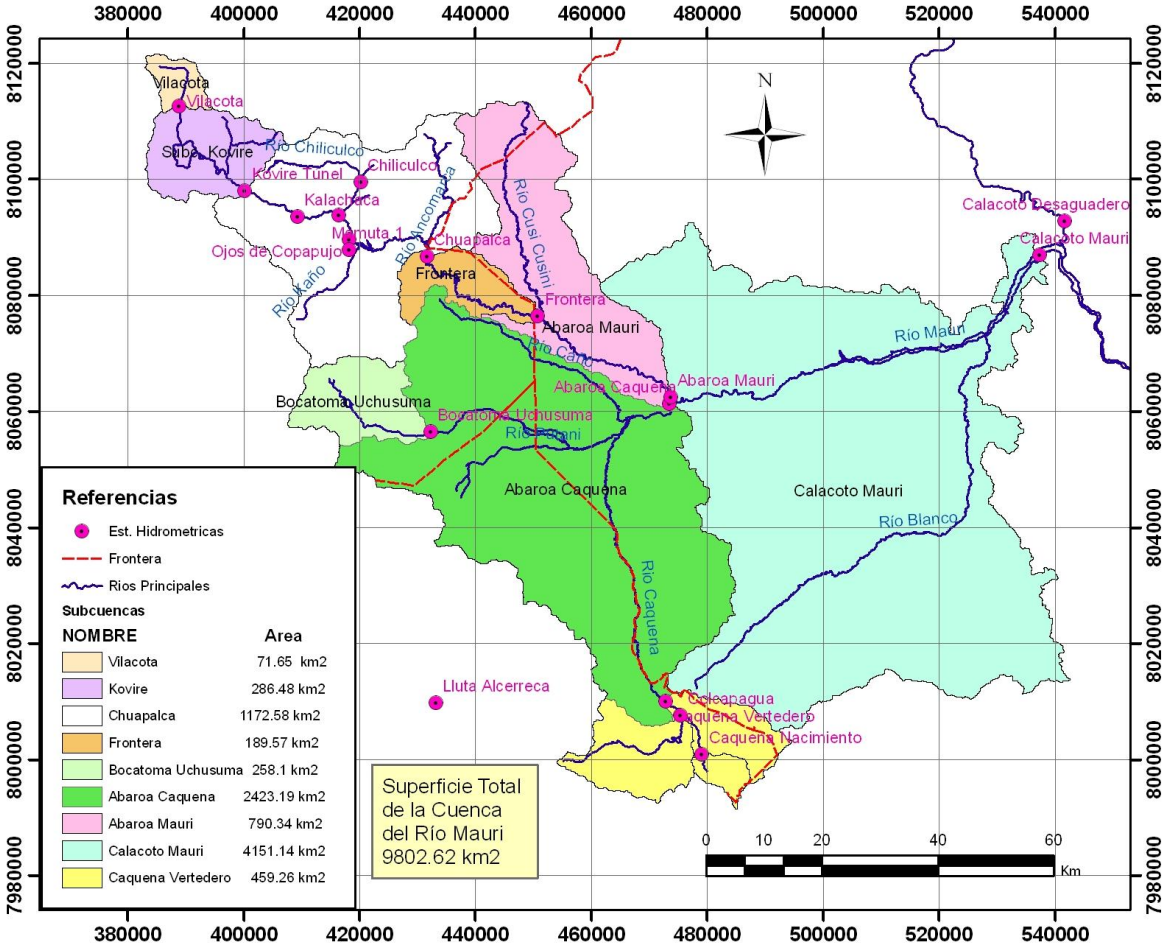
El río Mauri o Maure nace a 4800 m en el extremo noroeste de la cuenca (ver figura 2.7) y en territorio peruano. El curso más largo recibe el nombre de río Quilvire y se origina al pie del nevado Larjanco. Después de un corto recorrido ingresa a la laguna Vilacota, de la que es su principal afluente. Seis km más abajo del punto de salida de esa laguna, recibe por su margen izquierda al río Ancoaque, que lleva más caudal y del que adopta el nombre por un trayecto corto. Aguas abajo y antes de la confluencia con el río Chiliculco, el río recibe por su margen derecha el aporte de varios manantiales termales de origen volcánico, cuyas aguas tienen un alto contenido de boro y arsénico. Después de recibir varios afluentes (ríos Chiliculco, Kaño,

Kallapuma y Ancomarca y manantiales como el de Copapujo), el río Mauri cruza la frontera peruano-boliviano. Apenas 1 km aguas abajo de la frontera, recibe por su margen izquierda al río Cusi Cusini y 30 km más abajo, en el sector de Abaroa, confluye con el río Caquena, que drena una cuenca más grande que la del río Mauri.

El río Mauri continúa en dirección Este siguiendo un curso encajonado, recibiendo varios cursos de agua, como los ríos Vilcapalca o Tiquerani, Chaullani y Muru Aramaya por la margen derecha y los ríos Kankavi y Nasani por la margen izquierda. Nueve kilómetros más abajo del puente Rosario, el río Mauri recibe a su afluente más importante, el río Achuta o Blanco, que drena una extensa cuenca de la margen derecha. Desde la confluencia con el río Blanco hasta la confluencia con el río Desaguadero en Calacoto, el río Mauri discurre por la planicie altiplánica siguiendo un curso de suave pendiente. Su cauce se hace muy ancho y poco profundo y las márgenes a ambos lados están sujetas al riesgo de inundaciones.

La figura 2.7 muestra las subcuencas en que se subdividió la cuenca del río Mauri, según la estación hidrométrica que las controla. Se muestran también estaciones no utilizadas en el presente estudio. La superficie total de aporte hasta un punto de control se obtiene sumando la superficie de las subcuencas situadas aguas arriba de ese punto.

Figura 2.7: Subcuencas por estaciones hidrométricas de la cuenca del río Mauri



Fuente: Elaboración propia

La tabla 2.1 muestra el área de aporte en cada estación, obtenida de la forma descrita, así como los caudales medios anuales y caudales específicos, para esas subcuencas. Para las tres estaciones ubicadas sobre el río Desaguadero se muestran los caudales medios anuales en m3/s.

Tabla 2.1: Caudal específico y lámina de escurrimiento anual en la cuenca del río Mauri caudal del río Desaguadero, periodo 1965-08

No.	Subcuenca - Estación Hidrométrica	Rio	Area [Km^2]	Q [m^3/s]	Caudal especifico [l/s-km^2]		Lam. Escurr. Anual [mm]	
					Cuenca	Intercuenca	Cuenca	Intercuenca
1	Vilacota	Quilvire	72	0.355	4.9		156	
2	Kovire	Mauri	358	0.584	1.6	0.8	51	25
3	Chuapalca	Mauri	1532	3.071	2.0	2.1	63	67
4	Frontera	Mauri	1722	3.833	2.2	4.0	70	126
5	Abaroa Mauri	Mauri	2511	4.806	1.9	1.2	60	39
6	Caquena Vertedero	Caquena	459	1.560	3.4		107	
7	Bocatoma Uchusuma	Uchusuma	258.1	**0.844**	3.3			
8	Abaroa Caquena	Caquena	3141	2.385	0.8	0.0	24	0
9	Calacoto Mauri	Mauri	9804	16.078	1.6	2.1	52	67
10	Calacoto Desaguadero	Desaguadero		40.027				
11	Ulloma	Desaguadero		60.666				
12	Chuquiña	Desaguadero		73.419				

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tabla 2.1 evidencian grandes diferencias entre subcuencas. Las nacientes de los ríos Mauri y Caquena (subcuencas Vilacota y Caquena Vertedero) presentan los valores de caudal específico (4.9 y 3.4 litros/seg-km2, respectivamente) y lámina de escurrimiento (156 y 107 mm) más altos de toda la cuenca. En el otro extremo, las intercuencas de Kovire y Abaroa Caquena presentan caudales específicos muy bajos (0.8 y 0.0 litros/seg-km2, respectivamente). El valor de la intercuenca se debe sin duda a las extracciones para trasvase y las tomas para riego de bofedales. Para el conjunto de la cuenca del río Mauri en la estación de Calacoto, el caudal específico es de 1.6 l/s-km2 y la lámina de escurrimiento es de 52 mm, valores que están ligeramente por debajo de los correspondientes a la cuenca del río Desaguadero (Roche et al, 1992).

A partir de la confluencia con el río Mauri, el río Desaguadero sufre cambios morfológicos significativos. Su pendiente aumenta con respecto al tramo aguas arriba de Calacoto, y con ello, su velocidad de flujo. Se observa también que el tamaño medio del material del cauce del río Desaguadero se incrementa, debido a los aportes de sedimentos más gruesos, provenientes sobre todo del río Blanco.

En las cercanías de la población de La Joya (ver figura 2.3), inmediatamente aguas abajo de la estación hidrométrica de Chuquiña, el río Desaguadero se divide en dos brazos. Sobre el brazo izquierdo se encuentra el lago Uru Uru y prácticamente todos los sistemas de riego importantes del Bajo Desaguadero. Debido a diversos problemas, como la sedimentación, el caudal que fluye por el brazo izquierdo tiende a disminuir con el tiempo. Se estima que actualmente representa en promedio entre un 30 y 40% del caudal del río en Chuquiña.

Los dos brazos principales se subdividen a su vez en múltiples canales que desembocan, en último término, en el lago Poopó. Este lago poco profundo tiene como fuente de alimentación principal al río Desaguadero y es por tanto, muy sensible a las variaciones interanuales del caudal de este río. El lago Poopó es considerado un lago terminal, que en periodos secos, como en la década del 90, llegó a desaparecer casi por completo. Además recibe cargas importantes de efluentes mineros que ingresan ante todo por el sector noreste. Sin embargo, aún sostiene una fauna importante y tiene efectos reguladores sobre el clima de la región. Estudios recientes (Pillco y Bergsson, 2007) muestran que el lago Poopó es muy sensible a posibles cambios que impliquen una reducción de las entradas de agua, como por ejemplo una reducción del caudal del río Desaguadero o una disminución de la precipitación en el Altiplano.

Aunque el contenido de sales de las aguas del Mauri es considerablemente menor (≈0.5 g/l) que las del Desaguadero en Calacoto (1.83 g/l), las aguas del Mauri presentan concentraciones altas de boro (23 mg/l en Calachaca) y arsénico (5 mg/l en Calachaca) en el sector peruano del río, de origen natural (por lixiviación). La presencia de esos elementos provoca que las aguas del Mauri no sean aptas para consumo humano o animal. Quintanilla et al (1995) también detectan concentraciones altas de arsénico (0.6 a 0.8 mg/l) en el sector del río Desaguadero aguas abajo de la confluencia con el Mauri (pero no aguas arriba). De todas maneras esas aguas son usadas para riego. Aún cuando no se han identificado fuentes importantes de contaminación de origen antrópico, un estudio de calidad debe considerar esa posibilidad.

2.1.5 Aspectos socioeconómicos

Además de una baja densidad poblacional, la cuenca del río Mauri presenta un bajo nivel de vida y de ingresos, muy inferiores al promedio de Bolivia y Perú. Las tasas de crecimiento poblacional también han sido inferiores al promedio nacional e incluso negativas, como consecuencia de la migración extra e interregional, que se incrementó con la ocurrencia de sequías como la del año 1982-83 (ALT, 2003).

Una evaluación de los niveles de educación y de la infraestructura de servicios identificó (ALT, 2003): a) tasas de analfabetismo en el área rural relativamente elevadas, que se estima fueron reducidas significativamente en los últimos años; b) infraestructura de saneamiento básico, energía y salud es insuficiente. La mayor parte de los hogares no cuenta con uno o varios servicios básicos, especialmente en el área rural.

Las principales vías de acceso son la carretera La Paz – Charaña en Bolivia y la carretera Tacna – Capaso en Perú. En el sector boliviano existen además la denominada carretera La Paz – TholaKollo – Hito IV, que se une al tramo peruano para llegar a Tacna y el ferrocarril La Paz-Charaña-Arica, que no está en funcionamiento, aunque está en proceso de rehabilitación. Existen caminos vecinales conectados a esas vías principales.

La ganadería es la actividad que concentra a la mayor parte de la población económicamente activa. Por las limitaciones climáticas (baja temperatura, heladas, sequías) la agricultura se reduce a superficies pequeñas donde se cultiva papa amarga. La actividad ganadera se desarrolla aprovechando la presencia de bofedales. Se cría principalmente llamas, alpacas y

ovinos. Una parte de la producción pecuaria es procesada para elaborar quesos o lana y es vendida en las ferias rurales y ocasionalmente es llevada fuera de la región.

El comercio (particularmente el informal) representó también una importante actividad, especialmente en el sector de Charaña, aprovechando la condición de triple frontera de la región. Sin embargo, por diversos factores esta actividad ha disminuido en magnitud en años recientes y muchos comerciantes se han trasladado a otros sectores fronterizos donde las condiciones son más favorables.

Las condiciones son diferentes en la cuenca del río Desaguadero, donde existen extensos sistemas de riego que aprovechan las aguas de ese río (y del río Mauri) y donde existen sistemas de producción agroindustrial relativamente desarrollados, mejor acceso a los centros urbanos de consumo y en general, una mejor infraestructura de transporte y comunicaciones. De manera general, la densidad poblacional y los ingresos familiares se van incrementando desde la cuenca del Mauri hacia el sur en el departamento de Oruro.

2.2 LOS PROYECTOS DE TRASVASE

2.2.1 Aspectos históricos

El primer proyecto conocido para extraer y trasvasar aguas de la cuenca del río Mauri hacia la cuenca del Pacífico es del año 1867, en que un señor Hugues obtuvo autorización del gobierno peruano para construir un canal que llevase 3000 pies cúbicos por minuto (1400 lit/seg) desde el río Uchusuma, un afluente (ver figura 2.7). El canal fue construido, pero al parecer el caudal que efectivamente transportó fue muy inferior al previsto. En 1876 un ingeniero de apellido Kruger, elaboró planes para desviar 5000 litros/segundo de aguas del Mauri y de sus afluentes, con destino al valle de Tacna, que no se hicieron realidad (Jemu, 2002).

Como consecuencia de la Guerra del Pacífico (1879-81) Chile quedó en posesión de los territorios peruanos de Arica y Tacna. Entre 1912 y 1913, el gobierno chileno, empeñado en consolidar su soberanía en la región conquistada, perfeccionó el proyecto del ingeniero Kruger. En 1919 se organizó en Santiago de Chile, la Compañía industrial y Azucarera de Tacna, la que obtuvo autorización del Gobierno chileno para desviar el Mauri hacia dicho valle. Enterado el gobierno de Bolivia, formuló sus reservas y objetó ese desvío. Sin embargo, se construyeron obras que permitieron incrementar el caudal trasvasado desde el río Uchusuma.

Como consecuencia del tratado de 1929 entre Perú y Chile, Tacna retornó a soberanía peruana. En años posteriores, la República del Perú amplió y consolidó el trasvase del río Uchusuma hacia el valle de Tacna, mediante la mejora de los canales y túneles, y la construcción de la represas Paucarani y Condor Pico, que permiten almacenar y regular las aguas de la cabecera de ese río. Se abandonó el antiguo canal Uchusuma, que captaba las aguas provenientes de la parte alta del río Uchusuma en el lugar denominado Ancochaullane. Actualmente se usa el nuevo canal Uchusuma (denominado también Canal Azucarero), situado a una cota más baja que permite captar y transportar más agua. Del río Uchusuma se capta un caudal promedio de 766 lit/seg, incluyendo los aportes de los embalses Paucrani y Condor Pico, mediante una obra

denominada Bocatoma Uchusuma. El Uchusuma es un río de curso sucesivo, que nace en Perú, cruza territorio chileno en un tramo corto e ingresa a Bolivia cerca de la población de Charaña. Forma parte de la cuenca del río Caquena, un afluente por la margen derecha del río Mauri.

En los siguientes años se construyeron otras obras que permitieron incrementar aún más el caudal trasvasado hacia Tacna:

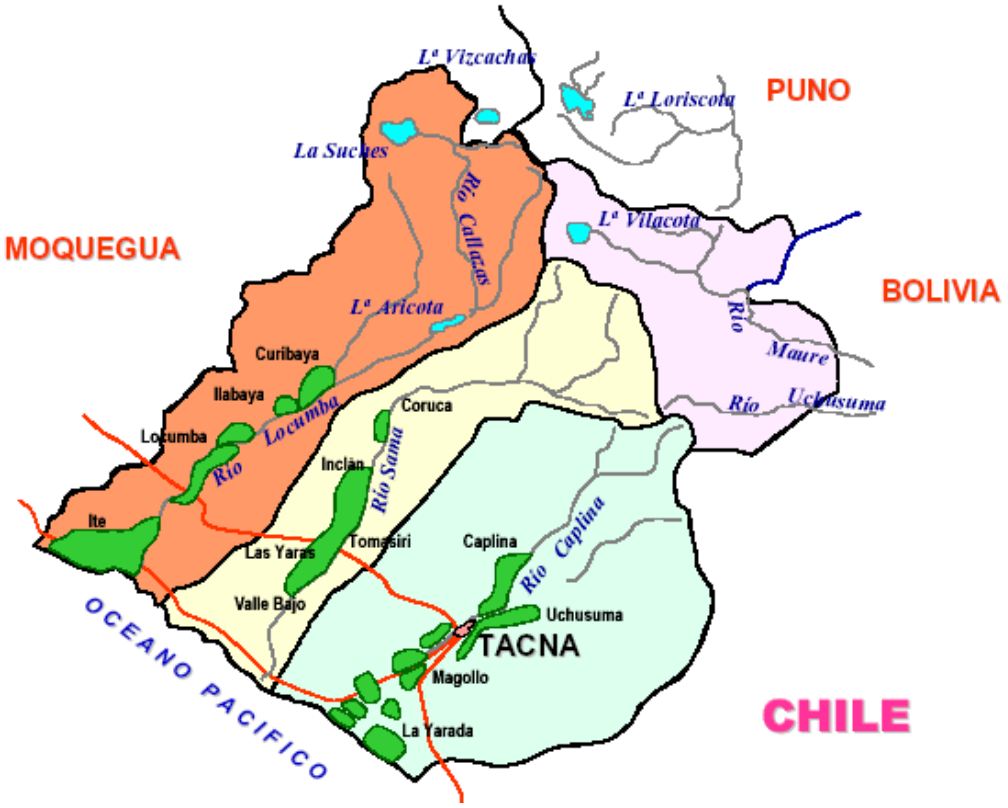
a) El canal Patapujo, que colecta los recursos de la laguna Casiri y varias quebradas (las más importantes son las quebradas Iñuma y Casillaco), que son afluentes directos del río Mauri. En conjunto se capta un promedio de 230 lit/seg (PET, 2011), aunque en el punto de control al final del canal se registran solamente 165 l/s. La diferencia es atribuible probablemente a las pérdidas a lo largo del canal. Este canal se une al actual canal Uchusuma.
b) Los pozos de aguas subterráneas de El Ayro ubicados en la misma subcuenca, que fueron construidos el año 1977, entraron en operación gradualmente y produjeron un promedio estimado de 314 lit/seg durante el periodo reciente 2004-08.

Los recursos hídricos de las tres fuentes mencionadas, que suman un caudal promedio de 1234 lit/seg, se trasvasan mediante el canal Uchusuma hacia la vertiente del Pacífico. Después de atravesar dos túneles, General Lagos y Huaylillas Sur, se descargan en la quebrada Vilavilani, afluente del río Caplina, que llevan esas aguas hasta el valle de Tacna, para abastecimiento de la ciudad y para riego en el valle. La figura 2.8 muestra las cuatro cuencas en que se divide el departamento de Tacna, la ciudad y poblaciones más importantes, así como las áreas de riego (en verde) de la cuenca del Pacífico. La parte de la cuenca del Mauri situada en Tacna se muestra en color rosado. Es el único sector del departamento que pertenece a la cuenca del Altiplano.

En 1996 empezó a funcionar el túnel Kovire que trasvasa aguas de las cabeceras del río Mauri hacia las cuencas de los ríos Locumba y Sama (figura 2.8). El túnel Kovire tiene una capacidad de 10000 lit/seg, pero en promedio ha transportado un caudal de solamente 550 lit/seg, 380 lit/seg provenientes del rio Mauri y el resto de los acuíferos subterráneos que atraviesa el túnel.

En varias ocasiones el Gobierno boliviano ha solicitado información y hecho observaciones sobre esos proyectos. Por ejemplo en nota de febrero de 1962, el "Gobierno boliviano se anticipa en expresar al ilustrado gobierno del Perú, que en forma invariable, ha sostenido, primero que la utilización de las aguas de un río sucesivo no debe perjudicar a las intereses de los propietarios del curso inferior y, segundo, que el caudal de un río internacional no debe ser alterado trasladando aguas de la cuenca geográfica que es la usufructuaria y acreedora natural de dicho recurso, hacia otra cuenca geográfica diferente". La respuesta a esa nota indica que "el Perú, fiel cumplidor de sus compromisos internacionales, procederá en este punto, como en todo, ajustándose a derecho y, en el caso del Río Mauri, dentro de la cordialidad fraterna que tradicionalmente lo liga a Bolivia”.

Figura 2.8: El departamento de Tacna y sus cuencas de abastecimiento de agua



Fuente: PET, 2006

Es decir, el Perú acepta formalmente que se aplica la Declaración de Montevideo[1], pero ha continuado con los estudios y construcción de obras hidráulicas. Tampoco otorgó ninguna compensación por los serios impactos ambientales y sociales que la extracción de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Uchusuma provocó en Bolivia. Entre esos impactos se incluye la desaparición de 580 hectáreas de bofedales en el sector de Charaña, que dependían de las aguas de ese río. Este impacto provocó a su vez que toda la población boliviana que dependía de esos bofedales para alimentar su ganado, tuviese que abandonarlos y emigrar a otras zonas. Pese a sus reclamos (Paredes, 1999), los afectados no fueron compensados por sus pérdidas y ni siquiera se plantearon medidas de mitigación que permitiesen salvar al menos parte de esos bofedales, como por ejemplo dejar un caudal mínimo en el río.

Tanto la cuenca del río Mauri como la del Bajo Desaguadero, quedaron bajo jurisdicción de la Autoridad Binacional del sistema de los lagos Titicaca, Poopó, río Desaguadero y Salares (ALT), que se estableció el 15 de junio de 1993 con un intercambio de Notas Reversales entre Bolivia y Perú. Uno de los objetivos de la ALT fue poner en ejecución el "Plan Director Global binacional de protección-prevención de inundaciones y aprovechamiento de los recursos

[1] *Declaración de* Montevideo: "Los estados tienen el derecho de aprovechar para fines industriales o agrícolas, el margen que se encuentra bajo su jurisdicción, de las aguas de ríos internacionales. Ese derecho, sin embargo está condicionado en su ejercicio por la necesidad de no perjudicar al igual derecho que corresponde al Estado vecino en el margen de su jurisdicción".

hídricos del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y salar de Coipasa", resultado de un estudio financiado por la Unión Europea. Entre otros aspectos importantes, el estudio estableció que se podía extraer y usar un caudal promedio de 20 a 25 m3/s del sistema Titicaca-Desaguadero sin afectar sensiblemente el equilibrio del sistema hídrico ni de los ecosistemas relacionados. Por el régimen de condominio, ese caudal debe repartirse en partes iguales entre los dos países, por lo que cada país puede consumir hasta un máximo de 12.5 m3/s.

Sin embargo y de acuerdo a la ALT (R. Zuleta, codirector de la ALT, en declaraciones al periódico El Deber, 2004), en esos 10 a 12.5 m3/seg no se incluyen los caudales que ambos países ya extraían antes de la firma de los acuerdos, como los de la cuenca del Uchusuma. Más aún, al parecer el gobierno regional de Tacna asume que los caudales adicionales a extraer de la cuenca del Mauri no están contemplados en los 12.5 m3/s que corresponden a Perú, por lo que el aprovechamiento de las aguas de ese río debería ser objeto de un acuerdo aparte.

Se tiene muy poca información sobre el uso de las aguas de la cuenca del Mauri por parte de Chile. Después de los tratados de 1904 con Bolivia y de 1929 con Perú, Chile quedó en posesión de la parte alta de la cuenca del río Caquena. Bazoberry (2002, 2005) afirma que Chile extrae un caudal de 2 m3/seg del río Caquena y lo trasvasa al Valle de Lluta, en la cuenca del Pacífico. Las obras de trasvase del Caquena se habrían iniciado en la década del 60. Las obras de captación se localizarían muy cerca de la confluencia del río Colpacagua con el Caquena (ver figura 2.7) 25 km más arriba del punto donde el río ingresa a Bolivia. Esas aguas serían derivadas mediante un canal de 13 km de longitud y un túnel de 6 km que atraviesa la Cordillera y que permite descargar el agua trasvasada al río Colpitas, un afluente del río Lluta, en la provincia de Tarapacá. Debido a ese trasvase, varios bofedales de la parte baja del río Caquena, en territorio boliviano, habrían sido afectados, perdiendo parte de su superficie.

Durante la presente investigación no se pudo verificar que Chile esté efectivamente trasvasando aguas del Caquena hacia la cuenca del Pacífico, principalmente porque no se pudo concretar una visita al sector chileno de la cuenca. Las imágenes de satélite permiten observar que hay varias obras de captación (tomas) a lo largo del río Caquena, pero no se pudo identificar canales o túneles de trasvase (en cambio los túneles y canal Uchusuma se identifican con toda claridad). Una de esas tomas se halla próxima a la ubicación mencionada por Bazoberry y a la estación hidrométrica de Vertedero Caquena (figuras 2.7 y 2.9), cuyo nombre mismo sugiere que es una obra de captación. Los datos de caudal en esa estación (ver tabla 2.1 y el estudio de Hidrología y Recursos Hídricos) indican que no es posible derivar un caudal de la magnitud sugerida por Bazoberry. La información que se dispuso a la fecha del presente estudio, hace suponer que casi todas las tomas identificadas en las imágenes sirven para proveer de agua a áreas situadas dentro de la misma cuenca, principalmente para riego de bofedales. Existen tomas no solamente en el tramo chileno del río Caquena, sino también en el río Putani, un afluente del Caquena.

Figura 2.9: Estación hidrométrica Vertedero Caquena (al centro de la fotografía)

Fuente: Google Earth

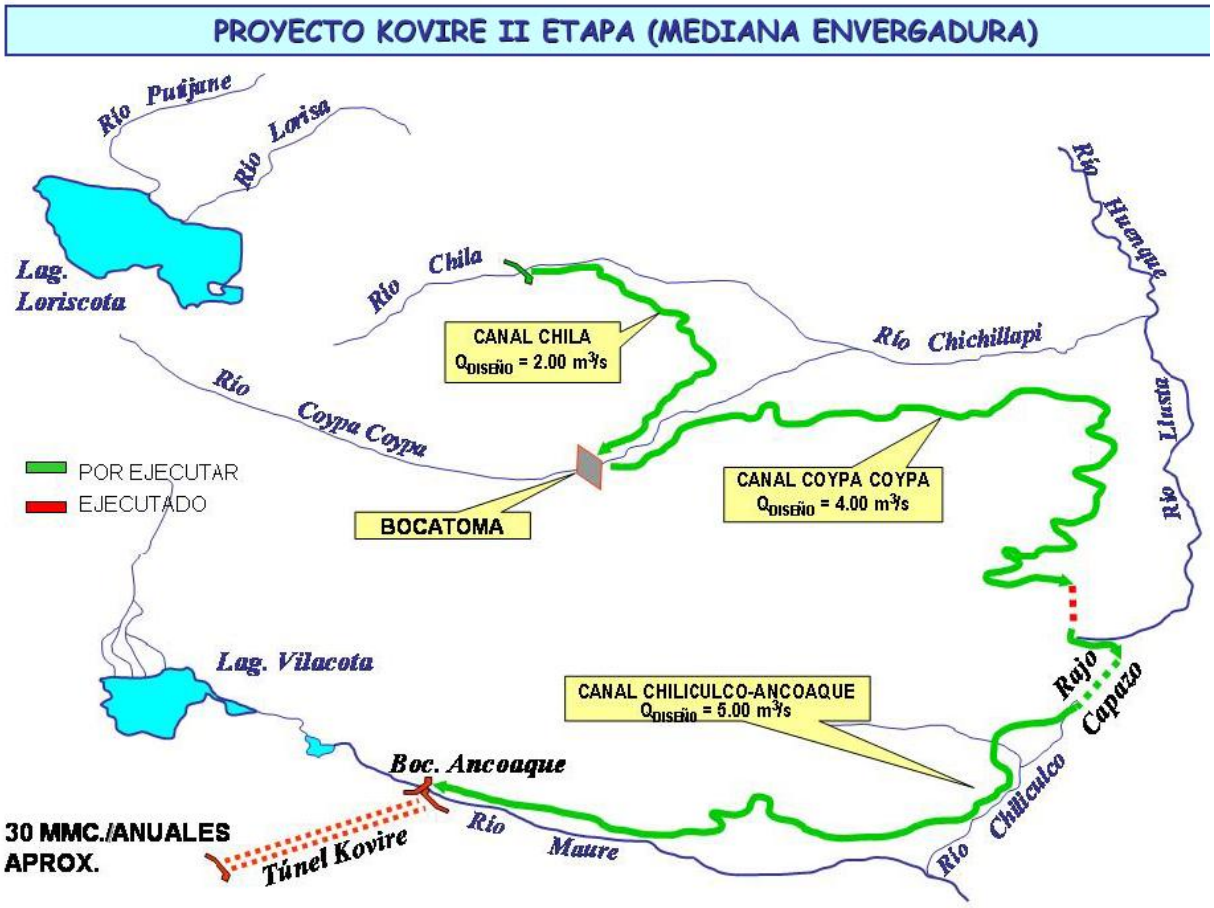
2.2.2 Situación actual

De acuerdo a los datos mencionados en 2.2.1, el Perú extrae actualmente alrededor de 1600 lit/seg de la parte alta de la cuenca del río Mauri, y tiene proyectado extraer más en un futuro próximo. Sin embargo, la situación es compleja y los actores involucrados son más numerosos.

El caso del proyecto Kovire, que deriva aguas del Mauri hacia la laguna Aricota de la cuenca de Locumba (ver ubicación en la figura 2.8), es paradigmático. El túnel tiene una capacidad de 10 m^3/seg, mucho más grande que los 0.38 m3/seg (380 lit/seg) que se captan en la bocatoma Kovire, situada al inicio del túnel. Esta subutilización tiene varias causas:

- La bocatoma Kovire estaba proyectada para captar todo o casi todo el caudal que lleva el río Mauri en ese punto, es decir 580 lit/seg (ver tabla 2.1), pero los comunarios peruanos de la zona se opusieron. Los argumentos fueron contundentes: las aguas de excelente calidad de Kovire se mezclan aguas abajo de la bocatoma con las aguas geotermales proveniente de las borateras Putina, que tienen alto contenido de boro y arsénico y son, por tanto, tóxicas. El efecto de dilución de las aguas de Kovire es vital para los bofedales existentes en ese tramo y por tanto, para el ganado camélido de los comunarios que se alimenta de esos bofedales. El conflicto llegó hasta el punto de que los comunarios tomaron las obras hidráulicas e interrumpieron el flujo de agua por el túnel en diciembre de 1997. El Gobierno Regional de Tacna se vio obligado a firmar un acuerdo por el que debe dejar pasar río abajo un caudal mínimo.

Figura 2.10: Proyecto Kovire



Fuente: Sáez, 2005

- El proyecto Kovire incluía la captación y trasvase de las aguas de varios pequeños afluentes de la cabecera del río Huenque (ver figuras 2.8 y 2.10). El río Huenque es el principal afluente del río Ilave, a su vez uno de los tres principales afluentes del Titicaca, por lo que cualquier extracción debería contabilizarse como parte del caudal máximo de 12.5 m3/s que puede usar Perú según el régimen de condominio. El problema se complica porque esos pequeños afluentes están ubicados en el departamento de Puno (no son jurisdicción de Tacna), cuyas autoridades se han opuesto firmemente a cualquier trasvase de la cuenca del Huenque, porque entienden que perjudica al departamento y los pobladores de la región. El proyecto original preveía derivar 600 lit/seg de los ríos Putijane y Lorisa, 1100 lit/seg de los ríos Chila y Coypa Coypa, 300 lit/seg del río Chilliculco (que es un afluente del Mauri), lo que unido al caudal captado en bocatoma Kovire, da un total de 2300 lit/seg que llevaría el túnel en su inicio. Sin embargo, estudios posteriores descartaron o suspendieron las obras de los ríos Putijane y Lorisa y disminuyeron el caudal que se esperaba captar de los otros ríos. En su versión más reciente (ver figura 2.10), los estudios de ingeniería esperaban captar un caudal medio de alrededor de 1000 lit/seg de esos afluentes, sujeto a un acuerdo con Puno.

Incrementar los caudales trasvasados hacia la costa del Pacífico siempre ha sido objetivo del Gobierno Regional de Tacna. Para ello han elaborado y siguen elaborando estudios y

proyectos de obras hidráulicas, al mismo tiempo que extienden los canales existentes (ver figura 2.11) y amplían los embalses. Sin embargo, ese propósito ha tropezado con algunos problemas.

Figura 2.11: Canal Calachaca-Chuapalca-Patapujo

CANAL CALACHACA CHUAPALCA PATAPUJO

La obra de conducción más importante del Proyecto Vilavilani, la constituye el canal Calachaca – Huaylillas Sur, el cual captará las aguas del río Maure, y las conducirá hasta su descarga en la quebrada de Vilavilani, recibiendo en su recorrido los aportes por bombeo de los caudales regulados en las presas Chuapalca y Ancomarca (11,98 Hm3). El Canal Calachaca – Huaylillas Sur tiene una longitud total de 143.10 Km, ha sido dividido, para fines de implementación del Proyecto en tres tramos:

El tramo 1: Canal Calachaca – Chuapalca, se desarrolla desde la captación en el río Maure, hasta el empalme con la planta de bombeo que llega del embalse de Chuapalca, tendrá una capacidad de 1.00 m3/s y una longitud de 45.6 Km

El tramo 2: Canal Chuapalca – Uchusuma, que se desarrolla desde la descarga de la tubería de impulsión de la Planta de bombeo de Chuapalca, hasta su entrega al canal Uchusuma existente. Tiene una capacidad de 3.50 m3/s y una longitud de 48.1 Km. En dicho tramo ya se tiene construido hasta el año 2002 cerca de 37.82 Km. El canal cuenta además con 5 túneles de 3548.1 m. de longitud acumulada

Fuente: PET, 2003

Por ejemplo, el Proyecto Especial Tacna (PET) instaló sistemas para bombear aguas subterráneas de la cuenca de la laguna Vilacota (ver ubicación de la laguna en las figuras 2.8 y 2.10) y trasvasarlas a la cuenca de Locumba, con un caudal de 150 lit/seg. Esos pozos funcionaron entre marzo y octubre de 1994. Adicionalmente se pensó aprovechar aguas superficiales mediante un rajo (corte) a la salida de la laguna, que permitiría extraer otros 250 lit/seg. El argumento fue que esos caudales se" pierden" por evaporación en la laguna, por lo que la consecuencia de extraerlos sería una reducción de su superficie y volumen. De acuerdo a la información que se tiene, ninguno de esos proyectos está funcionando, probablemente por la oposición de los pobladores.

