

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA  
INGENIERÍA CIVIL EN GEOGRAFÍA**

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA FACTIBILIDAD DE ABASTECIMIENTO  
DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO, SEGÚN EL COMPORTAMIENTO  
ACTUAL Y FUTURO DE LA DEMANDA, EN EL VALLE DEL RÍO COPIAPÓ,  
III REGIÓN**

**LENA ORELLANA GALARCE  
ALVARO SAN MARTÍN NARVÁEZ.**

**2003**

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA  
INGENIERÍA CIVIL EN GEOGRAFÍA**

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA FACTIBILIDAD DE ABASTECIMIENTO  
DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO, SEGÚN EL COMPORTAMIENTO  
ACTUAL Y FUTURO DE LA DEMANDA, EN EL VALLE DEL RÍO COPIAPÓ,  
III REGIÓN**

**Memoria Para Optar al Título de:  
Ingeniero Civil en Geografía**

**Profesor Guía : Víctor Pantoja M**

**Alumnos : Lena Orellana G.**

**Alvaro San Martín N.**

**Santiago, Marzo 2003**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por entregarme su fuerza y su sabiduría  
para enfrentar un nuevo desafío.

A Dios, por enviarme una luz a mi vida  
(Milena).

A Dios por enseñarme que los sueños pueden  
ser realidad.

A Dios, por conceder cuando se le pide.

A Dios, por enviarme pilares en momentos  
difíciles.

A Dios, por enseñarme el valor de las cosas.

A Dios, por su inmenso Amor...

A Ricardo, Margarita, Luis, Jorge, Puntito,  
Diego y otros olvidados, gracias por aparecer en  
Mi camino.

**Lena**

A mi madre:  
Pilar fundamental de lo construido, debido a su  
Constante apoyo, motivación y sacrificio.

**Álvaro**

## RESUMEN

En su estado natural el agua es un bien de propiedad común, ya que su uso no es controlado por ningún agente en forma exclusiva, por lo que se puede tender a la sobreexplotación del recurso. En general, las regulaciones que se aplican para asignar el recurso entre distintos usuarios buscan que dicha asignación sea eficiente y evitar que se agote rápidamente en presencia de una demanda creciente. El riesgo de agotar una fuente de agua es particularmente concreto y real en el caso de las aguas subterráneas que se pueden explotar a tasas superiores a los caudales de recarga.

El presente estudio se aplica a la III Región, específicamente en el valle del río Copiapó (tramo Embalse Lautaro-Copiapó) y consiste en definitiva, en considerar variables de oferta y demanda de agua en forma integrada, para determinar las condiciones actuales y las posibilidades futuras referente a las necesidades y disponibilidades hídricas subterráneas, todo esto en el contexto de proyectar el balance hídrico en condiciones transientes (dinámicas), para así aclarar la disyuntiva respecto a la escasez o no del recurso en el valle del río Copiapó.

Se plantea a modo de hipótesis que el recurso hídrico subterráneo en el valle del río Copiapó no sería un recurso escaso a corto plazo (6 a 10 años), considerando las proyecciones de demandas y el balance hídrico transiente del acuífero. Para esto se plantea como objetivo implementar dos modelos de balance hídrico del acuífero (el primero proyectando la demanda con similar comportamiento al actual, y el segundo en situación de sequía) para simular los efectos en la disponibilidad del recurso. El software Visual Modflow se ocupa como plataforma para la simulación hidrogeológica.

Los resultados del estudio indican que el acuífero es capaz de satisfacer las demandas en el tiempo, independientemente del escenario en que esto ocurra. Lo anterior se debe a que el acuífero muestra signos de recuperación de niveles en algunos sectores y en otros mecanismos de autocompensación que le permiten mitigar en parte los desbalances. Todo esto es posible en el corto plazo y quizás hasta en un mediano plazo, ya que las reservas acuíferas en el peor de los casos alcanzan para poco más de 95 años, esto sin períodos de abundancia de aguas superficiales.



## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1. INTRODUCCIÓN_____	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del Problema.....	5
1.3 Hipótesis.....	7
1.4 Objetivos.....	8
1.5 Metodología General.....	9
2. MARCO TEÓRICO_____	10
2.1 Conceptos Básicos en Hidrología Subterránea.....	10
2.2 Criterios Técnico-Jurídicos de Aprovechamiento del Agua Subterránea.....	35
2.3 Modelamiento del Agua Subterránea.....	41
3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO_____	55
3.1 Marco General.....	55
3.2 Metodologías Específicas.....	56
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN_	65
4.1 Información para la Modelación.....	65
4.2 Construcción del Modelo.....	96
5. GENERACIÓN Y MODELAMIENTO DE ESCENARIOS FUTUROS_____	124
5.1 Proyección de Demandas.....	124
5.2 Generación de Escenarios.....	134
6. EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO_____	135
6.1 Introducción.....	135
6.2 Escenario Tendencial.....	137
6.3 Escenario con Período de Sequía.....	142
6.4 Comparación entre Escenarios.....	150
6.5 Análisis de Factibilidad.....	159
7. CONCLUSIONES_____	161
8. BIBLIOGRAFÍA_____	165
9. ANEXOS_____	167

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Ubicación de la Zona de Estudio.....	4
Figura 2.1 Ciclo Hidrológico.....	10
Figura 2.2 Ciclo Hidrológico.....	12
Figura 2.3 Tipos de Acuíferos.....	18
Figura 2.4 Permeámetro de Carga Constante.....	21
Figura 2.4 Volumen Elemental Representativo.....	25
Figura 2.6 Tipos de Pozos.....	30
Figura 2.6 Efectos de las Captaciones en el Nivel de Agua de los Acuíferos.....	32
Figura 2.7 Proceso de Modelación.....	43
Figura 2.8 Esquema de Simulación de Visual Modflow.....	51
Figura 2.9 Esquema General del Programa SIMAC-4.....	54
Figura 3.1 Metodología General.....	55
Figura 3.2 Esquema Metodológico de la Construcción del Modelo.....	56
Figura 3.3 Esquema Metodológico de la Aplicación.....	60
Figura 4.1 Esquema General de datos de entrada que requiere el Modelo.....	65
Figura 4.2 Topografía del valle del río Copiapó.....	66
Figura 4.3 Profundidad del Basamento Rocoso v/s Cota de la Superficie.....	68
Figura 4.4 Perfil Estratigráfico Longitudinal.....	71
Figura 4.5 Perfil Longitudinal de Transmisividad Media a lo largo del valle.....	72
Figura 4.6 Perfil Longitudinal del Nivel Estático Medio a lo largo del valle.....	74
Figura 4.7 Correlación Ancho del valle v/s Nivel Estático.....	74
Figura 4.8 Ubicación de las Estaciones Pluviométricas.....	77
Figura 4.9 Precipitación Media Anual de Estaciones de la Cuenca Copiapó.....	78
Figura 4.10 Ubicación de las Estaciones Fluviométricas.....	81
Figura 4.11 Resumen de caudales Medios por Estación.....	82
Figura 4.12 Caudal Medio en periodo Verano – Invierno por estaciones.....	82
Figura 4.13 Diagrama Unifilar de red de Canales del valle de Copiapó.....	84
Figura 4.14 Caudal Extraído del río Copiapó y sus Afluentes.....	85
Figura 4.15 Superficie Total por Tipo de Cultivo.....	87
Figura 4.16 Evapotranspiración y Evapotranspiración por Sector.....	89

	Página
Figura 4.17 Ubicación de Pozos en la Cuenca del río Copiapó.....	91
Figura 4.18 Clasificación de Pozos según Usos.....	92
Figura 4.19 Descarga de Acuífero por Vertientes.....	94
Figura 4.20 Funcionamiento del Embalse Subterráneo.....	95
Figura 4.21 Límites de la Zona Modelada.....	98
Figura 4.22 Basamento Rocoso.....	101
Figura 4.23 Perfil Longitudinal Valle Copiapó.....	102
Figura 4.24 Perfil Transversal Valle Copiapó.....	103
Figura 4.25 Ubicación de Pozos y Norias en el Modelo.....	108
Figura 4.26 Contraste de Niveles Observados y Simulados.....	119
Figura 6.1 Nivel Piezométrico Medio en Periodo Observado y Proyectado.....	138
Figura 6.2 Nivel Piezométrico Medio en Periodo Observado y Proyectado.....	144
Figura 6.3 Niveles Piezométricos Esperados La Puerta-Mal Paso.....	150
Figura 6.4 Niveles Piezométricos Esperados Mal Paso-Copiapó.....	154
Figura 6.5 Variación Anual de Niveles.....	160

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 4.1 Volúmenes Acuíferos y Agua Embalsada Lautaro-La Puerta.....	76
Tabla 4.2 Volúmenes Acuíferos y Agua Embalsada La Puerta-Mal Paso.....	76
Tabla 4.3 Volúmenes Acuíferos y Agua Embalsada Mal Paso-Copiapó.....	76
Tabla 4.4 Estaciones Pluviométricas.....	77
Tabla 4.5 Periodos Secos-Húmedos Anual.....	79
Tabla 4.6 Estaciones Fluviométricas.....	80
Tabla 4.7 Infiltraciones del Río Copiapó.....	83
Tabla 4.8 Infiltraciones de Canales.....	86
Tabla 4.9 Infiltraciones por Riego Predial.....	87
Tabla 4.10 Evapotranspiración de Cultivos por Sector.....	88
Tabla 4.11 Cuadro Resumen de Evapotranspiración y Evaporación en zona de Vegas.....	89
Tabla 4.12 Pozos y Bombeos según Catastro 1995.....	92

