

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMON

CENTRO ANDINO PARA LA GESTION Y USO DEL AGUA

PROYECTO SID AGUA



ION Y USO DE

DINAMICA DEL FLUJO Y CONTROL DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA PUCARA

Jorge A. Iriarte Terrazas

Rígel F. Rocha López

2013

Contenido

1. Introducción:	1
2. Antecedentes	2
3. Problema de Investigación	3
4. Objetivo de Investigación	4
5. Pregunta Principal	4
6. Marco Conceptual	4
6.1. Control del agua:.....	4
a. Control técnico del agua:	5
b. Control organizacional del agua:.....	5
c. Control socio-económico y político del agua:	5
7. Metodología:	5
8. Resultados:	12
8.1. Periodos de control de agua en la cuenca Pucara	13
a) Periodo de control comunal (1953-1978):.....	14
b) Periodo de intervención estatal I (1978-1992)	14
c) Periodo de intervención estatal II (1992-2011)	15
8.2. Dinámica de caudales en los tres periodos.....	16
9. Conclusiones:.....	17
10. Referencias Bibliográficas	17
11. Anexos.....	19
Anexo 1. Datos de precipitación para el periodo 1953-1977 generado por el SWAT.....	19
Anexo 2. Presas y trasvases considerados para el primer periodo (1953-1977).....	20
Anexo 3. Presas y trasvases considerados para el segundo periodo (1978-1991).....	20
Anexo 4. Presas y trasvases considerados para el tercer periodo (1992-2011)	20
Anexo 5. Hidrograma de los caudales observados y simulados para el periodo 1992-2007.	21
Anexo 6. Esquema hidrológico para el periodo 1992-2011.	22

DINAMICA DEL FLUJO Y CONTROL DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA PUCARA

1. Introducción:

Como ocurre con otros recursos naturales, el agua es esencial para el desarrollo de la actividad humana. Sin embargo, es bien conocido que la escasa disponibilidad de agua en el tiempo y en el espacio constituye un problema que condiciona la vida de muchas personas. Así, el análisis de la disponibilidad de los recursos hídricos en el espacio y en el tiempo es complejo, y la simplificación en su tratamiento puede conducir a la toma de decisiones erróneas en situaciones de escasez de agua, pudiendo provocar efectos contrarios a los deseados.

Es así que en el contexto de cuencas, los recursos hídricos son aprovechados normalmente para el uso doméstico y la producción de alimentos, en tiempos pasados cuando la población era baja, la gente adaptó la agricultura a escenarios donde el agua y la tierra era relativamente suficientes, sin embargo gradualmente fueron realizando estructuras de control del agua (tomas, presas, trasvases y otros). Ya en un contexto de mayor desarrollo ante la aparición de industrias y ciudades, estos entran en una creciente competencia con el riego, lo cual condiciona que en el futuro la agricultura tendrá que producir más con menos agua.

A lo largo de la historia en nuestro país la planificación y ejecución de las intervenciones de riego suelen realizarse sin tener en cuenta otros usos del agua, como también el desarrollo de recursos hídricos para otros usos no toman en cuenta sus efectos en el riego.

Por otro lado la presencia de múltiples geografías, climas y otras variables a lo largo del territorio y más aún ante la falta de estaciones meteorológicas distribuidas uniformemente, hace que el comprender la realidad hídrica mediante modelos sea aún más complejo.

La cuenca Pucara, es un área que cuenta con las fuentes de agua más importantes para el Valle Alto de Cochabamba (principalmente Punata), ha sido beneficiaria de muchos proyectos de mejoramiento de sistemas de riego. De esa manera, durante la década de los 60 se han ejecutado en la zona proyectos de gran envergadura como ser el mejoramiento de las represas de Laguna Robada y Lluska Qhocha en beneficio del abanico de Punata y la construcción de las represas de Koari-Kewiña y Pachaj Qhocha en beneficio de comunidades de Tiraque. Posteriormente, el Programa de Riego Altiplano Valles (PRAV), programa del gobierno boliviano y la cooperación alemana, realiza el mejoramiento de la infraestructura de estos sistemas. Finalmente, en la década de los 80 el Proyecto de Riego Altiplano y Valles (PRAV) y en los 90 el Proyecto de Riego Intervalles (PRIV) implementa el proyecto Tatora Qhocha en beneficio de 33 comunidades en Tiraque y 55 comunidades en Punata. Como parte de este último proyecto se mejora también la infraestructura en las zonas de riego (Cossio y Delgadillo, 2012).

Como se ha visto en el párrafo anterior, en la cuenca Pucara ha existido muchas intervenciones de proyectos tanto de mejoramiento como de construcción de obras de captura de agua, sin embargo como parte del desarrollo de recursos hídricos, la presión sobre el recurso agua ha ido aumentando a medida que se ha ido desarrollando al sociedad (población, uso de la tierra y otros), lo cual ha derivado a una captura de agua sin

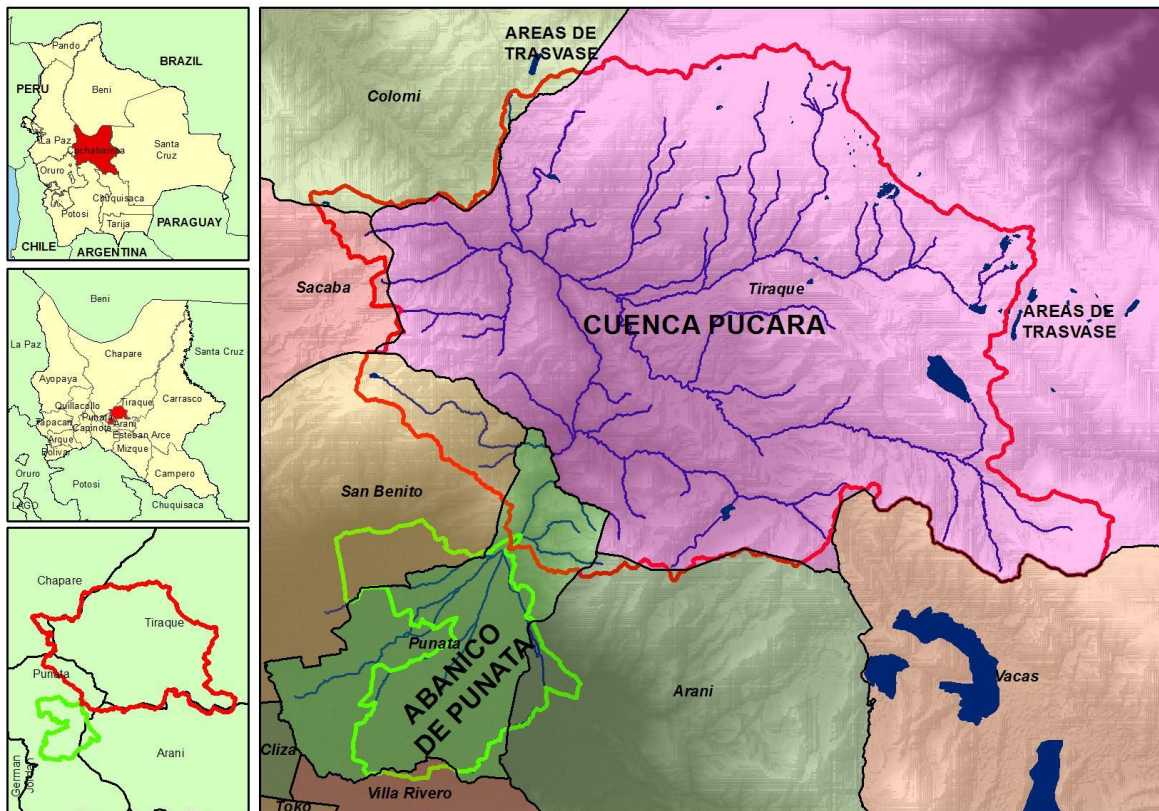
planificación, que actualmente ha llevado hacia un virtual cierre de la cuenca, sin embargo más allá de tratar de buscar equilibrio entre la disponibilidad y uso del agua, se pretende dar respuesta a la falta de agua mediante los trasvases de otras cuencas, sin considerar sus efectos a estos, para poder definir los escenarios anteriores es que se recurren a herramientas de modelación, en nuestro caso al modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), en su versión 2.3.4 (2009), bajo la plataforma de ArcGis 9.3.1.

2. Antecedentes

La cuenca Pucara está localizado aproximadamente a 60 Km de la ciudad de Cochabamba, comprende la cuenca hidrográfica de Pucara, las zonas de trasvase (Laguna robada, Cuencas A, B y C) y el abanico de Punata, de acuerdo al mapa de municipios (2004), la mayor parte del área de estudio se encuentra en los municipios de Tiraque y Punata, con pequeñas áreas en los municipios de Arani, Vacas, San Benito, Sacaba y Colomi.

Geográficamente la cuenca Pucara se ubica entre los 17°19' y 17°36' de latitud sur y entre los 65°22' y 65°53' de longitud oeste (en el Sistema Geodésico Mundial 1984), según Cruz (2011), el punto más alto de la cuenca se ubica a 4650 msnm en las montañas por el lado Norte y el punto más bajo se ubica a 2800 msnm a la salida de la cuenca Pucara.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.



La precipitación pluvial promedio anual aumenta desde la parte Sur hacia el Norte. A la salida de la cuenca Pucara, inicio del abanico de Punata, la precipitación anual es alrededor de 380mm, el clima en esta parte es seco; pero existen lluvias muy cortas y temporales que se presentan alrededor del valle conformado por el río Pucara haciendo que la precipitación sea algo mayor del resto de la zona. En Tiraque la precipitación

media anual es de 500mm. En las cabeceras conformadas por las montañas de la cordillera Oriental la precipitación es alta y alcanza los 1000mm al año (Cruz, 2009).

Agroecológicamente el área de estudio comprende cuatro zonas: La zona de valles que corresponde a la salida de la cuenca Pucara y el abanico de Punata (altitud 2700 a 3100 msnm); la zona de cabecera de valles que es representado por el abanico de Tiraque (3100 a 3350 msnm); la zona de transición que corresponden a las laderas por encima el abanico de Tiraque (3350 a 3650 msnm); y por último la zona de Puna que corresponde a las altura de Tiraque (por encima de los 3650 msnm).

Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), en base al censo del año 2001 y su cartografía provisional, el área de estudio está conformado por aproximadamente 181 centros poblados, con una población de 48.555 habitantes en 14.797 viviendas, se concentra la mayor población en los poblados de Punata (14.742 hab.) y en Tiraque (1906 habitantes), estando en el resto de los poblados en forma dispersa.

En términos de recursos hídricos entre las fuentes más importantes aprovechadas para riego por Tiraque, se encuentran los reservorios de: Totorá Khocha, Koari K'ewiña, Pachaj Khocha y Tukuruyo, entre las que son usadas de ríos estas las de Millu Mayu y Toralapa, asimismo cabe mencionar que existen también varias vertientes y pozos. Entre las aprovechadas por el abanico de Punata se encuentran los reservorios de Laguna Robada, Llusca Khocha-Muyu Loma, las de flujo superficial está el Río Pucara, por último están los pozos (aguas subterráneas).

Entre las actividades económicas principales de la zona de estudio, está la producción tanto agrícola como pecuaria, siendo los principales cultivos en la zona de Tiraque la papa, el haba y el maíz, aunque en algunas pequeñas zonas templadas también existen hortalizas, en la zona de Punata los cultivos más importantes son el maíz, la papa, hortalizas, alfalfa y durazno, aunque en la última década ha existido un incremento en el rubro de ganado vacuno lechero, lo cual ha incrementado la producción de forrajes (maíz, alfalfa, etc.).

Como se ha visto anteriormente la zona de estudio, es de vocación productiva agropecuaria, obviamente por la existencia de varias fuentes de agua (la mayoría en el municipio de Tiraque), es así que históricamente el desarrollo de los recursos hídricos ha sido dirigido principalmente hacia el riego, caracterizado por procesos de negociación y conflicto, concluyendo casi siempre en acuerdos entre organizaciones de usuarios del agua, territorios y comunidades. Por otro lado estos han permitido la ejecución de grandes obras de infraestructura hidráulica (presas), cuyo propósito es la de incrementar la oferta de agua para la producción agrícola.

3. Problema de Investigación

A lo largo de la historia el aprovechamiento de agua para riego ha sido motivo de conflicto entre los diferentes usuarios de la cuenca Pucara, estos conflictos se agudizan por la escasez de agua debido a un aumento de la demanda (incremento de la población y los usos) y una disminución de la oferta (cambios en el ciclo hidrológico), que ha ido provocando una sobre explotación de los recursos hídricos en la cuenca, lo cual ha provocado un virtual cierre de la cuenca (principalmente en épocas secas), además de aumentar la competencia y los conflictos por el agua. Entre los efectos inmediatos en el ciclo hidrológico de la cuenca Pucara está la disminución de los niveles freáticos en el valle (abanico de Punata) y la disminución del flujo natural del Río Pucara (prácticamente desaparece en épocas secas).

El estudio de los procesos hidrológicos en cuencas intervenidas, como es el caso de la cuenca Pucara, requiere entender estos procesos en el marco del proceso de desarrollo de la cuenca a lo largo de la historia.

Entender cómo es que una cuenca ha llegado a ser como es en el presente. En este sentido, es importante desarrollar los modelos de simulación hidrológica en términos de la trayectoria de la cuenca, vinculando los escenarios simulados de caudales de agua con las acciones de control socio técnico del recurso.

4. Objetivo de Investigación

Establecer un modelo (SWAT) y un Sistema de Información Geográfica sobre la dinámica espacial y Temporal del flujo y control de agua en la cuenca Pucara en tres periodos (1953-1977, 1978-1991 y 1992-2011).

5. Pregunta Principal

¿Cuál es la ***dinámica de control de agua*** para riego en la cuenca Pucara en tres periodos (1953-1977, 1978-1991 y 1992-2011)?

6. Marco Conceptual

6.1. Control del agua:

Según Ore (2005), el control del agua fue utilizado entre los ingenieros y los técnicos para referirse exclusivamente a su manejo físico. Solo recientemente la noción se ha referido al aspecto organizativo; en especial, en relación a las formas de cooperación, para lograr que el sistema funcione en razón de los objetivos buscados. Este aspecto también se encuentra presente en la literatura técnica sobre el riego. Sin embargo, hay otro ángulo todavía poco analizado, y son las relaciones de poder que se producen y reproducen dentro del sistema de irrigación para fortalecer el poder del estado y su legitimación.

Pero el control de agua en el sentido político está ligado al concepto del poder social, que no solo se encuentra en el contexto de los sistemas de riego, sino, también, en su interior. Las relaciones de poder pueden traducirse en disputas de distinto orden. Los diversos intereses de los usuarios de un sistema de irrigación pueden entrar en conflicto. Estos conflictos también forman parte de los fenómenos sociales que se dan en la dinámica del riego.

Es importante señalar que estos tres aspectos referidos al control del agua –lo físico, lo organizativo y lo político- están interrelacionados y son interdependientes, lo que afecta a uno de ellos afecta al conjunto del sistema.

Por otro lado Saldias (2009), menciona que parte de la política del agua es el control del agua. Mollinga (2008:12), sostiene que “cualquier intervención humana en el ciclo hidrológico que afecta intencionalmente el tiempo y/o las características espaciales de la disponibilidad del agua y/o su calidad, es una forma de control de agua. Por lo tanto, es algo que los seres humanos han hecho desde tiempos inmemoriales [...] y necesariamente lo seguirán haciendo. Las formas de control del agua, sin embargo, varían históricamente y geográficamente, y reciben sus características de su integración en un conjunto más amplio de su dinámica [...]”.

Mollinga (2008) al igual que Ore (2005), también se formula las dimensiones de control del agua, que en realidad dan forma al control del agua y que son las dimensiones de control técnico, organizacional y por último el control socio-económico y político del agua.

El control del agua como un concepto es más que un conjunto o catálogo de los significados que se refieren al mismo proceso. Las diferentes dimensiones de control de agua no son independientes, pero están íntimamente relacionados (por ejemplo, formas de diseño técnico formas de gestión, las formas políticas de regulación prácticas organizacionales, etc.)

En el presente estudio se considerara con mayor énfasis el control técnico, principalmente la construcción de presas, claro que se considerara también las otras dimensiones como parte del contexto, tal como se menciona en el párrafo anterior las dimensiones de control del agua no son independientes.

a. Control técnico del agua:

Según Mollinga (2008), es la dimensión que se asocia con la conducción – manipulación – dominación del proceso físico.

Está asociado al control físico del flujo de agua como un medio tecnológico de riego, el agua en primera instancia es controlada por la posibilidad de acceso a este recurso. En el caso de aguas subterráneas este es dependiente de la existencia de un acuífero debajo las tierras de los usuarios.

b. Control organizacional del agua:

Está asociada a la gestión y el comportamiento de la gente (Mollinga, 2008). Por otro lado Hoogesteger (2004) indica que el control organizacional se refiere a la regulación y control del comportamiento humano, particularmente considerando a las formas de cooperación, esto es necesario para hacer funcionar los sistemas de riego.

c. Control socio-económico y político del agua:

Aborda las condiciones de las posibilidades de control técnico y organizacional, este tipo de control está asociado con la dominación del trabajo de las personas y la regulación de los procesos sociales (mollinga 2008). Este nivel de control de agua define las condiciones que dan acceso a los factores técnicos determinantes del control del agua. Esta capacidad depende en lo económico las posibilidades de los productores para el pago de la tecnología y la energía que en una u otra dirección está relacionada a la economía de la región, los ingresos de los sistemas de producción agrícola y el acceso a subsidios gubernamentales. Los agricultores comerciales tienen un mayor control del agua socio-económico y político. Estos no tienen severas restricciones en el acceso al agua. Lo pequeños productores tienen más restricciones, y que están vinculados principalmente a la falta de capital, información, habilidades organizativas y poder político (Hoogesteger, 2004).

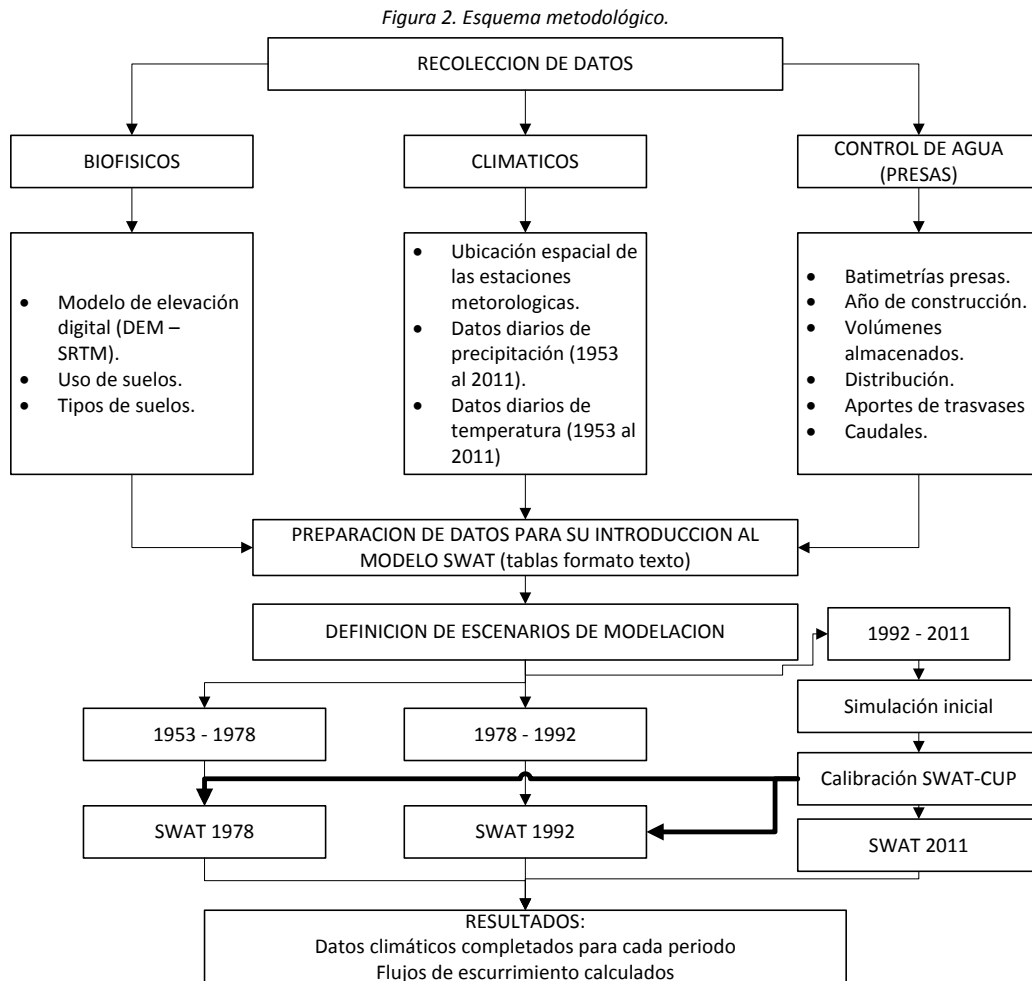
Estas dimensiones se entrelazaran, influenciando una a la otra y están unidas por el poder. Por ejemplo, los diseños técnicos dan forma a la gestión del agua, regulaciones políticas dan forma a las prácticas organizacionales (Mollinga, 2008).