Las aguas geotermales que ingresan al río Mauri en el sector de las Borateras de Putina y en el sector de Kallapuma representan otro problema serio por su toxicidad y por tanto, porque limitan mucho el uso de las aguas de ese río para consumo, animal y riego. Abajo del punto de ingreso, la concentración media de boro en las aguas del río Mauri es de 12 mg mg/lt y de

arsénico de 2 mg/l (PET, 2006) valores muy superiores a los límites máximos recomendados por la OMS (B=0.3 mg/lt y As=0.05 mg/lt). Para superar este problema el PET ha realizado varios estudios y propuesto diversas alternativas, entre las que destacan: a) la derivación de las aguas geotermales por medio de un canal de evitamiento que las descargaría nuevamente al río Mauri aguas abajo de las futuras represas y cerca a la frontera con Bolivia, b) la construcción de lagunas y pozos de evaporación de capacidad suficiente para eliminar esas aguas geotermales, cuyo caudal medio se estima en 400 lit/seg.

El Instituto de Recursos Naturales (INRENA) del Perú ha realizado estudios de impacto ambiental de los proyectos de aprovechamiento y trasvase en la cuenca del Mauri, pero solamente para el sector peruano. No se han realizado estudios similares para el sector boliviano. Al parecer, la ALT es el organismo que debería asumir la responsabilidad de llevarlos a cabo, junto con un Plan de Gestión Integral del Agua en la cuenca.

Las buenas relaciones entre Perú y Bolivia y los acuerdos ya existentes sobre la cuenca del Titicaca, permiten al menos abrigar la esperanza de que el futuro aprovechamiento de las aguas del Mauri se realice también en el marco de un convenio binacional. En ese marco, las cancillerías de ambos países, en Acta de la Comisión de Asuntos Políticos Bilaterales, efectuada en Santa Cruz de la Sierra, los días 9 y 10 de febrero de 2003 accedieron a conformar una Comisión Técnica Binacional compuesta por técnicos de ambos países. Los objetivos iniciales de la Comisión fueron:

- Cuantificar el caudal original en el área de las obras construidas por el Perú.
- Evaluar la utilización prevista y sus posibles repercusiones sobre el caudal de agua que ingresa a Bolivia
- Determinar el monto máximo que pudiera utilizarse, para permitir que el caudal adecuado ingrese a Bolivia.
- Analizar la calidad del agua y niveles de contaminación debido a los componentes de boro y arsénico que registra el caudal original.

La Comisión realizó varias visitas de campo para realizar aforos y tomar muestras. Sin embargo, su trabajo se ha visto restringido por falta de recursos y porque no obtuvo ni dispuso de toda la información necesaria de los organismos responsables en cada país. Hasta diciembre 2007 no había emitido conclusiones y recomendaciones que respondiesen a los objetivos planteados.

No existen acuerdos sobre el uso de las aguas de cuencas compartidas entre Chile y Bolivia. El uso por parte de Chile de las aguas de varias de esas cuencas ha llevado a conflictos, que incluso desembocaron en el rompimiento de relaciones diplomáticas. Todo esto explica en parte que no se pudiera realizar una verificación en campo del posible trasvase de las aguas del río Caquena. Se conoce que existe extracción de agua para riego de bofedales en el sector chileno de la cuenca y se obtuvo información de caudales en tres estaciones hidrométricas. Con esta información se trabajó en el presente estudio.

Capítulo 3

ASIGNACIÓN DEL AGUA A NIVEL DE CUENCA: REPRESENTACIÓN Y MODELOS

3.1 LA ASIGNACIÓN DEL AGUA Y SU REPRESENTACIÓN

Los objetivos del presente estudio son evaluar el funcionamiento actual del sistema hídrico y el comportamiento futuro considerando los proyectos de aprovechamiento de los recursos hídricos de ambos países, como apoyo a la toma de decisiones. Esto incluye, como aspecto central, evaluar los impactos ambientales y sociales de las actuales y futuras obras de aprovechamiento de las aguas en la parte alta de la cuenca del río Mauri, sobre los usuarios aguas abajo que dependen de esas aguas. Por la necesidad de representar situaciones futuras o hipotéticas (análisis de escenarios) y por la gran cantidad de información que se esperaba manejar, se decidió recurrir a la modelación matemática.

La modelación matemática en el campo de los recursos hídricos parte del concepto de sistema. En un sentido amplio, un sistema puede entenderse como un modelo de la realidad, que consiste de un número finito de elementos que se interrelacionan e interactúan entre sí (Nandalal y Simonovic, 2002). El problema central de la modelación matemática es la evaluación del comportamiento del sistema.

Los modelos que ayudan a estudiar cómo se asigna el agua dentro de un sistema hídrico usan una variedad de marcos conceptuales, desde el análisis conflicto-negociación hasta el de gestión integrada del agua a nivel de cuenca. Cada uno incorpora en grados diferentes, los componentes social-humano y físico-biológico. Dentro de la amplia gama de modelos existentes y tomando en cuenta los dos primeros objetivos del estudio, se optó por aplicar un modelo de gestión del agua.

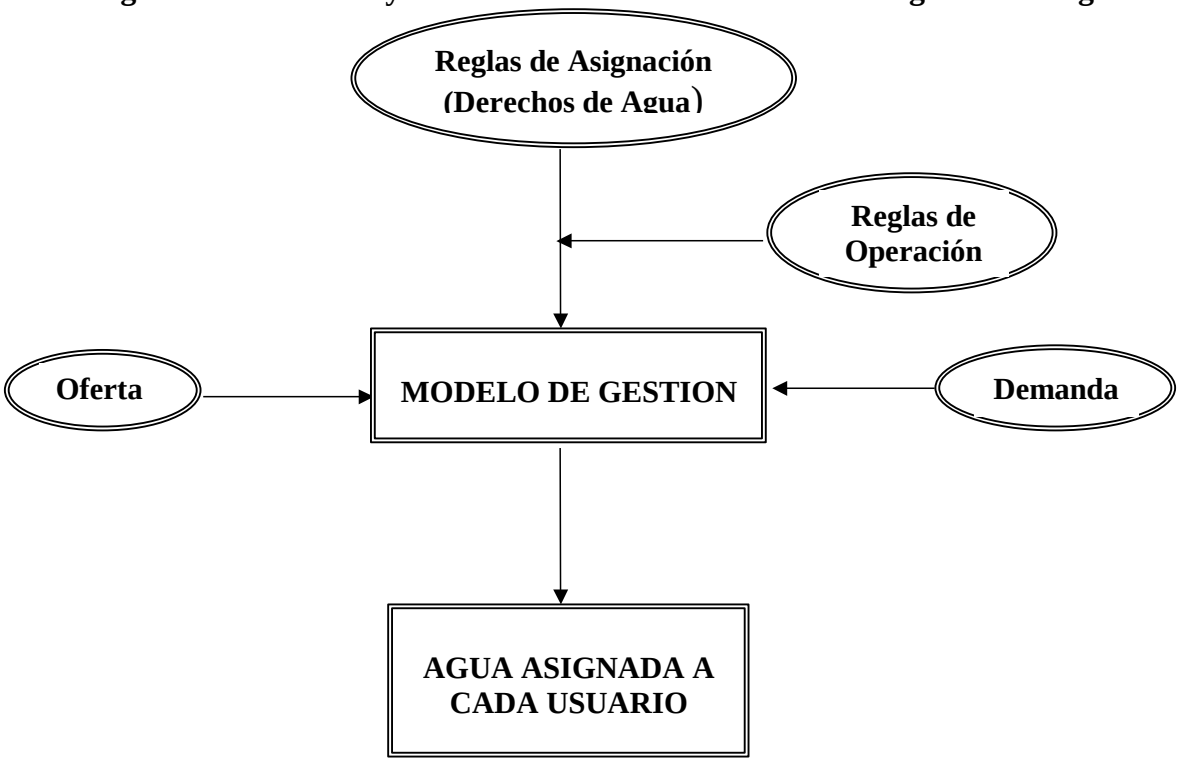
La gestión del agua a nivel de cuenca puede ser concebida como un intento de identificar el mejor uso posible de los recursos hídricos disponibles, considerando ciertas condiciones/restricciones sociales, legales, técnicas, de suelo y medio ambiente. Generalmente se usa a la cuenca como unidad de manejo, no solo porque es el territorio que capta y concentra el agua proveniente de las precipitaciones, sino porque las mismas características físicas del agua generan una fuerte interrelación e interdependencia entre los usos y usuarios de agua en una cuenca y entre estos y su medio ambiente.

El término “gestión integrada” se refiere generalmente al manejo de los recursos hídricos tomando en cuenta los aspectos socioeconómicos, físico-biológicos y técnicos del problema, así como también las necesidades e intereses de los diversos usos y usuarios, con el objeto de reducir los conflictos entre ellos. Desde este punto de vista, “integrado” significa multisectorial, es decir lo contrario de una visión y manejo sectoriales del problema. La gestión se hace indispensable cuando la oferta del agua es escasa frente a la demanda de múltiples usuarios que compiten por un recurso limitado, ya que la falta de agua en una región puede restringir seriamente su desarrollo y su uso puede provocar grandes impactos ambientales.

La figura 3.1 es una representación simplificada de cómo trabaja un modelo matemático de gestión. Teniendo como información de entrada la oferta, la demanda y las reglas de asignación del agua y de operación del sistema, el modelo producirá como salida la cantidad de agua que recibirá cada usuario, generalmente como una función del tiempo. Las reglas de asignación están íntimamente ligadas al marco legal y regulatorio (derechos sobre el agua).

Cada una de las principales variables de la figura 3.1 incorpora o incluye varias variables de menor orden o subtemas. Por ejemplo, la oferta de agua puede incluir el aporte por precipitación (clima), el flujo superficial y subterráneo, el trasvase de agua entre cuencas, la calidad del recurso y la infraestructura existente o proyectada (embalses, plantas de tratamiento, etc.) que modifique esa oferta en el tiempo o el espacio. La demanda se expresa para diferentes sectores de uso (doméstico, industrial, riego, energía, etc), que incluyen a los ecosistemas. Las reglas de asignación están basadas en los derechos de agua, que pueden provenir del marco legal o de los usos y costumbres. La asignación del agua también está influenciada por el valor económico del agua, por los costos ambientales que implica su uso, por las condiciones de recuperación de la inversión en infraestructura y por las reglas de operación que rigen dentro del sistema hídrico (uso de las fuentes, épocas y tiempos de largadas de los embalses, etc).

Figura 3.1: Entradas y salidas de un modelo matemático de gestión del agua



Si bien la salida principal es la cantidad de agua que recibe cada usuario y su variación en el tiempo, el modelo puede proporcionar otros resultados interesantes, como el nivel de satisfacción de la demanda de cada usuario, el déficit, el grado de eficiencia hídrica, las pérdidas en el sistema, la operación y funcionamiento de los embalses, el caudal residual, etc. Algunos modelos de gestión incluyen la posibilidad de optimizar el manejo del agua según

diversos criterios como satisfacción hídrica, eficiencia de uso del agua, distribución más equitativa o maximización de los ingresos o ganancias (análisis de mercado).

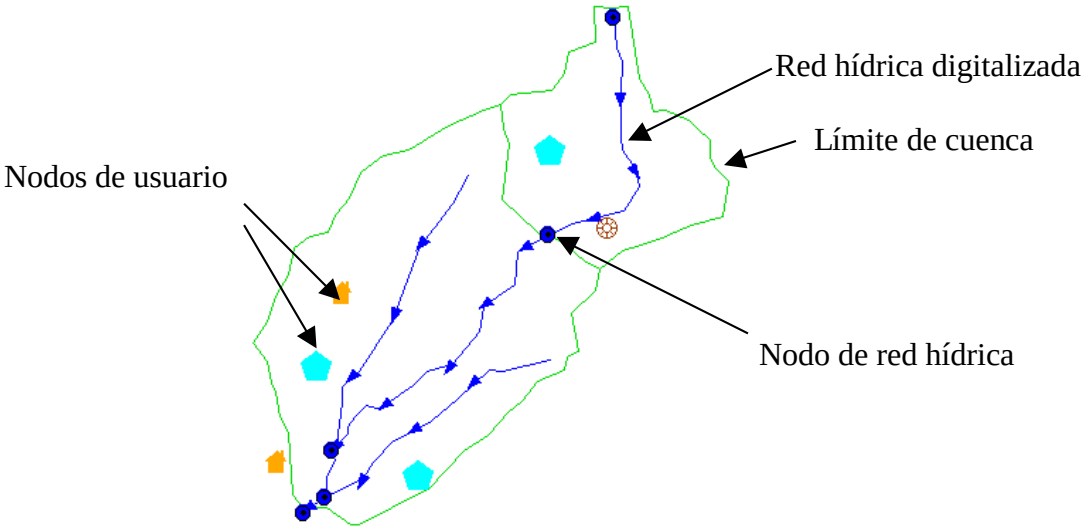
Por razones prácticas y experiencia previa, los puntos focales bolivianos decidieron usar el modelo MIKE BASIN versión 2007, del Danish Hydraulic Institute (DHI), que trabaja en un entorno ArcGIS 9.1 con nivel ArcEditor, para el que se cuenta con una licencia adquirida anteriormente.

3.2 EL MODELO MIKEBASIN

MIKE BASIN es una herramienta para la gestión integrada de recursos hídricos. Según sus creadores (DHI, 2002), MIKE BASIN es una representación matemática de una cuenca donde existen aprovechamientos hídricos. Esa representación incluye los ríos principales y sus tributarios, la hidrología de la cuenca en el espacio y el tiempo, los sistemas usuarios del agua, existentes y potenciales, y sus respectivas demandas. El modelo permite simular también el flujo y uso de aguas subterráneas. Existe además un módulo opcional WQ para la simulación de calidad del agua.

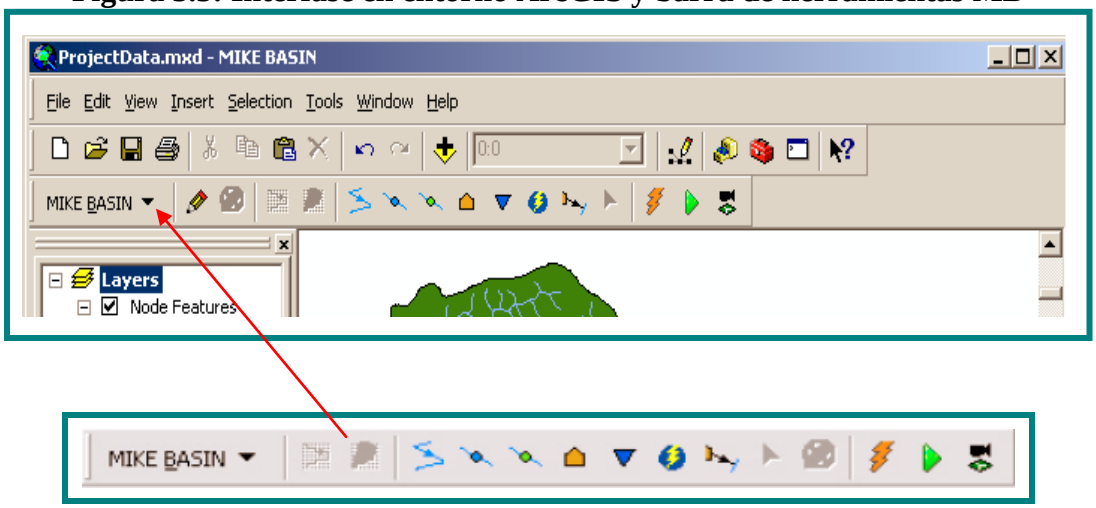
MIKE BASIN representa el sistema hídrico como una red formada por ramas y nodos. Las ramas representan tramos individuales de ríos o canales, mientras que los nodos representan confluencias, puntos de control, puntos donde existirán actividades hídricas (extracciones, derivaciones, flujos de retorno, etc) o donde se requieren resultados de simulación. Los usuarios son representados por iconos adecuados (ver figura 3.2). La red es digitalizada en un entorno ArcGIS, del que MIKE BASIN actúa como una extensión, con su respectiva barra de herramientas. De tal manera, todas las herramientas disponibles de ArcGIS pueden ser utilizadas en la modelación (figura 3.3). Se puede especificar en pantalla la red hídrica, la localización de los usuarios actuales y potenciales, los embalses, las entradas y salidas del sistema.

Figura 3.2: Representación del sistema hídrico en MIKE BASIN



El modelo está concebido para hallar soluciones estacionarias para cada paso de tiempo, por lo que puede ser usado para el cálculo de valores típicos de cantidad y calidad de agua en sistemas donde el cambio temporal es lento (días, semanas o meses), que es el caso de la gestión del agua. En cada paso el modelo realiza un balance de entradas y salidas en cada ramal y nodo de la red, sujeto a ciertas reglas que deben ser seleccionadas e introducidas por el proyectista. Para procesos sujetos a cambios muy rápidos existen otras herramientas.

Figura 3.3: Interfase en entorno ArcGIS y barra de herramientas MB



Fuente: DHI Software, 2005: MIKE BASIN User's Guide..

La información básica de entrada consiste en series de tiempo de oferta y demanda de agua para cada fuente y usuario y las reglas de asignación correspondientes. Archivos de entrada adicionales definen las características de los embalses, reglas de operación, series de tiempo meteorológicas (para cálculo de demanda y manejo de embalses), esquemas de derivación y retorno del agua. Para representar varios usuarios que reciben agua de una misma fuente, estos deben estar conectados a un solo nodo de abastecimiento.

Antes de comenzar la modelización del sistema hídrico, es recomendable definir el nivel de esquematización más adecuado, tomando en cuenta el tamaño del proyecto y la escala de trabajo. Por ejemplo una gran cantidad de pequeños usuarios esparcidos en un área obliga a definir si es necesario considerarlos individualmente (invirtiendo muchos recursos en el análisis), o si por el contrario se los puede agrupar. La decisión debe estar basada en los objetivos del modelo, la disponibilidad de información y la resolución espacial a la que se trabaja. La esquematización debería representar las actividades al nivel de detalle deseado. Según sea necesario, se puede agrupar la red hídrica de una cuenca pequeña en un solo ramal aguas arriba de un punto de extracción, varios usuarios individuales de agua para riego en uno solo o unir el uso domestico e industrial en un solo usuario urbano.

La versión 2005 y 2007 presentan algunos cambios o actualizaciones importantes con respecto a las anteriores. Mejoras relevantes para el presente estudio fueron la opción "lago" (equivalente a embalse no regulado por el hombre) para embalses, y la opción de usar dos depósitos acuíferos (superficial y profundo) para aguas subterráneas. Se eliminó la opción de regla de prioridad global para asignar el agua, que era poco práctica. En cambio ahora existe la

posibilidad de que un usuario extraiga agua según una proporción de la demanda o del caudal disponible. Esto último se había solicitado al DHI en el desarrollo de la Primera Fase, porque es la forma de asignación que más se aproxima a los "turnos" que se usan en Tiquipaya y muchas cuencas andinas.

MIKE BASIN trabaja integrado con el Temporal Analyst, una extensión ArcGIS creada por el DHI para el análisis de series temporales de datos en un ambiente SIG. Las versiones 2005 y 2007 también incorporan mejoras y complementos de las funciones del Temporal Analyst. Adicionalmente, MIKE BASIN incorpora explícitamente un subprograma de optimización.

3.2.1 Las reglas de asignación y los derechos de agua en MIKE BASIN

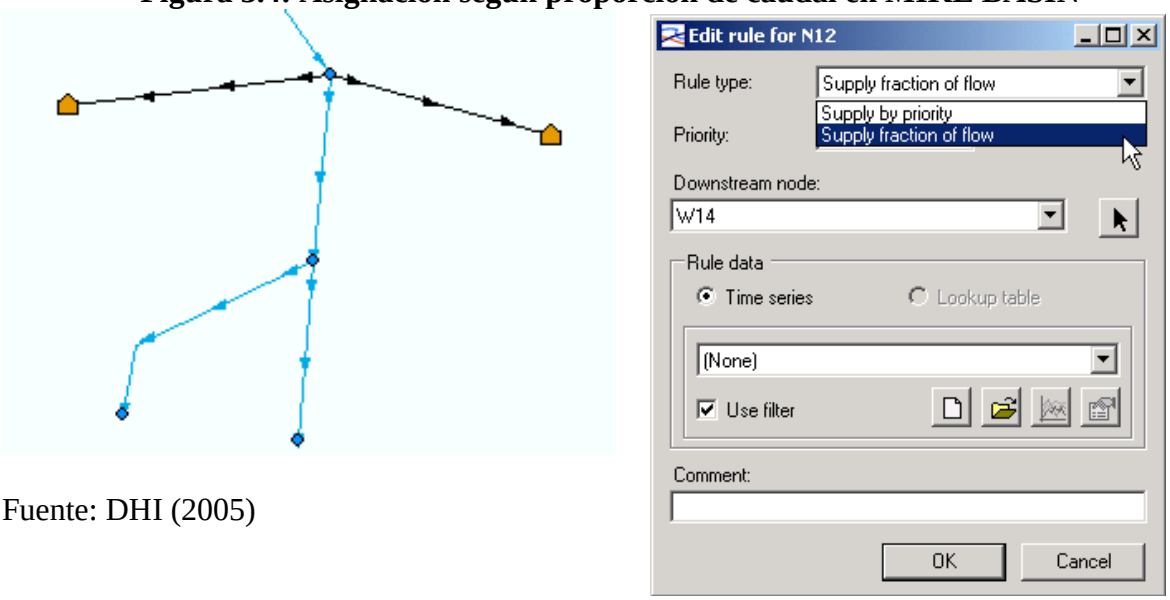
MIKE BASIN puede asignar el agua según un orden de prioridad local. La regla local implica que el agua se asigna según un orden de prioridad definido para cada nodo de extracción o aprovechamiento del agua. En cada uno de estos nodos se define una lista secuencial de nodos de usuario. El primer usuario de la lista recibirá toda el agua (si la oferta es suficiente) que necesita para cubrir su demanda. El segundo usuario recibirá lo que requiere solo después que el primer usuario ha recibido "su" agua y así sucesivamente para los siguientes usuarios de la lista. Si la oferta es insuficiente para cubrir la demanda de todos los usuarios, los últimos de la lista no recibirán agua. Si por el contrario, queda agua remanente, ésta es devuelta a un nodo de la red hídrica y si éste no existe, se asume que deja el área de modelación. Las reglas locales frecuentemente están asociadas a casos en que los usuarios más próximos a la fuente o situados aguas arriba reciben primero el agua.

La versión 2007 incorporó opciones de asignación proporcional ("water sharing algorithms"), que permiten asignar el agua según una fracción de la oferta o de la demanda. La fracción de oferta (caudal disponible en la fuente) se puede introducir como serie de tiempo para cada usuario (ver figura 3.4). Es decir, la fracción correspondiente a cada usuario puede variar en el tiempo. Para cada periodo o paso de tiempo, la suma de las fracciones de todos los usuarios de un grupo debería ser 1. Sin embargo, es posible "mezclar" los dos tipos de regla (prioridad local y asignación proporcional) en un nodo de extracción. En este caso, el usuario con regla local tiene una prioridad más alta, por lo que las fracciones se aplican al caudal remanente que queda después de que ese usuario ha recibido el agua que necesita para cubrir su demanda.

La regla de asignación proporcional puede representar adecuadamente la asignación de agua por turnos o mitas, que es la más frecuente en la región andina para usuarios regantes. La asignación por turnos se expresa en número de horas de uso del agua proveniente de una fuente. Esto significa que el caudal o volumen que recibe un usuario será variable según la época del año y el caudal disponible en la fuente. Por ejemplo, si la fuente es un río no regulado, en época de estiaje la cantidad de agua que recibe un usuario que tiene derecho a un turno de 12 horas, será mucho menor que la que recibe al final de la temporada lluviosa. En su forma más simple, la asignación de agua por turnos se aplica siguiendo un ciclo de duración determinada, por ejemplo 20 días. Así el usuario del ejemplo, que riega durante 12 horas cada 20 días, puede expresar su derecho D como una proporción fija k del caudal disponible Q ($D=kQ$). Para este caso $k=12/(20*24)=0.025$.

La versión 2007 de MIKE BASIN puede simular formas más complejas de turnos de riego, gracias a que las fracciones son series de tiempo. Por ejemplo, se presenta el caso que una parte de los usuarios (los mayoristas) de una fuente tengan un ciclo más corto que el resto (los minoristas). Además la duración del ciclo rara vez coincide con el paso de tiempo usado en la modelación (en el caso presente, mes). Esto provoca que para un usuario el coeficiente k de proporcionalidad pueda variar de un mes a otro. En estos casos, el uso de un k constante todo el tiempo no es estrictamente válido e introduciría cierto error en los resultados.

Figura 3.4: Asignación según proporción de caudal en MIKE BASIN



Fuente: DHI (2005)

La opción de fracción de demanda es de utilidad en varios casos prácticos. En este caso, el agua es extraída según una fracción de la demanda requerida en el nodo. Si el nodo no puede cubrir esa fracción de demanda no se realiza ningún intento de extraer agua de otro nodo. La suma de las fracciones de demanda no debe exceder 1. Incluso puede ser inferior a 1: la fracción faltante aparece en los resultados como "déficit de demanda". Sin embargo, este déficit es diferente al "verdadero" déficit que resulta de la falta de agua.

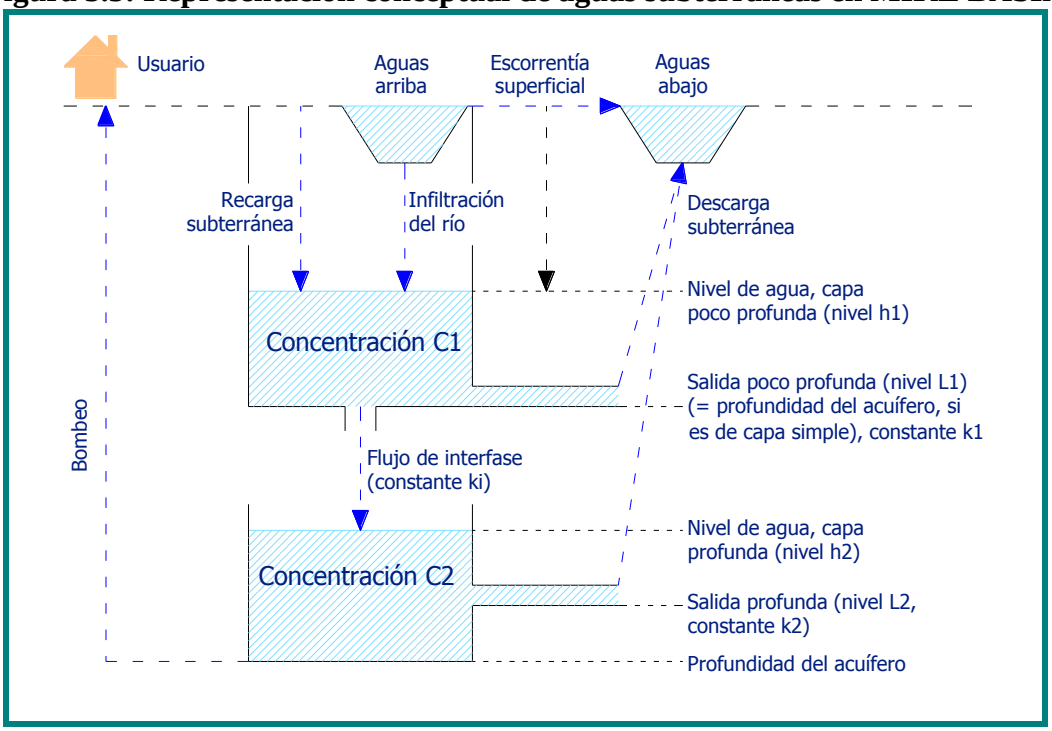
3.2.2 Aguas subterráneas y embalses

Tanto el escurrimiento superficial como el subterráneo son parte del ciclo hidrológico y se relacionan estrechamente. El flujo base de la época de estiaje proviene de los acuíferos, que en el caso de la cuenca del río Mauri son importantes. Debido a que buena parte de la extracción y trasvase de agua hacia Tacna proviene de aguas subterráneas se puede considerar el uso de la opción de Aguas Subterráneas de MIKE BASIN. El modelo considera que el acuífero interactúa con el agua superficial a través de los siguientes flujos (DHI Software, 2006):

- Infiltración desde los ríos hacia el acuífero.
- Recarga subterránea de la cuenca hacia el acuífero.
- Descarga por bombeo (sí existen usuarios que explotan el acuífero).
- Descarga subterránea del acuífero a la cuenca (flujo base).

En MIKE BASIN el depósito de agua subterránea se conceptualiza como un reservorio lineal, que consta de dos niveles de almacenamiento (figura 3.5): poco profundo y profundo. En cada nivel existe un punto de salida de agua. Cuando el acuífero es simple, la salida de agua del nivel poco profundo (o superficial) es también el nivel de fondo del acuífero. Entre la capa poco profunda y la profunda existe una interfase, regida por una constante de descarga (ki) y el nivel de agua del acuífero poco profundo (h1). Existe la opción de deshabilitar el nivel profundo.

Figura 3.5: Representación conceptual de aguas subterráneas en MIKE BASIN



Fuente: DHI Software, 2005: MIKE BASIN User's Guide..

La descarga subterránea del acuífero proviene de ambas capas y está en función de los niveles de agua (h1, h2) y las constantes de descarga (k1, k2). El proceso de descarga es exponencial. Si la descarga es mayor que la recarga, el acuífero se vacía, hasta alcanzar el nivel L2, por debajo del cual solamente existe agua remanente en el depósito de fondo. Si por el contrario, la descarga es menor que la recarga el agua, el acuífero se está llenando. Las ecuaciones que usa el modelo para representar la dinámica del acuífero son:

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} = (-k_1 - k_i)(h_1 - L_1) + q_{recarga} + q_{infiltración}$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = k_i(h_1 - L_1) - k_2(h_2 - L_2) - q_{bombeo}$$

Donde:
h1 = Nivel del agua en la capa superior poco profunda.
h2 = Nivel de agua en la capa profunda.
t = tiempo

k1 = Constante de descarga para nivel poco profundo (unidades 1/t)
k2 = Constante de descarga para nivel profundo (unidades 1/t)
L1 = Nivel de descarga, capa poco profunda.
L2 = Nivel de descarga, capa profunda.
$q_{recarga}$ = Flujo específico de recarga.
$q_{infiltración}$ = Flujo específico de infiltración.
q_{bombeo} = Flujo específico de bombeo.

La recarga a través de la cuenca, puede ser representada como flujo o flujo específico en series de tiempo. En MIKE BASIN la recarga proveniente del río puede expresarse como flujo absoluto (m3/s) o fracción del caudal de un río, en series de tiempo. Por otro lado se ha comprobado que el nivel de agua de la capa profunda no está limitado por la profundidad de salida de la capa poco profunda, es decir que el nivel de agua h2 del acuífero profundo puede superar el nivel más bajo L1 del acuífero poco profundo.

MIKE BASIN puede simular sistemas con múltiples embalses superficiales, donde cada reservorio puede ser multipropósito. Estos nodos pueden ser insertados sobre nodos de río o nodos de cuenca. Se puede trabajar con tres tipos de embalses: estándar, embalse con piscinas de asignación y lago. El primero considera al embalse como un almacenamiento físico simple, donde cada usuario conectado al embalse obtiene el agua que necesita según la prioridad y las reglas de operación. En embalses con piscinas de asignación el almacenamiento es dividido internamente en diferentes almacenamientos físicos; cada usuario tiene un espacio físico imaginario de almacenamiento y existe otro espacio para uso ambiental. Finalmente el lago es un almacén físico de agua en donde no se aplican las reglas de operación. Esta última opción fue incluida a partir de la versión 2005.

El funcionamiento simplificado de un embalse estándar es el siguiente: 1) El embalse recibe agua de diferentes fuentes y el agua se deposita en el almacenamiento principal. 2) El nivel de agua en el embalse y el área de la superficie del espejo del agua son calculados en base a la batimetría. 3) La precipitación es adicionada al volumen del almacenamiento principal. 4) Las pérdidas por evaporación e infiltración, son extraídas del volumen de almacenamiento principal. 5) El usuario puede extraer agua hasta un determinado nivel, por debajo del cual ya no es posible la extracción (nivel muerto) o está sometida a restricciones. La descarga del embalse puede realizarse opcionalmente con vertederos (spillways). En este caso se necesita conocer la relación nivel-caudal de descarga.

3.2.3 Simulación y resultados.

Una vez cumplidos los requisitos exigidos por el modelo y considerando que el paso de tiempo de la simulación no debe ser mayor al introducido en las series de tiempo de precipitación, se lleva a cabo la simulación del sistema bajo las reglas de asignación y operación definidas previamente por el modelista o usuario de MIKE BASIN. Como se indicó en la figura 3.1, el principal resultado que se obtiene es la cantidad de agua que recibe cada usuario y su variación en el tiempo. Sin embargo, el modelo proporciona otras salidas que muestran el desempeño del sistema hídrico, entre las que se mencionan:

- Flujo simulado por paso de tiempo en cada ramal de la red. Para nodos de cuenca y de río: escurrimiento, flujo neto hacia el nodo, probabilidad de excedencia, flujo observado en cada nodo (en caso de disponibilidad de los registros correspondientes).

- Para todos los nodos de usuario y en forma de series de tiempo: caudal extraído, caudal usado, abstracción subterránea, déficit absoluto, déficit relativo a la demanda, balance neto, volumen de agua que deja el área de modelado. Para nodos de hidroenergía: energía generada.

- Para nodos de embalse y en forma de series de tiempo: agua entregada aguas abajo del embalse, nivel de agua, superficie de almacenamiento, volumen almacenado, cambio en el almacenamiento, series de precipitación y evaporación.

Todas las series de tiempo de resultados pueden someterse a un análisis estadístico mediante la opción Statistics. Por defecto se estiman la media, moda, valor máximo, valor mínimo, etc. Temporal Analyst (TS) permite también elaborar curvas de doble masa y curvas de duración de caudales, entre otras opciones. En forma gráfica, en una ventana ArcGIS y diferenciando por colores, el TS puede mostrar automáticamente los aportes de aguas, los caudales que circulan por diferentes ríos, caudales extraídos, déficit de agua, etc. También es posible realizar una animación de los resultados de una corrida gráfica para todo o parte del periodo de simulación.

Capítulo 4

OFERTA Y CALIDAD DE AGUAS

4.1 OFERTA DE AGUA

Para estimar la oferta de agua en las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero se realizó un estudio hidrológico y de recursos hídricos, que representa una actualización y complementación de un estudio anterior (Molina et al, 2007). Tomando en cuenta las metas del proyecto, se definió que el estudio hidrológico determinase la oferta de las diversas fuentes en forma de series continuas de caudales mensuales, para un periodo suficientemente largo (1965-08). Este periodo incluye años secos y húmedos, lo que permitió evaluar los impactos de las obras de trasvase y de los nuevos proyectos de riego sobre los usuarios, para diferentes situaciones. La fecha final del periodo (diciembre 2008) estuvo determinada por la disponibilidad de datos de las estaciones peruanas proporcionadas por el Proyecto Especial Tacna (PET), porque en las estaciones bolivianas se disponía de datos incluso hasta junio 2010 (ver anexo I).

Los datos de las estaciones peruanas fueron tratados por el PET. Los datos de las estaciones hidrométricas bolivianas fueron tratados por IHH-SENAMHI a partir de 1991. Por acuerdo de los puntos focales de la Comisión Binacional, las series de caudal de las estaciones bolivianas para el periodo 1965-90 corresponden exactamente a la base de datos de la Autoridad Binacional del lago Titicaca y sistema TDPS (ALT), que fue validada por ambos países como parte de los estudios del Plan Director de la cuenca TDPS (Titicaca, Poopó, Desaguadero y Salares, 1991).

