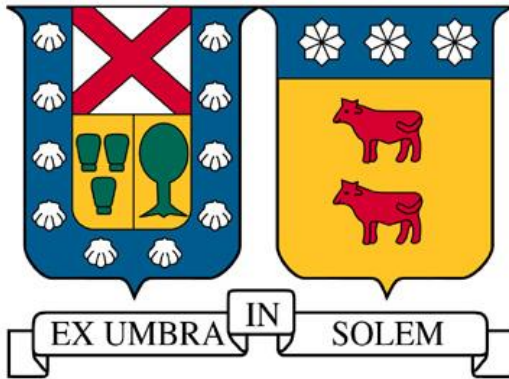


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE



“Evaluación de Recursos Hídricos y Modelo Operacional,
Embalse Caritaya, Valle Camarones, Región de Arica y
Parinacota”

MÓNICA ANDREA VÁSQUEZ GAMBOA

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUIA

: SR. PEDRO KAMANN CH.

Mayo 2016

Resumen Ejecutivo

El embalse Caritaya, construido en la década de 1930, con el fin de regular el recurso hídrico para el riego del valle de Camarones, se ubica en la cuenca del río homónimo, Comuna de Camarones, Provincia de Arica, Región de Arica y Parinacota, y se encuentra operativo hasta la fecha, abasteciendo a la producción de la agricultura local. Ha sido estudiado en diversas oportunidades, en análisis tanto hidráulico como hidrológico, sin embargo, no se aplicaron las nuevas metodologías elaboradas específicamente para la zona del extremo norte del país en los últimos años, las cuales buscan caracterizar fielmente el flujo superficial de dicho sector geográfico, cuyo particular régimen es fuertemente influenciado por el conocido “invierno altiánico”.

Además, dada la cantidad de años de funcionamiento del embalse Caritaya, resulta lógico analizar la operatividad actual del embalse, de tal manera de conocer la seguridad de riego, con los derechos de aguas otorgados a lo largo del valle y las condiciones agronómicas: superficies cultivables y tipos de cultivo. Es por ello, que el presente estudio pretende realizar una evaluación de recursos representativa, y desarrollar un modelo de operación del sistema existente, de manera de obtener un diagnóstico exhaustivo del Valle de Camarones.

La cuenca de Camarones nace de la confluencia del río Caritaya y río Ajatama, y cuenta con el embalse Caritaya como única obra reguladora del recurso, vale decir, que actúa como controlador de crecidas y como fuente de almacenamiento, entregando un flujo relativamente constante, que permite el desarrollo de la agricultura durante todo el año. Los regantes del valle, extraen las aguas directamente del río Camarones, sin diferenciar desde qué afluente provienen y se agrupan en tres grandes zonas, alta, media y baja, contabilizando 70 canales a lo largo del cauce, de los cuales sólo 34 poseen derechos de aguas constituidos. Dada la disposición de las zonas de riego en el río Camarones, y al no contar con un control en la captación de las aguas, la parte baja del valle se ve perjudicada por la parte media y alta, señal que se aprecia en las condiciones actuales de operatividad, por la baja seguridad de riego.

El análisis desarrollado en la presente memoria logra realizar una vasta recopilación de antecedentes, y determinar un completo estudio Hidrológico, destacando el estudio de Caudales Máximos, al emplear un Hidrograma Unitario elaborado para la zona geográfica en el cálculo de crecidas, el análisis de Caudales Medios Mensuales, mediante el modelo Pluvial “Brown y Ferrer” modificado, calibrado en la misma cuenca de Camarones y el estudio sedimentológico, que se evaluó con dos metodologías, la primera considerando como base la curva de descarga de la memoria en desarrollo “Estimación del gasto sólido en suspensión en cuencas chilenas” (Iris Jiménez, UTFSM) y la segunda, utilizando la relación empírica de Diseño de presas para cuencas semiáridas (EEUU). Complementariamente, se realiza el modelo de operación a nivel mensual que simula las condiciones actuales de uso del recurso hídrico del valle de Camarones, utilizando para ello, sólo los canales con derechos de aprovechamiento y su respectiva superficie de cultivo, de manera de obtener la seguridad de riego del sistema. Además, se evalúan escenarios propuestos, como lo son: emplear mayores eficiencias de regadío, mejorar la

infraestructura de canales, modificar la superficie de cultivo para obtener una seguridad de riego determinada, e incorporar nueva obra de almacenamiento, un embalse en el río Ajatama, como alternativa que asegure una mejor operatividad.

Los resultados obtenidos de la Modelación Mensual, en las condiciones actuales, confirman la baja seguridad de riego del embalse, en particular, la zona más afectada es la zona media, debido a su amplia superficie cultivada inconsistente con la cantidad de acciones en el sector. Esta situación con mejoras de revestimiento de canales es despreciable, mientras que al aumentar la eficiencia del sistema de riego, se obtienen resultados satisfactorios según extracción libre, es decir, las extracciones desde el río son según demandas de riego de la respectiva zona y que no están limitadas por los derechos de agua.

La evaluación con la nueva obra de regulación, en conjunto al embalse Caritaya, como alternativa de una mejora en la operatividad del sistema hidráulico, fue insuficiente, si bien se mantiene la superficie de riego, no es posible asegurar al 85% todas las áreas del valle destinado para el cultivo al respetar la extracción según los derechos de agua otorgados, manteniendo la criticidad de la zona media. Ahora bien, al analizar esta mejora, para la extracción libre, se obtienen resultados óptimos, asegurando el riego a las tres zonas, y alcanzando el 100% a la zona baja y alta, con la cual surge la opción de crecimiento de dichas superficies cultivables, y por lo tanto, representan el mejor escenario proyectado, sin embargo, al evaluar económicamente esta última alternativa, no resulta rentable.

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Objetivos.....	2
2.1	Generales	2
2.2	Específicos.....	2
3	ANTECEDENTES.....	3
3.1	Descripción de la zona en estudio.....	3
3.2	Descripción del embalse Caritaya	5
3.2.1	Reseña histórica	5
3.2.2	Características del embalse Caritaya.....	6
3.2.3	Reparación del tranque.....	7
3.3	Regantes del Río Camarones	8
3.3.1	Situación Legal de Derechos de Aprovechamiento.....	9
3.3.2	Derechos de Aprovechamiento.....	10
3.4	Caracterización Físico Química de Calidad del agua	17
3.4.1	Normativa Vigente	17
3.4.2	Antecedentes.....	19
3.5	Caracterización Granulométrica	25
3.6	Caracterización Agroclimática	26
3.6.1	Agroclima Putre (3.56).....	27
3.6.2	Agroclima Potrerillos (3.55).....	28
3.6.3	Agroclima Refresco (3.54)	28
3.6.4	Agroclima Copiapó (3.442-3.8).....	29
3.7	Caracterización de cultivos del Valle de Camarones.....	29
3.8	Demanda agrícola.....	30
3.9	Caracterización del recurso Hídrico Superficial	33
3.10	Caracterización del recurso Hídrico Subterráneo.....	38
3.11	Caracterización Hidrometeorológica	38
3.12	Información Cartográfica	41
4	ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	42
4.1	Análisis de estadística de caudales.....	42

4.2	Análisis de Información cartográfica.....	43
4.3	Análisis de estadística de precipitaciones máximas	43
4.3.1	Relación Precipitación – Altura	45
4.4	Estudio de Caudales Máximos Afluentes al Embalse Caritaya.....	46
4.4.1	Determinación del Hidrograma Unitario Sintético.....	46
4.4.2	Evaluación de precipitación efectiva	50
4.4.3	Cálculo de caudales de crecidas	52
4.5	Estudio de Caudales Máximos Afluentes al Embalse Ajatama	54
4.5.1	Determinación del Hidrograma Unitario Sintético embalse Ajatama...	54
4.5.2	Evaluación de precipitación efectiva	57
4.5.3	Cálculo de caudales de crecidas	57
4.6	Análisis de Caudales Medios Mensuales	58
4.6.1	Introducción.....	58
4.6.2	Estimación de Caudales Medios Mensuales.....	58
4.6.3	Generación de caudales en las cuencas de interés.	61
4.6.4	Curva de Variación Estacional.....	67
4.6.5	Caudal Ecológico.....	69
4.7	Análisis Sedimentológico	70
4.7.1	Transposición de registros.....	70
4.7.2	Estimación a partir de la fórmula empírica	76
4.7.3	Comparación y recomendaciones.....	77
4.7.4	Análisis Quebrada Ajatama.....	78
5	MODELO DE OPERACIÓN	84
5.1	Zonificación del modelo.....	84
5.2	Derechos de agua.....	87
5.3	Consumo de agua y áreas de cultivo	89
5.4	Canales de riego.....	91
5.5	Explicación del Modelo.....	92
5.5.1	Balance de aguas de regadío	93
5.5.2	Elementos de regulación	97
5.6	Diagrama de Flujo Operación.....	101
5.6.1	Situación actual: Embalse Caritaya.....	101
5.6.2	Situación proyectada: Embalse Caritaya y Embalse Ajatama	102

5.7	Caudales y Evaporaciones - Entrada Modelo.....	103
5.8	Escenarios de Operación	104
5.8.1	Embalse Caritaya	104
5.8.2	Embalse Caritaya y Embalse Ajatama	106
5.9	Análisis de resultados	110
5.10	Evaluación Socio- Económica Preliminar Embalse Ajatama	111
5.10.1	Ingresos.....	111
5.10.2	Inversión.....	112
5.10.3	Gastos de operación y mantención.....	113
5.10.4	Evaluación del proyecto.....	113
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
6.1	Estudios hidrológicos y de sedimentos.....	115
6.2	Modelo de Operación.....	116
7	REFERENCIAS	119
8	Anexos.....	121
8.1	Anexo N°1: Resumen de Bocatomas, Valle de Camarones.	121
8.2	Anexo N°2: Áreas de cultivos.	124
8.3	Anexo N°3: Antecedentes Hidrológicos.	125
8.4	Anexo N°4: Curvas Hipsométricas	128
8.5	Anexo N°5: Factor Precipitación - Altura	131
8.6	Anexo N°6: Modelo de Simulación Hidrológica.....	133
8.7	Anexo N°7: Estadística Modelo Hidrológico	139
8.8	Anexo N°8: Caudales Medios Mensuales Estimados	141
8.9	Anexo N°9: Datos Base Cálculos de Demandas de Agua	148
8.9.1	Eficiencias de Riego	148
8.10	Anexo N°10: Costos de inversión embalse Ajatama	149

1 INTRODUCCIÓN

A partir de finales de la década del 90, el Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile, comenzó a desarrollar a través de la Dirección de Obras Hidráulicas, una serie de estudios de evaluación de recursos hídricos, asociados a las cuencas Altiplánicas del Norte Grande, zona por décadas postergada en éste y otros ámbitos.

Las cuencas principalmente estudiadas, corresponden a las cuencas asociadas a los ríos Lluta, San José, Camarones y Camiña.

Fruto de estos estudios, se han propuesto una serie de obras de regulación de recursos y control de crecidas, que beneficiarán a localidades y poblaciones originarias que viven en dichos sectores, compuesto principalmente de población de origen Aymara y Quechua.

Específicamente dichas obras, corresponden a los embalse Chironta ubicado en el valle del Lluta, Embalse Livilcar ubicado en la cuenca del valle de Azapa y el Embalse Alpajares ubicado en la cuenca del río Camiña, todos ellos diseñados con una visión multifuncional, cumpliendo tanto una tarea de regulación de recursos para fines de regadío como una función de amortiguador de crecidas.

Siguiendo con estas iniciativas, el objetivo de esta memoria, es realizar un análisis de recursos hídricos del valle del río de Camarones junto a la fabricación de un modelo agrohídrológico de operación del embalse Caritaya, que permitirá realizar un diagnóstico del sistema existente.

Asimismo, este modelo de operación, permitirá evaluar diferentes escenarios de crecimiento de áreas potenciales de riego futuras y optimización de los tipos de cultivo, considerando tanto el embalse existente, como un embalse proyectado.

Al respecto, no existe hasta el momento un modelo de operación del Valle del río Camarones, por lo que se considera una necesidad en este sentido.

Por otro lado, diversas consultorías realizadas para el Ministerio de Obras Públicas, han abordado la evaluación de recursos, principalmente orientados a estimación de crecidas y estudios de sedimento afluente a los embalses existentes y proyectados. En esta memoria de título, se abordará nuevamente estos temas, incorporando metodologías más acordes a la realidad hidrológica del sector bajo estudio, mediante la incorporación de hidrogramas unitarios propio de dicha zona para estimación de crecidas, como la transposición de registros en estaciones con control sedimentométrico, hacia la cuenca del río Camarones, específicamente al lugar de emplazamiento de los embalses, con el fin de estimar el volumen muerto de ellos, metodología no utilizada hasta el momento en dicha zona.

2 OBJETIVOS

2.1 Generales

- Desarrollo de un modelo operacional del embalse Caritaya.
- Evaluación de recursos hídricos del valle del río Camarones.

2.2 Específicos

- Realizar una completa recopilación de los antecedentes existentes y análisis crítico de ellos, referente a aspectos tales como infraestructura de riego existente, zonas actuales y futuras de riego, calidad de agua, derechos de aguas, recursos hídricos existentes, entre otros.
- Elaboración de un modelo operacional del embalse Caritaya para realizar un diagnóstico del riego en el valle del río Camarones, obteniendo las seguridades de riego actuales y los balances hídricos correspondientes.
- Proposición y modelación de nuevas obras de regulación, que permitan mejorar la seguridad de riego actual e incorporar nuevos sectores de riego.
- Estudios de crecidas tanto al embalse Caritaya, como al embalse proyectado, incorporando hidrogramas unitarios propios de la zona altiplánica.
- Estudios de sedimentos afluentes tanto al embalse Caritaya, como al embalse proyectado, mediante transposición de registros sedimentométricos medidos en cuencas cercanas, metodología no incorporada en estudios anteriores.

3 ANTECEDENTES

3.1 Descripción de la zona en estudio

La zona en estudio corresponde a la cuenca del Valle Camarones, que se encuentra ubicada en la Región de Arica y Parinacota, cubriendo parcialmente la Provincia de Arica, con una longitud de alrededor de 70 km, formando parte de la Comuna de Camarones (Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991).

La hoya del río Camarones alcanza una superficie de 4.760 km² y su cuenca queda comprendida entre las coordenadas Norte 7.925.000 y 7.865.000 y Este 365.000 y 493.000 (AC, 2002), y limita al norte con la cuenca del río Vitor, al sur con la hoya de la quebrada de Camiña y al oriente con la cuenca del Salar de Surire. (UTA, 2010)

El río San José, comúnmente llamado Camarones (UTA, 2010), nace de la confluencia de los ríos Ajatama, que escurre desde el norte, y Caritaya, que proviene del sur, los cuales se unen en el sector de Arepunta a una altitud de 2.900 msnm. A partir de este punto desarrolla su curso en dirección oriente-poniente hasta desembocar en el Océano Pacífico. Su desarrollo total es de alrededor de 97 kilómetros de longitud (AC, 2002).

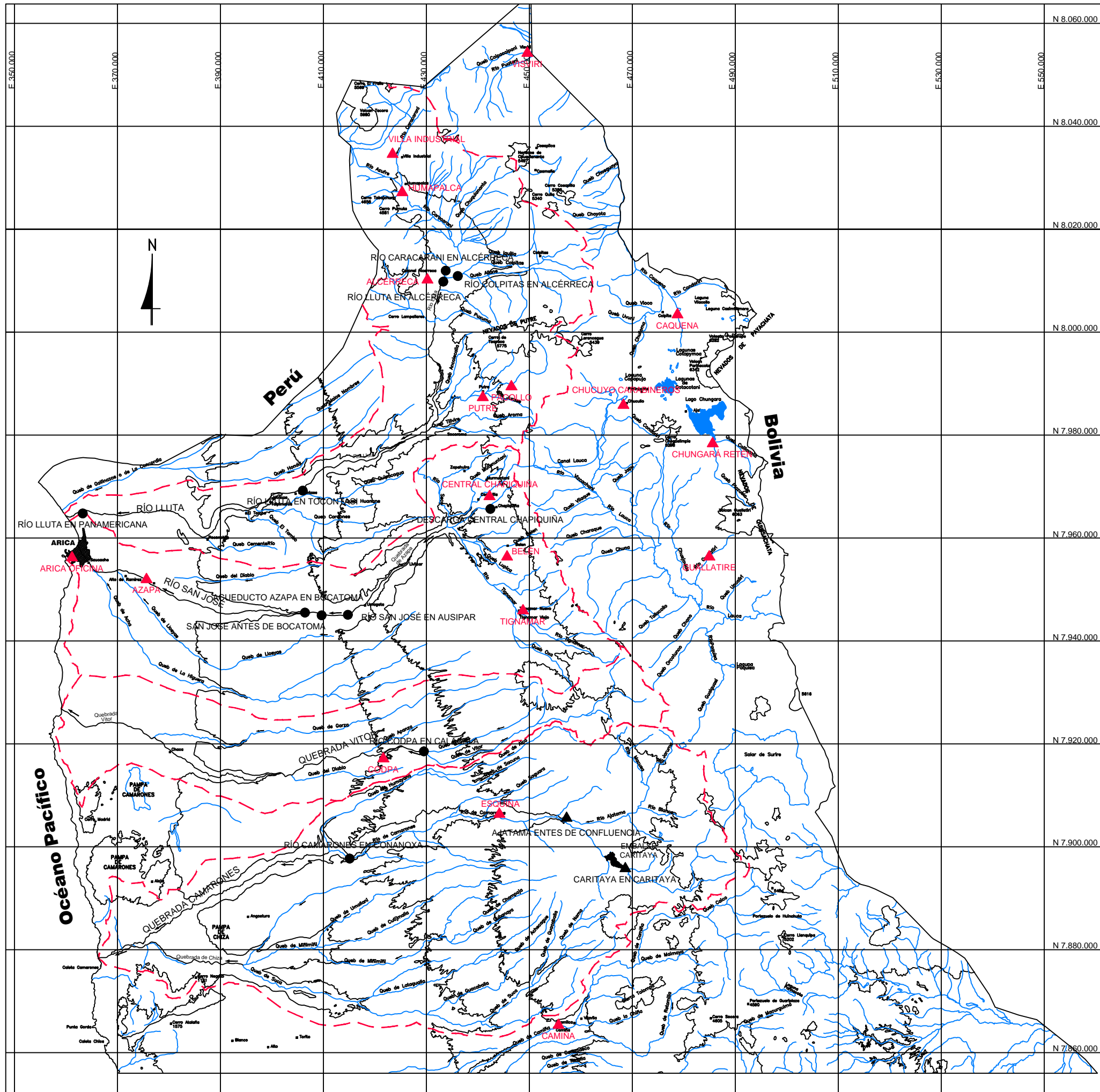
El río Ajatama se forma de varias quebradas al pie del faldeo poniente del volcán Chuquicamata (5.590 m). El estero Naco que nace al pie de los cerros Anocarire (5.050 m) y Tolapacheta (4.380 m) contribuye a la formación del río Ajatama (Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991).

El río Caritaya se forma de varios esteros que se descuelgan a la falda occidental de los cerros Guaiguari (5.390 m) y Latarani (5.290 m). Una vez formado, se le une por la ribera norte el estero Naco, aguas arriba del embalse Caritaya (Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991).

Aparte de los dos ríos formativos, la quebrada de Camarones no recibe aportes hidrológicos más abajo de Arepunta, salvo algunas vertientes en los flancos de la quebrada.

Por la ribera sur afluyen algunos cauces, los que no aportan recursos hídricos, destacando la quebrada de Chiza, siendo el último afluente de importancia a 10 km del océano, habitualmente sin escurrimiento superficial.

Lo anteriormente descrito se puede apreciar en la Figura 3.1.



SIMBOLOGIA

- CAUCE PRINCIPAL
- QUEBRADAS
- CURVAS DE NIVEL
- ESTACION PLUVIOMETRICA
- PUNTO DE INTERES CON CONTROL FLUVIOMETRICO
- PUNTO DE INTERES SIN CONTROL FLUVIOMETRICO
- LIMITE DE CUENCAS
- AREA URBANA
- LAGOS Y LAGUNAS
- EMBALSE

AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA.		PROYECTO:	
PLANO:		ESTUDIOS BASICOS DE LOS RECURSOS HIDRICOS VALLES LLUTA, AZAPA, VITOR Y CAMARONES PRIMERA REGION	
UBICACION ESTACIONES PLUVIOMETRICAS Y FLUVIOMETRICAS		FECHA:	ESCALA:
		FEBRERO-2002	S/ESCALA
		FIG:	3.1

Las principales localidades rurales existentes en el área de la cuenca son: Cuya, Esquiña, Palca, Camarones, Conanoxa, Chupisilca, Portocarrero, Catinjagua, Huancarane, Pama Nuna, Caruta, Iquilta e Isise (Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991).

La comuna de Camarones tiene una población, según datos del Instituto Nacional de Estadística al CENSO de 2002, de 1.220 habitantes, correspondiente a un 100% de población rural.

La cuenca de Camarones cuenta con sectores con actividad agrícola y su capacidad es en parte regulada a través del embalse Caritaya, situado en el curso superior del río homónimo, construido en los años 30 con un volumen de 42 millones de m³ aproximadamente, actualmente operativo.

El valle del río Camarones se caracteriza por ser muy estrecho y encajonado, sin embargo, a partir de Condumayo, situado poco más arriba del pueblo de Esquiña, se presentan hacia aguas abajo una serie de ensanchamientos donde se desarrolla la agricultura, separados por otras tantas angosturas (Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991).

En su curso superior, entre Condumaya y la Angostura de Isise, se riegan las localidades de Quebrada, Illapata y Condumaya.

En el curso medio, entre la angostura de Isise y Taltape, con una longitud aproximada de 25 km se riegan las localidades de Catinjagua, Huancarane, Pampa Nuna, Caruta, Iquilta e Isise.

En su curso inferior, la más importante desde el punto de vista de superficie cultivada, ubicada entre la angostura de Taltape y el Océano Pacífico, comprende las localidades de Camarones, Portocarrero, Chupisilca, Conanoxa y Cuya. Luego de ésta última el río Camarones es atravesado por la carretera panamericana norte.

El área agrícola corresponde al fondo de este valle de tipo aluvial. El uso del suelo de esta área se encuentra limitada a cultivos de alfalfa y algo de maíz a causa de la alta salinidad de suelos y agua, razón por la cual el desarrollo agrícola del Valle de Camarones ha sido escaso. (UTA, 2010)

3.2 Descripción del embalse Caritaya

3.2.1 Reseña histórica

En el año 1927 se proyectó construir en Caritaya un tranque de concreto armado y que posteriormente, tomando en cuenta las bajas temperaturas y sismos de la zona, se reemplazó la idea por un proyecto de escollera o rock-fill. El embalse tendría una capacidad máxima para almacenar de 42.171.000 m³ y permitiría regular el riego del Valle Camarones (UTA, 2010).

El tranque de Caritaya fue construido entre 1931 y 1935, en un afluente del río Camarones a 3.650 metros de altitud y a unos 110 km al Sureste de Arica, entre la precordillera y el altiplano, con el objetivo de diversificar la economía de la región y abastecer de alimentos a las salitreras de la pampa, reemplazando los productos que se traían desde Tacna.

La crisis del salitre de 1930 truncó la idea del gobierno de aquellos años de construir una red de canales distribuidores del vital recurso, donde se estimaba regar 3.000 hectáreas en las pampas de Camarones y 2.000 más en las pampas aledañas de Chiza, Miñimiñe, Humallani, Saguara y Codpa.

En el año 1946 se declaró la explotación de las obras del tranque Caritaya.

Hoy en día, el tranque acumula las aguas del río Caritaya, convirtiéndose en un regulador de las crecidas durante “el invierno boliviano” y beneficia sólo a unas pocas terrazas de cultivo en los pueblos al interior del valle de Camarones, por el poco desarrollo de la agricultura en la zona.

En el transcurso de los años la obra ha sufrido deterioros, producto de cambios climáticos, movimientos telúricos y grandes crecidas, como por ejemplo la crecida del año 2001 que terminó por colapsar las instalaciones y los severos daños tras el terremoto del 13 de Junio de 2005. Desde 1979, una serie de informes técnicos han revelado los daños en las estructuras del tranque.

En el año 2000, la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), se hizo cargo del tranque Caritaya, y con el fin de regular nuevamente el riego del Valle de Camarones tras el pleno funcionamiento del tranque Caritaya, se contrata las reparaciones de los sectores dañados por la inundación.

Entre los años 2006, 2007 y 2008, se llevan a cabo contratos de Consultorías y Asesorías de Inspección Fiscal, para los trabajos de rehabilitación de la presa, vertedero y obras complementarias, además de la definición del suministro y montaje de elementos metalmecánicos.

3.2.2 Características del embalse Caritaya

Este embalse construido para fines de regadío, se ubica a unos 10 km, aguas arriba de Arepunta (confluencia del río Caritaya con el río Ajatama).

El embalse Caritaya está constituido básicamente por los siguientes elementos: (SMI, 2008)

- Cuerpo de presa compuesto de enrocados, con taludes externos de 1V:1,5H en ambos paramentos.
- Pantalla de impermeabilización en el paramento de aguas arriba, constituida por losetas de hormigón armado de 7,50 x 7,50 m las inferiores y de 2,50 x 2,50 m las superiores.

- Túnel de desvío revestido en hormigón, situado en el estribo izquierdo, con sección medio punto de 4 m de base y 3 m de altura. Dentro del túnel se encuentran las obras mecánicas de entrega y descarga.
- Evacuador de crecidas, situado en la ladera izquierda del río, formado por un canal excavado en roca de 40 m de ancho, sin revestimiento. Este vertedero es frontal y el caudal de diseño de la obra es de 200 m³/s aproximadamente.

Las características principales del embalse se resumen en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Características de la presa.

Características	Dimensión	Unidad
Altura sobre el nivel del mar	3.600	m.s.n.m.
Superficie hoya hidrográfica	453	km ²
Capacidad de almacenamiento	42.171.000	m ³
Longitud de coronamiento del muro	156	m
Ancho del coronamiento	5	m
Altura máxima del muro sobre el plano de válvulas	38,5	m
Revancha del coronamiento sobre el vertedero	4	m
Altura útil del agua	34,5	m
Capacidad vertedero de rebalse	180	m ³ /s

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

3.2.3 Reparación del tranque

El estudio realizado por SMI drante los años 2006, 2007 y 2008, se refiere a la rehabilitación del embalse Caritaya, a partir de la elaboración de un diagnóstico del estado actual de las obras civiles y posteriormente, según las conclusiones del diagnóstico, la elaboración del diseño definitivo de las reparaciones del embalse (SMI, 2008).

El diseño de las obras de reparación del embalse contempló el diseño de las reparaciones del muro, que incluyen el retiro del sedimento en las inmediaciones del muro de la presa, impermeabilización de la pantalla y el diseño de las instalaciones para la operación del embalse, que corresponden al tapón, válvulas y torre de toma.

Las actividades realizadas para la materialización de la obra fueron las siguientes (UTA, 2010):

- Retiro de sedimentos del fondo del embalse. Para ello se utilizaron 3 camiones tolva de 12 m³ cada uno, una excavadora y una retroexcavadora, logrando trasladar 22.000 m³ de material fino, depositado en un sector a 400 m al oeste del muro de presa.

- Construcción de Tapón. Se demolió el tapón antiguo y se construyó el nuevo tapón con bomba de hormigón y “shotcretera”, utilizando para esto 70 m³ de mezcla de arena y cemento, 20 pernos de anclaje y 1.400 kg de fierro de construcción.
- Impermeabilización del muro. Se repararon las losetas con una soldadora de termofusión, bomba de hormigón y 3,5 m³ de asfalto. Posteriormente, con la ayuda de taladros se procedió a la construcción de anclajes. Finalmente, se instalaron 3.600 m² de membrana HDPE (espesor de 2 mm), utilizando 450 m de pletinas de acero galvanizadas y 40 litros de adhesivo Sikaflex.
- Torre de toma. Se desvió levemente el flujo del cauce para realizar la construcción de la fundación de la torre en dos etapas, utilizando para ello 21 m³ de hormigón. Luego se instalaron los tubos de cajón de hormigón y las rejas de toma, con el soporte de 1.200 Kg de fierro de construcción y 500 Kg de acero estructural, completando con el muro de cierre que requirió 7 m² de hormigón vibrado.

3.3 Regantes del Río Camarones

El Río Camarones posee una longitud estimada de 105 km y se estima que el valle posee algún grado de desarrollo agrícola en los últimos 70 km (SMI, 2008). El sector de mayor concentración se ubica desde aguas arriba del puente Camarones (sector Cuya) en una longitud de aproximadamente 6 km en donde además se emplazan la mayor cantidad de canales (AC, 2002). La cuenca se caracteriza por la presencia del embalse Caritaya que actúa como controlador del recurso hídrico y contenedor de crecidas.

El caudal efluente a dicha obra, junto a los recursos del río Ajatama, son utilizados por los regantes del río Camarones, sin distinguir de dónde proviene el consumo, motivo por el cual no existe una percepción respecto de lo que se denomina “recurso regulado”. Los beneficiarios con los aportes del embalse extraen las aguas directamente del río Camarones, el cual posee una baja seguridad de riego, situación que podría mejorar con la operación regulada del embalse, que aumentaría la seguridad de riego de los usuarios que extraen de él sus aguas. El embalse no opera en forma distintiva entre temporada de riego o no, sino que actúa como un controlador de crecidas del río Caritaya, acumulando el recurso excedente lo que le permite mantener un caudal de entrega más o menos constante a lo largo de la temporada (SMI, 2008). Sin embargo, en los últimos años, durante el proceso de reparación del embalse Caritaya, fueron instaladas válvulas de regulación, mediante el cual el caudal del río puede ser regulado y distribuido anualmente (UTA, 2010).

La recopilación de antecedentes, respecto a los canales y bocatomas del valle, incluye los estudios:

- “Estudio de Síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructura de aprovechamiento”, (REG, 1991)
- “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones”, (AC, 2002)

- “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya”, (SMI, 2008)
- “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones”, (Arrau, 2013)

El estudio de 1991 menciona que la infraestructura de riego de la cuenca del río Camarones cuenta con 63 canales, cuyo uso del agua es para 271 usuarios que riegan una superficie de 552,03 Ha. Mientras que los estudios del 2002, señalan que en el valle de Camarones se catastró, en campaña realizada en terreno por medio de fichas de registro, un total de 144 bocatomas, de las cuales 85 corresponden a obras sobre el río Camarones y 59 a captaciones sobre ríos y quebradas afluentes al cauce principal, sin embargo, en muchos casos estaban destruidas.

Por otra parte, según los catastros más recientes, SMI el 2008 y Arrau el 2013, se indica que se ubican alrededor de 70 tomas a lo largo del río.

Las obras de toma se caracterizan por ser de tipo artesanal y provisorio (AC, 2002). La gran mayoría de tipo rústico, sin obra de medición ni obra de descarga, muchas de ellas operadas a través de la acumulación de barro, palos y ramas (SMI, 2008).

Lo rústico de las bocatomas trae consigo problemas en la operación, por no tener un control de las extracciones, afectando a la parte baja del valle dado que los recursos son generalmente captados en las partes alta y media del río.

Además, cabe destacar que no todos los canales a lo largo del río Camarones poseen derechos de aprovechamiento, por lo cual a continuación se procede a su caracterización. El listado de los canales catastrados, como resumen de las obras a partir de los estudios antes mencionados se señalan en Anexo N°1.

3.3.1 Situación Legal de Derechos de Aprovechamiento

Como se mencionó anteriormente, dada la configuración del valle, el sector alto presenta una alta tasa de captación en desmedro de la parte baja del valle, a la cual en muchas ocasiones prácticamente no le llega el agua. Por ello, en el año 1980 la Dirección General de Aguas (DGA) intervino el río, llegando a un acuerdo entre las diferentes zonas, que es cumplido parcialmente y a criterio del regante. Mediante este acuerdo, la sección alta y media del valle captaría el recurso desde las 6 de la mañana hasta las 7 de la tarde, todos los días. El resto del tiempo el recurso debe dejarse pasar hacia la sección baja del valle (SMI, 2008).

Respecto de la organización del sistema de entrega desde el Embalse Caritaya, existe la resolución No 594 del 24 de abril de 1990 del Servicio Agrícola y Ganadero que establece que las aguas embalsadas se dividen en 850 acciones o partes alícuotas (SMI, 2008).

- 244,72 corresponden a la Hacienda Camarones que a su vez se dividen en:
 - 204,52 acciones al sector de Camarones (canales Taltape, Humallane, O'Higgins, Del Pueblo, Las Casas, San Juan, Parcela y Maquita).
 - 10 acciones a los canales Porto Carrero y Chupisilca.
 - 30,2 acciones al sector de Conanoxa.
- 254,2 acciones a la Hacienda Cuya cuyo traspaso no se realizó, quedando en poder de la Sociedad Agrícola de Camarones.
- 351,08 acciones distribuidas entre pequeños propietarios ubicados en la sección alta y media del valle.

Además en esta resolución se establece que las reservas embalsadas permitirán regar 789,23 Ha físicas, es decir, da una equivalencia de 0,93 Ha por acción, presumiendo que el valor en agua de cada acción dependerá de los caudales que escurran por el río.

A nivel de organización jurídica del río Caritaya, no posee Junta de Vigilancia, y legalmente existe un decreto de agosto de 1946 que declara la explotación definitiva del Embalse Caritaya. Para poder transferir el embalse a los usuarios es necesario que estén organizados y registrados como comunidad de aguas en la Dirección General de Aguas, como lo señala el código de aguas.

De acuerdo a antecedentes proporcionados por la Dirección de Obras Hidráulicas, el año 2005 se conformó una agrupación provisoria cuyo fin es formar una organización legalmente constituida bajo el nombre de "Asociación de canalistas del embalse Caritaya".

La formación de una Junta de Vigilancia a nivel de Río Camarones permitiría la adecuada administración del recurso hídrico. La reparación del Embalse Caritaya podría incentivar tal organización ya que para su operación y distribución será muy necesaria.

3.3.2 Derechos de Aprovechamiento

Ahora bien, a nivel de organización de canales, según estudio realizado por Luis San Martín y Cía. Ltda. (SMI, 2008), la DGA está realizando una regulación de los derechos de aprovechamiento de agua de las diferentes secciones en que se ha dividido el valle, y en todos aquellos canales que teniendo más de un regante procedió a formar la correspondiente comunidad de aguas. Hasta el momento se encuentran constituidas 36 comunidades de aguas, de los 70 canales que componen el sistema, el que se encuentra dividido en 3 secciones de acuerdo con el siguiente detalle:

Sección Alta

La sección alta se encuentra totalmente regada y los regantes se comprometieron a captar agua únicamente entre las 6 y las 19 horas. Cuenta con 27 canales, 8.994 acciones con 450 l/s aproximadamente, entre los que destaca Umaxo-Illapata con 52 regantes. Incluye los sectores:

- Condumaya (10 canales)
- Illapata- Esquiña (7 canales)
- Quebradas (10 canales)

Sección Media

La parte alta de la sección media se encuentra totalmente regada y posee las mismas condiciones de la sección alta. Sin embargo, la parte baja de la sección media no posee condiciones de captación, por tratarse de predios pequeños abastecidos de suficiente agua, sin interés de organizarse. Por otra parte, los canales se están redibujando continuamente debido a los cambios en el curso del estero. La sección media cuenta con 30 canales, 9.942 acciones con aproximadamente 450 l/s en los sectores:

- Isise (5 canales)
- Iquilta (4 canales)
- Caruta (4 canales)
- Pampanune (3 canales)
- Huancarane (9 canales)
- Catinjagua (5 canales)
- Camarones (8 canales)

Sección Baja

Los sectores de Chupisilca y Portocarrero poseen pocos regantes, por lo que se someten a las mismas condiciones de captación de la sección alta. En cuanto a los sectores bajos, existen dos grandes regantes, Cooperativa Camarones y Sociedad Agrícola Camarones, la primera debe cerrar sus captaciones los días viernes a las 18 horas y reanudarlas los días lunes a las 6 para asegurar el abastecimiento a la Sociedad Agrícola Camarones. La sección baja cuenta con 13 canales, 18.016 acciones y 520 l/s. en los sectores:

- Chupisilca y Portocarrero (2 canales)
- Conanoxa (1 canal)
- Cuya (2 canales)

El estudio más reciente elaborado en la zona, realizado por Arrau Ingeniería (Arrau, 2013), rectifica y adiciona la información del estudio de San Martín, señalando que el total de usuarios que participa en estas comunidades de agua suman alrededor de 238 personas, quienes en total mantienen una superficie de riego aproximada de 447 Ha y cerca de 36.861 acciones. Al referirse a la división de tres zonas de riego indica:

- En la sección alta, se registran 27 canales, de los cuales 10 son utilizados por comunidades de agua, las que suman en esta sección un total aproximado de 8.994 acciones y cerca de 100 Ha de riego.
- En la sección media por su parte, se registran 30 canales, de ellos 15 son utilizados por comunidades de agua. El total de acciones en esta sección es de aproximadamente 9.852, con las cuales se cubre una superficie de alrededor de 83 Ha de riego.
- La sección baja cuenta con 13 canales, de los cuales 9 son utilizados por comunidades de agua. Se registran 18.016 acciones con las que se riega un total de 264 Ha aproximadamente.

Por último, se cuenta con los antecedentes del encargado de establecer la Junta de Vigilancia, con los regantes que actualmente hacen uso de sus derechos.

Al realizar un análisis de las fuentes de información se obtiene un resumen de los canales con derechos de aprovechamiento y sus principales características, presentado en la Tabla 3.2, la Tabla 3.3 y la Tabla 3.4:

Tabla 3.2: Canales con comunidades Constituidas, Zona Alta.

Nº	Nombre de Organización	Ubicación UTM		Gasto [l/s]	Horas de Riego cada 12 días [hr]	Acciones	Superficie de riego [Ha]
		Norte	Este				
1	Condumaya 4	7904333	448751	30	131	786	12,12
2	Umaxo Illapata	7904580	448450	100	671	4026	42,33
3	Amasaca 1	7904419	447571	30	70	420	5,88
4	Amasaca 2	7904447	447071	50	156	936	8,17
5	Isla 1	7904508	447248	30	42	252	0,4
6	Amasaca 3	-	-	30	73	438	2,46
7	Taipitaque	7905562	443913	50	106	636	8,6
8	Quebrada 3	-	-	40	69	414	3,55
9	Ñeque	7905562	443913	50	121	726	14,69
10	Cortajima 2	7905157	441822	40	60	360	2,26
Total						8994	100,46

Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – SMI, 2008 – Arrau, 2013.

Tabla 3.3: Canales con comunidades Constituidas, Zona Media.

Nº	Nombre de Organización	Ubicación UTM		Gasto [l/s]	Horas de Riego cada 12 días [hr]	Acciones	Superficie de riego [Ha]
		Norte	Este				
11	Isise 3	-	-	30	38	228	1,40
12	Isise 5	-	-	30	46	276	2,50
13	Iquilta 1	7904592	431897	40	16	96	2,03
14	Iquilta 2	-	-	30	70	420	1,00
15	Iquilta 3	7904061	431436	30	43	258	11,19
16	Iquilta 4	7904013	431306	40	54	324	7,62
17	Caruta 1	7903249	430770	30	92	552	7,46
18	Caruta 2	7902795	430054	30	184	1104	7,04
19	Pampanune 2	7902465	428648	30	101,99	611,91	0,00
20	Huancarane 2	7902424	426593	40	168	1008	5,00
21	Huancarane 3	-	-	40	204	1224	27,59
22	Huancarane 5	-	-	40	180	1080	4,00
23	Huancarane 9	7900807	422836	20	85	510	1,00
24	Catinjagua 1	7900515	421227	20	205	1230	2,19
25	Catinjagua 2	7900036	420293	15	155	930	2,51
					Total	9851,91	82,53

Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – SMI, 2008 – Arrau, 2013.

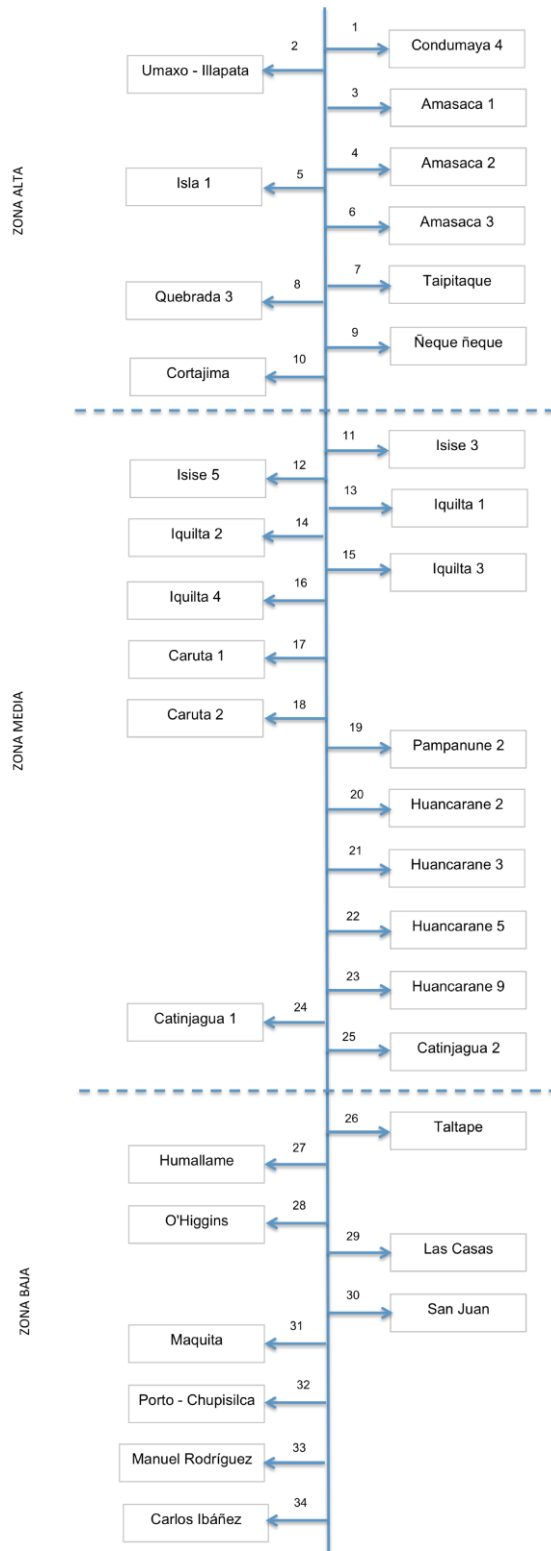
Tabla 3.4: Canales con comunidades Constituidas, Zona Baja.