Tabla 4.13 Pozos y Bombeos según Catastro 2001 .....	93
Tabla 4.14 Discretización Temporal considerada para el Modelo .....	104
Tabla 4.15 Pasos de Tiempo .....	105
Tabla 4.16 Resumen de Pozos de Observación .....	112
Tabla 4.17 Balance por Sector .....	112
Tabla 4.18 Propiedades de Recarga .....	114
Tabla 4.19 Propiedades de Evapotranspiración .....	115
Tabla 4.20 Condiciones de Nivel .....	116
Tabla 4.21 Coeficiente de Almacenamiento .....	117
Tabla 4.22 Propiedades de Permeabilidad .....	117
Tabla 4.23 Niveles Calculados en Pozos de Observación .....	118
Tabla 4.24 Balance de Masa en la Zona Modelada .....	122
Tabla 5.1 Superficie de Cultivo .....	125
Tabla 5.2 Volumen de Bombeos .....	125
Tabla 5.3 Caudal de Extracción Proyectada .....	126
Tabla 5.4 Pozos Seleccionados .....	127
Tabla 5.5 Demandas Mineras Proyectadas .....	129
Tabla 5.6 Demanda de Agua Potable .....	131
Tabla 5.7 Demanda de Agua Potable Proyectada .....	132
Tabla 5.8 Punto de Captación .....	132
Tabla 5.9 Discretización Temporal del Escenario Generado .....	133
Tabla 6.1 Variación Anual Media del Nivel Estático .....	137
Tabla 6.2 Niveles Piezométricos Medios en Pozos de Observación .....	138
Tabla 6.3 Balance de Masa en la Zona Modelada. Escenario Tendencial .....	140
Tabla 6.4 Variación Anual Media del Nivel Estático .....	142
Tabla 6.5 Niveles Proyectados Esperados en Pozos de Observación .....	143
Tabla 6.6 Balance de Masa en la Zona Modelada. Escenario en Sequía .....	145
Tabla 6.7 Caudales Esperados para Sector La Puerta-Mal Paso .....	147
Tabla 6.8 Caudales Esperados para Sector La Puerta-Mal Paso .....	148
Tabla 6.9 Variación Anual por Pozo .....	159

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Antecedentes**

El valle del río Copiapó está ubicado en la III Región, Provincia de Atacama, aproximadamente entre los 26° 30' y 28° 30' de latitud sur y los 69° y 71° de longitud Oeste (figura 1.1). En este valle existe un amplio embalse subterráneo, con rellenos que van desde los 40 metros a más de 500 metros de profundidad. El funcionamiento del embalse subterráneo está fundamentalmente condicionado por los recursos superficiales disponibles, en especial por el caudal que lleve el río Copiapó y sus afluentes. Las infiltraciones desde el sistema de riego, el aporte de las quebradas laterales, y principalmente, del río, son las fuentes de recarga más importantes del acuífero. Las descargas más importantes son producto de extracciones de agua y afloramientos de vertientes.

En el valle del río Copiapó las actividades productivas de mayor importancia son la minería y la agricultura. La minería se basa principalmente en la extracción de hierro y en la extracción y procesamiento de cobre donde destaca la fundición de Paipote en las cercanías de la ciudad de Copiapó. La actividad agrícola se localiza en las comarcas irrigadas por el río Copiapó y en las laderas del valle. Es importante la producción de plantas forrajeras, frutas de calidad y vid, las que en su mayoría se exportan a mercados extranjeros.

De acuerdo a lo anterior, el estudio y conocimiento cuantitativo del recurso hídrico (real y potencial), constituye un antecedente necesario para conocer cómo éste se presenta en el sector de Copiapó, base importante que anima y permite el desenvolvimiento de la vida natural y la generación de actividades económicas fundamentales para el desarrollo regional y nacional.

En la actualidad, existen varios estudios enfocados a cuantificar los caudales a través de balances hídricos, cuyo objetivo principal se enmarca en obtener parámetros que determinen la oferta de este recurso. Por otro lado, existen estudios enfocados a la demanda de agua que son referidos a proyecciones de esta misma a escala nacional. Adicionalmente, existen estudios, que no son utilizados en la actualidad, que integran ambas variables proyectadas (oferta-demanda). A continuación, se detallan los principales enfoques de algunos de éstos:

- Análisis de los Recursos Hidrogeológicos; Dirección General de Aguas (en adelante DGA)- Álamos y Peralta Ing.

Entre 1985 y 1987 la firma Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda., efectuó para la DGA el “Análisis de los Recursos Hidrogeológicos del Valle del Río Copiapó”, en el cual se construyeron y operaron 8 modelos hidrogeológicos de diversos sectores acuíferos, evaluando las recargas y descargas hacia y desde el acuífero, analizándose las implicancias de la explotación del acuífero con las fluctuaciones periódicas del nivel estático.

En lo que respecta a la relación demanda-oferta, los datos de demandas de agua, del año del estudio, son calculados en función de la superficie cultivada y las proyecciones de demandas se estiman por regresión lineal de superficies cultivadas en el tiempo; con estos datos más los obtenidos en el comportamiento hidrogeológico del acuífero se realizan balances de agua.

- Análisis de los Recursos Hídricos; DGA – Instituto de Planificación (IPLA)

El estudio “Análisis Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile” realizado en 1994, analiza las demandas actuales y futuras sobre los recursos hídricos que originan los distintos usos o actividades existentes en las cuencas del país. Con los recursos superficiales disponibles, por lo menos para un 50% de probabilidad de excedencia, determina el grado de equilibrio que existe entre demandas y ofertas, con el fin de definir una política sobre el ordenamiento o importancia que tienen los diferentes usos dentro de una cuenca. Los resultados indican la necesidad de desarrollar algún tipo de acción o de obras que lleven a un mejor aprovechamiento de los recursos.

- Análisis de los Recursos Hidrogeológicos; DGA- Álamos y Peralta Ing.

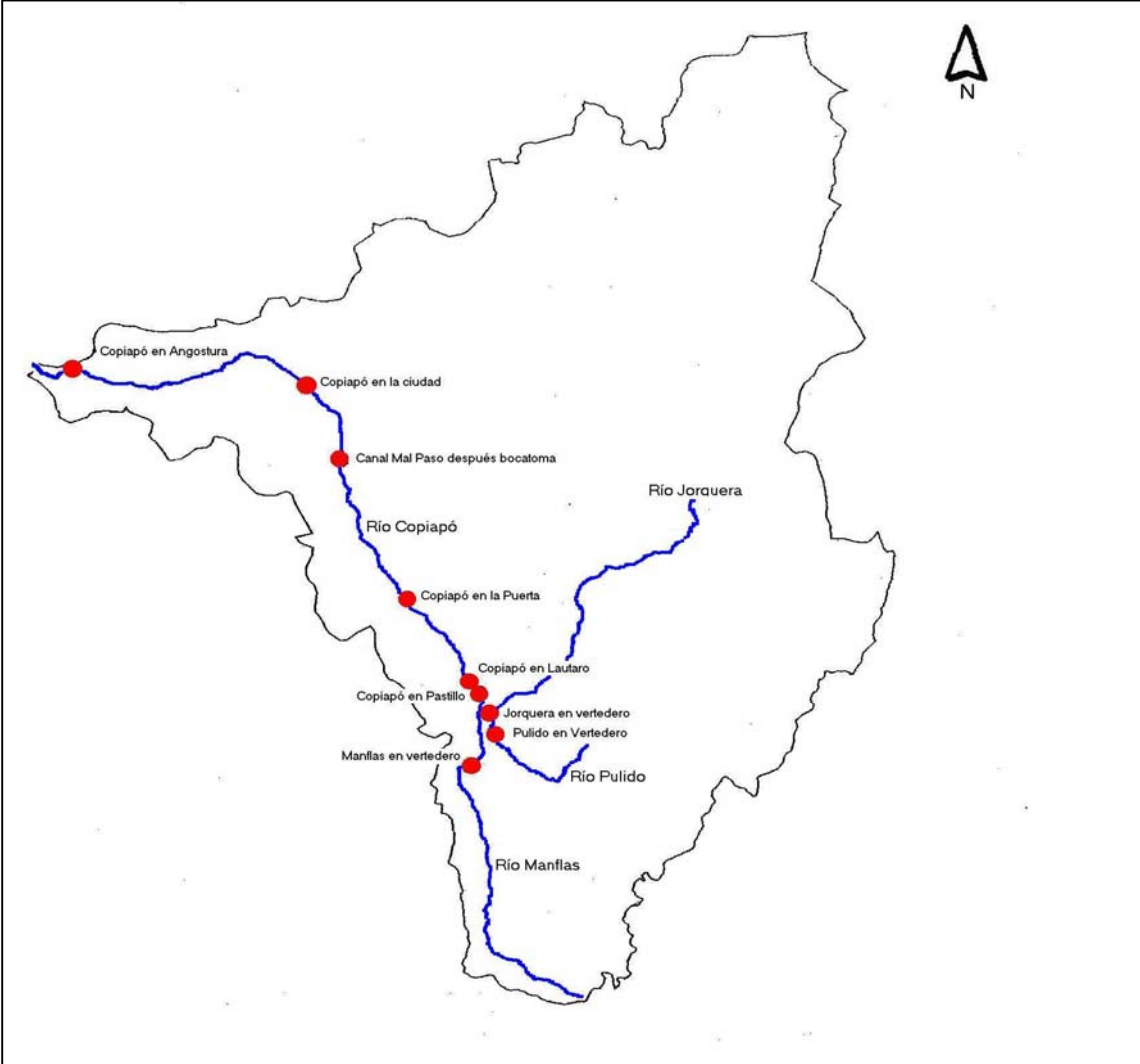
En 1995 Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda., efectuó para la DGA un nuevo estudio “Análisis de los Recursos Hídricos en el Valle del Río Copiapó, III Región”, que comprende un análisis de la situación del embalse subterráneo, en particular de su evolución y comportamiento en los últimos 10 años (1985-1995).

El estudio divide la cuenca del río Copiapó en seis sectores, los que son tratados en forma separada y sistemática. Dentro de cada sector se analiza las variaciones del nivel de saturación, en relación con las recargas y descargas, y dentro de éstas últimas, la relación con las extracciones de agua subterránea por los sondeos existentes. Al mismo tiempo, analiza la situación de los derechos de aprovechamiento tanto concedidos como en trámite, y su relación con los volúmenes embalsados en el acuífero.

- Pronóstico de Disponibilidad de Agua, DGA

El Departamento de Hidrología de la Dirección General de Aguas, elabora desde 1986 hasta la fecha estudios de “Pronóstico de Disponibilidad de Agua, Temporada de Riego”. El pronóstico para la estación de Verano se obtiene a partir de datos fluviométricos, pluviométricos y nivales de la temporada Otoño-Invierno; con los que a través de herramientas estadísticas (que no aparecen mencionadas) y cálculos de probabilidades de excedencia estima caudales (con un 20% de error) en el río Copiapó para las estaciones Primavera-Verano.

Figura 1.1: Ubicación de la zona de estudio





## 1.2 Planteamiento del Problema

El concepto de desarrollo sostenible, entendido como la posibilidad de “satisfacer las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras”, combina objetivos múltiples de carácter económico: crecimiento, equidad y eficiencia.