Con el objeto de disponer de series continuas de caudales para todo el periodo 1965-08, se aplicaron dos técnicas: modelos hidrológicos de cuenca y modelos estadísticos. Por diversas razones, explicadas en el informe, resultaron evidentes las limitaciones del modelo hidrológico. Por ello y considerando la relativamente alta densidad de estaciones hidrométricas, se decidió aplicar un modelo estadístico para el conjunto de las estaciones de las cuencas de los ríos Mauri y Desaguadero. Previamente se realizó el tratamiento a nivel diario de la información de las estaciones bolivianas.

El modelo estadístico usa técnicas de correlación múltiple entre estaciones, verificando al mismo tiempo que las series completadas/rellenadas sean estadísticamente similares a las series históricas. Esto se llevó a cabo aplicando el utilitario CORMUL del programa Hydraccess, que cuenta con herramientas para el “filtrado” de las series generadas, la comparación entre series completadas y observadas y entre series de estaciones consecutivas. Para verificar su consistencia, se aplicó el Vector Regional a las series completadas.

Se obtuvieron así series de caudales medios mensuales para el periodo 1965-2008 en 12 estaciones de las cuencas de los ríos Mauri y Desaguadero, que incluyen seis estaciones bolivianas, una chilena y cinco estaciones peruanas. Adicionalmente se dispuso de una serie más corta de caudales en la estación boliviana de Aguallamaya sobre el río Desaguadero, a la salida de la laguna del mismo nombre. Esta estación empezó a funcionar después de 1990. Por otro lado, un estudio anterior (Molina et al, 2007) incluyó las estaciones peruanas de Chiliculco y Challapalca, que disponían de registros relativamente cortos. Estas estaciones se

muestran en la figura 4.1, pero no se incluyen en la tabla 4.1, entre otras razones porque el PET no proporcionó datos recientes. Por las mismas razones en el presente estudio no se incluyeron las estaciones chilenas de Colcapagua y Caquena Nacimiento.

La figura 4.1 muestra la ubicación de las estaciones de la cuenca del Mauri y las áreas de aporte de las estaciones consideradas en el presente estudio. Los valores promedio de todo el periodo (agosto 1965 a diciembre 2008) se muestran en la tabla 4.1. Se dispuso de registros históricos cortos de otras tres estaciones peruanas (Mamuta 1 y 2, Ojos de Copapujo) que no fueron tratados por estar situadas sobre manantiales o pequeños afluentes. No se pudo obtener los registros de las estaciones peruanas de la cuenca del río Uchusuma ni la del canal Patapujo.

El uso de una técnica estadística implica que las series completadas corresponden estadísticamente a las series registradas, es decir reflejan también las posibles alteraciones o modificaciones producidas por el hombre. Entre esas alteraciones están las extracciones en los tramos de río aguas arriba de la estación, que en el caso de estudio corresponden a los trasvases hacia el Pacífico y los usos consuntivos para riego. Si se quiere obtener caudales "naturalizados" es necesario sumar los caudales extraídos río arriba a los registrados en la estación. Esto se hizo con la ayuda de MIKE BASIN para el escenario actual y los resultados se muestran en el capítulo 6.

La estación más afectada por las extracciones es la estación de Abaroa sobre el río Caquena. En la cuenca aguas arriba de esta estación se encuentran las obras de trasvase del río Uchusuma y los pozos de El Ayro, que suman algo más de 1000 l/seg. Además existen muchas tomas para riego de bofedales, tanto sobre el río Caquena como sobre afluentes como los ríos Putani y Caño. Todo esto se refleja en el bajo caudal específico de la cuenca del Caquena, de 0.7 l/seg-km (ver tabla 2.1 del presente informe).

Los registros de las estaciones a lo largo del río Mauri fueron afectados en un grado menor, porque la suma del caudal promedio trasvasado en Kovire y del caudal extraído por el canal Patapujo aún es inferior al 15% del caudal promedio en la estación de Frontera y porque las extracciones comenzaron en 1996. Esto cambiará a medida que se construyan y operen las nuevas obras de regulación, captación y trasvase que proyecta el Gobierno Regional de Tacna.

Los caudales promedio en las estaciones de Calacoto Desaguadero, Ulloma y Chuquiña de la tabla 4.1 son considerablemente inferiores a los estimados en los estudios del Plan Director (1991). Esto se debe a los diferentes periodos de análisis, 1965-90 del Plan Director y 1965-2008 en el presente estudio. Es evidente que el periodo utilizado en ese Plan fue relativamente húmedo, lo que pone en duda las conclusiones y recomendaciones del Plan Director o al menos, obliga a una revisión que tome en cuenta los registros hidrometeorológicos del periodo 1990-2010. En los anexos del presente estudio (anexo I) se muestran las series históricas completas de Frontera y Chuquiña.

Figura 4.1: Estaciones hidrométricas de la cuenca del río Mauri y áreas de aporte

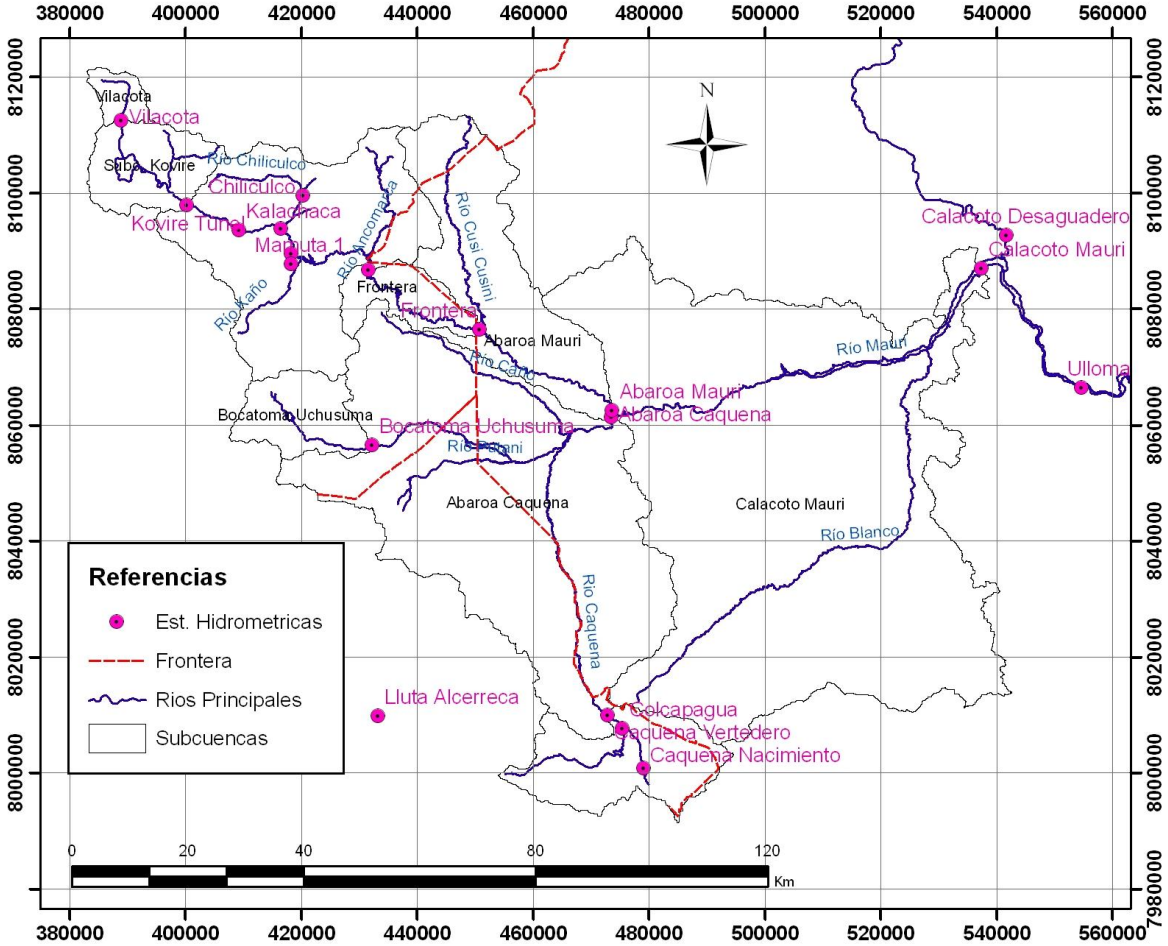


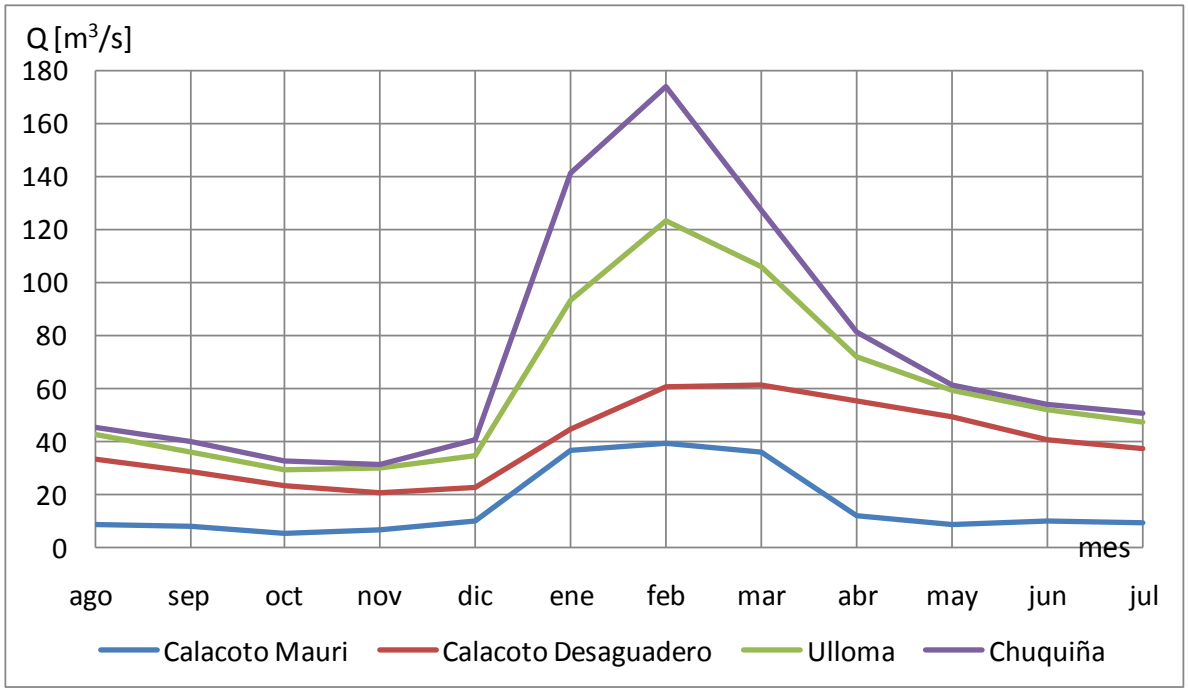
Tabla 4.1: Caudales medios mensuales en estaciones de las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero, periodo 1965-2008

Nombre de la Estación	Area aporte [Km^2]	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	media
Vilacota	72	0.64	0.73	0.59	0.36	0.29	0.29	0.25	0.26	0.22	0.19	0.20	0.25	0.36
Koviri (Ancoaque)	358	0.54	1.08	1.74	0.89	0.48	0.41	0.41	0.39	0.30	0.26	0.25	0.27	0.58
Chuapalca	1532	4.67	6.53	5.48	3.05	2.31	2.23	2.22	2.13	1.98	1.87	2.01	2.40	3.07
Frontera	1722	6.00	8.64	7.19	3.73	2.75	2.67	2.68	2.56	2.31	2.21	2.36	2.88	3.83
Abaroa Mauri	2511	7.96	12.14	10.05	4.64	3.05	3.00	2.99	2.83	2.56	2.40	2.58	3.47	4.81
Caquena Vertedero	459	2.44	3.62	2.64	1.40	1.25	1.40	1.43	1.32	0.96	0.63	0.68	0.95	1.56
Bocatoma Uchusuma	258	1.69	1.96	1.40	0.81	0.64	0.63	0.55	0.56	0.46	0.40	0.44	0.58	0.84
Abaroa Caquena	3141	4.17	7.23	4.65	1.86	1.61	1.94	1.74	1.60	1.24	0.67	0.76	1.15	2.39
Calacoto Mauri	9804	37.0	39.3	36.0	12.5	8.9	9.9	9.6	9.0	7.9	5.8	6.8	10.2	16.1
Calacoto Desaguadero		44.7	60.8	61.7	55.5	49.4	40.9	37.7	33.6	28.5	23.6	21.0	22.9	40.0
Ulloma		93.3	123.6	106.3	72.0	59.8	52.0	47.5	42.9	36.3	29.7	29.9	34.7	60.7
Chuquiña		141.7	174.0	127.7	81.3	61.5	53.9	50.9	45.3	39.9	32.7	31.2	40.8	73.4
Aguallamalla (*)		34.4	53.2	51.8	52.6	47.4	41.7	34.6	30.2	24.8	22.4	18.5	17.6	35.8

Fuente: Elaboración propia

La figura 4.2 muestra los caudales medios mensuales de la tabla 4.1 en forma de hidrogramas para la estación de Calacoto Mauri y las tres estaciones situadas sobre el río Desaguadero. Si bien existe una fuerte variación intermensual, se observa también que el flujo base (de época de estiaje) es importante, especialmente en la cuenca del río Mauri.

Figura 4.2: Hidrogramas medios en Calacoto Mauri y estaciones del río Desaguadero, periodo 1965-08

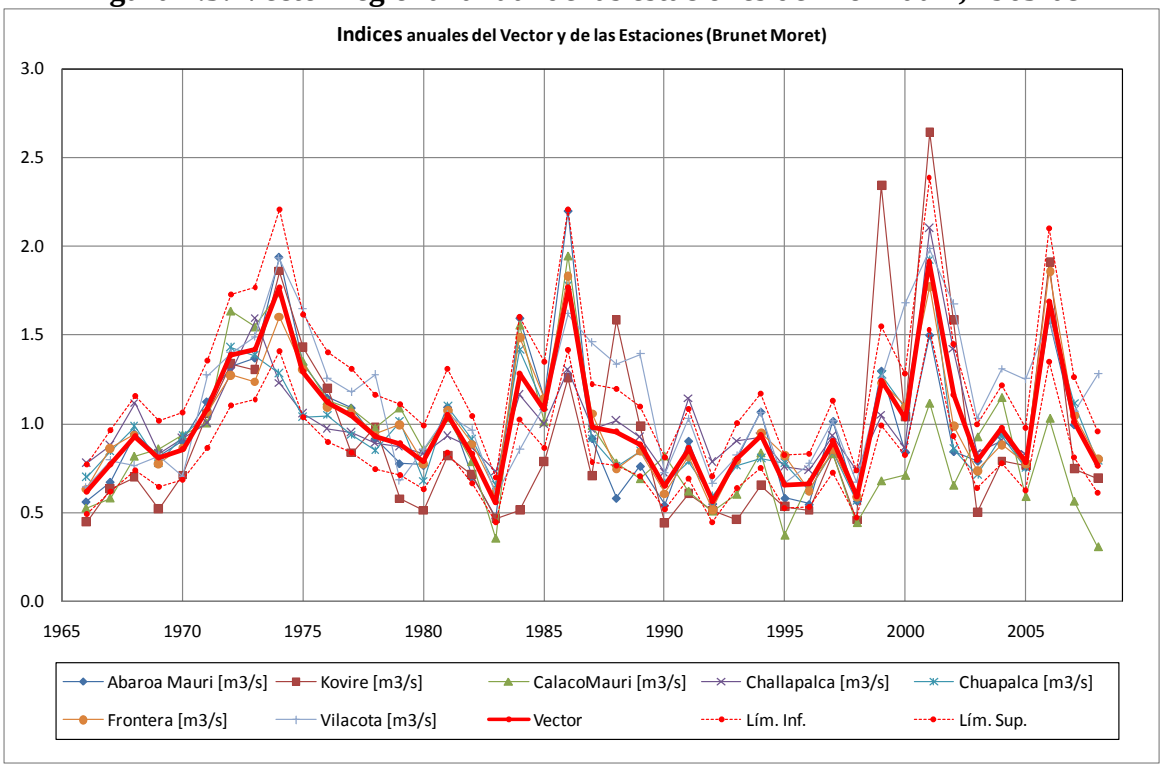


Fuente: Elaboración propia

Además de la variación intermensual, existe una fuerte variación interanual. La figura 4.3 muestra el vector regional de las estaciones situadas sobre el río Mauri, desde Vilacota hasta Calacoto. La figura 4.4 muestra el vector regional aplicado a los caudales medios anuales rellenados/completados de las tres estaciones hidrométricas situadas sobre el río Desaguadero. Un índice superior a 1 indica un año húmedo en que el caudal o escurrimiento del grupo de estaciones ha sido superior el promedio interanual. Un valor inferior a 1 indica un año deficitario.

En el caso del río Desaguadero se observa una gran variación interanual, con años como el 1985-86 en que el vector regional superó el valor de 4 y años en que estuvo por debajo de 0.3. Además permite caracterizar a la década del 90 como muy seca. A principios de la década del 2000 se registro un aumento del caudal medio de ese río, que sin embargo vuelve a decaer en años recientes, como se observa en la figura 4.4 y en la tabla respectiva del Anexo I. Se observa también que la variación interanual del vector en la cuenca del río Mauri es considerablemente más baja que la que se presenta sobre el río Desaguadero.

Figura 4.3: Vector regional anual de las estaciones del río Mauri, 1965-08



Fuente: Elaboración propia

Lo anterior tiene importantes consecuencias para los usuarios de los sistemas de riego que usan las aguas del río Desaguadero, situados aguas abajo de la estación de Calacoto. Los datos de la tabla 4.1 indican que la relación del caudal medio del río Mauri sobre el caudal del río Desaguadero es de 0.37 (14.9/39.9) en Calacoto. Pero en años y periodos secos se incrementa mucho. La figura 4.5 muestra esa relación en la estación de Calacoto para todos los años del periodo 1965-05. Durante el periodo seco 1966-73 en promedio esa relación fue de 1.58, con un máximo de 2.81 en 1971-72. Es decir el caudal del río Mauri durante ese periodo fue 1.58 veces el del río Desaguadero en la confluencia de ambos ríos, mucho más grande que el promedio de 0.37. Durante otro periodo seco, el de 1991-2001, la relación promedio entre caudal de los dos ríos fue de 0.94. En cambio durante años muy húmedos, como el de 1985-86, el caudal del Mauri representó solamente 18% (0.18) del caudal del Desaguadero en Calacoto. En síntesis, el aporte del río Mauri es muy importante durante periodos secos, que son los más críticos para los sistemas de riego situados a lo largo del río Desaguadero.

La precipitación es otra variable de "entrada". La tabla 4.2 muestra los promedios mensuales y anuales de precipitación en las estaciones situadas en la cuenca del río Desaguadero y zonas próximas.

Figura 4.4: Vector regional anual de las estaciones del río Desaguadero, 1965-08

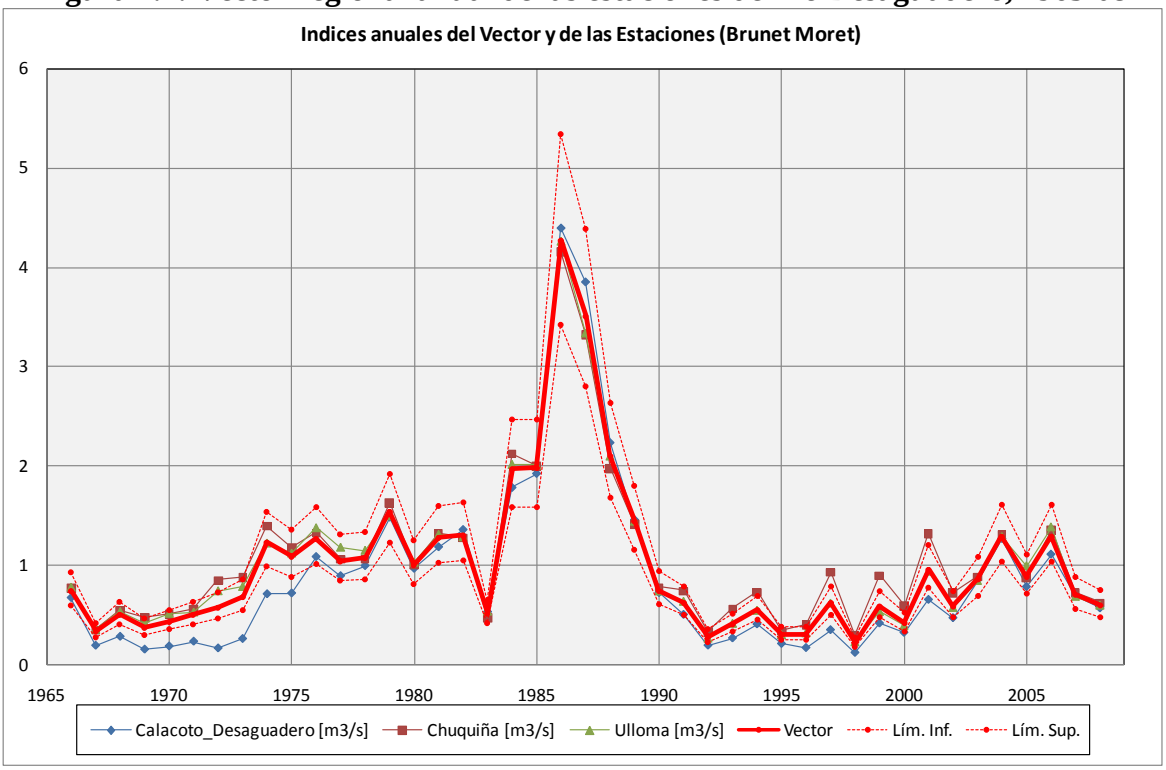
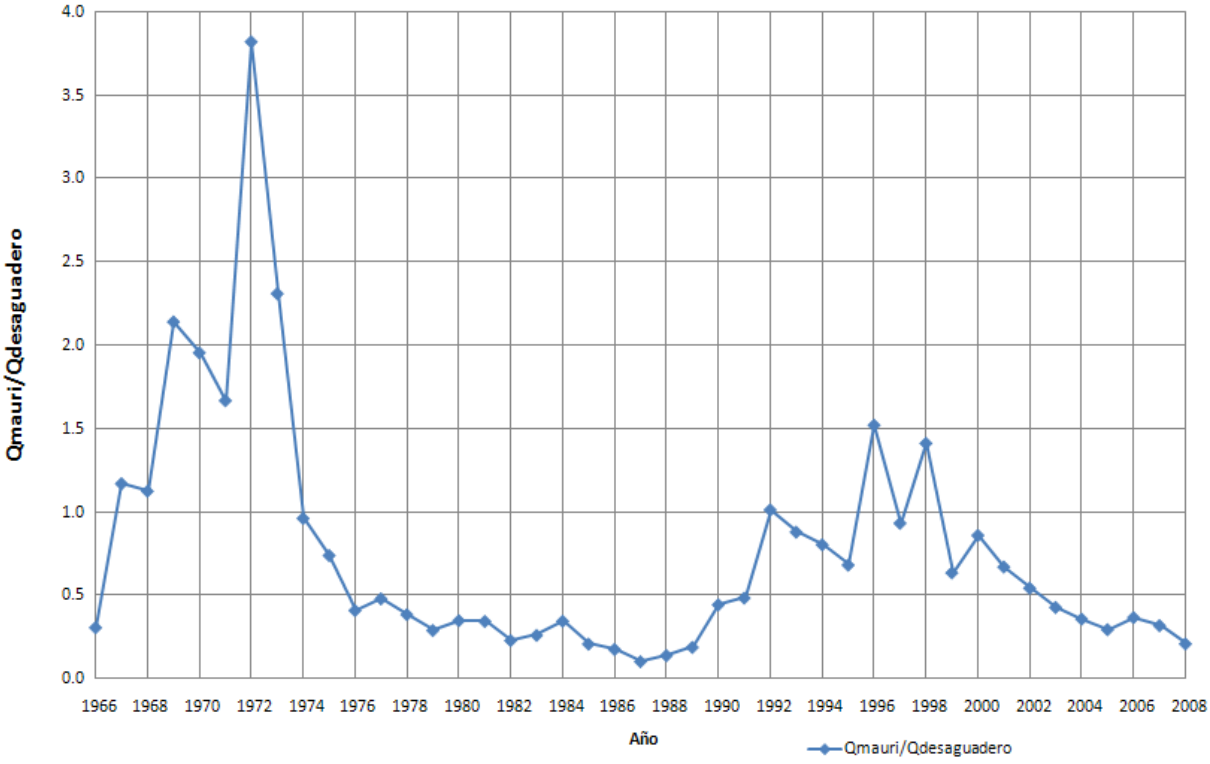


Figura 4.5: Relación de caudales anuales de los ríos Mauri y Desaguadero en Calacoto



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2: Precipitación media mensual y anual (mm) en estaciones de apoyo, 1965-2008

No	Codigo estación	Nombre Estación	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Total Anual
12	ABA	ABAROA	108.9	89.2	62.3	9.2	1.0	0.9	0.4	7.4	2.9	7.6	27.8	46.7	364.5
13	ACHI	ACHIRI	140.6	89.5	72.8	23.9	2.6	6.0	3.5	7.6	8.3	18.6	34.6	72.6	480.6
14	AND	ANDAMARCA	79.0	52.4	36.6	6.1	0.5	0.0	0.8	1.3	5.5	7.9	14.3	38.7	242.9
15	AYO	AYO AYO	98.9	62.2	50.3	19.1	6.2	4.4	6.3	10.4	20.5	27.8	32.7	63.5	402.2
17	BER	BERENGUELA	79.0	58.4	54.5	10.7	0.9	1.4	1.1	4.6	6.7	11.3	25.3	39.3	293.3
18	CAL	CALACOTO	120.2	79.4	62.5	18.4	3.0	2.7	2.1	8.3	6.6	15.5	26.8	71.9	417.4
20	CAM	CALAMARCA	83.9	65.1	55.7	23.7	8.4	5.6	6.3	12.1	19.1	31.3	33.1	58.6	402.7
19	CALANA	CALANA	3.5	1.8	0.7	0.4	0.8	1.7	2.2	3.2	2.8	1.0	1.1	1.4	20.5
5	08326	CAPAZO	154.7	124.8	95.9	17.6	2.5	2.9	0.9	4.8	3.8	8.9	29.5	80.4	526.7
2	01001005	CAQUENA	96.5	78.8	65.0	10.2	1.0	3.5	3.5	3.2	1.0	5.6	10.7	41.1	320.0
21	CAQ	CAQUIAVIRI	103.6	78.9	70.1	30.5	10.8	5.4	7.5	11.9	20.8	26.0	39.1	67.9	472.4
22	CAR	CARACOLLO	89.8	82.2	58.9	13.7	2.7	0.4	5.0	7.9	21.5	16.3	31.7	77.4	407.3
6	08327	CHALLAPALCA	103.5	90.9	76.9	10.1	2.1	3.5	1.3	4.9	1.9	6.4	23.1	58.8	383.5
24	CHA	CHARAÑA	99.1	72.6	56.4	10.9	1.7	2.0	0.8	5.8	2.4	8.3	15.9	36.9	312.7
8	08329	CHILLIGUA	151.9	123.0	102.7	31.6	8.1	3.5	3.1	10.7	14.0	27.7	45.4	89.2	611.0
9	08330	CHUAPALCA	115.9	97.4	74.0	13.0	2.2	1.0	1.1	3.2	2.7	6.6	22.4	51.9	391.4
25	CHU	CHUQUIÑA	87.6	62.6	48.5	13.3	4.4	2.8	2.3	7.6	13.8	16.3	21.4	44.7	325.4
27	COI	COIPASA	71.1	77.5	39.6	3.2	0.3	0.0	0.5	0.5	2.1	8.3	10.2	37.0	250.3
28	COL	COLLANA	137.0	90.5	79.3	29.1	6.7	5.8	8.1	13.5	28.1	33.4	52.1	78.2	561.7
29	COM	COMANCHE	135.0	102.1	74.0	26.6	6.6	6.9	5.6	10.7	25.0	25.9	45.2	74.5	538.1
23	CON	CONCHAMARCA	102.8	79.0	63.8	22.8	9.3	11.0	8.0	12.4	23.0	27.8	39.7	67.6	467.2
26	CON	CONIRI	147.4	91.2	79.4	33.9	11.2	7.9	8.6	11.3	25.7	30.8	58.3	76.4	582.1
30	COR	CORQUE	138.8	51.9	48.6	6.6	0.3	2.2	0.2	4.5	8.9	20.0	30.9	49.7	362.6
31	COS	COSAPA	115.4	74.6	59.1	5.5	0.5	1.2	0.2	2.7	3.7	6.6	22.7	52.5	344.6
32	DES	DESAGUADERO (Bolivia)	186.6	157.5	118.5	43.9	10.3	5.3	8.1	12.7	22.8	28.7	49.5	94.5	738.5
33	ELA	EL ALTO LA PAZ	145.3	100.0	83.1	25.1	6.0	1.5	12.2	7.3	26.3	39.7	60.5	110.6	617.6
16	AYRO	EL AYRO	111.8	89.0	59.1	16.2	1.3	4.9	0.8	3.1	1.5	2.9	8.6	28.0	327.2
34	EUC	EUCALIPTUS	103.8	79.4	55.6	12.0	2.7	1.4	2.6	8.3	19.0	17.4	27.3	61.4	390.7
35	GUA	GUAQUI	150.5	120.2	85.5	18.8	13.8	4.4	6.2	9.1	23.6	30.2	46.6	95.6	604.4
36	HUA	HUACHACALLA	124.1	82.1	58.5	9.5	2.7	0.4	0.1	1.2	4.6	7.1	13.1	58.6	362.1
37	IRP	IRPA CHICO	119.5	73.3	60.6	22.9	8.7	4.6	3.8	14.5	20.5	20.5	35.6	59.5	444.0
38	JES	JESUS DE MACHACA	182.8	97.6	103.6	29.7	8.4	1.8	4.4	11.8	23.9	28.5	47.6	91.9	632.0
39	JIH	JIHUACUTA	159.3	122.1	85.6	43.3	7.8	6.0	4.9	11.0	15.4	31.6	53.2	73.7	613.8
40	KOV	KOVIRE	127.5	94.3	98.1	9.4	0.6	1.0	0.6	3.1	1.5	3.8	13.4	43.6	396.8
3	08316	LARAQUERI	176.3	146.7	119.2	42.4	10.5	6.1	5.0	10.5	20.2	34.6	58.4	114.4	744.3
10	0878	MAZO-CRUZ	133.3	107.0	89.9	19.7	4.3	2.6	1.8	7.9	7.2	18.2	34.6	68.8	495.3
41	NAZ	NAZACARA	124.8	78.9	65.3	21.8	3.3	4.6	2.3	6.2	11.2	14.3	33.6	77.5	443.8
42	ORI	ORINOCA	127.9	82.4	48.9	7.1	0.6	0.4	2.7	6.9	4.3	6.8	16.8	61.2	365.9
43	ORU	ORURO	95.4	78.3	55.1	17.0	3.2	3.2	3.6	9.9	21.9	17.8	30.2	55.6	391.1
44	PAT	PATACAMAYA	101.6	71.4	50.7	18.7	6.9	4.7	4.1	8.4	20.1	21.5	32.8	59.8	400.7
7	08328	PAUCARANI	110.5	95.8	75.3	11.1	2.8	4.3	3.0	4.6	4.9	7.0	17.9	48.7	385.7
45	PAZ	PAZNA	121.0	93.3	64.8	10.2	2.3	2.5	1.3	7.1	13.0	17.8	25.9	56.4	415.7
11	0881	PIZACOMA	166.8	110.4	99.8	29.0	6.1	4.2	2.2	9.8	8.2	16.2	37.1	97.2	586.9
46	QUI	QUILLACAS	107.2	59.0	52.2	12.2	1.0	1.6	1.5	4.3	7.8	8.8	17.6	46.5	319.6
47	SAC	SACABAYA	81.1	67.6	39.2	4.0	0.6	1.7	0.0	6.7	1.7	5.1	7.3	26.0	241.1
48	SAJ	SAJAMA	90.8	88.0	42.3	2.2	0.7	0.1	0.1	0.4	1.2	8.0	19.1	56.3	309.1
50	SAN	SAN ANDRES DE MACHA	152.3	100.5	89.2	30.5	3.7	6.5	3.0	10.3	17.8	26.1	43.6	91.4	574.9
53	SJA	SAN JOSE ALTO	86.0	68.2	43.3	15.3	2.3	2.8	1.9	8.1	10.4	11.6	21.5	50.0	321.6
54	SJK	SAN JOSE DE KALA	120.6	113.7	47.4	7.0	0.9	1.5	2.1	4.3	13.2	8.6	8.9	54.0	382.3
55	SJU	SAN JUAN HUANCOLLO	158.7	123.4	114.9	49.1	6.5	8.3	4.3	11.9	21.4	33.2	66.7	89.7	688.0
56	SMA	SAN MARTIN	124.0	58.9	46.1	4.4	0.2	1.1	7.6	3.2	3.9	7.1	13.6	40.4	310.5
49	SAM	SANTIAGO DE MACHAC	126.6	93.3	72.7	19.1	1.7	3.6	2.2	5.5	5.7	13.8	25.6	58.7	428.6
51	SEP	SEPULTURAS	127.3	68.5	45.2	11.3	0.7	2.8	1.8	5.4	0.4	5.6	11.4	48.0	328.3
52	SIC	SICASICA	94.5	71.6	52.1	18.2	6.4	7.6	4.7	10.6	15.7	22.9	35.2	56.1	395.5
57	TAC	TACAGUA (Challapata)	106.0	73.8	56.4	10.5	3.3	2.4	1.6	6.4	13.5	15.7	32.5	65.3	387.1
58	TAM	TAMBILLO	123.5	84.4	66.0	30.6	10.7	6.1	6.7	13.7	25.4	37.9	49.8	66.7	521.7
59	TIA	TIAHUANACU	125.8	90.7	74.9	31.8	10.4	5.5	8.7	12.4	22.3	33.4	52.1	78.1	546.2
60	TOD	TODOS SANTOS	85.8	73.9	45.0	3.9	0.1	0.9	1.1	0.6	1.5	3.8	10.7	31.2	258.6
61	TUR	TURCO	143.7	97.0	69.6	8.7	0.6	0.0	0.2	2.0	8.7	7.8	26.2	85.2	449.7
62	ULL	ULLOMA	99.8	66.4	72.9	13.4	1.8	0.3	0.8	4.9	7.5	6.4	30.4	66.7	371.4
63	UMA	UMALA	105.8	63.3	54.6	21.4	4.9	1.5	3.5	5.1	8.9	12.2	32.4	68.0	381.7
64	VIA	VIACHA	133.5	90.1	69.5	31.8	9.9	4.2	6.9	13.7	26.1	36.4	52.1	77.3	551.7
4	08320	VILACOTA	137.9	129.7	89.1	11.1	2.4	1.5	1.2	5.3	3.9	7.1	16.9	52.1	458.2
1	01000005	VISVIRI	95.1	71.3	54.5	11.0	1.6	2.8	3.2	5.2	0.9	12.1	12.9	33.1	303.8

4.2 CALIDAD DE AGUAS

El uso del agua estará limitado no solamente por la cantidad de agua disponible sino también por su calidad. En la cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero se presentan problemas de contaminación, cuyo origen es tanto natural como antrópico. Como las aguas del río Mauri y sus afluentes se utilizan para el riego de bofedales y las aguas del río Desaguadero son utilizadas para el riego de cultivos y forrajes, existe el riesgo de contaminación de suelos, productos agrícolas y forrajes y como consecuencia, de problemas de salud en animales y humanos.