Nº	Nombre de Organización	Ubicación UTM		Gasto [l/s]	Horas de Riego cada 12 días [hr]	Acciones	Superficie de riego [Ha]
		Norte	Este				
26	Taltape	7897310	415310	50	520	3120	18
27	Humallame	7897848	414148	50	552	3312	33,91
28	O'Higgins	7898732	411595	50	588	3528	36
29	Las Casas	7898369	410758	10	68	408	4,89
30	San Juan	7898096	409760	50	344	2064	21
31	Maquita	-	-	50	512	3072	47,51
32	Porto -Chupisilca	7897020	404243	50	180	1080	12,2
33	Manuel Rodríguez	7888351	384448	105	105,83	635	61,5
34	Calos Ibañez	7886611	382235	105	132,83	797	29
					Total	18016	264,01

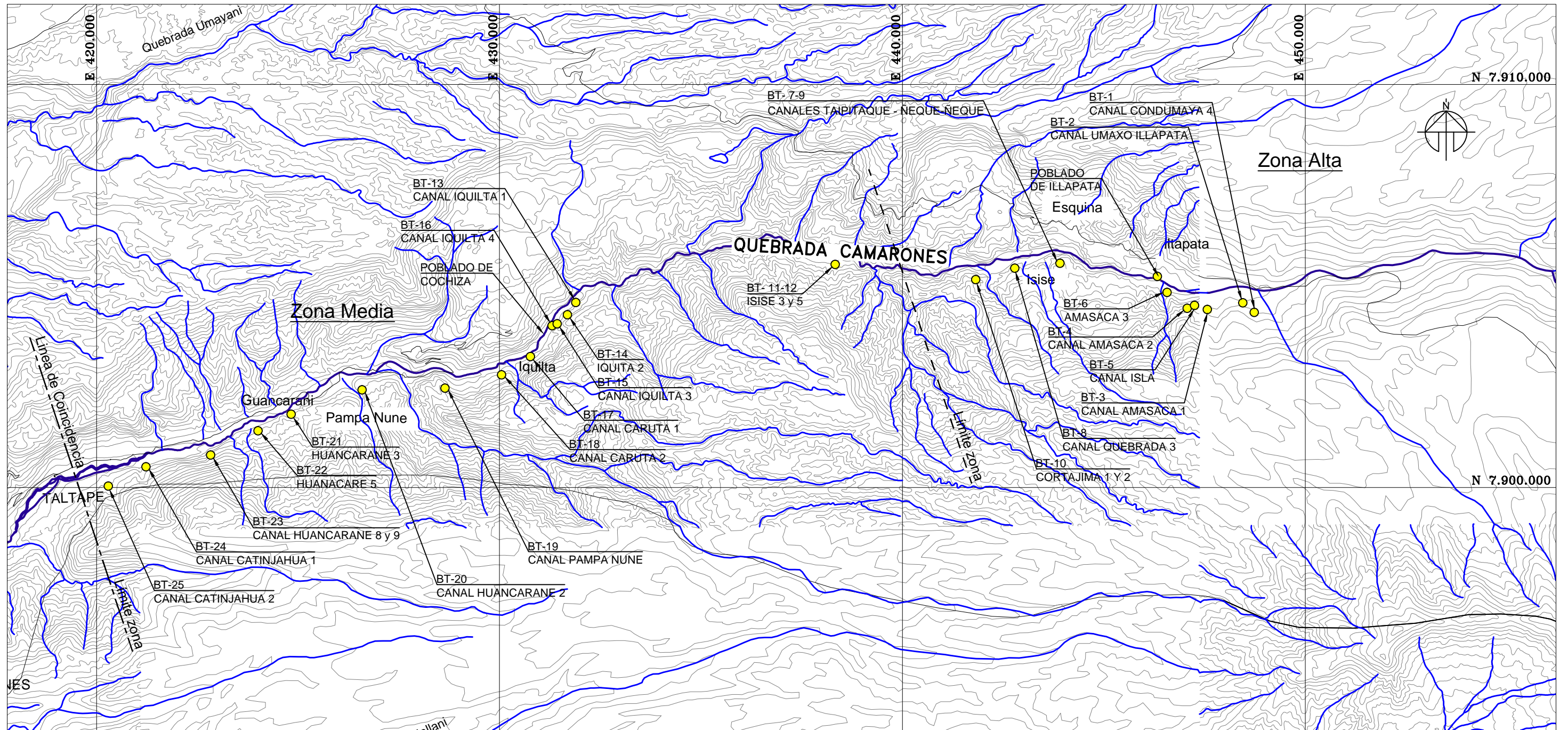
Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – SMI, 2008 – Arrau, 2013.

En la Figura 3.2 se presenta el diagrama unifilar del Río Camarones de canales con derechos de aprovechamiento (34 canales), realizada en base a los antecedentes recopilados, en particular, desde el estudio de Luis San Martín y Cía. Ltda. (SMI, 2008) y el de Arrau Ingeniería (Arrau, 2013). Adicionalmente, se presenta en la una imagen de la distribución de los canales (Ver Figura 3.3).

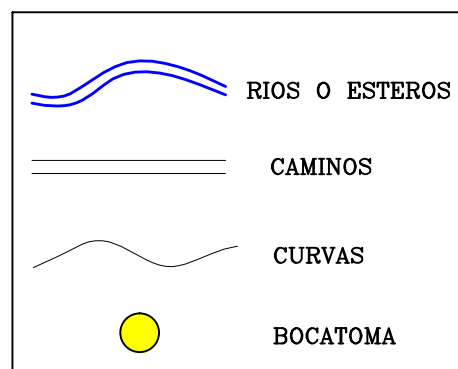
Figura 3.2: Diagrama Unifilar Cuenca Río Camarones.



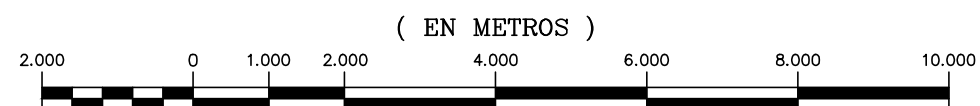
Fuente: Elaboración propia.



Simbología

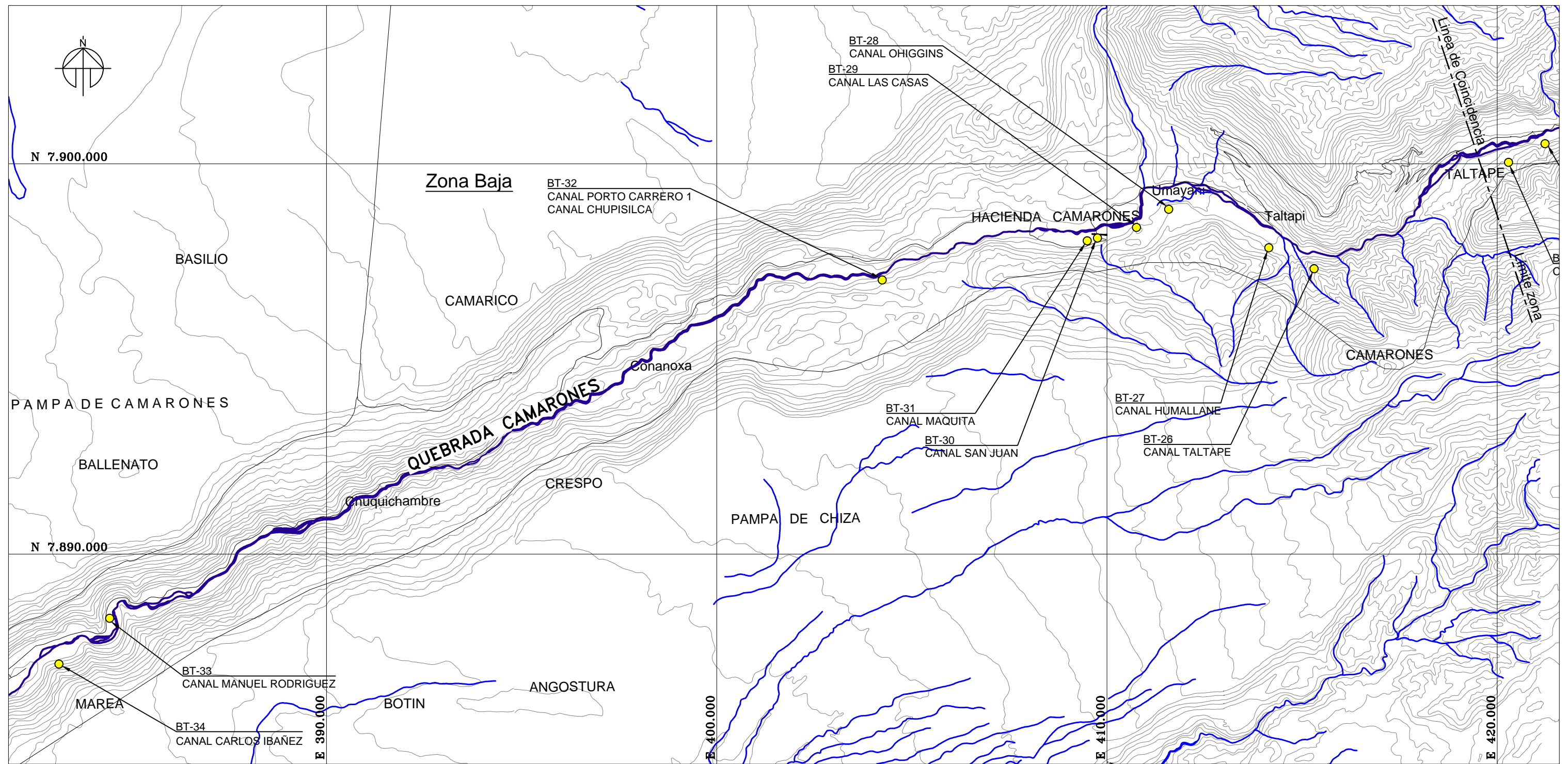


ESCALA GRAFICA

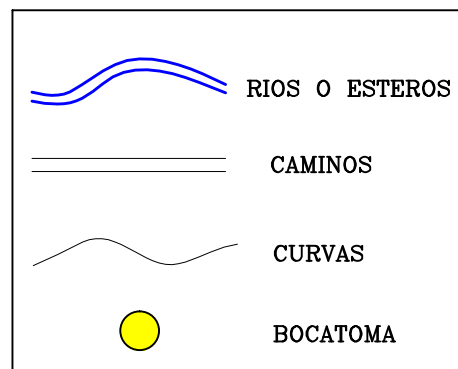


1 : 100.000

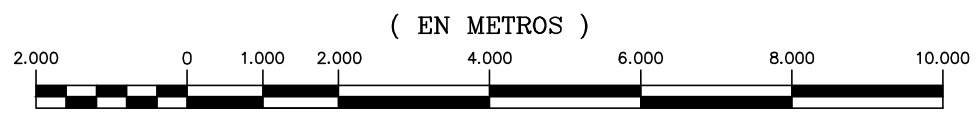
Figura 3.3: Canales con derechos del Río Camarones.
Lámina 1 de 2



Simbología



ESCALA GRAFICA



1 : 100.000

Figura 3.3: Canales con derechos del Río Camarones. Lámina 2 de 2

3.4 Caracterización Físico Química de Calidad del agua

3.4.1 Normativa Vigente

El análisis realizado por AC Ingenieros Consultores Limitada (AC, 2002) señala que las limitaciones que presenta la calidad del agua a sus distintos usos, fueron realizadas considerando los requerimientos que ésta debe cumplir conforme a lo indicado en las normas "Agua Potable, Requisitos" (NCh 409) y "Requisitos de Calidad del Agua Para Diferentes Usos" (NCh 1.333). En las Tabla 3.5, Tabla 3.6, Tabla 3.7 y Tabla 3.8 se presentan los valores límites para los microelementos y macroelementos, que se encuentran normados, los rangos de conductividad permitidos y los rangos para el pH.

Tabla 3.5: Valores máximos permitidos (mg/l) para uso en agua potable y riego de acuerdo a las Normas Chilenas.

Elemento	Norma	
	NCh 409 Agua Potable	NCh 1.333 Agua para diferentes usos
Arsénico	0,05	0,10
Boro	NN	0,75
Cobre	1,00	0,20
Fierro	0,30	5,00
Nitratos	10,00	NN
Cloruros	250,0	200,0
Sulfatos	250,0	250,0

NN: No Normado

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región, AC, 2002.

Tabla 3.6: Valores límites de Conductividad Eléctrica, según Norma NCh 1.333.

Rango Conductividad ($\mu\text{mhos/cm}$)	Efectos sobre Cultivos
< 750	No se detectan efectos
750 - 1500	Puede haber efecto perjudicial en cultivos sensibles
1500 - 3000	Efectos adversos en muchos cultivos. Necesita de manejo cuidadoso
3000 - 7500	Agua que puede ser utilizada sólo en cultivos tolerantes en suelos permeables, con métodos de cultivo cuidadoso
> 7500	No recomendable su uso en riego, ya que produce disminución notable de rendimiento en cualquier cultivo

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, Primera Región, AC, 2002.

Tabla 3.7: Clasificación de aguas para riego según su salinidad, según Norma NCh 1.333.

CLASIFICACIÓN	CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA, c $\mu\text{mhos/cm}$ A 25°C	SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES, s mg/L a 105°C
Agua con la cual generalmente no se observarán efectos perjudiciales.	$c < 750$	$s < 500$
Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles.	$750 < c < 1500$	$500 < s < 1000$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos.	$1500 < c < 3000$	$1000 < s < 2000$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3000 < c < 7500$	$2000 < s < 5000$

Fuente: Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya, UTA, 2010.

Tabla 3.8: Rango de Variación del pH, según Normas NCh 409 y NCh 1.333.

Norma	Rango
NCh 409	6,0 - 8,5
NCh 1.333	5,5 - 9,0

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región, AC, 2002.

3.4.2 Antecedentes

El estudio de AC Consultores (AC, 2002) realiza la caracterización del río Camarones usando como elementos de análisis el pH del agua, la conductividad eléctrica, los macroelementos bicarbonato, carbonato, sodio, potasio, sulfatos, calcio, cloruros y sodio, y los microelementos arsénico, boro, cobre, fierro y nitratos. La elección de estos parámetros obedece a la mayor regularidad con que se miden en el área de estudio. En este mismo estudio se señala que la mala calidad del agua de esta quebrada tanto para el uso de agua potable como de riego, se atribuye al alto contenido de arsénico y boro.

La información disponible para las estaciones de Camarones en Condumaya y Camarones en Conanoxa, se sintetizan en la Tabla 3.9.

La conductividad eléctrica varía entre 5.274 $\mu\text{mhos/cm}$ en la zona más baja del valle y 2.663 $\mu\text{mhos/cm}$ en la zona más alta, estando el pH en el orden de 7,6 y 7,7. El agua del río Camarones resulta ser del tipo alcalina, cuya alta conductividad genera severas limitaciones para su uso en riego, siendo muy restrictivo en el sector de Conanoxa y algo menor en Condumaya.

Al analizar los resultados de los microelementos: arsénico, boro y hierro, éstos exceden en ambas estaciones los límites establecidos para el uso en agua potable, mientras que para el uso de riego, sólo el hierro en Conanoxa, zona más baja del valle, se presenta bajo el límite establecidos por la norma, las mediciones restantes no cumplen con los requerimientos.

Para el caso del cobre, su contenido se encuentra bajo los rangos establecidos en las normas tanto para el uso en agua potable como en riego, presentando valores de 0,018 mg/l en Condumaya y de 0,032 mg/l en Conanoxa.

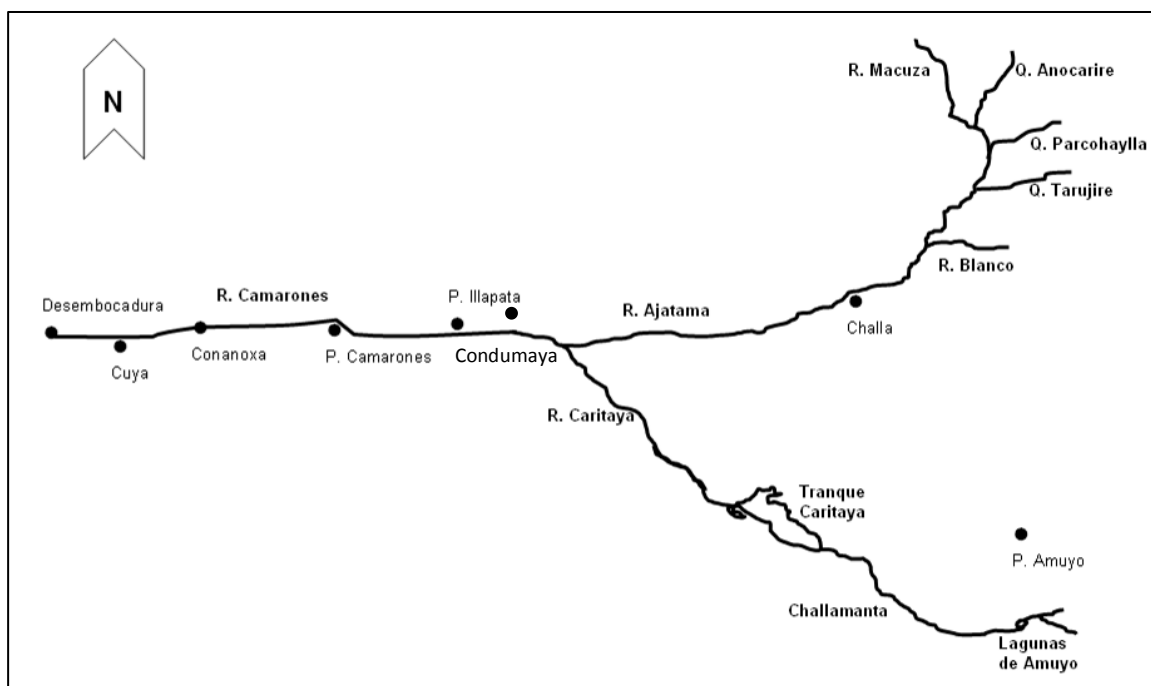
En general se aprecia que la calidad físico-química del agua del valle genera una severa limitación para los usos de agua potable y riego.

Por otra parte, en el estudio “Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya”, realizado por la Universidad Tarapacá el año 2010, se caracterizó espacialmente la variabilidad en la composición físico-química de las aguas y sedimentos a lo largo del cauce del río Camarones y de sus principales afluentes (Ver Figura 3.4). Los

resultados arrojan que los cursos de agua con los niveles más bajos de arsénico, boro y sales disueltas fueron localizados en el río Ajatama y corresponden a los afluentes: Macuza, Anocarire y río Blanco. En contraposición, los niveles más altos de arsénico, boro y sales disueltas en la cuenca fueron asociados al río Caritaya y sus afluentes. Frente a este escenario el río Ajatama, de mejor calidad, cumple una función de dilución de sales al combinarse con las aguas del Caritaya para dar origen al río Camarones.

Además, se pudo establecer que las aguas del río Caritaya a través de su paso por el tranque Caritaya, mantienen intactos sus niveles de sales y algunos elementos/especies importantes desde el punto de vista agronómico, como es el caso del boro, por lo que en la práctica el agua que se embalsaría tendría una calidad equivalente a la que posee el río en la actualidad. Por otra parte, adicionalmente, a la función de acumular el agua y actuar como obra reguladora de crecidas, el embalse permite el depósito de sedimentos arsenicados, que mediante un proceso de remoción pasiva, el arsénico es abatido con una eficiencia en torno al 24%.

Figura 3.4: Esquema de la Cuenca del río Camarones y lugares relevantes del muestreo, evaluación calidad de agua.



Fuente: Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya, UTA, 2010.

Tabla 3.9: Antecedentes de Calidad de Aguas Superficiales, Quebradas de Camarones.

Estación	Conduct. µmhos/ cm	pH mg/l	Na mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	K mg/l	H003 mg/l	C03 mg/l	SO4 mg/l	Cloruro mg/l	As mg/l	Boro mg/l	Cu mg/l	Fe mg/l
Río Camarones en Conanoxa	5.274	7,7	833,2	45,9	223,4	70,4	223,5	1,58	440,4	1418,7	0,86	30,0	0,032	1,3
Río Camarones en Condamaya	2.663	7,6	298,1	14,2	87,8	64,3	120,8	-	199,1	509,1	1,2	13,5	0,018	8,9

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región, AC, 2002.

El reciente estudio de Arrau en la zona llamado “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013) se indica la toma y análisis de tres muestras en el Valle de Camarones a lo largo del cauce. En la Figura 3.5 se señalan los puntos de medición de calidad de agua (CA-1 a CA-3) y en la Tabla 3.10 se presentan los resultados y límites máximos admisibles de los parámetros físicos y químicos analizados en el laboratorio, destacando aquellos valores que sobrepasan la norma NCh 1.333.

De la información presentada se puede destacar que las 3 estaciones de muestreo, poseen parámetros que sobrepasan los valores recomendados por la NCh 1.333, entre los cuales se destaca el contenido de boro, arsénico y conductividad eléctrica, por lo extremadamente superior a los valores admisibles por norma.

Cabe destacar, que dadas las condiciones actuales de la calidad de agua en el Valle de Camarones no es posible el crecimiento de variedad de cultivos, sino que mas bien es restrictivo, tal cómo se verá en acápite posteriores. Como por ejemplo, el caso del boro, nutriente esencial con límites determinados, son pocos los cultivos que toleran las altas concentraciones, de los cuales se pueden mencionar: alfalfa, trigo, maíz, cebolla, tomate, descartando los cultivos frutales, debido a que son más sensibles (UTA, 2010). O como es el caso de la conductividad eléctrica, medida de la concentración de sales de una solución, cuyos altos valores podrían provocar efectos en cultivos sensibles, obstrucción en los sistemas de goteo y salinización del suelo (Arrau, 2013).

Tabla 3.10: Parámetros físicos de Calidad de Agua, Valle de Camarones.

Parámetro	Unidad	Puntos de Muestreo			Límites Máximos
		CA1	CA2	CA3	NCh 1.333
pH	rango	7,19	7,13	7,19	5,5 – 9,0
Aluminio	mg/L	4,4	5,59	6,29	5
Arsénico	mg/L	0,32	0,55	0,69	0,1
Bario	mg/L	0,53	0,77	0,9	4
Berilio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	0,1
Boro	mg/L	4,57	5,81	<0,002	0,75
Cadmio	mg/L	<0,002	<0,002	<0,002	0,01
Cianuro	mg/L	<0,04	<0,04	<0,04	0,2
Cloruros	mg/L	207	234	281	200
Cobalto	mg/L	<0,001	0,001	0,007	0,05
Cobre	mg/L	0,02	0,04	0,06	0,2
Cromo	mg/L	<0,009	<0,009	<0,009	0,1
Fierro	mg/L	s/i	s/i	s/i	5
Fluoruros	mg/L	0,38	0,46	0,47	1
Litio	mg/L	s/i	s/i	s/i	2,5
Manganeso	mg/L	s/i	s/i	s/i	0,2
Mercurio	mg/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
Molibdeno	mg/L	<0,009	<0,009	<0,009	0,01
Níquel	mg/L	<0,009	<0,009	<0,009	0,2
Plata	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	0,2
Plomo	mg/L	<0,05	<0,05	<0,05	5
Selenio	mg/L	<0,004	<0,004	<0,004	0,02
Sodio Porcentual	%	57,2	51,7	25,9	35
Sulfatos	mg/L	83	108	<5,32	250
Vanadio	mg/L	s/i	s/i	s/i	0,1
Zinc	mg/L	s/i	s/i	s/i	2
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	1,60*10 ³	1,10*10 ³	540	1000
Conductividad eléctrica	µS/cm	985	1272	1492	750
Sólidos disueltos totales	mg/L	640	732	764	500
Calcio	mg/L	36,1	57,7	<5,00	-
N-Total	mg/L	6,44	9,34	10,9	-
Potasio	mg/L	19,8	40,5	<1,00	-
P-Total	mg/L	0,89	1,43	<0,60	-
Sodio Total	mg/L	103	141	<0,00	-

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

3.5 Caracterización Granulométrica

En el informe “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, Primera Región” (AC, 2002), se procedió a caracterizar la granulometría del Valle Camarones, para representar el material de arrastre a lo largo del río. Para ello, se realizan 4 calicatas en el lecho, la ubicación de estas se muestra en la Figura 3.6.

El muestreo se realizó por capas de 1,0 m de profundidad y en su área de 1,0 x 1,0 m, considerando como profundidad total de 2,0 m. Se obtuvieron curvas granulométricas para ambas capas, para luego calcular la curva integrada representativas del sector (AC, 2002).

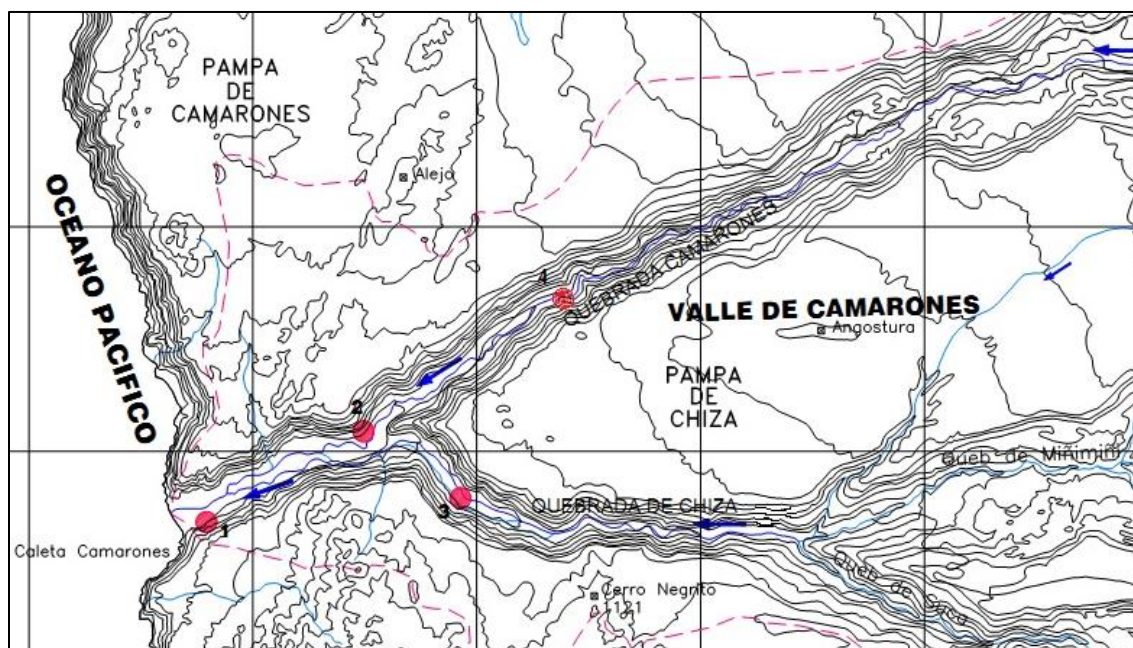
Los valores característicos de las curvas granulométricas se presentan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Parámetros Característicos de los Sedimentos, Valle de Camarones.

Nº Calicata	Ubicación	D16 [mm]	D50 [mm]	D84 [mm]	D90 [mm]	Dg [mm]	σ
1	km 0,0 (Desembocadura)	0,25	2,3	21	26	2,3	9,2
2	km 7,0	0,15	15	210	250	5,6	37,4
3	km 4,6	0,25	21	20	27	2,2	8,9
4	km 5,0 (Chiza)	0,25	0,7	11	20	1,7	6,6

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, Primera Región, AC, 2002.

Figura 3.6: Granulometrías realizadas en el Valle de Camarones.



Fuente: Elaboración propia, ref. Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, AC, 2002.

3.6 Caracterización Agroclimática

En el Valle de Camarones se ubican dos de los subgrupos climáticos en que se subdivide el Clima Desértico, el “Desértico Tropical Marino” para el tramo con mayor influencia costera, que se extiende desde el mar hasta las cercanías del sector La Burra y el “Desértico Sub tropical Marino” que se extiende hasta el sector de la ex Hacienda Camarones. Cada uno de ellos presenta parámetros agroclimáticos que se caracterizan a través de los agroclimas Arica y Poconchile, respectivamente, cuyas características pluviales, no permiten el cultivo sin riego (UTA, 2010).

Las condiciones agroclimáticas del “agroclima Arica” permiten el cultivo de hortalizas de primavera-verano en cualquier época, por lo que es posible la obtención de dos o más cultivos al año. Los cultivos que se pueden desarrollar son ajos, cebollas, espárragos, betarragas, entre otros, concentrados en los sectores Hacienda Camarones, poblado de Camarones, Esquiña e Illapata (UTA, 2010).

Mientras que en el agroclima Poconchile, todos los cultivos son posibles, salvo los frutales con alto requerimiento de frío como manzanos, peras, ciruelas, etc. Tiene aptitud para cultivos de frutales tropicales y subtropicales como mangos, guayabas, pomelos, tangelos, paltos, chirimoyos, maracuyá, etc. (UTA, 2010).

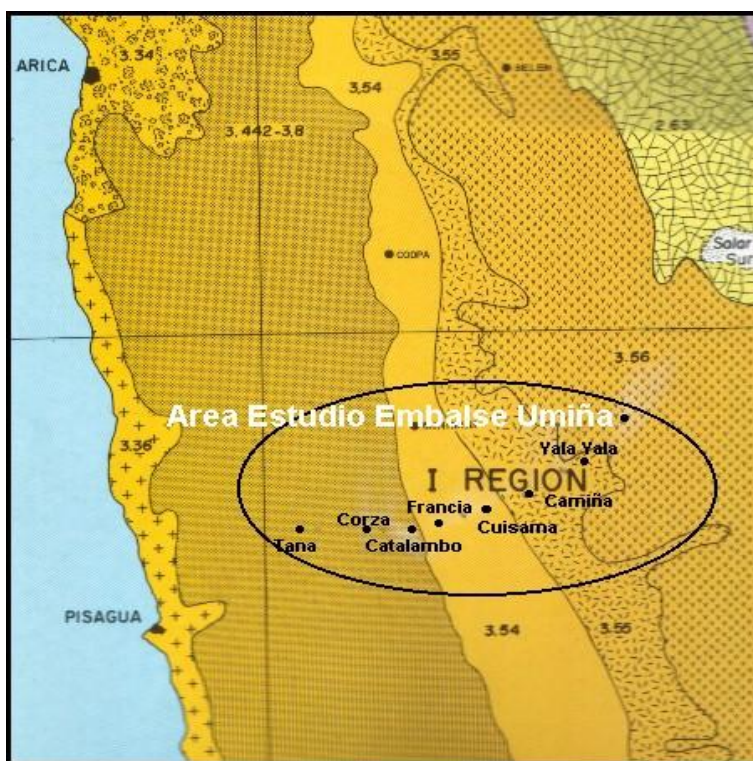
Por otra parte, a partir del “Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Umiña” (ARRAU, 2010), proyectado en la cuenca de Camiña, límite sur de la cuenca del Río Camarones, se caracteriza la zona con los distritos del Mapa Agroclimático de Chile. Tal como se aprecia en la Figura 3.7, los agroclimas, de oriente a poniente, son los señalados en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Distritos de Agroclimas de la zona en estudio.

Nº Distrito	Nombre Distrito
3.56	Agroclima Putre
3.55	Agroclima Potrerillos
3.54	Agroclima Refresco
3.442-3.8	Agroclima Copiapó

Fuente: Mapa Agroclimático de Chile - Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Umiña, ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2010.

Figura 3.7: Distritos Agroclimáticos.



Mapa Agroclimático de Chile, INIA, 1989.

Fuente: Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Umiña, ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2010.

Complementariamente, posterior al estudio de Camiña, el mismo consultor realizó en la zona de interés el “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013), reiterando la caracterización agroclimática basada en el Mapa Agroclimático de Chile, realizado por INIA.

Dada la ubicación de las áreas de cultivo se describen los agroclimas:

3.6.1 Agroclima Putre (3.56)

El Distrito 3.56, se encuentra al oriente del clima Potrerillos (3.55), desde la frontera con Perú, un sector de la frontera con Bolivia y la frontera con Argentina hasta un poco al norte del paralelo 29 (Arrau, 2010).

Este agroclima cubre la zona comprendida entre el sector de emplazamiento del embalse Caritaya hasta el sector de Conдумaya.

En invierno, el promedio más bajo del mes más frío es superior a $-2,9^{\circ}\text{C}$, en tanto que la máxima media diaria del mes más frío, varía de 0 a 5°C . En verano, la máxima media de los cuatro meses más cálidos es superior a los 10°C . La duración de la estación sin heladas promedio (temperaturas mínimas promedio superiores a 0°C) es inferior a 1

mes. La lluvia alcanza a 256,6 mm, de los cuales 196,3 mm caen entre los meses de enero y febrero. En los límites con la zona precedente (3.55) se puede cultivar cebada, papa, quínoa y cañihua (Arrau, 2010).

3.6.2 Agroclima Potrerillos (3.55)

El distrito 3.55 identificado como Agroclima Potrerillos se ubica inmediatamente al oriente del clima Refresco y se extiende desde el límite con Perú y la latitud 30°S (al norte de la ciudad de Vicuña).

El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 11,9°C, con una máxima media de los meses más cálidos, enero y febrero, de 18,4°C y una mínima media del mes más frío correspondiente a junio de 4,9°C.

La suma de temperaturas anuales base 10°C es de 744 grados-días. En invierno, el promedio de temperaturas más bajas del mes más frío, oscila entre -10°C y -2,5°C, siendo la máxima media del mes más frío superior a 12°C. En verano, el promedio de las máximas medias de los cuatro meses más cálidos es superior a 18°C. La duración de la estación sin heladas disponible (temperaturas mínimas absolutas medias superiores a 2,0°C) es de 2,5 a 4,5 meses.

La lluvia anual alcanza a 44,1 mm, distribuida principalmente entre los meses de mayo a agosto.

La aptitud agrícola de esta zona es para producción de avena, trigo, cebada, alfalfa y papas, destacando la participación de hortalizas como ajo y choclo.

3.6.3 Agroclima Refresco (3.54)

El Distrito 3.54 se ubica al oriente del clima 3.4, desde la frontera con Perú hasta un poco al norte de la ciudad de Vicuña, aproximadamente el paralelo 30° sur.

El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 17,7°C, con una máxima media del mes más cálido (enero) de 28,4°C y una mínima media del mes más frío (junio) de 5,5°C.

La suma de temperaturas anuales, base 5°C es de 4.629 grados-día; con base 10°C es de 2.793 grados-día.

Las lluvias alcanzan a 12 mm, distribuidas principalmente entre los meses de mayo a julio. La estación seca es de doce meses. Con riego, es apta para arroz, maíz, papa, trigo, cebada, avena, alfalfa, ballica, tréboles, berenjena, tomates, cucurbitáceas, ají, pimentón, porotos, coliflor, etc. Además, es apto para frutales, tales como cítricos, vides, etc., pero no lo es para frutales con requerimientos de frío.

3.6.4 Agroclima Copiapó (3.442-3.8)

El Distrito 3.442 - 3.8, se ubica a cierta distancia de la costa, en los valles interiores, desde la frontera con Perú hasta el paralelo 30°S, al nor-oeste de la ciudad de Vicuña.

El régimen térmico se caracteriza por una temperatura media anual de 18°C, con una máxima media del mes más cálido (febrero) con 30,1°C y una mínima media del mes más frío (julio) de 6,5°C.

La suma de temperaturas anuales, base 5°C, es de 4.700 grados-día; con base 10°C es de 2.895 grados-día. Dado que entre los meses de mayo a septiembre, las temperaturas mínimas medias se encuentran bajo los 10°C, el período de crecimiento de las plantas de verano es de siete meses.

Las lluvias alcanzan a 22 mm anuales, distribuidas principalmente entre los meses de abril y octubre. La estación seca es de doce meses.

Al igual que en los otros distritos, considerando las características hídricas no es posible cultivar sin riego. Bajo riego, esta zona es muy favorable para la producción de frutas y vides, en razón a que las temperaturas máximas son mucho más altas y la amplitud diurna mucho más grande, con lo cual se favorece la maduración de los cultivos y se reduce el peligro de muchas enfermedades.

3.7 Caracterización de cultivos del Valle de Camarones

Con lo expuesto en párrafos anteriores, se puede inferir que el clima de la zona podría permitir gran variedad de cultivos a lo largo del valle, sin embargo, la deficiente calidad del agua para el regadío restringen la producción agrícola, actualmente de escaso desarrollo.

De acuerdo a lo señalado en el estudio realizado por la Universidad de Tarapacá (UTA, 2010), la mitad de las tierras regables están ocupadas con grama salada, lo que es un claro índice del grado a que llega el problema de drenaje y de la salinidad asociada, en estos suelos. Destaca la alfalfa, como cultivo más relevante, de variedad local y adaptada a las condiciones de calidad de agua y del suelo del Valle de Camarones. Además su alta producción se debe a que el principal propietario, dueño de dos tercios de la superficie regable del valle, dedique la alfalfa para sus criaderos avícolas, ubicados en la parte costera del valle.

El uso del suelo de área agrícola, se encuentra limitada a cultivos de alfalfa y algo de maíz a causa de la alta salinidad de suelos y agua, mencionado anteriormente.

En la parte alta de Camarones existen algunas áreas de pastoreo ocasional poco importantes.

En algunos sectores de la quebrada de Chiza existen pequeños desarrollos agrícolas, asociados a la presencia de vertientes, cuya superficie total aprovechable no supera las 10 Ha (UTA, 2010).

3.8 Demanda agrícola

Según estudio “Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile” (IPLA, 1996) en la cuenca del Río Camarones existen sólo demandas agrícolas, siendo el único cultivo en el área, el alfalfa, cuya demanda de agua para riego fue estimada por zonas, tal como se presenta en la Tabla 3.14. Los antecedentes de este estudio provienen de un documento anterior llamado “Estudio Embalse Caritaya”, realizado por IPLA Ltda. para la Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas, en el año 1993. Aquí se identifican cuatro superficies de riego, zona alta, media, baja y Cuya, con una superficie total de 539,56 Ha y una eficiencia de aplicación de agua de riego de un 30%.

Tabla 3.13: Zonas de Riego, Cuenca Río Camarones, 1993.

Zona	Área Ha
Alta	131,65
Media	130,39
Baja	187,02
Cuya	90,50
Total	539,56

Fuente: Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile, IPLA, 1996.

Tabla 3.14: Demanda Neta de Alfalfa en [l/s], Cuenca Río Camarones.

Mes	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Alta y Media	75	65	66	87	119	148	186	190	173	163	142	109
Baja y Cuya	79	69	70	92	125	157	197	202	183	173	151	116

Fuente: Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile, IPLA, 1996.

Por otra parte, el estudio “Agua para el siglo XXI para América del Sur De la Visión a la Acción” (Global Water Partner South America, 2000) menciona que la superficie de la cuenca de Camarones corresponde a 540 Ha, regada en un 100% bajo riego tendido.

También, cabe mencionar los “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones” (AC, 2002), donde se detalla el uso de suelo catastradas en la parte baja del valle, que comprende entre Taltape y la desembocadura del río Camarones. Los principales cultivos y uso de suelo son:

Tabla 3.15: Uso de suelo, entre Taltape y la desembocadura, Río Camarones.

Uso de suelo	Área Ha
Alfalfa	188,14
Barbecho	38,42
Forestal	0,31
Gramma salada	503,31
Hortalizas	5,12
Maíz	53,17
Pie de monte	18,81
Tranque	0,39
Urbano	27,66
Urbano industrial	18,54
Total	853,88

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

Asimismo, en el estudio anterior se realizó un completo estudio de suelos de la parte baja del Valle de Camarones, que abarcó un reconocimiento del orden de 3.200 Ha.

El estudio reciente de Arrau sobre la quebrada Camarones (Arrau, 2013), se basa en los antecedentes recopilados desde AC Consultores (AC, 2002) y Luis San Martín y Cía. Ltda. (SMI, 2008), para extrapolar dicha información a la superficie total del Valle de Camarones. De los resultados obtenidos se desprende que, la superficie total asciende a 3.915,1 Ha, siendo la mayor proporción de ésta destinada a un uso de suelo “agrícola”, representado por un 24,58% de la superficie total, de la cual destaca el cultivo de alfalfa con un mayor porcentaje dentro de esta categoría. En la siguiente tabla se presenta un resumen de las series de suelos y sus actitudes agrícolas.

Tabla 3.16: Uso de suelo estimado, Quebrada Camarones.

Uso de Suelo	Superficie [Ha]	Porcentaje [%]
Agrícola	962,18	24,58
<i>Alfalfa</i>	<i>867,00</i>	<i>22,14</i>
<i>Hortalizas</i>	<i>5,12</i>	<i>0,13</i>
<i>Maíz</i>	<i>51,71</i>	<i>1,32</i>
<i>Barbecho</i>	<i>38,36</i>	<i>0,98</i>
Pasto natural	68,86	1,76
Gramma salada	504,19	12,88
Forestal	0,31	0,01
Matorral	865,75	22,11
Urbano	22,37	0,57
Urbano industrial	25,02	0,64
Pie de monte	18,81	0,48
Duna	544,37	13,90
Sin uso	421,66	10,77
Caja de río y otros	481,59	12,30
Total	3.915,11	100,00

* Estimación realizada a partir de antecedentes de SMI – 2008.

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

Posteriormente, en complemento a lo anterior, se realiza campaña en terreno a la zona, actualizando el catastro del uso de suelo (ver Tabla 3.17 y Anexo N°2), destacando que la mayor cantidad de superficie de uso agrícola es el cultivo de praderas, en especial la alfalfa, seguido por las hortalizas que ocupan superficie principalmente en el sector alto y el medio, destacándose la cebolla, el maíz choclo y la zanahoria. Mientras que el sector bajo, se caracteriza por una escasa presencia trigo, único cultivo del tipo cereales registrado en el sector (Arrau, 2013).

Adicionalmente, del “Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Umiña” (Arrau, 2010), se cuenta con un catastro actual de los cultivos de la cuenca de Camiña, ubicada al sur de la cuenca de Camarones, que dada a la similitud de las características agroclimáticas, son elementos que se podrían evaluar como alternativa de producción agrícola en el valle. Los cultivos son: ajo, zanahoria, alfalfa, betarraga, cebolla y choclo.

Tabla 3.17: Uso actual de suelos, Valle de Camarones.