Para el presente estudio se verá específicamente el control técnico desde la perspectiva de captura de agua a partir de infraestructura construida (presas y tomas), al interior de la cuenca Pucara.

7. Metodología:

La investigación se desarrolla en el marco de la dinámica de control del agua para riego entre los años 1953 y 2012 (específicamente tres periodos), para definir el proceso de control técnico del agua se ha recopilado datos relacionados a la implementación de infraestructura de riego (principalmente presas y tomas), cronológicamente como fueron implementados y sus efectos en la disponibilidad de agua principalmente a

la salida de la cuenca Pucara, para lo cual se recurrirá a modelos hidrológicos matemáticos (en nuestro caso el SWAT), preparándose para ello tres escenarios para los periodos; 1953 a1977, 1978 a 1991 y 1992 a 2011, para ello se ha definido tres etapas: Recolección de datos, modelación hidrológica y el análisis de datos.



7.1. Recolección de datos:

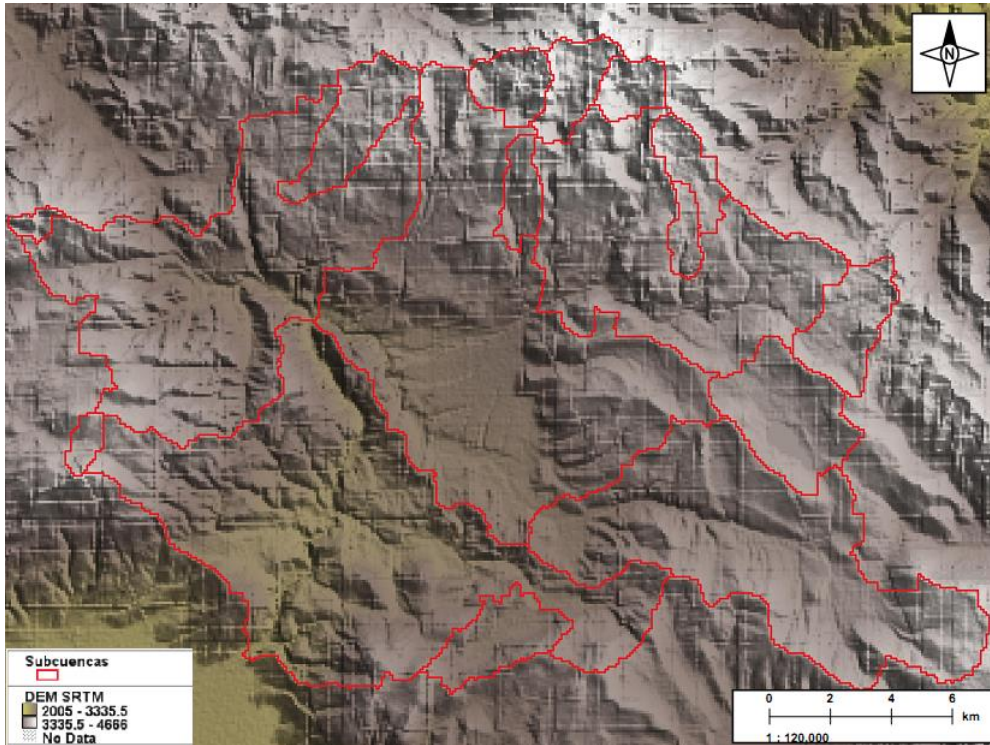
El control técnico se verá desde el punto de vista de infraestructura de riego existente en la cuenca Pucara entre los años 1953 y 2012, asimismo se recopilara toda la información requerida por el modelo ArcSWAT.

a. Datos Biofísicos.

Modelo de elevación digital.

El modelo de elevación, es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, para el presente estudio se utilizó imágenes de la misión topográfica de radar a bordo del transbordador (SRTM), con una resolución de 3 arc-segundos (aproximadamente 90 x 90metros).

Figura 3. Modelo de elevación digital de la cuenca Pucara.



Uso de suelos.

Se la obtuvo de la reclasificación del mapa de zonas de producción dominantes (ZSPDs), realizado en anteriores estudios, de acuerdo a las unidades de uso existentes en el SWAT.

Figura 4. Uso de la tierra de la cuenca Pucara.

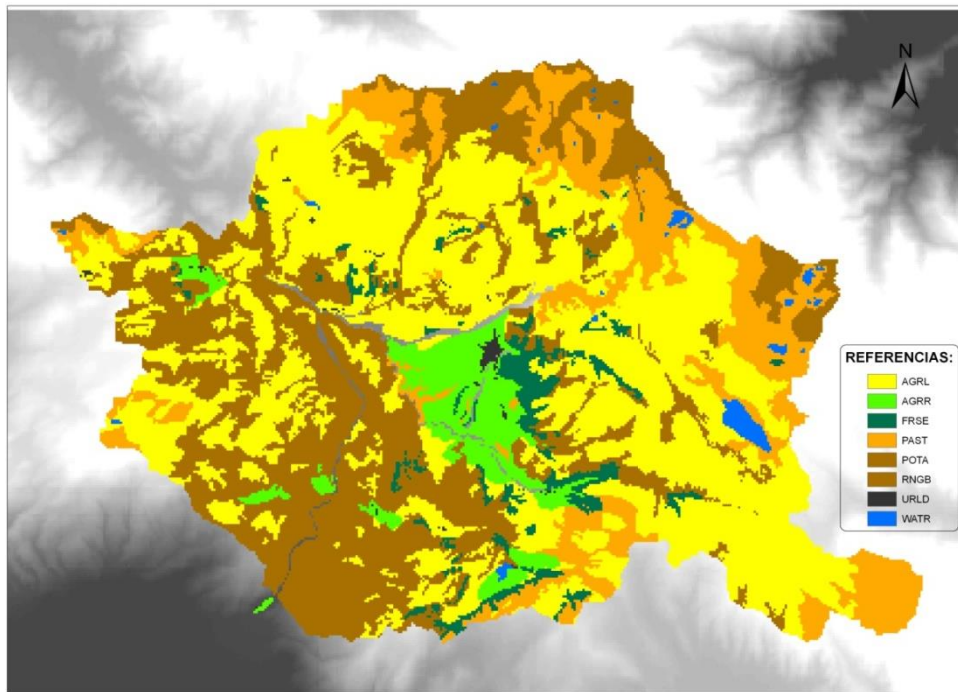
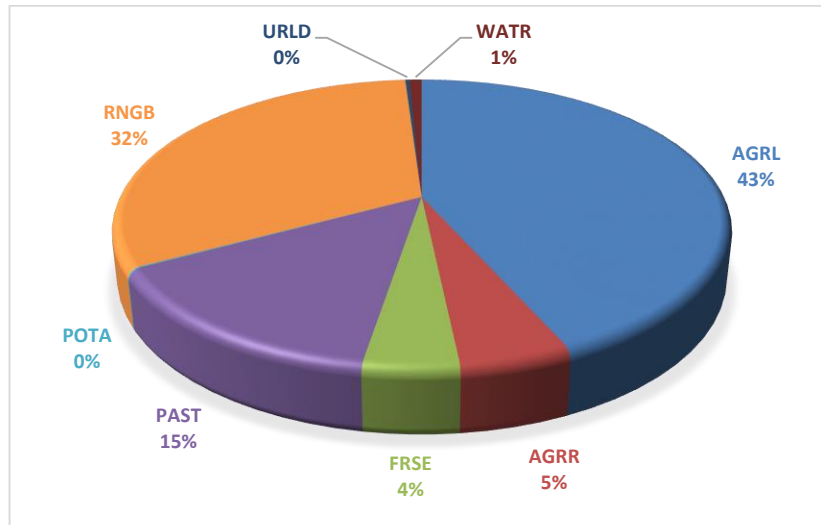


Figura 5. Distribución porcentual de los tipos de suelo.



Como se ha visto en la gráfica, el uso más preponderante en la zona de estudio es el agrícola (AGRL), dentro del cual se encuentra la agricultura temporal o de año, que es producido solamente con las lluvias, o excepcionalmente complementada con algún tipo de riego.

Tipo de suelo.

El tipo de suelo se extraxto del estudio de zonificación agroecológica realizada por Paredes (2003), el cual fue reclasificado de acuerdo a las unidades requeridas por el SWAT (unidades taxonómicas).