Por esa razón y como parte de los estudios básicos, se llevó a cabo un Estudio de Calidad de aguas y Evaluación Ambiental en las Cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero (Orsag et al, 2007). De ese estudio se presenta a continuación una síntesis de los temas relativos a calidad de aguas.

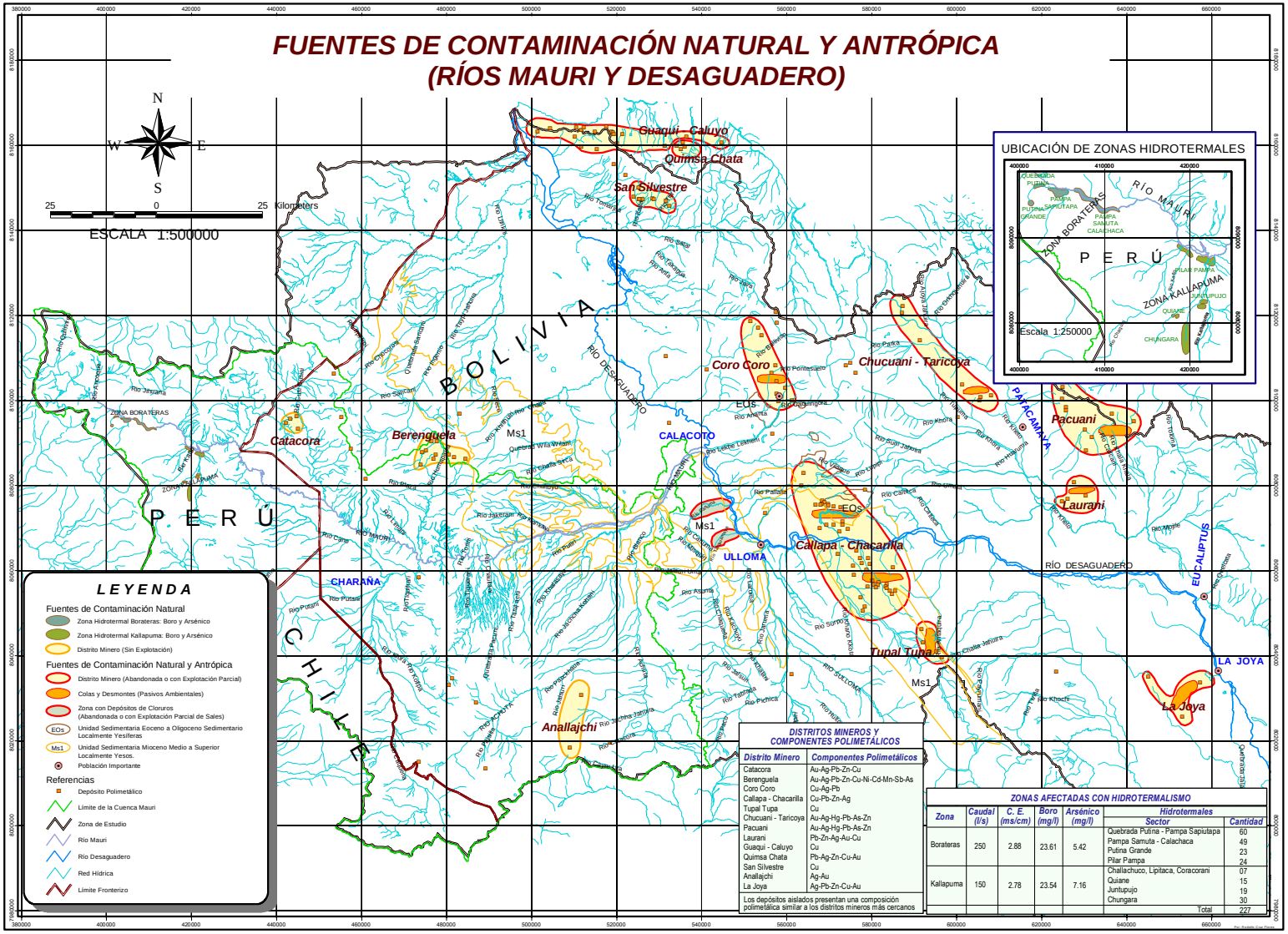
4.2.1 Fuentes de contaminación

La ubicación de las principales fuentes de contaminación se muestra en la figura 4.6. En el recuadro superior derecho se observan las fuentes hidrotermales de origen volcánico, situadas en la parte alta de la cuenca del río Mauri, en Perú. Esas aguas presentan altas concentraciones de boro y arsénico, y al ser introducidas al sistema hídrico superficial, afectan la calidad de los dos ríos principales: Mauri y Desaguadero. La contaminación antrópica en la cuenca alta es muy modesta: solamente se tiene referencias de explotación de oro aluvial en la comunidad de Tiquerani, cerca al río Caquena, pero existen concesiones mineras que podrían entrar en explotación en un futuro próximo.

En la parte boliviana del área de estudio existen importantes yacimientos mineros de cobre (ie: San Silvestre y Corocoro), a veces asociados a otros metales como el oro, plata, plomo, zinc y en algunos casos al arsénico. Varias formaciones geológicas como Berenguela están constituidas de rocas sedimentarias y volcánicas del Terciario, que contienen minerales polimetálicos (plata, oro, cobre, arsénico, zinc, cadmio, plomo, antimonio y otros). De estos elementos, el plomo y cadmio son más tóxicos para los animales y el hombre, mientras que el cobre y cobalto son más fitotóxicos. Algunos de estos elementos como el Cu, Zn y Co, son necesarios para las plantas en cantidades muy pequeñas, ya que juegan un papel muy importante en el metabolismo de las mismas, pero en cantidades mayores son tóxicos.

En la cuenca del río Bajo Desaguadero (parte media), existen minas (Corocoro, Chacarilla, etc.) que fueron explotadas hace décadas y podrían ser reactivadas, especialmente para explotar cobre. Por otro lado, el Desaguadero atraviesa entre Calacoto, Ulloma y Chilahuala depósitos del Terciario, que aportan yeso, sales y boro. Un afluente de este tramo, el río Tarquiamaya, aporta cantidades elevadas de cloruros y boro. Esta zona se caracteriza también por una alta degradación (erosión), por lo que aporta grandes volúmenes de sedimentos al río Desaguadero.

Figura 4.6: Fuentes de Contaminación Potencial Natural y Antrópica (ríos Mauri y Desaguadero)



Fuente: Orsag et al (2007)

La contaminación minera más importante proviene de la faja mineralógica de la Cordillera Oriental, donde se originan varias subcuencas que aportan a la margen noreste del lago Poopó (Japo, Huanuni, etc). Esas subcuencas no forman parte del área de estudio, pero están próximas a éste. Aparte de los grandes depósitos de colas y desmontes de esas minas, producto de la explotación de muchas décadas, las aguas superficiales se contaminan por el drenaje ácido de roca, debido a que con frecuencia los depósitos polimetálicos en las rocas de la Cordillera, vienen asociados a la pirita (sulfuro de hierro). El agua de lluvia reacciona con este mineral favoreciendo la formación de ácido sulfúrico. Este ácido, acelera la movilización de los metales pesados (la mayoría de los metales son movibles en condiciones ácidas), que así pueden pasar a las aguas superficiales y subterráneas.

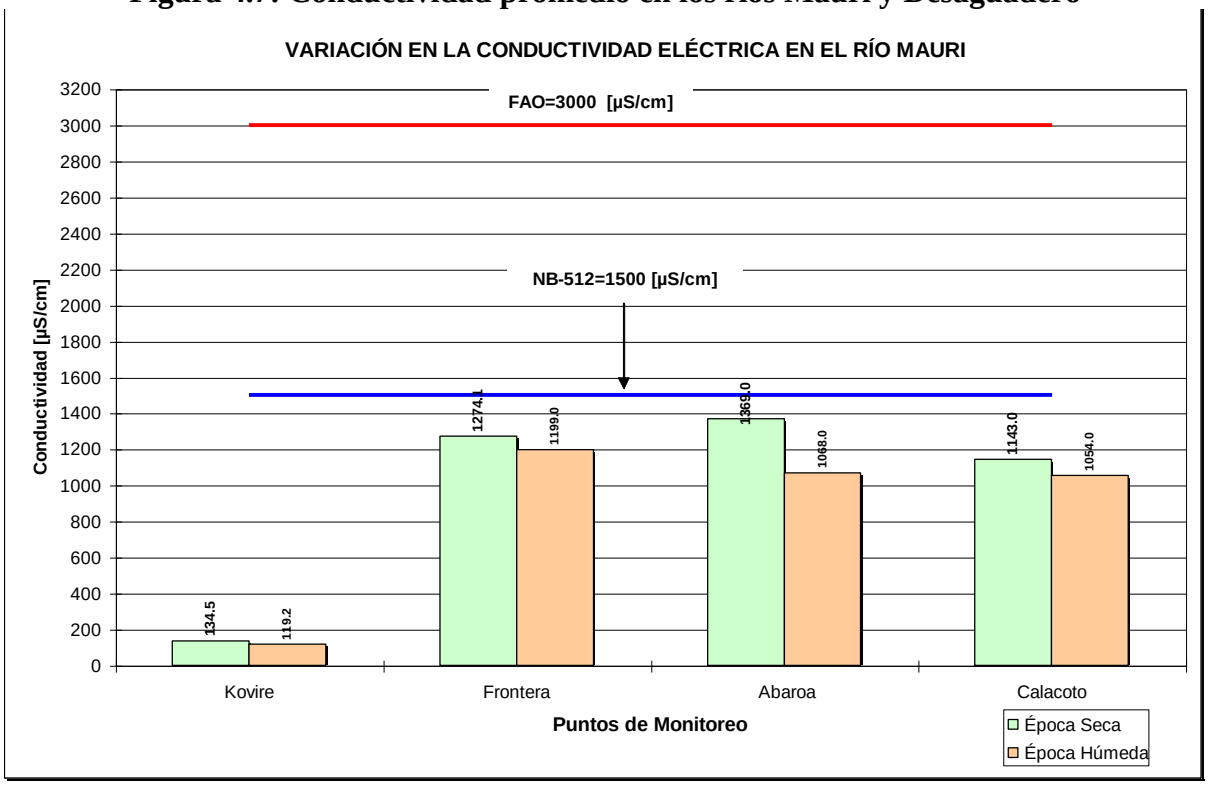
Las aguas del río Desaguadero, según los estudios realizados por Orsag y Miranda (2000 a 2004) en las zonas de riego de Chilahuala y El Choro, aportan a los suelos regados sales (cloruros, sulfatos de sodio, boro y arsénico) y algunos metales pesados, que se van acumulando paulatinamente. En algunos sistemas de riego se observa que los suelos regados por varias décadas presentan mayor acumulación de metales (Cu, Ni, Zn, As, Cr, Pb, Ag, Al Fe, y otros) en sus horizontes superficiales, que los suelos no regados.

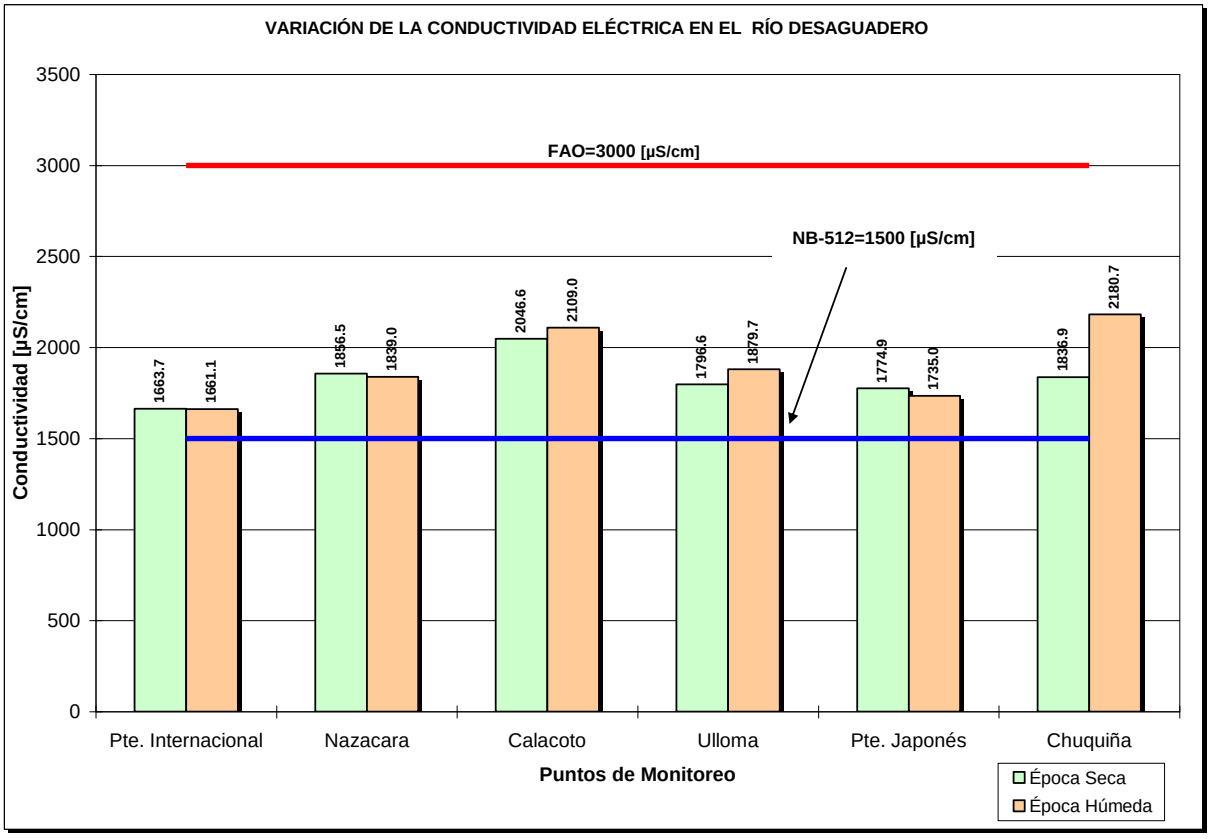
4.2.2 Calidad y clasificación de aguas

Las figuras 4.7 a 4.11 muestran la conductividad (que se asocia al contenido de sales disueltas) y las concentraciones de boro, arsénico y cadmio en algunos puntos seleccionados a lo largo de los ríos Mauri y Desaguadero, como promedios de época húmeda (diciembre-marzo o diciembre-abril) y seca (abril/mayo-noviembre). La ubicación de esos y otros puntos se muestra en la figura 4.12. La línea azul en cada gráfica indica los valores límite de la Norma Boliviana 512 para el caso de los cuerpos de agua destinadas al consumo humano, que en algunos casos coincide con los límites de la OMS y del anexo a la ley 1333 de Medio Ambiente. La línea roja indica los valores límites permisibles del agua con fines de riego, según la FAO, que en algún caso coincide con el límite de la clase D de la ley 1333. Para el caso del boro aparece una tercera línea de color verde, que corresponde a los límites de las clases A, B, C, D de la ley 1333.

En la estación peruana de Kovire, ubicada en el tramo superior del río Mauri, las aguas son de muy buena calidad físico-química: baja conductividad, el contenido de arsénico y boro está por debajo de la norma 512 y no se detecta cadmio. Son aptas para consumo humano. Aguas abajo de Kovire se produce el ingreso de aguas hidrotermales y por tanto un drástico cambio en la calidad: la conductividad (y por tanto el contenido de sales) en Frontera y Abaroa aumenta más de 10 veces. El contenido de arsénico supera en más de 50 veces el límite permisible para consumo humano y en más de 20 veces el de la FAO. También los niveles de boro superan los límites permisibles en ambas épocas. En ese tramo el agua del río Mauri es tóxica para el hombre y los seres humanos. A partir de Abaroa, se observa dilución por los aportes de los afluentes, por lo que en Calacoto Mauri, las concentraciones de boro y arsénico disminuyen apreciablemente, pero se mantienen por encima de los límites permisibles para consumo humano y riego. En general las aguas son medianamente aptas para uso agrícola, pero la presencia de boro y arsénico disminuye su aptitud como agua de riego. Según la Clasificación de la USDA, son aguas de tipo C3-S1 y C3-S2, que por su contenido de sodio no deben usarse en suelos cuyos drenajes sean deficientes.

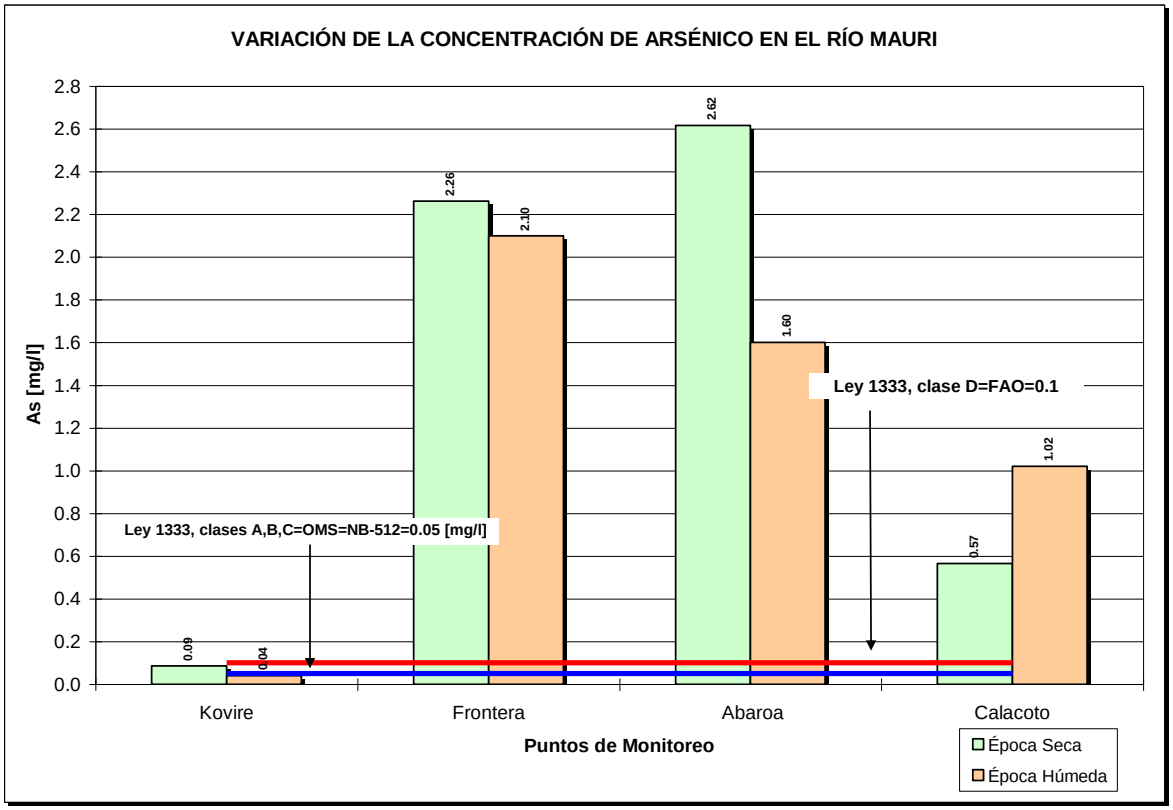
Figura 4.7: Conductividad promedio en los ríos Mauri y Desaguadero

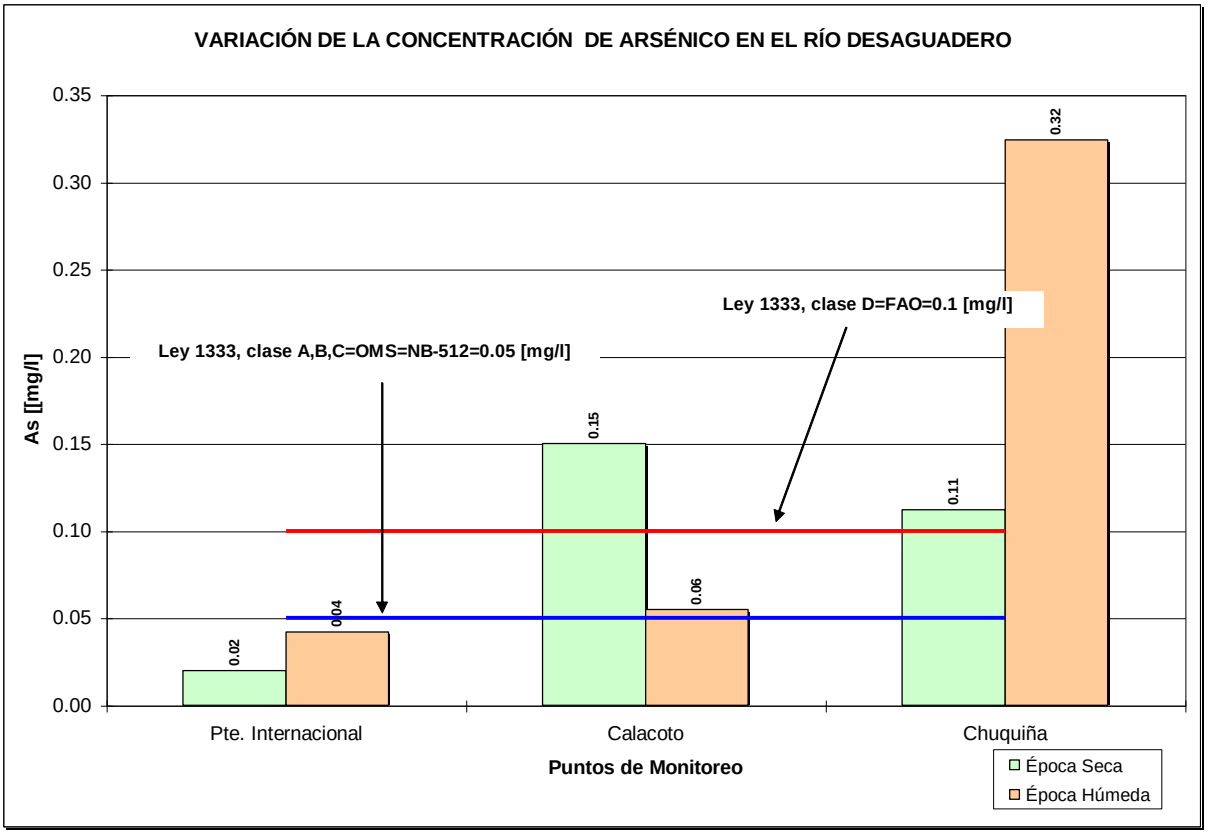




Fuente: Orsag et al (2007)

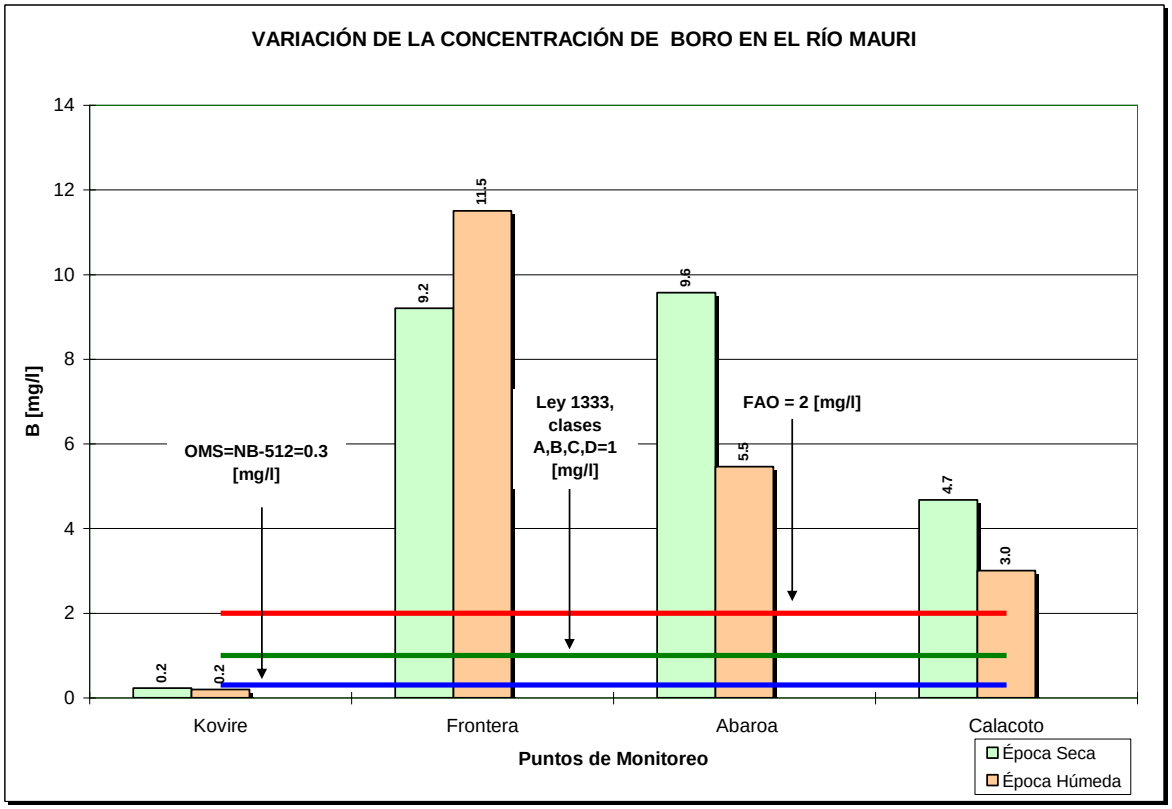
Figura 4.8: Concentración promedio de arsénico en los ríos Mauri y Desaguadero





Fuente: Orsag et al (2007)

Figura 4.9: Concentración promedio de boro en los ríos Mauri y Desaguadero



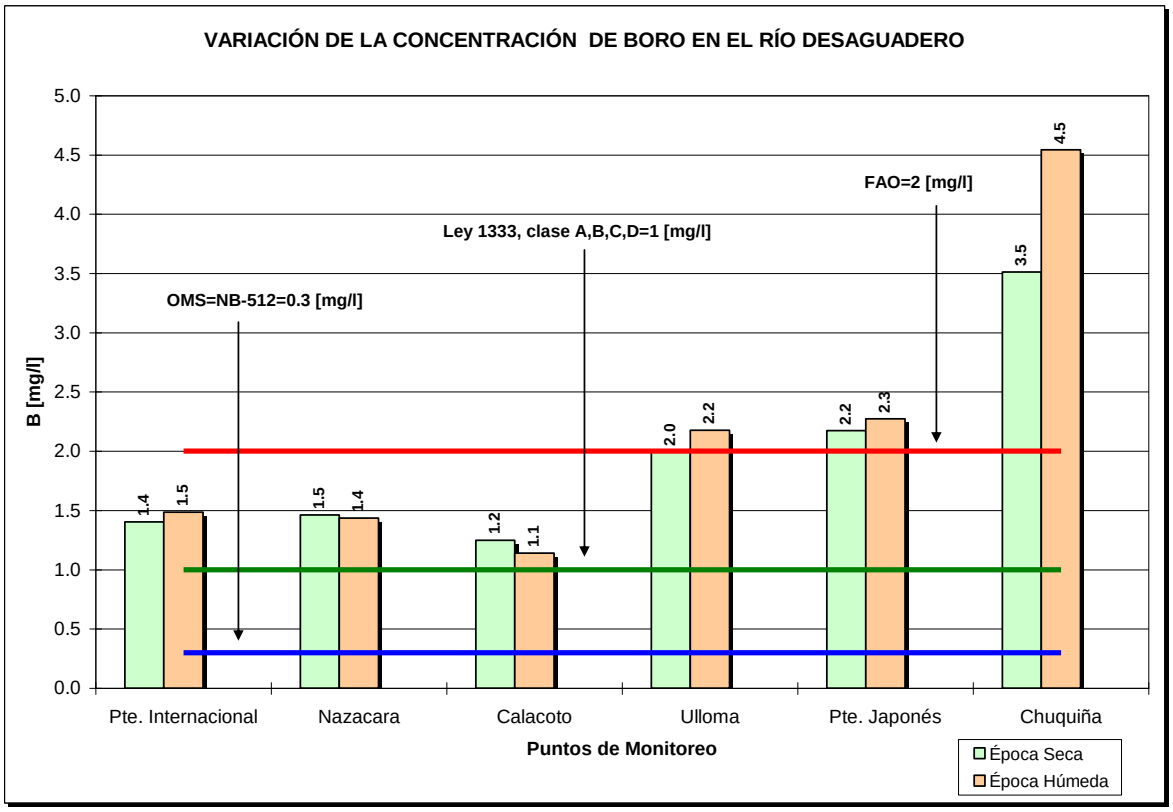
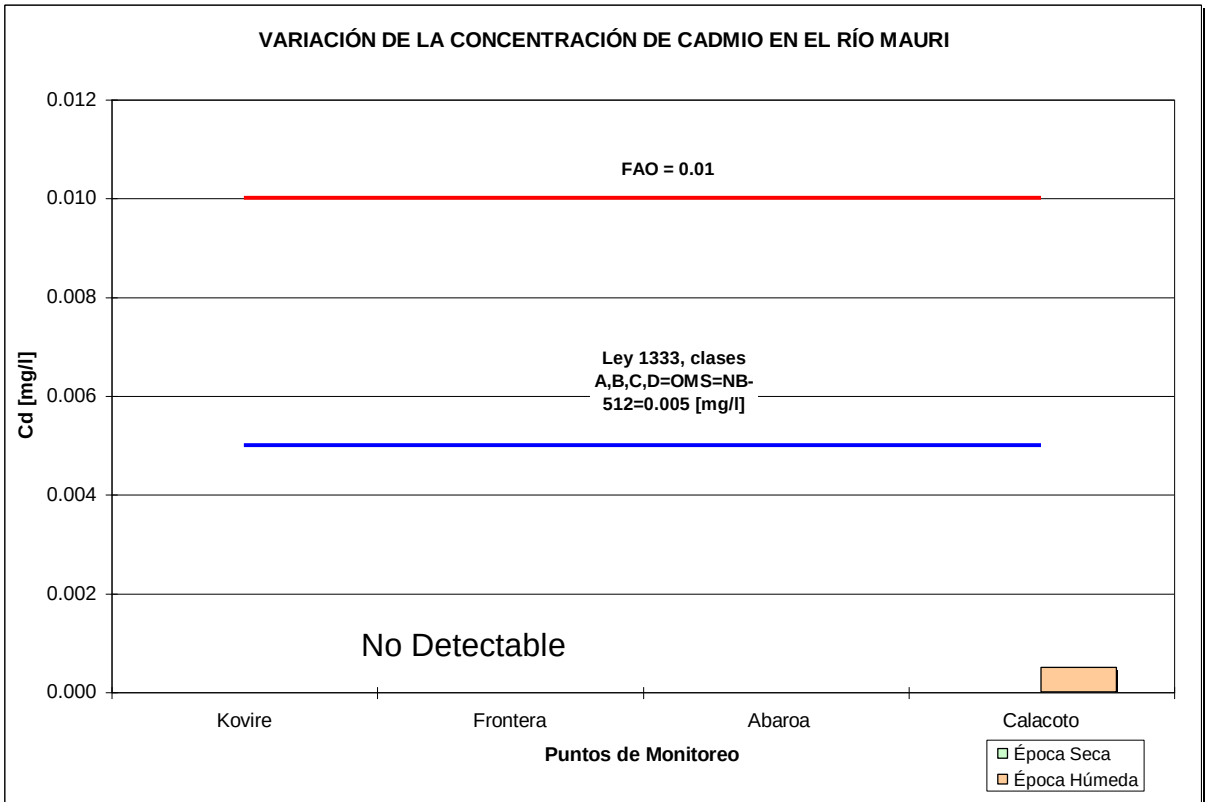


Figura 4.10: Concentración promedio de cadmio en los ríos Mauri y Desaguadero



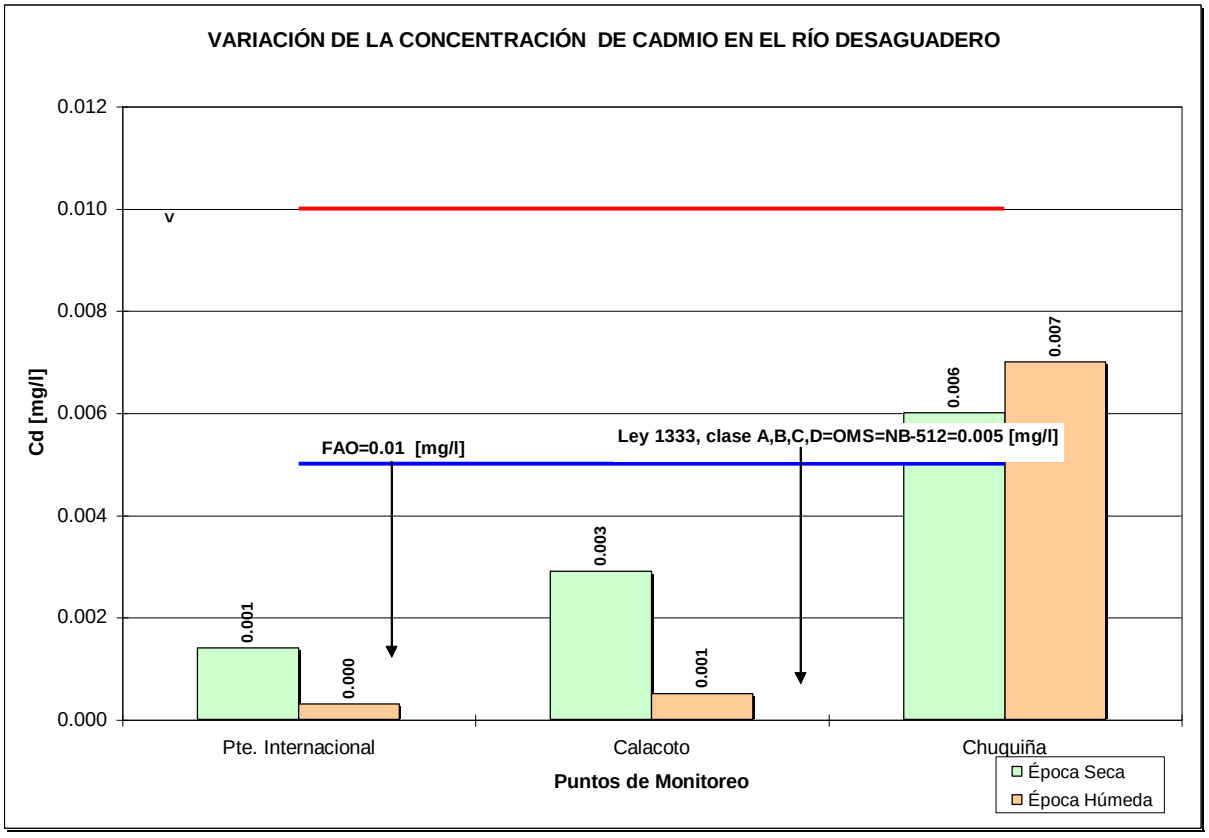
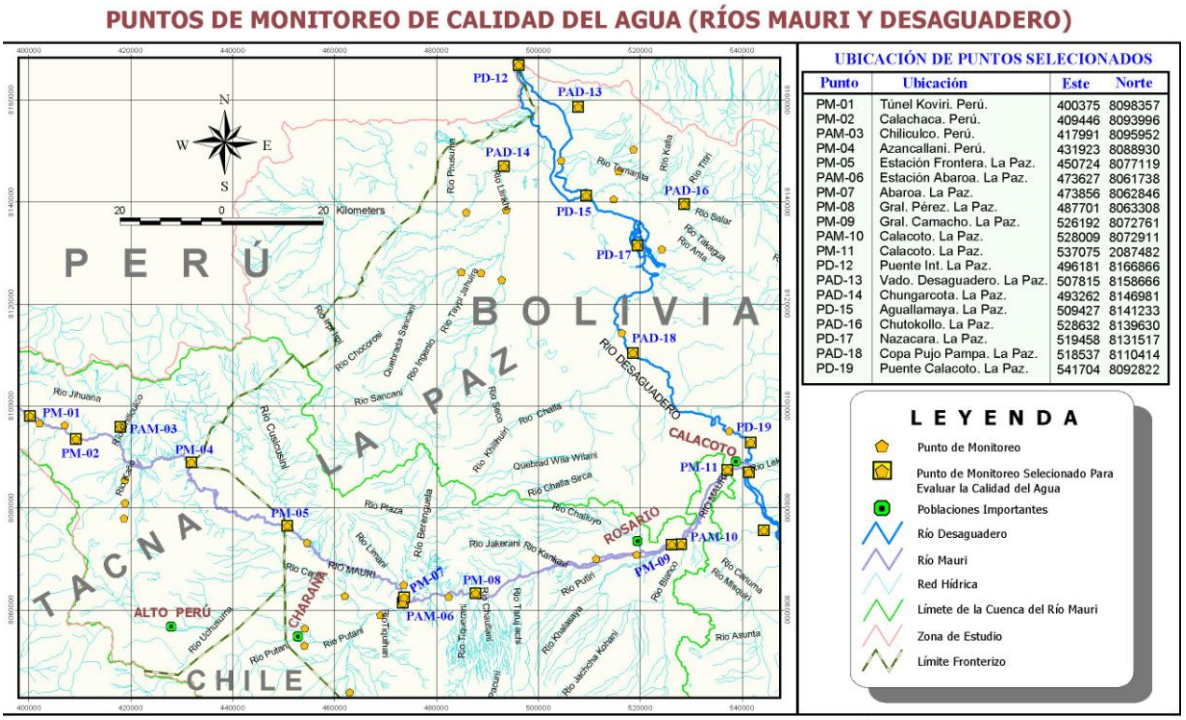


Figura 4.11: Ubicación de puntos de monitoreo



Punto	Ubicación	Este	Norte
PM-01	Túnel Koviri. Perú.	400375	8098357
PM-02	Calachaca. Perú.	409446	8093996
PAM-03	Chiliculco. Perú.	417991	8095952
PM-04	Azancallani. Perú.	431923	8088930
PM-05	Estación Frontera. La Paz.	450724	8077119
PAM-06	Estación Abaroa. La Paz.	473627	8061738
PM-07	Abaroa. La Paz.	473856	8062846
PM-08	Gral. Pérez. La Paz.	487701	8063308
PM-09	Gral. Camacho. La Paz.	526192	8072761
PAM-10	Calacoto. La Paz.	528009	8072911
PM-11	Calacoto. La Paz.	537075	2087482
PD-12	Puente Int. La Paz.	496181	8166866
PAD-13	Vado. Desaguadero. La Paz.	507815	8158666
PAD-14	Chungarcota. La Paz.	493262	8146981
PD-15	Aguallamaya. La Paz.	509427	8141233
PAD-16	Chutokollo. La Paz.	528632	8139630
PD-17	Nazacara. La Paz.	519458	8131517
PAD-18	Copa Pujo Pampa. La Paz.	518537	8110414
PD-19	Puente Calacoto. La Paz.	541704	8092822

Punto	Ubicación	Este	Norte
PD-20	Confluencia. Calacoto. La Paz.	541308	8087024
PAD-21	Jesús de Machaca. La Paz.	544274	8075586
PD-22	Ulloma. La Paz.	548854	8068858
PAD-23	Río Caranguillas. La Paz.	555967	8054006
PD-24	Puente Japonés. Pacajes. La Paz.	573750	8067606
PAD-25	Patacamaya. La Paz.	614592	8092364
PD-26	Eucaliptus. Oruro.	656201	8052759
PD-27	Chuquiña. Toledo. Oruro.	664850	8028651
PD-28	Puente Español. Cercado. Oruro.	697020	8001952

Fuente: Orsag et al (2007)

La calidad de las aguas del río Desaguadero antes de la confluencia con el río Mauri, está influenciada por el Lago Titicaca. Las aguas son algo salinas, contienen cloruros, sodio, y algún metal en concentraciones modestas, por lo que requieren de tratamiento para consumo humano y se debe tomar precauciones para su uso en riego. También se nota la presencia de boro y arsénico de origen natural.. De acuerdo con los criterios de la FAO y de la USDA, las aguas se pueden usar para riego, pero con moderación por el contenido de arsénico, boro y la presencia de sales que elevan la conductividad eléctrica y la RAS.