Cultivo	Superficie [ha]	Porcentaje [%]
Riego		
Trigo	28,24	3,2
Cebolla	32,51	3,7
Maíz Choclo	20,73	2,4
Zanahoria	5,99	0,7
Huerta	4,87	0,6
Alfalfa	712,29	81,8
Barbecho	66,17	7,6
Sub Total Riego	870,80	22,2
Secano		
Sin Habilitar	2.811,05	71,8
Sub Total Secano	2.811,05	71,8
No Habilitable	234,91	6
TOTAL	3.915,11	100

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013

3.9 Caracterización del recurso Hídrico Superficial

La escorrentía continua en el río Camarones se encuentra en la parte superior de la cuenca, y se debe fundamentalmente a los aportes de los ríos Ajatama y Caritaya. En efecto, las fuertes lluvias que caen durante la temporada de verano provocan violentas crecidas lo que significa que en Conanoxa escurra el 50% del volumen anual en los meses de Enero a Abril, repartiéndose en forma pareja el resto del caudal en el año. Las mayores precipitaciones, ocurridas en la parte alta de la cuenca, regulan el recurso del valle, debido a que posee un clima de hielo por efecto de altura, que produce una fusión lenta y distribuida a lo largo del año, además la cuenca altiplánica, en general, se caracteriza por suelos de textura gruesa y con pendiente menos fuerte, siendo un sector favorable para la infiltración, provocando un flujo más o menos plano, sin acusar la fuerte variabilidad de las cuencas más bajas (UTA, 2010).

Según los antecedentes del estudio realizado por AC Ingenieros Consultores Limitada en el año 2002, la cuenca del río Camarones en aquél entonces contaba con sólo una estación de control vigente, que corresponde a Río Camarones en Conanoxa. Existiendo dos puntos de interés adicionales que corresponden a los caudales afluentes al embalse Caritaya y los caudales de la quebrada Ajatama antes de la confluencia con el río Caritaya, cuyas series de caudales medios mensuales se obtuvieron del estudio de IPLA-DR, 1991.

Tabla 3.18: Caudales Medios Mensuales Promedios [m³/s].

Estación	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
Quebrada Ajatama antes de Confluencia (*)	0,281	0,252	0,312	0,74	0,962	0,599	0,355	0,327	0,422	0,349	0,336	0,438	0,448
Río Caritaya en Caritaya (*)	0,215	0,193	0,238	0,541	0,738	0,449	0,266	0,245	0,317	0,262	0,252	0,328	0,337
Río Camarones en Conanoxa	0,223	0,218	0,286	0,6	0,897	0,801	0,431	0,388	0,453	0,387	0,324	0,253	0,444

(*) Puntos de interés sin control fluviométrico.

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

La Tabla 3.18 permite apreciar que los mayores caudales se producen entre diciembre y marzo, que el estiaje se da típicamente en septiembre y octubre, y que los valores máximos ocurren principalmente en los meses de enero y febrero. Ello se debe al efecto que sobre el régimen pluviométrico de la zona tiene el invierno altiplánico (AC, 2002) También en las curvas de variación estacional es posible distinguir el peak que se produce en los meses de verano. Dichas curvas se presentan en Anexo N°3.

Respecto a la caracterización de crecidas, del mismo estudio se desprende que la estación del Río Camarones, se encuentra influenciada por la operación del embalse Caritaya. Dentro de las mayores crecidas registradas se puede mencionar, la del 9 de marzo de 1985, información proveniente del estudio "Mejoramiento Embalse Caritaya, I Región", IPLA-1993, con un caudal de 65 m³/s en Camarones en Conanoxa, donde el embalse Caritaya no vertió, por lo que se concluyó que la mayor parte del caudal provenía del Río Ajatama, que tiene una cuenca con una superficie 425 km², mientras que el área aportante al embalse Caritaya, es menor, cuyo caudal máximo esperado es de 42 m³/s (AC, 2002).

Cabe señalar, que en principio los resultados de la Tabla 3.18, resultan inconsistentes, dado que la suma de los afluentes, superan por mucho los valores medidos en Río Camarones en Conanoxa, a pesar que el sistema está influenciado por riego.

Tabla 3.19: Caudales de crecidas, Estación Río Camarones en Conanoxa.

Período de Retorno [años]	Caudales de Crecidas [m ³ /s]
5	21
10	35
20	54
25	61
50	88
75	109
100	122

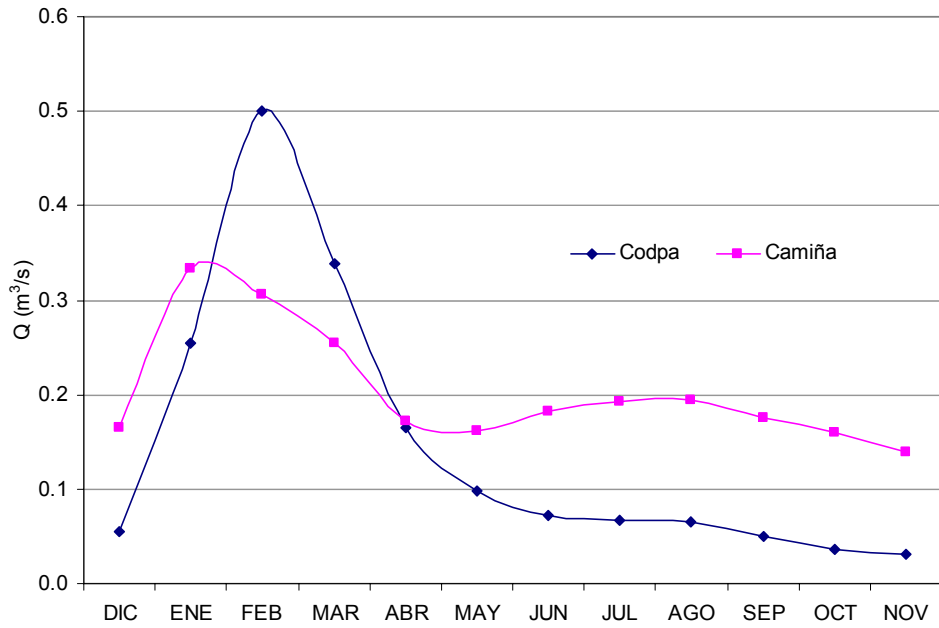
Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

Mientras que al recopilar antecedentes de la cuenca afluyente al embalse Caritaya, se cuenta con el estudio “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya” (SMI, 2008), donde se estiman los caudales medios asociados a la cuenca de Caritaya, a partir de las dos cuencas vecinas, Camiña y Codpa. En el Gráfico 3.1 se pueden apreciar los resultados.

La estimación se realizó con las estaciones fluviométricas Camiña en Altusa y Codpa en Cala Cala, cuya transposición a Caritaya se concluye que los caudales entregados por Camiña en Altusa son mayores que los de Codpa en Cala-Cala en los meses de recesión y menores en época de crecidas, presentando una menor dispersión. Codpa presenta caudales muy grandes en época de crecida, pero sugiere una disponibilidad muy baja del recurso hídrico en el período de recesión. Finalmente, en este estudio se sugiere que la estadística de Camiña en Altusa como la más representativa de la cuenca de Caritaya, debido a que tiene similitud en la curva hipsométrica y un régimen de precipitación más parecido, que dada la ubicación de la línea de nieves (4.750 m.s.n.m.) y siendo que se encuentra a una mayor altitud, recibe más lluvia, sugiere que se vea influenciada por un área nival, presentando un caudal base mayor y caudales menores en época de crecidas, comportamiento que no ocurre en Codpa.

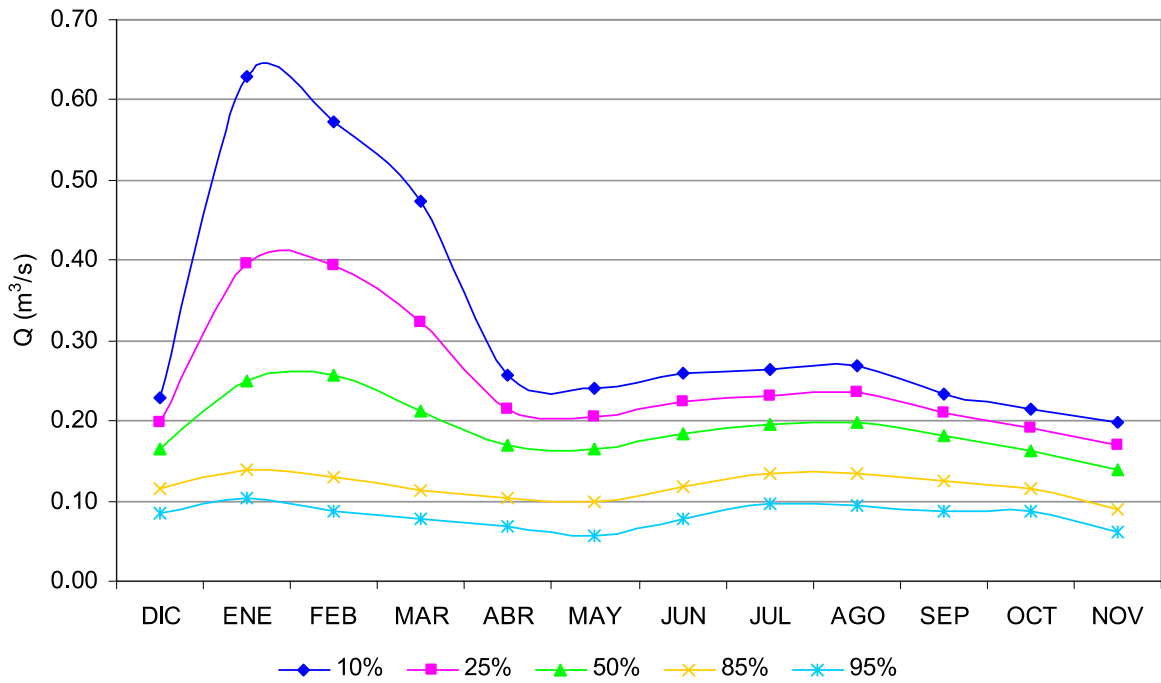
En el Gráfico 3.2 se presenta la curva de variación estacional estimada por Luis San Martín y Cía. Ltda (SMI, 2008) en el embalse Caritaya, donde se puede distinguir claramente los máximos en los meses de verano. Mientras que los caudales de crecidas recomendados, resultantes del Método del Hidrograma Unitario Sintético, se señalan en la Tabla 3.20.

Gráfico 3.1: Caudales Mensuales Promedio en Caritaya Transpuestos desde Cuencas de Camiña y Codpa.



Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Gráfico 3.2: Curva de Variación Estacional, Embalse Caritaya.



Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

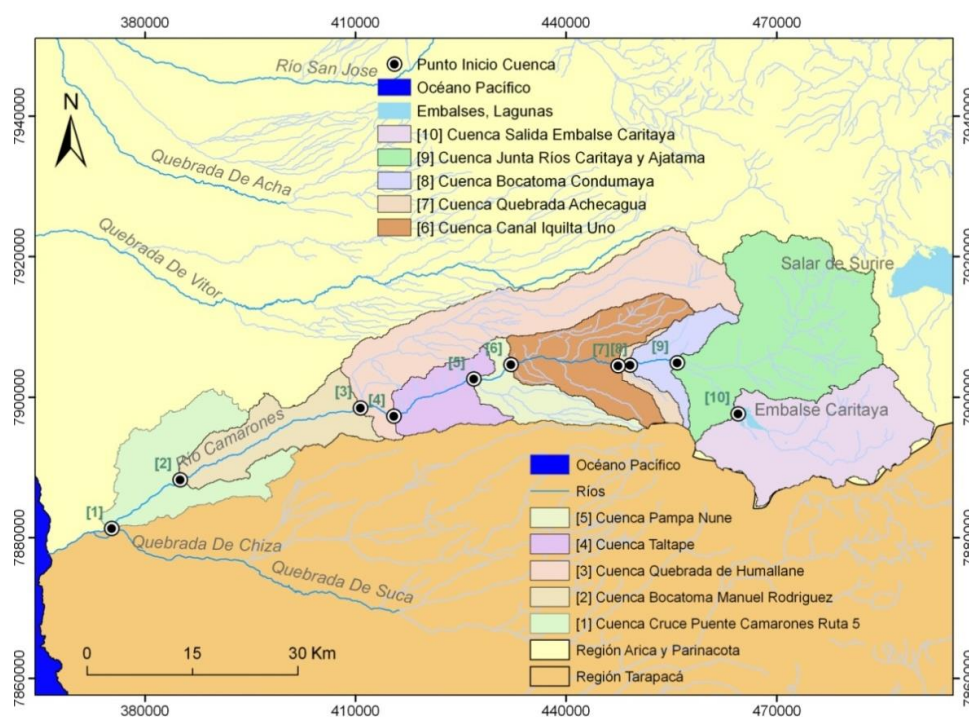
Tabla 3.20: Caudales de Crecidas, Embalse Caritaya.

Período de Retorno [años]	Caudal Máximo Instantáneo [m ³ /s]
2	20
5	72
10	120
20	166
50	237
100	289
500	414
1.000	471
10.000	662

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Del “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013) se obtienen los caudales estimados por transposición de la estación fluviométrica Camarones en Conanoxa, para diversas sub-cuencas del Valle de Camarones. Las sub-cuencas se señalan en la Figura 3.8 y los caudales máximos para diferentes períodos de retorno en la Tabla 3.21.

Figura 3.8: Cuencas delimitadas para cada punto de interés.



Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

Tabla 3.21: Caudales adoptados para las cuencas delimitadas en distintos periodos de retorno, en [m³/s].

Cuenca	T= 5	T= 10	T= 15	T= 20	T= 50	T= 100	T= 200
Cruce Camarones Ruta 5	42	89	128	164	328	520	792
Bocatoma Manuel Rodríguez	38	80	115	148	294	467	711
Quebrada Humallane	34	73	105	134	267	424	646
Canal Taltape	26	55	80	102	204	324	494
Quebrada Pampa Nune	24	51	73	94	188	298	454
Canal Iquilta	22	47	68	86	173	274	417
Quebrada Achecagua	18	38	55	70	140	222	339
Bocatoma Condumaya	18	37	53	68	136	215	328
Junta Ríos Caritaya y Ajatama	16	34	48	62	124	196	299
Salida Embalse Caritaya	7	14	20	26	52	82	125

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

3.10 Caracterización del recurso Hídrico Subterráneo

En el informe “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones” (AC, 2002), se realizó un catastro de captaciones en el valle de Camarones, cuyos resultados señalan que no existen captaciones de pozos, realizándose el aprovechamiento de los recursos hídricos sólo en forma superficial.

Por otra parte, los antecedentes del estudio “Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya” (UTA, 2010), indican que por Resolución No 594 del 24/04/90 publicada en el Diario Oficial, se conceden los derechos para un pozo profundo para riego de 83,3 Ha en el Proyecto de Parcelación C. Ibáñez del Campo y para 4 pozos profundos en el Proyecto Manuel Rodríguez.

3.11 Caracterización Hidrometeorológica

En el presente estudio es de principal interés el análisis de caudales, tanto máximos anuales como mensuales, afluentes al embalse Caritaya, sin embargo, no se dispone de información directa dado a que no se cuenta con una estación de control fluviométrico que registre mediciones en dicha zona. Sólo se cuenta con los registros de la estación Río Camarones en Conanoxa y Río Camarones en Chilpe, ambas pertenecientes a la misma cuenca. La estación en Chilpe, más cercana al embalse, tiene poca vigencia, debido a que su operación parte el año 2005, por lo que su aporte en mediciones es reducido, mientras que en Conanoxa, ubicada aproximadamente a 80 km aguas abajo al embalse, se poseen registros desde 1968, pero a pesar de lo extensa de

la base de información no resulta representativa de un régimen natural debido al efecto regulador del embalse y a las extracciones y aportes de flujo no controlado por riego.

Por otra parte, se tienen los registros de caudales medios mensuales de estaciones ubicadas en cuencas adyacentes, como los son Codpa en Cala Cala y Camiña en Altusa.

Resultado de la recopilación de información mencionada anteriormente, se analizaron las cuencas adyacentes y la cuenca misma del río Camarones, destacando por la extensión de años de medición, las siguientes estaciones fluviométricas dependientes de la Dirección General de Aguas (DGA).

Tabla 3.22: Estaciones Fluviométricas.

Estación Fluviométrica	Coordenadas en UTM		Altitud [m.s.n.m.]	Fecha de Inicio
	Norte	Este		
Río Camarones en Conanoxa	7.893.938	396.435	710	01-01-68
Río Camarones en Chilpe	7.905.332	434.748	1.565	01-12-05
Río Codpa en Cala Cala	7.918.163	429.727	1.745	01-01-94
Quebrada Camiña en Altusa	7.866.366	459.169	2.280	01-01-70

Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas, DGA.

Respecto a las precipitaciones, se dispone de los antecedentes provenientes del estudio “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región” (SMI, 2008) como las precipitaciones máximas anuales. Para el análisis mensual se cuenta con la estadística de las estaciones pluviométricas y meteorológicas de la zona, como lo son: Esquiña, Caritaya Embalse, Pumire y Chilcaya.

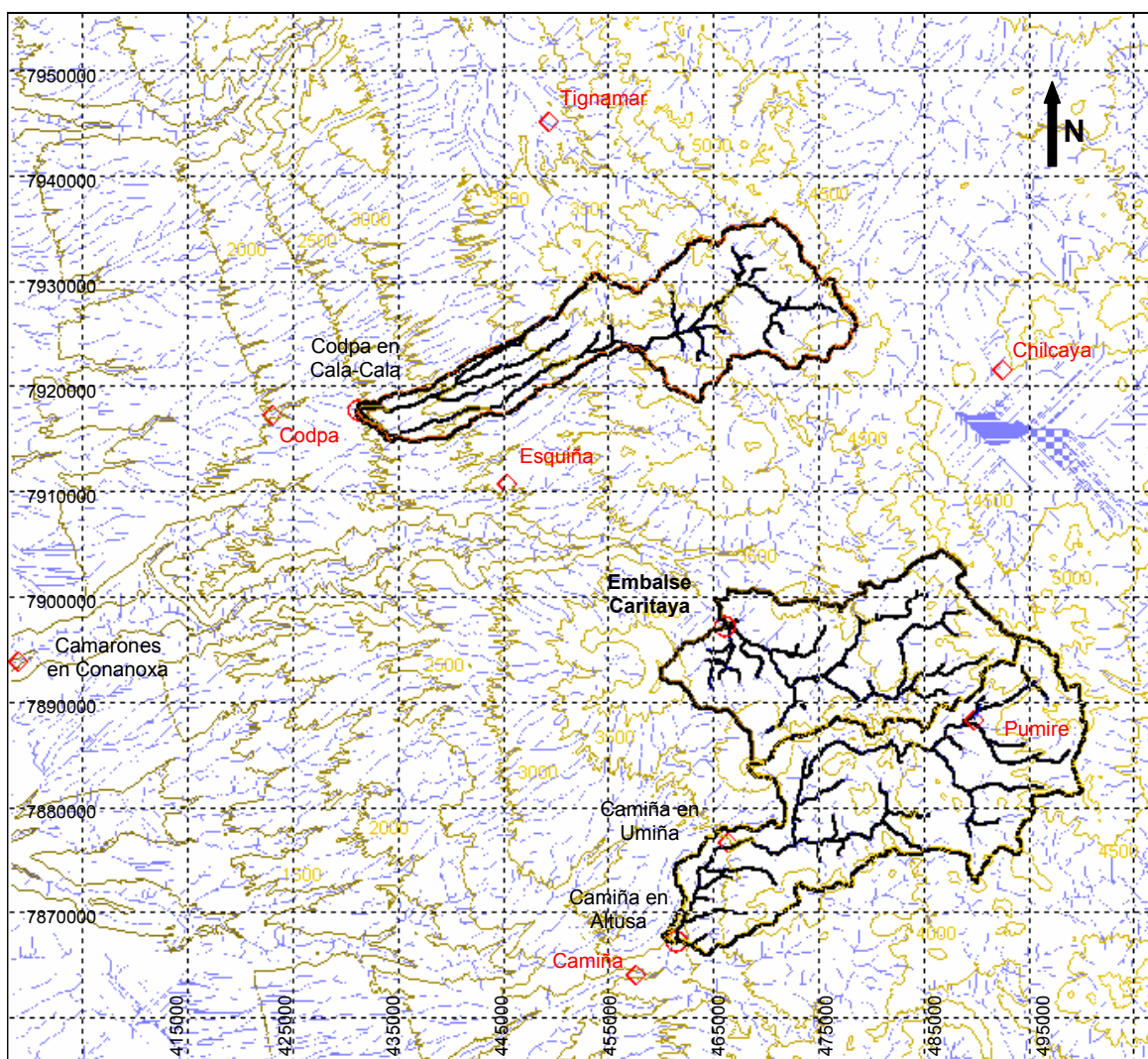
Tabla 3.23: Estaciones Pluviométricas.

Estación Pluviométrica	Coordenadas en UTM		Altitud [m.s.n.m.]	Fecha de Inicio
	Norte	Este		
Codpa	7.917.546	421.622	1.870	01-06-61
Esquiña	7.905.516	443.902	2.170	01-07-75
Camiña	7.864.392	456.168	2.500	01-01-71
Tignamar	7.945.423	447.886	3.230	01-12-75
Caritaya Embalse	7.896.377	464.627	3.600	01-01-32
Pumire	7.888.600	488.340	4.150	01-01-62
Chilcaya	7.921.950	491.100	4.270	01-11-71

Fuente: Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas, DGA.

En la Figura 3.9 se indica de manera esquemática la ubicación del punto en estudio y las estaciones pluviométricas y meteorológicas mencionadas en los párrafos precedentes.

Figura 3.9: Estaciones Pluviométricas y Fluviométricas Relevantes.



Simbología: ◇: Estaciones Pluviométricas
 ○: Estaciones Fluviométricas

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación Embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región, Estudio Hidrológico, SMI Ltda., 2008.

3.12 Información Cartográfica

Por otro lado, la topografía del sector se tiene representada en planos cartográficos de escala 1:50.000, del Instituto Geográfico Militar así como también en planos digitales obtenidos de “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región” (AC, 2002).

4 ESTUDIO HIDROLÓGICO

4.1 Análisis de estadística de caudales

Resultado de la recopilación de información, se analizaron las cuencas adyacentes y la cuenca misma del río Camarones, destacando por la extensión de años de medición, las estaciones fluviométricas dependientes de la Dirección General de Aguas (DGA) señaladas en la Tabla 3.22.

Al no contar con una estación de control en la zona de interés, en primera instancia sería recomendable utilizar para el estudio hidrológico la estación río Camarones en Conanoxa, debido a que posee un amplio rango de mediciones y pertenece a la misma cuenca que el embalse Caritaya, localizándose aproximadamente a 80 km aguas abajo de éste, sin embargo, por el efecto regulador que el embalse genera, en conjunto a la serie de extracciones y aportes de flujo no controlado por riego a lo largo del río Camarones, no resulta ser un registro representativo tanto para la estimación de caudales medios mensuales como para los máximos instantáneos afluentes al embalse.

La estación Río Codpa en Cala Cala cuenta con un extenso registro, y a pesar de ubicarse en la cuenca norte limítrofe a la de Camarones, se descarta su uso, debido a que Camiña en Altusa ubicada inmediatamente al sur del embalse Caritaya, presenta condiciones que asemejan de mejor forma a las de la zona en estudio por su mayor proximidad y similar altitud. También se puede destacar que la influencia del área nival, el régimen de precipitaciones y la curva hipsométrica de Camiña en Altusa la hacen una estación más representativa.

No obstante lo señalado, a pesar de no contar con una amplia base de datos, por lo reciente de su puesta en marcha, comparativamente con las estaciones mencionadas anteriormente, se considera recomendable, tomar de referencia para el análisis mensual la estación fluviométrica Camarones en Chilpe, puesto que las crecidas en esta zona geográfica, no necesariamente son coincidentes con crecidas de cuencas vecinas, sino más bien son producto de tormentas concentradas, que se ven reflejadas en estaciones pertenecientes en la misma. Por otra parte, a pesar de tratarse de una estación que no mide en régimen natural, está menos influenciada que Conanoxa por estar aguas arriba de ésta y más cercana al punto de interés.

La estadística de caudales medios mensuales de Camarones en Chilpe se adjunta en Anexo N°7.

4.2 Análisis de Información cartográfica

La información relativa al área aportante de la cuenca en estudio, además de las áreas pluviales de las estaciones de medición que así lo requieren, fueron obtenidas de la revisión de los planos topográficos digitales, recopilados de los “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones” (AC, 2002). De dichos planos se obtienen además, toda la información geomorfológica necesaria para la aplicación del método de Hidrograma Unitario.

Para desarrollar un análisis de la influencia del embalse en la zona de riego, se procede a estimar el área aportante al embalse Caritaya y la correspondiente a la Quebrada Ajatama, las cuales en conjunto contribuyen a los flujos circulantes por el río Camarones, por lo que se presentan ambas curvas hipsométricas en Anexo N°4.

Respecto a la ubicación de la línea de nieve se obtiene, a partir del estudio “Diseño Embalse Livilcar” (MN, 2010), donde se estima que la línea de nieve se ubica a 4.539 m.s.n.m. con una probabilidad de excedencia del 50% para dicho embalse, considerando esta altitud representativa para cuencas vecinas, se determina que el área aportante al embalse Caritaya tiene una componente pluvial del orden del 90% de su cuenca total.

Por otra parte, según el estudio “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya” (SMI, 2008) se adopta que la línea de nieves de la cuenca del embalse Caritaya se ubica a una de cota 4.750 m.s.n.m., extraído del estudio hidrológico para el Anteproyecto de la Construcción del Embalse Umiña en la cuenca de Camiña.

4.3 Análisis de estadística de precipitaciones máximas

La estadística y ajuste probabilístico de las precipitaciones máximas diarias se obtiene del estudio “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya” (SMI, 2008), considerando para el presente análisis las mediciones de la estación Pumire, perteneciente a la cuenca de la Quebrada Camiña (Tabla 4.1). La selección de esta estación pluviométrica se debe a que se caracteriza por un registro continuo de mediciones y que a pesar de no ubicarse dentro de la cuenca de cabecera al embalse Caritaya, es la más cercana a ésta y se encuentra a una cota de 4.150 m.s.n.m. que corresponde aproximadamente a la altura media de la cuenca.

Cabe mencionar, que se descarta el uso de la estación Chilcaya para este análisis, puesto que si bien se ubica a una cota media similar y también tiene cercanía a Caritaya, posee una estadística incompleta, sin mediciones en el período 1988 – 1998, por lo que no resulta conveniente para el estudio probabilístico.

El análisis de frecuencia realizado en la estación Pumire es a partir de mediciones entre los años 1962 – 1991, resultando como mejor ajuste una distribución Gumbel. No

fue posible extender o rellenar la estadística mediante correlaciones con estaciones vecinas, debido a la naturaleza de las tormentas de tipo convectiva, características en la zona norte, conocida por la ocurrencia de eventos independientes de un punto a otro (SMI, 2008).

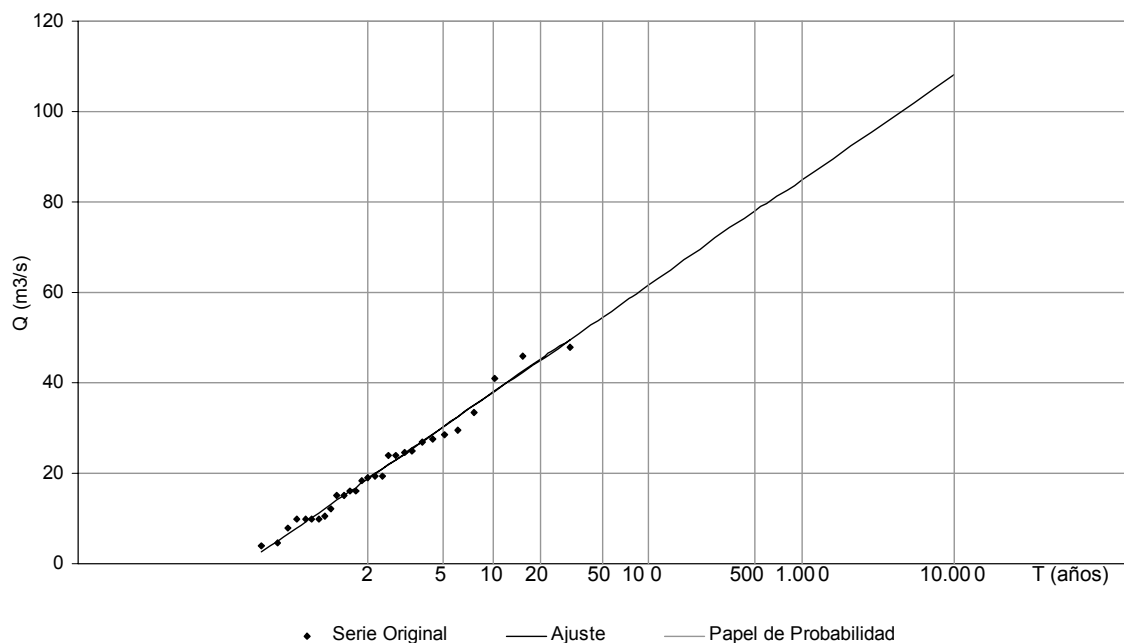
En la Tabla 4.1 y Gráfico 4.1 se presentan los resultados de la distribución tipo Gumbel de la estación Pumire.

Tabla 4.1: Precipitación máxima en 24 horas, Estación Pumire.

T [años]	Precip. máx. en 24 hr. [mm]
10	38
20	45
50	55
100	62
500	78
1.000	85
10.000	108

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Gráfico 4.1: Análisis de Frecuencia P24 max Estación Pumire, Ajuste a Distribución Gumbel.



Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

4.3.1 Relación Precipitación – Altura

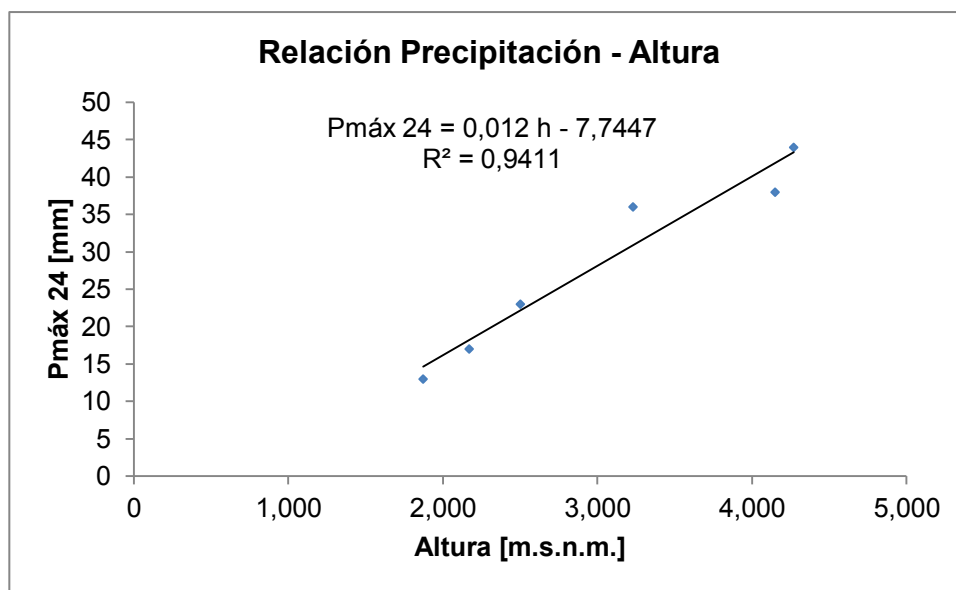
Dentro del régimen de lluvias característico del norte es posible apreciar que las precipitaciones registradas en una estación determinada presentan una correspondencia con la cota de éstas, por lo que existe una relación creciente entre las precipitaciones medidas y la altura a la que se realizan. Es por ello, que se estima una relación Precipitación – Altura para la zona en estudio, a partir de las precipitaciones máximas en 24 horas ($P_{\text{máx 24}}$) de período de retorno 10 años. Esta información se obtiene del estudio “Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya” (SMI, 2008). A continuación se presentan la tabla con los datos mencionados y la relación Precipitación – Altura obtenida.

Tabla 4.2: Precipitación Máxima 24 horas con 10% de probabilidad de excedencia por estación de control.

Estación Pluviométrica	Altitud [m.s.n.m.]	$P_{\text{máx 24}}$ [mm]
Codpa	1.870	13
Esquiña	2.170	17
Camiña	2.500	23
Tignamar	3.230	36
Pumire	4.150	38
Chilcaya	4.270	44

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Gráfico 4.2: Relación Precipitación – Altura en la zona de interés. ($P_{\text{máx 24}}$)



Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico 4.2 se presenta la variación de la precipitación con la altura, donde se observa una tendencia bastante lineal, con una pendiente del orden de 12 mm/km para el período de retorno analizado.

Luego, a partir de la expresión anterior y la curva hipsométrica de la cuenca del embalse Caritaya, se calcula el factor de precipitación media, considerando como estación base, la estación pluviométrica de Pumire. El factor para la cuenca obtenido es de 1,077 y las precipitaciones medias máximas calculadas se presentan en la Tabla 4.3, el detalle del cálculo puede revisarse en el Anexo N°5.

Tabla 4.3: Precipitación Máxima 24 horas, Embalse Caritaya.

T [años]	P _{máx} 24 horas [mm]	
	Pumire	Embalse Caritaya
10	38	40,9
20	45	48,5
50	55	59,2
100	62	66,8
500	78	84,0
1000	85	91,5
10000	108	116,3

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estudio de Caudales Máximos Afluentes al Embalse Caritaya

Dadas las características de la cuenca en estudio, correspondiente al afluente al embalse Caritaya, cuya superficie es de 364,0 km², además de no poseer estación de control cercana, y por las condiciones de precipitación, el procedimiento a utilizar en la estimación de caudales de crecidas se realizará siguiendo la metodología del Hidrograma Unitario Sintético. A continuación, se determinará las crecidas afluentes al embalse Caritaya.

4.4.1 Determinación del Hidrograma Unitario Sintético

Los parámetros geomorfológicos que caracterizan a la cuenca en estudio fueron calculados a través del análisis de los planos cartográficos provenientes de “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región” (AC, 2002). Dichos parámetros se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Parámetros Geomorfológicos, Embalse Caritaya.

Cota [m.s.n.m.]	3.600
A [km ²]	364,00
Lcp [km]	35,52
Lcg [km]	15,87
Σli [km]	672,12
Δh [m]	100
S%	19,00%
GM [km ²]	1.293,05

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros básicos del hidrograma unitario de la cuenca, se calculan con el Hidrograma Unitario Sintético de Lluta en Alcérreca (MN, 2010).

$$t_p = 0,111 \cdot \left(\frac{Lcp \cdot Lcg}{\sqrt{S}} \right)^{0,397} [h]$$

$$t_b = 2,55 \cdot t_p^{1,104} [h]$$

$$q_p = 637,08 \cdot t_p^{-1,22} [l/s / mm/km^2]$$

$$t_u = t_p / 5,5 [h]$$

Los parámetros se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Parámetros del Hidrograma Unitario, Embalse Caritaya.

Cota [m.s.n.m.]	3.600
t _p [h]	1,91
t _b [h]	5,20
q _p [l/s/mm/km ²]	289,61
t _u [h]	0,35

Fuente: Elaboración propia.

Resulta recomendable modificar el t_u en base al criterio adoptado por la DGA, con lo cual se cambia el hidrograma unitario.

- La corrección del valor t_u , es decir t_r , no deberá ser superior al 50% de t_u .
- Si el valor corregido queda dentro del intervalo $t_u - 10\% < t_r < t_u + 10\%$ el hidrograma unitario no será modificado.
- Si el valor corregido queda fuera del intervalo anterior, t_p se modifica de la siguiente forma, $t_{pr} = t_p + 0,25 \cdot (t_r - t_u)$

Una vez definido el t_u , se determinan por consiguiente los nuevos parámetros de la cuenca, como se muestra en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros del Hidrograma Unitario corregidos, Embalse Caritaya.

Cota [m.s.n.m.]	3.600
t_p [h]	1,95
t_b [h]	5,32
q_p [l/s/mm/km ²]	282,68
t_u [h]	0,50

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se procede a definir el hidrograma unitario sintético (HUS), cuya forma se determina por los coeficientes de distribución, razón t/t_p y razón q/q_p y los valores para t_p y q_p calculados y corregidos previamente.

Tabla 4.7: Coeficientes de distribución de Hidrograma Unitario Sintético.

Razón t/t_p	Razón q/q_p
0,00	0,000
0,20	0,000
0,40	0,000
0,60	0,000
0,80	0,029
1,00	1,000
1,20	0,713
1,60	0,385
1,80	0,279
2,00	0,193
2,20	0,125
2,40	0,070
2,60	0,035
2,80	0,001
3,00	0,000
3,20	0,000

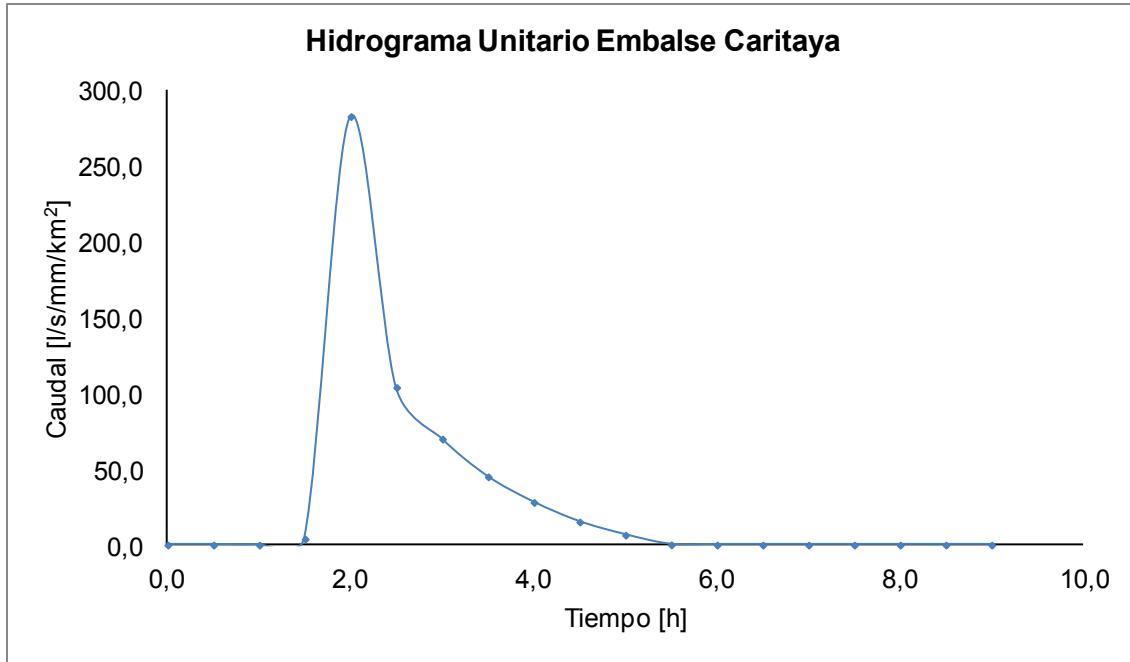
Fuente: Estudio de Pre-Factibilidad para la Construcción de Obras de Control de Crecidas Cuenca del Río San José”, Ingendesa, 2008.

Tabla 4.8: Hidrograma Unitario Embalse Caritaya.

t [hr]	Q [l/s/mm/km ²]
0,0	0,0
0,5	0,0
1,0	0,0
1,5	4,0
2,0	282,7
2,5	103,9
3,0	69,9
3,5	45,0
4,0	28,1
4,5	15,2
5,0	6,5
5,5	0,1
6,0	0,0
6,5	0,0
7,0	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.3: Hidrograma Unitario, Embalse Caritaya.



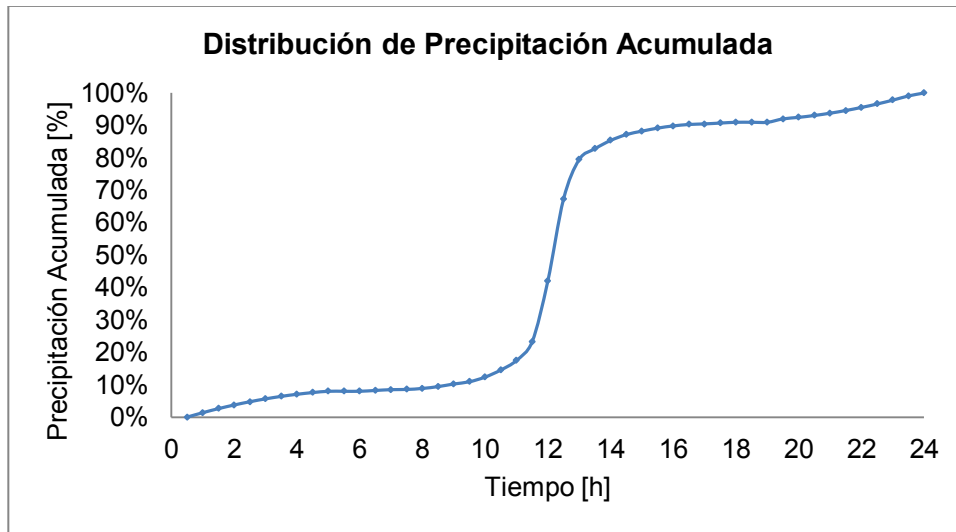
Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Evaluación de precipitación efectiva

Para el análisis de la precipitación efectiva se utilizan los datos presentados en la Tabla 4.1. Mientras que la distribución de precipitación se recurre al Manual de Carreteras (MOP, 2002).

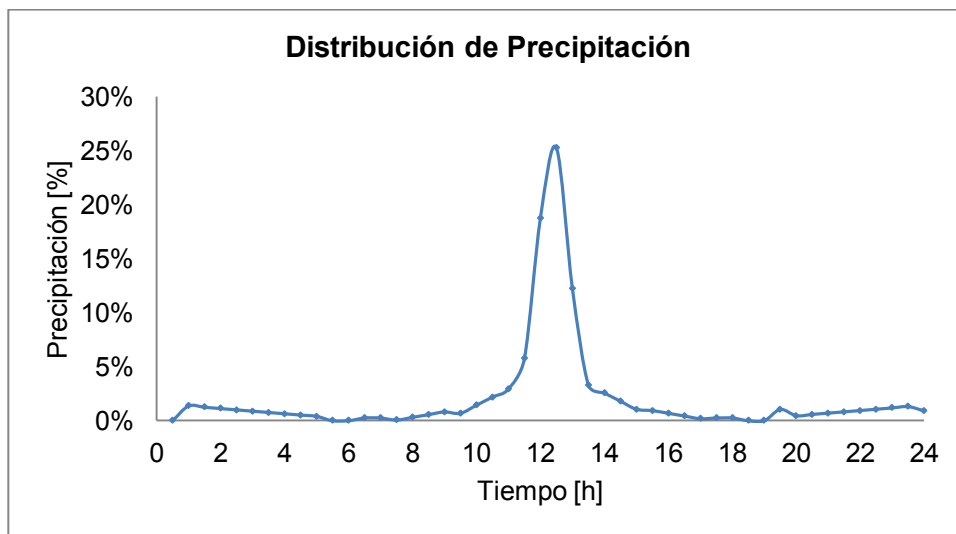
Las lluvias son distribuidas de acuerdo a los coeficientes de duración de la estación Putre, extraídos de la Tabla 3.702.403 A, Coeficientes de Duración para 10 años de período de retorno, de dicho documento. El Gráfico 4.4 y el Gráfico 4.5 muestran la distribución acumulada y centrada respectivamente del Manual de Carreteras en términos porcentuales para una precipitación de 24 horas.