Figura 6. Tipos de suelo en la cuenca Pucara

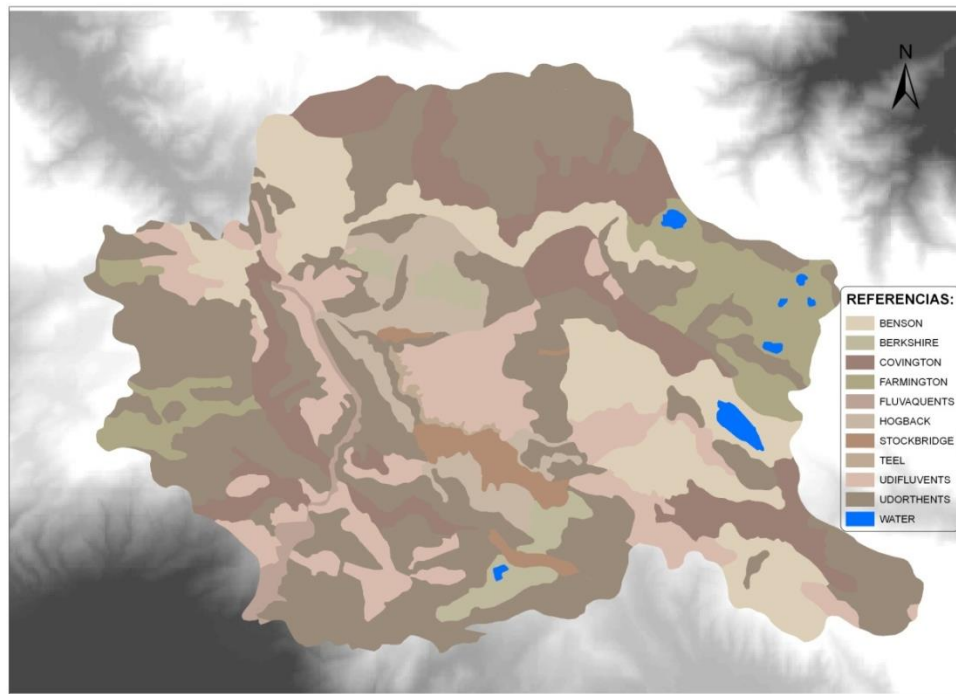
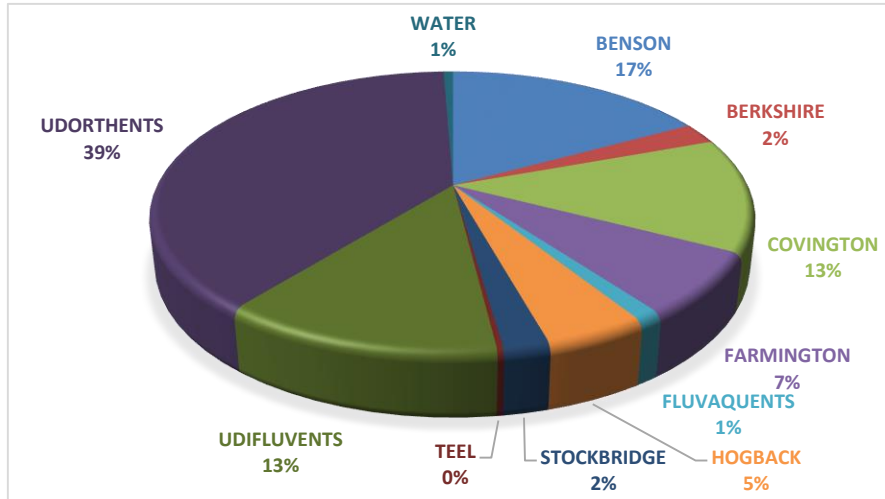


Figura 7. Distribución porcentual de uso de suelo.

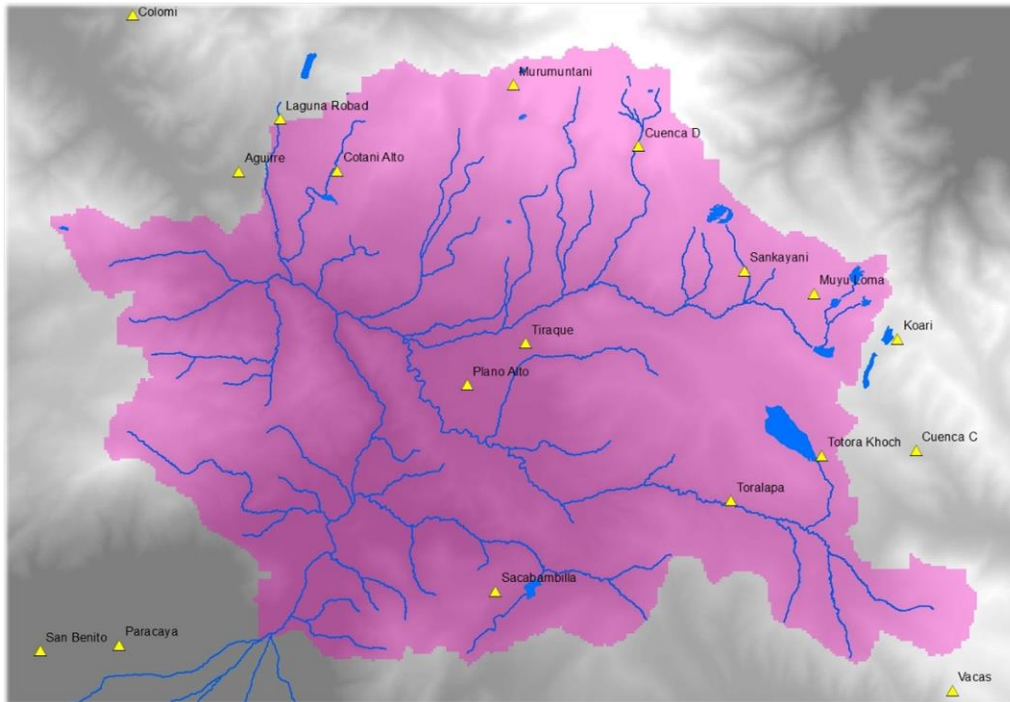


Como se ha visto en el mapa y en la gráfica, el grupo de suelos predominantes en la cuenca Pucara es el de Udorthents, que está formado por asociaciones de suelos *Entisoles* (horizontes poco desarrollados) e *Inceptisoles* (horizontes bien desarrollados).

a. Datos climáticos.

Para los parámetros climáticos se utilizó la estación meteorológica de Tiraque, los datos requeridos por el modelo SWAT básicamente son los de precipitación, temperaturas máximas y mínimas, para nuestro caso se usaron datos diarios desde el año 1953 al 2011, todos ellos fueron obtenidos Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), asimismo cabe mencionar que en las primeras décadas no existen series completas, los cuales son completados por el SWAT a través del generador climático (ver anexos).

Figura 8. Estaciones meteorológicas existentes en el área de estudio.



Como se observa en la figura anterior en la zona de estudio y sus alrededores existen 28 estaciones meteorológicas, sin embargo la mayoría de ellos no se encuentran dentro el rango de años estudiados de 1953 a 2011, siendo los únicos las estaciones de San Benito, Colomi y Tiraque, siendo este último que se tomó como base para los parámetros climáticos, ya que los otros dos por la lejanía al área de estudio aun cuando son incluidos en el modelo, son eliminados por este.

b. Datos de control de agua

Los datos utilizados tienen como base el inventario nacional de presas realizado por el Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO) el año 2010, fue complementado mediante la interpretación de imágenes ASTER Terralok, del año 2010, y el estudio de gestión de sistemas de riego de la cuenca Pucara, elaborado por Caceres (2009).

Los datos más relevantes y requeridos por el modelo son: Volumen de almacenamiento (hasta el vertedero de excedencias), volumen hasta el aliviadero de salida y el volumen muerto, todos ellos con sus respectivas áreas, en caso de no existir el último dato se tomó el 10% de su volumen total. Asimismo por tratarse de un estudio multi temporal, se requiere datos de los años en que fueron construidos (ver tabla 1).

Se tomaron en cuenta los escurrimientos utilizados para riego al interior de la cuenca a partir de las tomas de Toralapa y Millu Mayu, estos datos fueron extractados de la base de datos existentes de la cuenca Pucara Mayta (2012), en el modelo fueron considerados como puntos de entrada (ver figura 9).

Tabla 1. Datos de las principales acciones de control del agua.

id	Año	Acciones	Tipo	Flujo controlado (m ³ /año)
1	<1953	Millu Mayu	Toma	1589140.8
2	<1953	Mit'a Punata*	Toma	1346220
3	<1953	Mit'a Toralapa	Toma	394560
4	<1953	Pilayacu Pucara*	Toma	103680
5	<1953	Pilayacu Villa*	Toma	689472
6	<1953	Rol*	Toma	4078080
7	1952	Kotani	Presa	194000
11	1952	Laguna Robada (trasvase)	Presa	2200000
8	1964	Millu Khocha	Presa	50000
10	1980	Pachaj Khocha	Presa	1589000
15	1980	Pachaj Khocha 2	Presa	62800
16	1980	Toro Wañuna (trasvase)	Presa	46500
18	1984	Totorayoj Khocha	Presa	180000
19	1985	Laguna Tukuruyu	Presa	450000
13	1987	Muyu Loma	Presa	1000000
20	1988	Lluska Khocha	Presa	1250000
21	1989	Quechua Khocha	Presa	50000
22	1989	Puca Jusk'u	Presa	50000
9	1994	Totora Khocha	Presa	2318000
12	1994	Koari Khocha (trasvase)	Presa	1500000
14	1994	Cuencas A, B y C (trasvase)	Presa	4401850
17	1994	Kewiña Khocha (trasvase)	Presa	2000000
23	1996	Totorayoj	Presa	260000
24	2000	Tuti Laguna	Presa	148000
30	2000	Huayna Juno	Presa	25000
31	2000	K'ara K'asa	Presa	25000
25	2004	Choto	Presa	3300
26	2006	Cruz Khocha	Presa	100000
27	2007	K'asa Laguna	Presa	53000
28	2010	Kaspicancha	Presa	473000
29	2010	Murmuntani	Presa	890500
32	Sin dato	Wirkhini Qhata Qhata	Presa	70000

** Estas tomas se encuentran aguas abajo del punto de salida de la cuenca.*

a. Preparación de datos

La preparación de datos se realizó de acuerdo al formato requerido por el modelo SWAT, mencionado en el documento *Input/Output File Documentation* (Versión 2009). Los datos tabulados fueron preparados en formato texto (.txt), con separadores tabulares o espacios según sea el caso. Los datos faltantes, principalmente en los climáticos fueron reemplazados por el valor de -99, para que posteriormente sean rellenos por el generador climático del SWAT.

b. Definición de escenarios

La definición de los 3 escenarios se realizó en función del proceso de intervención y control de agua en la cuenca. Considerando la dinámica de la construcción y mejoramiento de la infraestructura de control hidráulico (embalses) a lo largo de los tres periodos, se estableció inicialmente el modelo para el tercer periodo (1992 al 2011), considerando el escenario para el último año del periodo (2011), en el cual la totalidad de los embalses existentes ya se encuentran desarrollados. A partir de este escenario, se modificaron las características de los embalses en términos del año de construcción y la variación de su capacidad de almacenamiento, llegando a constituir los otros dos escenarios (1978-1972 y 1992-2011) correspondientes a los dos periodos restantes.

c. Simulación inicial

Una vez definidos los escenarios se procedió a ingresar los datos al modelo inicial (1992-2011), para luego realizar la primera corrida del modelo. Esta primera corrida se realizó con el propósito de verificar la existencia de errores durante el cargado de datos, y para analizar de manera preliminar, la coherencia de los caudales superficiales de salida.

d. Calibración

Considerando que se disponen de muy pocos datos hidrométricos, el proceso de calibración se realizó con datos de caudales obtenidos del modelo de gestión de agua de la cuenca Pucara, desarrollado en MIKE BASIN (Cruz, 2011).