La influencia del río Mauri sobre la calidad de las aguas del río Desaguadero se observa a partir de la confluencia en Calacoto. La conductividad (y por tanto la salinidad) del río Desaguadero disminuye en Ulloma, debido al ingreso de aguas menos salinas provenientes del Mauri, para luego aumentar río abajo a medida que el río recibe el aporte de otras fuentes salinas. En cambio, la concentración de arsénico y el boro en el Desaguadero aumenta significativamente por el aporte del Mauri, aunque se mantiene por debajo de las concentraciones registradas en éste río gracias a los efectos de dilución. De todas maneras, las concentraciones de boro y arsénico en el río Desaguadero aguas abajo de Calacoto están por encima de los límites permisibles para consumo humano y muy cerca a los límites para riego.

El hecho de que las concentraciones de boro aumenten incluso aguas abajo de Ulloma indica que hay otras fuentes que aportan al río Desaguadero, además del río Mauri. En lo tramos de Ulloma a Chuquiña y de Chuquiña a la desembocadura en el lago Poopó, algunos afluentes del río Desaguadero, como el Tarquiamaya y el Cañuma, aportan una gran cantidad de sales y otros elementos, como el boro en el caso del Tarquiamaya. Otros afluentes colectan aguas de zonas con gran población humana (ríos Jilakata y Kheto), por lo que se detecta aceites y grasas, amoniaco y coliformes. Por último, en ese tramo existen minas que han dejado desmontes y colas, lo que es un factor importante para que aumente la concentración de varios metales, como mercurio, hierro, manganeso y níquel.

La tabla 4.3 muestra los valores promedio de varios parámetros físico-químicos en varios puntos situados a lo largo de los ríos Mauri y Desaguadero, cuya ubicación se muestra en la figura 4.11. En algunos puntos, los promedios se obtuvieron en base a un número apreciable de muestras, mientras que en otros puntos se dispuso de muy pocas muestras y en algún caso, de solamente una. Los análisis se hicieron en varios laboratorios y se siguieron diversos procedimientos de recolección de las muestras. Todo eso explica algunas diferencias e inconsistencias en los datos de esa tabla.

Tabla 4.3: Valores promedio de mediciones de parámetros físico-químicos en las cuencas de los ríos Mauri y Desaguadero

Zona	CODIGO	Lugar de muestreo	Época	Caudal m^3/seg	Cond µS/cm	pH	TDS mg/l	Cl^- mg/l	$SO_4^=$ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	As mg/l	B mg/l	Cd mg/l	Co mg/l	Cu mg/l
1	PM-01	Río Ancoaque. Tunel Kovire	Seca	0.146	134	8.713	104	8	26	5	3	24	0.086	0.228			
			Húmeda	0.214	119	9.52	106	5	16	4	2	17	0.040	0.200	< 0.01		
	PM-02	Río Maure en Calachaca	Seca	0.873	2282	7.576	1502	685	64	33	14	397	4.234	23.320	<0.002		<0.001
			Húmeda	1.025	1749	7.649	1288	536	54	4	3	390	6.300	23.100	< 0.01		
	PM-04	Río Maure en Azancallani	Seca	0.910	1546	8.592	953	348	49	23	18	264	1.750	8.011	<0.002		<0.001
			Húmeda	2.500	1325	8.519	912	366	54	5	13	236	3.600	12.300	< 0.01		
2	PM-05	Río Maure en Estación Frontera	Seca	1.912	1274	8.667	774	297	38	22	13	243	2.263	9.203	<0.002		<0.001
			Húmeda	2.393	1199	8.479	830	319	50	5	15	200	2.100	11.500	< 0.01		
	PM-07	Río Mauri antes c. Río Caquena	Seca	1.920	1369	8.610	817	305	42	25	15	228	2.617	9.573	0.001		
			Húmeda	5.002	1068	8.329	612	187	45	16	12	152	1.600	5.460	< 0.01		
	PM-08	Río Maure, Gral. Campero	Seca	2.229	1553	8.500	766	425	130	40	31	323	1.023	7.250			
			Húmeda														
	PM-09	Río VilaPalca, Charaña	Seca	2.995	1175	8.509	716	236	85	34	24	214	0.839	4.675	0.001		
			Húmeda														
	PM-11	Río Mauri, Calacoto	Seca	6.701	1143	8.441	611	226	82	40	17	150	0.565	4.674	0.002	0.050	0.036
			Húmeda	19.135	1054	8.534	745	325	95	47	18	217	1.021	3.004	0.001	0.040	0.041
3	PAM-03	Río Chiliculco, Perú	Seca		384	9.350	280	59	32	2	3	68	0.300	0.800			
			Húmeda		729	8.439	514	137	50	20	19	19	0.050	0.900	< 0.01		
	PAM-06	Río Caquena en Estación Abaroa	Seca	0.424	3233	8.320	1894	757	258	77	80	561	1.847	8.928	0.003		
			Húmeda	1.812	1595	8.299	1304	346	225	45	37	494	0.800	0.800	< 0.01		
	PAM-10	Río Blanco	Seca	6.971	1414	8.538	983	336	150	46	37	293	0.519	2.113			
			Húmeda	7.299	1420	8.54	998	338	157	48	39	298	0.408	1.618	< 0.02		
4	PD-12	Río Desaguadero, Pte. Internacional	Seca	57.905	1663	8.774	834	297	237	52	37	206	0.020	1.403	<0.1	0.040	0.000
			Húmeda	46.762	1661	8.708	889	318	253	52	37	207	0.042	1.485	0.040	0.040	0.004
	PD-15	Río Desaguadero, Aguallamaya	Seca		1855	9.105	931	336	278	56	43	230		1.603			
			Húmeda		1767	9.214	895	309	255	62	35	198		1.542			
	PD-17	Río Desaguadero, Nazacara	Seca		1856	8.957	939	325	271	60	41	230		1.462			
			Húmeda		1839	9.418	921	328	239	60	40	214		1.435			
	PD-19	Río Desaguadero, Calacoto	Seca	56.670	2046	8.751	1077	355	278	68	39	268	0.150	1.249	0.000	0.050	0.000
			Húmeda		2109	8.781	1095	420	307	83	36	286	0.055	1.139	0.003	0.040	0.000

Zona	Código	Lugar de muestreo	Época	Caudal m^3/seg	Cond µS/cm	pH	TDS mg/l	Cl^- mg/l	$SO_4^=$ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	As mg/l	B mg/l	Cd mg/l	Co mg/l	Cu mg/l
4	PD-20	Ríos Mauri-Desaguadero, confluencia	Seca	45.173	1906	7.660	1186	329	276	43	39	265	0.137	0.900			
			Húmeda		1456	8.800	711										
	PD-22	Río Desaguadero, Ulloma	Seca	72.260	1796	8.656	906	320	214	58	31	221		1.998			
			Húmeda		1879	8.373	944	365	209	64	31	220		2.177			
	PD-24	Río Desaguadero, Pte. Japonés	Seca		1774	8.491	926	335	218	62	29	223	0.041	2.172	0.001	0.050	0.013
			Húmeda	165.955	1735	8.430	895	351	183	68	24	222	0.082	2.273	0.000	0.040	0.015
	PD-26	Río Desaguadero, Eucaliptos	Seca		1884	8.467	946	304	227	67	33	243	0.341		0.003		0.005
			Húmeda		1624	8.284	846	279	181	66	23	203	0.136		0.001		0.003
	PD-27	Río Desaguadero, Chuquiña	Seca		1836	8.817	1060	446	197	62	30	298	0.112	3.513	0.006	0.080	0.015
			Húmeda		2180	8.404	1215	476	207	79	24	361	0.324	4.544	0.007	0.050	0.012
	PD-28	Río Desaguadero, Pte. Español	Seca	8.820	2488	8.627	1247	529	314	77	45	344	0.243	2.709	0.020	0.070	0.000
			Húmeda		2792	8.300	1420	658	271	90	38	396	0.138	1.913	0.035	0.050	0.000
5	PAD-13	Río Lucuchata	Seca		458	7.980	232	7	80	49	7	26		0.272			
			Húmeda		285	8.322	148	3	45	36	5	12		0.322			
	PAD-14	Río Jacha Mauri y Río Tujsa Jahuira	Seca	1.23	750	7.77	787	176	151.53	93	12	93	0.015	0.8	0.003		0.067
			Húmeda	4.191	643	8.050	553	131	75	50	10	68	0.029	0.487	< 0.0001		0.012
	PAD-16	Río Desaguadero, Chutokhollo	Seca	0.385	2768	8.410	1401	621	336	131	21	387		0.270			
			Húmeda		1718	8.406	865	323	218	100	16	205		0.305			
	PAD-18	Río Khillhuiri	Seca		652	8.420	330	31	146	88	6	29		0.232			
			Húmeda		660	8.492	332	29	143	88	8	26		0.327			
	PAD-21	Río Khañu	Seca		6152	8.318	3147	1677	244	161	16	1015		0.840			<0.049
			Húmeda		6626	8.140	3323	1823	264	242	17	953		0.779			
	PAD-23	Río Caranguillas	Seca	2.035	1156	8.372	609	201	128	67	7	141	0.009	0.496	0.002		0.048
			Húmeda	0.740	1080	8.208	598	263	158	84	10	147	0.013	0.554	0.0002		0.019
	PAD-25	Río Kheto, aguas abajo	Seca	0.020	697	8.700	440	26	67	49	16	67	0.033	1.040	0.002		< 0.049
			Húmeda	0.160	363	7.910	203	13	71	33	13	21	0.009	0.359	0.000		0.015

Capítulo 5

DEMANDA Y DERECHOS DE AGUA

Capítulo 6

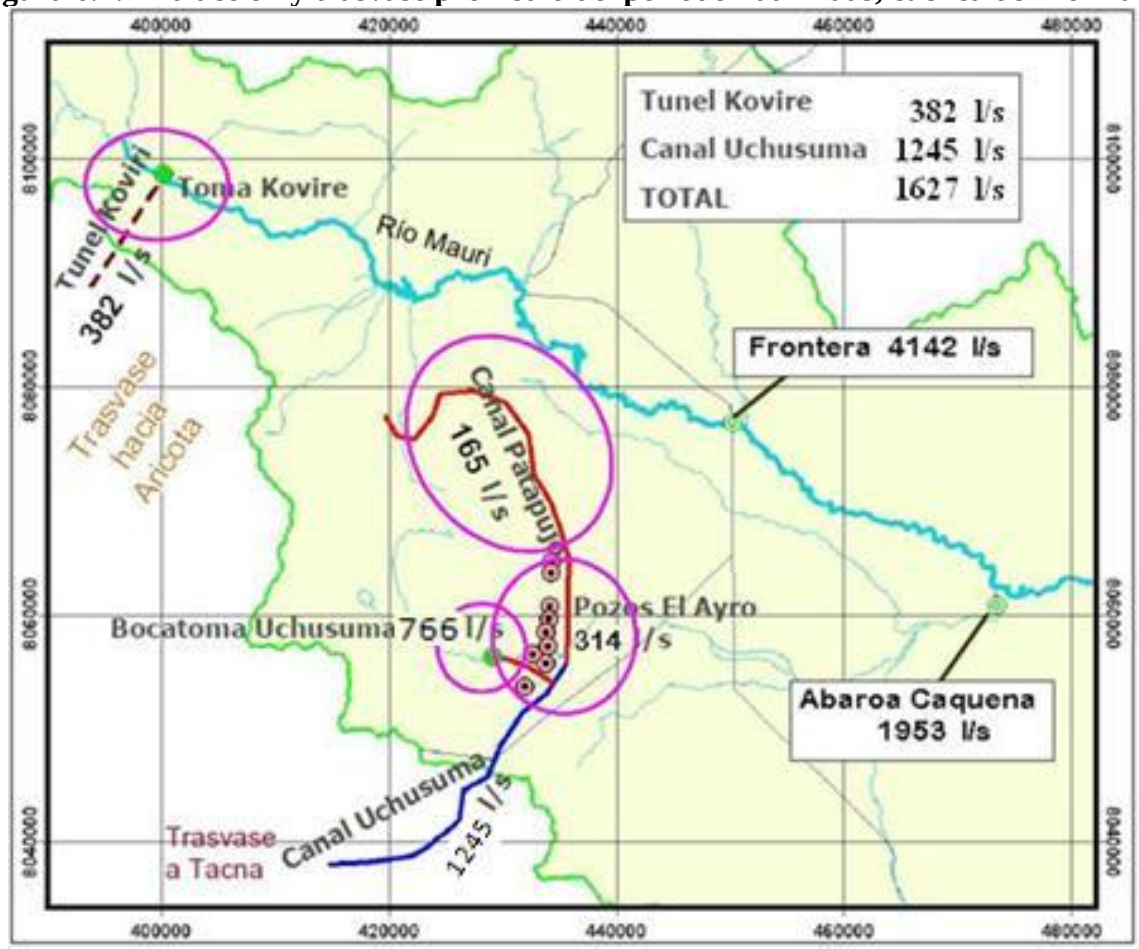
VALIDACIÓN DEL MODELO PARA EL ESCENARIO HISTÓRICO

6.1 EL ESCENARIO HISTÓRICO

Este escenario es una representación de todo el sistema Mauri-Bajo Desaguadero para el periodo histórico, es decir equivale a una línea base con respecto a la cual se compararán los otros escenarios. Para el escenario histórico se creó la red hídrica básica y se realizó la calibración del modelo MIKE BASIN. Para la validación se usaron las series de caudales mensuales del periodo 1965-2008, descritas en el capítulo 4 del presente informe. Por su buena longitud y existencia de registros, ese periodo fue adoptado para la simulación de todos los escenarios.

La figura 6.1 muestra la extracción actual de agua de la cuenca alta del río Mauri en Perú, que es trasvasada hacia la costa del Pacífico, mediante el túnel Kovire y el canal Uchusuma, que también se muestran en la figura. Los caudales de extracción son valores promedio del periodo 2004-2008, en que todas las obras de extracción, regulación y trasvase construidas estuvieron funcionando, en particular los pozos de El Ayro, el túnel Kovire y la represa Paucarani.

Figura 6.1: Extracción y trasvase promedio del periodo 2004-2008, cuenca del río Mauri



Fuente: Elaboración propia con datos del Proyecto Especial Tacna (PET)

Se debe mencionar que el caudal medio del canal Patapujo es significativamente inferior a los valores mencionados en informes del PET (0.23 m^3/s en promedio), antiguos y recientes. Se desconoce la razón de esas diferencias. Al parecer el caudal de 165 l/s de la figura 6.1 corresponde a los registros de una estación situada en la parte final del canal, por lo que las diferencias podrían deberse a las pérdidas a lo largo del canal, que tiene una longitud considerable.

El caudal extraído de los pozos de El Ayro es una estimación realizada restando a la serie de caudales registrados en la estación Puente El Ayro situada en el canal Uchusuma, donde ya se han colectado todas las extracciones, las series de caudales registrados en el canal Patapujo y en la bocatoma sobre el río Uchusuma (incluyendo una estimación de los caudales provenientes de la represa Paucarani, situada en la parte alta de la cuenca de este río).

6.1.1 Datos de entrada

La **oferta de agua** (ver capítulo 4) consideró principalmente a las aguas superficiales, incluyendo vertientes y manantiales, cuyo origen es subterráneo. Este enfoque de modelación está basado en la unicidad del ciclo hidrológico: se considera que tanto la recarga de los acuíferos como el flujo superficial provienen de la precipitación y que la descarga del acuífero se convierte en el caudal base de los ríos. Eso también significa que no se consideró la existencia de acuíferos "fósiles" o aislados en las cuencas estudiadas.

Los sitios de extracción en Perú obligaron a estimar la oferta de agua en algunos puntos adicionales a los incluidos en el Estudio de Hidrología. Para el escenario actual, esos puntos fueron el río Uchusumas en la Bocatoma y el embalse Paucarani, ambos situados en la subcuenca del río Uchusuma. Mediante el modelo digital de elevación se determinó que el área de aporte en la Bocatoma Uchusuma es de 258 km2, de los que 103 km2 corresponden al área de aporte del embalse Paucarani. La tabla 6.1 muestra los caudales medios mensuales en Bocatoma Uchusuma sin considerar el embalse Paucarani, es decir el aporte de un área de 258-103= 155 km2, así como el aporte al embalse de Paucarani. Las series de caudal en Paucarani fueron estimadas por el PET (2011). Las series en Bocatoma Uchusuma también fueron estimadas por el PET (2011), pero fueron modificadas para considerar los caudales que no puede captar la Bocatoma en época de lluvias (diciembre-marzo) en años muy húmedos. La corrección se realizó con el modelo CHAC-SIMULA. Las series completas se muestran en el Anexo I.

Tabla 6.1: Caudales medios mensuales generados para la cuenca Uchusuma

Punto de Control	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Año
Bocatoma Uchusuma	1.07	1.25	0.83	0.45	0.36	0.35	0.31	0.31	0.26	0.22	0.24	0.35	0.50
Represa Paucarani	0.62	0.71	0.57	0.36	0.28	0.28	0.24	0.25	0.20	0.17	0.19	0.23	0.34

Fuente: PET y elaboración propia

La **demanda de agua** consideró a los bofedales de la cuenca del río Mauri, las extracciones y trasvases que realiza el Perú hacia la costa del Pacífico y los sistemas de riego ubicados a lo largo del río Desaguadero.

Se realizó un estudio de demanda de bofedales (AS, 2011), que consideró dos tipos: permanentes y no permanentes. Los bofedales permanentes, que son más productivos y pueden alimentar a un número mayor de cabezas de ganado por unidad de superficie, corresponden aproximadamente al mapeo que se realizó en un estudio anterior (Orsag et al, 2007). Los bofedales no permanentes tienen una demanda por unidad de área considerablemente menor a los permanentes, como se puede observar en la tabla 6.2, donde se sintetiza la superficie y demanda media anual de los bofedales de la cuenca del río Mauri. La tabla 6.2 muestra la demanda media anual de los bofedales de la cuenca del río Mauri por subcuenca (o intercuenca entre estaciones según el caso) controlada por estación hidrométrica (ver figura 4.1 para ubicación), en forma de caudal medio interanual. La demanda máxima de bofedales se produce en los meses de octubre y noviembre, coincidiendo con el máximo de evapotranspiración.

Tabla 6.2: Superficie y demanda media de bofedales de la cuenca del río Mauri

	Superficie [Ha]			Demanda Media [m3/s]		
Subcuenca	**Bofedales No Perm.**	**Bofedales Perm.**	**Total Bofedales**	**Bofedales No Perm.**	**Bofedales Perm.**	**Total Bofedales**
Vilacota	137	685	823	0.03	0.41	0.44
Kovire	379	631	1010	0.09	0.38	0.47
Chuapalca (*)	1568	2527	4094	0.38	1.50	1.89
Frontera	37	65	101	0.01	0.04	0.05
Abaroa mauri	1648	1875	3523	0.40	1.12	1.52
Sub total Abaroa Mauri	**3768**	**5783**	**9551**	**0.92**	**3.44**	**4.36**
Caquena Vertedero (**)	787	1546	2333	0.19	0.92	1.11
Bocatoma uchusuma	219	575	794	0.05	0.34	0.40
Abaroa caquena	3156	2903	6059	0.77	1.73	2.50
Sub total Caquena	**4162**	**5024**	**9186**	**1.02**	**2.99**	**4.01**
Calacoto mauri	1839	1740	3579	0.45	1.03	1.49
Total Mauri	**9770**	**12546**	**22316**	**2.39**	**7.46**	**9.85**

(*) Contiene la suma de bofedales de las subcuencas: Chuapalca + Challapalca+Kalachaca + Mamuta1 +Chiliculco, que aparecían en Molina y Cruz (2008)
(**) Contiene la suma de bofedales de las subcuencas: Caquena Vertedero + Colpacagua+ Caquena Nacimiento, que aparecían en Molina y Cruz (2008)
Fuente: Elaboración propia en base a Estudio de Demanda de Bofedales (AS, 2011)

La suma de los caudales registrados/generados en cada estación hidrométrica, más los caudales extraídos aguas arriba de ese punto, más la demanda de los bofedales situados en la cuenca de aporte a la estación, es lo que ALT (2003) denomina *producción de agua* de la cuenca. Esta representa el volumen máximo que escurriría si no hubiera pérdidas (incluyendo el agua que necesitan los bofedales) ni extracciones en la cuenca aguas arriba del punto de control. Es un valor teórico porque supone, entre otras cosas, que la demanda de los bofedales es satisfecha siempre y porque no diferencia entre las posibles fuentes (río, manantial, napa freática) que alimentan a los bofedales.

La tabla 6.3 muestra la producción de agua por cuencas y subcuencas, estimada en base a los resultados de MIKE BASIN. Los valores de la tabla 6.3 están basados en el promedio

histórico del periodo agosto 1965 a diciembre 2008. Es por eso que la extracción promedio en Kovire (0.12 m3/s) y en Abaroa Caquena (0.47 m3/s. que corresponde a El Ayro más Paucarani) son considerablemente menores que los valores que figuran en la tabla 6.4, porque se ha promediado sobre todo el periodo 1965-08, incluyendo los años en que todavía no funcionaban.

El "caudal excedente" de la tabla 6.3 corresponde al caudal registrado en las estaciones hidrométricas. La extracción de 0.14 m3/s en la intercuenca Chuapalca corresponde al caudal que se deriva por el canal Patapujo.

Teóricamente el caudal medio que se hubiese registrado en la estación hidrométrica de Frontera durante el periodo 1965-08, sería de 4.08 m3/s (3.82+0.26), si no hubiesen existido extracciones. En forma similar, el caudal medio en Abaroa Caquena debió ser 3.27 m3/s (2.39+1.16) si no se producían las extracciones y trasvase.

Tabla 6.3: Producción hídrica de la cuenca del río Mauri (m^3/s), periodo 1965-2008

Subcuencas	Consumo Bofedales No Permanentes	Consumo Bofedales Permanentes	Extracción	Caudal Excedente	Producción hídrica
Vilacota	0.03	0.41		0.35	0.80
Kovire (intercuenca)	0.09	0.38	0.12	0.23	0.81
Kovire (cuenca)	0.13	0.78	0.12	0.58	1.61
Chuapalca (intercuenca)	0.38	1.50	0.14	2.48	4.51
Chuapalca (cuenca)	0.51	2.29	0.26	3.06	6.12
Frontera (intercuenca)	0.01	0.04		0.76	0.81
Frontera (cuenca)	0.52	2.32	0.26	3.82	6.93
Abaroa Mauri (intercuenca)	0.40	1.12		0.97	2.49
Abaroa Mauri (cuenca)	**0.92**	**3.44**	**0.26**	**4.79**	**9.41**
Caquena Vertedero (cuenca)	0.19	0.92		1.55	2.67
Bocatoma Uchusuma (cuenca)	0.05	0.34	0.43	0.43	1.25
Abaroa Caquena (intercuenca)	0.77	1.73	0.47	1.94	4.91
Abaroa Caquena (cuenca)	**1.02**	**2.99**	**0.90**	**2.37**	**7.28**
Calacoto Mauri (intercuenca)	0.45	1.03		8.84	10.33
Calacoto Mauri (cuenca)	**2.39**	**7.46**	**1.16**	**16.00**	**27.02**

Fuente: Elaboración propia

Se tienen registros históricos de caudales extraídos y trasvasados de la parte peruana de la cuenca del río Mauri. La tabla 6.4 muestra los caudales extraídos Qext, para cada sitio de extracción, que sirvieron de referencia para ajustar el modelo. El caudal medio de extracción se estima en 1.643 m3/s, que es casi igual al consignado en la figura 6.1, a pesar de que los periodos son diferentes.

Los caudales de extracción en Bocatoma Uchusuma de la tabla 6.4 no incluyen los aportes del embalse Paucarani. Estos aportes se presentan en forma conjunta con los pozos de El Ayro. Estos datos se consignaron así debido a la forma en que el PET registró y remitió la

información. Como ya se mencionó, esa institución dispone de una estación de medición (Puente El Ayro), donde se registra todo el caudal que fluye por el canal Uchusuma. El caudal de pozos El Ayro más embalse Paucarani se obtuvo restando los datos de río Uchusuma en Bocatoma y canal Patapujo a los registros de Puente El Ayro. En el caso del canal Patapujo, el valor de la tabla 6.4 corresponde al caudal medido en el punto de control ubicado al final del canal. La extracción real es mayor, debido a las pérdidas que se producen en el trayecto.

Tabla 6.4: Caudales medios de extracción y trasvase

Río/Acuífero	Sitio extracción	Qext [m^3/s]	Periodo	Referencia
Uchusuma	Bocatoma Uchusuma	0.498	1991 - 2008	PET, 2011
Casiri y otras	Canal Patapujo	0.155	1980 - 2008	PET, 2011
El Ayro + Paucarani	Pozos El Ayro y Bocatoma Uchusu	0.582	1991 - 2008	PET, 2011
Mauri Kovire	Kovire	0.409	1996 - 2008	PET, 2011
Totales		1.643		

Fuente: Elaboración propia en base a datos del PET

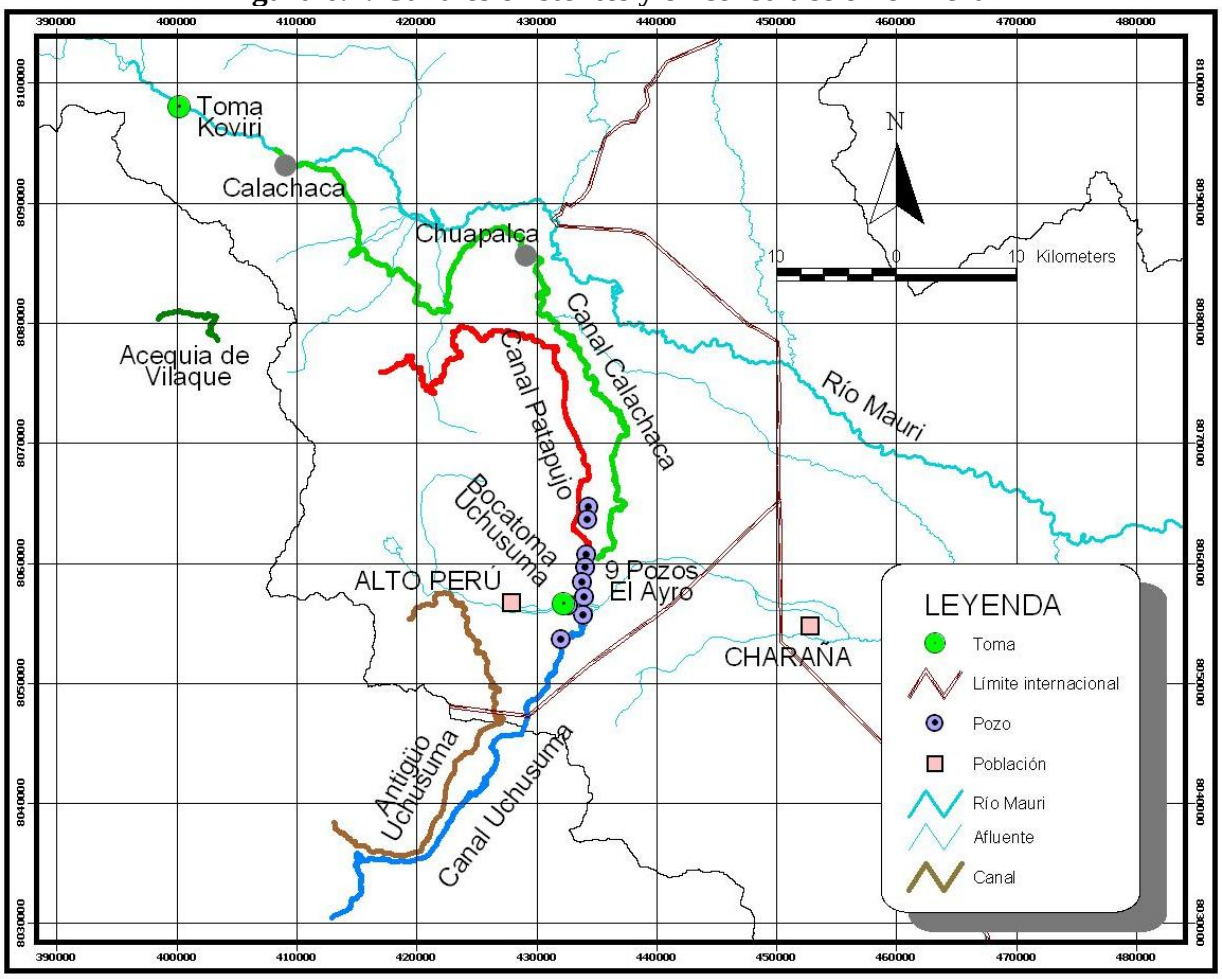
El consumo de los sistemas de riego ubicados a lo largo del río Desaguadero resultó de la combinación de la demanda potencial y la época de riego de cada sistema, descritas en el Estudio de Demanda (AS, 2011) y las limitaciones impuestas por la oferta de agua y las extracciones aguas arriba.

Respecto a los **derechos de agua**, las extracciones y trasvases que se realizan en Perú fueron modelados bajo el supuesto de que tienen una prioridad absoluta, es decir que corresponden a una demanda que debe ser satisfecha de tal manera que el valor promedio del caudal extraído durante el periodo sea igual al valor de Qext de la tabla 6.4. La demanda de los bofedales de la cuenca del Mauri es también de prioridad absoluta, pero para el escenario histórico fue contabilizada aparte de los caudales registrados en cada punto de control. Los **derechos de agua** a lo largo del río Desaguadero siguen una prioridad de cabecera: los sistemas que están río arriba tienen prioridad sobre los que están río abajo, tal como se explica en el estudio de demnada.

6.1.2 Condiciones de funcionamiento del sistema

Las obras hidráulicas existentes actúan como condiciones o “restricciones” del sistema a ser simulado. Las obras de trasvase en Perú incluyen tomas, canales y túneles de derivación. En la figura 6.2 se observan los canales existentes y en construcción en la parte peruana de la cuenca, así como los pozos de El Ayro. El canal Antiguo Uchusuma (también llamado canal Mauri) no se usa en la actualidad. Los canales Uchusuma y Patapujo funcionan desde hace tiempo. El canal Calachaca tiene dos tramos: el primero (Calachaca-Chuapalca) está en fase de proyecto. El tramo Chuapalca-Patapujo está construido en su mayor parte, pero aún no entró en funcionamiento (ver figura 2.11). La tabla 6.5 muestra algunas dimensiones geométricas y la capacidad de los canales principales y de la toma Kovire (Ancoaque). Las dimensiones son solamente una referencia, ya que varían a lo largo del trazo del canal.