Gráfico 4.4: Distribución de Precipitación Acumulada de 24 horas en términos porcentuales.



Fuente: Manual de Carreteras, Volumen N° 3 Instrucciones y Diseño, Parte II, MOP, 2002.

Gráfico 4.5: Distribución de Precipitación de 24 horas en términos porcentuales.



Fuente: Manual de Carreteras, Volumen N° 3 Instrucciones y Diseño, Parte II, MOP, 2002.

Luego, la precipitación efectiva en la cuenca se determina por el método de la Curva Número.

El modelo plantea la ecuación básica de escorrentía directa de una tormenta.

$$P_{ef} = \frac{(P_T - I_a)^2}{(P_T - I_a + S)}$$

Donde

P_{ef} : precipitación efectiva en [in]

P_T : precipitación total en [in]

I_a : infiltración inicial en [in]

S : infiltración potencial en [in]

Aplicando la relación empírica $I_a = 0,2 \cdot S$, la expresión anterior puede reducirse a:

$$P_{ef} = \frac{(P_T - 0,2 \cdot S)^2}{(P_T + 0,8 \cdot S)}$$

A continuación, se define un número adimensional de curva número (CN), que puede tomar valores que van desde 30 hasta 100. Este parámetro debe estimarse tomando en cuenta características del suelo de la cuenca en cuestión. La CN y la S se relacionan por:

$$CN = \frac{1.000}{10 + S}$$

Una vez que se obtiene el hidrograma unitario y la distribución de la precipitación, se procede a realizar la convolución de hidrogramas y con ello, se determina el hidrograma de la tormenta.

Específicamente, para esta cuenca se adopta una Curva Número de 70, debido a que este valor logra representar las características del suelo, la cobertura vegetal y el uso de la tierra en la zona, por otra parte, entrega condiciones de seguridad para la operación de una obra de envergadura, como lo es un embalse.

Cabe mencionar, que en el estudio “Diseño Embalse Livilcar” (MN, 2010) se determinó la Curva Número experimental de un evento crítico en el Valle de Azapa, cuyo valor corresponde a 64, por lo que dada la cercanía y régimen de precipitaciones, entre la cuenca del embalse proyectado de Livilcar y el estudiado, Caritaya, respalda la estimación adoptada.

4.4.3 Cálculo de caudales de crecidas

Una vez determinados el hidrograma unitario y la precipitación efectiva, es posible realizar el cálculo del caudal de crecida en el embalse Caritaya.

Los caudales de crecidas obtenidos se reducen por el factor de reducción de línea de nieves 0,9 al considerar sólo el área pluvial, indicados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Caudal Máximo Instantáneo, Embalse Caritaya.

Período de Retorno	Caudal Máximo Instantáneo	Caudal Máximo Instantáneo*
[años]	[m3/s]	[m3/s]
10	80,9	72,8
20	167,2	150,5
50	323,4	291,0
100	453,1	407,8
500	791,4	712,3
1.000	958,0	862,2
10.000	1.640,2	1.476,2

Fuente: Elaboración propia.

* Se aplica factor de reducción, igual a 0,9, por área pluvial, según línea de nieve estimada en la zona en estudio.

Al comparar los resultados con los valores presentados en la recopilación de antecedentes (ver tabla siguiente), se puede apreciar lo superior de los valores estimados respecto a los obtenidos de estudios anteriores. Dicha diferencia, para el caso del estudio de reparación del Embalse Caritaya (SMI, 2008), se debe a que el hidrograma unitario utilizado, no es representativo de la zona altiplánica del norte grande y para el estudio reciente de Arrau (Arrau, 2013), se produce principalmente por la metodología empleada, puesto que utiliza transposición de los caudales desde la estación Camarones en Conanoxa.

Tabla 4.10: Comparación de resultados, Caudales Máximos Instantáneos, Embalse Caritaya.

Período de Retorno	Valores estimados	SMI, 2008	ARRAU, 2013
[años]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
10	72,8	120,0	14,0
20	150,5	166,0	26,0
50	291,0	237,0	52,0
100	407,8	289,0	82,0
500	712,3	414,0	-
1.000	862,2	471,0	-
10.000	1.476,2	662,0	-

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Estudio de Caudales Máximos Afluentes al Embalse Ajatama

Tal como se mencionó anteriormente, el Valle de Camarones, es producto de la confluencia de los ríos de Caritaya y Ajatama, siendo la única obra reguladora del recurso hídrico, la presa ubicada en la cuenca de Caritaya, por lo cual, se procedió primeramente a evaluar los caudales afluentes al embalse existente, sin embargo, a continuación, también se evaluará la cuenca Ajatama, considerando para ello, como punto de análisis, la ubicación de una obra proyectada, el embalse Ajatama. Dicho análisis será contextualizado, más adelante, en el capítulo Modelo de Operación, donde surge como alternativa del sistema de riego, incorporar una nueva obra de regulación.

Repitiendo la metodología aplicada para el estudio de Caudales Máximos afluentes al embalse Caritaya, tal como se aprecia en el punto 4.4, se presenta a continuación la estimación de los caudales afluentes al embalse Ajatama.

4.5.1 Determinación del Hidrograma Unitario Sintético embalse Ajatama

Los parámetros geomorfológicos que caracterizan a la cuenca en estudio fueron calculados a través de fotografías satelitales Aster y el programa WMS versión 8.3. En la Figura 4.1 se presenta la cuenca obtenida.

Dichos parámetros se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Parámetros Geomorfológicos, Embalse Ajatama.

Cota [m.s.n.m.]	3.537
A [km ²]	376,5
Lcp [km]	29,7
Lcg [km]	12,74
S%	22,9%
GM [km ²]	79,7

Fuente: Elaboración propia.

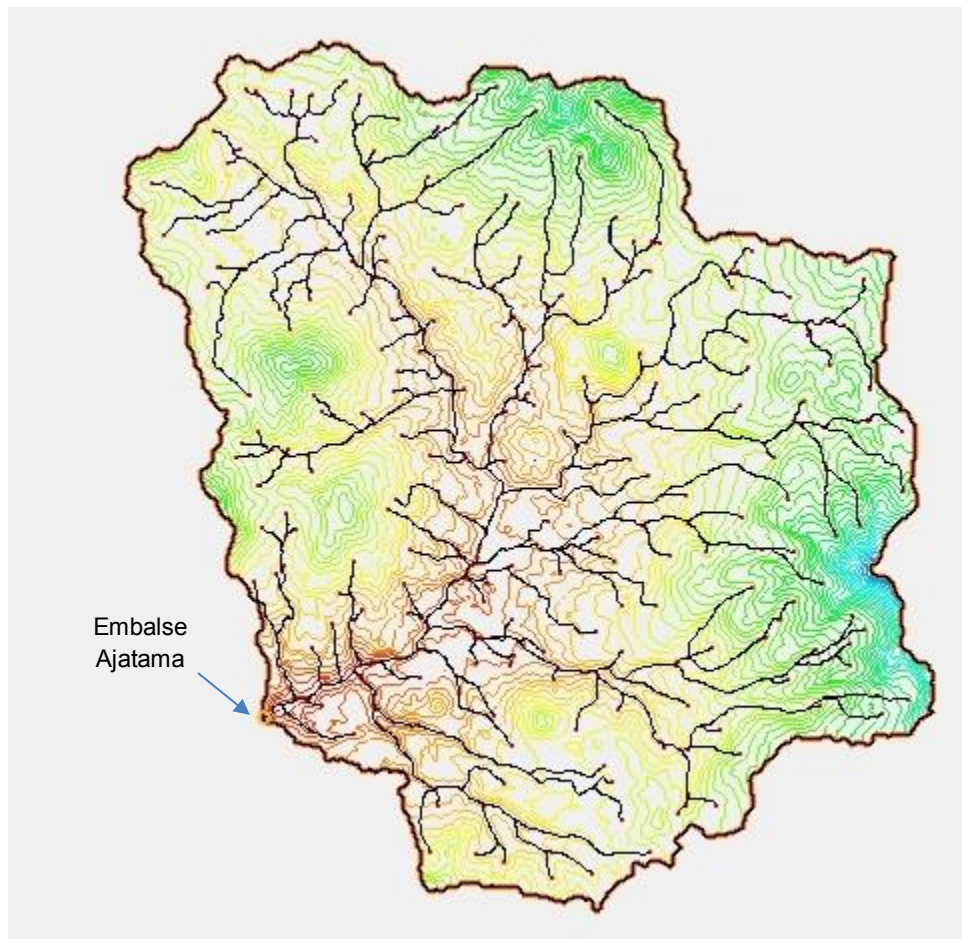
Los parámetros básicos del hidrograma unitario de la cuenca, se calculan con el Hidrograma Unitario Sintético de Lluta en Alcérreca (MN Ingenieros, 2010). Los parámetros se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Parámetros del Hidrograma Unitario, Embalse Ajatama.

Cota [m.s.n.m.]	3.537
tp [h]	1,57
tb [h]	4,2
qp [l/s/mm/km ²]	367,4
tu [h]	0,29

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1: Cuenca embalse Ajatama.



Fuente: Fotografías satelitales Aster y el programa WMS versión 8.3.

Una vez definido el t_u , se determinan por consiguiente los nuevos parámetros de la cuenca, como se muestra en la Tabla 4.13. En la Tabla 4.14 se presenta Hidrograma Unitario Embalse Ajatama.

Tabla 4.13: Parámetros del Hidrograma Unitario corregidos, Embalse Ajatama.

Cota [m.s.n.m.]	3.537
t_p [h]	1,62
t_b [h]	4,35
q_p [l/s/mm/km ²]	353,7
t_u [h]	0,50

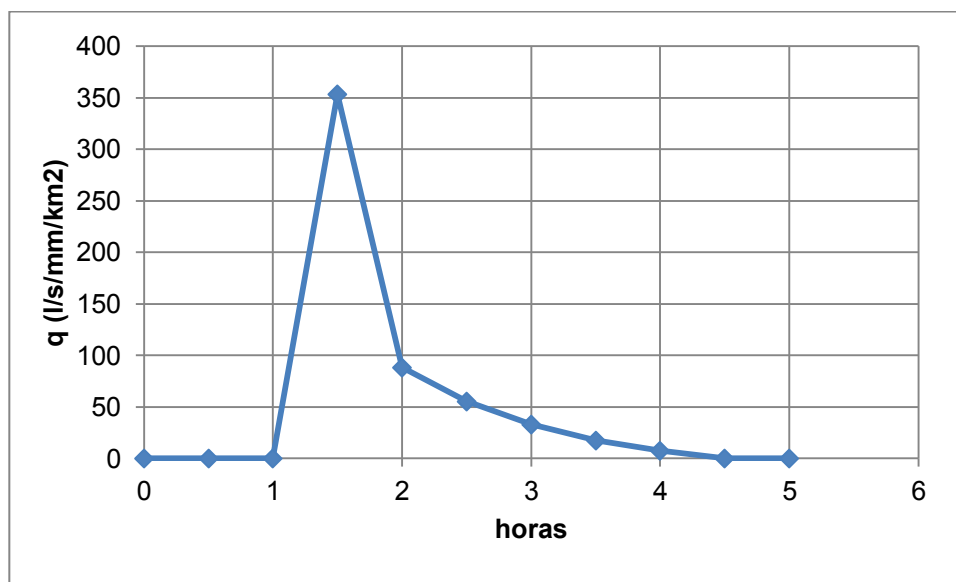
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14: Hidrograma Unitario Embalse Ajatama.

t [hr]	Q [l/s/mm/km ²]
0,0	0,0
0,5	0,0
1,0	0,3
1,5	353,7
2,0	88,1
2,5	55,6
3,0	33,3
3,5	17,8
4,0	7,5
4,5	0,1
5,0	0,0
5,5	0,0
6,0	0,0
6,5	0,0
7,0	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.6: Hidrograma Unitario, Embalse Ajatama.



Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Evaluación de precipitación efectiva

Se replica el análisis realizado para Caritaya, por lo cual, véase acápite 4.4.2. El factor de precipitación media para Ajatama embalse es de 1,1, considerando como base la estación pluviométrica Pumire, al igual que Caritaya. Dichos cálculos se presentan en Anexo N°5. Las precipitaciones máximas en 24 horas ($P_{m\acute{a}x\ 24}$) para la cuenca del embalse Ajatama son las siguientes:

Tabla 4.15: Precipitación Máxima en 24 horas, Embalse Ajatama proyectado.

T [años]	P _{máx 24 horas} [mm]	
	Pumire	Embalse Ajatama
10	38	41,8
20	45	49,5
50	55	60,5
100	62	68,2
500	78	85,8
1.000	85	93,5
10.000	108	118,8

Fuente: Elaboración propia.

4.5.3 Cálculo de caudales de crecidas

Una vez determinados el hidrograma unitario y la precipitación efectiva, es posible realizar el cálculo del caudal de crecida en el embalse Ajatama.

Los caudales de crecidas obtenidos se indican en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16: Caudal Máximo Instantáneo, Embalse Ajatama.

Período de Retorno	Caudal Máximo Instantáneo	Caudal Máximo Instantáneo*
[años]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
10	110,29	99,26
20	215,10	193,59
50	400,95	360,86
100	550,23	495,21
500	1.021,47	919,32
1.000	1.257,59	1.131,83
10.000	2.112,32	1.901,09

Fuente: Elaboración propia.

* Se aplica factor de reducción, igual a 0,9, por área pluvial, según línea de nieve estimada en la zona en estudio.

4.6 Análisis de Caudales Medios Mensuales

4.6.1 Introducción

En el presente ítem, se tiene como objetivo estimar los recursos hídricos a nivel de caudales medios mensuales en el río Camarones, para ello, es necesario determinar los caudales afluentes al Embalse Caritaya y los circulantes por el río Ajatama, debido a que las mediciones de la estación Camarones en Conanoxa, ubicada a 65 km aguas abajo a la confluencia del río Caritaya y el río Ajatama no resulta ser representativa por las entradas y salidas de caudal por riego, tal como se señaló anteriormente, sin embargo, la más reciente estación de medición instalada en la misma cuenca del Valle Camarones resulta ser la más conveniente para el análisis (Camarones en Chilpe). Si bien, esta última no se encuentra en régimen natural, se ubica cerca de Arepunta y registra las crecidas de los últimos años. En la Figura 3.9 se puede apreciar gráficamente la conformación de la cuenca con las estaciones de control relevantes y en la Tabla 4.17 se resumen las características principales. Cabe mencionar, que tanto Caritaya como Ajatama no cuentan con control fluviométrico. Por lo anterior, se desarrollará la siguiente metodología para su estimación.

Tabla 4.17: Características de puntos de interés.

Punto de Interés	Área aportante [km ²]	Coordenadas en UTM		Cota aproximada [m.s.n.m.]
		Norte	Este	
Embalse Caritaya	364,0	7.898.066	464.621	3.600
Río Ajatama antes de confluencia	447,8	7.905.370	456.128	2.900

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2 Estimación de Caudales Medios Mensuales

Para la estimación de caudales medios mensuales, aportantes al embalse Caritaya, quebrada Ajatama y cuencas intermedias, se ha utilizado un modelo hidrológico de precipitación–escorrentía, ampliamente conocido y utilizado en el país, correspondiente al modelo Brown y Ferrer presentado en 1973 en el 2º Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica. Si bien en la zona, en la parte alta de la cuenca, cae precipitación sólida, ésta perdura solo unos días, por lo que un modelo de este estilo no tendría problemas en simular la escorrentía mensual. En Anexo N°6, se presenta una explicación del modelo.

Particularmente, el río Camarones posee control fluviométrico en dos puntos, estación Camarones es Conanoxa y Camarones en Chilpe. De estas dos estaciones, la estación Camarones en Chilpe, parece la más adecuada para calibrar el modelo, ya que es una estación que se encuentra en la parte superior del valle, con pequeñas áreas de riego ubicadas sobre esta estación, en comparación con la estación de Camarones en Conanoxa que se encuentra en la parte baja del valle, muy intervenida por riego.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que uno de los afluentes principales se encuentra intervenido por el embalse Caritaya, el cual regula los recursos de este importante afluente.

Ante lo anterior, se procedió a modificar el programa, incorporándose la regulación del embalse Caritaya, además de las evaporaciones, rebalses y consumos.

Con respecto a esto último, se utilizaron como consumos u oferta del embalse, los informados por el operador del embalse, señor Solón Chávez, correspondiente a un caudal de 400 l/s en la época de verano y de 200 l/s en la época de invierno.

Cabe indicar que con motivo de la reparación efectuada en el embalse Caritaya y posterior llenado de éste, efectuada en el período 2007-2009, se ha utilizado para la calibración del modelo solo la estadística existente desde el año 2010 en adelante.

Además de la estadística de caudales, como información base del modelo hidrológico a utilizar, se necesita también una estadística de precipitaciones totales mensuales de alguna estación pluviométrica representativa de la zona bajo estudio como una estadística de evapotranspiraciones potenciales.

Como estación pluviométrica base de la zona bajo estudio, se utilizó la estación Chilcaya, dependiente de la Dirección General de Aguas, cuya estadística presentaba algunos vacíos, los cuales se precedió a rellenarlos en base a promedios dada la inexistencia de correlaciones con estaciones cercanas, hecho común en climas de carácter convectivo. El uso de Chilcaya en el estudio mensual, en vez de la estación Pumire, se debe a que se trata de una estación vigente, a diferencia de Pumire que si bien se usó para el estudio de crecidas, por la continuidad de registros, no está actualmente operativa, ya que fue suspendida en noviembre de 2006.

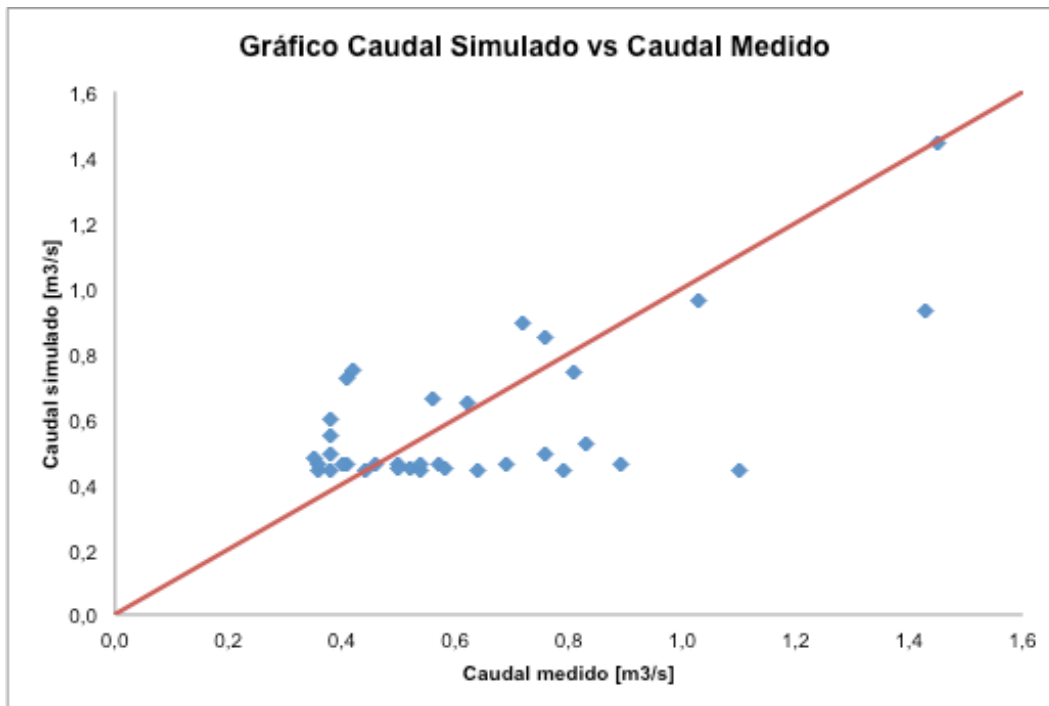
Con respecto a la estadística de evapotranspiraciones potenciales totales mensuales de la zona bajo estudio, éstas se extrajeron de la estadística del estudio de la Comisión Nacional de Riego “Visualizador Electrónico de la Evapotranspiración Potencial de Chile”, año 2000. Los datos empleados para la calibración del modelo se adjuntan en Anexo N°7.

El proceso de calibración consistió básicamente en variar los parámetros hasta determinar los parámetros óptimos que permitan disminuir una función objetivo, definida como la diferencia absoluta entre los caudales medidos y los caudales generados a partir del modelo.

Los resultados de la calibración para el modelo Brown y Ferrer se presentan en el Gráfico 4.7, resultando un coeficiente de correlación de $R=0,6$.

Cabe indicar, que se realizaron un sin número de modelaciones para reproducir los caudales medidos en la cuenca de Camarones, utilizando incluso programas para cuencas nivo pluviales, probándose además una serie de combinaciones de estaciones pluviométricas y evaporimétricas. Junto a ello, se intentó calibrar el modelo con las cuencas colindantes de Codpa (al norte) y Camiña (al sur), sin resultados satisfactorios. Lo presentado constituye el mejor resultado obtenido, lo cual es razonable para cuencas altiplánicas con precipitaciones de origen convectivo, ya que en éstas se presenta una variación importante en la precipitación durante las tormentas, lo que constituye una gran incertidumbre para la modelación.

Gráfico 4.7: Gráfico Caudal Simulado versus Caudal Medido.



Fuente: Elaboración propia.

La función de calibración corresponde a la siguiente expresión:

$$FOB = \sum \frac{|Q_{simulado} - Q_{medido}|}{\sqrt{Q_{medido}}}$$

donde: $Q_{simulado}$: Caudal mensual simulado

Q_{medido} : Caudal mensual medido

Los parámetros óptimos de calibración se presentan en la Tabla 4.18, la descripción de cada uno de ellos se detalla en Anexo N°6.

Tabla 4.18: Parámetros óptimos de calibración, modelo Brown – Ferrer.

Parámetro	Valor adoptado
A	1,08
B	1,01
HMAX	181,1
POR	46,0
CMAX	0,32
CN	1,0
CK	0,001
D	0,266
PLIM	41,25
CMN	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Del Gráfico 4.7 se puede observar que el modelo utilizado ajusta medianamente los caudales medidos. Sin embargo, la calibración se considera un éxito, dado lo intervenida de la cuenca, sobre todo en lo relativo a la presencia del embalse Caritaya y las ofertas entregadas por éste.

4.6.3 Generación de caudales en las cuencas de interés.

Una vez ya calibrado el modelo, y determinados los parámetros óptimos, se procedió a generar la serie de caudales medios mensuales en las cuencas de interés. Dicha estadística generada se presenta en Anexo N°8, y comprende el período de 1979/80 – 2013/14. Las cuencas de interés se pueden visualizar en la Figura 4.2.

Cabe indicar, que en las diferentes cuencas generadas, se varió el coeficiente de precipitación de cada cuenca de interés, utilizando la relación precipitación-altura, presentada más adelante. En la Tabla 4.19, se presenta las cuencas generadas, área, coeficiente de precipitación y caudal medio obtenido.

A modo de resumen, vale destacar que el presente estudio tiene como finalidad analizar la operación, a nivel mensual, de los recursos hídricos del Valle de Camarones, por lo anterior, la estimación de los caudales medios mensuales de los puntos de interés: el embalse Caritaya, cuenca lateral al río Caritaya y el río Ajatama, éstos dos últimos corresponden a las cuencas aportantes en el punto de confluencia de ambos ríos, sector conocido como Arepunta.

Tabla 4.19: Resumen de cuencas generadas.

Cuenca	Área [km ²]	Precipitación Media [mm]	Parámetro A	Caudal [l/s]
Embalse Caritaya	364	254,0	1,127	256
Bajo Caritaya	78	210,0	0,932	39
Ajatama alto*	377	263,7	1,171	282
Ajatama bajo*	71	191,6	0,850	30
Intermedia	145	206,9	0,918	71

Fuente: Elaboración propia.

* Ajatama se diferencia en alto y bajo, por el análisis posterior, en que se avalúa la incorporación de un embalse (Ver Figura 4.3).

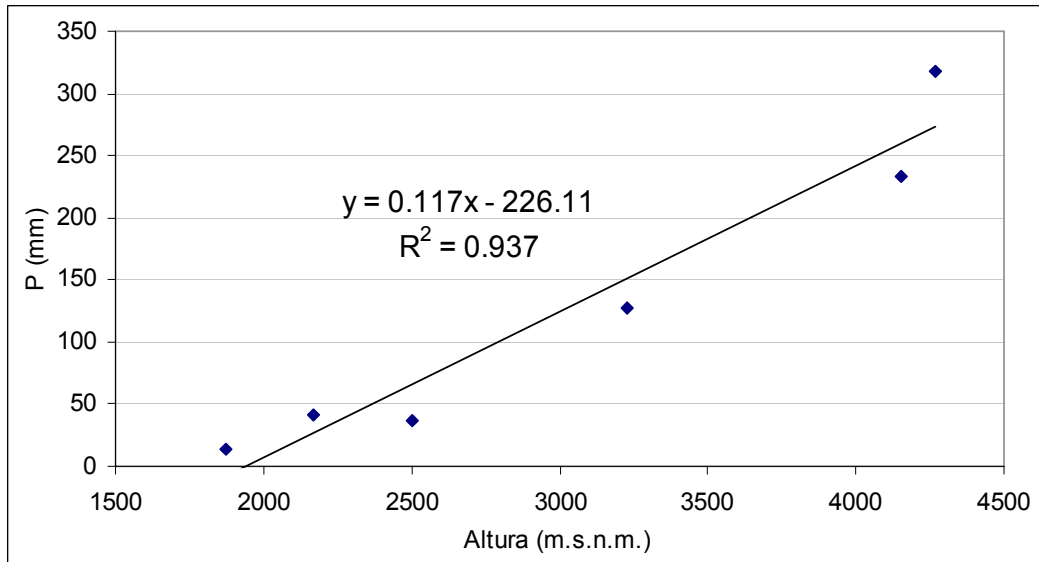
Para el cálculo de la Precipitación Media se emplea la curva hipsométrica de cada cuenca y la relación precipitación–altura. Esta última, obtenida en el estudio de “Diagnóstico y Diseño Definitivo, Reparación Embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región, Estudio Hidrológico, SMI Ltda.” (SMI, 2008), cuya curva se presenta en el Gráfico 4.8.

Tabla 4.20: Precipitación anual de estaciones de la zona en estudio.

Estación Pluviométrica	Altitud [m.s.n.m.]	P anual [mm]
Codpa	1.870	14,4
Esquiña	2.170	41,5
Camiña	2.500	36,6
Tignamar	3.230	127,7
Pumire	4.150	233,4
Chilcaya	4.270	318,0

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Gráfico 4.8: Relación Precipitación – Altura (P anual).



Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Los caudales medios mensuales promedios generados se presentan a continuación (Tabla 4.21):

Tabla 4.21: Promedios de Caudales Medios Mensuales Generados, en [l/s].

Cuenca	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	ANUAL
Embalse Caritaya	0,139	0,145	0,182	0,432	0,808	0,564	0,197	0,145	0,148	0,145	0,143	0,147	0,266
Bajo Caritaya	0,023	0,024	0,029	0,067	0,117	0,080	0,031	0,024	0,024	0,024	0,023	0,024	0,041
Ajatama alto*	0,152	0,159	0,199	0,462	0,891	0,635	0,217	0,158	0,162	0,158	0,157	0,161	0,292
Ajatama bajo*	0,018	0,019	0,023	0,051	0,087	0,058	0,024	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,031
Ajatama	0,170	0,177	0,223	0,513	0,978	0,693	0,241	0,177	0,181	0,177	0,175	0,180	0,324
Intermedia	0,041	0,043	0,054	0,121	0,211	0,143	0,056	0,043	0,044	0,043	0,042	0,044	0,074

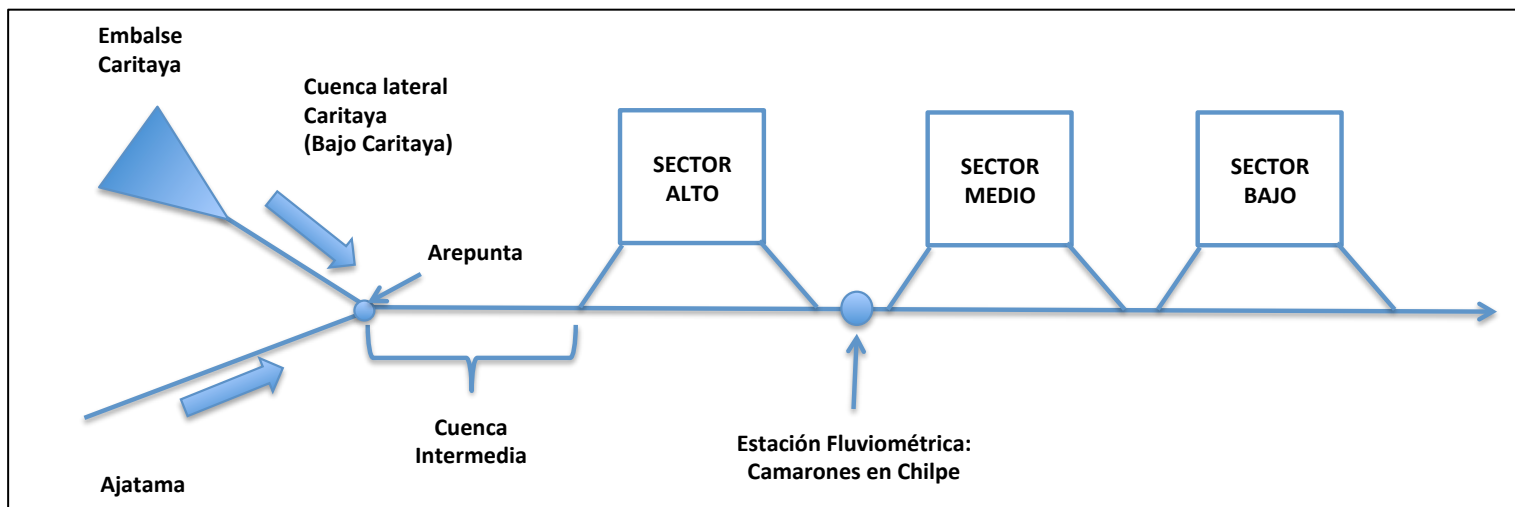
* la sumas de dichos valores corresponden a los caudales de la Quebrada de Ajatama en Arepunta, antes de confluencia.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos con los expuestos en la Tabla 3.18 provenientes de la recopilación de antecedentes de los “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones” (AC, 2002), se puede apreciar que tanto

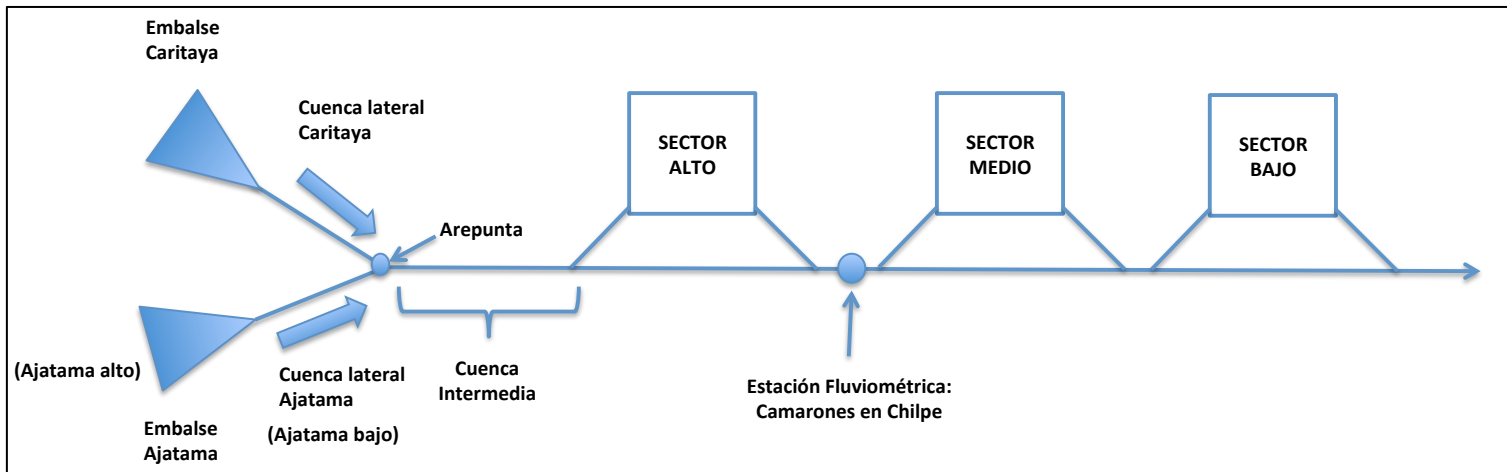
los caudales generados en la cuenca de Caritaya en Embalse y la Quebrada de Ajatama, a la altura de Arepunta, son más bajos en todos los meses y se desprende que los peaks ocurren en el mismo período enero – marzo. La inconsistencia de los resultados se debe a que los valores estimados por el estudio de AC Consultores son producto de una transposición simple desde la estación Camarones en Conanoxa, que no mide el flujo en régimen natural, y que si bien no corresponden al mismo período de análisis del presente estudio, éste último, se realiza en base a una modelación desarrollada para la particular condición de operación del valle Camarones, situación no evaluada anteriormente.

Figura 4.2: Cuencas de interés, Valle de Camarones, situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3: Cuencas de interés, Valle de Camarones, situación proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

4.6.4 Curva de Variación Estacional

A las series de caudales medios mensuales obtenidos por la aplicación del modelo pluvial se ha procedido a determinar la probabilidad de excedencia de 95%, 90%, 85%, 50%, 25%, 10% y 5% por medio de la fórmula de Weibull.

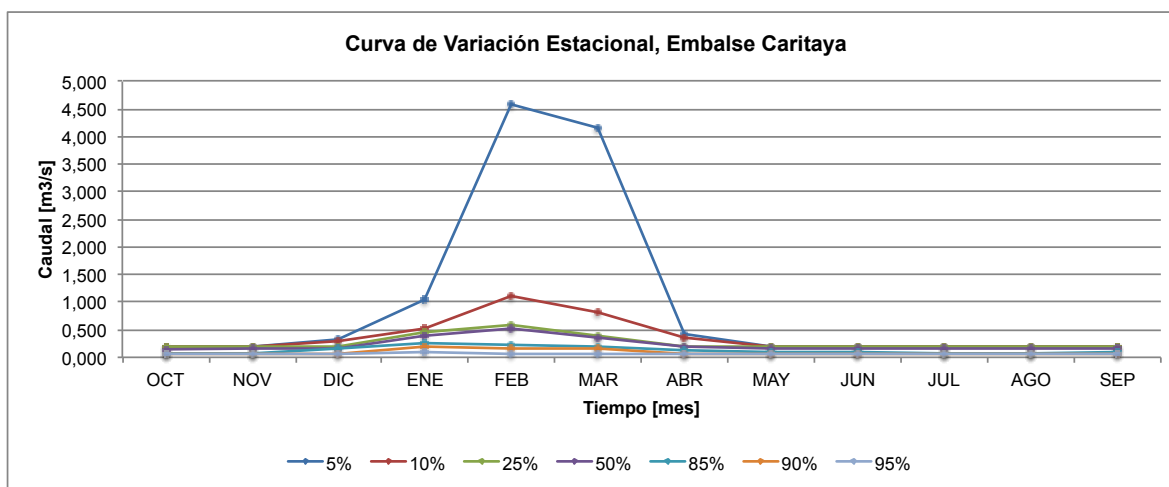
En las siguientes tablas se presentan los caudales medios mensuales para las probabilidades de excedencia señaladas y en el Gráfico 4.9 y el Gráfico 4.10, se presentan las curvas de variación estacional.

Tabla 4.22: Curva de Variación Estacional, Embalse Caritaya, en [m³/s].

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	0,187	0,194	0,317	1,054	4,575	4,174	0,419	0,192	0,197	0,203	0,189	0,195
10%	0,184	0,193	0,294	0,533	1,107	0,820	0,342	0,189	0,193	0,190	0,188	0,193
25%	0,180	0,188	0,199	0,450	0,602	0,393	0,206	0,184	0,189	0,184	0,183	0,188
50%	0,144	0,149	0,177	0,392	0,523	0,368	0,186	0,148	0,152	0,147	0,147	0,152
85%	0,072	0,078	0,148	0,262	0,215	0,190	0,125	0,083	0,091	0,078	0,078	0,083
90%	0,062	0,062	0,067	0,195	0,177	0,156	0,074	0,061	0,063	0,061	0,065	0,068
95%	0,056	0,052	0,061	0,100	0,074	0,071	0,063	0,057	0,059	0,057	0,058	0,059

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.9: Curva de Variación Estacional, Embalse Caritaya, en [m³/s].



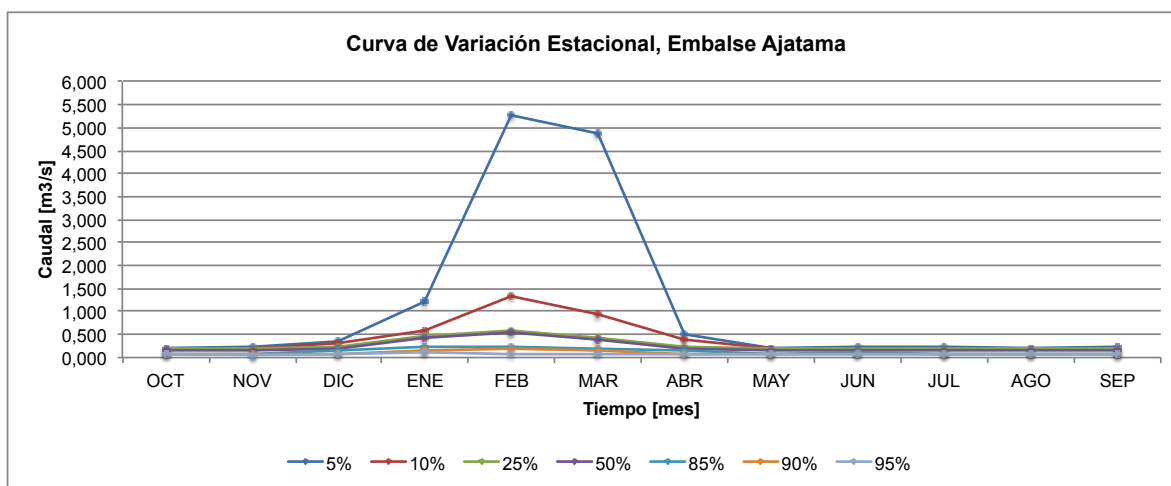
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.23: Curva de Variación Estacional, Embalse proyectado Ajatama, en [m³/s].

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
5%	0,206	0,213	0,348	1,217	5,285	4,860	0,493	0,210	0,217	0,224	0,207	0,214
10%	0,202	0,212	0,320	0,578	1,352	0,942	0,380	0,207	0,212	0,208	0,206	0,211
25%	0,198	0,206	0,218	0,460	0,595	0,429	0,226	0,201	0,207	0,202	0,200	0,206
50%	0,157	0,163	0,194	0,423	0,565	0,401	0,203	0,162	0,166	0,161	0,161	0,166
85%	0,078	0,085	0,162	0,243	0,236	0,208	0,138	0,090	0,099	0,084	0,084	0,090
90%	0,067	0,067	0,073	0,169	0,193	0,170	0,080	0,066	0,068	0,066	0,070	0,074
95%	0,060	0,055	0,065	0,107	0,081	0,076	0,068	0,062	0,064	0,062	0,063	0,064

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4.10: Curva de Variación Estacional, Embalse proyectado Ajatama, en [m³/s].



Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos con los recopilados en los antecedentes (Anexo N°3), se puede concluir que la Curva de Variación de Caritaya en Caritaya los valores calculados son mucho menores, en particular en el tramo peak, comprendido entre diciembre y marzo, a los expuestos en “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones” (AC, 2002), situación que se repite para la Quebrada Ajatama antes de confluencia, que si bien no es el mismo punto de análisis, respecto a la ubicación del embalse Ajatama proyectado, corresponde a la misma cuenca, y a poca distancia.

4.6.5 Caudal Ecológico

En el presente acápite se procede a determinar el caudal ecológico de la Quebrada Ajatama, en específico en el punto de ubicación del embalse proyectado.

En este análisis no se considera al embalse Caritaya, dada su data, debido a que al tratarse de una obra de regulación construida antes de la década de los 90's, queda fuera de la aplicación de la norma.

El reglamento utilizado para la determinación del caudal ecológico mínimo se extrae del Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos (DGA, 2008), el cual establece que el caudal mínimo ecológico se determina según escenarios, en el caso de estudio, corresponde a "cauces sin derechos constituidos o sin caudal ecológico mínimo definido", señalando que el procedimiento corresponde al mismo que para el escenario con derechos constituidos con caudal ecológico mínimo del menor del 50% del Q95%, detallado a continuación.

Se consideran los caudales asociados a 50% del caudal con probabilidad de excedencia del 95% (50% del Q95%PE), para cada mes, con las restricciones siguientes:

- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es menor al caudal determinado para el 20% del caudal medio anual (20% del Qma), entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 50% del Q95%PE.
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 20% del caudal medio anual (20% del Qma), entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 20% del Qma.

En la siguiente tabla se presentan los caudales ecológicos según la metodología planteada anteriormente.

Tabla 4.24: Caudal Ecológico, Embalse Ajatama en [m3/s].

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
50% PE95%	0,030	0,028	0,032	0,054	0,040	0,038	0,034	0,031	0,032	0,031	0,032	0,032
20% Anual	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
Q. Ecológico	0,030	0,028	0,032	0,054	0,040	0,038	0,034	0,031	0,032	0,031	0,032	0,032

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Análisis Sedimentológico

En el presente acápite se estima la tasa de sedimentos afluente al embalse Caritaya basado en la transposición de curva de gasto desde la cuenca de la quebrada Tarapacá, integrándose finalmente con la curva de duración de caudales medios diarios.