De acuerdo a lo anterior, en relación a la situación concreta de los recursos hídricos frente a la creciente demanda en la cuenca del río Copiapó, los criterios de evaluación del comportamiento demanda/disponibilidad pueden ser muy amplios y dicen relación con la eficacia operativa, la eficiencia económica, la equidad distributiva. Desde la perspectiva satisfacción de las demandas frente a la incertidumbre del recurso, los estudios plantean diversas respuestas:

- El estudio realizado por la Dirección General de Aguas (DGA) en 1994 señala que, en el Valle del río Copiapó los recursos hídricos disponibles para futuras expansiones sólo podrían provenir de ahorros de agua mediante la tecnificación del riego, ya que nuevos recursos superficiales o subterráneos no es posible obtener, aún cuando aparentemente existe un cierto potencial de recursos subterráneos.
- El estudio “Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos en el Valle del río Copiapó” (Álamos y Peralta 1995) concluye que, en el valle del río Copiapó desde el punto de vista general, la recarga media calculada y la explotación calculada, se encuentran balanceadas, por lo que se puede presumir que podría producirse un déficit de recarga en caso que aumenten las extracciones por nuevos pozos o por mayor intensidad en la explotación de los actuales, básicamente para los acuíferos ubicados aguas abajo del sector La Puerta y aguas arriba de la ciudad de Copiapó. El acuífero comprendido entre Copiapó y Angostura, no presenta ninguna muestra de agotamiento.
- El año 2000, la resolución DGA N° 750 establece zona de prohibición al sector comprendido entre Copiapó y Angostura (que significa que los derechos otorgados no pueden ser transados, ni se concederán nuevos derechos). Por otro lado, el sector entre La Puerta y Copiapó se encuentra declarada como zona de restricción (se acepta transacción de derechos entre usuarios).

- En el año 2001, el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) levanta zona de prohibición y declara área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas en las zonas acuíferas denominadas Copiapó-Angostura, III Región. A su vez, levanta la restricción para extracciones de agua en el sector que comprende entre la ciudad de Copiapó y La Puerta.

De acuerdo a los antecedentes antes mencionados, se observan claras contradicciones entre estudios que conllevan a declaraciones y alzadas de zonas de restricción y/o prohibición, lo que genera una incertidumbre con respecto a la escasez o no del recurso. Entonces, cabe preguntarse ¿Cómo se hace la evaluación de escasez del recurso hídrico? ¿Con qué herramienta se evalúa el comportamiento del agua? ¿Dependerá de un juicio subjetivo o no la declaración y/o levantamiento de restricción-prohibición?.

El problema no es nuevo para la institución, ya en el año 1987 la DGA contrata los servicios de la Consultora Álamos y Peralta, la que a través de modelos hidrogeológicos realiza evaluaciones de escasez en base a *proyecciones de balance hídrico*. Sin embargo, la misma consultora en el año 1995, retoma el estudio de 1987, lo actualiza y cuantifica el recurso embalsado, entregando resultados de balances de aguas subterráneas divididas en sectores, pero no determina proyecciones de estos balances. Los resultados de este estudio son la base de trabajo utilizada actualmente por la DGA para la toma de decisiones.

Resulta extraño que el estudio de 1995, no utilice los modelos para proyecciones de balance realizados en el año 1987, las razones concretas se desconocen, pero pueden deberse a que los modelos construidos resultaron demasiado complejos para su utilización o simplemente no generaron credibilidad, sin embargo, actualmente existen plataformas más amigables para poder realizar este tipo de modelaciones de proyección de balance.

**La problemática en definitiva radica en, enfocar ambas variables, oferta y demanda, en forma integrada cuyos resultados cuantitativos determinen las condiciones actuales y las posibilidades futuras referente a las necesidades y disponibilidades hídricas, todo esto en el contexto de proyectar el balance hídrico en condiciones transientes (dinámicas), para así aclarar la disyuntiva respecto a la escasez o no del recurso en el valle del río Copiapó.**

### 1.3 Hipótesis

Se plantea como hipótesis que, **el recurso hídrico subterráneo en el valle del río Copiapó no sería un recurso escaso a corto plazo (periodo de 6 a 10 años), considerando las proyecciones de demandas y el balance hídrico transiente del acuífero.**

El sustento técnico de la hipótesis planteada, será a través de la utilización de modelos numéricos para la simulación de condiciones transientes en los sistemas de aguas subterráneas, herramienta actualmente utilizada. Esto representa un amplio manejo de condiciones de explotación, protección y, en general, de escenarios para la gestión de los recursos hidrogeológicos.

La generación de modelos hidrogeológicos está fuertemente condicionada por la calidad de la información y el objetivo que se busque con el estudio. De esta forma modelos hidrogeológicos de carácter predictivo necesitarán información de mayor calidad en comparación con aquellos modelos cuyo objetivo sea el entendimiento del comportamiento u ocurrencia de las aguas subterránea en un acuífero, donde bastará información de carácter cualitativo como una buena base para la modelación mediante algún balance hídrico simple.

El software Visual Modflow (en adelante VM) permite la resolución de la ecuación de flujo impermanente a través de un medio poroso para fluidos inmiscibles de densidad constante. VM permite el manejo de un amplio rango de condiciones de borde donde, por ejemplo, las tasas de recarga, las tasas de evapotranspiración, la explotación desde pozos para diferentes usos, condiciones de nivel o flujo constante, etc., pueden ser representadas sin mayores complicaciones.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivos Generales**

Evaluar la factibilidad de abastecimiento del recurso hídrico subterráneo, en función de la demanda, utilizando un modelo de balance hídrico del acuífero que permita simular los efectos de las proyecciones de demandas a corto plazo (6 a 10 años) en la disponibilidad del recurso.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Establecer y analizar la evolución de las condiciones de demanda de agua subterránea en los distintos usos.
- Establecer y analizar la evolución de las condiciones históricas del recurso hídrico.
- Caracterizar las condiciones hidrogeológicas del acuífero.
- Simular las condiciones actuales del acuífero.
- Determinar las proyecciones de demanda, por uso, a mediano plazo.
- Evaluar la factibilidad de satisfacer las demandas en el tiempo.

## **1.5 Metodología General**

Para cumplir los objetivos del estudio, inicialmente resulta indispensable tener un acabado conocimiento del sistema de aguas subterráneas, es decir, se requiere conocer y comprender la estructura y funcionamiento de las aguas de la cuenca. Para lograr lo anterior, se debe comenzar por recopilar toda la información geológica del sector en estudio de manera de establecer la distribución y configuración del valle y del acuífero. Este estudio debe ser apoyado en una cartografía geológica detallada, una base topográfica precisa y análisis estratigráficos que permitan estudiar las características físicas del relleno y de la roca que conforma el acuífero.

Por otro lado, se requiere recopilar y analizar la información que permitirá tener conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca. El régimen pluvial sobre la cuenca determinará la influencia de las precipitaciones sobre las tasas de recarga, y las tasas evapotranspirativas. A su vez, la información fluviométrica permite identificar aquellas zonas donde el río experimenta recuperaciones o pérdidas en el caudal, indicando tramos de acuífero que recargan o descargan.

Una vez recopilada tanto la información geológica como hidrológica, se puede tener una caracterización hidrogeológica de la cuenca, que dará cuenta de la estructura, espesor, continuidad y funcionamiento del sistema acuífero.

Además de lo anterior, un catastro de los pozos existentes en la cuenca y la determinación de la demanda de aguas subterráneas, junto a un análisis de los niveles piezométricos disponibles de dichos pozos, permite entre otras cosas determinar las fluctuaciones de los niveles de aguas subterráneas y estimar volúmenes de recarga durante los períodos lluviosos y de drenaje durante período de sequía.

De esta forma, la implementación de un modelo hidrogeológico actualizado para el acuífero del valle de Copiapó se transforma en una sólida herramienta de planificación, y se enmarca dentro de las políticas de gestión integrada de los recursos hídricos planteada por la Dirección General de Aguas (DGA).

## 2. MARCO TEORICO

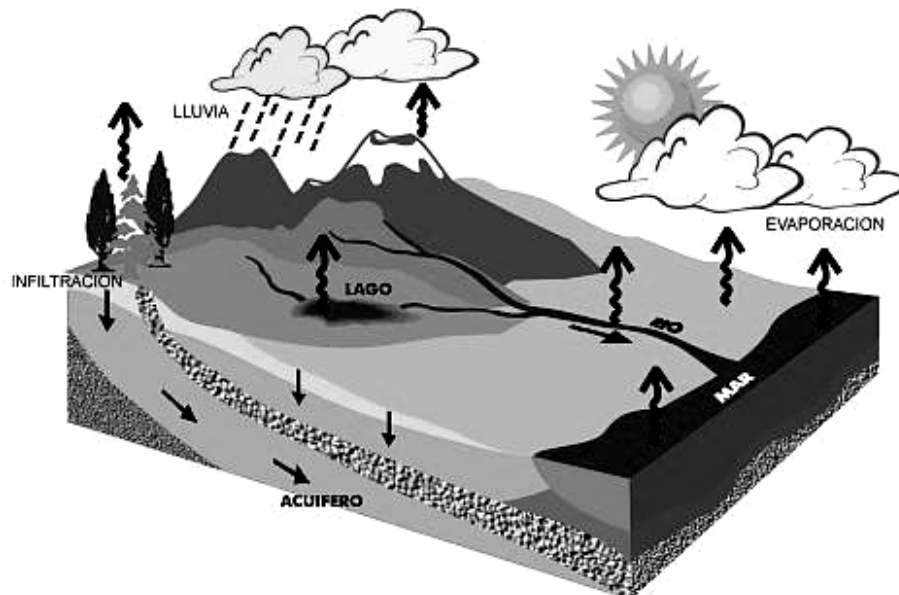
### 2.1 Conceptos Básicos en Hidrología Subterránea

#### El Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es un concepto más bien académico que corresponde a un modelo o idealización del movimiento de circulación del agua dentro del planeta Tierra, e incluye por lo tanto el movimiento y distribución del agua dentro de la litósfera (continentes), hidrósfera (océanos y mares) y atmósfera, al igual que los procesos de transferencia del agua entre estos elementos a través de los mecanismos de **evaporación, precipitación y escorrentía**.

En la figura 2.1 se describe en forma pictórica los diferentes elementos que constituyen el ciclo hidrológico, distinguiéndose tanto elementos de almacenamiento como de transferencia o transporte de agua.

Figura 2.1: Ciclo Hidrológico



Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia cuando el agua depositada (océanos) es transferida mediante **procesos de evaporación** a la atmósfera donde se almacena en forma de vapor de agua. Este vapor puede condensar e incorporarse a la superficie terrestre a través de **procesos de precipitación** pluvial o nival.