Una vez concluido la introducción de datos al modelo SWAT, se procedió al calibrado con el software SWAT-CUP, bajo el algoritmo sufi2, a partir de datos obtenidos del modelo Mike Basin (Cruz, 2009).

En la etapa de calibrado en el módulo de análisis de sensibilidad se obtuvo lo siguiente:

Tabla 2. Análisis de sensibilidad SWAT-CUP.

Parameter Name	t-Stat	P-Value
r_CN2.mgt	3.932844074	0.000556858
r_SOL_K(1).sol	2.871892983	0.008013784
r_SOL_BD(1).sol	2.413258008	0.023156758
v_ALPHA_BNK.rte	2.048410749	0.050741584
v_GW_DELAY.gw	-1.667763187	0.107364336
v_CH_N2.rte	-1.375086310	0.180839087
v_CH_K2.rte	-0.980873743	0.335694708
v_SFTMP.bsn	-0.708743313	0.484790623
v_ESCO.hru	-0.554817305	0.583761566
v_GW_REVAP.gw	0.444022428	0.660700011
r_SOL_AWC(1).sol	0.375459913	0.710364234
v_GWQMN.gw	-0.159649726	0.874390799
v_ALPHA_BF.gw	0.145308763	0.885587736

De acuerdo al anterior cuadro el parámetro con mayor sensibilidad son aquellos con valores mayores en la columna *t-stat* y valores menores en *P-values*, es decir que el parámetro más sensible es el de CN2, que es el valor inicial del número de curva para la condición de humedad que se utiliza para calcular la escorrentía

superficial en el método creado por el Servicio de Conservación de Suelos. Está incluido en la base de datos del modelo hidrológico.

En relación a los parámetros mejor estimados en la calibración son:

Tabla 3. Parámetros estimados por SWAT-CUP (mejores parámetros).

Parameter Name	Fitted Value
1 r_CN2.mgt	0.055000
2 v_ALPHA_BF.gw	0.162500
3 v_GW_DELAY.gw	161.250000
4 v_GWQMN.gw	0.825000
5 v_GW_REVAP.gw	0.097500
6 v_ESCO.hru	0.892500
7 v_CH_N2.rte	0.131250
8 v_CH_K2.rte	90.937500
9 v_ALPHA_BNK.rte	0.637500
10 r_SOL_AWC(1).sol	-0.057500
11 r_SOL_K(1).sol	0.780000
12 r_SOL_BD(1).sol	-0.018750
13 v_SFTMP.bsn	4.875000

Los anteriores parámetros fueron aplicados al periodo de calibración (1992 al 2007), obteniéndose los siguientes resultados estadísticos para el periodo 1992 a 2011:

Tabla 4. Análisis estadístico de los datos calibrados.

Parámetro estadístico	Sesgo porcentual (PBIAS)	Nash –Sutcliffe (NSE)	RMSE-Desv. Estandar (RSR)
Periodo 1992 - 2011	-35.8	0.75	0.50
Interpretación según Moriasi et. al. (2007)	No satisfactorio	Buena	Buena

Los parámetros NSE y RSR se encuentran aceptables, sin embargo el PBIAS se encuentra fuera de los rangos de aceptación, lo cual indica que la tendencia de los datos simulados es menor o mayor que los datos observados. Sin embargo, este parámetro es aceptable considerando la limitación de los datos observados reales. El hecho de no contar con los suficientes datos de caudales medidos para realizar la calibración, se constituye en una importante limitante del estudio, por lo que los resultados del modelo deben usarse como tendencias de respuesta de la cuenca más que como valores precisos reales.

e. Procesamiento final de resultados

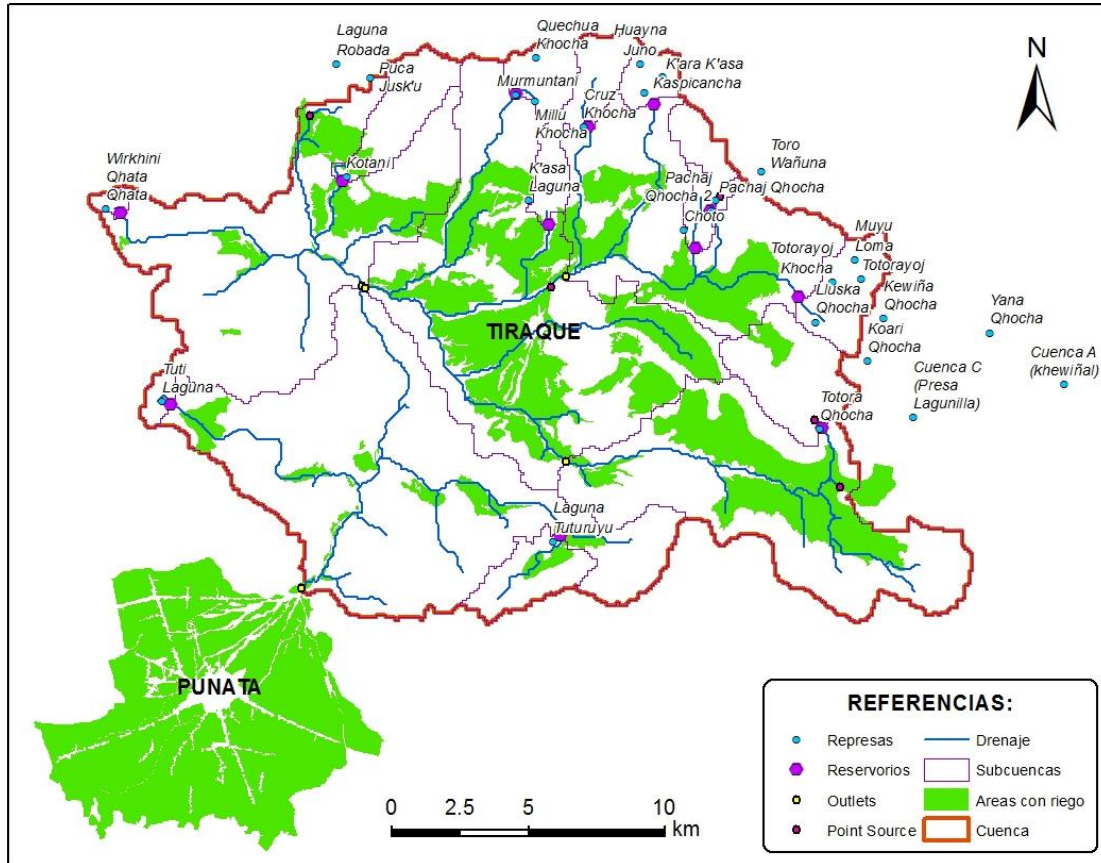
Una vez calibrado el modelo inicial, se procedió a establecer los otros dos modelos para los periodos 1953-1978 y 1978-1992, llegando finalmente a generar los tres escenarios de análisis con sus respectivos flujos de escurrimiento calculados.

8. Resultados:

Tal como se mencionó anteriormente, la cuenca Pucara tiene una larga historia de desarrollo de riego. A lo largo del tiempo, los pobladores de la cuenca han realizado diversos tipos de intervenciones en el ciclo hidrológico, llegando a controlar importantes caudales de agua para regar sus cultivos.

Cabe notar que el modelo incluye los caudales de agua trasvasados de cuencas vecinas que ingresan a la cuenca Pucara para alimentar embalses localizados en la cuenca, además de los caudales de agua de embalses localizados fuera de la cuenca y que ingresan sus aguas para riego a la cuenca. La Figura 9 ilustra el esquema del modelo inicial estructurado, donde se pueden observar los puntos de entrada (inlets) y salida (outlets) de agua de la cuenca para el periodo 1992-2011.

Figura 9. Estructura del modelo SWAT en su módulo ArcSWAT.



8.1. Periodos de control de agua en la cuenca Pucara

La contabilización de la dinámica de los caudales que fluyen en la cuenca, han podido diferenciar los periodos de captura del agua como se verá en el cuadro siguiente:

Tabla 5. Resumen de las características de control de agua en tres periodos para la cuenca de Pucara.

Periodo	Periodo de control comunal (1953-1978)	Periodo de intervención estatal I (1978-1992)	Periodo de intervención estatal II (1992-2011)
Caudal de ingreso por Precipitación (hm ³ /año)	213,3	230,6	231,7
Caudal de ingreso por Trasvase (hm ³ /año)	1,9	10,1	10,1
Caudal controlado para riego (hm ³ /año)	5,9	19,3	21,4
Caudal consumido: evaporación, infiltración, percolación y otros (hm ³ /año)	172,2	175,8	176,5
Caudal de salida cuenca hidrográfica (hm ³ /año)	37,1	45,7	44,0
Caudal de salida comprometido Punata (hm ³ /año)	5,2	6,4	6,2
Caudal de salida libre (hm ³ /año)	31,9	39,2	37,8

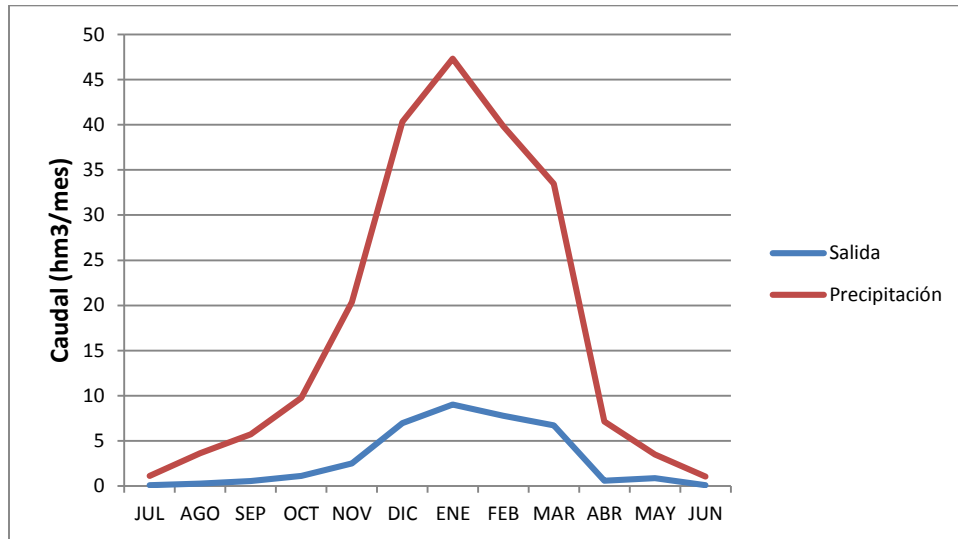
Como se puede ver, los ingresos de agua por precipitación pluvial se han ido incrementando con el tiempo, registrándose un incremento de 17.3 hm³/año del primer al segundo periodo, y de 1.1 hm³/año del segundo al tercer periodo. Asimismo la cantidad de ingresada a la cuenca a través de trasvases se ha incrementado de 1.9 a 10.1 hm³/año, (manteniéndose los dos últimos periodos).