Adicionalmente, se obtiene una estimación en base a la aplicación de una expresión empírica propuesta en el manual de Diseño de pequeñas presas, obtenidas para 28 cuencas semiáridas en los EEUU (U.S. Department of the Interior, 1987).

Cabe destacar, que el transporte de sedimento es un tema complejo de mucha incertidumbre, que en esta zona en particular se ve acrecentado por la escasa información y las características de las crecidas, que resultan ser esporádicas, intensas y de corta duración.

4.7.1 Transposición de registros

La cuenca del embalse Caritaya no cuenta con registro de caudales medios diarios, por lo cual se recurre a información de cuencas vecinas que operan bajo régimen similar, al concentrar las crecidas en los meses estivales y caracterizarse por una breve duración.

La curva de duración de caudales medios diarios, se obtuvo por transposición en base a rendimientos, desde la curva obtenida en el Estudio Diseño Embalse Camiña en Alpajeres (MN, 2012), donde se generó un modelo de caudales diarios, contando con datos de 35 años, para el período 01/01/1962 hasta 31/12/1996.

La relación utilizada se presenta a continuación:

$$Q_{PE} = Q_{EB} \left(\frac{A_{PE} \cdot P_{PE}}{A_{EB} \cdot P_{EB}} \right)$$

Donde:

Q_{pe} : Caudal en el punto de estudio.

Q_{eb} : Caudal en estación base (Embalse Alpajeres).

A_{pe} : Área aportante al punto de estudio (364,0 km².)

A_{eb} : Área aportante estación base (300,6 km².)

P_{pe} : Precipitación media en la cuenca del punto de estudio. (254,0 mm/año)

P_{eb} : Precipitación media en la cuenca de la estación base. (287,0 mm/año)

La precipitación media de cada cuenca se obtuvo en base a una relación precipitación – altura y a las curvas hipsométricas de las cuencas.

La curva de duración a emplear en los cálculos de aquí en adelante resulta ser (Tabla 4.25):

Tabla 4.25: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios.

Probabilidad (%)	Q Alpajeres [m³/s]	Q Caritaya [m³/s]	Probabilidad (%)	Q Alpajeres [m³/s]	Q Caritaya [m³/s]
0,00%	35,60	38,15	3,00%	0,65	0,70
0,01%	32,90	35,26	4,00%	0,54	0,58
0,01%	25,00	26,79	5,00%	0,47	0,50
0,02%	20,13	21,57	6,00%	0,41	0,44
0,05%	11,62	12,45	8,00%	0,33	0,35
0,10%	5,42	5,81	10,00%	0,30	0,32
0,15%	2,93	3,14	15,00%	0,24	0,26
0,20%	2,18	2,34	20,00%	0,22	0,24
0,30%	1,59	1,70	30,00%	0,21	0,23
0,40%	1,39	1,49	40,00%	0,20	0,21
0,50%	1,25	1,34	50,00%	0,18	0,19
0,60%	1,19	1,28	60,00%	0,17	0,18
0,80%	1,09	1,17	80,00%	0,15	0,16
1,00%	1,03	1,10	90,00%	0,12	0,13
1,50%	0,89	0,95	95,00%	0,09	0,10

Fuente: Elaboración propia.

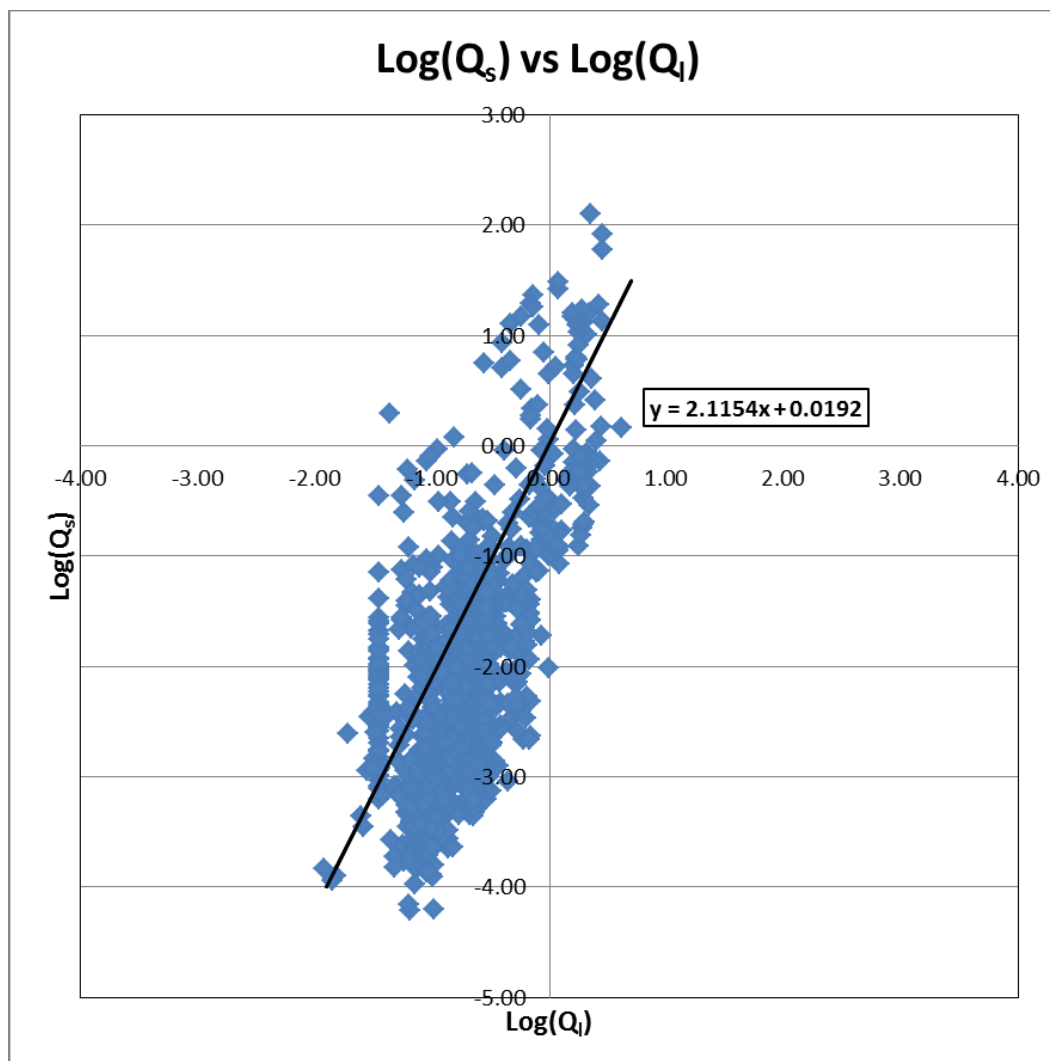
4.7.1.1 Curva de Descarga de Gasto Sólido en suspensión

En vista a que no se dispone de mediciones de concentración en estaciones ubicadas en el cauce del río Caritaya, se opta por utilizar los registros de la cuenca cercana, correspondiente a la quebrada Tarapacá.

Las curvas de descarga (Gasto sólido en suspensión v/s Caudal medio diario) se obtiene de la memoria de título (en preparación) “Estimación del gasto sólido en suspensión en cuencas chilenas”, Iris Jiménez, UTFSM.

Las curvas de Gasto Sólido en suspensión se presentan en el Gráfico 4.11.

Gráfico 4.11: Curva de Descarga de gasto sólido en suspensión, Tarapacá en Laonsana.



Fuente: Estimación del gasto sólido en suspensión en cuencas chilenas. Memoria de Título, U.T.F.S.M., I.Jiménez, 2015.

Ecuación de la Curva de Descarga:

Quebrada Tarapacá en Laonsana $Q_s = 10^{0,0192} \cdot Q_L^{2,1154}$ (Ecuación 4.1)

Donde:

Q_s : Gasto sólido en suspensión, en kg/día.

Q_L : Caudal medio diario, en m³/s.

4.7.1.2 Transposición de la curva de descarga

El sedimento en suspensión anual se estima a partir de la Curva de Descarga mencionada en el punto anterior, y usando el método de caudal específico tanto líquido como sólido. Se procede a transponer las curvas de descarga de Tarapacá en Laonsana.

$$q_S = \frac{Q_S}{A_{LAO}} = 10^{0,0192} \cdot A_{LAO}^{1,1154} \cdot \left(\frac{Q_L}{A_{LAO}}\right)^{2,1154}$$

$$q_S = 10^{0,0192} \cdot A_{LAO}^{1,1154} \cdot (q_L)^{2,1154}$$

Reemplazando $q_S = Q_S/A_{CAR}$ y $q_L = Q_L/A_{CAR}$

$$Q_S = 10^{0,0192} \cdot \left(\frac{A_{LAO}}{A_{CAR}}\right)^{1,1154} \cdot (Q_L)^{2,1154}$$

Ecuación 4.2

Donde:

Q_S : Gasto sólido en suspensión, en kg/s.

Q_L : Caudal medio diario, en m³/s.

q_S : Gasto sólido en suspensión, en kg/s/km².

q_L : Caudal medio diario, en m³/s/km².

A_{CAR} : Área de drenaje Embalse Caritaya 364 km².

A_{LAO} : Área de drenaje Quebrada Tarapacá en Laonsana 1.338 km².

4.7.1.3 Determinación de aporte anual de Gasto Sólido en suspensión

Se determina el Gasto Sólido en suspensión usando la Curva de Duración del Embalse Caritaya y la Curva de Descarga de material sólido de la estación Quebrada Tarapacá en Laonsana. La estimación del gasto sólido anual para el embalse Caritaya se indica en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26: Gasto Sólido en suspensión, Embalse Caritaya.

prob exc	QL [m ³ /s]	QSS [kg/s]	QSS promedio [kg/s]	QSS promedio [Ton/día]	intervalo %	QSS ponder [Ton/día]
0,003%	38,15	9.893,7	9.893,7	854.811,6	0,003%	25,6
0,005%	35,26	8.373,3	9.133,5	789.131,4	0,002%	15,8
0,010%	26,79	4.684,1	6.528,7	564.076,6	0,005%	28,2
0,02%	21,57	2.961,9	3.823,0	330.305,1	0,010%	33,0
0,05%	12,45	926,3	1.944,1	167.970,7	0,030%	50,4
0,10%	5,81	184,6	555,4	47.989,3	0,050%	24,0
0,15%	3,14	50,2	117,4	10.143,0	0,050%	5,1
0,20%	2,34	26,9	38,6	3.331,4	0,050%	1,7
0,30%	1,70	13,8	20,3	1.756,7	0,100%	1,8
0,40%	1,49	10,4	12,1	1.043,7	0,100%	1,0
0,50%	1,34	8,3	9,3	806,2	0,100%	0,8
0,60%	1,28	7,5	7,9	680,7	0,100%	0,7
0,80%	1,17	6,2	6,8	590,6	0,200%	1,2
1,0%	1,10	5,5	5,9	505,7	0,200%	1,0
1,5%	0,95	4,0	4,8	412,2	0,500%	2,1
2,0%	0,86	3,2	3,6	313,8	0,500%	1,6
3,0%	0,70	2,1	2,7	229,1	1,000%	2,3
4,0%	0,58	1,4	1,7	150,4	1,000%	1,5
5,0%	0,50	1,0	1,2	105,9	1,000%	1,1
6,0%	0,44	0,8	0,9	79,1	1,000%	0,8
8,0%	0,35	0,5	0,6	55,3	2,000%	1,1
10,0%	0,32	0,4	0,5	38,9	2,000%	0,8
15,0%	0,26	0,3	0,3	28,4	5,000%	1,4
20,0%	0,24	0,2	0,2	20,0	5,000%	1,0
30,0%	0,23	0,2	0,2	17,3	10,000%	1,7
40,0%	0,21	0,2	0,2	15,6	10,000%	1,6
50,0%	0,19	0,1	0,2	13,4	10,000%	1,3
60,0%	0,18	0,1	0,1	11,2	10,000%	1,1
80,0%	0,16	0,1	0,1	9,3	20,000%	1,9
90,0%	0,13	0,1	0,1	6,6	10,000%	0,7
95,0%	0,10	0,0	0,0	3,9	5,000%	0,2
100%	0,02	0,0	0,0	1,4	5,000%	0,1

T/día	212,37
T/año	77.515

4.7.1.4 Determinación de aporte anual de Gasto Sólido de fondo

Se estima el arrastre de fondo como un porcentaje del arrastre en suspensión, específicamente del orden de un 20%, por lo que su valor es 15.503 Ton/año.

4.7.1.5 Determinación del Volumen de sedimento medio anual afluyente al embalse

El volumen de sedimento en suspensión queda determinado por la siguiente relación:

$$V_{SS} = \frac{Q_{SS}}{Pe_{SS}}$$

Donde:

V_{SS} : Volumen de sólido en suspensión (por unidad de tiempo).

Q_{SS} : Gasto sólido en suspensión.

Pe_{SS} : Peso específico del material en suspensión igual a 1,3 Ton/m³.

El volumen de sedimento de fondo queda determinado por la siguiente relación:

$$V_{SF} = \frac{Q_{SF}}{Pe_{SF}}$$

Donde:

V_{SF} : Volumen de sólido de fondo (por unidad de tiempo).

Q_{SF} : Gasto sólido de fondo, en Ton/día o Ton/año.

Pe_{SF} : Peso específico del material de fondo igual a 2,2 Ton/m³.

Los volúmenes estimados para el río Caritaya en Embalse son:

Tabla 4.27: Volumen de Sedimento en Suspensión y Fondo, en m³/día, Embalse Caritaya.

Volumen de Sedimento [m ³ /año]		
Suspensión	Fondo	Total
59.627	7.047	66.674

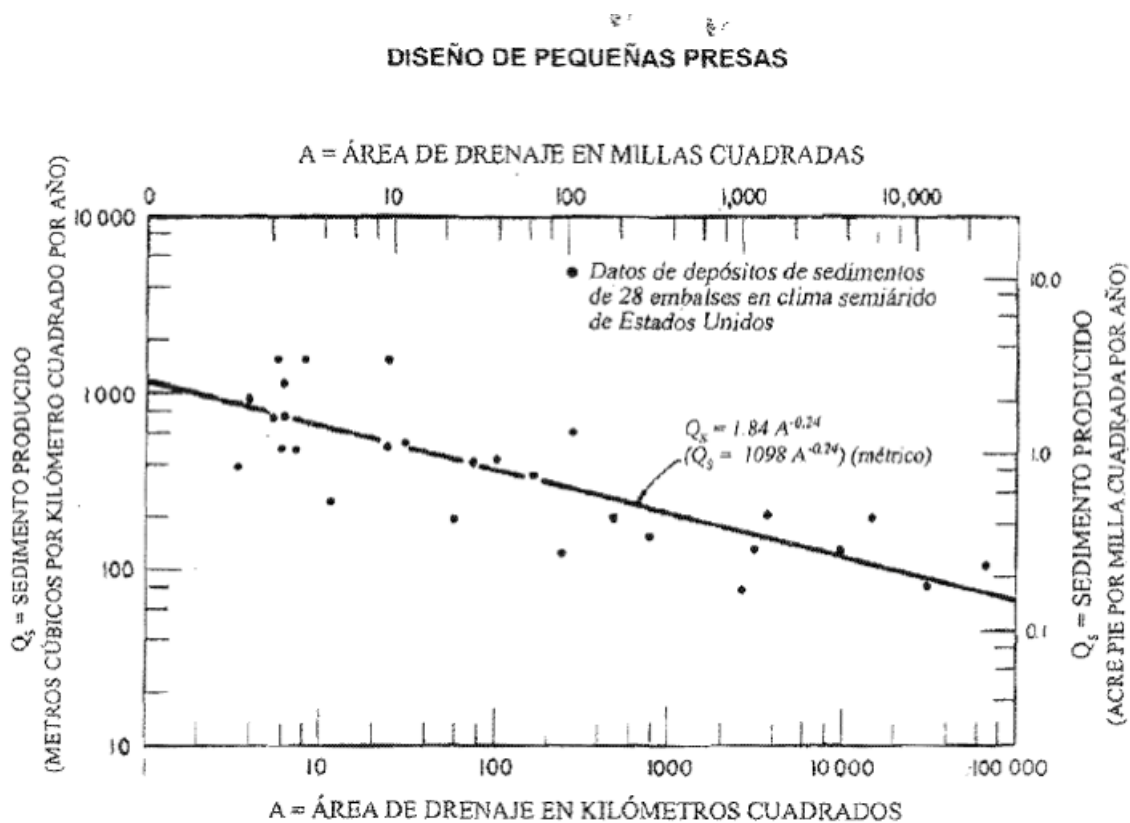
Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos, se tiene que el volumen de sedimentos aportante al embalse Caritaya es del orden de **67.000 m³/año**.

4.7.2 Estimación a partir de la fórmula empírica

Esta estimación adicional se basa en la aplicación de una expresión empírica propuesta en el manual de pequeñas presas, obtenidas para 28 cuencas semiáridas en los EEUU.

Gráfico 4.12: Curva de Descarga, Diseño pequeñas presas.



Fuente: Design of Small Dams, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Third Edition, 1987. (Traducción, año 2007)

Utilizando la ecuación de la Curva de Descarga:

$$Q_s = 1098 \cdot A^{-0.24}$$

Ecuación 4.3

Donde:

Q_s : Gasto sólido [$m^3/año/km^2$]

A : Área Drenaje cuenca [km^2].

Considerando, un área de drenaje de $364 km^2$, según la expresión anterior, se obtiene un rendimiento de $267 m^3/km^2/año$, lo que resulta un aporte anual del orden de **$97.000 m^3/año$** .

4.7.3 Comparación y recomendaciones

En Tabla 4.28 se presenta los volúmenes medios anuales de sedimento aportante al embalse.

Tabla 4.28: Volumen sedimento afluente embalse Caritaya.

Metodología	Volumen medio anual [$m^3/año$]	Volumen 50 años [m^3]	Volumen 75 años [m^3]
Transpuesto datos medidos	67.000	3.350.000	5.025.000
Expresión empírica	97.000	4.850.000	7.275.000

Fuente: Elaboración propia.

Considerando, que se tienen antecedentes del estudio de Luis San Martín (SMI, 2008), que la actual capacidad del embalse Caritaya es de $38.000.000 m^3$, lo que implica una cantidad de sedimento acumulado del orden de $4.000.000 m^3$ en 75 años, por lo que se recomienda utilizar una tasa de $67.000 m^3/año$, lo que entregaría un volumen muerto a 75 años de $5.000.000 m^3$, como resultado de una evaluación desde inicios de su operatividad. Cabe indicar, que para alcanzar la cota de radier de la tubería de descarga, se estima que faltarían alrededor de $500.000 m^3$ de sedimento.

4.7.4 Análisis Quebrada Ajatama

En el presente acápite se estima la tasa de sedimentos afluente al embalse proyectado Ajatama, que al igual a la estimación empleada en el Embalse Caritaya, se basa en la transposición de curvas de gasto sólido desde la cuenca de la quebrada Tarapacá, integrándose finalmente con la curva de duración de caudales medios diarios y a la estimación adicional con la aplicación de una expresión empírica propuesta en el manual de Diseño de pequeñas presas, obtenidas para 28 cuencas semiáridas en los EEUU (U.S. Department of the Interior, 1987).

4.7.4.1 Transposición de registros

Al igual que la cuenca de Caritaya, la cuenca del embalse proyectado Ajatama, no cuenta con registro de caudales medios diarios, por lo cual se recurre a información de cuencas vecinas que operan bajo régimen similar, repitiendo el procedimiento utilizado en el acápite 4.7.1.

La curva de duración de caudales medios diarios, se obtuvo por transposición en base a rendimientos, desde la curva obtenida del Estudio Diseño Embalse Camiña en Alpajeres (MN, 2012).

La relación utilizada se presenta a continuación:

$$Q_{PE} = Q_{EB} \left(\frac{A_{PE} \cdot P_{PE}}{A_{EB} \cdot P_{EB}} \right)$$

Donde:

Q_{pe} : Caudal en el punto de estudio.

Q_{eb} : Caudal en estación base (Embalse Alpajeres).

A_{pe} : Área aportante al punto de estudio (376,5 km².)

A_{eb} : Área aportante estación base (300,6 km².)

P_{pe} : Precipitación media en la cuenca del punto de estudio.(263,7 mm/año)

P_{eb} : Precipitación media en la cuenca de la estación base. (287,0 mm/año)

La precipitación media de cada cuenca se obtuvo en base a una relación precipitación – altura y a las curvas hipsométrica de las cuencas.

La curva de duración a emplear en los cálculos de aquí en adelante resulta ser:

Tabla 4.29: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios, Ajatama.

Probabilidad (%)	Q Alpajeres [m ³ /s]	Q Ajatama [m ³ /s]	Probabilidad (%)	Q Alpajeres [m ³ /s]	Q Ajatama [m ³ /s]
0,00%	35,60	40,97	3,00%	0,65	0,75
0,01%	32,90	37,86	4,00%	0,54	0,62
0,01%	25,00	28,77	5,00%	0,47	0,54
0,02%	20,13	23,17	6,00%	0,41	0,47
0,05%	11,62	13,37	8,00%	0,33	0,38
0,10%	5,42	6,24	10,00%	0,30	0,35
0,15%	2,93	3,37	15,00%	0,24	0,28
0,20%	2,18	2,51	20,00%	0,22	0,25
0,30%	1,59	1,83	30,00%	0,21	0,24
0,40%	1,39	1,60	40,00%	0,20	0,23
0,50%	1,25	1,44	50,00%	0,18	0,21
0,60%	1,19	1,37	60,00%	0,17	0,20
0,80%	1,09	1,25	80,00%	0,15	0,17
1,00%	1,03	1,19	90,00%	0,12	0,14
1,50%	0,89	1,02	95,00%	0,09	0,10
2,00%	0,80	0,92	100%	0,02	0,02

Fuente: Elaboración propia.

En vista a que no se dispone de mediciones de concentración en estaciones ubicadas en el cauce del río Ajatama, se opta por utilizar los registros de la cuenca cercana de la Quebrada Tarapacá, para obtener la curva de descarga de Gasto Sólido en suspensión (Ver 4.7.1.1).

Luego, se procede a transponer la curva de descarga de Tarapacá en Laonsana, y usando el método de caudal específico tanto líquido como sólido, para estimar el sedimento en suspensión anual.

$$Q_S = 10^{0.0192} \cdot \left(\frac{A_{LAO}}{A_{AJA}} \right)^{1.1154} \cdot (Q_L)^{2.1154}$$

Donde:

Q_S : Gasto sólido en suspensión, en kg/s.

Q_L : Caudal medio diario, en m³/s.

q_S : Gasto sólido en suspensión, en kg/s/km².

q_L : Caudal medio diario, en m³/s/km².

A_{CAR} : Área de drenaje Embalse proyectado Ajatama 376,5 km².

A_{LAO} : Área de drenaje Quebrada Tarapacá en Laonsana 1.338 km².

Finalmente, se determina el Gasto Sólido en suspensión usando la Curva de Duración del embalse proyectado Ajatama y la Curva de Descarga del material sólido en suspensión de la estación Quebrada Tarapacá en Laonsana. La estimación del gasto sólido anual promedio para el embalse Ajatama se indica en la Tabla 4.30.

Tabla 4.30: Gasto Sólido en suspensión, Embalse proyectado Ajatama.

prob exc	QL [m ³ /s]	QSS [kg/s]	QSS prom [kg/s]	QSS prom [Ton/día]	intervalo %	QSS ponder [Ton/día]
0,003%	40,97	11.077,8	11.077,8	957.123,3	0,003%	28,7
0,005%	37,86	9.375,5	10.226,6	883.581,9	0,002%	17,7
0,010%	28,77	5.244,7	7.310,1	631.590,5	0,005%	31,6
0,02%	23,17	3.316,4	4.280,5	369.839,1	0,010%	37,0
0,05%	13,37	1.037,2	2.176,8	188.075,0	0,030%	56,4
0,10%	6,24	206,6	621,9	53.733,1	0,050%	26,9
0,15%	3,37	56,3	131,4	11.357,0	0,050%	5,7
0,20%	2,51	30,1	43,2	3.730,1	0,050%	1,9
0,30%	1,83	15,4	22,8	1.966,9	0,100%	2,0
0,40%	1,60	11,6	13,5	1.168,7	0,100%	1,2
0,50%	1,44	9,3	10,4	902,7	0,100%	0,9
0,60%	1,37	8,4	8,8	762,1	0,100%	0,8
0,80%	1,25	6,9	7,7	661,3	0,200%	1,3
1,0%	1,19	6,2	6,6	566,2	0,200%	1,1
1,5%	1,02	4,5	5,3	461,6	0,500%	2,3
2,0%	0,92	3,6	4,1	351,4	0,500%	1,8
3,0%	0,75	2,3	3,0	256,5	1,000%	2,6
4,0%	0,62	1,6	1,9	168,4	1,000%	1,7
5,0%	0,54	1,2	1,4	118,5	1,000%	1,2
6,0%	0,47	0,9	1,0	88,5	1,000%	0,9
8,0%	0,38	0,6	0,7	61,9	2,000%	1,2
10,0%	0,35	0,5	0,5	43,5	2,000%	0,9
15,0%	0,28	0,3	0,4	31,8	5,000%	1,6
20,0%	0,25	0,2	0,3	22,4	5,000%	1,1
30,0%	0,24	0,2	0,2	19,4	10,000%	1,9
40,0%	0,23	0,2	0,2	17,5	10,000%	1,8
50,0%	0,21	0,2	0,2	15,0	10,000%	1,5
60,0%	0,20	0,1	0,1	12,5	10,000%	1,3
80,0%	0,17	0,1	0,1	10,4	20,000%	2,1
90,0%	0,14	0,1	0,1	7,3	10,000%	0,7
95,0%	0,10	0,0	0,1	4,4	5,000%	0,2
100%	0,02	0,0	0,0	1,6	5,000%	0,1

T/día	237,79
T/año	86.793

Fuente: Elaboración propia.

Se obtiene para el gasto sólido en suspensión anual 86.793 Ton/año y se estima el arrastre de fondo como un porcentaje del arrastre en suspensión, del orden de un 20%, por lo que su valor es 17.359 Ton/año.

La estimación del volumen se determina por medio de las relaciones señaladas en el punto 4.7.1.5 y los resultados para el río Ajatama en embalse son:

Tabla 4.31: Volumen de Sedimento en Suspensión y Fondo, en m³/día, Embalse proyectado Ajatama.

Volumen de Sedimento [m ³ /año]		
Suspensión	Fondo	Total
66.764	7.890	74.654

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos, se tiene que el volumen de sedimentos aportante al embalse Ajatama es del orden de **75.000 m³/año**.

4.7.4.2 Estimación a partir de la fórmula empírica

Empleando la Ecuación 4.3 y considerando, un área de drenaje de 376,5 km², se obtiene un rendimiento de 264,5 m³/km²/año, lo que resulta un aporte anual del orden de **99.500 m³/año**.

4.7.4.3 Comparación y recomendaciones

En Tabla 4.32 se presenta los volúmenes medios anuales de sedimento aportante al embalse.

Tabla 4.32: Volumen sedimento afluente embalse Ajatama.

Metodología	Volumen medio anual [m ³ /año]	Volumen 50 años [m ³]
Transpuesto datos medidos	75.000	3.750.000
Expresión empírica	99.500	4.975.000

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al estudio del embalse Caritaya, los antecedentes demuestran que la estimación realizada a través de la transposición de la curva de descarga, entrega resultados más consistentes con la realidad, se adopta en definitiva un volumen muerto para el embalse Ajatama de 4.000.000 m³.

5 MODELO DE OPERACIÓN

El objetivo del modelo de operación, es el de diagnosticar la situación de riego actual en la cuenca del río Camarones, mediante la formulación y parametrización de un modelo matemático de simulación del balance hidrológico de la cuenca, que permita disponer de una herramienta de respuesta y sensibilidad del sistema a cambios en la distribución, manejo y regulación de recursos.

Por este motivo, se desarrolló un modelo paramétrico, para la simulación del balance hidrológico en distintos sectores de riego y leyes de operaciones de embalses proyectados y/o existentes.

En este capítulo se procederá a detallar la sectorización del modelo y los datos necesarios para su operación, así como los datos referentes principalmente a las áreas de riego, evapotranspiraciones potenciales y uso consumos de los diferentes tipos de cultivos, existentes como proyectados.

5.1 Zonificación del modelo

Los recursos hidráulicos que intervienen en el balance hidrológico de las zonas de riego del río Camarones, provienen fundamentalmente de la cuenca altiplánica de régimen nivo-pluvial. El río Camarones es formado por dos afluentes de importancia, correspondiente a los ríos Caritaya y Ajatama. Cabe indicar, que los recursos hídricos aportantes por estos tributarios, fueron estudiados y evaluados en los capítulos precedentes. Ver Figura 5.1.

Con el fin de establecer la sectorización de las diferentes zonas de riego en el valle del río Camarones, se realizó un análisis crítico a los antecedentes disponibles, en lo relativo a ubicación de bocatomas, terrazas de riego, zonificación administrativa. Una vez reunidos y estudiados todos estos antecedentes, se subdividió el área bajo estudio en 3 zonas de riego, con el propósito de representar más fielmente la realidad de cada una de éstas. Cabe señalar, que estas zonas de riego coincidieron con la división administrativa del río.

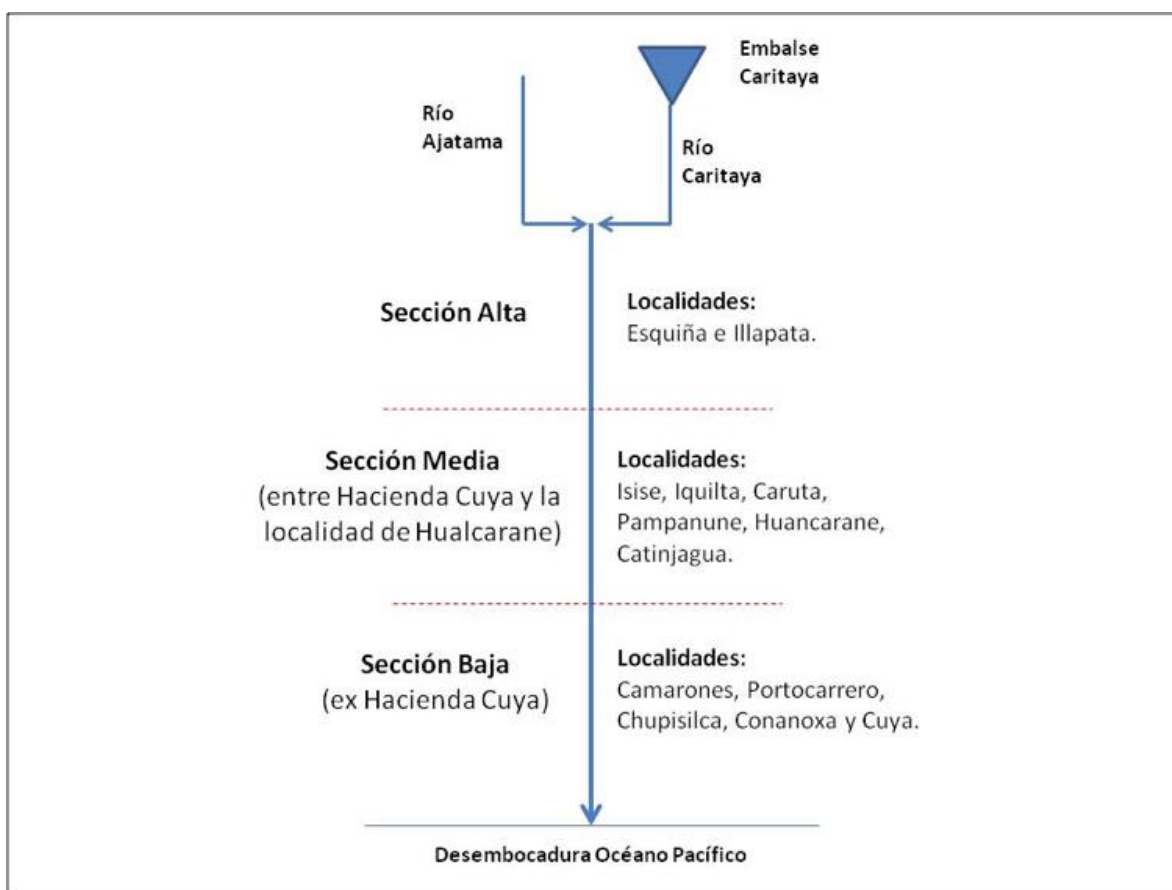
ZR1 = Corresponde a los terrenos ubicados aguas abajo de la junta de los tributarios Caritaya y Ajatama. Su área es regada por 10 canales de riego. El principal canal de este sector corresponde al canal Umaxo Illapata, el cual tiene del orden del 50% de las acciones de agua de este sector.

ZR2 = Corresponde a los zona de riego media del valle de Camarones, y abarca los poblados de Cochiza, Iquilta, Pampa Nune y Guancarani. Su área es regada por 15 canales de riego. Los principales canales de riego de este sector, corresponden a los canales Caruta 2, Huancarane 2, 3 y 5 y Catinjagua 1, los cuales representan más del 50% de las acciones de agua de este sector.

ZR3 = Corresponde a los terrenos ubicados en la parte baja del sector de riego, y abarca los poblados de Taltapí, Umayaní, Hacienda Camarones, Conanoxa y Chuquichambre. Su área es regada por 9 canales de riego. Los principales canales de riego de este sector, corresponden a los canales Taltape, Humallame, O'Higgins y Maquita, los cuales representan más del 60% de las acciones de agua de este sector.

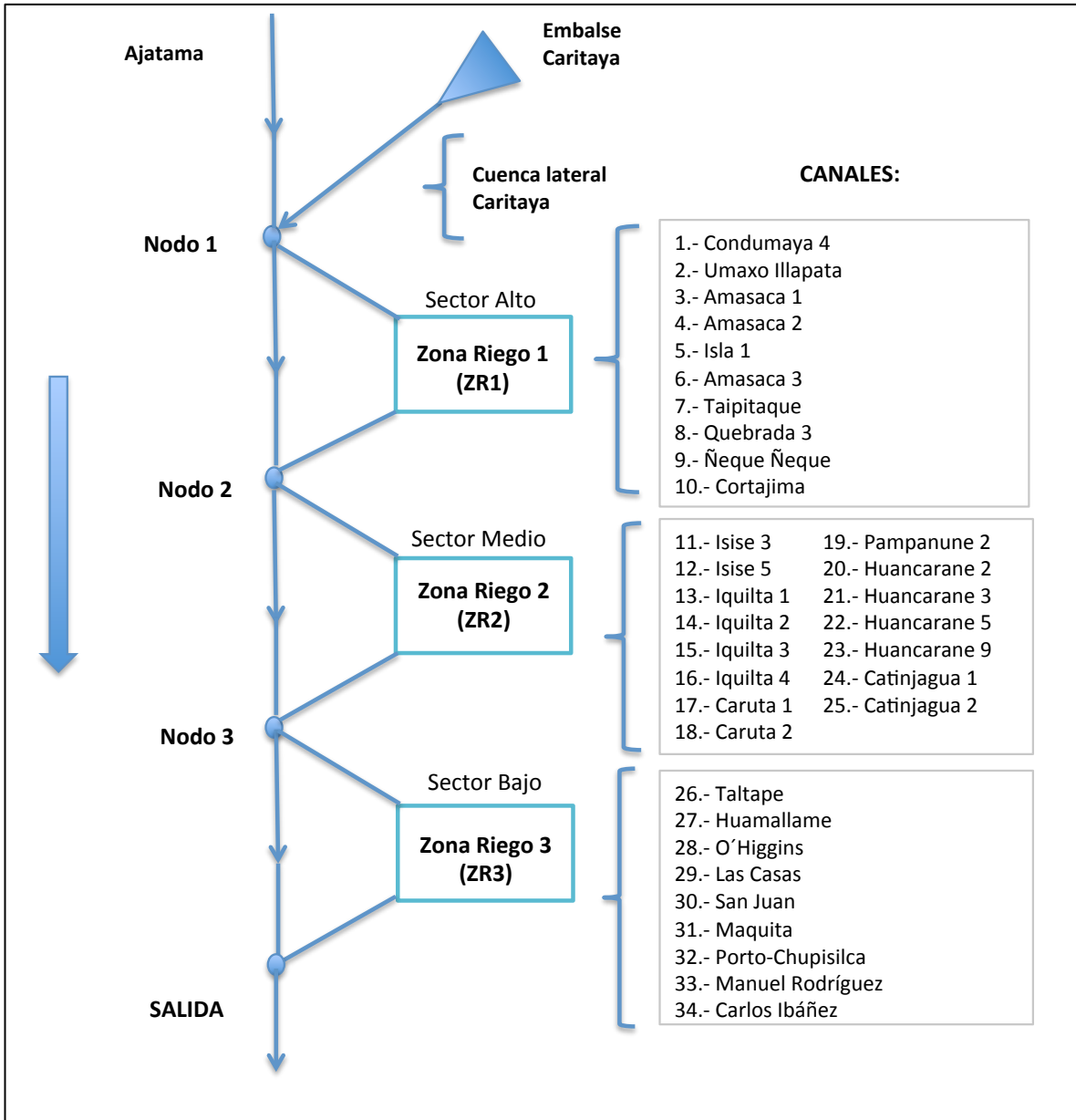
En la Figura 5.2 se presenta la sectorización utilizada por el modelo de simulación, donde se bosquejan las diferentes zonas de riego definidas anteriormente y sus interrelaciones con el cauce natural de abastecimiento, a través de entradas (canales) y salidas (drenaje natural de los derrames y sobrantes de riego).

Figura 5.1: Esquema del Sistema Quebrada Camarones.



Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

Figura 5.2: Diagrama de Sistema, Valle de Camarones.



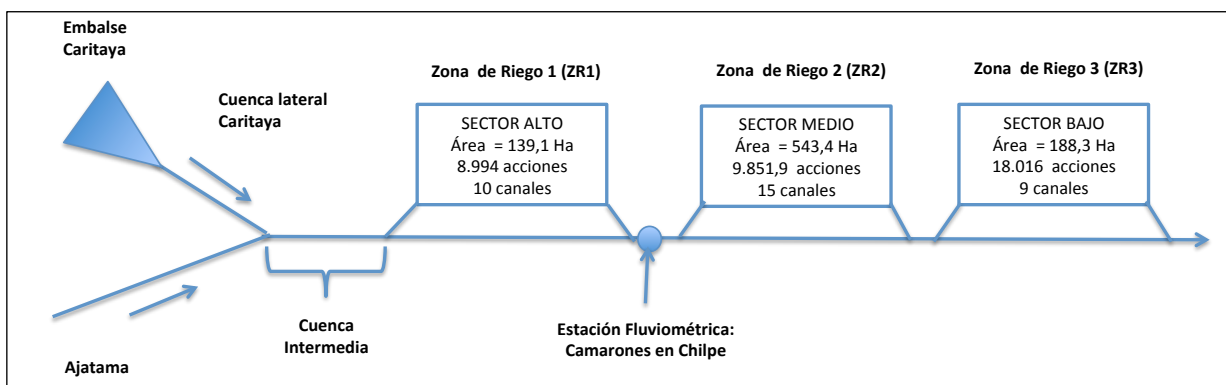
Fuente: Elaboración propia.

5.2 Derechos de agua

Se estima de gran importancia la recopilación de los derechos de agua de cada canal o grupo de canales de riego, ya que de esto depende la cantidad de agua que se capta de su cauce alimentador.

En la Figura 5.3 y en Tabla 5.1 se pueden ver las zonas de riego con sus respectivos derechos de agua, obtenidos de acuerdo a la información recopilada.

Figura 5.3: Esquema Resumen, Situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

Las zonas de riego corresponden a secciones dispuestas de oriente a poniente, en forma descendente a lo largo de todo el valle y extraen el agua desde la fuente alimentadora que es el río Camarones, la cual no cuenta con aportes laterales, sino que opera desde los recursos aportados por Caritaya y Ajatama. La extracción del recurso actualmente, es libre, vale decir, cada sector toma el agua que requiera, sin embargo, una vez regulado el sistema por medio de la comunidad de aguas, la extracción debe hacerse según derecho, retirando desde el río, la fracción proporcional de derechos otorgados de acuerdo a la totalidad constituida aguas abajo de la bocatoma respectiva.

Tabla 5.1: Derechos de agua, Valle Camarones.

	Nº	Nombre de Organización	Acciones
Z O N A 1	1	Condumaya 4	786
	2	Umaxo Illapata	4.026
	3	Amasaca 1	420
	4	Amasaca 2	936
	5	Isla 1	252
	6	Amasaca 3	438
	7	Taipitaque	636
	8	Quebrada 3	414
	9	Ñeque ñeque	726
	10	Cortajima 2	360
	TOTAL ZR1		8.994
Z O N A 2	11	Isise 3	228
	12	Isise 5	276
	13	Iquilta 1	96
	14	Iquilta 2	420
	15	Iquilta 3	258
	16	Iquilta 4	324
	17	Caruta 1	552
	18	Caruta 2	1.104
	19	Pampanune 2	611,91
	20	Huancarane 2	1.008
	21	Huancarane 3	1.224
	22	Huancarane 5	1.080
	23	Huancarane 9	510
	24	Catinjagua 1	1.230
	25	Catinjagua 2	930
	TOTAL ZR2		9.851,91
Z O N A 3	26	Taltape	3.120
	27	Humallame	3.312
	28	O'Higgins	3.528
	29	Las Casas	408
	30	San Juan	2.064
	31	Maquita	3.072
	32	Porto -Chupisilca	1.080
	33	Manuel Rodríguez	635
34	Calos Ibañez	797	
	TOTAL ZR3		18.016

Fuente: Elaboración propia, ref. AC, 2002 – SMI, 2008 – Arrau, 2013.

5.3 Consumo de agua y áreas de cultivo

La cuenca del río Camarones se caracteriza por no poseer una calidad de agua óptima para el cultivo de variados frutos, por lo que la agricultura de la zona se ve restringida a ciertos tipos de cultivos, dado a que se constata una alta concentración de boro y arsénico, entre otras sustancias, según el estudio “Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya”, desarrollado por la Universidad de Tarapacá para la Dirección General de Aguas (UTA, 2010).

Para la identificación de cultivos plantados en la zona se recurre al levantamiento de información realizado por Arrau en el estudio llamado “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013).

En la Tabla 5.2 se presentan los cultivos y sus áreas asociadas, para la situación actual.

Tabla 5.2: Áreas de cultivos asociados a los diferentes sectores de riego, Situación Actual.