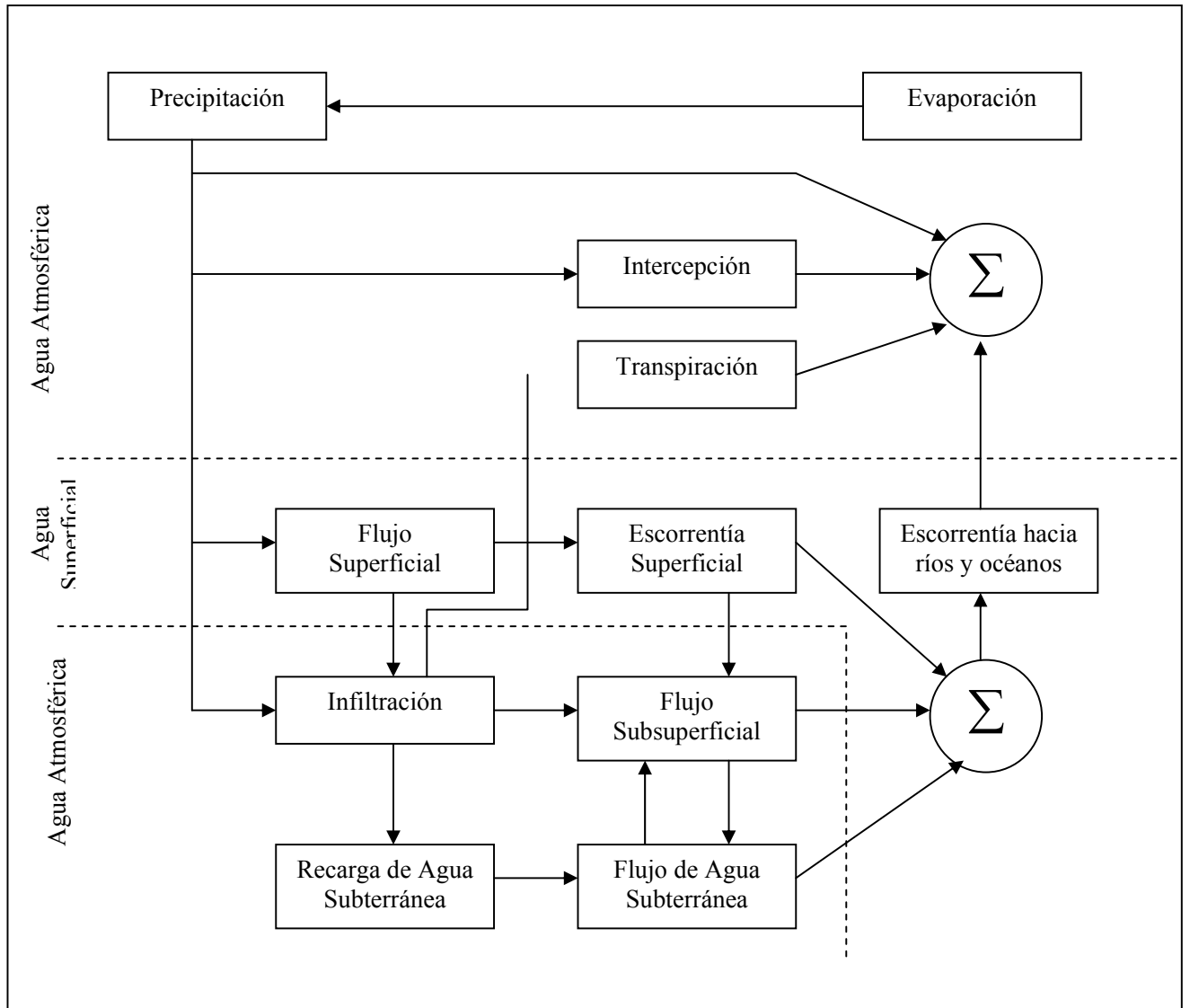
Parte de la precipitación caída sobre la superficie terrestre puede escurrir sobre ella, incorporándose a ríos que retornarán al mar –**escorrentía superficial**-, o puede quedar superficial y temporalmente almacenada en depresiones, lagos o en forma de hielo o nieve –**almacenamiento superficial**-, o puede **infiltrarse**, quedando retenida en la zona de raíces de las plantas o percolar profundamente hasta alcanzar las napas subterráneas o escurrir a través de grietas en los estratos profundos de la roca.

El agua superficialmente almacenada o retenida en el suelo, retornará a la atmósfera a través de procesos de evaporación, sublimación de hielo o transpiración de las plantas, o infiltrará y percolará profundamente, escurriendo en forma subterránea hasta aflorar en ríos o lagos, o descargará subterráneamente al mar. Puede observarse a su vez, la interacción o traspaso de agua entre diferentes elementos superficiales y subterráneos del ciclo, y la existencia de distintas alternativas de circulación o subciclos, como agua precipitada directamente sobre los océanos o precipitación evaporada durante su caída, antes de alcanzar la superficie de la Tierra.

La imagen gráfica del ciclo hidrológico permite efectuar en forma limitada una especie de inventario de los fenómenos que ocurren, pero no permite puntualizar la forma ni las relaciones entre los distintos componentes que determinan la trayectoria del agua a través de los distintos subciclos existentes en su camino de retorno a la atmósfera o al mar. El movimiento del agua en el ciclo hidrológico se caracteriza por su irregularidad, tanto en el espacio como en el tiempo, como por ejemplo el caso del agua temporalmente almacenada en forma de hielo o nieve, o procesos más complejos como la existencia de períodos húmedos o de crecidas, o períodos secos o sequías.

Para resolver estos problemas, levantando algunas limitaciones, se puede recurrir a diagramas de flujo del ciclo hidrológico, figura 2.2, en que es posible distinguir entre elementos de almacenamiento y de traslación del agua, describiendo los diversos fenómenos que intervienen en el ciclo hidrológico y las interconexiones entre los distintos procesos.

Figura 2.2: Ciclo Hidrológico





### **Balance Hídrico**

El balance hídrico es el concepto de conservación de la masa o su equivalente en mecánica de fluidos, la ecuación de continuidad. Expresada en su forma más básica y general, la ecuación de continuidad puede representarse por la relación:

$$I - Q = dS / dt \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde I y Q son los caudales de entrada y salida a un determinado volumen de control y S es el almacenamiento al interior de dicho volumen. La ecuación expresada en su forma integral y aplicada a una cuenca hidrográfica como “volumen de control” para un intervalo de tiempo comprendido entre dos instantes t1 y t2, se conoce con el nombre de ecuación de balance de masas o **ecuación general de balance hidrológico**.

La ecuación de balance proporciona una cuantificación del recurso hídrico y esta dada por:

$$P + Q_{se} + Q_{te} - E - Q_{ss} - Q_{ts} - \Delta S = \mathcal{E} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

- P = Precipitación Total ocurrida en determinado periodo
- Q<sub>se</sub> = Caudal Superficial Entrante
- Q<sub>te</sub> = Caudal Subterráneo Entrante
- E = Evapotranspiración Real
- Q<sub>ss</sub> = Caudal Superficial Saliente
- Q<sub>ts</sub> = Caudal Subterráneo Saliente
- ΔS = Variación de Almacenamiento (final-inicial)
- ε = Error de Balance

Existen muchas situaciones en que es posible eliminar ciertos parámetros de la ecuación, ya sea por ser despreciables o por no intervenir en la solución. Por ejemplo, en un acuífero confinado se tiene equilibrio hídrico independiente de las aguas superficiales que lo cubren, por lo que los parámetros correspondientes a entradas y salidas superficiales pueden omitirse de la ecuación.

La ecuación de balance rara vez se equilibra exactamente, por ello se incorpora un término de error de balance, esto se debe a imprecisiones en las medidas, falta de datos básicos o aproximaciones groseras. El monto de desequilibrio no debe exceder los límites de precisión de la información básica. La aplicación de la ecuación requiere el buen criterio, información hidrológica adecuada, y un análisis cuidadoso de la geología e hidrología del área en estudio.

## *Aguas Subterráneas*

- **Origen de las Aguas Subterráneas**

Casi toda el agua subterránea es agua meteórica proveniente de la precipitación. En algunos sitios se encuentra agua de formación, presente en la roca durante su formación o deposición, y generalmente de alto contenido salino. En menores cantidades existe también la llamada agua juvenil, formada químicamente dentro del subsuelo y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil con frecuencia son la fuente de minerales indeseables en el agua subterránea.

El agua lluvia llega a formar parte del agua subterránea por infiltración y percolación de corrientes y lagos. La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los suelos son altamente permeables o donde la capa freática está cerca de la superficie del terreno.

En sitios donde la precipitación anual es relativamente baja y la capa freática está a cientos de metros bajo la superficie, se puede esperar muy poca o nula recarga. En estas áreas, el agua de irrigación puede producir alguna recarga, pero la infiltración del agua de los ríos a través de gravas permeables será posiblemente la mayor fuente de recarga. Los ríos que contribuyen al agua subterránea se denominan corrientes afluentes. Dichas corrientes se secan con frecuencia durante sequías prolongadas, cuando la percolación absorbe todo el caudal disponible, comportándose así como corrientes intermitentes. Las corrientes de agua casi nunca son afluentes en toda su longitud. A veces el canal cruza estratos de diferente permeabilidad, donde ocurren las mayores pérdidas por percolación en tramos cortos de alta permeabilidad. Con frecuencia se encuentran áreas de considerable percolación en las corrientes que cruzan estratos de grava procedentes de abanicos aluviales.

Con relación a la capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas, los terrenos pueden clasificarse en las siguientes tres categorías:

- a) Acuíferos: formaciones de gran porosidad y permeabilidad capaces de almacenar y transmitir agua en forma apreciable (ejemplo: arena).
- b) Acuífugos: formaciones de muy baja porosidad y muy baja permeabilidad, las cuales, en consecuencia, no almacenan ni transmiten aguas (ejemplo: rocas graníticas).
- c) Acuitardo: formaciones de alta porosidad y baja permeabilidad, susceptibles de almacenar grandes cantidades de agua, pero de muy difícil extracción por los métodos corrientes de explotación (ejemplo: arcillas).

- **Sistema Acuíferos**

Un acuífero es una unidad geológica de estructura permeable que permite el almacenamiento del agua a través del material que lo constituye. En términos netamente geológicos se puede hablar de acuíferos detríticos o líticos fracturados, dependiendo del medio permeable que lo anida.

No todas las formaciones geológicas poseen la misma facilidad para transmitir y proporcionar agua en cantidades apreciables. Los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas, mezcla de ambos, etc., pudiendo ser su origen geológico muy distinto: fluvial, como los que forman los materiales aluviales de los ríos o las terrazas de los mismos; deltaico, si se trata de depósitos acumulados en la desembocadura de los ríos; depósitos sedimentarios ocasionados por la acumulación de partículas transportadas por la gravedad (piedemontes), viento (dunas), hielo (depósitos glaciares), etc.