Figura 6.2: Canales existentes y en construcción en Perú



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.5: Capacidad y características de canales y tomas de Perú

Obra	Forma	Ancho base (m)	Ancho superior (m)	Altura (m)	Capacidad (m3/s)	Observ.	Fuente
Canal Calachaca-Chuapalca	Trapecial				1.0	Proyectado	PET, 2011
Canal Chuapalca-Patapujo	Trapecial	2.2	4.8	2.0	3.5	Construido 90%	PET, 2011
Canal Patapujo	Trap.	1.90	1.90	1.0		Funciona	PET, 2011
Canal Uchusuma	Trapecial				5.0	Funciona	PET, 2011
Bocatoma Kovire					5.0	Funciona	PET, 2011
Bocatoma Uchusuma					4.5	Funciona	PET, 2011
Túnel Kovire					12	Funciona	PET, 2011

Fuente: Elaboración propia en base a datos del PET

Como algunos estudios peruanos (Vera Fung, 1996; Piérola, 1991) mencionan la posibilidad de extraer agua de la laguna de Vilacota o de su cuenca de aporte, se decidió simular su funcionamiento. Para ello se consideraron los siguientes datos: área de la laguna=10.5 km^2, volumen=13.5 millones m^3. Estos valores corresponden al nivel de vertido, por encima del cual escurre agua de la laguna hacia el río Ancoaque-Mauri.

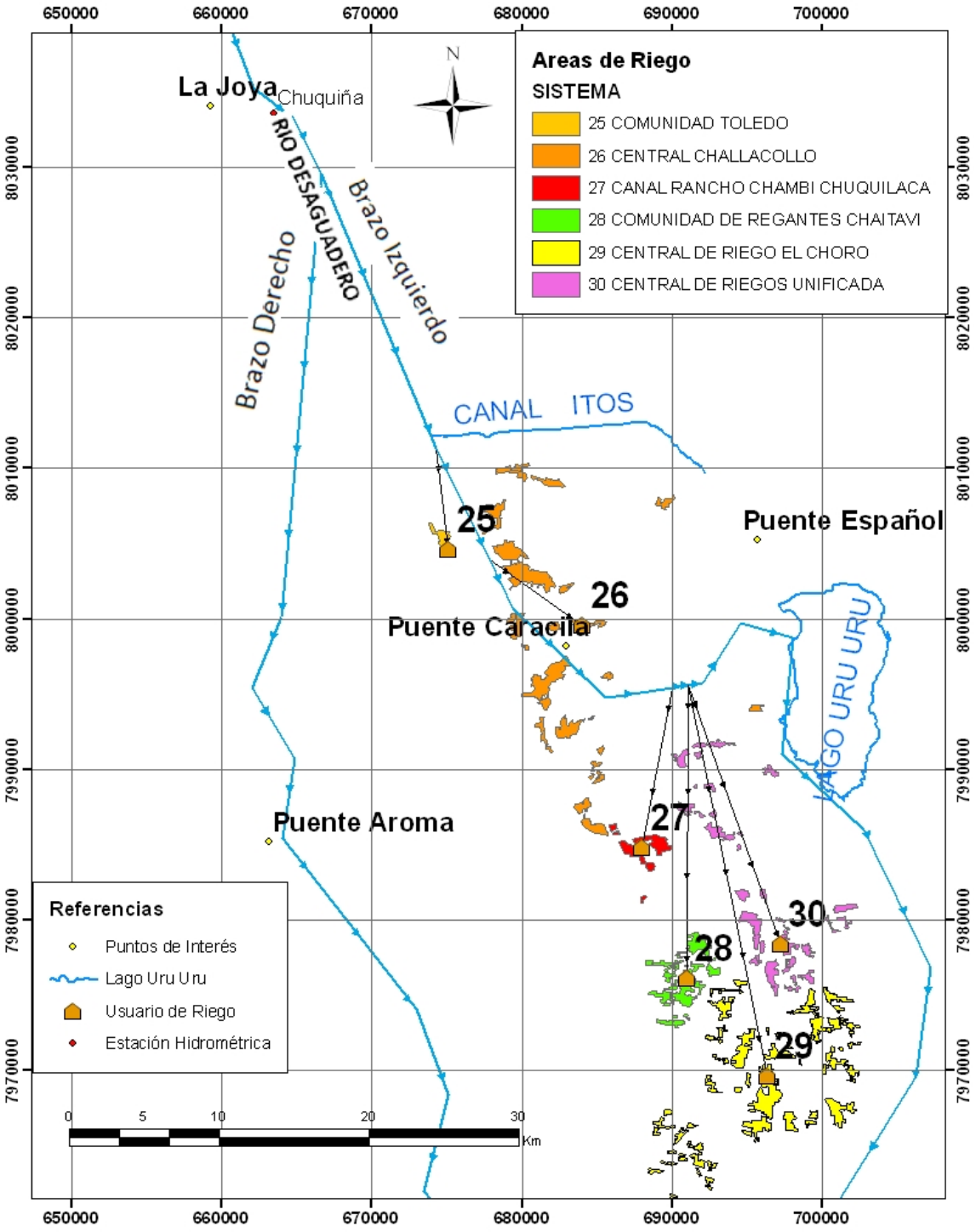
Como el objetivo principal del presente estudio era evaluar los impactos de las actuales y futuras obras de aprovechamiento y trasvase de la parte alta de la cuenca del río Mauri, sobre los usuarios del sector boliviano que dependen de esas aguas, no se incluyó en la simulación el comportamiento de la demanda de los usuarios de Tacna y la costa peruana. Estos temas han sido objeto de varios estudios contratados por el Gobierno Peruano y el Gobierno Regional de Tacna (Piérola, 1992, Vera Fung, 1996, Chavarri, 2001, etc.). Por las mismas razones, tampoco se consideró las pérdidas en los canales y túneles del sector peruano, que afectan la cantidad de agua que reciben los usuarios peruanos de la costa.

Los sistemas de riego ubicados a lo largo del río Desaguadero pueden dividirse en dos grupos: los situados aguas arriba de Chuquiña (La Joya), donde el río se divide en dos brazos, y los situados aguas abajo de la bifurcación, casi todos sobre el brazo izquierdo. En el primer grupo (figura 6.4) se incluyen todos los sistemas de riego del departamento de La Paz. En el segundo grupo (figura 6.3) se encuentran los sistemas grandes del departamento de Oruro, como El Choro. Se observa que el brazo izquierdo se subdivide a su vez en otros ramales o sub-brazos.

Para poder representar adecuadamente el sistema hídrico, fue necesario conocer cómo se distribuye el caudal del río Desaguadero aguas abajo de la bifurcación. En base a aforos realizados por la ALT entre 1998 y 2006, se obtuvo la curva de distribución mostrada en la figura 6.5, que muestra la proporción que fluye por el brazo derecho como porcentaje del caudal del río antes de la bifurcación. La curva muestra que la mayor parte del caudal del Desaguadero fluye por ese brazo y que esa proporción aumenta con el caudal presente en el del río.

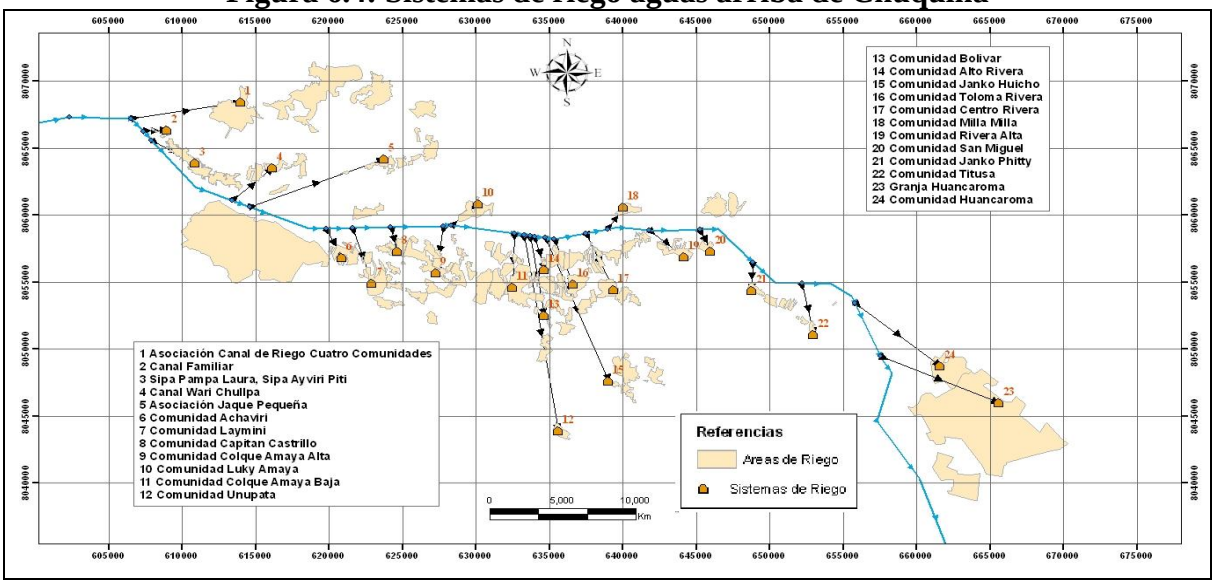
La regla descrita es una aproximación útil para el periodo histórico y para la simulación de escenarios futuros. Las obras hidráulicas proyectadas por la ALT en la bifurcación (repartidor La Joya) podrían modificar esa regla y eventualmente, podrían regular el caudal por cada brazo.

Figura 6.3: Sistemas de riego aguas abajo de Chuquiña



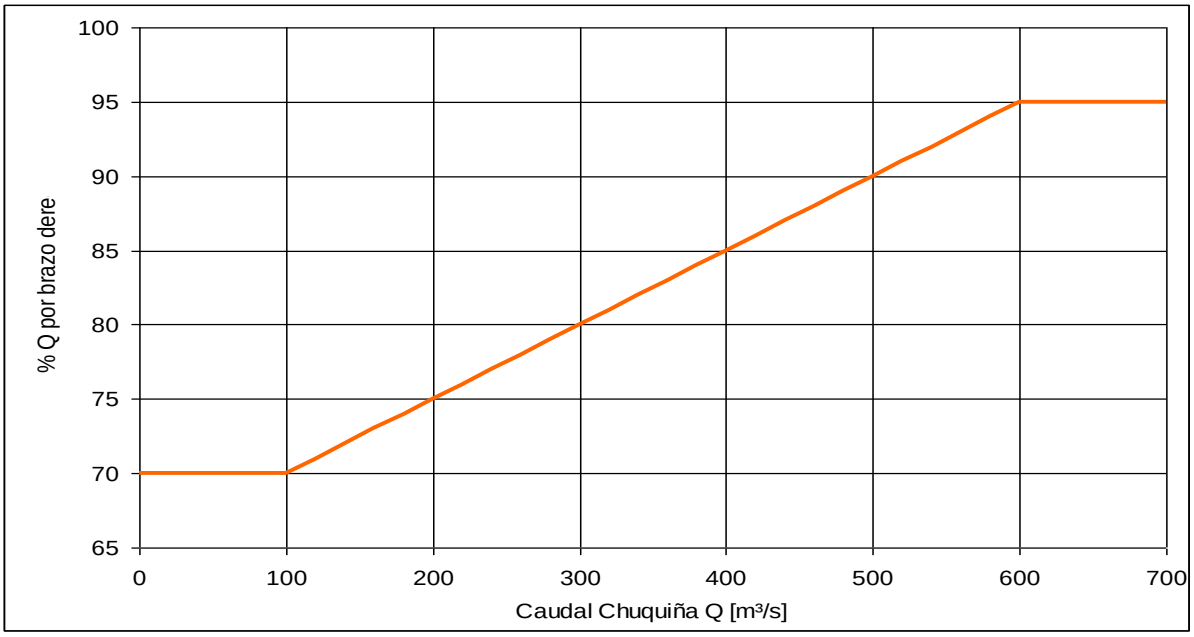
Fuente: Elaboración propia

Figura 6.4: Sistemas de riego aguas arriba de Chuquiña



Fuente: Elaboración propia

Figura 6.5: Regla de distribución del caudal en la bifurcación Chuquiña



Fuente: Elaboración propia en base a aforos ALT

Para el presente estudio era de interés el conocer cómo se distribuye el caudal que fluye por el brazo izquierdo, hacia los ramales que nacen de éste. Uno de esos ramales, el canal Itos (ver figura 6.3) construido por COMIBOL, creció hasta convertirse en el ramal más grande y en el principal alimentador del lago Uru Uru, un lago que se formó en el siglo pasado gracias al aporte del río Desaguadero. El problema es que el agua que ingresa al Uru Uru no llega al sistema de riego de El Choro (Central El Choro, Unificada y Chaytavi), el más importante de toda la región, por lo que al parecer el Gobierno Regional (Prefectura) de Oruro ha decidido cerrar el canal Itos y por tanto, reducir la alimentación y superficie del lago Uru Uru.

Por lo anterior y tomando en cuenta que no se tienen datos suficientes para evaluar qué proporción fluye por cada uno de los ramales, se decidió modelar el brazo izquierdo como si fuese único. Esto tiene como consecuencia la sobrestimación del caudal que realmente recibe el sistema El Choro. Un estudio realizado por el Instituto de Hidráulica e Hidrología (Rojas, 2006) muestra que el volumen promedio de agua que ingresa por el canal principal de El Choro, es cerca de un 40% inferior a la demanda potencial del sistema (tabla 5.3), durante los meses en que opera. Esto es equivalente a decir que el déficit hídrico del sistema de riego El Choro está próximo al 40%. La simulación considerando un brazo izquierdo único da como resultado un déficit considerablemente más bajo (ver resultados más adelante).

Lo anterior sugiere la posibilidad de dos opciones de simulación para el escenario actual, lo que se aplicó en un estudio previo (Molina y Cruz, 2008). Para la opción a) imponer un déficit hídrico de 35% en el sistema El Choro, de 25% en el sistema Chambi Rancho y de 15% en el sistema de Central Chachacollo. Para aplicar esa imposición, se puede usar la opción de proporción de la demanda disponible en MIKE BASIN (ver capítulo 3). La opción a) representaría la mejor aproximación a la realidad histórica.

En la opción b) no se impone ningún déficit y se considera un brazo izquierdo único del que se alimentan todos los sistemas de riego correspondientes a ese brazo. Es esta opción la que permite la comparación de escenarios desde el punto de vista de los usuarios (los sistemas de riego), en particular entre el escenario actual y los escenarios futuros en que se extrae más agua en la cuenca alta del río Mauri. Por tanto, se presentarán resultados correspondientes a esta opción solamente.

No se consideró la posibilidad de que parte del agua extraída retorne al río Desaguadero, como consecuencia de los excedentes o pérdidas en los sistemas de riego. En los sistemas más grandes y alejados, el flujo de retorno es probablemente nulo. En los sistemas más pequeños y próximos al río Desaguadero, se consideró que la infiltración no es de la magnitud suficiente para que el flujo de retorno subsuperficial o subterráneo sea significativo. El flujo superficial resultado de las tormentas y crecidas llega al río por la red de drenaje, independientemente de la existencia de los sistemas de riego.

A lo largo del río Desaguadero no se consideraron otros usos diferentes al riego. Tampoco se representaron los pequeños sistemas de riego que captan agua de algunos afluentes y vertientes *de la cuenca*. La razón principal es que el objetivo del presente estudio es evaluar las *consecuencias de las extracciones y trasvases en la cuenca del río Mauri*, en particular sobre los usuarios situados a lo largo del río Desaguadero. Para cumplir con este objetivo se puede hacer abstracción de los usuarios de riego situados en la cuenca del Desaguadero y de los usuarios de agua potable que usan ante todo fuentes subterráneas, debido a que la comparación entre escenarios se realizará en base al cambio relativo inducido por las extracciones en el río Mauri. Se podría justificar incluir a esos usuarios en la modelación si se quisiera implementar un modelo de gestión detallado de todo el sistema TDPS, o al menos de toda la cuenca del río Desaguadero. Ninguno de estos aspectos forma parte del alcance del presente estudio.

6.2 RESULTADOS

6.2.1 Ajuste del modelo

El ajuste del modelo se realizó de tal manera que los caudales simulados con el modelo correspondiesen a los caudales registrados en las estaciones hidrométricas, que son nodos de control de la red hídrica creada con MIKE BASIN. Para el ajuste también se usaron las series históricas de extracción de agua, o al menos la mejor aproximación posible, tanto en Bolivia como en Perú. Esto implica conocer y definir la fecha en que los usuarios empezaron a operar/extraer agua del sistema hídrico.

Para los usuarios bolivianos a lo largo del Desaguadero se aplicaron las fechas consignadas en la tabla 5.1. Para el Perú, se consideró que la Bocatoma Uchusuma ya operaban a toda su capacidad (tabla 6.3) al inicio del periodo de simulación (1965) y el canal Patapujo a partir de 1968 (PET, 2011). Los pozos de El Ayro entraron en operación en 1978 y el caudal extraído fue aumentando gradualmente hasta alcanzar el valor promedio de la figura 6.1 en 1986. La extracción del Mauri en Kovire empezó a funcionar en enero de 1996.

La tabla 6.6 muestra los caudales medios mensuales y anual "naturalizados" en la estación de Chuquiña, resultado de sumar los caudales registrados en Chuquiña y los caudales usados por los sistemas de riego a lo largo del río Desaguadero. La serie completa se muestra en el anexo I. **No** se incluyeron los caudales extraídos en la cuenca alta del río Mauri. Para el periodo 1965-08, el caudal medio anual "naturalizado" Qnat fue, en promedio, 3.2 m3/s mayor al registrado Qreg. Entre enero y mayo, ambos valores son iguales. En cambio, las diferencias son mayores a 3.2 m^3/s entre julio y diciembre, época del año en que operan los sistemas. La extracción máxima promedio es de 9.8 m3/s en octubre. Es importante destacar que el caudal de 3.2 m3/s es un promedio histórico del periodo 1965-08, que toma en cuenta la fecha en que empezó a operar cada sistema de riego. Actualmente la extracción media anual es algo mayor, ya que todos los sistemas listados en la tabla 5.1 están en operación.

Tabla 6.6: Caudales naturalizados y registrados en Chuquiña, periodo 1965-08

	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	med.
Qnat	44.5	42.5	40.7	44.3	141.8	173.9	127.7	81.3	61.5	54.2	55.0	52.1	76.6
Qreg	39.9	32.7	31.2	40.8	141.7	173.9	127.7	81.3	61.5	53.9	50.9	45.3	73.3

Qnat=Caudales naturalizados, Qreg=Caudales registrados en Chuquiña
Fuente: Elaboración propia

La tabla 6.7 muestra el caudal de salida o "remanente", que sale por ambos brazos del río Desaguadero, como promedio histórico del periodo 1965-08, que es un resultado de la modelación. La serie completa de caudal de salida se muestra en el anexo II. El caudal que sale por el brazo izquierdo alimenta a los lagos Uru Uru y Poopó y el caudal del brazo derecho al lago Poopó. Por tanto la suma de los caudales de ambos brazos equivale aproximadamente al aporte del río Desaguadero al lago Poopó.

La diferencia entre el Qnat y el Qsal de de la tabla 6.7 representa el caudal promedio extraído Qext por los sistemas de riego a lo largo del río Desaguadero, durante el periodo 1965-08, para el escenario sin imposición de déficit. Se obtuvo un Qext medio histórico de 5.3 m^3/s (76.6-71.3), de los que 3.3 m3/s corresponden al tramo Ulloma-Chuquiña (figura 6.4 y tabla 6.6) y

2.1 m3/s a los sistemas de riego situados aguas abajo de Chuquiña (figura 6.3). A nivel mensual, se observa que la extracción máxima del conjunto de los sistemas de riego del Desaguadero se produce en octubre y noviembre, con valores que se aproximan a los 15 m3/s. No hay extracción entre enero y abril.

Tabla 6.7: Caudal de salida medio del sistema, periodo 1965-08

	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	med.
Qsal	37.2	27.8	26.2	37.2	141.7	173.9	127.7	81.3	60.4	52.4	48.4	41.4	71.3
Qext	7.3	14.7	14.5	7.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1.2	1.8	6.6	10.7	5.3

Qsal=caudal remanente o de salida, Qext=caudal médio extraído
Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Simulación

Río Uchusuma

La figura 6.6 muestra la serie de caudales remanentes y naturalizados para el río Uchusuma en Bocatoma Uchusuma. Se entiende por caudales naturalizados a los que se registrarían en el río si no hubiese extracción. Los valores naturalizados de la figura se obtuvieron sumando las series “río Uchusuma sin represa Paucarani” en Bocatoma y “Ingreso Represa Paucarani”, proporcionadas por el PET. La serie Uchusuma sin represa Paucarani del PET, que considera solamente los caudales extraídos en la Bocatoma, fue corregida para considerar las crecidas que se pueden presentar durante la estación lluviosa Diciembre-Marzo. Esta corrección se realizó mediante el modelo hidrológico CHAC-SIMULA de paso mensual.

Se observa que durante el periodo 1965-08, el río Uchusuma solamente ha llevado agua (caudal remanente) en algunos años durante la estación lluviosa. En la mayor parte del periodo no llevó agua ni aún en esa estación. El río perdió completamente su caudal base (estiaje).

La figura 6.6 es una buena aproximación de los caudales que ingresarían a territorio boliviano. Si bien entre Bocatoma Uchusuma y la frontera peruano-boliviano el río Uchusuma tiene un área de aporte, también en este tramo se encuentran los pozos de El Ayro, que explotan el acuífero del mismo nombre, por lo que cabe esperar que el aporte al caudal base de ese tramo sea prácticamente nulo.

Lo anterior es corroborado por el testimonio de los pobladores de la región de Charaña, quienes afirman que hace muchos años el río Uchusuma se seca completamente en época de estiaje y sólo lleva agua ocasionalmente durante crecidas. Incluso las vertientes que brotaban próximas al cauce del río se secaron. La desecación de los bofedales que dependían del agua del río en Bolivia, que se produjo mucho antes de 1978, parece confirmar ese testimonio. Esos bofedales se convirtieron en lo que se observa en la figura 6.8 (comparar con los bofedales de la figura 2.6).

Sería conveniente explorar la posibilidad de simular el comportamiento del acuífero de El Ayro y su interacción con el flujo del río Uchusuma (y del río Caño si es que el acuífero se extiende hasta la subcuenca de este río). Esta simulación puede proporcionar información valiosa sobre el efecto de la explotación del acuífero sobre el caudal base de los ríos Uchusuma y Caño e incluso sobre los niveles sostenibles de explotación del acuífero. Tanto

MIKE BASIN como WEAP tienen las herramientas para realizar una simulación básica del movimiento de aguas subterráneas. WEAP incluso puede conectarse al modelo de flujo subterráneo MODFLOW.

Laguna de Vilacota

La tabla 6.8 muestra el balance hídrico medio de la laguna de Vilacota para el periodo 1965-08, en forma de caudales. Para el cálculo de la evaporación en la laguna se usaron los datos medidos en tanque en la estación de Vilacota (ver capitulo 4). Esta laguna, situada en las cabeceras del río Mauri, ocupa una superficie de 11 km^2 y es alimentada por el río Quilvire. De acuerdo a la simulación, de la laguna se evapora un volumen de agua equivalente a un caudal medio de 454 lit/seg. El caudal medio efluente de la laguna es 223 l/seg. Por tanto, el principal aportante al río Mauri en Kovire (Qmedio Kovire=585 l/seg) es el río Ancoaque. La figura 6.7 muestra que el efluente de la laguna lleva agua entre enero y abril, con un máximo en marzo. En varios años no hubo caudal de salida en enero y solamente en algunos años sale agua entre mayo y julio. De agosto a diciembre el efluente de la laguna permanece seco.

Tabla 6.8: Balance hídrico medio de la laguna de Vilacota en m3/s, periodo 1965-08

Variable	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	Año
Escorrentia (Aporte cuenca)	0.373	0.300	0.257	0.266	0.309	0.722	1.041	1.252	0.685	0.438	0.402	0.376	**0.532**
Precipitacion	0.022	0.015	0.026	0.054	0.173	0.489	0.546	0.369	0.044	0.010	0.006	0.005	**0.145**
Evaporación	0.510	0.558	0.567	0.537	0.437	0.426	0.407	0.397	0.432	0.397	0.389	0.383	**0.454**
Q salida de la laguna	0.025	0.000	0.000	0.000	0.000	0.226	0.793	1.154	0.317	0.085	0.054	0.047	**0.223**

Fuente: Elaboración propia

El estudio de Vera Fung (1996) propuso extraer 0.150 m^3/s mediante pozos que explotarían el acuífero próximo a la laguna Vilacota y 0.250 m^3/s adicionales mediante un tajo abierto a la salida de la laguna. La suma de ambas extracciones (0.400 m^3/s) se derivaría hacia el sistema Aricota. Como se observa en la tabla 6.8, los 0.400 m^3/s corresponden aproximadamente al caudal que se evapora de la laguna. La explotación de esas aguas tendría al menos tres consecuencias:

- Fuerte reducción de la superficie de la laguna, hasta lograr un nuevo estado de equilibrio
- Reducción del caudal a la salida, incluso a un valor próximo a cero y por tanto disminución del caudal en Kovire.
- Desecación y pérdida de bofedales

De hecho, tres pozos funcionaron entre marzo y octubre de 1994 extrayendo por bombeo un volumen de 4.34 millones de m^3 (Vera Fung, 1996). Esos pozos fueron posteriormente abandonados (ver figura 6.9), al parecer porque habían empezado a desecar los bofedales próximos, con la consecuente oposición de los comunarios del lugar. Tampoco pudo hallarse una referencia reciente a una posible explotación de aguas. Sin embargo, en una visita (26/10/07) pudo observarse equipo de prospección geofísica próximo al pozo de la figura 6.9.

Figura 6.6: Caudal naturalizado y remanente (m3/s) del río Uchusuma en Bocatoma, periodo 1965-08

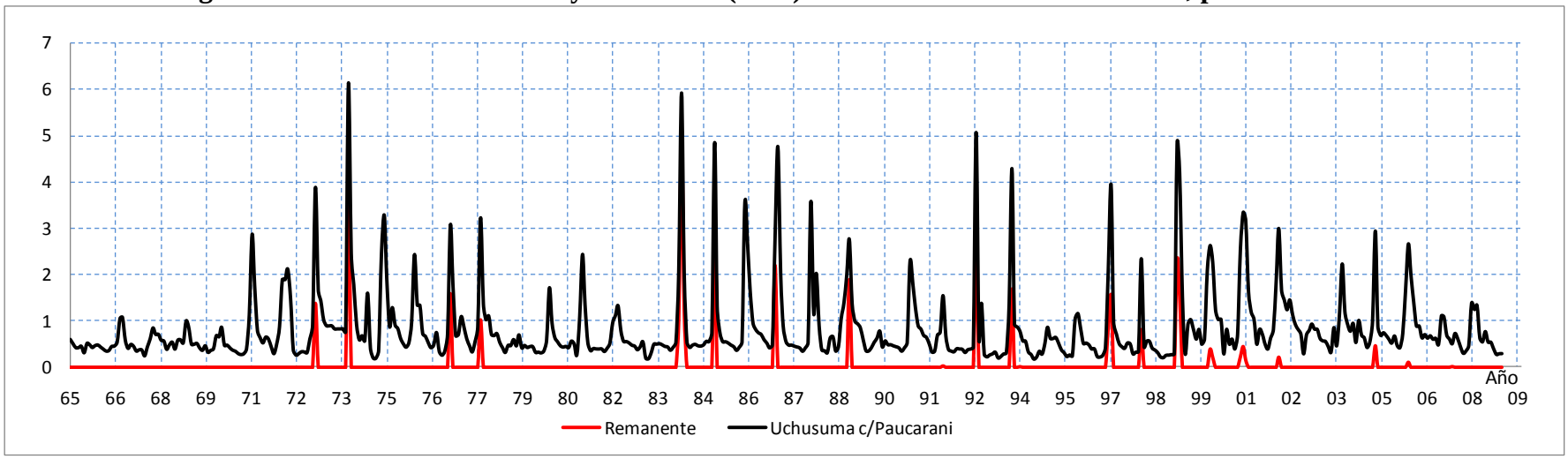
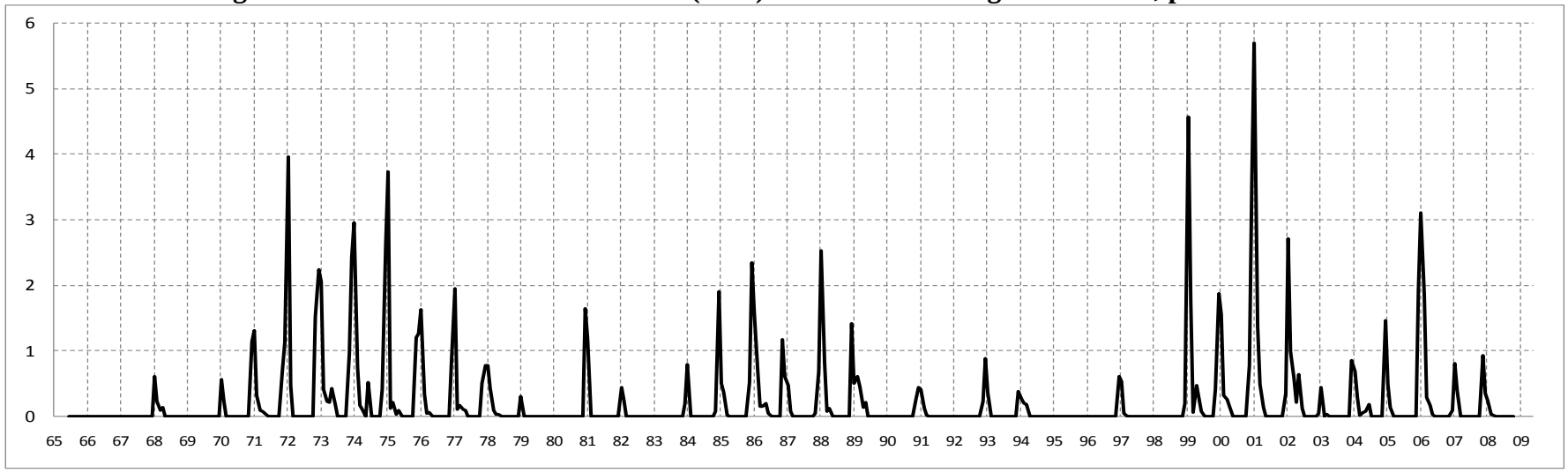


Figura 6.7: Serie de caudales simulados (m3/s) a la salida de la laguna Vilacota, periodo 1965-05



Fuente: Elaboración propia en base a modelo MIKE BASIN

Figura 6.8: Situación actual de los (ex)bofedales del río Uchusuma

Fuente: Equipo de proyecto

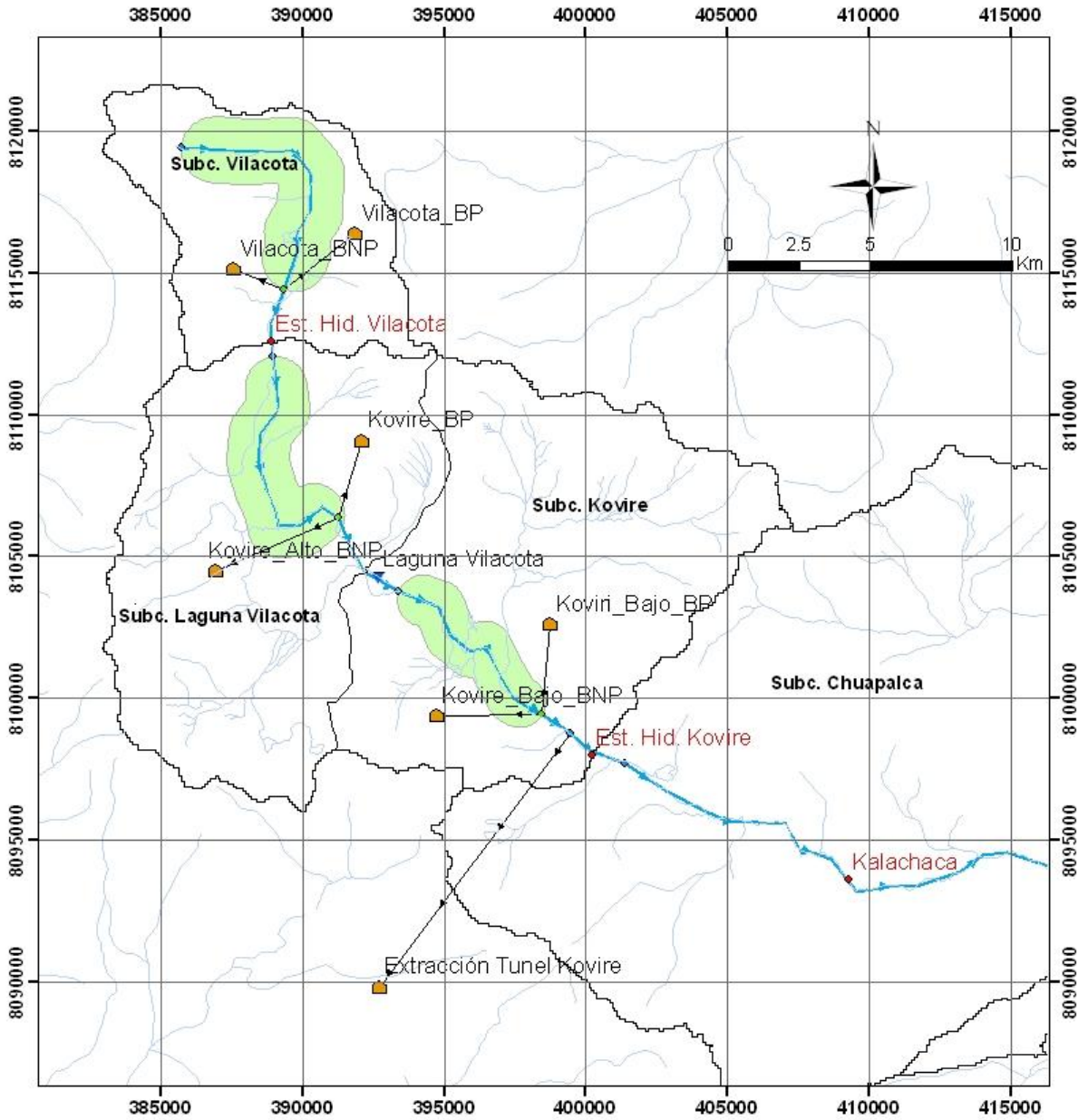
Figura 6.9: Caseta de bombeo y pozo abandonado en el sector de Vilacota

Foto: R. Cruz

Con el objeto de ilustrar como se construyó la red hídrica en MIKE BASIN, la figura 6.10 muestra parte del esquema en el sector de Vilacota-Kovire. La laguna está representada por un nodo en forma de triángulo azul, que el modelo usa para representar embalses (en MIKE

BASIN una laguna es un embalse no regulado). Los usuarios están representados por los polígonos anaranjados. Excepto el usuario en el extremo inferior izquierdo de la figura 6.10, que representa a la extracción por el túnel Kovire, los otros usuarios representan a los bofedales permanentes (BP) y no permanentes (BNP) de cada cuenca o intercuenca. Los nodos de forma circular situados sobre la red hídrica son de dos tipos: nodos de cuenca, asociados a una cuenca de aporte (en color verde) o nodos de río, que sólo reciben agua del nodo aguas arriba. Un usuario puede extraer agua tanto de nodos de cuenca como de nodos de río.

Figura 6.10: Modelo MIKE BASIN, representación de la cuenca del Mauri en Kovire



Fuente: Elaboración propia con modelo MIKE BASIN

Consumo de agua para riego

La tabla 6.9 muestra el consumo de agua por sistema de riego, en forma de promedios mensuales y anuales durante el respectivo periodo de funcionamiento. No se promedió sobre todo el periodo 1965-08, porque varios sistemas empezaron a funcionar después de 1965. Por la misma razón, los valores de la tabla 6.9 son mayores a los Qext de la tabla 6.7. El promedio se obtuvo de las series simuladas con MIKE BASIN, combinando los datos de oferta, demanda, derechos, reglas de operación de los sistemas de riego y condiciones de funcionamiento del sistema hídrico.