Cultivo	ZR1 Ha	ZR2 Ha	ZR3 Ha
Cebolla	1,81	30,7	-
Maíz Choclo	18,64	2,09	-
Zanahoria	1,81	4,18	-
Huerta	4,87	-	-
Trigo	-	-	28,24
Alfalfa	112,01	487,33	112,95
Barbecho	-	19,11	47,06
Total Riego	139,1	543,4	188,3

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

Posteriormente, en función de los coeficientes de cultivo, eficiencias de riego y evapotranspiraciones potenciales obtenidas desde el estudio de Arrau (Arrau, 2013), incluidas en Anexo N°9, se obtuvieron las dotaciones de riego para cada sector en la situación actual, presentadas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Dotaciones (m3/Ha/mes) y eficiencias de riego, Situación Actual.

Zona	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total	eficiencia
alta	3.213	2.687	2.548	2.849	3.191	3.638	3.961	4.133	4.181	4.162	4.039	3.541	42.144	0,32
media	1.941	1.620	1.728	2.143	2.705	3.384	3.839	4.392	4.092	3.525	3.341	2.516	35.226	0,31
baja	1.663	1.477	1.532	1.917	2.454	3.075	3.483	3.959	3.701	3.007	2.853	2.155	31.276	0,33

Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes de Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013

5.4 Canales de riego

Para el análisis de operatividad, como se mencionó anteriormente, sólo serán considerados aquellos canales que cuenten con derechos (ver Tabla 5.1). El criterio adoptado, se debe a que la recopilación de antecedentes muestra una variabilidad de canales, muchos fuera de uso, en mal estado o sin derechos, por lo que una manera de representar el sistema, bajo cumplimiento normativo, es simular el escenario con todos los canales de regadío haciendo uso de los derechos otorgados.

Las características de canales por zona se presentan en las siguientes tablas. La información empleada se basa en el “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013), el cual considera la infraestructura de riego actual con posibles mejoras, por medio de obras civiles, destacando la incorporación de mayor metraje de canales revestidos. Adicionalmente, dichos antecedentes fueron complementados con los “Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones” (AC, 2002), el cual realiza también, un catastro a las tomas de agua a lo largo del valle Camarones.

Tabla 5.4: Características de canales, Zona Alta (ZR1).

Nº	Nombre de Organización	Gasto [l/s]	Largo total [m]	L. con revest. [m]	L. sin revest. [m]
1	Conдумaya 4	30	920	800	120
2	Umaxo Illapata	100	4.000	400	3.600
3	Amasaca 1	30	550	550	0
4	Amasaca 2	50	1.720	1.200	520
5	Isla 1	30	700	700	0
6	Amasaca 3	30	680	0	680
7	Taipitaque	50	1.250	1.250	0
8	Quebrada 3	40	530	0	530
9	Ñeque ñeque	50	1.280	1.280	0
10	Cortajima 2	40	950	950	0

Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – Arrau, 2013.

Tabla 5.5: Características de canales, Zona Media (ZR2).

Nº	Nombre de Organización	Gasto [l/s]	Largo total [m]	L. con revest. [m]	L. sin revest. [m]
11	Isise 3	30	460	0	460
12	Isise 5	30	500	0	500
13	Iquilta 1	40	730	730	0
14	Iquilta 2	30	0	0	0
15	Iquilta 3	30	820	820	0
16	Iquilta 4	40	1.630	1.630	0
17	Caruta 1	30	1.200	1.200	0
18	Caruta 2	30	1.400	1.400	0
19	Pampanune 2	30	2.650	2.650	0
20	Huancarane 2	40	1.230	1.230	0
21	Huancarane 3	40	0	0	0
22	Huancarane 5	40	0	0	0
23	Huancarane 9	20	1.840	1.840	0
24	Catinjagua 1	20	2.200	2.200	0
25	Catinjagua 2	15	1.370	1.370	0

Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – Arrau, 2013.

Tabla 5.6: Características de canales, Zona Baja (ZR3).

Nº	Nombre de Organización	Gasto [l/s]	Largo total [m]	L. con revest. [m]	L. sin revest. [m]
26	Taltape	50	4.000	4.000	0
27	Humallame	50	3.700	3.700	0
28	O'Higgins	50	3.340	3.340	0
29	Las Casas	10	1.358	1.358	0
30	San Juan	50	2.300	2.300	0
31	Maquita	50	4.520	4.520	0
32	Porto Chupisilca	50	3.150	3.150	0
33	Manuel Rodríguez	105	1.000	1.000	0
34	Calos Ibañez	105	3.000	250	2.750

Fuente: Elaboración propia, Ref. AC, 2002 – Arrau, 2013.

5.5 Explicación del Modelo

El modelo de operación realizado para este valle, consiste en 2 embalses uno actual y otro proyectado, 4 nodos, elementos topológicos desde donde se extraen los recursos de aguas para las respectivas zonas de riego y también donde llegan los derrames de riego de la zonas de cultivo ubicadas inmediatamente aguas arriba. Otro elemento del modelo corresponde a la zona de riego. Ésta corresponde al elemento donde se ubican las zonas de cultivo, y son las que demandan recursos tanto al embalse como al río. Particularmente, para el valle de Camarones se han considerado tres zonas de riego, zona alta ZR1, zona media ZR2 y zona baja ZR3.

Otro elemento que compone el modelo, corresponde a los canales de riego. Estos se han modelado como un canal equivalente que abastece cada zona de riego, con la capacidad correspondiente a la suma total de capacidades de cada uno de los canales que riegan la zona de riego respectiva. El largo considerado de este canal equivalente, corresponde a un largo equivalente ponderado (ver punto 5.5.1.2).

Dadas las características hidrogeológicas del valle de Camarones, donde existe una muy somera formación de sedimentos no consolidados, con una muy baja potencia y extensión de estos rellenos y a la inexistencia de acuíferos reconocidos, según la bibliografía consultada (Mapa Hidrogeológico de Chile), no se ha considerado en el modelo de operación la presencia de embalses subterráneos. Si bien, existen infiltraciones en los canales de riego, estas se manifiestan junto con los sobrantes y derrames de riego, como recursos superficiales o subsuperficiales que vuelven a incorporarse al río, para ser aprovechados por las zonas de riego ubicadas aguas abajo.

5.5.1 Balance de aguas de regadío

5.5.1.1 Extracción de caudales en bocatoma

Debido a la falta de información referente a caudales extraídos en bocatoma se ha debido adoptar un criterio de operación de canales. Se han adoptado 2 criterios de extracción desde el río.

Extracción Según derechos

Este criterio corresponde a que los canales captarán en bocatoma el mínimo entre el caudal que le corresponde según derechos de aguas y su capacidad máxima, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$QBOC = \text{MIN}(Qdisp, Capmax)$$

donde $QBOC$ = Caudal captado en bocatoma.
 $Qdisp$ = Caudal disponible según derecho.
 $Capmax$ = Capacidad máxima de canal.

donde el caudal disponible depende del caudal existente en el punto de captación, y de los derechos de agua según la siguiente expresión:

$$Q_{disp} = Q_{toma} * P_{order}$$

Porder: Porcentaje de Derechos, obtenido como la razón de las acciones del grupo de canales que riegan una determinada zona de riego y las acciones que quedan hacia aguas abajo, tal como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 5.7: Factores de extracción por zona de riego.

Zona	Porder
ZR1	0,24
ZR2	0,35
ZR3	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Extracción Libre

Este criterio corresponde a que los canales captarán en bocatoma el mínimo entre el caudal existente en el río y su capacidad máxima, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q_{BOC} = \text{MIN}(Q_{toma}, Cap_{max})$$

donde Q_{BOC} = Caudal captado en bocatoma.

Q_{toma} = Caudal disponible en el río.

Cap_{max} = Capacidad máxima de canal.

5.5.1.2 Infiltración en canales de riego

Para la evaluación de la infiltración en canales, se ha utilizado la fórmula de Moritz.

$$Q_{INFC} = 0,0375 * C_x (Q_{BOC} / V)^{0,5} * Z_c$$

donde: $QINFC$ = Caudal infiltrado en canal, en [m³/s].
 $QBOC$ = Es el caudal extraído en bocatoma, en [m³/s].
 V = velocidad del agua en el canal igual a 1 [m/s].
 Zc = es la longitud de canales, en [m].
 C = es un coeficiente paramétrico, igual a 0,35.

Nota: El coeficiente paramétrico C toma el valor de 0,35 para los canales sin revestir.

Se ha adoptado un canal equivalente para cada zona de riego, donde Z_e

$$Z_e = (\sum Q_{MAXi} * Z_{Ci}) / (\sum Q_{MAXi})$$

donde: Q_{MAXi} = Caudal máximo canal i .
 Z_{Ci} = Largo canal i .

Por otro lado, se adoptó un coeficiente C , equivalente de los canales de riego, dada por la siguiente expresión:

$$C_e = (\sum C_i * \sqrt{Q_{MAXi} * Z_{Ci}}) / (\sqrt{\sum Q_{MAXi}})$$

donde: Q_{MAXi} = Caudal máximo canal i .
 Z_{Ci} = Largo canal i .
 C_i = Coeficiente de Moritz, canal i .

En la tabla siguiente se presentan los largos y coeficientes de Moritz equivalentes.

Tabla 5.8: Coeficientes equivalentes de infiltración.

Coeficientes	ZR1	ZR2	ZR3
C ponderado	0,1516	0,0210	0,0365
Largo equivalente [m]	5.159	4.072	11.849

Fuente: Elaboración propia.

5.5.1.3 Caudal disponible en zona de riego

Es el caudal que llega a nivel de zona de riego, corresponde al caudal en bocatoma menos la infiltración en camino, y estaría dada por la siguiente expresión.

$$QZR = \text{MAX}(QBOC - QINFC, 0)$$

donde QZR = Caudal disponible en zona de riego.

$QBOC$ = Caudal captado en bocatoma.

$QINFC$ = Caudal infiltración canales.

5.5.1.4 Derrames de riego

El agua aplicada en exceso y que se presenta como derrame de riego, viene dada por la siguiente expresión:

$$DR = QZR(1 - \eta)$$

Donde: DR = Derrame de riego.

QZR = Caudal disponible en zona de riego.

η = Eficiencia ponderada para la zona de riego.

La eficiencia ponderada viene dada por la siguiente expresión:

$$n = (\sum DEMi * ni) / (\sum DEMi)$$

Donde: n = Eficiencia ponderada.

$DEMi$ = Demanda cultivo i.

ni = Eficiencia cultivo i.

5.5.1.5 Caudal de salida zona de riego

Finalmente, se obtiene el caudal de salida de la zona de riego, que se incorpora al nodo de aguas abajo.

$$QSALZR = (DR + QINFC)$$

Donde: $QSALZR$ = Caudal salida zona de riego.

DR = Derrame de riego.

$QINFC$ = Infiltración canales zona de riego.

5.5.2 Elementos de regulación

Dado que en el valle en estudio se presenta tanto un embalse existente como uno proyectado, que abastecerán a diferentes zonas de riego, se hace necesario realizar una operación simulada de dichos embalses mes a mes.

La operación simulada se hace en base a la ecuación de continuidad, que se expresa de la siguiente forma:

$$VOLF = VOLI + QNAT + PREC - EVAP - DEMAN - FILT$$

Donde:

$VOLF$ = Volumen final del embalse [m^3].

$VOLI$ = Volumen inicial del embalse [m^3].

$QNAT$ = Aportes de aguas de la cuenca de cabecera [m^3].

$PREC$ = Aportes de precipitación caída en el embalse [m^3].

$EVAP$ = Evaporación de agua desde el embalse [m^3].

$DEMAN$ = Demanda de las respectivas zonas de riego que sirve el embalse [m^3].

$FILT$ = Filtraciones del embalse [m^3].

Para el caso del embalse proyectado, se considera que el volumen almacenado disponible para el riego se ve disminuido, por dejar en curso el caudal ecológico. Hecho que no ocurre en Caritaya por tratarse de una obra en funcionamiento que no se rige por tal normativa, debido a su antigua data, y es cómo opera el sistema en la actualidad.

Asimismo, dependiendo del volumen final del embalse se pueden presentar las siguientes situaciones:

a) $VOLF < V_{max}$ se tiene

$$REB=0$$

$$VOLF=VOLF$$

b) $VOLF > V_{max}$ se tiene

$$REB=VOLF-V_{max}$$

$$VOLF=V_{max}$$

c) $VOLF < V_{min}$ se tiene

$$OFER=DEMAN-(V_{min}-VOLF)$$

$$VOLF=V_{min}$$

donde:

REB=Rebalse.

OFER=Oferta ofrecida por el embalse.

V_{max} =Volumen máximo embalse.

V_{min} =Volumen mínimo embalse.

En base a antecedentes topográficos del embalse, se dispone de las siguientes expresiones matemáticas de curva de capacidad y espejo de agua:

$$V = a \cdot H^b \quad (\text{Curva de capacidad})$$

$$A = c \cdot H^d \quad (\text{Curva de espejo de agua})$$

donde:

a, b= Constantes de curva de capacidad.

c, d= Constante de curva de espejo de agua.

H= Altura de aguas en el embalse.

La curva de capacidad del Embalse Caritaya es la siguiente:

$$V = 9,623 \cdot H^{161,3}$$

donde:

H : altura en [m].

V : volumen en [m³].

Para el caso del embalse proyectado de Ajatama, se tiene la curva presentada a continuación, con las mismas unidades de medida.

$$V = 4,431 \cdot H^{2,751}$$

De la información recopilada y los cálculos realizados se consideran los siguientes volúmenes como límites.

Tabla 5.9: Volúmenes límites de embalses.

Embalse	Volumen Mínimo [Miles de m ³]	Volumen Máximo [Miles de m ³]
Caritaya	500	38.000
Ajatama	4.000	45.000

Fuente: Elaboración propia.

Cabe indicar, que en el caso del uso de los 2 embalses, se utilizó un factor de entrega de demanda asociado a cada embalse, el cual se optimizó mediante un proceso iterativo.

Este factor resultó 0,45 para el embalse Caritaya y por lo tanto 0,55 para el embalse proyectado Ajatama, muy similar a la distribución de volúmenes máximos de regulación.

Cabe finalmente señalar, que no se ha considerado infiltración bajo los embalses existente como proyectado, dado que éstos consideran una pantalla de hormigón aguas arriba lo que evita filtraciones en el muro.

Con respecto al flujo subterráneo bajo la presa, esta se estima despreciable, dado la presencia casi superficial de la roca base de fundación.

Por otra parte, para determinar la seguridad de riego se considera que el criterio de falla del sistema es el siguiente:

- $OFER_{mes\ i} < 0,85 \cdot DEMAN_{mes\ i} \rightarrow Falla\ 1$
- $OFER_{mes\ i} < 0,9 \cdot DEMAN_{mes\ i}$ y
 $OFER_{mes\ i+1} < 0,9 \cdot DEMAN_{mes\ i+1} \rightarrow Falla\ 2$

Se considera como año fallido si dentro de los 12 meses ocurre *Falla 1* y/o *Falla 2*.

Utilizando la expresión:

$$S = \frac{N_{total\ años} - Naños\ fallados}{N_{total\ años}} \cdot 100\%$$

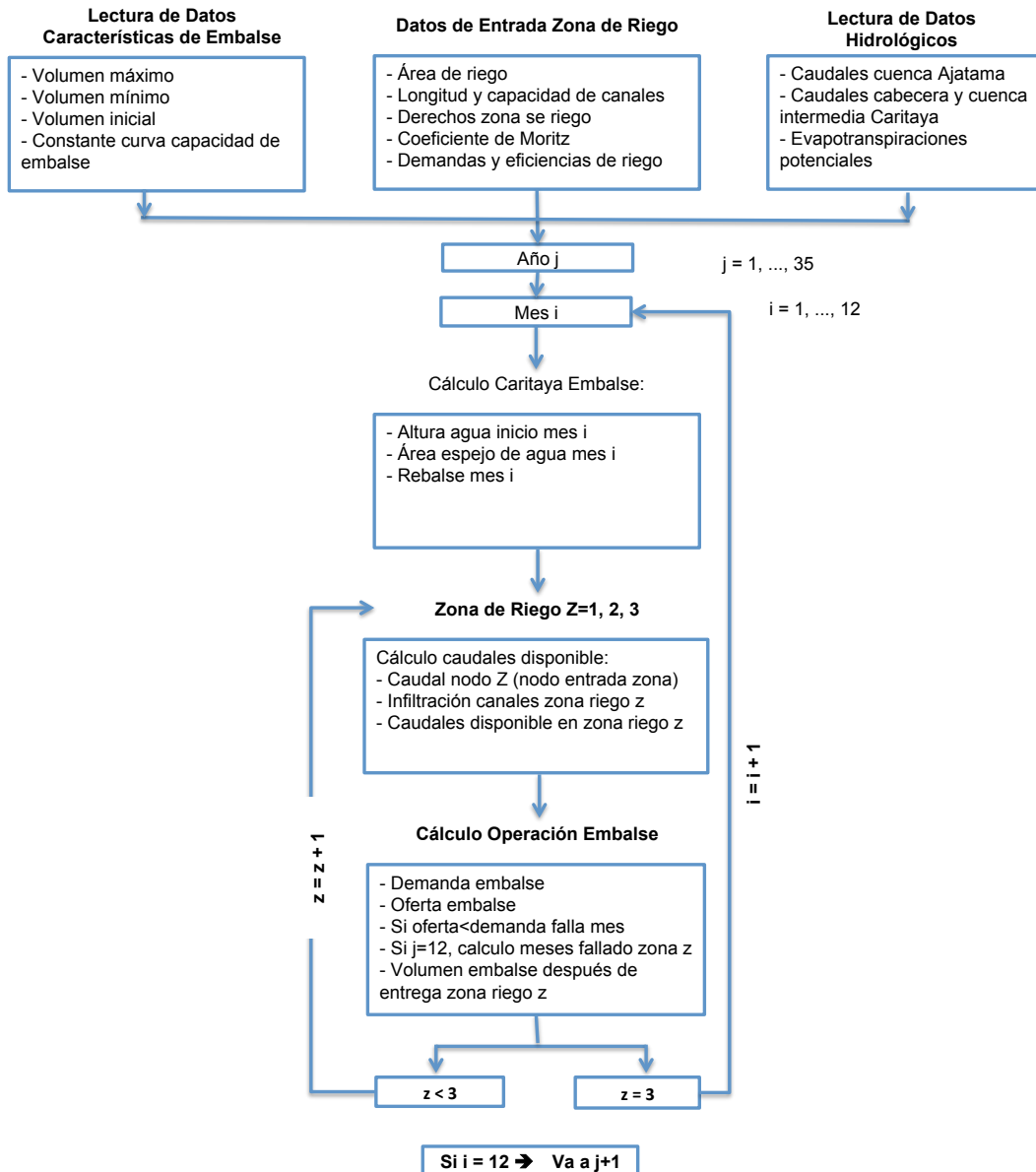
donde: *Ntotal años*: Número total de años de análisis (35).

Naños fallidos: Número de años fallados.

5.6 Diagrama de Flujo Operación

5.6.1 Situación actual: Embalse Caritaya

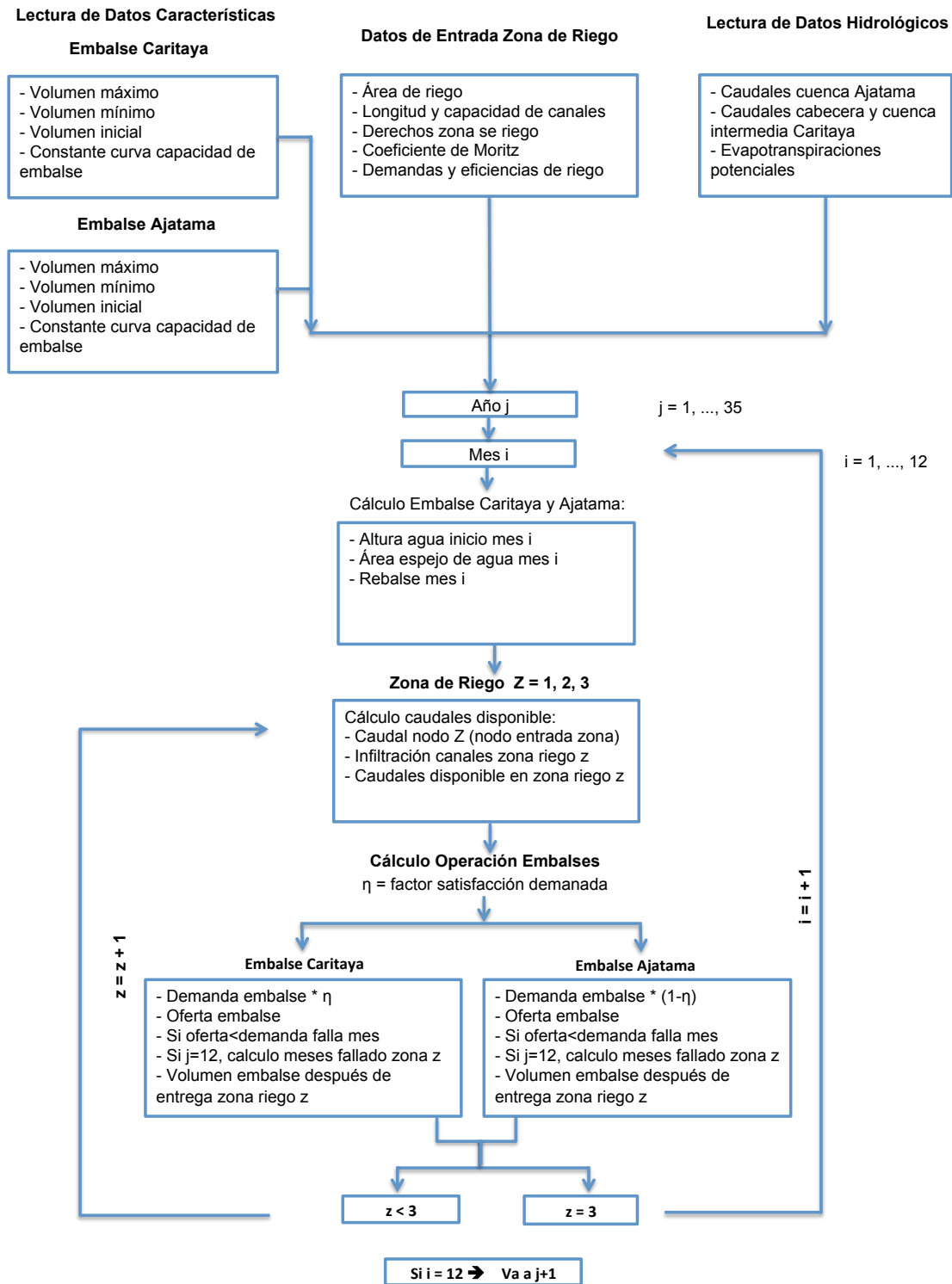
Figura 5.4: Diagrama de Flujo, Situación actual.



Fuente: Elaboración propia.

5.6.2 Situación proyectada: Embalse Caritaya y Embalse Ajatama

Figura 5.5: Diagrama de Flujo, Situación Proyectada.



Fuente: Elaboración propia.

5.7 Caudales y Evaporaciones - Entrada Modelo

La información hidrometeorológica de entrada al modelo son caudales y evaporaciones, las cuales son a nivel mensual durante el período de análisis que comprende el período 1979/80 – 2013/2014.

Los caudales se obtienen de la generación de caudales medios mensuales de la simulación hidrológica desarrollada en el capítulo anterior.

Los caudales medios mensuales utilizados en el modelo son:

Situación Actual (Ver Figura 4.2)

1. Caudal afluente Embalse Caritaya: caudal natural de la cuenca de cabecera al embalse Caritaya.
2. Caudal bajo Caritaya: corresponde al caudal generado en la cuenca intermedia, bajo al embalse Caritaya hasta Arepunta.
3. Caudal Ajatama: caudales generados en la cuenca de Ajatama, hasta Arepunta.
4. Caudal cuenca Intermedia: caudal generado desde Arepunta hasta el inicio de zona de riego 1.

Situación Proyectada (Ver Figura 4.3)

1. Caudal afluente Embalse Caritaya: caudal natural de la cuenca de cabecera al embalse Caritaya.
2. Caudal bajo Caritaya: corresponde al caudal generado en la cuenca intermedia, bajo al embalse Caritaya hasta Arepunta.
3. Caudal afluente Embalse Ajatama: caudal natural de la cuenca de cabecera al embalse Ajatama.
4. Caudal bajo Ajatama: corresponde al caudal generado en la cuenca intermedia, bajo al embalse Ajatama hasta Arepunta.
5. Caudal cuenca Intermedia: caudal generado desde Arepunta hasta el inicio de zona de riego 1.
6. Caudal ecológico Ajatama: corresponde al caudal ecológico de la cuenca embalse Ajatama.

Dichos caudales se obtienen de la generación de caudales medios mensuales de la simulación hidrológica desarrollada en el capítulo anterior, presentados en Anexo N°8.

Para el caso de las evaporaciones, se utilizaron los datos de la estación de Codpa en Cala Cala, multiplicando los valores promedios medidos por coeficientes de corrección de embalse de 0,7.

Tabla 5.10: Evapotranspiración Potencial, Codpa en Cala Cala, en [mm/mes].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
132,6	134,1	136,3	122,6	104,9	111,4	93,1	81,9	72,1	78,9	93,6	108,7

Fuente: Elaboración propia, ref. Estadística de Estación Meteorológica, Dirección General de Aguas.

5.8 Escenarios de Operación

Una vez definido el modelo de operación mensual, se evalúan los escenarios detallados en el presente acápite. Para ello, se distinguen los casos de extracción por zona de riego, respetando los derechos y también por extracción libre.

Los escenarios evaluados serán la situación actual de operación del embalse Caritaya, situación con mejoras en infraestructura de canales y de sistema de riego, y adicionalmente un escenario proyectado, con una nueva obra, correspondiente a la incorporación del embalse Ajatama. Se dejan fuera del presente análisis escenarios que varíen la demanda de riego, vale decir, cambiar tipos de cultivo del valle de Camarones o que involucren procesos de tratamientos de agua del río Caritaya que mejoren la calidad de éste y que permitan ampliar la gama de productos agrícolas cultivables en la zona, temáticas que pueden ser profundizadas en estudios posteriores.

5.8.1 Embalse Caritaya

5.8.1.1 Situación actual

Corresponde a la aplicación del modelo para las áreas de riego actuales y sus respectivas eficiencias, bajo el escenario con las extracciones libres y regidas por los derechos constituidos, sin considerar ningún tipo de mejora.

Tabla 5.11: Seguridad de riego, Situación actual.

Zona de Riego	Extracción según derechos	Extracción libre
ZR1	65,71%	88,57%
ZR2	5,71%	34,29%
ZR3	85,71%	68,57%

Fuente: Elaboración propia.

Para el escenario actual no es posible satisfacer todas las zonas de regadío al 85%, por lo cual, se evalúa reducir la superficie por zona. El análisis arroja que la zona mayormente demandada corresponde a la zona de regadío 2, y al modificar sólo su área es posible asegurar el riego para todas las zonas.

Tabla 5.12: Seguridad de Riego mínimo del 85% para cada zona.

Zona de Riego	Área actual [Ha]	según derechos		libres	
		área [Ha]	Seg. Riego [%]	área [Ha]	Seg. Riego [%]
ZR1	139,1	139,1	91,43	139,1	88,57
ZR2	543,4	235,6	85,71	466,2	85,71
ZR3	188,3	188,3	91,43	188,3	88,57

Fuente: Elaboración propia.

5.8.1.2 Situación Mejorada

Con revestimiento

El presente análisis consiste en evaluar la operatividad del embalse existente considerando la totalidad de los canales de riego revestidos, por lo tanto, la infiltración es nula. Se mantiene las áreas de riego y las eficiencias actuales.

En general, gran parte de los canales se encuentran revestidos, y sólo 9.160 m del total de 54.978 metros lineales de las tres zonas, se encuentran sin revestir.

Tabla 5.13: Seguridad de Riego, con revestimiento de canales.

Zona de Riego	Extracción según derechos	Extracción libre
ZR1	71,43%	88,57%
ZR2	5,71%	37,14%
ZR3	85,71%	74,29%

Fuente: Elaboración propia.

Con mejora de eficiencia

En esta evaluación se considera una mejora porcentual de la eficiencia del sistema, como se determinó anteriormente (ver Tabla 5.3 y acápite 8.9.1), se trabaja en base a una eficiencia ponderada, según área de riego y tipo de cultivo, por lo que se analiza el sistema con un aumento del 15% de la eficiencia de riego ponderada actual por sector, manteniendo sin modificar la superficie cultivable o las condiciones de la infraestructura de regadío. Este criterio normalmente se utiliza en proyectos de riego para evaluar una situación mejorada del sistema actual.

La mejora porcentual es referencial, con el fin de evaluar cómo se ve afectado el sistema, por este tipo de variable, si bien es posible instalar sistemas de mayor eficiencia, en la práctica se torna complejo cambiar los mecanismos actuales drásticamente por las

características culturales de la zona, debido principalmente a lo arraigado de lo rústico de la operatividad actual en varios de los agricultores, en base a tradición familiar, por lo que se debiera considerar jornadas educativas para acercar la tecnología a ciudadanos, que viven alejados geográficamente de centros urbanos, sin contar, por ejemplo, con suministro de electricidad por red eléctrica.

Tabla 5.14: Seguridad de Riego, mejora eficiencia.

Zona de Riego	Extracción según derechos	Extracción libre
ZR1	82,86%	88,57%
ZR2	11,43%	85,71%
ZR3	85,71%	88,57%

Fuente: Elaboración propia.

5.8.2 Embalse Caritaya y Embalse Ajatama

Tal como se analizó el caso en que se modela el Valle Camarones con la operatividad sólo del Embalse Caritaya, se procede a realizar el análisis, pero ahora tanto Caritaya como Ajatama operando.

Tabla 5.15: Seguridad de Riego, Situación proyectada.

Zona de Riego	Extracción según derechos	Extracción libre
ZR1	94,29%	100,00%
ZR2	34,29%	85,71%
ZR3	94,29%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa para extracción libre, la seguridad en la zona baja es de un 100%, se evaluará, la nueva área de riego factible de regar para un 85%, el cual se presenta a continuación:

Tabla 5.16: Seguridad de Riego con área aumentada, Situación proyectada.

Zona de Riego	Área [Ha]	Extracción libre
ZR1	139,10	100,00%
ZR2	543,40	85,71%
ZR3	357,40	91,43%

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla anterior, se desprende que es posible aumentar 169,1 Ha en la Zona de Riego 3, manteniendo la seguridad mínima del 85% en el sistema completo. Repetir el procedimiento con las otras dos superficies, no es viable, puesto que cualquier aumento perjudica la seguridad de riego en la zona baja, y es más, dada las condiciones actuales de la zona media, cualquier incremento en su superficie de cultivo, conlleva a que la operatividad sea crítica, y repercute en las seguridades de riego de las zonas alta y baja.

5.8.2.1 Comparación de resultados

Embalse Caritaya

Al ver los resultados, se puede apreciar que la zona de riego 1, presenta una desfavorable seguridad de riego en la extracción según derechos, situación que se contrapone al considerar una extracción libre de recursos, donde se alcanza el mínimo porcentaje de seguridad de riego esperado (85%) en todos los escenarios: actual, mejora en infraestructura y tecnología.

Para el caso de la zona de riego 2, al comparar todos los escenarios analizados, se visualiza que corresponde a la zona más crítica, con seguridades de riego muy bajas, llegando al 6% en la extracción según derechos, situación que mejora al 34% para extracción libre en la situación actual, sin embargo, no logra el mínimo del 85%, en casi todos los escenarios, excepto en el escenario de mejora de eficiencia y extracción libre.

En la zona de riego 3, para el caso de extracción según derechos, alcanza el 85% de seguridad de riego en la situación actual, y se mantiene para los escenarios de mejora. Sin embargo, para el caso de extracción libre, la sección baja del valle se ve perjudicada y sólo alcanza la seguridad requerida para el escenario proyectado de aumento de eficiencia.

Al analizar la condición de operatividad actual, se desprende que la extracción libre favorece a las zonas alta y media, en desmedro del sector bajo, situación que es regulada por la extracción según derechos, que si bien no asegura el 85% de seguridad de riego para todas las zonas, si es posible para la zona de riego 3, que es la de menores dotaciones.

En la condición de infiltración nula, la mejora en seguridad de riego se produce sólo en la zona alta por extracción según derechos, en cambio en la extracción libre, la mejora es en la zona media y baja. Si bien, el revestimiento total de los canales logra aumentar la seguridad de riego, no alcanza satisfacer el requerimiento para cada uno de los sectores de riego.

En la comparación de resultados con mejora de eficiencia, se aprecia que es el escenario más favorable, con las seguridades de riego más altas, donde se logra el 85% de seguridad de riego esperado para la extracción libre en todos los sectores, situación

que no se logra repetir para la extracción según derechos, donde la zona alta y media quedan por debajo del nivel mínimo.

Al comparar los resultados, según escenario, se visualiza que la seguridad de riego con el revestimiento de canales es levemente más alta que la obtenida en la situación actual, en cambio, el aumento de eficiencia de riego logra mejoras considerables en los valores de seguridad para el regadío.

Embalse Caritaya y Ajatama

La comparación de resultados demuestra que la operatividad conjunta de los embalses Caritaya y Ajatama logra mejores porcentajes de seguridad de riego. En particular, la zona de riego 1 y 3 presenta valores satisfactorios tanto en la extracción según derechos como extracción libre. Sin embargo, para la zona media no es posible alcanzar el mínimo para la condición de extracción respetando porcentajes de derechos otorgados.

La condicionante para definir la capacidad del embalse proyectado de Ajatama es la zona de riego 2, como se puede apreciar, para la extracción libre, la situación proyectada presenta seguridades de riego muy altas, alcanzando incluso el 100% en las zonas alta y baja, por lo que el volumen de almacenamiento se define asegurando el sector medio, zona crítica que no puede ser resuelta para la extracción según derechos, por la limitante en la topografía, que no permite que la obra de regulación sea de mayor capacidad.

En la Tabla 5.17 se presentan un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 5.17: Comparación de escenarios.

Extracción	Zona de Riego	Área actual [Ha]	Situación actual	Situación mejorada		Área Sit. proyectada [Ha]	Situación Proyectada
				con revestimiento	aumenta eficiencia en 15%		
según derechos	Z1	139,1	65,71%	71,43%	82,86%	139,1	94,29%
	Z2	543,4	5,71%	5,71%	11,43%	543,4	34,29%
	Z3	188,3	85,71%	85,71%	85,71%	188,3	94,29%
libre	Z1	139,1	88,57%	88,57%	88,57%	139,1	100,00%
	Z2	543,4	34,29%	37,14%	85,71%	543,4	85,71%
	Z3	188,3	68,57%	74,29%	88,57%	357,4	91,43%

Fuente: Elaboración propia.

5.9 Análisis de resultados

Al analizar los resultados se puede concluir que la operatividad conjunta de los embalses Caritaya y el embalse proyectado de Ajatama logran efectivamente grandes mejoras en la seguridad de riego del Valle de Camarones, independiente del factor de extracción. También es posible apreciar que el sistema operando con ambos embalses, es menos sensible al régimen de extracción, vale decir, que las seguridades de riego para cada caso son muy similares entre ellas, lo que se podría traducir en mayor estabilidad. Caso contrario al operar sólo con Caritaya, donde los resultados son muy variados, y en general poco satisfactorios.

El estudio arroja claramente la criticidad del sistema, el que se individualiza en la zona de riego 2, debido principalmente a que en este sector se conjuga la mayor cantidad de derechos otorgados, la más amplia superficie de riego y a su vez la mayor demanda hídrica.

También del análisis se desprende lo relevante del régimen de extracción en la operatividad del embalse Caritaya, en la situación actual, mejora en canales (revestimiento) y sistema de riego (eficiencia), donde comparativamente, el respetar la extracción según derechos permite que la zona baja siempre se pueda regar con 85% de seguridad, mientras que la extracción libre lo perjudica, imposibilitando tal riego, tanto en la situación actual como en el caso de considerar canales revestidos.

Los resultados exitosos para cada una de las 3 zonas de riego son con el escenario de embalse Caritaya, aumento en eficiencia de riego y extracción libre, así como también el escenario de ambos embalses operando.

Respecto a las áreas de regadío estimadas para alcanzar el 85% de seguridad de riego, se puede concluir que al reducir las hectáreas de cultivo solamente en la sección media, bajo la extracción de recursos según derechos y libre extracción en un 57% y un 14% respectivamente, demuestra lo sensible del sistema al régimen de extracción. La reducción de áreas es claramente superior en la operatividad según derechos, pero se obtienen seguridades de riego superiores al 91% en las zonas alta y baja, mientras que por extracción libre, si bien la superficie cultivada es superior, la seguridad de las zonas contiguas es levemente menor, cercanas al 89%. Al contraponer los dos casos, se hace necesario mencionar que el escenario más conveniente es reducir lo menos posible el área de regadío actual, por todos los alcances que ello conlleva, al tratarse de la zona con más usuarios a lo largo del valle, las consecuencias de la aplicación de una decisión de este tipo es poco viable.

Por otra parte, la incorporación del embalse Ajatama, trabajando en conjunto al tranque Caritaya, bajo la extracción libre de derechos, permite obtener resultados satisfactorios en todas las zonas de riego, y se caracteriza por aumentar la superficie de cultivo de la zona baja en 169,1 Ha. Esta alternativa, da solución a la totalidad de los sectores de riego, favorecidos al asegurar el 85% la demanda de riego en el período analizado.

5.10 Evaluación Socio- Económica Preliminar Embalse Ajatama

Posterior al análisis de escenarios propuestos en respuesta a lo insuficiente del recurso hídrico para la operatividad actual del Valle de Camarones, lo que se vislumbra como alternativa de solución más propicia técnicamente es la incorporación del embalse Ajatama al sistema de riego, por lo cual se procede a la evaluación socio-económica de dicha obra de regulación.

5.10.1 Ingresos

Los ingresos generados de la puesta en marcha del Proyecto Embalse Ajatama al sistema de regadío del Valle de Camarones están asociados a la venta de productos agrícolas adicionales que pueden ser cosechados al asegurar el riego de una mayor superficie de cultivos. Ver Tabla 5.16, de la cual se desprende el aumento de área cultivable, donde la zona baja crece en 169,15 Ha y la zona media permite regar 77,01 Ha más que antes, sin la alternativa propuesta no era posible asegurar el riego.

La producción y comercialización de los diversos productos cultivados se obtienen del “Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones” (Arrau, 2013), donde clasifican los predios agrícolas según superficie, tipo de cultivo y ubicación en el sistema. En resumen los ingresos de la nueva área cultivada se presentan en la Tabla 5.18

Tabla 5.18: Ingresos por venta de productos agrícolas.

Tipo de cultivo	Zona Media		Zona Baja		Total	
	ha	\$	ha	\$	ha	\$
Trigo	0	0	33,83	6.304.574	33,83	6.304.574
Cebolla	4,52	12.276.283	0	0	4,52	12.276.283
Maíz Choclo	0,31	135.879	0	0	0,31	135.879
Zanahoria	0,62	1.124.505	0	0	0,62	1.124.505
Huerta	0	0	0	0	0	0
Alfalfa	71,56	64.754.804	135,32	212.908.508	206,88	277.663.312
Total Riego	77,01	78.291.471	169,15	219.213.082	246,16	297.504.553

Fuente: Elaboración propia.

5.10.2 Inversión

Las características del embalse proyectado se detallan en la Tabla 5.19 y se grafica en la Figura 5.6. Se trata de un muro de tipo enrocado con pantalla de hormigón ubicado en el río Ajatama, aproximadamente a 16 km aguas arriba a Arepunta (confluencia de río Cartiya y Ajatama).

Tabla 5.19: Características de la presa Ajatama.

Características	Dimensión	Unidad
Altura sobre el nivel del mar	3.537	m.s.n.m.
Superficie hoya hidrográfica	376,5	km ²
Capacidad de almacenamiento	45.000.000	m ³
Longitud de coronamiento del muro	687	m
Longitud base del muro	70	m
Ancho del coronamiento	10	m
Ancho basal	610	m
Altura del muro	100	m
Talud muro (ambos lados)	1:3	v:h

Fuente: Elaboración propia, desde información de Google Earth.

Figura 5.6: Elevación de muro, Embalse Ajatama.



Fuente: Elaboración propia con el software Google Earth.

Los costos asociados a la construcción del embalse Ajatama se presentan en detalle en Anexo N°10, y ascienden a \$34.083.222.300, destacando los mayores costos en relleno, cortina de inyección, y hormigón y enfierradura de pantalla de muro.

5.10.3 Gastos de operación y mantención

Los gastos que se incurren para la operatividad del embalse Ajatama se deben principalmente a la contratación de profesionales y a la movilización de los equipos, si bien, también se requiere de un inmueble y artículos de oficina para la administración, los mayores gastos se concentran en lo siguiente:

Profesionales:

- Técnico en construcción (Operación)
- Secretario – Administrativo (Operación)
- Vigilantes de instalaciones (Operación)

Movilización:

- - Camionetas
- - Bote a motor inspección

Se estima que los gastos de operación y mantención son de \$3.800.000 mensuales, lo que significa un valor anual de \$45.600.000.

5.10.4 Evaluación del proyecto

Se tomaron las siguientes consideraciones para analizar la rentabilidad del proyecto propuesto.

- Tasa de retorno: 6%
- Horizonte de evaluación: 30 años

Los resultados se presentan en la Tabla 5.20, de la cual se desprende que la incorporación del embalse proyectado Ajatama al sistema de riego del valle de Camarones no resulta conveniente económicamente, por la alta inversión que implica la ejecución de una obra de tal embergadura, más que los costos anuales de mantención, y que los ingresos generados por concepto de comercialización de los productos cultivados no son suficientes, sino más bien, sería recomendable evaluar otras alternativas que permitan asegurar el regadío de la zona actualmente cultivada, con propuestas como tratamiento de aguas para cultivar productos más rentables o cambiar los actuales cultivos, tema que queda fuera de alcance planteado en el presente estudio.

Tabla 5.20: Evaluación de rentabilidad proyecto embalse Ajatama.