Si se consideran las características geológicas e hidráulicas del medio permeable, se pueden reconocer los tipos de acuífero (ver figura 2.3) que a continuación se describen:

#### **a) Acuífero No Confinado (Libres o Freáticos)**

Se define como acuífero libre a un medio permeable que se encuentra por lo general parcialmente saturado y cuya agua subterránea se encuentra a presión atmosférica, vale decir la superficie freática se encuentra conectada a la atmósfera a través de los intersticios del medio permeable.

Este tipo de acuífero es muy común en Chile. El hecho de que la hidrogeología se haya practicado preferentemente en depósitos sedimentarios, hace de este tipo de acuífero el de mayor difusión conocida.

#### **b) Acuífero Confinado**

Son medios permeables limitados hacia el techo y la base por estratos impermeables. Se presentan en presión y por consiguiente el agua satura por completo el acuífero. El nivel confinante superior suele ser un estrato con alto porcentaje de arcillas y el piso del acuífero es común que sea la roca que hace de basamento a los depósitos sedimentarios donde se aloja el acuífero.

Estos acuíferos son en general poco comunes en nuestro país, debido a que los estudios suelen centrarse en depósitos aluviales y fluviales de buena cobertura, donde es poco frecuente que se hayan dado las condiciones geológicas necesarias para la depositación de sedimentos finos confinantes.

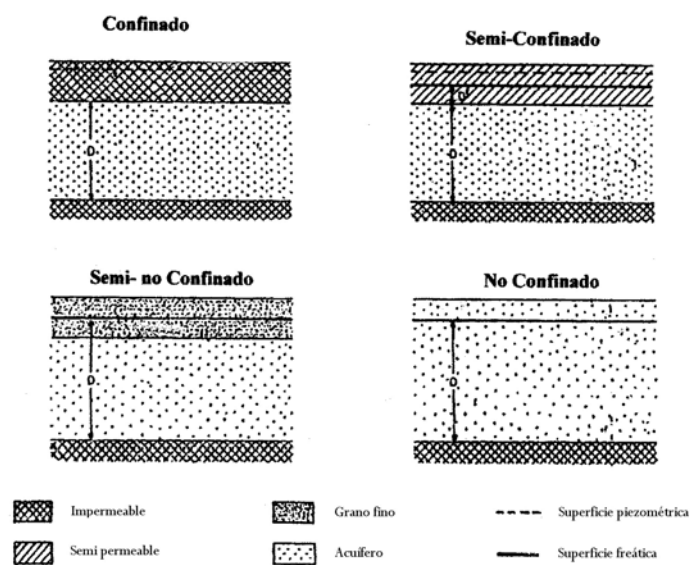
#### **c) Acuífero Semi-Confinado (Semi-Libres)**

Llamado también acuífero que gotea, es un lecho completamente saturado de agua que se encuentra limitado por encima por una capa semi-permeable y por abajo por capas impermeables o semi-permeables. La capa superior tiene una permeabilidad mucho menor que el acuífero principal y el flujo horizontal en esta capa superior puede ser prácticamente desechado.

#### d) Acuífero Semi-NoConfinado

Cuando la permeabilidad de un acuífero semi-confinado es grande, de tal manera que la componente de flujo horizontal, de la capa superior, no pueda ser ignorada, se tendrá un acuífero intermedio entre el acuífero semi-confinado tradicional y el no confinado.

Figura 2.3: tipos de acuíferos



#### • Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos

Las propiedades hidráulicas de los acuíferos dependen, en primer lugar, de las características físicas de las rocas que conforman el acuífero. Estas propiedades permiten definir y en algunos casos, predecir, el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores. Las principales propiedades son:

- Porosidad (P) y Porosidad Eficaz ( $P_e$ )

- Conductividad Hidráulica o Coeficiente de Permeabilidad (k)
- Transmisibilidad o Transmisividad (T)
- Coeficiente de Almacenamiento (S)
- Homogeneidad – Heterogeneidad
- Isotropía, anisotropía

## 1. Porosidad (P)

La porosidad de un medio detrítico o fracturado corresponde a la razón entre el volumen total del material y el volumen de su parte ocupada por agua y/o aire. De esta forma se tendría que la porosidad puede expresarse como sigue:

$$P = V_v/V_t \quad (\text{Ec 2.3})$$

donde:

$V_v$  = volumen de huecos o espacios rellenos con agua o aire

$V_s$  = volumen de la parte sólida

$V_t$  = volumen total del material ( $V_v + V_s$ )

## 2. Porosidad Eficaz ( $P_e$ )

De las reservas de agua contenidas en el subsuelo sólo es recuperable mediante la gravedad una fracción de la porosidad total. Una parte de esta agua quedará irremediabilmente retenida en el subsuelo (agua de retención). Esta se puede expresar mediante la “capacidad de retención específica” del terreno definida por la expresión:

$$m_s = \frac{V_s}{V_t} * 100 \quad (\text{Ec. 2.4})$$

donde:

$V_s$  = agua retenida en el subsuelo previamente saturado

$V_t$  = volumen total de agua contenida inicialmente en el sustrato.

La porosidad eficaz es entonces igual a la diferencia entre la porosidad total y la retención específica, es decir:

$$P_e = P_t - m_s \quad (\text{Ec 2.5})$$

La porosidad eficaz no representa más que una porción a menudo pequeña de la porosidad total. Esta observación es importante puesto que las reservas útiles de un material acuífero están condicionadas por la porosidad eficaz.

### 3. Conductividad Hidráulica o Permeabilidad (k)

Se define como el caudal de agua que se filtra a través de una sección unitaria, bajo la carga producida por un gradiente hidráulico unitario y a una temperatura constante. El ingeniero francés Henry Darcy (1856) descubrió la ley que rige el movimiento del agua subterránea en un medio permeable (Figura 2.4).

$$Q = k * A * \frac{\Delta h}{l} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

$Q$  = caudal por unidad de sección (m<sup>3</sup>/día)

$k$  = coeficiente de permeabilidad

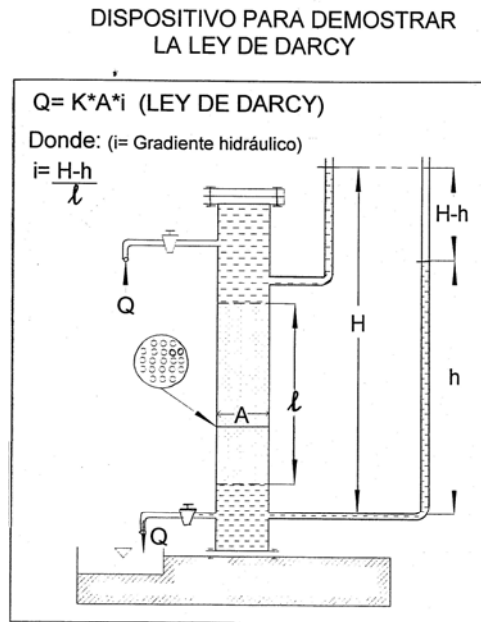
$A$  = área de la sección a través de la cual se produce el flujo de agua (m<sup>2</sup>)

$\Delta h$  = diferencia de carga entre la entrada y la salida de la sección (m)

$l$  = longitud de la sección (m)



Figura 2.4: Permeámetro de Carga Constante



Si se tiene que:  $\frac{Q}{A} = v$  (Ec. 2.7)

Con  $v$  = velocidad media, resulta:

$$\frac{Q}{A} = v = k \cdot \frac{\Delta h}{l} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Finalmente, llamando  $i = \frac{\Delta h}{l}$ , se tiene que:

$$k = \frac{v}{i} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

La ecuación anterior demuestra que las unidades de  $k$  son las de una velocidad (L/T). En el Sistema Internacional serían m/seg.

#### 4. Transmisividad (T)

La transmisividad de un sistema acuífero, mide la cantidad de agua, por unidad de ancho, que puede ser transmitida horizontalmente a través del espesor saturado de un acuífero con un gradiente hidráulico igual a 1 (unitario).

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = b * k \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

T = transmisividad (L<sup>2</sup>/T)

b = espesor saturado del acuífero (L)

k = conductividad hidráulica (L/T)

Para un acuífero compuesto de muchos estratos la transmisividad total es la suma de las transmisividades de cada estrato:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (\text{Ec 2.11})$$

donde n es el número total de estratos y T<sub>i</sub> es la transmisividad del estrato i. La transmisividad de un acuífero es un concepto que asume que el flujo a través de él es horizontal.

#### 5. Coeficiente de Almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento es el volumen de agua, por unidad de área y cambio en altura de agua, que una unidad permeable absorberá o liberará desde almacenamiento. De acuerdo a esta definición esta cantidad es adimensional.

En un acuífero confinado el coeficiente de almacenamiento se denomina Almacenamiento Específico (S<sub>s</sub>). En un acuífero no confinado o libre el nivel de saturación (nivel freático) el coeficiente de almacenamiento se denomina como S<sub>y</sub>.

## **6. Homogeneidad – Heterogeneidad**

Una unidad homogénea es aquella que tiene las mismas propiedades en todas las posiciones. Esto significa que la porosidad, conductividad hidráulica y otros parámetros son similares en cualquier posición dentro de la unidad geológica.

En formaciones heterogéneas las propiedades hidráulicas cambian espacialmente. Estrictamente, todo medio poroso o fracturado es un medio heterogéneo por naturaleza. Como para efectos prácticos sólo interesan propiedades promedio, un medio en sí heterogéneo puede considerarse macroscópicamente homogéneo si las propiedades promediadas en un cierto volumen de material alrededor de cada punto considerado no varían de un lugar a otro. Así en la homogeneidad existe un factor de escala.

## **7. Isotropía – Anisotropía**

Un medio es hidráulicamente isótropo cuando sus propiedades, principalmente la permeabilidad, no dependen de la orientación, o sea que es igual en cualquier dirección que se considere; si la permeabilidad varía con la orientación el medio es anisótropo.

## Flujo de Aguas Subterráneas

La fórmula general de la ley de Darcy se puede expresar como:

$$v = k \frac{\partial h}{\partial s} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Si se proyecta esta ecuación sobre un sistema de ejes cartesianos en tres dimensiones, las velocidades respectivas serán:

$$v_x = k_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = k_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

en donde  $k_x$ ,  $k_y$  y  $k_z$  son los coeficientes de permeabilidad en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respectivamente. Se define el potencial de velocidad  $\phi$  como una función escalar del espacio y del tiempo tal que su derivación negativa con respecto a cualquier dirección entrega la velocidad del fluido en esa dirección.