La tabla 6.9 muestra el consumo en forma de caudales y volúmenes mensuales. Las tres últimas columnas muestran, para cada sistema, el volumen medio anual consumido y el consumo unitario medio, en forma de volumen por hectárea y año y en forma de caudal por hectárea y año, respectivamente. El volumen promedio consumido por todos los sistemas de riego situados a lo largo del río Desaguadero es de 232.4 millones m3/año. En realidad este es un valor que presupone que todos los sistemas de riego listados en la tabla 6.9 están funcionando, lo que solo ocurrió a partir de 2006. Estos valores son muy inferiores a la demanda total media histórica (525.6 millones m3/año, AS, 2011) de la tabla 5.5, lo que se debe ante todo a que la época de riego real se reduce a pocos meses por año. Para la condición sin imposición de déficit, el consumo medio de agua por hectárea regada es 12130 m3/año, equivalente a un caudal unitario de 0.38 l/s/km2. Se observa que la mayor parte de los sistemas tiene un consumo unitario próximo alrededor de este valor promedio.

Tabla 6.9: Consumo medio mensual y anual de los sistemas de riego del río Desaguadero, periodo 1965-2008

SISTEMA DE RIEGO	Area [Ha]	Periodo		Epoca de riego	Caudales de Riego [m^3/s]									Volúmenes de Riego [MMC]										Consumo Unitario	
		inicio	final		jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	may	Año	m^3/ha-año	l/s-Ha
Asociación Canal de Riego Cuatro Comunidades	2047	1983	2008	Jul a Nov		1.64	2.12	1.45	2.94	2.91					4.40	5.69	3.76	7.87	7.53				29.25	14286	0.45
Canal Familiar	15	2003	2008	Jul a Dic		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01				0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.04			0.19	13006	0.41
Sipa Pampa Laura, Sipa Ayviri Piti	404	1990	2008	Ago a			0.28	0.20	0.43	0.46						0.74	0.52	1.15	1.19				3.60	8917	0.28
Canal Wari Chullpa	318	1990	2008	Jul a Dic		0.06	0.10	0.13	0.24	0.29	0.30				0.17	0.26	0.32	0.66	0.75	0.80			2.96	9302	0.29
Asociación Jaque Pequeña	340	1976	2008	Ago a			0.34	0.23	0.48	0.47						0.91	0.60	1.28	1.23				4.02	11817	0.37
Comunidad Achaviri	183	1970	2008	Ago a Dic			0.15	0.10	0.22	0.22	0.11					0.40	0.27	0.59	0.56	0.30			2.12	11583	0.37
Comunidad Laymini	487	1965	2008	Ago a Dic			0.34	0.23	0.51	0.52	0.31					0.90	0.61	1.36	1.34	0.83			5.04	10348	0.33
Comunidad Capitán Castrillo	147	1965	2008	Jul a Dic		0.08	0.10	0.07	0.15	0.14	0.08				0.21	0.27	0.17	0.39	0.37	0.21			1.63	11075	0.35
Comunidad Colque Amaya Alta	1259	1965	2008	Jul a Nov		0.67	0.84	0.57	1.22	1.22					1.81	2.25	1.48	3.27	3.15				11.96	9497	0.30
Comunidad Luky Amaya	191	1991	2008	Jul a Dic	0.11	0.20	0.25	0.17	0.33	0.32	0.13			0.30	0.54	0.67	0.44	0.88	0.82	0.36			4.00	20920	0.66
Comunidad Colque Amaya Baja	438	1965	2008	Jul a Ago		0.27	0.34								0.72	0.92							1.64	3741	0.12
Comunidad Unupata	69	1984	2008	Jun	0.02									0.06									0.06	820	0.03
Comunidad Bolivar	198	1978	2008	Ago a Dic			0.16	0.12	0.26	0.28	0.19					0.42	0.30	0.70	0.73	0.50			2.65	13376	0.42
Comunidad Alto Rivera	498	1970	2008	Ago a Dic			0.14	0.10	0.23	0.24	0.15					0.38	0.26	0.60	0.61	0.39			2.26	4532	0.14
Comunidad Janko Huicho	391	1982	2008	Jun a Oct	0.17	0.30	0.38	0.26	0.55					0.43	0.79	1.02	0.68	1.46					4.38	11216	0.36
Comunidad Toloma Rivera	400	1978	2008	Jun y Dic	0.10						0.21			0.25						0.57			0.82	2059	0.07
Comunidad Centro Rivera	514	1982	2008	Jun a Oct	0.11	0.19	0.25	0.17	0.37					0.28	0.51	0.66	0.45	0.99					2.88	5603	0.18
Comunidad Milla Milla	81	1984	2008	Ago a Dic			0.04	0.03	0.06	0.07	0.05					0.11	0.07	0.17	0.17	0.13			0.66	8156	0.26
Comunidad Rivera Alta	184	1965	2008	Ago a Ene			0.11	0.07	0.16	0.16	0.09	0.06				0.29	0.18	0.43	0.42	0.25	0.17		1.75	9485	0.30
Comunidad San Miguel	47	1975	2008	Sep a Dic				0.02	0.04	0.05	0.04						0.05	0.12	0.13	0.10			0.40	8375	0.27
Comunidad Janko Phitty	98	1992	2008	Ago a Dic			0.09	0.07	0.13	0.13	0.07					0.25	0.17	0.34	0.34	0.18			1.29	13181	0.42
Comunidad Titusa	101	1985	2008	Ago a Dic			0.05	0.04	0.07	0.08	0.04					0.13	0.09	0.19	0.20	0.12			0.73	7241	0.23
Comunidad Huancaroma	436	1980	2008	Ago a Dic			0.31	0.21	0.52	0.58	0.37					0.84	0.55	1.40	1.50	1.00			5.28	12124	0.38
Granja Huancaroma	3895	1983	2008	Jul a Dic		2.88	3.86	2.70	6.05	6.35	3.30				7.73	10.33	6.99	16.19	16.45	8.83			66.53	17079	0.54
Comunidad Toledo	139	2006	2008	Jul a Ago		0.06	0.09								0.16	0.23							0.39	2818	0.09
Central Challacollo	1960	1965	2008	Ago a Dic			0.75	0.54	1.31	1.41	0.96					2.00	1.41	3.50	3.67	2.58			13.16	6716	0.21
Canalización Chambi Rancho Chuquilaca	317	1965	2008	Jun a Dic	0.13	0.20	0.27	0.20	0.42	0.42	0.26			0.33	0.53	0.72	0.51	1.11	1.09	0.70			4.99	15732	0.50
Chaitavi	694	1970	2008	Jun a Dic	0.26	0.42	0.60	0.42	0.87	0.94	0.64			0.68	1.13	1.60	1.09	2.32	2.43	1.72			10.98	15818	0.50
Central El Choro	2214	1965	2008	May a Dic	1.05	1.69	2.18	1.51	2.33	2.24	1.65		1.15	2.73	4.53	5.83	3.92	6.25	5.81	4.41		3.08	36.56	16514	0.52
Central Unificada	1092	1998	2008	Jun a Dic	0.39	0.65	0.63	0.50	0.55	0.44	0.70			1.02	1.73	1.70	1.29	1.47	1.13	1.88			10.22	9357	0.30
Total	19161				2.3	9.3	14.8	10.1	20.4	19.9	9.7	0.06	1.15	6.1	25.0	39.6	26.2	54.7	51.7	25.9	0.2	3.1	232.41	12129	0.38

Fuente: Elaboración propia

6.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Para evaluar el desempeño o funcionamiento de un sistema hídrico se recurre a índices que miden el grado de satisfacción de un(os) objetivo(s). El objetivo más frecuente de la gestión del agua es el de cubrir las necesidades de agua de los usuarios. El enfoque más utilizado (Dölling y Varas, 2005) es evaluar el desempeño del sistema por medio de la probabilidad de que no se pueda entregar a un usuario el agua que necesita o demanda, lo que se denomina "fallo". El parámetro que más se usa para esa evaluación es el déficit hídrico. Este parámetro es una de las "salidas" (outputs) de MIKE BASIN en forma de series de tiempo. Fue utilizado para evaluar cada escenario y comparar entre sí el escenario actual y los escenarios futuros de aprovechamiento y trasvase de las aguas del río Mauri, en la forma que se describe en el presente subcapítulo.

6.3.1 Déficit hídrico

El nivel de satisfacción hídrica de los diferentes usuarios del sistema se expresa generalmente como una relación entre el agua realmente usada (o asignada) y la demanda potencial. La insatisfacción o déficit hídrico relativo es el concepto opuesto, que para un determinado periodo (mes, semana o día) puede definirse así:

Déficit relativo = (Demanda potencial - Agua usada)/Demanda potencial

El déficit relativo puede tener un valor mínimo de 0, que indica que el usuario satisface plenamente su demanda de agua. MIKE BASIN calcula el déficit relativo en porcentaje, para cada intervalo y para toda la serie de simulación. Por tanto, el déficit varía en función de los cambios en el tiempo de la oferta, demanda, reglas de asignación y operación. A nivel interanual los cambios en la oferta influyen mucho. A nivel estacional la demanda y las reglas de asignación tienen también gran influencia para muchos usuarios. Habrá épocas del año en que el déficit es alto, mientras que en otras es bajo o nulo.

El déficit hídrico es un parámetro útil para evaluar si la distribución del agua en un determinado sistema es equitativa y satisface las necesidades de todos los usuarios o, si por el contrario, existe una alta concentración de derechos de agua en pocos usuarios. Permite también identificar los usuarios o áreas que debieran beneficiarse de futuros proyectos de aprovechamiento de agua y de fuentes nuevas.

6.3.2 Criterios de evaluación y comparación de escenarios

La probabilidad de "fallo" de un sistema hídrico se evalúa en términos de *fiabilidad* (frecuencia de fallos), *vulnerabilidad* (la ocurrencia de fallos totales o catastróficos) y la *flexibilidad* (definida como la capacidad de recuperarse de un fallo). En términos de déficit hídrico, es frecuente evaluar la fiabilidad por medio del déficit medio (anual o mensual), la vulnerabilidad por medio de la magnitud del déficit máximo y la flexibilidad (resilience en inglés) por medio de la duración del déficit (generalmente máximo). Esto requiere de un análisis estadístico de la frecuencia, intensidad y duración del déficit para cada usuario o grupo de usuarios.

Para aplicar esos conceptos a un caso particular se requiere tener claro los objetivos del estudio (y por tanto de la simulación) y el comportamiento de cada usuario en particular. El objetivo del presente estudio fue el de "evaluar los impactos ambientales y sociales de las actuales y futuras obras de aprovechamiento de las aguas en la parte alta de la cuenca del río Mauri, sobre los usuarios del sector boliviano que dependen de esas aguas". Por otro lado y tal como se describió en los capítulos anteriores, los principales usuarios bolivianos (en términos de volumen de agua) son los bofedales situados en la cuenca del río Mauri y los sistemas de riego tradicionales ubicados a lo largo del río Desaguadero. Existen otros usuarios, como los pobladores y el ganado, que usan también el agua de la red hídrica de la cuenca, pero en volúmenes menores a los anteriores.

Si el comportamiento de dos tipos de usuarios (bofedales y sistemas de riego tradicionales en el presente caso) es diferente, pueden usarse índices diferentes. Los bofedales son sistemas hidromórficos: los bofedales Údicos, que son los más productivos, requieren de humedad permanente para sobrevivir (los bofedales Ústicos, ubicados en las áreas adyacentes a los údicos, pueden resistir un periodo seco durante el año). Se estima que la interrupción del suministro varios meses al año y en años consecutivos puede provocar la desaparición de un bofedal údico o su conversión a un bofedal ústico. Es decir, los bofedales permanentes údicos son sistemas muy vulnerables y de baja capacidad de recuperación (se estima que la formación de un bofedal údico requiere de 10 años de suministro permanente de agua), por lo que se decidió evaluar su comportamiento por medio de la magnitud de los déficit (vulnerabilidad) y la duración de esos déficit (flexibilidad). El déficit medio no tiene relevancia para este caso.

En cambio, los sistemas de riego situados a lo largo del río Desaguadero pueden recuperar su capacidad productiva más rápidamente después de una sequía hidrológica. Un periodo de déficit significa en primer lugar una disminución de la producción. Por otro lado, mientras más largos sean los periodos de déficit, más grande será la pérdida de producción. Por estas razones, para evaluar el comportamiento de estos sistemas se decidió usar el déficit medio (anual o del mes más crítico) y la curva de duración del déficit.

La tabla 6.10 muestra el déficit hídrico de cada uno de los sistemas de riego que están aguas abajo de la bifurcación de Chuquiña, en forma de promedios mensuales durante el respectivo periodo de funcionamiento. Los sistemas se listan en la tabla de aguas arriba hacia aguas abajo.

Tabla 6.10: Déficit hídrico relativo (%) de los sistemas del brazo izquierdo del río Desaguadero

Sistema de riego	Periodo	Epoca riego	jul	ago	sep	oct	nov	dic
Toledo	2006 - 2008	jul a ago	0	0	0	0	0	0
Central Challacollo	1965 - 2008	ago a dic	0	0	0	0	2	0
Canalización Chambi Rancho Chuquilaca	1965 - 2008	jun a dic	0	0	0	4	11	2
Chaitavi	1970 - 2008	jun a dic	0	0	0	16	21	3
Central El Choro	1965 - 2008	may a dic	0	5	3	36	41	9
Central Unificada	1998 - 2008	jun a dic	0	26	9	65	69	25

Fuente: Elaboración propia

Se observa que el déficit medio mensual es mayor para los sistemas de riego del sistema El Choro: Chaitavi, Central el Choro y Central Unificada, que están al final. Toledo, que es un sistema reciente y que aún usa poco agua, no sufre de déficit. Para el sistema de Chachacollo, que toma agua del brazo izquierdo a continuación, el déficit es muy bajo. El déficit se incrementa para el sistema Canalización Chambi Rancho Chuquilaca. Eso se debe al orden de prioridad por cabecera: los que están más arriba son los que reciben primero el volumen de agua que requieren. Los escenarios futuros se compararán con de la tabla 6.10.

En el escenario histórico casi no hay déficit (déficit=0%) para los sistemas aguas arriba de Chuquiña. En realidad, varios de estos sistemas sufren de déficit en periodos secos debido a un problema operativo: las tomas rústicas que captan el agua pueden quedar "colgadas", es decir por encima del nivel del agua en el río cuando ese nivel está muy bajo.

La tabla 6.11 muestra la demanda, extracción de agua y déficit medio anual en volumen (millones de m3) y el déficit relativo medio anual en %. El valor anual del déficit se obtuvo restando la extracción a la demanda. El déficit relativo anual se obtuvo dividiendo el déficit en volumen entre la demanda anual en volumen. El valor así obtenido no es igual al promedio de los valores mensuales de la tabla 6.10. Nuevamente se observa que el déficit relativo está muy asociado a la ubicación del usuario (aguas arriba o aguas abajo) en el sistema hídrico.

En el Anexo III se muestra el déficit medio del mes más crítico (octubre o noviembre) para los sistemas de riego ubicados aguas abajo de Chuquiña, para la situación actual. Ese déficit se muestra en figuras, donde el color indica su magnitud, según un rango que va de 0 a 60% en intervalos de 10%.

Tabla 6.11: Déficit medio anual en volumen (millones m3) y relativo (%) de los sistemas del brazo izquierdo del río Desaguadero

Sistema de riego	Periodo	Epoca riego	Demanda mill m3	Extracción mill m3	Deficit mill m3	Deficit %
Toledo	2006 - 2008	jul a ago	0.2	0.2	0.0	0.0
Central Challacollo	1965 - 2008	ago a dic	13.3	13.2	0.1	1.1
Canalización Chambi Rancho Chuquilaca	1965 - 2008	jun a dic	5.2	5.0	0.2	3.5
Chaitavi	1970 - 2008	jun a dic	12.0	11.0	1.0	8.3
Central El Choro	1965 - 2008	may a dic	44.4	36.6	7.8	17.6
Central Unificada	1998 - 2008	jun a dic	16.5	10.2	6.2	37.9

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar el comportamiento a lo largo del tiempo y el nivel de riesgo o de confianza, es conveniente analizar los resultados desde un punto de vista estadístico/probabilístico. Las figuras 6.11 y 6.12 muestran las curvas de duración del déficit para dos sistemas de riego que han funcionado durante todo el periodo de estudio: Canalización Chambi Rancho Chuquilaca y Central El Choro.. La curva de duración expresa, en forma de probabilidad, la posibilidad de que un determinado evento o valor sea igualado o superado.

En las figuras 6.11 y 6.12, el déficit en % se representa en el eje vertical y la probabilidad de excedencia en el eje horizontal. Por ejemplo, para el sistema Central El Choro, existe un 0.10 (10%) de probabilidad de que en un determinado mes el déficit hídrico sea igual o superior al

70%. La curva de duración también pone en evidencia que en algunos meses y años el déficit alcanzó valores de 90 y 100%, es decir que no hubo agua disponible para los dos sistemas.

Figura 6.11: Curva de duración del déficit hídrico, sistema Chambi Rancho Chuquilacal Choro, 1965-08

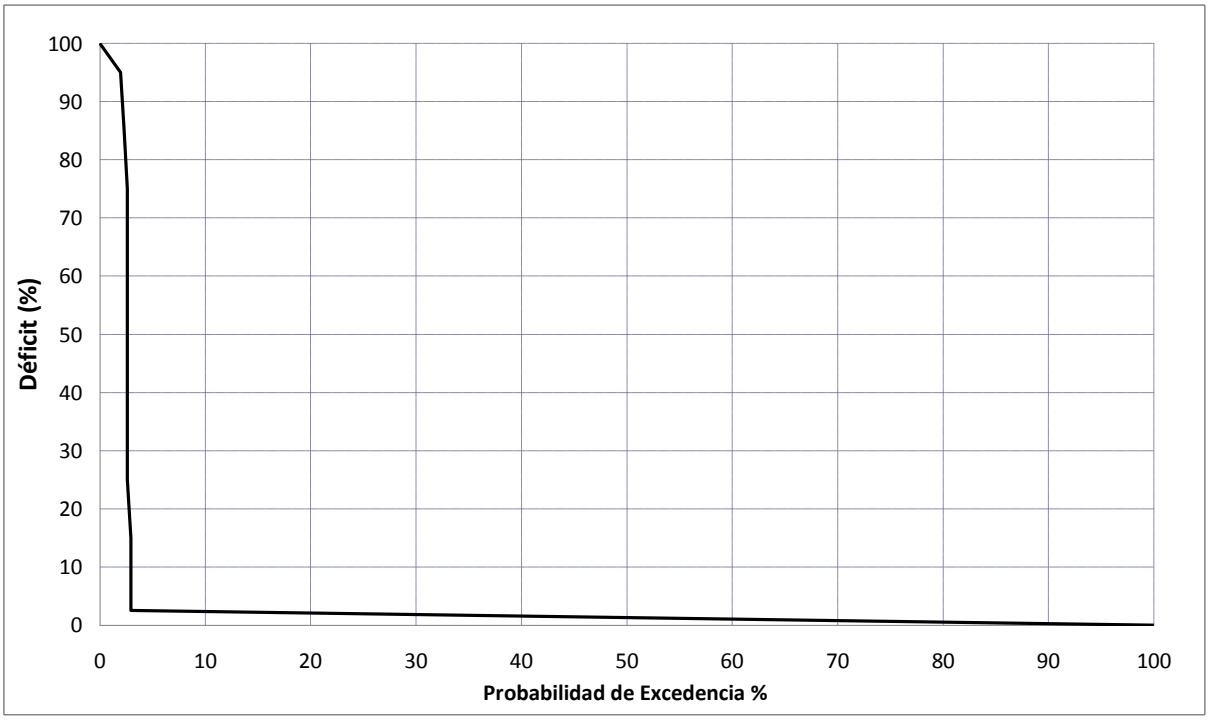
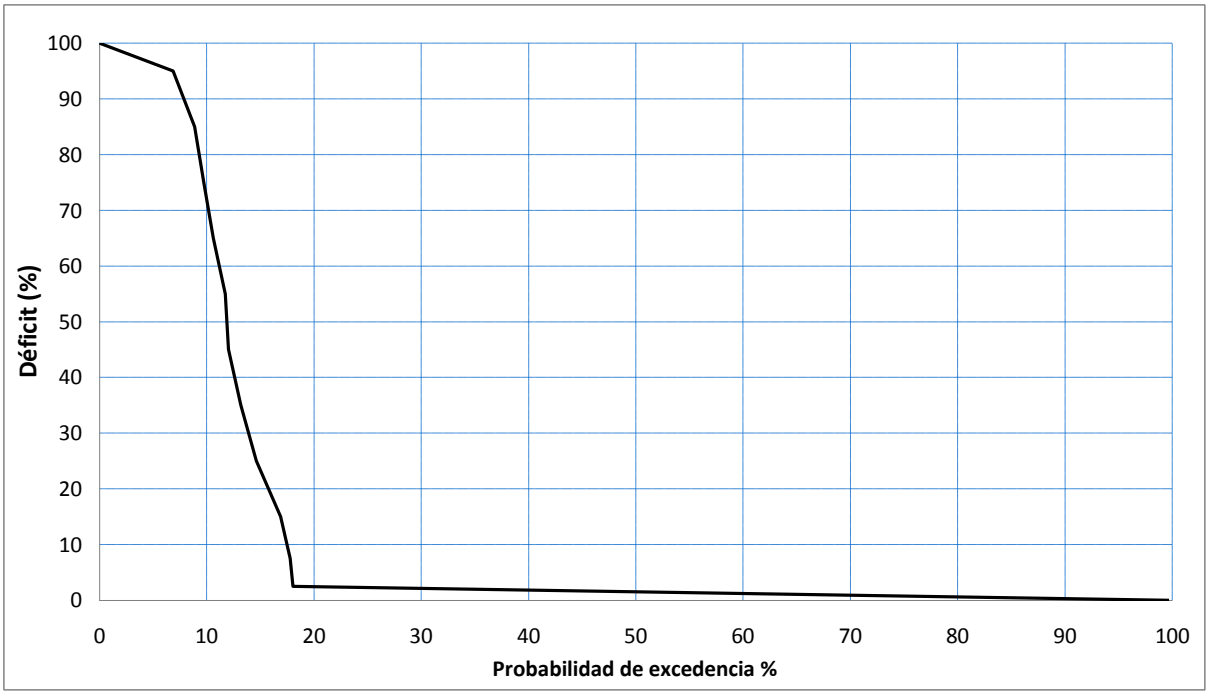


Figura 6.12: Curva de duración del déficit hídrico, sistema Central El Choro, 1965-08



Fuente: Elaboración propia con modelo MIKE BASIN

Las figuras 6.13 y 6.14 muestran la variación en el tiempo del déficit hídrico para los mismos sistemas. Se observa que efectivamente, durante los meses de estiaje de varios años, el déficit alcanzó valores de 90 y 100%. Esto ocurrió especialmente en la década del 90, en coincidencia con un periodo hidrológicamente seco, en que el caudal del río Desaguadero alcanzó valores muy bajos (ver figura 4.4 del capítulo 4). Otro periodo crítico pudo haberse dado entre 1966 y 1974, pero afectó solamente a la Central El Choro, situada aguas abajo de Chambi Rancho Chuquilaca. La simulación muestra que el usuario Central Unificada (figura 6.15) ha sufrido de déficits casi todos los años desde que entró en operación en 1998. La principal causa es su ubicación al final de todo el sistema hídrico del río Desaguadero.

Figura 6.13: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Chambi Rancho Chuquilaca

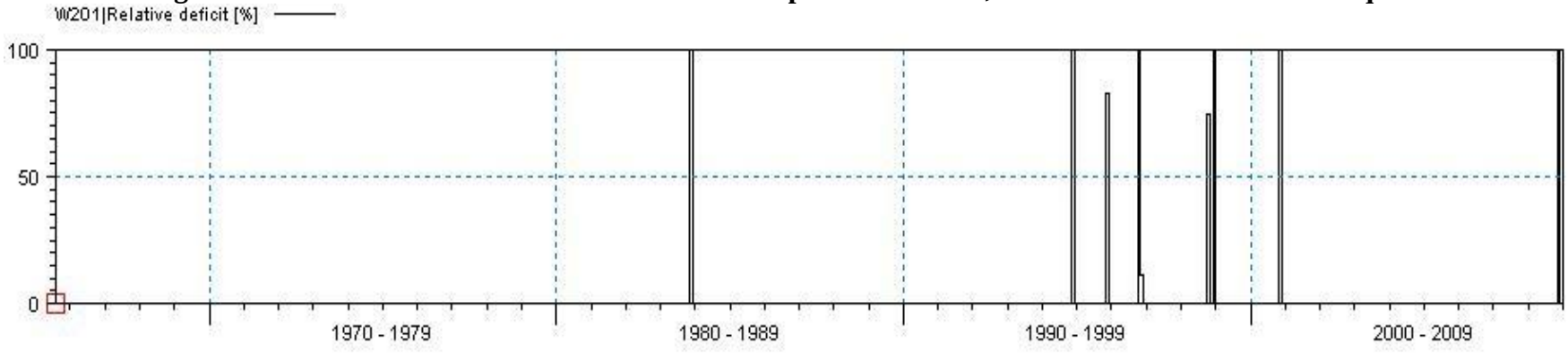
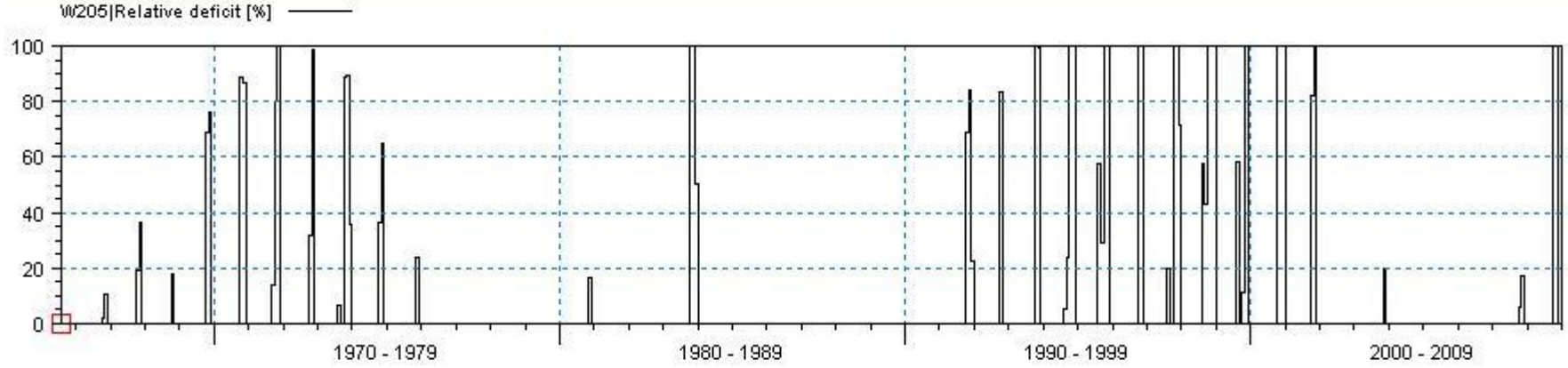
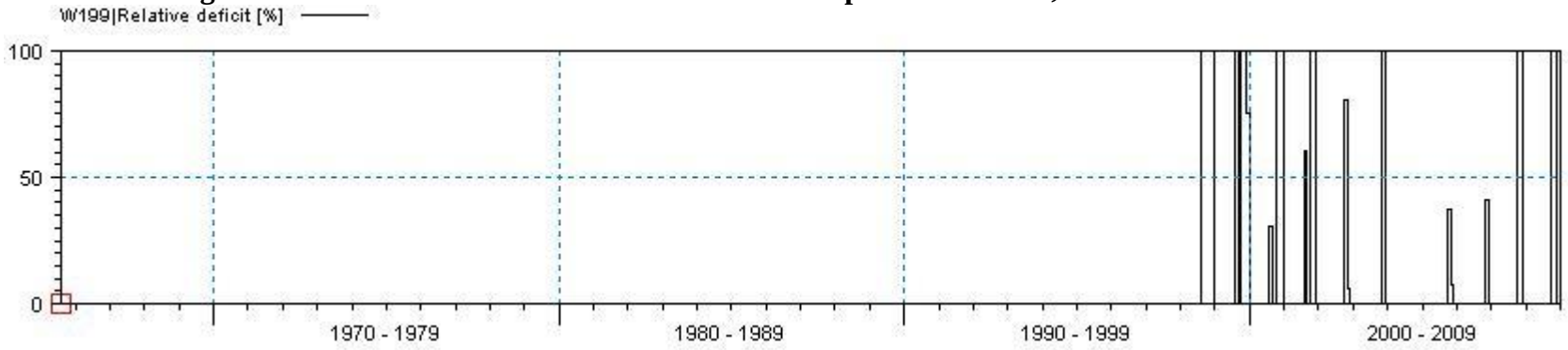


Figura 6.14: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Central El Choro



Fuente: Elaboración propia con modelo MIKE BASIN

Figura 6.15: Variación del déficit hídrico durante el periodo 1965-08, sistema Central Unificada



Fuente: Elaboración propia con modelo MIKE BASIN

Capítulo 7

LOS ESCENARIOS FUTUROS

Capítulo 8

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

Autoridad Autónoma Binacional (ALT) del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa (TDPS), 1999. Determinación de la oferta de caudal en la cuenca del río Mauri. La Paz, noviembre de 1999, 13 p. más anexos.

ALT, 2001. Macrozonificación ecológica económica del sistema TDPS. Puno, octubre 2001, 256 p. más anexos.

ALT, 2003. Proyecto Cuenca Alta del río Mauri. La Paz, octubre 2003, 25 p. más anexos.

Bazoberry, A., 2005. Deuda de Chile por uso de aguas bolivianas. En Indymedia (bolivia.indymedia.org/es), Enero 2005.

Bazoberry, A., 2002. Desvío del río Caquena por Chile. En periódico La Prensa, 10 Dic 2002, La Paz.

Chavarri, E., 2001. Simulación hidrológica del Planeamiento Hidráulico del Sistema Vilavilani II – Proyecto Especial Tacna. 1er Simposio Internacional sobre la Gestión Integrada de Cuencas en el Perú, 2001.

DHI, 2005. MIKE BASIN User´s Guide. 234 p.

Dölling, O. y Varas, E., 2005. Decisión support model for operation of multi-purpose water resources systems. Journal of Hydraulic Research Vol.43, No. 2 (2005), pp. 115-124.

El Peruano, 2006. Decreto Supremo No 068-2006-AG: Reservan aguas superficiales y subterráneas procedentes de las cuencas de los ríos Locumba, Sama y Maure a favor del Proyecto Especial Afianzamiento y ampliación de los recursos hídricos de Tacna. El Peruano, año XXIII, No 9679. Lima, 5 diciembre 2006.

Gobierno Regional de Tacna, 2005. Acta Nº 55-2005: Continuación de la sesión ordinaria de fecha 20 de diciembre, del Consejo Regional del Gobierno Regional de Tacna.

Molina, J. y Cruz, R., 2008. Escenarios de uso y asignación del agua en la cuenca de los ríos Mauri y Desaguadero, Informe Final. La Paz, 146 p.

Molina, J., Villaroel O., Espinoza, D., 2007. Estudio de Hidrología y Recursos Hídricos, Informe Final. La Paz, 111 p.

Orsag, V., Chungara J., Guisbert, P., Cruz, R., 2007. Estudio de Calidad de aguas y Evaluación Ambiental en las cuencas de los ríos Mauri y Bajo Desaguadero. La Paz, mayo de 2007, 330 p.

Paredes, M., 1999. El Rol del Parlamento del Pueblo Aymara en la Defensa del Agua del Altiplano, la Ecología y el Medio Ambiente de la Cuenca Andina. Ponencia presentada al Taller de la IICA, Montevideo, junio 1999.

Proyecto Especial Tacna (PET), 2006. Estudio de batimetría de la represa Paucarani, 22 p.
Proyecto Especial Tacna (PET), 2011. Obras Ejecutadas en la Cuenca del río Maure – Sector Peruano.

Piérola J. de, 1991. Estudio hidrológico y Simulación Sistema Kovire, informe final. Tacna, 1991, 51 p. más anexos.

Piérola J. de, 1992 Estudio hidrológico y Simulación Sistema Vilavilani II, informe final. Tacna, enero 1992.

Pillco, R. y Bengtsonn, L., 2007. The behavior of the Bolivian Altiplano lakes in varying climate. Journal of Hydrological Sciences.

Proyecto Especial Tacna (PET), 1994. Estructuración y compatibilización del Estudio de factibilidad Proyecto Vilavilani II etapa, informe principal. Tacna, agosto 1994, 712 p.

PET, 2005. Problemática hídrica y proyectos de solución propuestos. Tacna, noviembre 2005.

Quintanilla, J., Coudrain-Ribstein, A., Martínez, J., 1995. Hidroquímica de las aguas del Altiplano de Bolivia. En Memorias del Seminario Internacional Aguas Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales, La Paz, 1995.

Rojas, F., 2006. Evaluación del uso de agua en la agricultura de la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru. Informe IHH-UMSA para el proyecto "Gestión de los recursos hídricos de la cuenca de los lagos Poopó y Uru Uru", 41 p.

Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., Aguirre, E., 2000. Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el Norte de Chile. En Revista Vertiente, Santiago.

Sistema Nacional de Inversión Pública (SNIP) del Perú, 2004. Proyecto Vilavilani II etapa para el aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del rio Maure. Código SNIP 7361. Septiembre 2004.

Vera Fung, G., 1996. Estudio de actualización hidrológica de los proyectos Kovire y Vilavilani, informe final. Tacna, septiembre de 1996, 180 p.

Villaroel, E., Pérez, J., 2007. Mapeo de derechos, Anexo al II Informe Técnico, Proyecto Regulación de derechos de Agua, fase II. 31 p.

Yabar Peralta, F., 1997. Aguas y suelos – Zonas afectadas con hidrotermalismo - Cuenca río Maure, informe final. Tacna, febrero 1997, 58 p. más anexos.