Año	Inversión	Costos de Operación y Mantenimiento	Ingresos	Resultado del periodo
0	-34.083.222.300			-34.083.222.300
1		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
2		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
3		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
4		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
5		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
6		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
7		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
8		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
9		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
10		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
11		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
12		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
13		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
14		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
15		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
16		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
17		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
18		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
19		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
20		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
21		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
22		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
23		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
24		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
25		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
26		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
27		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
28		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
29		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
30		-45.600.000	297.504.552	251.904.552
			VAN	\$-30.615.798.674

Fuente: Elaboración propia.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizar una amplia recopilación de antecedentes en la cuenca del Valle de Camarones, cuencas limítrofes y otras cercanas, su revisión y posterior análisis, es posible afirmar en lo relativo a:

6.1 Estudios hidrológicos y de sedimentos

Estudio de recursos de caudales medios mensuales

En la generación de caudales medios mensuales, al no poseer el valle de Camarones estaciones de control fluviométrico en régimen natural, se procedió a modificar un modelo precipitación-escorrentía de carácter pluvial (Brown y Ferrer) incorporándose las extracciones de riego del sector alto y la operatividad del embalse Caritaya (reglas por el operador del sistema). En base a lo anterior, se calibraron los caudales medios mensuales de la estación fluviométrica Camarones en Chilpe, logrando representar de buena forma los caudales medidos. El caudal medio anual de las respectivas cuencas de cabecera al embalse Caritaya y al embalse proyectado Ajatama, resultaron $0,266 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,292 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Estudio de Crecidas

El estudio de crecidas, representa un avance respecto a las metodologías utilizadas con anterioridad en los estudios existentes, destacando que el presente análisis posee una base más consistente, al considerar un hidrograma unitario sintético desarrollado para la cuenca de Lluta, ubicada al norte de Camarones, así como también la curva número determinada para ese mismo valle. Los resultados obtenidos, al aplicar un hidrograma unitario propio de cuencas altiplánicas, resultaron ser más conservadores que los obtenidos en los estudios anteriores de SMI y Arrau, obteniéndose para el embalse Caritaya y el embalse proyectado Ajatama, crecidas para 1.000 años de período de retorno de $862,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.132 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Estudio de Sedimentos

Para el estudio de sedimentos se aplicaron dos metodologías. La primera correspondiente a transposición de la curva de descarga de gastos sólidos en suspensión de la Quebrada de Tarapacá y la segunda correspondiente a una relación empírica obtenida en 28 cuencas en Estados Unidos para climas semi - áridos, lográndose resultados concordantes entre ambas metodologías, a pesar que esta última es obtenida en base a cuencas del extranjero. Para el embalse Caritaya se obtuvo un volumen de

sedimentos en sus 75 años de operación, de 5 millones de m³. Para la cuenca de Ajatama, en el punto de ubicación del embalse proyectado, la estimación del volumen muerto es de 4 millones de m³ para 50 años de operación. Cabe indicar, que con motivo de la reparación del embalse Caritaya, se estimó un volumen de sedimento acumulado en su período de operación de 4,5 millones de m³, lo cual es completamente consistente con los resultados obtenidos anteriormente.

6.2 Modelo de Operación

Situación actual

Del análisis realizado, aplicando el modelo de operación mensual del Valle de Camarones, se puede concluir que, dada la demanda hídrica y los derechos de agua otorgadas para el desarrollo agrícola, actualmente no permiten satisfacer las dotaciones de regadío, puesto que al evaluar la seguridad de riego del sistema, independiente de la ley de operación de los canales de riego (extracción según derecho o extracción libre limitada a la capacidad de porteo del canal de riego), no hacen posible que se alcance el 85% de seguridad de riego, para todas las zonas de riego, sino más bien, sólo se cumple parcialmente, siendo el sector más crítico la sección media, la cual cuenta con mayor superficie de cultivo.

Al reducir el área cultivable del sector medio, bajo el escenario de extracciones de riego según derechos, se obtiene para una seguridad de riego del 85% en el valle completo, una reducción de 307,8 Ha de superficie, es decir, del orden del 57% del valor actual. Si se realiza la extracción de caudales de riego bajo el escenario de extracción libre, se obtiene una disminución de 77,2 Ha de superficie, equivalente al 14% de la superficie original.

Situación mejorada

En la búsqueda de opciones que mejoren la seguridad de riego, se evaluaron la implementación de obras de revestimiento y cambios en el sistema de regadío bajo las condiciones de operatividad del embalse Caritaya, los cuales lograron diferentes impactos en la modelación. La operatividad con canales totalmente revestidos aumenta la seguridad levemente, mientras que al aumentar la eficiencia de riego, se logra un cambio mucho más significativo, llegando incluso, para el régimen bajo extracción libre, asegurar el riego de las 3 zonas con un 85% de seguridad de riego, si se aumenta la eficiencia de riego en un 15%.

Situación con embalse proyectado

Finalmente, se planteó la alternativa de incorporar un nuevo embalse en la quebrada de Ajatama, para que en conjunto al embalse Caritaya, optimicen la distribución del recurso. La operación con los dos embalses logra mejoras en el sistema, alcanzando

a cumplir con la seguridad mínima esperada de un 85%, según extracción libre, adicionando 169,1 Ha en la superficie de cultivo de la zona baja.

Lamentablemente, para la extracción según derechos, la zona media, queda muy por debajo, siendo inferior al 35% en superficie cultivada, respecto al potencial de siembra.

Respecto a la distribución de la oferta de los volúmenes embalsados, se optó por evaluar cuál sería la mejor opción, por medio una análisis iterativo, resultando el más conveniente un factor de 0,45, es decir, la demanda se satisface en un 45% por el embalse Caritaya y un 55% por el embalse Ajatama, relación proporcional a la capacidad de almacenamiento de dichas obras. Ahora bien, desde el punto de vista técnico, la incorporación de una obra de gran envergadura con una capacidad de 45 millones de m³, apoyando la presa actual de Caritaya de 38 millones de m³, logra satisfacer los requerimientos del valle, y aportar con mayor seguridad al sistema de regadío, principal uso de las aguas del río Camarones, mientras que la evaluación socio-económica de esta alternativa, arroja que no es conveniente la construcción del embalse Ajatama, puesto que la rentabilidad del proyecto es negativa, con un VAN del orden de -\$30.000 millones en el horizonte de 30 años.

Del análisis también es posible apreciar que la alta tasa de evaporación de la zona geográfica de emplazamiento, tanto del embalse actual, como el proyectado, conlleva a casi un balance de equilibrio entre las precipitaciones y evaporaciones, concluyendo que para las estructuras de este tipo en la pre-cordillera del norte grande, son un factor muy importante a considerar en el diseño y que juegan un papel trascendental en la operatividad de un sistema de riego.

Por otra parte, cabe mencionar que la situación actual de la agricultura desarrollada en el Valle de Camarones se caracteriza por presentar poca variedad de cultivos, reducida a hortalizas, alfalfa y trigo, podría ser ampliada en un futuro próximo, dado a que hay otros tipos de cultivos tan excepcionales que resisten la condiciones climáticas del invierno, con poco peligro, como tomates, zapallitos o pimientos, y también cereales de invierno como leguminosas de grano y papas (Arrau, 2010). Las características de los distritos agroclimáticos del área en estudio permitiría ampliar la gama de cultivos en el valle, para ello sería necesario considerar la demanda y oferta hídrica asociada, y las posibles limitaciones que podrían presentar los cultivos sensibles a la presencia de sales, boro y arsénico, temática que quedó fuera del presente análisis, y que podría ser tratado en otros estudios, ya que implica profundizar en estudiar la calidad de agua, agronomía y obras civiles, principalmente, y contar con el interés y la participación de la comunidad.

Por lo anterior, existe la posibilidad de que variando el tipo de cultivos sea posible obtener mejoras en las seguridades de riego o un sistema más eficiente, sin embargo, requiere de un estudio centralizado en este tema, debido a que en la práctica, hasta hoy en día la calidad de agua no ha permitido llevarlo a cabo. La incorporación del embalse proyectado de Ajatama, operando en conjunto al de Caritaya, trae consigo un beneficio asociado, debido a que lograría un efecto de dilución química de las aguas, en que la

mala calidad de las aguas de Caritaya, se mezclarían durante todo el año con los recursos, de mejor calidad, provenientes de Ajatama, por lo tanto, sería posible sembrar mayor variedad de plantaciones y fomentar el desarrollo de la agricultura del valle Camarones.

Finalmente, realizado el diagnóstico del recurso hídrico y el modelo operacional del Valle de Camarones, se concluye que las condiciones actuales no permitirían un sistema óptimo, debiendo proponer, en el presente estudio, alternativas de mejoras, generando obras civiles, como canales revestidos y hasta un embalse complementario al Caritaya, y obras de riego que aumenten la eficiencia de regadío, tal como se refleja en los escenarios estudiados, donde a pesar de obtener buenos resultados en la mayoría de ellos, la zona media es la más deficitaria, y generalmente se mantiene con niveles insatisfactorios, lo que lleva a cuestionar la cantidad de derechos otorgados en dicho sector, y es más, hace evidente que la relación acción–área de cultivo, no es la adecuada para el recurso disponible. Ahora bien, dada la larga data de operación del embalse Caritaya en el Valle de Camarones, con ya 70 años desde que se declaró su explotación, es posible que en aquella época no se contaba con las actuales superficies cultivables, o no se proyectó su uso actual y riesgos asociados, y también al ser una de las primeras obras de regulación en la zona norte, no se contaba con una robusta base estadística hidrometeorológica o los estudios que existen hoy en día para el diseño de presas, junto a los cambios en la administración del embalse a los largo de los años, serían factores determinantes, por lo que la operatividad en el presente serían consecuencias de modificaciones de demanda y a la gestión de los administradores en el tiempo, recomendando que con un mayor control en la distribución y uso del agua para riego sería un sistema más eficiente.

7 REFERENCIAS

- [1] **Iris Jiménez, 2016.** Estimación del gasto sólido en suspensión en cuencas chilenas. (Memoria de título). Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.
- [2] **ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2013.** Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones.
- [3] **MN Ingenieros, 2012.** Diseño Embalse Camiña, Región de Tarapacá.
- [4] **ARRAU Ingeniería E.I.R.L., 2010.** Estudio de Factibilidad Construcción Embalse Umiña – Camiña, Región de Tarapacá. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas.
- [5] **Laboratorio de Investigaciones Medioambientales de Zonas Áridas, (LIMZA), Centro de Investigaciones del Hombre en el Desierto (CIHDE), Universidad de Tarapacá (UTA), 2010.** Cuenca de Camarones: Identificación y Caracterización de Fuentes que condicionan la calidad de las aguas superficiales: Rol del tranque Caritaya.
- [6] **MN Ingenieros, 2010.** Diseño Embalse Livilcar, Región de Arica y Parinacota.
- [7] **Ingendesa, 2008.** Estudio de Pre-Factibilidad para la Construcción de Obras de Control de Crecidas Cuenca del Río San José, Arica, Región de Arica y Parinacota.
- [8] **Luis San Martín y Cía. Ltda., 2008.** Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, Provincia de Arica, I Región. Informe Final.
- [9] **Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas, 2008.** Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos.
- [10] **AC Ingenieros Consultores Limitada, 2002.** Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, Primera Región. Informe Final.

- [11] **Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad, 2002.** Manual de Carreteras, Volumen N° 3 Instrucciones y Diseño, Parte II.
- [12] **Global Water Partner South America, 2000.** Agua para el siglo XXI para América del Sur De la Visión a la Acción
- [13] **Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas, 2000.** Mapa de Evapotranspiraciones Potenciales de Chile.
- [14] **IPLA Ltda., 1996.** Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios.
- [15] **Ricardo Edwards G. – Ingenieros Ltda., 1991.** Estudio de Síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructura de aprovechamiento. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios.
- [16] **United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987.** Design of Small Dams, A Water Resources Technical Publication. Third Edition U.S.A.

8 ANEXOS

8.1 Anexo N°1: Resumen de Bocatomas, Valle de Camarones.

Tabla 8.1: Resumen de Bocatomas, Zona Alta.

N°	Nombre de Organización	Otro Nombre	Ribera	Acciones
1	Barranco		derecha	No
2	Poroma	Poroma Flores	izquierda	No
3	Viza	Viza Flores	derecha	No
4	Quitina	Quitima Alto	izquierda	No
5	Ancollante		derecha	No
6	Pedregal	El Pedregal	izquierda	No
7	Condumaya 1	Condumaya Chico	derecha	No
8	Condumaya 2		izquierda	No
9	Condumaya 3		derecha	No
10	Condumaya 4		izquierda	Si
11	Umaxo Illapata		derecha	Si
12	Amasaca 1		izquierda	Si
13	Amasaca 2		izquierda	Si
14	Isla 1	Isla o Las Ánimas	derecha	Si
15	Amasaca 3		izquierda	Si
16	Isla 2		derecha	No
17	Canales temporales		izquierda	No
18	Taipitaque	Taipitaque chico	derecha	No
19	Taipitaque		izquierda	Si
20	Quebrada 1		derecha	No
21	Quebrada 2		izquierda	No
22	Quebrada 3	El Tapial El Arenal Uno	derecha	Si
23	Ñeque ñeque		izquierda	Si
24	Cortajima 1		derecha	No
25	Cortajima 2	Cortajima (1 y 2)	derecha	Si
26	canal eventual		izquierda	No
27	canales eventuales		derecha	No

Fuente: Elaboración Propia, Ref. AC, 2002 - SMI, 2010 - Arrau 2013.

Tabla 8.2: Resumen de Bocatomas, Zona Media.

Nº	Nombre de Organización	Otro Nombre	Ribera	Acciones
28	Isise 1		derecha	No
29	Isise 2		izquierda	No
30	Isise 3		izquierda	Si
31	Isise 4		derecha	No
32	Isise 5		derecha	Si
33	Iquilta 1		izquierda	Si
34	Iquilta 2		derecha	Si
35	Iquilta 3		izquierda	Si
36	Iquilta 4		derecha	Si
37	Caruta 1		derecha	Si
38	La Montaña		derecha	No
39	Caruta 2		derecha	Si
40	Silvio Calle		izquierda	No
41	Pampanune 1		izquierda	No
42	Pampanune 2	Pampanune 1, 2, 3	izquierda	Si
43	Pampanune 3		izquierda	No
44	Huancarane 1		derecha	No
45	Huancarane 2		izquierda	Si
46	Huancarane 3		izquierda	Si
47	Huancarane 4		derecha	No
48	Huancarane 5		izquierda	Si
49	Huancarane 6		derecha	No
50	Huancarane 7		izquierda	No
51	Huancarane 8		izquierda	No
52	Huancarane 9		izquierda	Si
53	Catinjagua 1	Catinjagua 1	derecha	Si
54	Catinjagua 2	Catinjagua 2	izquierda	Si
55	Catinjagua 4	Catinjagua 4	derecha	No
56	Catinjagua 3	Catinjagua 3	izquierda	No
57	Catinjagua 5		derecha	No

Fuente: Elaboración Propia, Ref. AC, 2002 - SMI, 2010 - Arrau 2013.

Tabla 8.3: Resumen de Bocatomas, Zona Baja.

Nº	Nombre de Organización	Otro Nombre	Ribera	Acciones
58	Taltape		izquierda	Si
59	Humallame	Humallany	derecha	Si
60	O'Higgins		derecha	Si
61	El pueblo provisional	Del pueblo	izquierda	No
62	Las Casas	De las casas/El Pueblo	izquierda	Si
63	San Juan	San Juan ii	izquierda	Si
64	Parcela 15		derecha	No
65	Maquita		derecha	Si
66	Porto	Porto Carrero	derecha	Si
67	Chupisilca		derecha	No
68	Conanoxa		izquierda	No
69	Manuel Rodríguez		derecha	Si
70	Calos Ibañez		derecha	Si

Fuente: Elaboración Propia, Ref. AC, 2002 - SMI, 2010 - Arrau 2013.

8.2 Anexo N°2: Áreas de cultivos.

Cultivo	Zona Alta		Zona Media		Zona Baja		Total	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Riego								
Trigo	0,00	0,0	0	0,0	28,24	15,0	28,24	3,2
Cebolla	1,81	1,3	30,7	5,6	0	0,0	32,51	3,7
Maíz Choclo	18,64	13,4	2,09	0,4	0	0,0	20,73	2,4
Zanahoria	1,81	1,3	4,18	0,8	0	0,0	5,99	0,7
Huerta	4,87	3,5	0	0,0	0	0,0	4,87	0,6
Alfalfa	112,01	80,5	487,33	89,7	112,95	60,0	712,29	81,8
Barbecho	0,00	0,0	19,11	3,5	47,06	25,0	66,17	7,6
Sub Total Riego	139,14	94,5	543,41	56,7	188,25	6,7	870,8	22,2
Secano								
Sin Habilitar	8,1	5,5	276,09	28,8	2.528,69	90,0	2.812,88	71,8
Sub Total Secano	8,1	5,5	276,09	28,8	2.528,69	90,0	2.812,88	71,8
No Habilitable	0	0,0	138,73	14,5	92,72	3,3	231,45	5,9
TOTAL	147,24	100,0	958,23	100,0	2.809,66	100,0	3.915,13	100,0

Fuente: Estudio Básico Diagnóstico de Obras Hidráulicas y Fluviales Quebrada de Camarones, Arrau, 2013.

8.3 Anexo N°3: Antecedentes Hidrológicos.

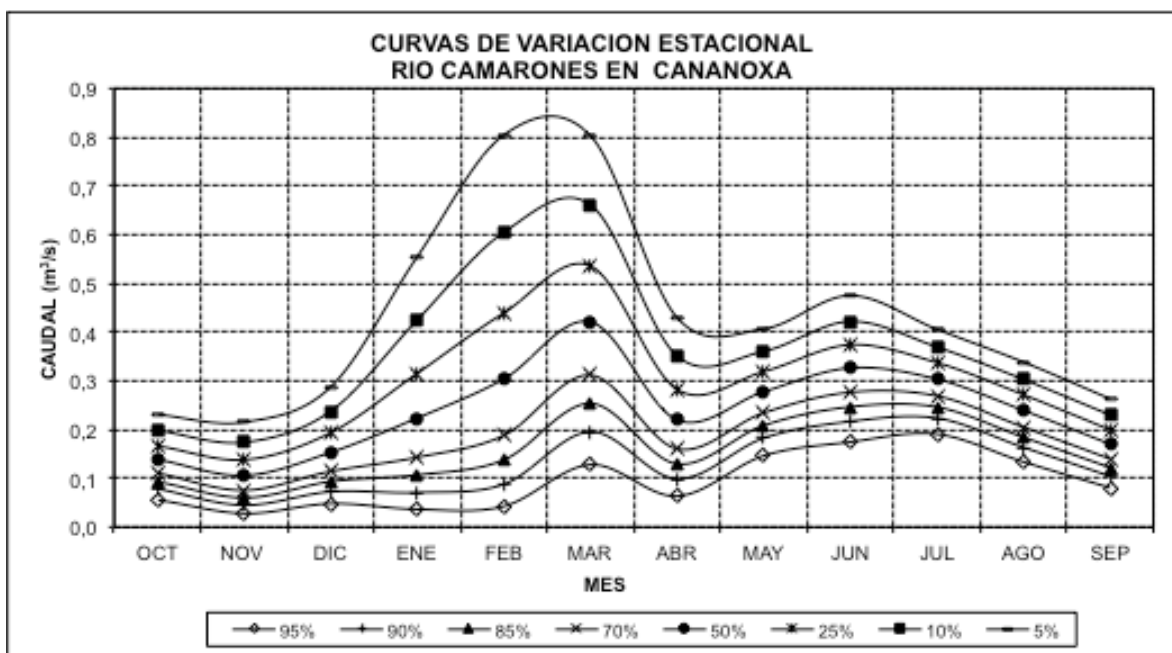
Curva de Variación Estacional Camarones en Conanoxa:

Tabla 8.4: Curva de Variación Estacional, Camarones en Conanoxa.

MES	CAUDAL (m ³ /s)							
	95%	90%	85%	70%	50%	25%	10%	5%
OCT	0,057	0,078	0,094	0,111	0,139	0,168	0,197	0,230
NOV	0,028	0,045	0,060	0,075	0,106	0,138	0,174	0,215
DIC	0,048	0,073	0,093	0,114	0,153	0,194	0,238	0,287
ENE	0,036	0,071	0,107	0,143	0,224	0,315	0,425	0,555
FEB	0,043	0,088	0,138	0,188	0,304	0,439	0,605	0,805
MAR	0,128	0,196	0,254	0,312	0,421	0,536	0,661	0,803
ABR	0,063	0,099	0,130	0,160	0,220	0,282	0,351	0,430
MAY	0,146	0,183	0,208	0,234	0,278	0,319	0,361	0,407
JUN	0,174	0,217	0,247	0,277	0,327	0,374	0,422	0,475
JUL	0,191	0,224	0,246	0,269	0,304	0,337	0,369	0,406
AGO	0,134	0,163	0,184	0,205	0,239	0,271	0,303	0,338
SEP	0,081	0,104	0,122	0,140	0,170	0,199	0,230	0,263

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

Gráfico 8.1: Curva de Variación Estacional, Camarones en Conanoxa.



Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

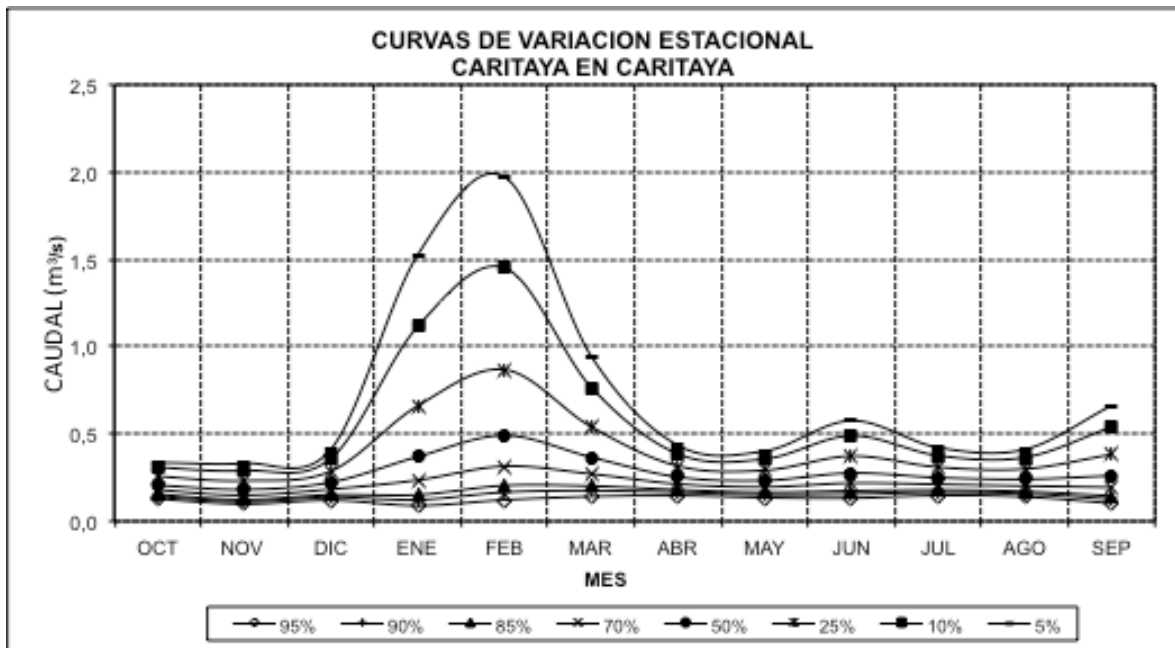
Curva de Variación Estacional Caritaya en Caritaya:

Tabla 8.5: Curva de Variación Estacional Caritaya en Caritaya.

MES	CAUDAL (m ³ /s)							
	95%	90%	85%	70%	50%	25%	10%	5%
OCT	0,125	0,140	0,151	0,176	0,206	0,253	0,304	0,339
NOV	0,099	0,113	0,123	0,149	0,181	0,232	0,290	0,332
DIC	0,121	0,138	0,151	0,183	0,223	0,287	0,361	0,413
ENE	0,090	0,122	0,151	0,235	0,370	0,661	1,116	1,526
FEB	0,122	0,166	0,205	0,315	0,491	0,869	1,451	1,972
MAR	0,142	0,175	0,202	0,271	0,367	0,540	0,767	0,945
ABR	0,147	0,166	0,180	0,213	0,253	0,316	0,385	0,434
MAY	0,135	0,153	0,165	0,196	0,233	0,291	0,356	0,401
JUN	0,133	0,156	0,174	0,219	0,276	0,373	0,490	0,576
JUL	0,148	0,166	0,179	0,211	0,250	0,310	0,376	0,422
AGO	0,140	0,158	0,171	0,202	0,240	0,299	0,365	0,411
SEP	0,103	0,126	0,145	0,194	0,261	0,383	0,540	0,663

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

Gráfico 8.2: Curva de Variación Estacional Caritaya en Caritaya.



Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vitor y Camarones, AC, 2002.

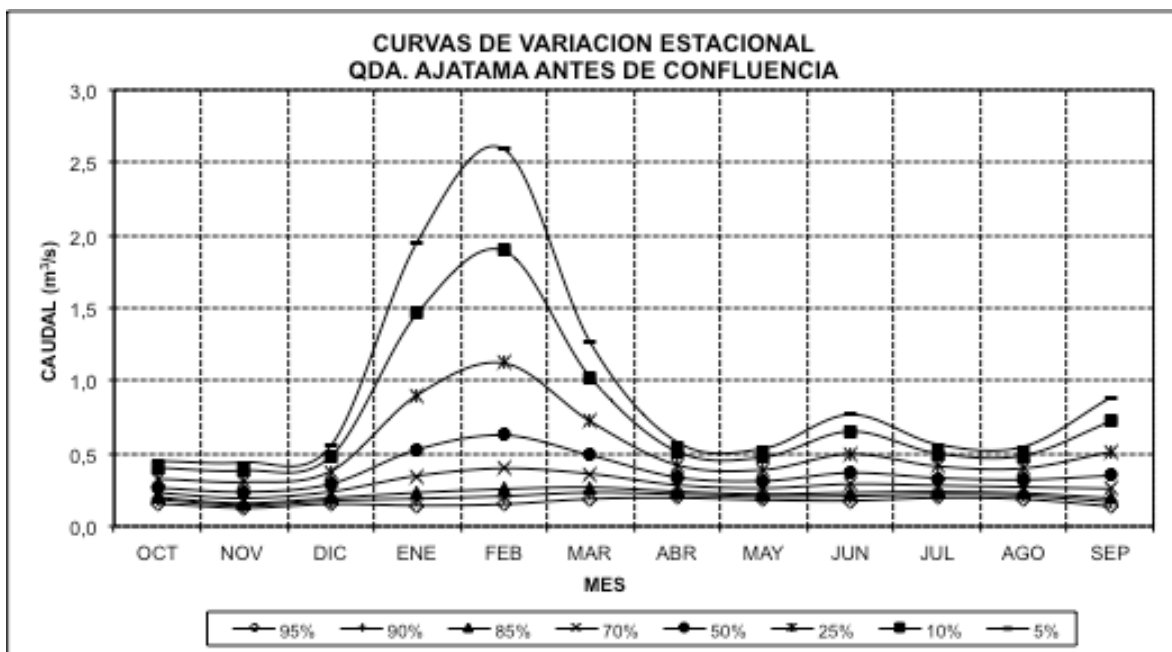
Curva de Variación Estacional Quebrada Ajatama antes de confluencia:

Tabla 8.6: Curva de Variación Estacional Quebrada Ajatama antes de confluencia.

MES	CAUDAL (m ³ /s)							
	95%	90%	85%	70%	50%	25%	10%	5%
OCT	0,160	0,179	0,193	0,227	0,268	0,332	0,402	0,451
NOV	0,126	0,145	0,159	0,193	0,235	0,304	0,383	0,440
DIC	0,153	0,177	0,194	0,237	0,291	0,378	0,479	0,552
ENE	0,142	0,190	0,231	0,347	0,528	0,903	1,464	1,956
FEB	0,151	0,207	0,256	0,398	0,626	1,122	1,895	2,593
MAR	0,189	0,233	0,268	0,361	0,488	0,720	1,022	1,261
ABR	0,196	0,220	0,239	0,283	0,337	0,421	0,514	0,580
MAY	0,181	0,204	0,221	0,262	0,311	0,388	0,474	0,535
JUN	0,176	0,207	0,231	0,291	0,368	0,497	0,653	0,768
JUL	0,196	0,220	0,238	0,281	0,332	0,413	0,502	0,564
AGO	0,187	0,210	0,228	0,269	0,320	0,399	0,486	0,547
SEP	0,137	0,168	0,193	0,259	0,348	0,510	0,719	0,884

Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, AC, 2002.

Gráfico 8.3: Curva de Variación Estacional Quebrada Ajatama antes de confluencia.



Fuente: Estudios Básicos de los Recursos Hídricos, Valles Lluta, Azapa, Vítor y Camarones, AC, 2002.

8.4 Anexo N°4: Curvas Hipsométricas

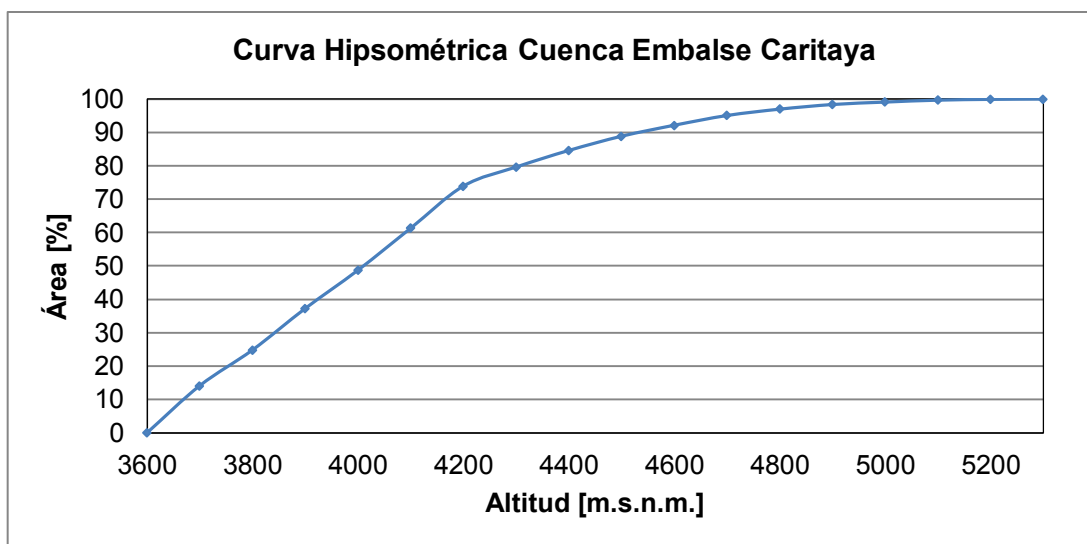
Tabla 8.7: Curva Hipsométrica de cuenca cabecera Embalse Caritaya.

Área cuenca: 364 km²

Cota [m]	Área acum. [%]
3600	0,00
3700	14,11
3800	24,81
3900	37,25
4000	48,72
4100	61,30
4200	73,93
4300	79,63
4400	84,60
4500	88,85
4600	92,15
4700	95,06
4800	96,97
4900	98,36
5000	99,09
5100	99,67
5200	99,90
5300	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.4: Curva Hipsométrica de Embalse Caritaya.



Fuente: Elaboración propia.

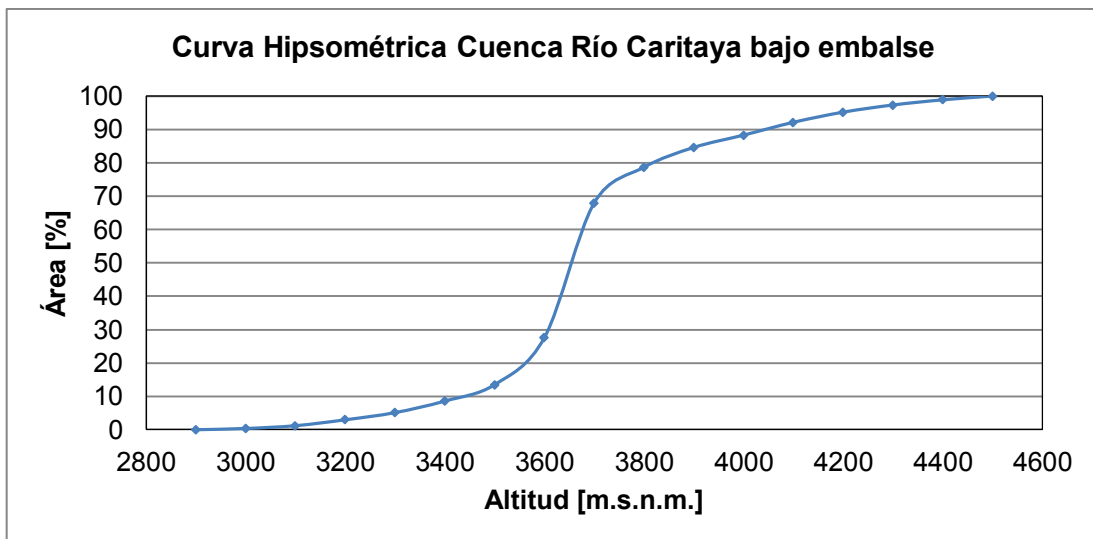
Tabla 8.8: Curva Hipsométrica de Río Caritaya bajo Embalse.

Área cuenca: 78 km²

Cota [m]	Área acum. [%]
2900	0,00
3000	0,38
3100	1,21
3200	2,97
3300	5,13
3400	8,59
3500	13,50
3600	27,61
3700	67,98
3800	78,66
3900	84,59
4000	88,29
4100	92,13
4200	95,17
4300	97,32
4400	98,86
4500	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.5: Curva Hipsométrica de Río Caritaya bajo embalse.



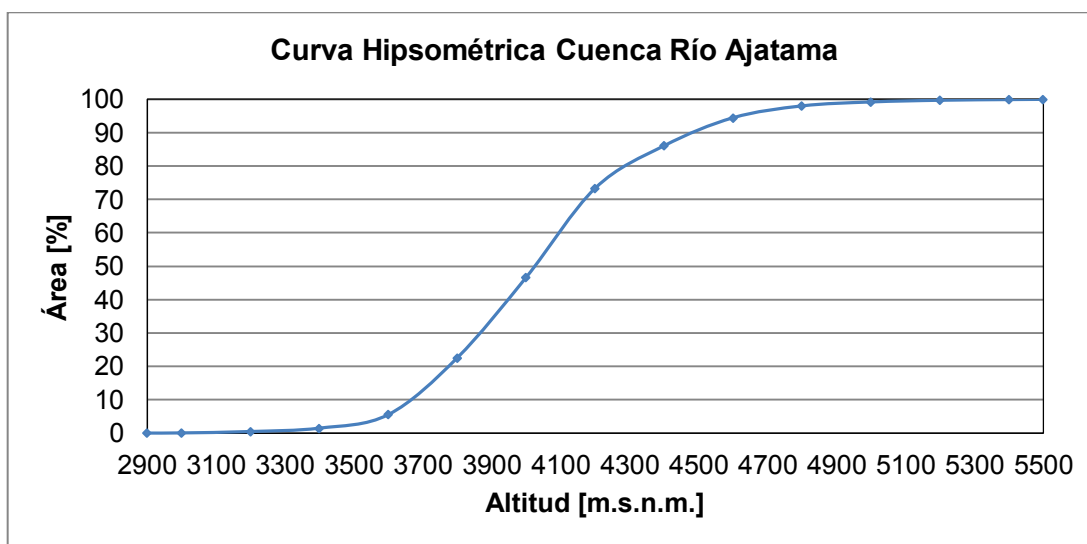
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.9: Curva Hipsométrica de Río Ajatama.

Área cuenca: 448 km ²	
Cota [m]	Área acum. [%]
2900	0,00
3000	0,05
3200	0,47
3400	1,48
3600	5,55
3800	22,58
4000	46,71
4200	73,40
4400	86,12
4600	94,50
4800	98,05
5000	99,23
5200	99,73
5400	99,94
5500	100,00

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8.6: Curva Hipsométrica de Río Ajatama.



Fuente: Elaboración propia.

8.5 Anexo N°5: Factor Precipitación - Altura

Tabla 8.10: Cálculo Factor Precipitación – Altura. Embalse Caritaya.

N° Banda	Área [%]	Cota [m]	Pp media [mm]	Pi*Ai [mm*%]
1	14,11	3650	36,06	508,9
2	10,7	3750	37,26	398,6
3	12,43	3850	38,46	478,1
4	11,48	3950	39,66	455,0
5	12,58	4050	40,86	514,1
6	12,62	4150	42,06	530,8
7	5,7	4250	43,26	246,8
8	4,97	4350	44,46	220,9
9	4,26	4450	45,66	194,3
10	3,29	4550	46,86	154,4
11	2,92	4650	48,06	140,1
12	1,91	4750	49,26	93,8
13	1,39	4850	50,46	69,9
14	0,73	4950	51,66	37,9
15	0,58	5050	52,86	30,4
16	0,24	5150	54,06	12,7
17	0,1	5250	55,26	5,5
Total	100		$\Sigma pi*Ai$ [mm*%]	4092,2
			$\Sigma pi*Ai$ [mm]	40,9
			P máx Pumire	38
			FP Medio	1,077

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.11: Cálculo Factor Precipitación – Altura. Embalse Ajatama proyectado.

N° Banda	Área [%]	Cota [m]	Pp media [mm]	Pi*Ai [mm*%]
1	0,09	3470	36,06	3,1
2	7,59	3625	37,26	271,2
3	27,33	3875	38,46	1059,2
4	17,21	4050	39,66	703,2
5	18,54	4175	40,86	785,2
6	17,32	4375	42,06	775,0
7	8,26	4625	43,26	394,5
8	2,60	4875	44,46	132,1
9	0,80	5125	45,66	42,8
10	0,27	5375	46,86	15,1
Total	100		$\Sigma p_i \cdot A_i$ [mm*%]	4181,4
			$\Sigma p_i \cdot A_i$ [mm]	41,8
			P máx Pumire	38
			FP Medio	1,100

Fuente: Elaboración propia.

8.6 Anexo N°6: Modelo de Simulación Hidrológica

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN Y ADAPTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO MENSUAL (MHM)

2.1 Descripción del MHM propuesto por Ferrer et al. (1973)

El modelo propuesto por Ferrer et al. (1973) es un MHM de carácter pluvial que considera la cuenca como un sistema de doble almacenamiento, uno subsuperficial y uno subterráneo, donde la única entrada de agua es la precipitación y las salidas son el flujo subterráneo, el flujo producido por la escorrentía directa y la evapotranspiración. Para esta última el modelo requiere como entrada el valor de la evapotranspiración máxima de la cuenca o potencial. El modelo conceptual se presenta en la Figura 3.1.

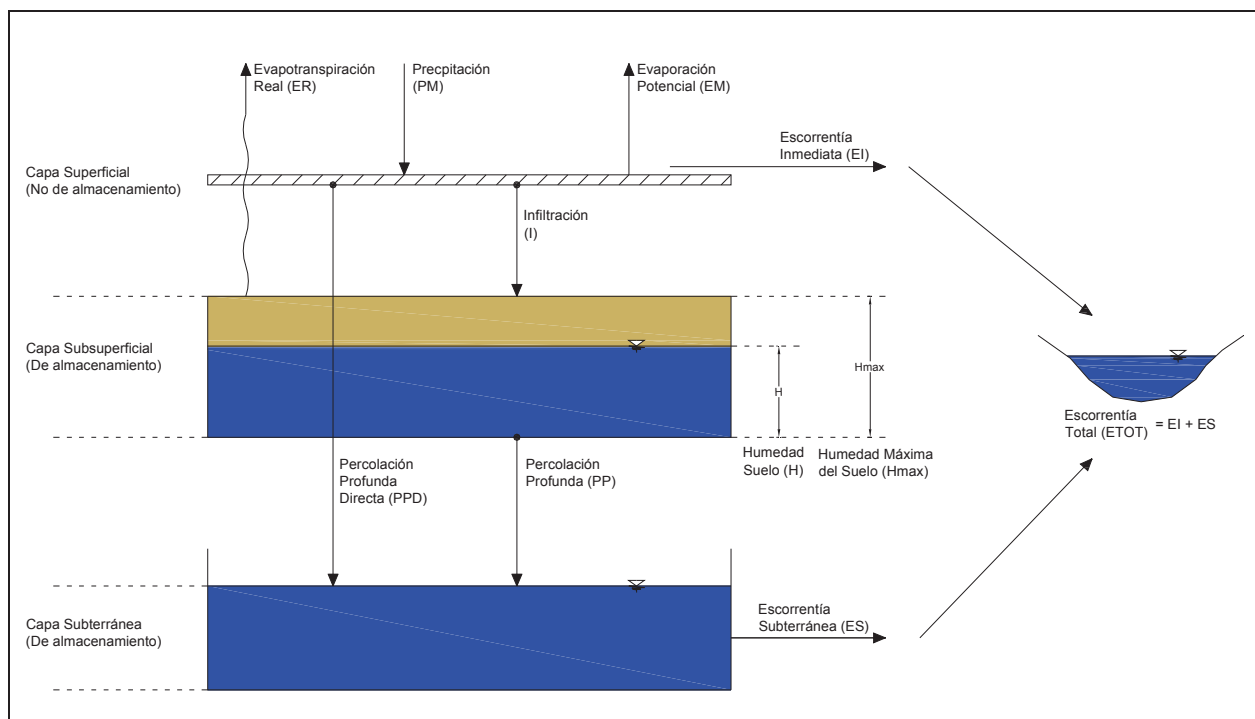


Figura 2.1: Modelo conceptual del MHM (adaptado de Ferrer et al. 1973).

La Figura 2.1 muestra los procesos o caminos que toma el agua hasta su salida. Primero, es necesario conocer la precipitación (PM) y la evaporación potencial (EM) en valores medios mensuales. Luego del agua caída, una parte se transforma en escorrentía inmediata (EI), una parte recarga directamente el acuífero (PPD) y una parte recarga la capa subsuperficial a través de la infiltración (I). El agua infiltrada se almacena en el embalse o capa subsuperficial, en forma de humedad (H). Luego, desde la capa subsuperficial y en función de H y EM, se calcula la evaporación real (ER). Luego, de la humedad restante, una queda en la capa subsuperficial como humedad y otra recarga el acuífero a través de la percolación profunda (PP). Finalmente una porción del almacenamiento subterráneo se transforma en escorrentía subterránea (ES), la cual junto a la escorrentía inmediata componen la escorrentía total de la cuenca (ETOT).

El proceso matemático se describe según la siguiente secuencia.

- Las variables de entrada PM y EM se multiplican por dos parámetros A y B respectivamente. Estos parámetros permiten modificar las variables de entrada, y su uso se justifica en casos donde se sabe que la PM y EM no son representativos de la cuenca, de lo contrario su valor debería ser la unidad.

$$P_{pluvial}(t) = A \cdot PM(t) \quad [2.1]$$

$$ETP(t) = B \cdot EM(t) \quad [2.2]$$

Donde $P_{pluvial}$ y ETP son la precipitación pluvial y evapotranspiración potencial dependientes del mes (t) respectivamente.