A continuación se describen los periodos de control de agua considerados en el presente estudio y la relación entre entradas y salidas de agua en la cuenca Pucara:

a) Periodo de control comunal (1953-1978):

En este periodo las comunidades campesinas, por acción propia y con el apoyo técnico y financiero de agencias gubernamentales, lograron controlar y mejorar un total de 7 embalses, que junto con los sistemas de río, lograron captar un total de 5,9 hm³/año, de los cuales 1.15 hm³/año correspondían al embalse Laguna Robada que trasvasaba agua desde la zona de Aguirre para el riego de tierras en Punata.

Figura 10. Distribución de caudales de salida en relación a la precipitación (1953-1978).

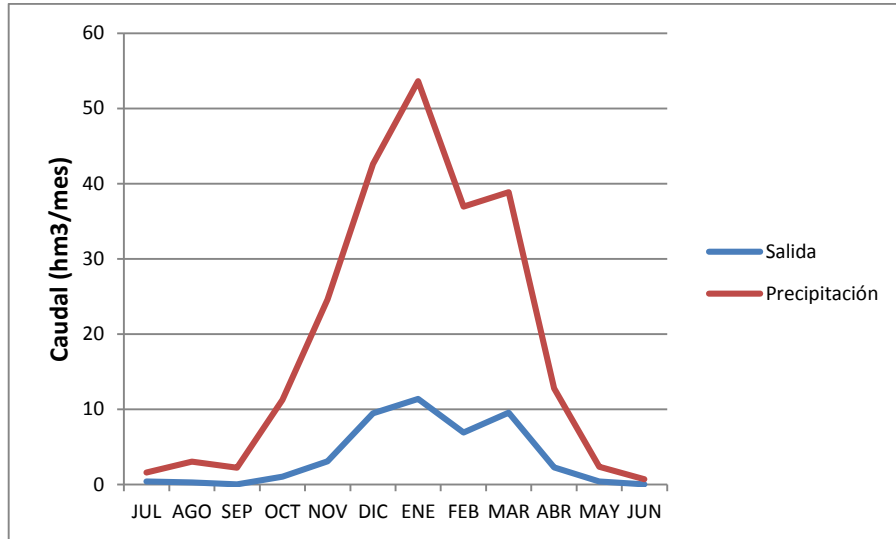


En este periodo la precipitación ha sido menor que los otros periodos analizados, alcanzando los 47.3 hm³/mes en enero, sin embargo la salida de agua se encuentra distribuido entre los meses de octubre a marzo por encima de 1 hm³/mes., ya en este periodo se puede observar la escasez de agua especialmente en los meses de junio a julio que tiene un 0.1 hm³/mes.

b) Periodo de intervención estatal I (1978-1992)

A partir de la intervención del PRAV y el desarrollo del proyecto Tiraque-Punata se realizó el mejoramiento de 6 embalses antiguos y la construcción del embalse de mayor tamaño Totora Khocha (construido sobre un embalse antiguo). Sumando el mejoramiento de otros 8 embalses pequeños en forma aislada, hasta 1992 se establecieron un total de 14 embalses. La cantidad de agua controlada para riego en este periodo se incrementó a 19.3 hm³/año, de los cuales 10.1 hm³/año correspondían a trasvases de agua de 5 embalses. Cabe mencionar que el embalse Totora Khocha fue diseñado y construido con una capacidad de 22 hm³ pero que sin embargo simplemente logró almacenar un promedio de 6.1 hm³/año.

Figura 10. Distribución de caudales de salida en relación a la precipitación (1978-1992).

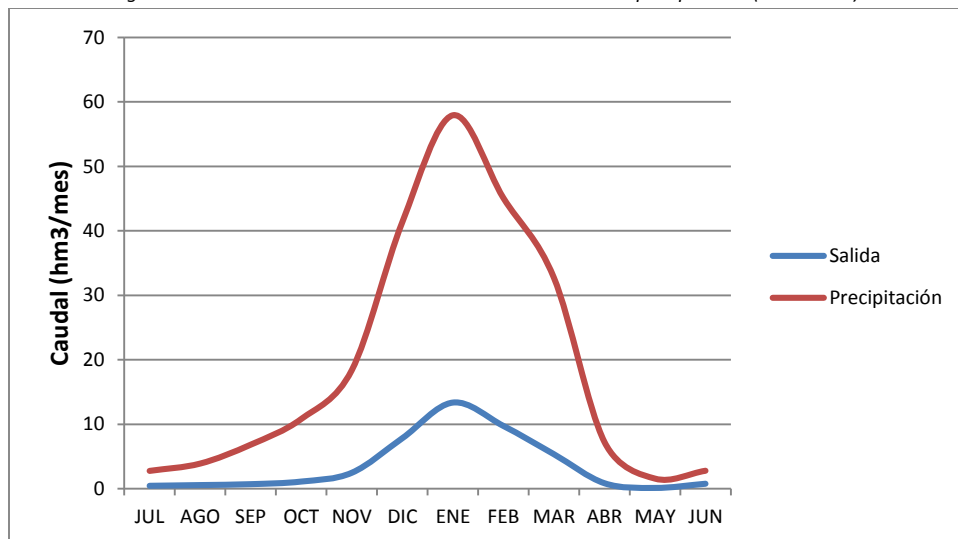


Como se observa en el gráfico anterior la precipitación es mayor al periodo anterior estudiado alcanzando los 53.6 hm³/mes en el mes de enero, sin embargo la distribución mensual considerando los valores por encima 1 hm³/mes se encuentra entre los meses de octubre a abril, sin embargo en este periodo se puede encontrar meses en los cuales prácticamente no existe agua a la salida de la cuenca (septiembre y junio), lo cual nos indicaría ya un virtual cierre de la cuenca en algunos meses, lo cual ya nos indica que las alternativas de provisión de más agua son los trasvases.

c) Periodo de intervención estatal II (1992-2011)

En este periodo, a partir de múltiples intervenciones estatales aisladas, se mejoraron otros 10 embalses, haciendo un total de 24 embalses establecidos. En total se logró controlar para riego 21.4 hm³/año, de los cuales 10.1 hm³/año (47%) correspondían a trasvases de cuencas vecinas. Producto de las múltiples intervenciones, el caudal de agua de escorrentía que sale de la cuenca disminuyó de 45.7 a 44 hm³/año, registrando una disminución de 1.7 hm³/año.

Figura 10. Distribución de caudales de salida en relación a la precipitación (1992-2011).

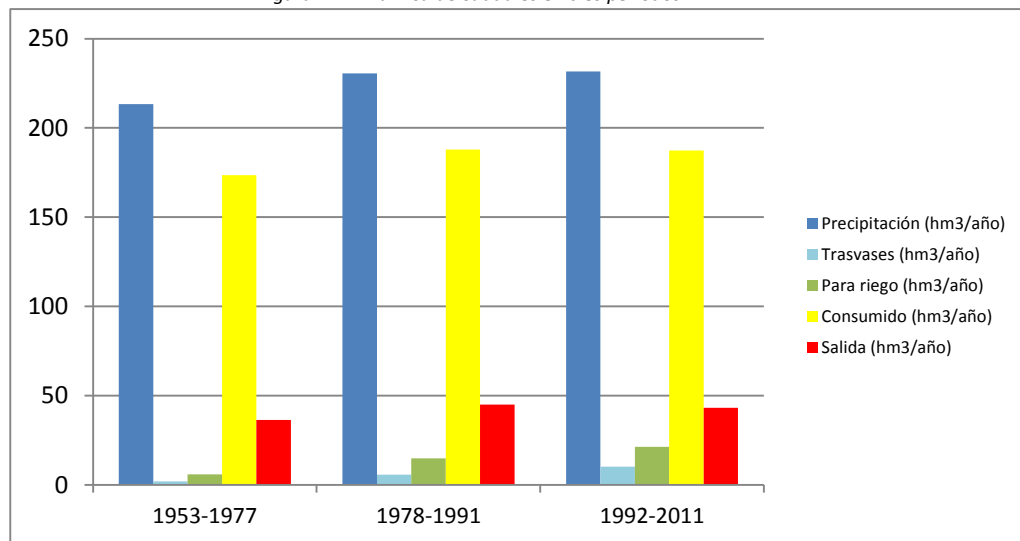


En este periodo la precipitación alcanzado los 57.9 hm³/mes en el mes de febrero, de acuerdo a la gráfica anterior, aparentemente existiría agua disponible suficiente, sin embargo haciendo la distribución a nivel mensual se puede evidenciar que la mayor parte se concentra en los meses de lluvia (noviembre a marzo), en el resto de los meses está por debajo del 1 hm³/mes, incluso casi llegando a 0,1 hm³/mes en mayo, pese a que en este periodo los trasvases han ido aumentando en casi el doble (de 5.7 a 10.1 hm³/año) en relación al periodo anterior.