Sea  $\phi = -k h$ , entonces se tiene:

$$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

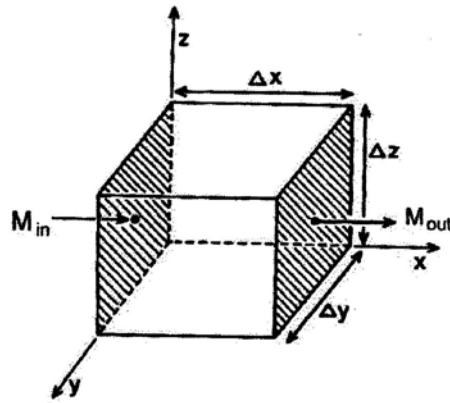
La existencia del potencial de velocidades implica la irrotacionalidad del flujo. En la realidad el flujo no es irrotacional dentro de cada poro, pero macroscópicamente puede considerarse como tal, que es cuando es válida la ley de Darcy.

Todo el flujo del agua subterránea debe satisfacer la ecuación de continuidad, es decir, la masa de fluido que entra en un determinado intervalo de tiempo menos la que sale en el mismo intervalo de tiempo es igual a una variación del almacenamiento del acuífero.

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Variación en el Almacenamiento}$$

Sea un cubo diferencial de lados  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  denominado volumen elemental representativo.

Figura 2.4 : Volumen Elemental Representativo



Por la cara A, normal al eje  $0_x$ , entra una masa de fluido  $M_{in}$  en el tiempo  $dt$ :

$$M_{in} = (\rho \cdot u)_{in} dy \cdot dz \cdot dt \quad (\text{Ec. 2.15})$$

siendo  $u$  la velocidad según el eje  $x$  en  $x$ , y  $\rho$  la densidad en  $x$ . Por la cara B, opuesta a la cara A, sale una masa de fluido  $M_{out}$  en el tiempo  $dt$ .

$$M_{out} = (\rho \cdot u)_{out} \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (\text{Ec. 2.16})$$

La diferencia entre la demanda y la salida es:

$$\Delta M = M_{in} - M_{out} = dy \cdot dz \cdot dt [(\rho \cdot u)_{in} - (\rho \cdot u)_{out}] \quad (\text{Ec. 2.17})$$

también se puede escribir como:

$$\frac{[(\rho \cdot u)_{in} - (\rho \cdot u)_{out}]}{dx} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (\text{Ec. 2.18})$$

La variación de masa por unidad de tiempo y unidad de volumen  $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ ,  $\Delta\mu_x$ , será:

$$\Delta\mu_x = -\frac{\partial(\rho \cdot \mu)}{\partial x} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Similarmente según los ejes y, z puede establecerse:

$$\Delta\mu_y = -\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} \quad \Delta\mu_z = -\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

en las que v y w son respectivamente las componentes del vector velocidad v según los ejes y, z.

Sumando las tres ecuaciones se obtiene la diferencia entre la entrada y la salida que vale:

$$\Delta\mu = \Delta\mu_x + \Delta\mu_y + \Delta\mu_z = -\left(\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z}\right) - \left(\frac{\partial(\rho \cdot v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot v_z)}{\partial z}\right)$$

$$\Delta u = \text{variación de almacenamiento} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

- **Flujo estacionario**

Para el flujo estacionario no hay cambio en las condiciones respecto al tiempo y tomando el agua como un fluido incompresible la  $\rho$  pasa a ser constante y la ecuación de continuidad se reduce a:

$$\left[ \frac{\partial(v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} \right] = 0 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Si se sustituye en esta ecuación las condiciones de irrotacionalidad se tiene:

$$\left[ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (\text{Ec. 2.23})$$

al reemplazar  $\varphi = -kh$  se tiene la ecuación general para fluidos estacionarios en un medio homogéneo e isótropo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

- **Flujo no estacionario**

Si se considera una extracción o aporte de agua al volumen elemental representativo analizado, por ejemplo un pozo de explotación o un pozo de inyección, el volumen de este aporte o pérdida está dado por  $\pm W$ . Por lo tanto, la ecuación de continuidad se queda:

$$-\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + W \right] = \text{variación del almacenamiento} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Al analizar un flujo no estacionario se debe considerar que la variación del almacenamiento está dada por el almacenamiento o rendimiento específico  $S_s$ , el cual se definió como la variación de la altura del agua por unidad de volumen.

$$S_s = -\frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

$\Delta V$  es intrínsecamente positivo cuando  $\Delta h$  es negativo, es decir, el agua es liberada del almacenamiento cuando la altura del nivel  $h$  decrece. La variación del volumen del almacenamiento en el tiempo está dada por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s = \frac{\Delta h}{\Delta t} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Por lo tanto, la ecuación de continuidad queda:

$$-\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + W \right] = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

tomando el agua como un fluido incompresible la  $\rho$  pasa a ser constante y la ecuación de continuidad se reduce a:

$$-\left[ \frac{\partial(v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} + W \right] = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Si se sustituye en esta ecuación las condiciones de irrotacionalidad se tiene:

$$\left[ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + W \right] = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

al reemplazar  $\varphi = -kh$  se tiene la ecuación general para fluidos no estacionarios en un medio homogéneo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

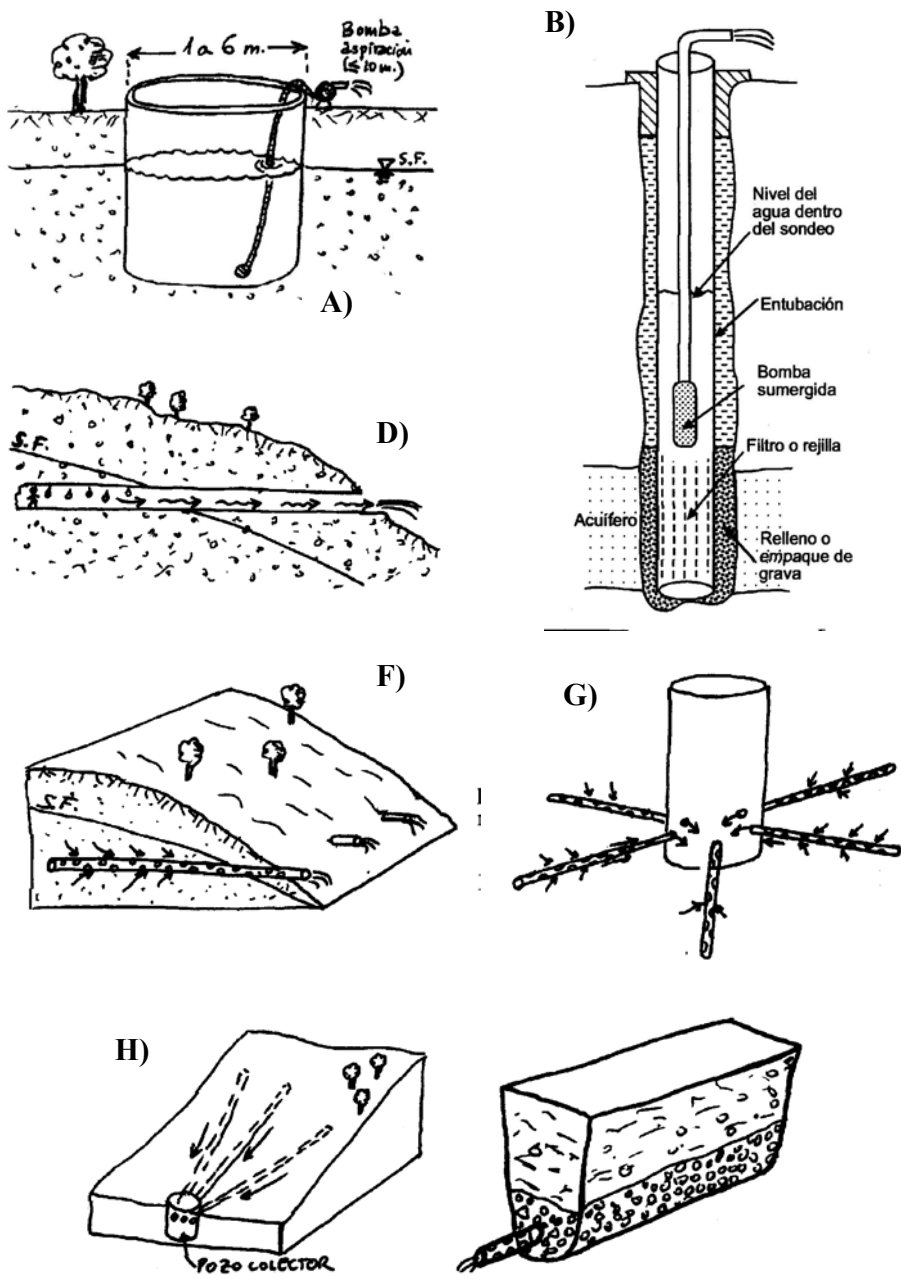


### **Captaciones de Agua Subterránea**

Captación de agua subterránea es toda instalación que permite poner a disposición de uso el agua contenida en los acuíferos. Para extraer agua del terreno se utilizan diversos tipos de captaciones:

- a) Pozos Excavados: Perforación vertical, de forma cilíndrica y de diámetro de 1 a 6 metros, con profundidad generalmente de 5 a 20 metros. Es probablemente el tipo de captación más antiguo. En la actualidad se excava con máquinas y en rocas duras con explosivos. Su rendimiento es superior al de un sondeo de la misma profundidad (figura 2.5A).
- b) Sondeos: Son las captaciones más utilizadas en la actualidad. Los diámetros oscilan entre 20 y 60 cm. y la profundidad en la mayoría de los casos es entre 30-40 metros y 300 o más. Si la construcción es correcta, se instala una tubería ranurada sólo frente a los niveles acuíferos, el resto, es tubería ciega (figura 2.5B).
- c) Drenes y Galerías: Perforaciones o instalaciones horizontales de sección más o menos circular y con una longitud mucho mayor que el diámetro. El agua penetra a lo largo de la obra creando un flujo aproximadamente paralelo y horizontal. Los drenes y galerías acaban en un pozo colector o afloran en superficie (figura 2.5D y F).
- d) Pozos Excavados con Drenes Radiales: Obra consistente en un pozo revestido del que salen drenes horizontales en varias direcciones. El conjunto actúa como un pozo de gran diámetro (figura 2.5G).
- e) Zanjas de Drenaje: En acuíferos de muy poco espesor, profundidad de 2 a 4 metros y longitudes de unas decenas a varios centenares de metros. Se excavan una o varias zanjas, que, siguiendo la pendiente topográfica, vierten a un pozo colector desde el que se bombea (figura 2.5H).
- f) Norias: Es un tipo artesanal de captación de agua subterránea. Se caracteriza por ser una captación de gran diámetro y de poca profundidad (generalmente entre 5 y 25 metros) que suele verse afectada por las fluctuaciones estacionales del nivel estático y que debe construirse en sectores donde el agua subterránea se presente poco profunda.