ANEXO I: CAUDALES EN CHUQUIÑA Y BOCATOMA UCHUSUMA

Tabla I.1: Caudales mensuales (m3/s) en Chuquiña, serie histórica completada/corregida

ESTACION :	CHUQUIÑA	DPTO. :ORURO		LONGITUD	-67.46
CUENCA :	BAJO DESAGUADERO	PROV. :TOMAS BARRON		LATITUD	-17.69
RIO :	DESAGUADERO	DIST. :TOMAS BARRON		ALTITUD	3710 m.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1965								39.4	65.0	48.0	38.2	40.2	
1966	50.8	126.2	79.9	56.8	33.8	35.8	30.9	30.5	23.1	16.5	15.2	22.8	43.5
1967	20.3	57.2	49.0	22.5	14.0	12.9	18.6	15.6	17.9	12.1	12.9	21.6	22.9
1968	21.5	131.5	84.5	50.1	26.2	26.2	26.8	18.9	14.1	15.7	33.6	54.1	41.9
1969	101.5	57.2	31.5	16.4	17.4	18.8	17.1	11.8	10.4	7.7	6.9	16.0	26.0
1970	81.7	136.1	58.6	30.1	17.9	18.1	20.4	17.2	13.4	8.9	11.3	25.7	36.6
1971	33.3	186.8	84.8	32.2	17.3	14.8	17.3	16.7	9.4	8.8	5.5	43.7	39.2
1972	256.7	77.4	163.0	65.9	18.3	15.8	14.6	20.1	16.5	15.2	7.9	27.6	58.2
1973	178.1	215.6	123.2	36.6	35.5	29.2	23.4	15.1	13.7	8.7	10.0	11.2	58.3
1974	188.3	427.6	173.5	77.5	61.1	55.7	52.2	71.2	34.2	15.6	13.6	14.5	98.7
1975	117.3	323.2	160.9	57.8	55.1	61.6	58.0	57.1	46.8	37.3	19.0	55.9	87.5
1976	282.2	161.2	111.9	88.0	73.4	76.2	73.7	66.8	54.6	46.5	31.9	28.9	91.3
1977	42.9	187.6	212.6	68.7	52.9	51.7	54.5	43.3	30.6	25.6	36.5	43.7	70.9
1978	161.0	147.7	84.9	83.1	64.9	71.7	63.8	62.2	45.0	25.5	35.7	67.3	76.1
1979	350.5	145.8	160.1	126.9	114.8	99.0	91.1	78.5	64.2	55.6	36.8	94.2	118.1
1980	79.5	80.4	132.7	77.0	62.6	54.5	58.8	39.0	39.3	32.3	23.0	29.9	59.1
1981	95.2	249.7	166.4	121.4	95.7	89.2	76.3	71.6	58.1	45.2	33.2	52.7	96.2
1982	202.3	98.4	131.8	103.9	94.6	84.7	78.7	69.1	61.8	50.2	43.5	32.0	87.6
1983	26.6	41.9	24.0	21.8	21.7	23.9	24.9	20.8	12.9	7.0	3.7	12.8	20.2
1984	286.1	448.2	252.0	226.0	162.1	131.9	112.4	94.6	73.6	87.8	125.0	83.4	173.6
1985	182.2	234.2	183.8	171.5	142.7	130.2	109.3	122.4	89.5	78.1	128.4	164.7	144.8
1986	437.2	454.3	432.3	439.0	395.0	257.0	278.5	273.8	325.4	208.5	174.8	166.3	320.2
1987	443.5	371.2	259.3	190.4	173.5	152.8	146.5	125.1	115.7	98.3	84.5	69.8	185.9
1988	197.0	146.8	165.7	218.4	159.5	133.6	123.2	114.8	115.9	106.5	66.2	71.4	134.9
1989	160.8	110.9	105.8	114.2	89.7	81.0	81.8	63.9	59.8	55.1	59.8	52.8	86.3
1990	85.3	58.8	49.7	47.0	43.3	52.1	42.5	34.0	30.2	35.4	38.4	56.4	47.8
1991	138.7	62.7	86.1	47.4	34.1	32.6	26.9	23.2	18.0	12.8	11.5	14.9	42.4
1992	99.7	24.2	28.3	15.0	9.9	10.7	11.5	13.2	11.1	10.2	17.5	32.2	23.6
1993	171.7	60.0	82.8	31.5	12.5	12.6	10.0	13.5	9.3	8.5	10.2	62.2	40.4
1994	88.1	287.4	39.1	32.9	18.3	16.4	16.0	13.3	9.6	8.2	6.6	13.5	45.8
1995	35.5	40.2	72.2	27.3	22.4	16.9	16.4	8.6	8.1	7.6	8.3	13.1	23.0
1996	89.6	84.5	33.2	31.4	16.1	13.9	13.7	9.9	8.8	5.7	7.7	32.3	28.9
1997	136.2	324.0	146.2	44.5	21.0	17.9	13.8	9.6	9.3	9.2	9.1	9.4	62.5
1998	61.8	73.9	14.5	10.5	8.8	11.6	14.3	8.8	7.7	7.1	8.9	7.8	19.6
1999	26.2	197.5	276.1	128.8	40.0	15.8	12.8	10.3	7.8	7.6	8.0	10.5	61.8
2000	86.5	123.8	141.0	33.0	16.5	17.8	18.5	15.2	12.2	8.4	5.8	9.6	40.7
2001	148.2	451.4	267.4	66.8	40.2	32.7	34.0	14.2	14.5	13.4	14.8	13.9	92.6
2002	31.1	136.5	148.8	61.2	48.5	41.5	42.3	30.7	22.3	25.8	26.6	35.0	54.2
2003	91.3	114.8	143.5	77.6	65.5	60.0	34.4	34.0	26.7	39.0	30.9	34.2	62.7
2004	199.9	244.4	109.5	99.6	76.7	73.4	77.3	63.8	48.9	41.0	32.8	30.8	91.5
2005	92.8	188.4	74.3	59.7	40.7	39.9	38.6	36.6	33.2	26.1	24.0	35.3	57.5
2006	314.4	252.8	122.0	102.1	66.6	54.8	47.2	40.1	27.5	28.3	29.2	26.9	92.6
2007	80.6	56.0	152.7	48.8	38.4	41.3	36.8	27.3	24.1	17.9	19.9	29.8	47.8
2008	119.6	81.3	71.4	36.4	27.6	30.2	27.5	26.3	17.7	11.8	7.3	24.7	40.1
2009	45.2	56.0	98.4	43.0	20.2	17.6	14.1	8.6	4.7	2.5	5.5	31.3	28.9
2010	59.1	83.3	50.1	18.0	20.8								
Prom 65-08	141.7	174.0	127.7	81.3	61.5	53.9	50.9	45.3	39.9	32.7	31.2	40.8	73.4
Máximo	443.5	454.3	432.3	439.0	395.0	257.0	278.5	273.8	325.4	208.5	174.8	166.3	454.3
Mínimo	20.3	24.2	14.5	10.5	8.8	10.7	10.0	8.6	7.7	5.7	3.7	7.8	3.7

Fuente: Elaboración propia en base a datos SENAMHI

Tabla I.2: Caudales mensuales (m3/s) en Chuquiña, serie "naturalizada", 1965-08

ESTACION :	CHUQUIÑA	DPTO. :ORURO		LONGITUD	-67.46
CUENCA :	BAJO DESAGUADERO	PROV. :TOMAS BARRON		LATITUD	-17.69
RIO :	DESAGUADERO	DIST. :TOMAS BARRON		ALTITUD	3710 m.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1965								40.6	65.6	49.4	39.5	40.7	
1966	50.9	126.2	79.9	56.8	33.8	35.8	31.7	32.0	24.0	18.4	17.1	23.3	44.2
1967	20.5	57.2	49.0	22.5	14.0	12.9	19.4	17.0	18.6	13.8	14.8	21.8	23.5
1968	21.6	131.5	84.5	50.1	26.2	26.2	27.5	20.2	14.8	17.3	34.5	54.6	42.4
1969	101.5	57.2	31.5	16.4	17.4	18.8	17.9	13.1	11.2	9.3	8.5	16.5	26.6
1970	81.8	136.1	58.6	30.1	17.9	18.1	21.1	18.9	14.4	11.0	13.5	26.3	37.3
1971	33.4	186.8	84.7	32.2	17.3	14.8	18.1	18.4	10.4	10.9	7.3	44.5	39.9
1972	256.7	77.4	163.0	65.9	18.3	15.8	15.4	21.9	17.5	17.1	10.1	28.2	58.9
1973	178.1	215.6	123.2	36.6	35.5	29.2	24.1	16.8	14.5	10.8	12.3	11.9	59.1
1974	188.3	427.6	173.5	77.5	61.1	55.7	53.0	72.3	35.2	17.5	15.9	15.3	99.4
1975	117.3	323.2	160.9	57.8	55.1	61.6	58.8	58.9	47.6	39.4	21.3	56.5	88.2
1976	282.2	161.2	111.9	88.0	73.4	76.2	74.5	69.1	55.5	50.0	35.3	29.7	92.3
1977	43.0	187.6	212.6	68.7	52.9	51.7	55.5	46.0	32.0	28.4	38.5	44.2	71.8
1978	161.1	147.7	84.9	83.1	64.9	71.8	64.6	64.7	46.7	29.0	38.0	68.1	77.1
1979	350.5	145.8	160.1	126.9	114.8	99.1	92.0	81.2	65.9	58.5	40.5	94.3	119.1
1980	79.6	80.4	132.7	77.0	62.6	54.6	59.6	41.8	40.5	36.0	27.5	31.9	60.3
1981	95.3	249.7	166.4	121.4	95.7	89.2	77.1	74.1	59.2	48.5	36.8	54.0	97.3
1982	202.3	98.4	131.8	103.9	94.6	85.0	80.1	72.0	64.0	54.5	47.1	34.3	89.0
1983	26.8	41.9	24.0	21.8	21.7	24.2	33.2	31.2	21.7	23.8	21.5	20.1	26.0
1984	286.1	448.2	252.0	226.0	162.1	132.3	120.2	105.3	81.8	102.9	138.3	89.9	178.8
1985	182.3	234.2	183.8	171.5	142.7	130.6	116.6	134.8	93.8	96.5	139.1	167.2	149.4
1986	437.3	454.3	432.3	439.0	395.0	257.3	284.9	284.0	331.8	225.2	190.9	168.1	325.0
1987	443.5	371.2	259.3	190.4	173.5	153.2	153.1	136.4	122.9	110.8	98.9	77.7	190.9
1988	197.0	146.8	165.7	218.4	159.5	133.9	130.2	126.9	123.9	123.1	84.5	78.8	140.7
1989	160.8	110.9	105.8	114.2	89.7	81.4	88.0	73.7	67.5	72.2	75.4	60.5	91.7
1990	85.4	58.8	49.7	47.1	43.3	52.2	47.5	42.5	37.0	48.1	52.7	60.9	52.1
1991	138.8	62.7	86.1	47.4	34.1	33.2	32.6	34.8	26.3	29.9	26.3	21.5	47.8
1992	99.7	24.2	28.3	15.0	9.9	11.3	17.8	22.5	18.2	22.9	28.0	35.6	27.8
1993	171.7	60.0	82.7	31.5	12.5	13.3	17.1	22.1	15.1	20.3	23.0	66.9	44.7
1994	88.2	287.4	39.1	32.9	18.3	16.9	21.5	22.4	16.3	20.5	18.4	16.3	49.8
1995	35.5	40.2	72.2	27.3	22.4	17.3	21.4	16.8	13.9	19.5	21.4	15.4	27.0
1996	89.6	84.5	33.2	31.4	16.1	14.4	19.5	17.4	15.1	20.3	17.1	33.3	32.7
1997	136.2	324.0	146.2	44.6	21.0	18.4	19.5	18.9	11.8	21.5	20.6	14.5	66.4
1998	61.8	74.0	14.5	10.5	8.8	12.0	20.9	19.9	15.8	23.0	21.3	16.2	24.9
1999	26.4	197.5	276.1	128.8	40.0	16.3	18.8	21.1	12.1	18.4	22.5	16.0	66.2
2000	86.6	123.8	141.0	33.0	16.5	18.4	24.7	25.8	18.3	23.1	23.0	15.5	45.8
2001	148.2	451.4	267.4	66.8	40.2	33.4	40.0	25.0	21.0	26.7	32.3	18.7	97.6
2002	31.2	136.5	148.8	61.2	48.5	42.3	49.2	41.6	29.4	41.4	41.3	41.1	59.4
2003	91.4	114.8	143.5	77.6	65.5	60.4	41.2	43.4	34.6	54.7	47.5	42.0	68.0
2004	199.9	244.4	109.5	99.6	76.7	73.8	82.3	72.7	57.5	57.8	47.5	38.7	96.7
2005	92.9	188.4	74.3	59.7	40.7	40.3	45.6	47.1	39.5	41.6	37.4	40.2	62.3
2006	314.4	252.8	122.0	102.1	66.6	55.3	53.0	51.7	34.9	43.8	45.8	30.8	97.8
2007	80.7	56.0	152.7	48.8	38.4	42.1	44.1	39.7	32.7	33.9	33.9	36.2	53.3
2008	119.6	81.3	71.4	36.4	27.6	30.8	33.3	36.1	25.7	28.7	24.3	30.2	45.4
Prom 65 - 08	141.8	173.9	127.7	81.3	61.5	54.2	55.0	52.1	44.5	42.5	40.7	44.3	76.6
Máximo	443.5	454.3	432.3	439.0	395.0	257.3	284.9	284.0	331.8	225.2	190.9	168.1	454.3
Mínimo	20.5	24.2	14.5	10.5	8.8	11.3	15.4	13.1	10.4	9.3	7.3	11.9	7.3

Fuente: Elaboración propia a resultados MIKE BASIN

Tabla I.3: Serie de caudales (m3/s) generada en Bocatoma Uchusuma, río Uchusuma Serie "naturalizada" (antes de la extracción), sin aportes de Paucarani

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1965								0.335	0.282	0.236	0.237	0.253	
1966	0.174	0.287	0.274	0.238	0.260	0.269	0.244	0.218	0.195	0.201	0.250	0.255	0.239
1967	0.302	0.586	0.601	0.326	0.228	0.275	0.253	0.195	0.210	0.207	0.137	0.245	0.297
1968	0.342	0.474	0.397	0.397	0.326	0.315	0.216	0.270	0.302	0.218	0.325	0.331	0.326
1969	0.294	0.557	0.487	0.278	0.277	0.287	0.233	0.204	0.259	0.180	0.204	0.222	0.290
1970	0.380	0.368	0.482	0.265	0.267	0.233	0.206	0.193	0.164	0.153	0.163	0.220	0.258
1971	0.635	1.601	0.856	0.444	0.356	0.293	0.363	0.340	0.244	0.164	0.286	0.486	0.506
1972	1.056	1.056	0.928	0.834	0.210	0.146	0.164	0.188	0.184	0.177	0.343	0.509	0.483
1973	2.775	0.937	0.806	0.577	0.503	0.499	0.499	0.462	0.462	0.462	0.462	0.424	0.739
1974	5.063	1.604	1.108	0.513	0.331	0.380	0.320	0.894	0.232	0.113	0.109	0.200	0.906
1975	1.363	1.834	0.932	0.491	0.720	0.509	0.466	0.347	0.281	0.242	0.297	0.546	0.669
1976	1.358	0.751	0.747	0.406	0.374	0.297	0.236	0.267	0.418	0.191	0.145	0.193	0.449
1977	0.400	2.413	0.965	0.380	0.394	0.611	0.487	0.343	0.258	0.185	0.309	0.487	0.603
1978	2.252	0.764	0.575	0.618	0.396	0.382	0.405	0.299	0.236	0.178	0.263	0.261	0.552
1979	0.334	0.258	0.391	0.234	0.263	0.238	0.249	0.248	0.179	0.182	0.173	0.195	0.245
1980	0.324	0.957	0.535	0.358	0.308	0.259	0.243	0.251	0.237	0.315	0.280	0.151	0.352
1981	0.612	1.360	0.756	0.296	0.200	0.226	0.221	0.220	0.221	0.190	0.231	0.291	0.402
1982	0.537	0.627	0.741	0.442	0.313	0.310	0.293	0.266	0.254	0.211	0.247	0.307	0.379
1983	0.110	0.102	0.169	0.277	0.278	0.285	0.271	0.251	0.244	0.205	0.242	0.302	0.228
1984	1.602	5.476	1.709	0.302	0.239	0.266	0.276	0.259	0.255	0.270	0.313	0.310	0.940
1985	0.416	3.898	0.732	0.411	0.309	0.308	0.292	0.267	0.247	0.204	0.243	0.305	0.636
1986	1.984	1.467	0.918	0.534	0.455	0.415	0.395	0.332	0.291	0.233	0.269	2.524	0.818
1987	2.658	1.125	0.496	0.309	0.267	0.267	0.254	0.244	0.232	0.193	0.234	0.297	0.548
1988	2.000	0.654	1.132	0.503	0.209	0.200	0.175	0.352	0.368	0.195	0.248	0.583	0.552
1989	0.779	1.119	2.377	0.767	0.558	0.524	0.476	0.334	0.200	0.196	0.238	0.301	0.656
1990	0.351	0.436	0.244	0.318	0.272	0.272	0.258	0.247	0.233	0.194	0.236	0.298	0.280
1991	1.272	1.011	0.727	0.501	0.461	0.384	0.361	0.283	0.183	0.195	0.390	0.423	0.516
1992	0.864	0.379	0.215	0.195	0.186	0.223	0.220	0.216	0.178	0.211	0.220	0.240	0.279
1993	4.235	0.346	0.772	0.155	0.125	0.148	0.161	0.182	0.112	0.129	0.161	0.174	0.558
1994	0.761	3.244	0.519	0.486	0.433	0.318	0.314	0.186	0.153	0.098	0.123	0.193	0.569
1995	0.159	0.291	0.482	0.350	0.346	0.359	0.292	0.211	0.174	0.129	0.148	0.136	0.256
1996	0.583	0.648	0.471	0.287	0.292	0.270	0.220	0.221	0.129	0.123	0.144	0.239	0.302
1997	1.640	2.765	0.547	0.401	0.286	0.247	0.228	0.292	0.280	0.162	0.182	0.190	0.602
1998	1.821	0.245	0.312	0.313	0.232	0.207	0.177	0.125	0.115	0.144	0.146	0.153	0.333
1999	0.161	3.738	3.044	0.854	0.161	0.515	0.575	0.456	0.339	0.456	0.278	0.339	0.910
2000	1.165	1.467	1.266	0.693	0.575	0.575	0.161	0.456	0.278	0.339	0.220	0.397	0.633
2001	1.423	1.868	1.768	0.908	0.664	0.575	0.278	0.456	0.397	0.278	0.220	0.352	0.766
2002	0.456	1.049	2.121	0.930	0.812	0.693	0.812	0.634	0.515	0.456	0.397	0.161	0.753
2003	0.389	0.445	0.521	0.459	0.456	0.347	0.318	0.310	0.244	0.183	0.478	0.258	0.367
2004	0.633	1.246	0.673	0.515	0.434	0.528	0.298	0.564	0.388	0.356	0.238	0.299	0.514
2005	0.552	1.643	0.493	0.384	0.416	0.383	0.337	0.291	0.377	0.260	0.238	0.405	0.482
2006	0.927	1.487	1.119	0.786	0.498	0.497	0.355	0.394	0.351	0.379	0.337	0.348	0.623
2007	0.276	0.618	0.608	0.388	0.340	0.283	0.407	0.343	0.244	0.168	0.198	0.261	0.345
2008	0.773	0.696	0.747	0.353	0.305	0.431	0.304	0.302	0.221	0.155	0.163	0.164	0.385
Prom 65-08	1.074	1.253	0.832	0.453	0.357	0.350	0.310	0.312	0.258	0.221	0.245	0.346	0.501

Fuente: Elaboración propia con modelo CHAC-SIMULA

ANEXO II: CAUDAL REMANENTE DEL RÍO DESAGUADERO

Tabla II.1: Caudal (m3/s) remanente histórico del río Desaguadero, periodo 1965-08

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1965								36.6	62.8	43.4	33.2	38.8	
1966	50.8	126.2	79.9	56.8	32.6	34.4	29.0	27.5	20.6	11.5	10.7	19.9	41.7
1967	20.3	57.2	49.0	22.5	12.6	11.2	15.9	12.4	15.6	8.4	9.0	19.1	21.1
1968	21.5	131.5	84.5	50.1	25.1	24.9	24.5	15.8	11.7	11.0	29.6	51.1	40.1
1969	101.5	57.2	31.5	16.4	16.1	17.2	14.8	8.7	7.8	5.4	4.8	12.6	24.5
1970	81.7	136.1	58.6	30.1	16.4	16.0	17.2	12.8	10.2	6.2	7.9	22.9	34.7
1971	33.3	186.8	84.7	32.2	15.9	12.7	14.4	12.9	6.6	6.2	3.9	39.9	37.5
1972	256.7	77.4	163.0	65.9	16.8	13.9	11.5	15.6	13.0	10.6	5.5	25.3	56.3
1973	178.1	215.6	123.2	36.6	34.1	27.3	20.4	10.6	10.8	6.1	7.0	7.8	56.5
1974	188.3	427.6	173.5	77.5	59.7	53.7	49.3	69.2	31.0	10.9	9.5	11.6	96.8
1975	117.3	323.2	160.9	57.8	53.8	60.0	55.7	52.4	44.1	31.6	13.3	53.0	85.3
1976	282.2	161.2	111.9	88.0	72.1	74.6	71.8	62.5	53.1	40.7	24.6	25.2	89.0
1977	42.9	187.6	212.6	68.7	51.6	50.3	52.2	39.0	28.0	20.3	31.1	41.7	68.8
1978	161.0	147.7	84.9	83.1	63.6	70.0	61.5	58.4	42.0	18.6	29.8	65.5	73.8
1979	350.5	145.8	160.1	126.9	113.7	97.5	88.9	75.3	61.3	49.9	30.3	92.8	116.1
1980	79.5	80.4	132.7	77.0	61.3	53.1	56.1	35.2	37.5	27.2	16.1	24.5	56.7
1981	95.2	249.7	166.4	121.4	94.5	87.8	73.9	68.1	57.0	40.0	26.5	50.3	94.2
1982	202.3	98.4	131.8	103.9	93.5	83.2	76.4	65.5	59.9	44.4	37.8	27.3	85.4
1983	26.6	41.9	24.0	21.8	20.4	21.9	21.6	17.3	9.2	4.9	2.6	9.0	18.4
1984	286.1	448.2	252.0	226.0	160.8	130.2	109.4	90.5	70.1	80.7	118.7	78.7	170.9
1985	182.2	234.2	183.8	171.5	141.3	128.3	106.1	116.3	87.2	68.9	123.1	163.3	142.2
1986	437.2	454.3	432.3	439.0	393.8	255.3	276.2	269.0	322.7	200.8	165.8	164.5	317.6
1987	443.5	371.2	259.3	190.4	172.1	151.4	144.3	121.3	112.3	92.9	76.4	63.0	183.2
1988	197.0	146.8	165.7	218.4	158.4	132.3	120.9	110.4	112.0	98.7	55.4	64.8	131.7
1989	160.8	110.9	105.8	114.2	88.6	79.8	79.8	60.2	56.0	46.7	51.6	46.1	83.4
1990	85.3	58.8	49.7	47.1	42.3	51.4	40.6	30.3	27.3	29.4	32.1	53.3	45.6
1991	138.7	62.7	86.1	47.4	33.2	31.6	25.4	19.8	15.3	8.9	8.0	10.4	40.6
1992	99.7	24.2	28.3	15.0	9.0	9.6	9.7	9.7	8.4	7.2	12.3	30.1	21.9
1993	171.7	60.0	82.7	31.5	11.5	11.6	8.0	10.2	7.0	5.9	7.1	58.5	38.8
1994	88.1	287.4	39.1	32.9	17.4	15.4	14.1	9.3	6.7	5.7	4.6	11.6	44.4
1995	35.5	40.2	72.2	27.3	21.5	15.8	14.6	6.0	5.6	5.3	5.8	11.2	21.8
1996	89.6	84.5	33.2	31.4	15.2	12.9	12.1	7.1	6.1	4.0	5.4	31.1	27.7
1997	136.2	324.0	146.2	44.6	20.1	16.9	12.0	6.7	8.7	6.4	6.4	6.6	61.2
1998	61.8	74.0	14.5	10.5	7.8	10.1	11.7	6.1	5.4	4.9	6.2	5.4	18.2
1999	26.2	197.5	276.1	128.8	39.1	14.4	10.5	7.2	5.9	5.3	5.6	7.4	60.3
2000	86.6	123.8	141.0	33.0	15.5	16.3	16.1	10.6	9.6	5.9	4.1	6.7	39.1
2001	148.2	451.4	267.4	66.8	39.2	31.1	31.4	10.0	13.0	9.4	10.3	10.6	90.7
2002	31.1	136.5	148.8	61.2	47.3	39.6	39.2	25.6	19.2	18.0	18.6	28.6	51.1
2003	91.3	114.8	143.5	77.6	64.5	58.1	31.2	29.9	22.0	29.0	21.7	25.8	59.1
2004	199.9	244.4	109.5	99.6	75.5	71.7	74.8	59.0	44.5	31.4	25.0	23.0	88.2
2005	92.8	188.4	74.3	59.7	39.6	38.3	35.3	31.5	30.1	18.3	16.8	31.2	54.7
2006	314.4	252.8	122.0	102.1	65.6	53.2	44.6	34.7	24.1	20.1	20.4	24.3	89.9
2007	80.6	56.0	152.7	48.8	37.4	39.6	34.3	22.2	20.5	12.6	13.9	23.2	45.1
2008	119.6	81.3	71.4	36.4	26.6	28.6	24.8	21.6	14.6	8.3	5.1	18.7	38.1
Prom65 - 08	141.7	173.9	127.7	81.3	60.4	52.4	48.4	41.4	37.2	27.8	26.2	37.2	71.2

Se entiende por caudal remanente al caudal que sale del sistema. Puede asumirse que este caudal ingresa al lago Poopó por los brazos del río Desaguadero

Fuente: Elaboración propia en base a resultados MIKE BASIN

ANEXO III: CAUDAL DEL RIO MAURI EN FRONTERA SEGÚN ESCENARIO

Tabla III.1: Serie de caudales históricos (m3/s), completados-corregidos del río Mauri en Frontera, 1965-08

ESTACION :	FRONTERA	DPTO.	TACNA	LONGITUD	-69.45
CUENCA :	MAURI	PROV.	TARATA	LATITUD	-17.47
RIO :	MAURI	DIST.	TARATA	ALTITUD	4000 m

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
1965								2.80	3.00	1.95	1.74	2.08	
1966	1.76	2.85	2.91	2.28	2.70	2.63	2.67	2.61	2.27	2.21	2.38	2.66	2.49
1967	2.51	4.79	7.38	3.90	2.86	2.98	2.98	2.83	2.77	2.65	2.53	3.18	3.45
1968	4.94	7.49	6.17	3.32	3.03	2.45	2.60	2.21	2.12	2.20	3.50	3.04	3.59
1969	4.21	5.03	3.57	2.33	2.41	2.52	2.41	2.53	2.57	2.06	1.89	2.93	2.87
1970	4.51	6.08	5.09	3.90	3.09	2.69	2.65	2.44	1.99	2.17	2.09	3.28	3.33
1971	4.85	15.94	5.80	2.80	2.65	2.62	2.62	2.33	2.02	1.92	2.24	2.62	4.03
1972	9.86	7.42	14.68	5.81	3.34	2.91	3.19	2.86	2.74	2.74	2.52	3.67	5.15
1973	7.64	11.01	9.51	4.74	3.31	2.90	3.08	3.32	2.32	2.23	2.05	2.52	4.55
1974	14.11	24.03	8.05	5.98	3.17	3.06	3.05	3.50	2.93	2.16	2.18	2.22	6.20
1975	4.41	16.01	13.16	4.69	3.55	3.34	3.22	2.57	2.14	2.02	1.63	3.73	5.04
1976	8.67	8.45	6.99	3.89	3.27	3.47	3.42	2.89	2.69	2.22	2.08	2.08	4.18
1977	3.05	7.73	13.04	4.00	3.11	3.15	3.10	2.85	2.69	2.53	3.20	2.71	4.26
1978	7.99	6.09	3.60	3.21	2.71	2.78	2.96	2.82	2.42	2.29	2.83	3.04	3.56
1979	12.19	3.06	4.99	3.12	2.86	2.99	3.14	2.92	2.55	2.73	2.20	3.23	3.83
1980	2.99	2.94	5.68	3.11	2.66	2.56	2.64	2.58	2.48	2.48	2.50	2.12	2.89
1981	4.36	13.58	7.03	3.63	2.82	2.88	2.95	2.69	2.38	2.16	2.17	3.14	4.15
1982	6.64	4.37	4.80	3.17	3.02	3.01	3.13	2.94	2.54	2.56	2.44	2.45	3.42
1983	2.42	2.04	2.06	2.21	2.38	2.39	2.46	2.46	2.24	2.20	2.23	2.51	2.30
1984	8.97	18.98	15.51	3.76	3.29	3.10	3.05	2.89	2.49	2.76	4.63	3.49	6.08
1985	5.02	14.00	5.55	3.88	3.03	2.77	2.53	2.51	2.54	2.40	6.30	10.50	5.09
1986	13.86	14.44	16.86	5.12	3.49	3.23	3.15	2.81	2.70	2.63	2.57	4.54	6.28
1987	10.05	6.59	4.27	2.61	2.71	2.80	3.53	3.84	2.42	2.23	2.21	1.98	3.77
1988	3.60	5.73	4.29	3.66	2.43	2.04	2.04	1.72	1.61	1.38	1.11	2.84	2.70
1989	4.99	4.88	5.46	4.88	2.98	2.94	2.97	2.92	2.09	1.99	1.82	1.64	3.30
1990	4.07	2.39	2.52	2.36	2.03	2.23	2.61	2.15	2.50	2.66	2.96	3.69	2.68
1991	4.63	4.10	4.45	2.99	2.52	2.84	2.15	2.04	1.96	1.71	1.85	1.78	2.75
1992	2.60	1.73	1.71	1.81	2.13	2.23	2.14	2.05	1.78	1.94	2.44	2.78	2.11
1993	6.35	3.17	4.62	2.65	2.63	2.71	2.51	2.98	2.53	3.38	2.57	3.07	3.27
1994	3.05	10.40	3.39	3.06	3.11	3.10	3.08	2.98	3.01	2.94	3.09	3.38	3.72
1995	3.50	4.11	5.52	2.63	2.31	2.20	2.63	2.63	2.06	2.00	2.00	2.71	2.86
1996	3.14	3.78	2.68	2.41	2.19	2.00	1.92	1.82	1.84	1.82	1.92	2.44	2.33
1997	5.66	10.50	4.57	2.79	2.05	1.95	1.79	1.94	1.91	1.70	1.69	1.88	3.20
1998	4.36	3.98	1.99	2.00	2.14	1.87	1.85	1.81	1.70	1.60	1.67	1.81	2.23
1999	2.60	13.13	18.92	6.01	2.39	2.62	2.29	2.16	2.11	2.12	1.88	2.23	4.87
2000	6.26	11.87	12.42	2.88	2.36	2.23	2.20	2.16	1.84	1.77	1.72	2.38	4.17
2001	13.63	25.03	16.82	5.91	3.89	2.85	3.14	2.90	2.58	2.35	2.18	2.79	7.00
2002	2.83	7.39	9.57	5.28	2.83	2.43	2.65	2.66	2.03	2.46	2.51	2.50	3.76
2003	4.06	4.26	4.00	2.68	2.61	2.43	2.28	2.16	2.04	1.81	1.83	2.04	2.68
2004	7.32	10.94	3.03	2.49	2.07	2.15	2.52	2.43	2.03	1.72	1.62	1.92	3.35
2005	3.85	10.28	3.42	2.76	1.98	2.09	2.22	1.97	2.19	1.84	1.88	3.35	3.15
2006	15.81	19.77	18.58	12.50	2.65	2.64	2.62	2.23	2.27	2.37	2.57	2.50	7.21
2007	5.36	6.75	10.32	4.23	3.15	3.33	2.99	2.66	2.72	2.44	2.47	2.83	4.10
2008	5.28	4.52	4.40	3.07	2.33	2.59	2.35	2.03	2.04	1.82	1.74	2.58	2.89
Prom 65-08	6.00	8.64	7.19	3.73	2.75	2.67	2.68	2.56	2.31	2.21	2.36	2.88	3.83
Máximo	15.81	25.03	18.92	12.50	3.89	3.47	3.53	3.84	3.01	3.38	6.30	10.50	9.18
Mínimo	1.76	1.73	1.71	1.81	1.98	1.87	1.79	1.72	1.61	1.38	1.11	1.64	1.68

Fuente: Elaboración propia en base a datos del PET corregidos y completados

ANEXO IV: DEFICIT EN SISTEMAS DE RIEGO EXISTENTES

Notas: - Para todos los casos los valores simulados corresponden al periodo 1965-05.
- Se muestran los sistemas de riego del brazo izquierdo del río Desaguadero

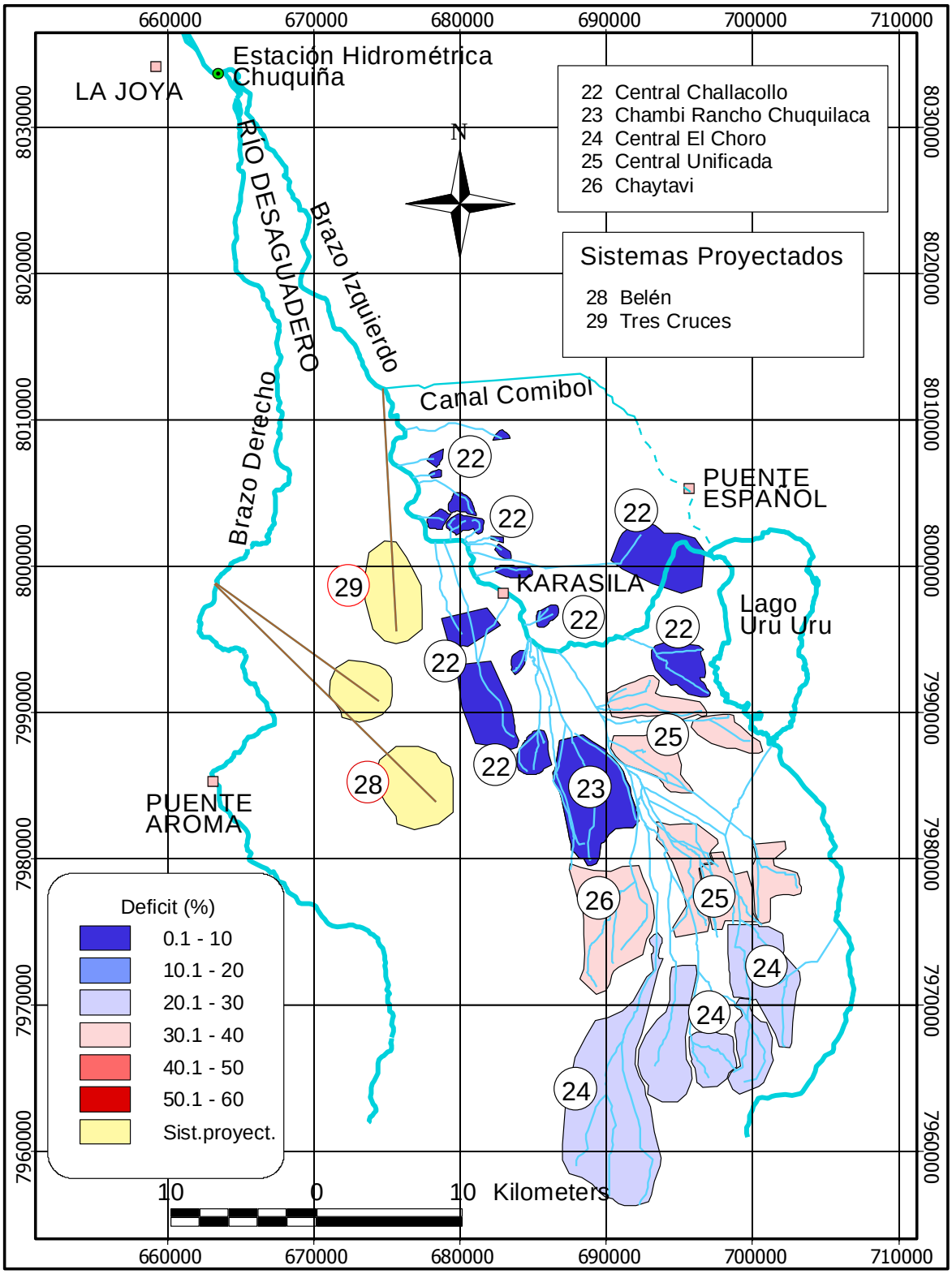



Figura A.IV.1: Déficit promedio (%) del mes más crítico en la situación actual