8.2. Dinámica de caudales en los tres periodos

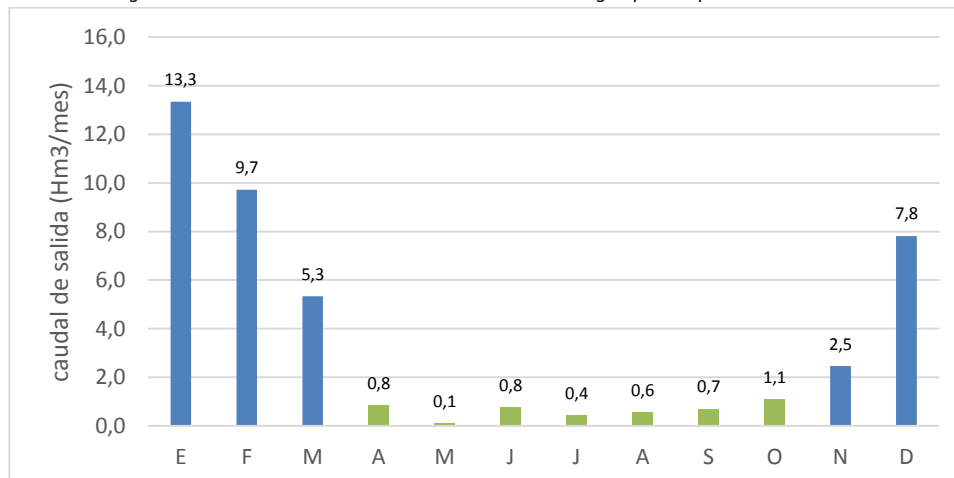
La dinámica a lo largo de los periodos en términos de precipitación ha ido aumentando de 213.3 a 231.7 hm³/año, lo cual también a implicado en un mayor control del agua al interior de la cuenca que en términos generales se puede decir que se ha triplicado (5.9 a 21.4 hm³/año), aunque cabe mencionar que una parte de estos viene como aporte de trasvases (aproximadamente 10.1 hm³/año).

Figura 12. Dinámica de caudales en tres periodos.



Como se ha visto en la gráfica anterior pese a existir, pese a existir un creciente control de agua, aparentemente existe suficiente agua, sin embargo para hacer una análisis de esta situación se ha hecho una gráfica de la distribución a nivel mensual de los escurrimientos para el último periodo.

Figura 13. Dinámica mensual de caudales de salida de agua para el periodo 1992-2011



De acuerdo a la gráfica anterior y el balance que se presente anteriormente, aparentemente existiría agua disponible suficiente, sin embargo haciendo la distribución a nivel mensual (promedios del último periodo) se puede evidenciar que la mayor parte se concentra en los meses de lluvia (noviembre a marzo), en el resto de los meses está por debajo del 1 hm³/mes, incluso casi llegando a 0,1 hm³/mes en mayo.

9. Conclusiones:

La modelación temporal y espacial de caudales considerando los medios de control de agua (presas), provee de valiosa información para el análisis profundo y detallado de la dinámica de los flujos de agua en una cuenca intervenida, para la construcción de escenarios, diferenciando y contabilizando los cambios de entradas y salidas de agua en la cuenca, relaciona los procesos naturales del ciclo hidrológico con los procesos sociales de control de agua, permitiendo una mayor aproximación de los caudales de agua existentes.

Ante la diversidad de modelos disponibles, el modelo SWAT aparece como válido para la cuenca Pucara. Como puntos fuertes de dicho modelo cabe destacar su carácter continuo en el tiempo y semi-distribuido en el espacio, así como los módulos específicos para su aplicación en cuencas agrícolas altamente intervenidas (represas). Por el contrario, sus mayores limitaciones son la relativa complejidad en el uso del software y la elevada cantidad de datos de entrada requeridos. En referencia a los datos requeridos, estos no siempre se encuentran disponibles en las cuencas de Bolivia, con vacíos de información en aspectos como datos climáticos históricos, datos de control de agua (caudales trasvasados, caudales aprovechados y prácticas de uso de agua) y datos hidrométricos para la calibración, siendo la falta de estos últimos la mayor limitación del presente estudio.

Los resultados logrados en el estudio realizado, justifican plenamente la orientación del proceso de desarrollo del riego en la cuenca Pucara, en cuanto a la construcción de embalses, los cuales permiten almacenar agua en el periodo de lluvias para luego utilizarla en la época seca. Sin embargo, al estar estos embalses ubicados en la parte alta de la cuenca, se limita la superficie de captación por lo que se tiene que recurrir al trasvase de aguas de cuencas vecinas para poder ampliar los embalses. Finalmente, el proceso de cierre de la cuenca Pucara, condiciona las futuras acciones de intervención en riego en la cuenca, debido principalmente al incremento de la dependencia entre los diferentes usos y usuarios del agua en la cuenca.

10. Referencias Bibliográficas

- BOUWER H., 2002. Integrated water management for the 21st century: problems and solutions. 128, 193-202.
- COSSIO V., DELGADILLO O., 2012. Gestión del agua en la Cuenca Hidrosocial de Pucara. Capítulo 3. Versión preliminar presentada en el módulo de planificación de recursos hídricos, marzo 2012.
- DURAN A., 2012. Presentación Procesos de desarrollo de los recursos hídricos, en la quinta versión de la maestría en Gestión Integral de Recursos Hídricos, Cochabamba-Bolivia.
- HOOGESTEGER, J. 2004. Understanding the failure of institutional responses to reduce groundwater exploitation in Guanajuato, Thesis of M.Sc. Wageningen University, 2004.
- LUNQVIST J., 2009. Agua para comer, no para desperdiciar. Una nueva mirada a la crisis alimentaria. Documentos de divulgación de la Fundación Agbar.

- MACA, VACR. 2005. Plan Nacional de Riego 2005-2010. Dirección Nacional de Servicios Agropecuarios y Riego. Unidad de aguas y suelos.
- MOLDEN, D., SAKTHIVADIVEL, R. (1999) 'Water Accounting to Assess Use and Productivity of Water', *International Journal of Water Resources Development*, 15: 1, 55- 71.
- MOLDEN, D.; SAKTHIVADIEL, R.; SAMAD, M. 2001b. Accounting for changes in water use and the need for institutional adaptation. In *Intersectoral management of river basins: Proceedings of an international workshop on "Integrated Water Management in Water-Stresses River Basins in Developing Countries: Strategies for Poverty Alleviation and Agricultural Growth"*, Loskop Dam, South Africa, 16-21 October 2000, 73-78, ed. C. L. Abernethy. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute; Deutsche Stiftung fur Internationale Entwicklung.
- MOLLE, F. 2004. Development trajectories of river basins: A conceptual framework. Research Report 72. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- MOLLE F., WESTER P., HIRSH P., 2010. River basin closure: Process implications and responses, *Agricultural Water Management*.
- MOLLINGA, P. (2008). For a Political Sociology of Water Resources Management .In *EVERS, H. D., GERKE, S., MOLLINGA, P. P. & SCHETTER, C. (Eds.) Working Paper Series. Bon, ZEF Center for Development Research*.
- ORE, M. 2005. Agua, bien común y usos privados. Lima, PUCP, 2005.
- RIJSBERMAN F.R., 2006. Water scarcity: fact or fiction? *AgricWatManage* 80, 5-22.
- ROCHA R., DEL CALLEJO I., VASQUEZ S., 2010. En busca de la seguridad hídrica. Dinámica de los sistemas de riego campesino en el valle de Punata. In *VOS, JEROEN (Ed.) Riego campesino en los Andes: Seguridad hídrica y seguridad alimentaria en Ecuador, Peru y Bolivia, Concertación y el Instituto de Estudios Peruanos, Lima, 2010*.
- VARGAS S., MOLLARD E., WESTER P., 2004. Enfoque integral para el estudio de la cuenca Lerma-Chapala, publicado en el anuario del IMTA 2004, Mexico.

11. Anexos.

Anexo 1. Datos de precipitación para el periodo 1953-1977 generado por el SWAT.

Año	Mes	PPmm
1953	1	106.9
1953	2	61.2
1953	3	90.7
1953	4	14.7
1953	5	0.0
1953	6	0.0
1953	7	9.1
1953	8	38.6
1953	9	11.8
1953	10	34.5
1953	11	45.5
1953	12	118.5
1954	1	102.0
1954	2	58.2
1954	3	102.2
1954	4	56.7
1954	5	8.5
1954	6	0.0
1954	7	0.0
1954	8	23.5
1954	9	9.6
1954	10	29.9
1954	11	93.1
1954	12	34.0
1955	1	130.0
1955	2	111.4
1955	3	119.8
1955	4	0.7
1955	5	31.1
1955	6	0.0
1955	7	9.6
1955	8	0.0
1955	9	0.0
1955	10	21.2
1955	11	71.8
1955	12	110.9
1956	1	110.1
1956	2	53.5
1956	3	41.7
1956	4	9.9
1956	5	0.0
1956	6	0.0
1956	7	2.0
1956	8	4.0
1956	9	0.0
1956	10	8.0
1956	11	6.0
1956	12	52.0
1957	1	121.0
1957	2	217.0

Año	Mes	PPmm
1957	3	36.0
1957	4	0.0
1957	5	0.0
1957	6	4.2
1957	7	4.2
1957	8	2.7
1957	9	0.0
1957	10	0.0
1957	11	0.0
1957	12	60.0
1958	1	167.0
1958	2	74.0
1958	3	32.0
1958	4	0.0
1958	5	0.0
1958	6	0.0
1958	7	0.0
1958	8	0.0
1958	9	0.0
1958	10	12.0
1958	11	94.0
1958	12	0.0
1959	1	92.9
1959	2	80.8
1959	3	69.4
1959	4	12.2
1959	5	0.0
1959	6	8.5
1959	7	0.0
1959	8	2.3
1959	9	3.1
1959	10	18.8
1959	11	65.1
1959	12	89.7
1960	1	106.0
1960	2	37.2
1960	3	51.5
1960	4	42.6
1960	5	0.0
1960	6	0.0
1960	7	0.0
1960	8	8.4
1960	9	26.5
1960	10	21.8
1960	11	105.2
1960	12	183.2
1961	1	66.7
1961	2	50.8
1961	3	74.5
1961	4	37.2

Año	Mes	PPmm
1961	5	7.0
1961	6	0.0
1961	7	0.0
1961	8	6.0
1961	9	10.3
1961	10	1.5
1961	11	28.7
1961	12	99.5
1962	1	81.8
1962	2	57.3
1962	3	90.5
1962	4	13.1
1962	5	9.0
1962	6	0.0
1962	7	2.2
1962	8	2.7
1962	9	6.0
1962	10	11.0
1962	11	26.0
1962	12	127.1
1963	1	141.9
1963	2	75.5
1963	3	93.7
1963	4	42.5
1963	5	0.0
1963	6	3.0
1963	7	0.0
1963	8	4.0
1963	9	11.5
1963	10	24.0
1963	11	21.3
1963	12	71.4
1964	1	78.3
1964	2	91.6
1964	3	83.0
1964	4	1.0
1964	5	0.0
1964	6	0.0
1964	7	6.5
1964	8	10.5
1964	9	7.0
1964	10	46.2
1964	11	16.0
1964	12	92.0
1965	1	136.5
1965	2	45.0
1965	3	54.0
1965	4	9.5
1965	5	1.5
1965	6	0.0