Figura 2.5: Tipos de Pozos



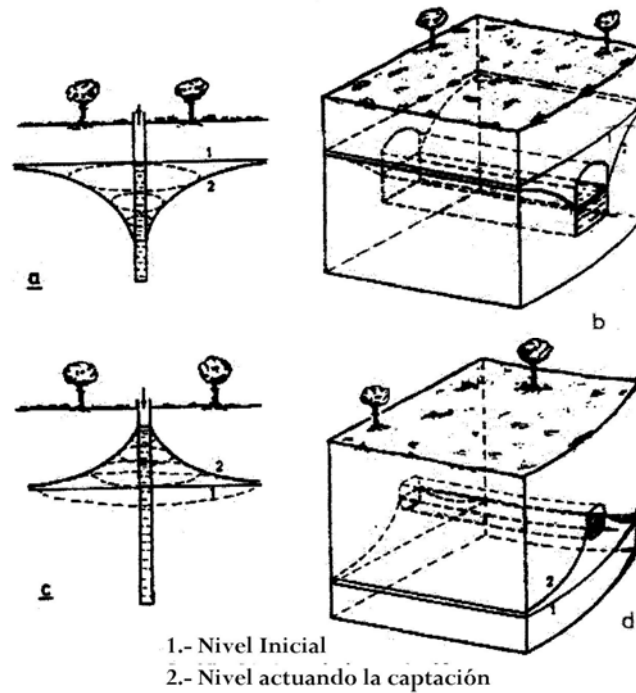
El efecto primario del bombeo es producir un descenso del nivel del agua a fin de establecer un gradiente hidráulico que ponga en movimiento el agua hacia la captación. Si no se produce descenso no puede crearse el gradiente necesario para que el agua se dirija a la captación.

En el pozo, el agua debe penetrar por una superficie cilíndrica relativamente pequeña y por lo tanto se precisa un gradiente importante para que de acuerdo con la ley de Darcy exista un flujo igual al caudal bombeado. Por cualquier cilindro concéntrico con el pozo debe pasar la misma cantidad de agua pero como la superficie de los mismos aumenta en proporción directa al radio, el gradiente preciso para establecer el flujo es tanto menor cuanto más lejos del pozo, lo cual justifica la forma de embudo de descensos de la figura 2.6a. Un razonamiento similar puede hacerse para una captación horizontal resultando entonces la formación de un valle o depresión longitudinal en la superficie piezométrica, cuyo punto más bajo coincide con la captación (figura 2.6b).

En el caso de introducir agua en un acuífero mediante un pozo o una captación horizontal, se tiene el fenómeno inverso al descrito, formándose un domo o una cresta respectivamente (figura 2.6c y 2.6d).

El nivel del agua en el acuífero cuando no hay bombeo se llama **nivel estático** y el nivel cuando existe una captación en funcionamiento se llama **nivel dinámico**.

Figura 2.6: Efecto de las Captaciones en el nivel del agua de los acuíferos



- a) Formación del embudo a consecuencia de un pozo de bombeo
- b) Formación de un valle de drenaje a consecuencia de una captación en galería
- c) Formación de un domo de inyección a consecuencia de un pozo de recarga
- d) Formación de una cresta de recarga a consecuencia de la introducción de agua por un tubo horizontal filtrante.

### • Caudal Específico y Eficiencia de un Pozo

Se llama **caudal específico** de un pozo al cociente entre el caudal de agua bombeado y el descenso del nivel producido.

$$q = \frac{Q}{s_p} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

siendo  $s_p$  el descenso medido en el pozo.

El caudal específico de un pozo no es constante para un determinado caudal ya que, con el tiempo el descenso aumenta. Sin embargo, los descensos tienden a estabilizarse y por lo tanto el caudal específico también.

Las curvas caudal-descenso y las curvas caudal específico-descenso se llaman **curvas características de un pozo**.

El nivel del agua dentro de un pozo es menor o a lo más igual al nivel de agua en el exterior del pozo, ya que, existe una pérdida de carga al atravesar el agua la zona filtrante. Este descenso adicional se llama **pérdida de penetración** en el pozo.

La eficiencia del pozo esta dada por:

$$eficiencia = \frac{\textit{descenso teórico}}{\textit{descensos medido en el pozo}}$$

En la eficiencia del pozo intervienen la pérdida de penetración en el pozo más la pérdida por circulación en la porción del acuífero próximo y dentro del propio pozo.

Los pozos poco eficientes no son económicos por cuanto para bombear el mismo caudal que un pozo eficiente se precisan mayores descensos de nivel y por lo tanto mayor altura de bombeo.

La eficiencia de un pozo puede modificarse con el tiempo a consecuencia de varios fenómenos, tales como la aparición de incrustaciones, corrosión, sedimentación, arena en el pozo, etc. Las curvas características de un pozo relacionan el caudal extraído con el descenso en la captación al cabo de un cierto tiempo de bombeo y son de gran valor para apreciar la eficiencia de un pozo y sus variaciones.

- **Pruebas de Bombeo**

Una prueba de bombeo es una prueba realizada en condiciones predeterminadas y controladas cuyo objetivo puede ser:

- a) Establecer las características del acuífero
- b) Conocer el funcionamiento
- c) Determinar la correcta construcción del pozo

El conocimiento de las características de un acuífero es importante en la programación de su óptimo aprovechamiento y es requisito necesario para cualquier investigación hidrogeológica. También tiene interés por cuanto permite predecir de forma razonable cuales van a ser los descensos y los caudales obtenibles de un pozo, tanto a corto como a largo plazo.

Las pruebas de bombeo en el pozo, como único elemento de observación permiten valorar su eficiencia, trazar su curva característica y también obtener algunas de las características del acuífero. Sin embargo, para lograr una buena precisión en los datos y valorar suficientemente el acuífero conviene realizar observaciones en otros puntos. El ensayo observando únicamente el pozo de bombeo se llama a veces simplemente aforo.

## **2.2 Criterios Técnicos-Jurídicos de Aprovechamiento del agua Subterránea**

### **Aspectos Económicos de las Regulaciones relativo al Mercado del Agua**

En su estado natural el agua es un bien de propiedad común ya que su uso no es controlado por ningún agente en forma exclusiva, por lo que se puede tender a la sobreexplotación del recurso. En general, las regulaciones que se aplican para asignar el recurso entre distintos usuarios buscan que dicha asignación sea eficiente y evitar que se agote rápidamente en presencia de una demanda creciente. El riesgo de agotar una fuente de agua es particularmente concreto y real en el caso de las aguas subterráneas que se pueden explotar a tasas superiores a los caudales de recarga.

En las regulaciones en general se define si la propiedad del agua es pública o privada, los mecanismos para obtener el recurso, la posibilidad de realizar traspasos entre los usuarios y las autorizaciones o permisos que debe otorgar el sector público, entre otros factores. En general, dichas regulaciones norman respecto de los derechos de uso del agua y no de la propiedad del bien en sí, la que queda en manos del Estado.

En Chile, las aguas son de dominio público y se otorga a los particulares su uso y goce de acuerdo con las reglas y exigencias que establece el Código de Aguas. El derecho a usar y gozar del agua es perpetuo y el titular, que además es el dueño de ese derecho incorporal, puede emplearlo en el uso que determine.

El sistema en nuestro país se basa en la libre transacción de los derechos de aprovechamiento de aguas por parte de sus titulares. En virtud de ello el comprador del derecho puede darle un uso diferente del que le daba el titular original, aún más, puede emplearlo en un lugar físico diverso de aquél.

Asimismo, el derecho es susceptible de división, en consecuencia el dueño puede transferir o enajenar parte del caudal asignado originalmente por el ente estatal con potestades para ello.

### **La gestión de los Acuíferos**

La gestión de los acuíferos puede definirse como el proceso de control sobre el flujo del agua subterránea, en su cantidad, calidad, lugar y tiempo de ocurrencia, durante el ciclo hidrológico. Dicha gestión debe estar dirigida a sostener, conservar, proteger, restaurar y regenerar los acuíferos, además de maximizar en forma equilibrada los beneficios sociales (equidad) y económicos (crecimiento económico), que se puedan obtener con el aprovechamiento del agua subterránea, así como a controlar fenómenos y efectos adversos asociados con los usos del agua subterránea, con el fin de proteger al hombre y el ambiente que lo sustenta.

La explotación de los acuíferos debe realizarse en forma compatible con la demanda a servir, con otras demandas existentes, con el medio ambiente y con la ordenación y uso del territorio. La gestión requiere considerar los costos y beneficios directos e indirectos, las prioridades y restricciones no valorables económicamente, el uso sostenible del recurso y el respeto de los derechos intergeneracionales. Se debe respetar la normativa vigente y los derechos legales y legítimos.

La protección de los acuíferos debe basarse en principios generales, hidrológicos, ambientales, económicos, sociales y legales. La mala gestión generará costos y problemas sociales a las generaciones futuras.

El Código de Aguas vigente establece que se pueden otorgar derechos de uso de agua a quienes lo soliciten, siempre que haya disponibilidad en la fuente o cuenca. El propietario de estos derechos no está sujeto a restricciones o prioridades en el uso del agua, aunque existen algunos costos asociados a la participación en organizaciones de usuarios, que deben asumir la construcción, mantenimiento, conservación, mejoramiento y otras relacionada con su infraestructura y manejo.

En base a esta legislación se ha desarrollado un mercado de derechos de agua, donde los agentes, cuando una cuenca esta agotada, pueden adquirir los derechos de otros. Si bien ello otorga seguridad jurídica y estimula las inversiones en actividades que utilizan esta agua, mejorando la asignación del recurso desde el punto de vista económico, también se registran prácticas de acaparamiento de derechos y especulación.



### **Explotación y Sobreexplotación de los Acuíferos**

Al explotar un acuífero con un caudal menor a la recarga que recibe éste, el acuífero alcanza un nuevo equilibrio en el sistema de agua subterránea, de manera que el caudal captado se compensa, pasado cierto tiempo, con la disminución de salidas naturales y con un aumento de recarga.

Por otro lado, si las extracciones superan la recarga se produce un progresivo vaciado del acuífero por consumo de reservas, proceso denominado “minar” el acuífero y también sobreexplotación en sentido estricto.