- Conocida la precipitación, el modelo calcula la EI, la cual se determina multiplicando $P_{pluvial}$ por un coeficiente de escorrentía (C), el cual es una proporción del coeficiente de escorrentía máximo (C_{max} , parámetro del modelo) que se tiene cuando la capa subsuperficial se encuentra saturada. Dicha proporción se determina como la razón entre la humedad media del suelo entre el mes t y el mes $t-1$, y la máxima capacidad de retención de agua del suelo (H_{max}).

$$EI(t) = C(t) \cdot P_{pluvial}(t) \quad [2.3]$$

$$C(t) = C_{max} \cdot \frac{H_{aux}(t) + H(t-1)}{2 \cdot H_{max}} \quad [2.4]$$

Al inicio de los cálculos el modelo no conoce la humedad del suelo en el mes $t=1$, por lo tanto asume un valor auxiliar o de arranque $H_{aux}(t)$ equivalente a H_{max} . Luego el valor real de $H(t)$, se calcula tras un proceso iterativo luego de determinar la ER.

- El agua sobrante puede recargar el embalse subsuperficial y el embalse subterráneo por medio de la I y PPD. Lo primero que se satisface en el modelo es la PPD, la cual se calcula como un porcentaje (D, parámetro del modelo), de la precipitación sobre una precipitación límite (P_{lim} , parámetro del modelo) sobre la cual existe aporte directo al embalse subterráneo.

$$PPD(t) = D \cdot (P_{pluvial}(t) - P_{lim}) \quad [2.5]$$

Una simplificación del modelo con el fin de reducir los parámetros del mismo se puede conseguir al asumir que no existe PPD. Para dicho caso, basta con considerar un valor de D igual a cero. Con esto se elimina la PPD y se eliminan dos parámetros de calibración (D y P_{lim}).

- Satisfecha la EI y la PPD, se calcula la infiltración como el agua sobrante.

$$I(t) = P_{pluvial}(t) - EI(t) - PPD(t) \quad [2.6]$$

- Luego se determina el agua disponible para evaporar, que es el equivalente a la humedad en el suelo al inicio del mes t ($H^1(t)$). Esta humedad se calcula como la humedad al final del mes anterior ($H(t-1)$) más el agua infiltrada ($I(t)$).

$$H^1(t) = H(t-1) + I(t) \quad [2.7]$$

- Lo primero a satisfacer con esta humedad es la evaporación real. Para esto se define un nivel crítico de humedad (H_{crit}), el cual se determina como un porcentaje de H_{max} (PORC, parámetro del modelo).

$$H_{crit} = PORC \cdot \frac{H_{max}}{100} \quad [2.8]$$

- Con H_{crit} conocido, se calcula la ER según la siguiente función (ec.2.9). Esta función condiciona la ER según el nivel de humedad disponible respecto del nivel crítico, y asume que cuando la humedad está por sobre dicho nivel, no existe dificultad de evaporación, de lo contrario la evapotranspiración real será proporcional a la ETP y al nivel de humedad respecto de H_{crit} .

$$ER(t) = \begin{cases} ETP(t) & \Leftrightarrow H^1(t) > H_{crit} \quad y \quad H^1(t) \geq ETP(t) \\ H^1(t) & \Leftrightarrow H^1(t) > H_{crit} \quad y \quad H^1(t) < ETP(t) \\ ETP(t) \cdot \frac{H^1(t)}{H_{crit}} & \Leftrightarrow H^1(t) \leq H_{crit} \quad y \quad H_{crit}(t) \geq ETP(t) \\ H^1(t) & \Leftrightarrow H^1(t) \leq H_{crit} \quad y \quad H_{crit}(t) < ETP(t) \end{cases} \quad [2.9]$$

- Luego, la humedad en el mes t ($H(t)$) es la humedad al inicio menos la ER.

$$H(t) = H^1(t) - ER(t) \quad [2.10]$$

- En el paso anterior se calcula el valor de $H(t)$ (variable que se asume igual a H_{\max} al inicio de los cálculos), por lo tanto se repiten todos los pasos de cálculo anteriores, pero con el valor de $H(t)$ calculado. Este proceso se repite de manera iterativa, hasta que la diferencia entre el valor de $H(t)$ calculado y $H_{\text{aux}}(t)$ sea menor que una tolerancia permitida (tol).

$$|H(t) - H_{\text{aux}}(t)| \leq \text{tol} \begin{cases} \text{Si} & \Rightarrow \text{ok} \\ \text{No} & \Rightarrow H_{\text{aux}}(t) = H(t), \text{ vuelve a ec.3} \end{cases} \quad [2.11]$$

- Con la humedad de la capa subsuperficial conocida, se puede determinar la percolación profunda, la cual se define como el exceso de agua disponible por sobre H_{\max} .

$$PP(t) = \begin{cases} 0 & \Leftrightarrow H(t) < H_{\max} \\ H(t) - H_{\max} & \Leftrightarrow H(t) \geq H_{\max} \end{cases} \quad [2.12]$$

- Luego, la percolación profunda total (PPT) será la suma de la PPD y PP.

$$PPT(t) = PPD(t) + PP(t) \quad [2.13]$$

- La PPT constituye el único aporte de agua al embalse subterráneo. Luego, la ES se define como una proporción del volumen embalsado (V). Esta proporción se define a través de un coeficiente de escorrentía subterránea ($C_k [t^{-1}]$, parámetro del modelo).

$$ES(t) = C_k \cdot V(t) \quad [2.14]$$

El volumen del embalse subterráneo depende de la recarga y de la escorrentía producida, por lo tanto, una manera de calcularlo es a partir de la forma discreta de la ecuación de balance de masa.

$$\frac{PPT(t) + PPT(t-1)}{2} - \frac{ES(t) + ES(t-1)}{2} = \frac{V(t) - V(t-1)}{\Delta t} \quad [2.15]$$

Luego, al evaluar la ec.2.14 en t y en $t-1$ y reemplazarla en la ec.2.15, se tiene lo siguiente.

$$ES(t) = \left(\frac{2 - C_k}{2 + C_k} \right) \cdot ES(t-1) + \left(\frac{C_k}{2 + C_k} \right) \cdot (PPT(t-1) + PPT(t)) \quad [2.16]$$

La ec.2.16 permite calcular la ES, en función de variables y parámetros conocidos. Además, la ecuación muestra que para valores bajos de C_k , la ES del mes t será muy similar a la del mes anterior, por lo que la ES presentará una variabilidad muy baja y su

valor medio estará condicionado al valor de partida de la ES, el cual es definido al inicio de la simulación. Por otra parte, un valor de C_k entre 0.4 y 1.0, entrega la máxima variabilidad a la ES.

- Finalmente el caudal de salida de la cuenca originado por la precipitación pluvial ($Q_{\text{producido}}$) se determina multiplicando la escorrentía total (ETOT) por el área de la cuenca (AR).

$$ETOT(t) = EI(t) + ES(t) \quad [2.17]$$

$$Q_{\text{producido}}(t) = AR \cdot ETOT(t) \quad [2.18]$$

Si bien, el modelo presentado es física y conceptualmente consistente, este presenta una inestabilidad matemática bajo determinadas condiciones de H_{max} y C_{max} , ya que para un coeficiente de escorrentía alto (mayor a 0.5) y una humedad máxima del suelo baja (menor a 100 [mm]), el modelo tiende a divergir, debido a que ambos parámetros se encuentran interrelacionados y son condicionantes de la relación de convergencia $|H(t) - H_{\text{aux}}(t)| \leq \text{tolerancia}$. Esto ocurre, porque un valor bajo de H_{max} entrega una alta variabilidad del coeficiente de escorrentía y por lo tanto alta variabilidad del agua infiltrada, luego puede ocurrir que la suma de el agua infiltrada mas la humedad del mes anterior menos la evaporación real sea mayor que H_{max} ($I(t) + H(t-1) - ER(t) > H_{\text{max}}$), en dicho caso el coeficiente de escorrentía calculado por el modelo será mayor que uno y luego la humedad del suelo tomaría un valor negativo, lo que produce la divergencia del modelo.

Este modelo considera sólo la precipitación de tipo pluvial y los procesos de escorrentía, evapotranspiración y almacenamiento asociados a la lluvia, estando restringida su aplicación a cuencas con régimen nival o con alteraciones hidromorfológicas. Como solución a esto se modifica la estructura del programa incluyendo una componente nival y una componente de extracciones y aportes, con lo que se generaliza su aplicación casi a cualquier tipo de cuenca.

8.7 Anexo N°7: Estadística Modelo Hidrológico

Tabla 8.12: Evapotranspiración potencial cota media, cuenca Camiña, en [mm].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80 - 2013/14	132	141	146	137	132	127	113	103	94	98	107	118

Fuente: Mapa de Evapotranspiraciones Potenciales de Chile, Dirección General de Aguas, 2000.

Tabla 8.13: Caudales Medios Mensuales, Estación Camarones en Chilpe, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
2005/06	-	-	0,62	0,96	2,00	1,70	1,37	0,71	0,85	1,25	1,29	1,57
2006/07	1,50	1,67	1,75	2,64	2,81	2,52	1,42	1,49	1,50	1,52	1,37	1,14
2007/08	1,04	1,09	1,07	5,09	3,12	2,05	2,41	-	0,13	0,13	0,13	0,13
2008/09	-	-	-	-	-	-	0,43	0,46	0,52	0,53	0,45	0,40
2009/10	-	-	0,30	0,30	0,33	0,31	0,34	0,48	0,35	0,33	0,31	0,30
2010/11	0,37	-	-	0,73	1,35	-1,00	0,69	0,73	0,84	1,05	-	0,63
2011/12	0,57	0,47	0,48	0,95	1,37	0,65	-	-	-	-	-	-
2012/13	-	-	-	-	0,34	0,28	-	-	-	-	-	-
2013/14	-	-	0,54	0,68	0,75	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Dirección General de Aguas.

Tabla 8.14: Precipitación Mensual, Chilcaya, en [mm].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1978/79	0,0	33,1	16,0	117,0	24,0	62,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1979/80	0,0	0,0	92,0	21,0	2,0	113,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1980/81	27,0	0,0	0,0	151,0	137,0	35,0	21,0	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0
1981/82	0,0	4,0	70,0	63,0	28,0	0,0	5,0	0,0	2,5	0,0	0,0	0,0
1982/83	10,0	10,0	4,0	5,0	16,0	12,0	5,0	0,0	0,0	0,0	3,0	17,0
1983/84	0,0	0,0	11,0	117,0	160,0	100,5	2,0	0,0	16,0	0,0	0,0	0,0
1984/85	5,0	42,0	0,0	99,5	328,9	167,0	35,0	8,0	0,0	0,0	0,0	6,0
1985/86	0,0	0,0	103,0	158,0	84,0	149,0	51,0	0,0	0,0	3,0	16,0	0,0
1986/87	0,0	15,0	108,0	218,0	120,0	0,0	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1987/88	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1988/89	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1989/90	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1990/91	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1991/92	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1992/93	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1993/94	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1994/95	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1995/96	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1996/97	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1997/98	2,2	6,0	31,2	89,7	78,9	56,3	9,2	1,1	1,2	2,4	1,8	1,9
1998/99	2,2	6,0	31,2	65,0	239,0	193,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1999/00	0,0	0,0	16,1	148,3	0,0	15,0	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2000/01	0,0	0,0	9,6	149,9	142,6	144,1	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2001/02	0,0	0,0	0,0	29,2	117,4	36,0	9,0	0,0	6,0	24,0	0,0	0,0
2002/03	2,0	15,0	24,0	39,0	20,0	87,5	6,6	8,0	0,0	13,5	0,0	0,0
2003/04	0,0	0,0	0,0	82,5	65,0	7,9	0,0	0,0	0,0	21,0	6,9	0,0
2004/05	0,0	0,0	13,0	78,0	91,9	17,4	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2005/06	0,0	0,0	27,0	120,0	35,7	58,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2006/07	4,0	2,0	20,5	99,5	57,0	37,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2007/08	0,0	12,0	3,0	125,7	3,0	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0
2008/09	0,0	0,0	8,6	4,0	52,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2009/10	0,0	11,0	26,9	44,7	41,9	24,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2010/11	0,0	0,0	0,0	84,4	57,9	5,0	12,5	0	0	2,4	0	0
2011/12	0,0	0,0	74,4	78,5	108,8	56,3	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2012/13	0,0	0,0	59,9	87,2	34,1	6,9	0,0	13,1	6,5	2,1	0,0	0,0
2013/14	0,0	4,4	67,4	65,4	2,0	0,3	5,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Valor rellenado con promedio

Fuente: Dirección General de Aguas.

8.8 Anexo N°8: Caudales Medios Mensuales Estimados

Tabla 8.15: Caudales Medios Mensuales, Embalse Caritaya, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,046	0,048	0,224	0,109	0,056	0,352	0,053	0,051	0,053	0,051	0,051	0,053
1980/81	0,073	0,053	0,051	0,380	0,733	0,195	0,122	0,059	0,061	0,059	0,067	0,061
1981/82	0,059	0,061	0,180	0,279	0,164	0,061	0,066	0,061	0,064	0,061	0,061	0,063
1982/83	0,064	0,069	0,063	0,062	0,079	0,073	0,067	0,060	0,062	0,060	0,060	0,076
1983/84	0,060	0,062	0,063	0,346	0,950	0,584	0,079	0,070	0,090	0,070	0,070	0,072
1984/85	0,071	0,129	0,070	0,304	8,513	4,686	0,669	0,122	0,092	0,089	0,089	0,094
1985/86	0,089	0,092	0,289	0,736	0,518	0,798	0,357	0,103	0,106	0,104	0,118	0,106
1986/87	0,103	0,113	0,356	2,326	1,342	0,116	0,130	0,116	0,120	0,116	0,116	0,119
1987/88	0,115	0,120	0,147	0,383	0,516	0,365	0,151	0,120	0,123	0,119	0,119	0,123
1988/89	0,119	0,124	0,150	0,386	0,520	0,368	0,155	0,123	0,127	0,123	0,122	0,126
1989/90	0,122	0,127	0,153	0,389	0,523	0,372	0,158	0,127	0,130	0,126	0,125	0,129
1990/91	0,125	0,130	0,156	0,392	0,527	0,375	0,161	0,130	0,133	0,129	0,129	0,133
1991/92	0,128	0,134	0,159	0,396	0,530	0,378	0,165	0,133	0,136	0,132	0,132	0,136
1992/93	0,131	0,137	0,163	0,399	0,534	0,381	0,168	0,136	0,140	0,135	0,135	0,139
1993/94	0,134	0,140	0,166	0,402	0,537	0,384	0,171	0,139	0,143	0,138	0,138	0,142
1994/95	0,138	0,143	0,169	0,405	0,540	0,387	0,174	0,142	0,146	0,141	0,141	0,145
1995/96	0,141	0,146	0,172	0,408	0,544	0,390	0,177	0,145	0,149	0,144	0,144	0,148
1996/97	0,144	0,149	0,175	0,411	0,547	0,393	0,180	0,148	0,152	0,147	0,147	0,152
1997/98	0,146	0,152	0,178	0,414	0,550	0,396	0,183	0,151	0,155	0,150	0,150	0,155
1998/99	0,149	0,155	0,181	0,321	3,590	4,046	0,338	0,164	0,169	0,163	0,163	0,168
1999/00	0,163	0,168	0,169	0,544	0,185	0,182	0,247	0,166	0,172	0,166	0,166	0,171
2000/01	0,165	0,171	0,167	0,526	0,887	0,852	0,347	0,178	0,183	0,177	0,177	0,183
2001/02	0,177	0,182	0,176	0,201	0,602	0,320	0,207	0,179	0,188	0,216	0,178	0,184
2002/03	0,178	0,191	0,204	0,252	0,242	0,464	0,207	0,190	0,185	0,190	0,178	0,184
2003/04	0,178	0,184	0,177	0,346	0,496	0,202	0,186	0,180	0,185	0,200	0,190	0,185
2004/05	0,179	0,184	0,183	0,361	0,632	0,239	0,195	0,181	0,187	0,181	0,181	0,187
2005/06	0,180	0,186	0,199	0,522	0,347	0,389	0,190	0,184	0,189	0,183	0,183	0,189
2006/07	0,183	0,189	0,195	0,450	0,464	0,317	0,191	0,185	0,191	0,184	0,184	0,190
2007/08	0,184	0,194	0,185	0,471	0,216	0,201	0,193	0,186	0,192	0,186	0,186	0,192
2008/09	0,185	0,191	0,187	0,186	0,302	0,190	0,191	0,185	0,191	0,184	0,184	0,190
2009/10	0,184	0,193	0,212	0,277	0,335	0,247	0,189	0,183	0,189	0,183	0,182	0,188
2010/11	0,182	0,188	0,182	0,358	0,461	0,197	0,206	0,184	0,189	0,184	0,183	0,189
2011/12	0,183	0,189	0,307	0,482	0,739	0,435	0,213	0,188	0,194	0,188	0,188	0,194
2012/13	0,187	0,193	0,271	0,496	0,346	0,203	0,196	0,199	0,203	0,190	0,188	0,195
2013/14	0,188	0,195	0,301	0,416	0,215	0,190	0,197	0,190	0,195	0,189	0,189	0,195

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.16: Caudales Medios Mensuales, Bajo embalse Caritaya, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,008	0,009	0,036	0,018	0,010	0,062	0,010	0,009	0,010	0,009	0,009	0,010
1980/81	0,012	0,009	0,009	0,067	0,130	0,033	0,020	0,011	0,011	0,011	0,012	0,011
1981/82	0,011	0,011	0,029	0,044	0,026	0,011	0,012	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
1982/83	0,011	0,012	0,011	0,011	0,014	0,012	0,012	0,011	0,011	0,011	0,011	0,013
1983/84	0,011	0,011	0,011	0,060	0,151	0,096	0,014	0,012	0,015	0,012	0,012	0,013
1984/85	0,012	0,021	0,012	0,052	1,102	0,582	0,088	0,021	0,016	0,015	0,015	0,016
1985/86	0,015	0,016	0,050	0,128	0,091	0,140	0,061	0,018	0,018	0,018	0,020	0,018
1986/87	0,018	0,019	0,061	0,254	0,164	0,020	0,022	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
1987/88	0,020	0,020	0,024	0,062	0,085	0,060	0,025	0,020	0,021	0,020	0,020	0,021
1988/89	0,020	0,021	0,025	0,062	0,086	0,060	0,026	0,021	0,021	0,021	0,020	0,021
1989/90	0,020	0,021	0,025	0,063	0,086	0,060	0,026	0,021	0,022	0,021	0,021	0,022
1990/91	0,021	0,022	0,025	0,063	0,086	0,061	0,026	0,022	0,022	0,021	0,021	0,022
1991/92	0,021	0,022	0,026	0,064	0,087	0,061	0,027	0,022	0,023	0,022	0,022	0,022
1992/93	0,022	0,023	0,026	0,064	0,087	0,062	0,027	0,022	0,023	0,022	0,022	0,023
1993/94	0,022	0,023	0,027	0,064	0,088	0,062	0,028	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
1994/95	0,022	0,023	0,027	0,065	0,088	0,062	0,028	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
1995/96	0,023	0,024	0,027	0,065	0,089	0,063	0,029	0,024	0,024	0,023	0,023	0,024
1996/97	0,023	0,024	0,028	0,066	0,089	0,063	0,029	0,024	0,025	0,024	0,024	0,024
1997/98	0,024	0,025	0,028	0,066	0,090	0,064	0,029	0,024	0,025	0,024	0,024	0,025
1998/99	0,024	0,025	0,029	0,050	0,404	0,412	0,044	0,026	0,027	0,026	0,026	0,027
1999/00	0,026	0,027	0,027	0,092	0,030	0,029	0,039	0,027	0,028	0,027	0,027	0,028
2000/01	0,027	0,028	0,027	0,089	0,154	0,148	0,057	0,029	0,030	0,029	0,029	0,030
2001/02	0,029	0,029	0,029	0,032	0,100	0,053	0,033	0,029	0,030	0,034	0,029	0,030
2002/03	0,029	0,031	0,033	0,040	0,039	0,074	0,033	0,031	0,030	0,031	0,029	0,030
2003/04	0,029	0,030	0,029	0,054	0,077	0,032	0,030	0,029	0,030	0,032	0,030	0,030
2004/05	0,029	0,030	0,029	0,056	0,104	0,039	0,031	0,029	0,030	0,029	0,029	0,030
2005/06	0,029	0,030	0,032	0,087	0,057	0,061	0,030	0,029	0,030	0,029	0,029	0,030
2006/07	0,029	0,030	0,031	0,074	0,076	0,050	0,031	0,030	0,031	0,030	0,030	0,030
2007/08	0,029	0,031	0,030	0,080	0,035	0,032	0,031	0,030	0,031	0,030	0,030	0,031
2008/09	0,030	0,031	0,030	0,030	0,048	0,030	0,031	0,030	0,031	0,029	0,029	0,030
2009/10	0,029	0,031	0,033	0,044	0,053	0,039	0,030	0,029	0,030	0,029	0,029	0,030
2010/11	0,029	0,030	0,029	0,056	0,072	0,031	0,033	0,029	0,030	0,029	0,029	0,030
2011/12	0,029	0,030	0,048	0,075	0,122	0,071	0,034	0,030	0,031	0,030	0,030	0,031
2012/13	0,030	0,031	0,042	0,079	0,055	0,032	0,031	0,031	0,032	0,030	0,030	0,031
2013/14	0,030	0,031	0,047	0,064	0,034	0,030	0,031	0,030	0,031	0,030	0,030	0,031

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.17: Caudales Medios Mensuales, Embalse Ajatama proyectado, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,049	0,051	0,241	0,117	0,060	0,379	0,057	0,055	0,057	0,055	0,055	0,057
1980/81	0,080	0,056	0,055	0,117	0,487	0,211	0,134	0,064	0,066	0,064	0,072	0,066
1981/82	0,063	0,066	0,198	0,308	0,180	0,066	0,071	0,066	0,069	0,066	0,066	0,068
1982/83	0,069	0,075	0,067	0,067	0,086	0,079	0,072	0,065	0,067	0,065	0,065	0,082
1983/84	0,065	0,067	0,068	0,374	1,151	0,689	0,086	0,076	0,098	0,076	0,076	0,078
1984/85	0,077	0,141	0,076	0,328	9,704	5,339	0,766	0,138	0,100	0,097	0,097	0,102
1985/86	0,096	0,100	0,311	0,841	0,579	0,960	0,425	0,112	0,115	0,113	0,128	0,115
1986/87	0,111	0,123	0,386	2,720	1,653	0,126	0,143	0,126	0,130	0,126	0,126	0,130
1987/88	0,125	0,131	0,160	0,416	0,556	0,397	0,165	0,131	0,134	0,130	0,129	0,133
1988/89	0,129	0,134	0,164	0,420	0,561	0,401	0,169	0,134	0,138	0,133	0,133	0,137
1989/90	0,133	0,138	0,167	0,423	0,565	0,405	0,172	0,138	0,141	0,137	0,137	0,141
1990/91	0,136	0,142	0,171	0,427	0,569	0,408	0,176	0,141	0,145	0,141	0,140	0,145
1991/92	0,140	0,146	0,175	0,431	0,572	0,412	0,180	0,145	0,149	0,144	0,144	0,148
1992/93	0,143	0,149	0,178	0,434	0,576	0,415	0,183	0,148	0,152	0,148	0,147	0,152
1993/94	0,147	0,153	0,182	0,438	0,580	0,419	0,187	0,152	0,156	0,151	0,151	0,155
1994/95	0,150	0,156	0,185	0,441	0,584	0,422	0,190	0,155	0,159	0,154	0,154	0,159
1995/96	0,154	0,160	0,188	0,444	0,588	0,425	0,194	0,159	0,163	0,158	0,157	0,162
1996/97	0,157	0,163	0,192	0,448	0,591	0,429	0,197	0,162	0,166	0,161	0,161	0,166
1997/98	0,160	0,167	0,195	0,451	0,595	0,432	0,201	0,165	0,170	0,164	0,164	0,169
1998/99	0,164	0,170	0,198	0,354	4,180	4,740	0,381	0,179	0,185	0,179	0,179	0,184
1999/00	0,178	0,184	0,185	0,591	0,202	0,199	0,272	0,182	0,188	0,181	0,181	0,187
2000/01	0,181	0,187	0,183	0,285	0,655	0,930	0,380	0,194	0,200	0,194	0,194	0,200
2001/02	0,193	0,199	0,193	0,220	0,656	0,349	0,227	0,195	0,206	0,238	0,195	0,201
2002/03	0,195	0,210	0,224	0,277	0,266	0,506	0,226	0,208	0,202	0,208	0,195	0,201
2003/04	0,195	0,201	0,194	0,382	0,547	0,222	0,203	0,197	0,203	0,220	0,208	0,202
2004/05	0,196	0,202	0,200	0,398	0,691	0,262	0,214	0,199	0,205	0,198	0,198	0,204
2005/06	0,198	0,204	0,218	0,569	0,379	0,428	0,208	0,201	0,207	0,201	0,200	0,207
2006/07	0,201	0,207	0,214	0,491	0,507	0,349	0,209	0,202	0,209	0,202	0,202	0,208
2007/08	0,201	0,213	0,203	0,511	0,236	0,220	0,211	0,204	0,211	0,204	0,204	0,210
2008/09	0,203	0,210	0,205	0,204	0,332	0,208	0,209	0,202	0,209	0,202	0,202	0,208
2009/10	0,201	0,212	0,232	0,306	0,369	0,272	0,207	0,201	0,207	0,200	0,200	0,206
2010/11	0,200	0,206	0,199	0,395	0,509	0,216	0,226	0,201	0,208	0,201	0,201	0,207
2011/12	0,200	0,207	0,339	0,527	0,799	0,475	0,233	0,207	0,213	0,206	0,206	0,213
2012/13	0,206	0,212	0,299	0,542	0,378	0,223	0,215	0,218	0,223	0,209	0,207	0,214
2013/14	0,207	0,214	0,333	0,460	0,237	0,208	0,217	0,208	0,215	0,207	0,207	0,214

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.18: Caudales Medios Mensuales, Bajo Embalse Ajatama proyectado, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,007	0,007	0,029	0,015	0,008	0,051	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
1980/81	0,010	0,008	0,008	0,056	0,108	0,027	0,016	0,009	0,009	0,009	0,010	0,009
1981/82	0,009	0,009	0,023	0,035	0,021	0,009	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
1982/83	0,009	0,010	0,009	0,009	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009	0,009	0,011
1983/84	0,009	0,009	0,009	0,050	0,126	0,079	0,011	0,010	0,012	0,010	0,010	0,010
1984/85	0,010	0,017	0,010	0,040	0,764	0,382	0,058	0,017	0,013	0,013	0,013	0,013
1985/86	0,013	0,013	0,039	0,103	0,073	0,113	0,049	0,014	0,015	0,014	0,016	0,015
1986/87	0,014	0,015	0,049	0,151	0,107	0,016	0,018	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
1987/88	0,016	0,017	0,019	0,048	0,066	0,047	0,020	0,016	0,017	0,016	0,016	0,017
1988/89	0,016	0,017	0,020	0,049	0,067	0,047	0,020	0,017	0,017	0,017	0,016	0,017
1989/90	0,016	0,017	0,020	0,049	0,067	0,047	0,021	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
1990/91	0,017	0,017	0,020	0,049	0,067	0,048	0,021	0,017	0,018	0,017	0,017	0,018
1991/92	0,017	0,018	0,020	0,049	0,068	0,048	0,021	0,017	0,018	0,017	0,017	0,018
1992/93	0,017	0,018	0,021	0,050	0,068	0,048	0,022	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
1993/94	0,018	0,018	0,021	0,050	0,068	0,048	0,022	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
1994/95	0,018	0,019	0,021	0,050	0,068	0,049	0,022	0,018	0,019	0,018	0,018	0,019
1995/96	0,018	0,019	0,022	0,050	0,069	0,049	0,022	0,019	0,019	0,018	0,018	0,019
1996/97	0,018	0,019	0,022	0,051	0,069	0,049	0,023	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
1997/98	0,019	0,019	0,022	0,051	0,069	0,049	0,023	0,019	0,020	0,019	0,019	0,019
1998/99	0,019	0,020	0,022	0,039	0,253	0,225	0,030	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
1999/00	0,021	0,021	0,021	0,074	0,023	0,023	0,030	0,021	0,022	0,021	0,021	0,022
2000/01	0,021	0,022	0,021	0,073	0,127	0,122	0,046	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
2001/02	0,022	0,023	0,022	0,025	0,081	0,042	0,026	0,023	0,024	0,027	0,023	0,023
2002/03	0,023	0,024	0,026	0,031	0,030	0,057	0,026	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023
2003/04	0,023	0,023	0,023	0,042	0,060	0,025	0,023	0,023	0,023	0,025	0,024	0,023
2004/05	0,023	0,023	0,023	0,044	0,081	0,031	0,025	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2005/06	0,023	0,023	0,025	0,070	0,045	0,048	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2006/07	0,023	0,024	0,024	0,058	0,059	0,039	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2007/08	0,023	0,024	0,023	0,065	0,027	0,025	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2008/09	0,023	0,024	0,023	0,023	0,037	0,024	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2009/10	0,023	0,024	0,026	0,034	0,041	0,030	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,023
2010/11	0,023	0,023	0,023	0,043	0,055	0,024	0,025	0,023	0,024	0,023	0,023	0,023
2011/12	0,023	0,023	0,037	0,058	0,097	0,057	0,026	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024
2012/13	0,023	0,024	0,033	0,061	0,043	0,025	0,024	0,024	0,025	0,023	0,023	0,024
2013/14	0,023	0,024	0,036	0,050	0,026	0,023	0,024	0,023	0,024	0,023	0,023	0,024

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.19: Caudales Medios Mensuales, Quebrada Ajatama, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,056	0,058	0,270	0,132	0,068	0,430	0,065	0,063	0,065	0,063	0,063	0,065
1980/81	0,090	0,064	0,063	0,173	0,595	0,238	0,150	0,073	0,075	0,073	0,082	0,075
1981/82	0,072	0,075	0,221	0,343	0,201	0,075	0,081	0,075	0,078	0,075	0,075	0,077
1982/83	0,078	0,085	0,076	0,076	0,097	0,089	0,082	0,074	0,076	0,074	0,074	0,093
1983/84	0,074	0,076	0,077	0,424	1,277	0,768	0,097	0,086	0,110	0,086	0,086	0,088
1984/85	0,087	0,158	0,086	0,368	10,468	5,721	0,824	0,155	0,113	0,110	0,110	0,115
1985/86	0,109	0,113	0,350	0,944	0,652	1,073	0,474	0,126	0,130	0,127	0,144	0,130
1986/87	0,125	0,138	0,435	2,871	1,760	0,142	0,161	0,142	0,146	0,142	0,142	0,146
1987/88	0,141	0,148	0,179	0,464	0,622	0,444	0,185	0,147	0,151	0,146	0,145	0,150
1988/89	0,145	0,151	0,184	0,469	0,628	0,448	0,189	0,151	0,155	0,150	0,149	0,154
1989/90	0,149	0,155	0,187	0,472	0,632	0,452	0,193	0,155	0,158	0,154	0,154	0,158
1990/91	0,153	0,159	0,191	0,476	0,636	0,456	0,197	0,158	0,163	0,158	0,157	0,163
1991/92	0,157	0,164	0,195	0,480	0,640	0,460	0,201	0,162	0,167	0,161	0,161	0,166
1992/93	0,160	0,167	0,199	0,484	0,644	0,463	0,205	0,166	0,170	0,166	0,165	0,170
1993/94	0,165	0,171	0,203	0,488	0,648	0,467	0,209	0,170	0,174	0,169	0,169	0,173
1994/95	0,168	0,175	0,206	0,491	0,652	0,471	0,212	0,173	0,178	0,172	0,172	0,178
1995/96	0,172	0,179	0,210	0,494	0,657	0,474	0,216	0,178	0,182	0,176	0,175	0,181
1996/97	0,175	0,182	0,214	0,499	0,660	0,478	0,220	0,181	0,185	0,180	0,180	0,185
1997/98	0,179	0,186	0,217	0,502	0,664	0,481	0,224	0,184	0,190	0,183	0,183	0,188
1998/99	0,183	0,190	0,220	0,393	4,433	4,965	0,411	0,200	0,206	0,200	0,200	0,205
1999/00	0,199	0,205	0,206	0,665	0,225	0,222	0,302	0,203	0,210	0,202	0,202	0,209
2000/01	0,202	0,209	0,204	0,358	0,782	1,052	0,426	0,217	0,223	0,217	0,217	0,223
2001/02	0,215	0,222	0,215	0,245	0,737	0,391	0,253	0,218	0,230	0,265	0,218	0,224
2002/03	0,218	0,234	0,250	0,308	0,296	0,563	0,252	0,232	0,225	0,232	0,218	0,224
2003/04	0,218	0,224	0,217	0,424	0,607	0,247	0,226	0,220	0,226	0,245	0,232	0,225
2004/05	0,219	0,225	0,223	0,442	0,772	0,293	0,239	0,222	0,229	0,221	0,221	0,228
2005/06	0,221	0,227	0,243	0,639	0,424	0,476	0,232	0,224	0,231	0,224	0,223	0,231
2006/07	0,224	0,231	0,238	0,549	0,566	0,388	0,233	0,225	0,233	0,225	0,225	0,232
2007/08	0,224	0,237	0,226	0,576	0,263	0,245	0,235	0,227	0,235	0,227	0,227	0,234
2008/09	0,226	0,234	0,228	0,227	0,369	0,232	0,233	0,225	0,233	0,225	0,225	0,232
2009/10	0,224	0,236	0,258	0,340	0,410	0,302	0,231	0,224	0,231	0,223	0,223	0,229
2010/11	0,223	0,229	0,222	0,438	0,564	0,240	0,251	0,224	0,232	0,224	0,224	0,230
2011/12	0,223	0,230	0,376	0,585	0,896	0,532	0,259	0,230	0,237	0,229	0,229	0,237
2012/13	0,229	0,236	0,332	0,603	0,421	0,248	0,239	0,242	0,248	0,232	0,230	0,238
2013/14	0,230	0,238	0,369	0,510	0,263	0,231	0,241	0,231	0,239	0,230	0,230	0,238

* corresponde a la suma de los caudales de Embalse Ajatama y Bajo embalse Ajatama.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8.20: Caudales Medios Mensuales, Cuenca Intermedia, en [m³/s].

AÑO	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
1979/80	0,016	0,016	0,066	0,033	0,019	0,113	0,018	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017
1980/81	0,023	0,017	0,017	0,123	0,238	0,061	0,037	0,019	0,020	0,019	0,021	0,020
1981/82	0,019	0,020	0,052	0,080	0,048	0,020	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
1982/83	0,020	0,022	0,020	0,020	0,025	0,023	0,021	0,019	0,020	0,019	0,019	0,024
1983/84	0,019	0,020	0,020	0,110	0,277	0,175	0,025	0,022	0,028	0,022	0,022	0,023
1984/85	0,023	0,038	0,022	0,093	1,962	1,030	0,156	0,039	0,029	0,028	0,028	0,029
1985/86	0,028	0,029	0,091	0,233	0,165	0,255	0,111	0,032	0,033	0,032	0,036	0,033
1986/87	0,032	0,035	0,112	0,444	0,290	0,036	0,040	0,036	0,037	0,036	0,036	0,037
1987/88	0,036	0,037	0,044	0,112	0,154	0,108	0,046	0,037	0,038	0,037	0,037	0,038
1988/89	0,037	0,038	0,045	0,113	0,155	0,109	0,047	0,038	0,039	0,037	0,037	0,039
1989/90	0,037	0,039	0,045	0,114	0,156	0,110	0,047	0,038	0,039	0,038	0,038	0,039
1990/91	0,038	0,040	0,046	0,115	0,157	0,110	0,048	0,039	0,040	0,039	0,039	0,040
1991/92	0,039	0,040	0,047	0,115	0,157	0,111	0,049	0,040	0,041	0,040	0,040	0,041
1992/93	0,039	0,041	0,048	0,116	0,158	0,112	0,050	0,041	0,042	0,040	0,040	0,042
1993/94	0,040	0,042	0,048	0,117	0,159	0,112	0,050	0,041	0,042	0,041	0,041	0,042
1994/95	0,041	0,043	0,049	0,117	0,160	0,113	0,051	0,042	0,043	0,042	0,042	0,043
1995/96	0,042	0,043	0,050	0,118	0,161	0,114	0,052	0,043	0,044	0,042	0,042	0,044
1996/97	0,042	0,044	0,050	0,119	0,161	0,115	0,052	0,043	0,045	0,043	0,043	0,044
1997/98	0,043	0,045	0,051	0,119	0,162	0,115	0,053	0,044	0,045	0,044	0,044	0,045
1998/99	0,044	0,045	0,052	0,090	0,709	0,711	0,078	0,048	0,049	0,048	0,048	0,049
1999/00	0,048	0,049	0,049	0,168	0,054	0,053	0,071	0,049	0,050	0,049	0,049	0,050
2000/01	0,048	0,050	0,049	0,163	0,282	0,271	0,104	0,052	0,054	0,052	0,052	0,054
2001/02	0,052	0,054	0,052	0,058	0,183	0,096	0,060	0,052	0,055	0,062	0,052	0,054
2002/03	0,052	0,056	0,059	0,072	0,070	0,133	0,061	0,056	0,054	0,055	0,052	0,054
2003/04	0,052	0,054	0,052	0,098	0,140	0,059	0,054	0,053	0,054	0,058	0,055	0,054
2004/05	0,052	0,054	0,053	0,102	0,188	0,071	0,057	0,053	0,055	0,053	0,053	0,055
2005/06	0,053	0,054	0,058	0,159	0,103	0,111	0,055	0,054	0,055	0,053	0,053	0,055
2006/07	0,053	0,055	0,057	0,135	0,137	0,091	0,056	0,054	0,055	0,054	0,054	0,055
2007/08	0,053	0,056	0,054	0,146	0,063	0,058	0,056	0,054	0,056	0,054	0,054	0,056
2008/09	0,054	0,056	0,054	0,054	0,086	0,055	0,055	0,054	0,055	0,054	0,053	0,055
2009/10	0,053	0,056	0,061	0,079	0,095	0,070	0,055	0,053	0,055	0,053	0,053	0,055
2010/11	0,053	0,054	0,053	0,101	0,130	0,057	0,059	0,053	0,055	0,053	0,053	0,055
2011/12	0,053	0,054	0,087	0,136	0,221	0,130	0,061	0,054	0,056	0,054	0,054	0,056
2012/13	0,054	0,056	0,077	0,144	0,100	0,058	0,056	0,057	0,058	0,055	0,054	0,056
2013/14	0,054	0,056	0,085	0,117	0,062	0,054	0,057	0,054	0,056	0,054	0,054	0,056

Fuente: Elaboración propia.

8.9 Anexo N°9: Datos Base Cálculos de Demandas de Agua

Tabla 8.21: Evapotranspiración Potencial [mm/mes].

Sector	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Alto	113,4	103,7	108,6	118,2	130,7	145,6	155,4	161,7	151,5	146,1	140,6	124,5
Medio y Bajo	69,3	58,1	60,2	74,2	93,1	116,2	131,6	150,5	145,6	125,3	118,9	89,8

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

Tabla 8.22: Coeficientes de Cultivo, Kc.

Cultivos	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Trigo	-	0,64	0,65	0,83	1,06	1,11	1,11	1,04	0,64	-	-	-
Cebolla	-	-	0,7	0,85	1,0	1,0	1,0	1,0	-	-	-	-
Maíz Choclo	0,96	0,88	-	-	-	-	-	-	0,45	0,65	0,8	0,96
Zanahoria	-	-	-	-	-	0,4	0,75	0,8	1,0	1,0	0,7	-
Huerta						0,4	0,75	0,8	1,0	1,0	0,7	
Alfalfa	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Fuente: Diagnóstico Definitivo Reparación embalse Caritaya, SMI, 2008.

8.9.1 Eficiencias de Riego

Las eficiencias de riego consideradas para los diferentes cultivos asignados en situación actual, corresponden a valores que se producen a nivel potrero. Estas eficiencias varían según el método de riego utilizado, sea éste gravitacional o tecnificado.

A cada uno de los métodos de riego se les asignó un determinado coeficiente de eficiencia. Estos coeficientes, debido a la imposibilidad de hacer experiencias a lo largo del estudio, se estimaron de acuerdo a la experiencia de los consultores, y tomando como base los coeficientes contenidos en la Ley No. 18.450, de subsidio al riego, las cuales fueron comparadas con las declaradas por los propios agricultores en la encuesta de Estudio de Casos.

De esta forma en el cultivo de trigo se ha considerado una eficiencia de 90% al ser regado por pivote, en hortalizas de 50% debido a que el riego se efectúa en pequeños paños de suelo en forma muy controlada. Finalmente, en el cultivo de alfalfa se ha considerado una eficiencia de 30%, correspondiente al método de riego por tendido.

8.10 Anexo N°10: Costos de inversión embalse Ajatama

Tabla 8.23: Detalle de inversión, Construcción embalse Aajatama.

Item	Descripción	Unidad	Precio unitario	Cantidad	Valor
1.	Instalación de Faenas	Gl	1.500.000	1	1.500.000
2.	Muro Presa				
2.1.	Excavaciones				
2.1.1	Escarpe	m ³	2.600	244200	634.920.000
2.1.2	Excavacion fundación	m ³	3.200	122100	390.720.000
2.1.3	Excavacion Plinto	m ³	11.600	578	6.704.800
2.2	Relleno	m ³	5.200	2.478.500	12.888.200.000
2.3	Otros presa				
2.3.1	Hormigón Pantalla	m ³	155.000	23.940	3.710.700.000
2.3.2	Hormigón Plinto	m ³	220.000	580	127.600.000
2.3.3	Hormigón Parapeto	m ³	267.000	417	111.339.000
2.3.4	Fierro Pantalla	m ³	1.300	2.034.900	2.645.370.000
2.3.5	Fierro Plinto	m ³	1.300	49.300	64.090.000
2.3.6	Fierro Parapeto	m ³	1.300	35.445	46.078.500
2.3.7	Cortina de inyecciones	ml	5.100.000	960	4.896.000.000
3.	Vertedero	Gl	1.140.000.000	1	1.140.000.000
4.	Obras de entrega y desvío	Gl	2.050.000.000	1	2.050.000.000
5.	Instrumentalización	Gl	330.000.000	1	330.000.000
6.	Equipamiento electrico y mecanico	Gl	1.440.000.000	1	1.440.000.000
7.	Miscelaneos	Gl	1.400.000.000	1	1.400.000.000
8.	Manejo y seguimiento ambiental	Gl	2.200.000.000	1	2.200.000.000
Total					34.083.222.300

Fuente: Elaboración propia, ref. Evaluación preliminar de costos embalse Pocuro, MN Ingenieros, 2016.