Año	Mes	PPmm
1965	7	0.0
1965	8	0.0
1965	9	14.5
1965	10	20.5
1965	11	50.7
1965	12	109.0
1966	1	41.5
1966	2	88.0
1966	3	40.0
1966	4	8.5
1966	5	22.0
1966	6	12.0
1966	7	0.0
1966	8	2.5
1966	9	0.0
1966	10	34.5
1966	11	30.0
1966	12	93.5
1967	1	57.8
1967	2	110.5
1967	3	79.0
1967	4	6.0
1967	5	3.0
1967	6	0.0
1967	7	0.0
1967	8	0.0
1967	9	8.5
1967	10	12.0
1967	11	37.0
1967	12	149.2
1968	1	103.4
1968	2	186.2
1968	3	44.0
1968	4	13.7
1968	5	0.0
1968	6	0.0
1968	7	0.0
1968	8	0.0
1968	9	36.8
1968	10	16.5
1968	11	85.0
1968	12	47.5
1969	1	77.1
1969	2	75.8
1969	3	84.0
1969	4	8.5
1969	5	0.6
1969	6	0.0
1969	7	0.8
1969	8	0.0

Año	Mes	PPmm
1969	9	2.3
1969	10	5.6
1969	11	24.5
1969	12	46.5
1970	1	91.8
1970	2	78.3
1970	3	107.1
1970	4	31.5
1970	5	14.2
1970	6	0.0
1970	7	20.5
1970	8	0.0
1970	9	32.1
1970	10	22.5
1970	11	13.5
1970	12	106.5
1971	1	102.9
1971	2	97.9
1971	3	35.8
1971	4	11.5
1971	5	1.0
1971	6	4.5
1971	7	0.0
1971	8	3.5
1971	9	7.2
1971	10	14.5
1971	11	56.1
1971	12	106.3
1972	1	88.3
1972	2	89.7
1972	3	51.3
1972	4	8.9
1972	5	0.0
1972	6	19.9
1972	7	0.0
1972	8	28.9
1972	9	0.0
1972	10	39.4
1972	11	32.8
1972	12	108.7
1973	1	71.7
1973	2	103.7
1973	3	84.4
1973	4	15.0
1973	5	14.9
1973	6	0.0
1973	7	2.1
1973	8	14.6
1973	9	25.4
1973	10	73.0

Año	Mes	PPmm
1973	11	60.4
1973	12	67.4
1974	1	204.9
1974	2	97.5
1974	3	110.6
1974	4	30.4
1974	5	0.0
1974	6	4.0
1974	7	1.0
1974	8	37.3
1974	9	0.0
1974	10	34.8
1974	11	10.4
1974	12	61.2
1975	1	153.5
1975	2	94.3
1975	3	147.8
1975	4	23.6
1975	5	1.9
1975	6	3.8
1975	7	0.0
1975	8	3.0
1975	9	13.8
1975	10	4.3
1975	11	75.1
1975	12	99.6
1976	1	190.5
1976	2	64.3
1976	3	56.5
1976	4	10.2
1976	5	1.0
1976	6	0.0
1976	7	0.0
1976	8	8.2
1976	9	60.5
1976	10	17.2
1976	11	63.6
1976	12	68.3
1977	1	78.6
1977	2	175.9
1977	3	132.2
1977	4	0.0
1977	5	84.1
1977	6	0.0
1977	7	4.9
1977	8	5.8
1977	9	40.3
1977	10	33.2
1977	11	50.0
1977	12	201.5

Anexo 2. Presas y trasvases considerados para el primer periodo (1953-1977)

Año	Acciones	Flujo (m3/año)
1952	Kotani	64667
1964	Millu Khocha	50000
1966	Pachaj Khocha	625000
1966	Tatora Qhocha	800000
1976	Muyu Loma**	500000
1976	Koari Khocha (mal diseño)	750000
1978	Laguna Robada (trasvase)*	1155000

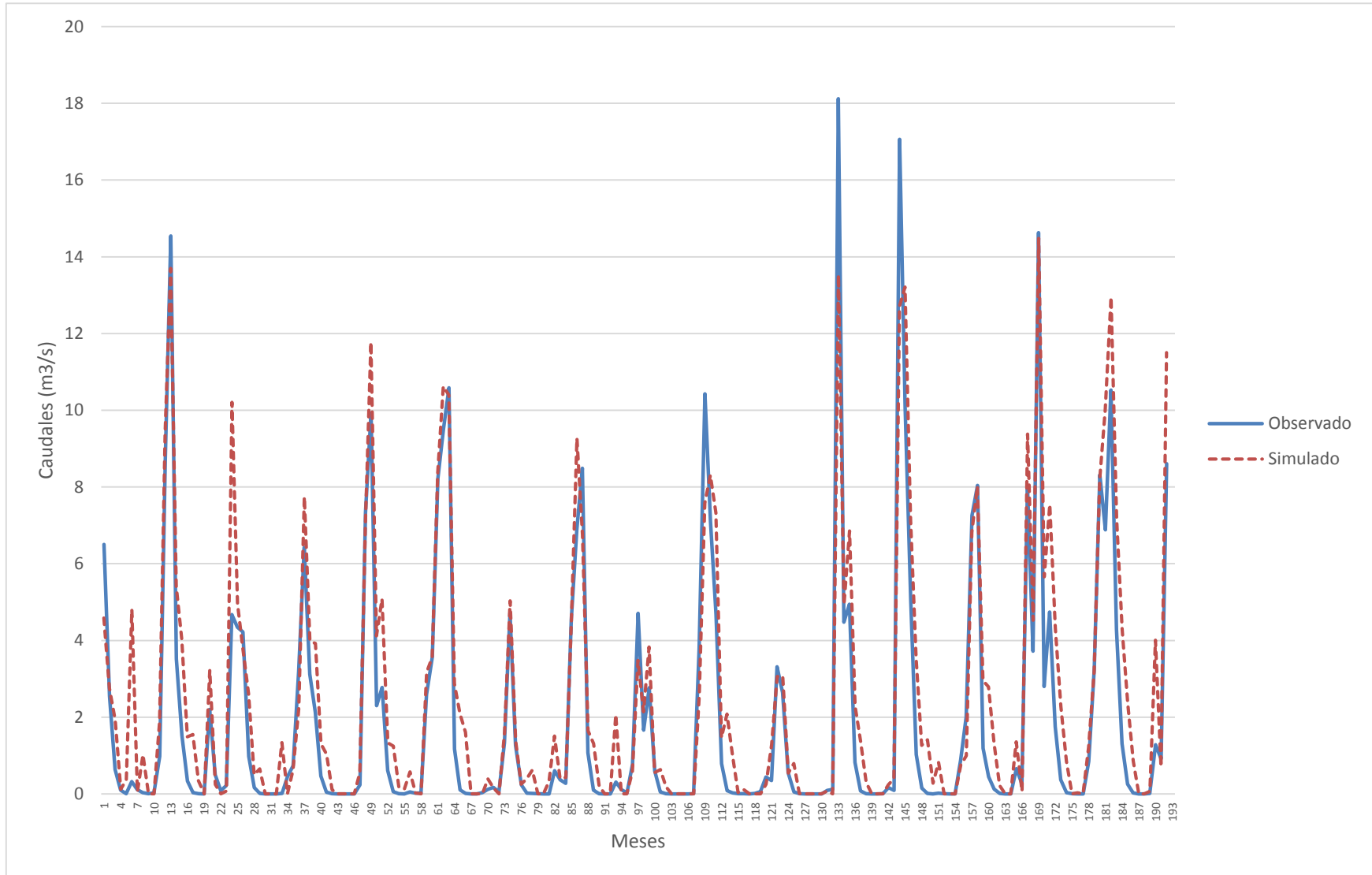
Anexo 3. Presas y trasvases considerados para el segundo periodo (1978-1991)

Año	Acciones	Flujo (m3/año)
1952	Kotani	194000
1964	Millu Khocha	50000
1966	Tatora Qhocha	2318000
1979	Koari Khocha (trasvase)	1500000
1980	Pachaj Qhocha	1589000
1980	Pachaj Qhocha 2	62800
1980	Toro Wañuna (trasvase)	46500
1980	Kewiña Khocha (trasvase)	2000000
1984	Totorayoj Khocha	180000
1985	Laguna Tukuruyu	450000
1986	Laguna Robada (trasvase)*	2200000
1987	Llusca Khocha	1250000
1988	Muyu Loma (estabilización)	1000000
1989	Quechua Khocha	50000
1989	Puca Jusk'u	50000

Anexo 4. Presas y trasvases considerados para el tercer periodo (1992-2011)

Año	Acciones	Flujo (m3/año)
1952	Kotani	194000
1952	Laguna Robada	2200000
1964	Millu Khocha	50000
1980	Pachaj Qhocha	1589000
1980	Pachaj Qhocha 2	62800
1980	Toro Wañuna	46500
1984	Totorayoj Khocha	180000
1985	Laguna Tukuruyu	450000
1987	Muyu Loma	1000000
1988	Llusca Qhocha	1250000
1989	Quechua Khocha	50000
1989	Puca Jusk'u	50000
1994	Tatora Qhocha	2318000
1994	Cuencas A,B y C	4401850
1994	Kewiña Qhocha	2000000
1994	Koari Qhocha	1500000
1996	Totorayoj	260000
2000	Huayna Juno	25000
2000	K'ara K'asa	25000
2000	Tuti Laguna	148000
2004	Choto	3300
2006	Cruz Khocha	100000
2007	K'asa Laguna	53000
2010	Murmuntani	890500
2010	Kaspiancha	473000
s/d	Wirkhini Qhata Qhata	70000

Anexo 5. Hidrograma de los caudales observados y simulados para el periodo 1992-2007.



Anexo 6. Esquema hidrológico para el periodo 1992-2011.