Se debe considerar que un descenso continuo de los niveles del agua subterránea indica un consumo de reservas de agua del sistema acuífero, pero no necesariamente implica que las extracciones superen a la recarga. El problema se produce debido a larga duración del periodo transitorio entre el inicio de la extracción y la llegada de un nuevo estado de equilibrio. En las circunstancias más frecuentes puede variar entre pocos años y decenas de años, pero en ocasiones puede ser de centenares o millares de años.

A base de estos conceptos, se identifican tres enfoques de explotación del agua subterránea:

- a) Equilibrio Estable: Los modelos de equilibrio estacionario o estables sustentan el concepto de rendimiento seguro sostenido. Adoptar este enfoque significa permitir una explotación sólo hasta un caudal menor que el de recarga original del sistema acuífero.

- b) Equilibrio Inestable (Sobreexplotación Controlada): Este enfoque contempla que, después de pasar por etapas transitorias, se llega a un estado que requerirá de una intervención continua para evitar condiciones no deseadas o incontrolables. Este enfoque es utilizado donde el agua es escasa o de muy alto costo, requiriendo de medidas continuas de ajuste para mantener principalmente el contenido mineral del agua dentro de niveles aceptables. La aplicación de este enfoque implica legar a las generaciones futuras un recurso de aguas de inferior calidad del que existía originalmente en el estado natural. Sin embargo, el costo de las futuras medidas de ajuste disminuirán con el avance de la tecnología, de modo que las medidas necesarias de aplicar no necesariamente representarán a las generaciones futuras un mayor costo de lo que significaría a nuestra generación desarrollar recursos alternativos.
  
- c) Falta de Equilibrio (Sobreexplotación): Corresponde a la extracción sostenida de aguas subterráneas por sobre su caudal de renovación. Este enfoque podría ser aplicado como condición previa para el desarrollo de una región y para crear producción y capacidad de producción que, con el tiempo, podría justificar la importación de agua de mayor costo.

El enfoque utilizado en la explotación de los recursos hídricos subterráneos dependerá del conocimiento que se posea del balance hídrico y de las políticas de desarrollo de la zona. En todo caso será necesario establecer “ensayos de explotación” y mantener una vigilancia rigurosa y permanente de la evolución en el tiempo de los niveles piezométricos.

## **Legislación Chilena**

La administración de los recursos hídricos en general, y de las aguas subterráneas en nuestro país depende de la Dirección General de Aguas (DGA), la cual a través del Código de Agua y la Resolución 186 de 1996, establece las normas, los procedimientos y limitaciones para la exploración y explotación de las aguas subterráneas.

Dentro de este marco legal y reglamentario, el fuerte incremento de la demanda de los recursos hídricos es otro aspecto que condiciona la administración de estos recursos, en un contexto de creciente valorización y protección del medio ambiente, lo cual ha originado una fuerte preocupación por el problema de la asignación de los derechos de aprovechamiento.

Las disposiciones contenidas en la Resolución DGA N° 186/1996 tienden en general, a mejorar los procedimientos de tal forma de permitir un adecuado acceso a la exploración y explotación de las aguas subterráneas por parte de quienes tienen un real interés en desarrollarla y a promover la declaración de áreas de restricción, con el objeto de formar las respectivas Comunidades de Aguas Subterráneas, a fin de que los propios usuarios logren una adecuada gestión de los acuíferos.

Estas normas establecen que para **explorar** las aguas subterráneas se requiere tramitar una solicitud de exploración, la cual está limitada a:

- a) No se podrán efectuar exploraciones en terrenos privados de zonas que alimenten áreas de vegas y de los llamados bofedales de las regiones de Tarapacá y de Antofagasta sino con autorización fundada de la Dirección General de Aguas.
- b) No se podrán explorar aguas subterráneas mediante perforaciones a una distancia menor de 200 metros de obras de captación de aguas subterráneas que tengan derechos legalmente constituidos o que sean susceptibles de ser regularizadas.
- c) Durante la exploración, la Dirección General de Aguas podrá establecer todas aquellas condiciones y medidas que estime pertinentes para resguardar el entorno ecológico y la calidad de las aguas subterráneas contenidas en el acuífero explotado.

Respecto de la **explotación** de las aguas subterráneas, estas normas señalan:

- a) Para explotar aguas subterráneas deberá previamente constituirse el derecho de aprovechamiento respectivo establecido en el Código de Aguas.
- b) Solamente se podrá constituir el derecho de aprovechamiento sobre aguas subterráneas que hubieran sido alumbradas y cuya disponibilidad haya sido comprobada.
- c) No se podrá constituir un derecho de aprovechamiento de aguas subterráneas, en aquellos sectores próximos a afloramientos o vertientes, si de ello resultare perjuicio o menoscabo a derechos de terceros.

Por otro lado, la Dirección General de Aguas puede declarar **zonas de restricción** en aquellos casos en que lo soliciten y que demuestren:

- a) Los estudios demuestren que existe riesgo de un descenso generalizado de los niveles estáticos en el largo plazo, que afecte la capacidad productiva de los acuíferos, debido a una insuficiente recarga en relación a la explotación existente.
- b) Que exista peligro de contaminación del acuífero por intrusión de aguas que perjudiquen los aprovechamientos usuales.

Además, la Dirección General de Aguas puede declarar **zona de prohibición** para nuevas explotaciones en virtud de proteger el acuífero, cuando se constaten algunas de las siguientes situaciones:

- a) Que en el plazo de cinco años a lo menos, o durante un periodo representativo de la situación hidrológica de largo plazo del acuífero, se observe un descenso en el nivel estático y de rendimiento de las captaciones, afectando a lo menos al 50% de las captaciones del área.
- b) Que se haya comprobado la contaminación del acuífero como consecuencia del nivel de explotación existente.

## c) Modelamiento de las Aguas Subterráneas

### Modelo Conceptual

Un modelo es una herramienta que representa una aproximación de un sistema real, que puede reproducir las relaciones causa-efecto de interés.

Un modelo de simulación hidrogeológica es un modelo numérico, que consiste en un programa computacional que resuelve las ecuaciones de flujo del agua subterránea, en base a una discretización espacial del dominio, a la que se asignan condiciones de borde, condiciones iniciales y las propiedades hidrogeológicas del acuífero.

La etapa inicial de la modelación es la recopilación de antecedentes de terreno y la elaboración del **modelo conceptual** de funcionamiento del acuífero (figura 2.7).

El modelo conceptual se inicia con el conocimiento de la geología de la zona de estudio.

Posteriormente se deben considerar los aspectos hidrogeológicos del sistema acuífero, de manera de incluir en el modelo conceptual, las cotas del nivel de terreno, las cotas piezométricas (nivel del agua subterránea), sus fluctuaciones y series históricas, la dirección del flujo, la distribución espacial y temporal de la recarga, las zonas de descarga, la conexión con ríos o lagos, la ubicación y caudal de explotación de pozos.

Definido el modelo conceptual del sistema acuífero, se debe proceder a discretizar el dominio del acuífero, considerando que en zonas de gradiente hidráulico pronunciado y en las zonas de mayor interés, se debe utilizar mallas pequeñas e incluso diferentes estratos si es necesario. También se debe asignar las propiedades hidrogeológicas a cada celda, como la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento o la porosidad de drenaje y finalmente la asignación de las celdas de borde a ríos, lagos, zanjas o drenes. La recarga neta al sistema debe incorporarse tanto espacialmente como temporalmente, considerando las diferentes fuentes como recargas de ríos y canales, de precipitación, de riego o de otras fuentes o acuíferos adyacentes.

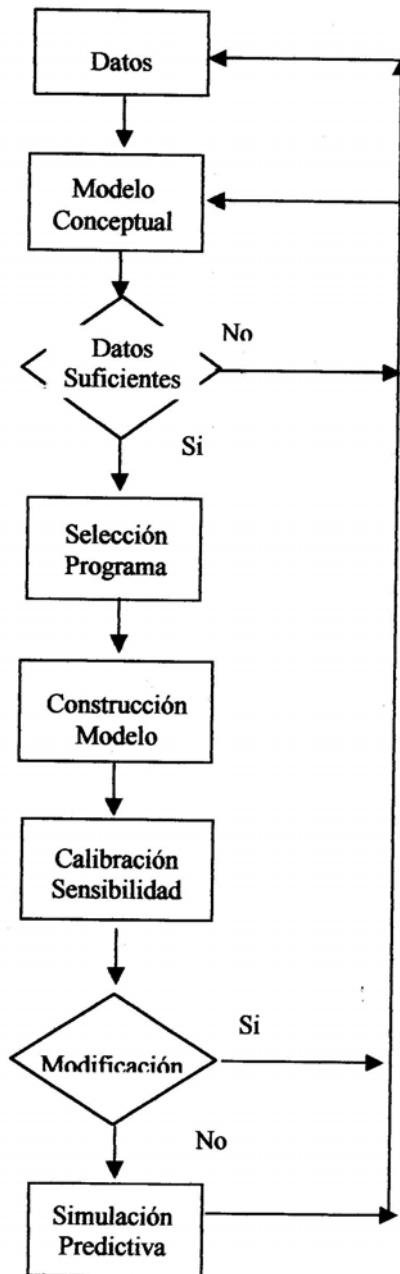
La **calibración de un modelo**, etapa siguiente del proceso, consiste en la asignación de los parámetros que definen el comportamiento del agua subterránea en el dominio, como la conductividad hidráulica, el coeficiente de almacenamiento, las condiciones de borde, las tasas de recarga, la infiltración de acuíferos inferiores, etc., de manera de igualar el sistema natural con el modelo. Se debe realizar en régimen permanente y transitorio. La calibración no da resultados únicos, lo que significa que existen otras combinaciones de parámetros que pueden entregar un buen ajuste a los datos observados. Por tal motivo es siempre necesario efectuar la validación de un modelo.

La **validación** consiste en la comparación de valores observados en el terreno, con valores predichos con el modelo para periodos diferentes al usado en la etapa de calibración.

La utilización de un modelo para predecir el comportamiento del agua subterránea frente a futuros eventos de explotación o de recarga, entregará resultados cuya incertidumbre dependerá de la calidad y cantidad de los datos e información utilizada para elaborar el modelo conceptual. Un **análisis de sensibilidad** puede permitir cuantificar el efecto en los resultados de una variación en los diferentes parámetros asignados al modelo y otorgar un nivel de confianza.

Finalmente, y después de haber usado el modelo durante un tiempo, es necesario efectuar auditorías que permitan verificar su real desempeño e incorporar nuevos datos de terreno que pueden terminar en un rediseño del modelo.

Figura 2.7: Proceso de Modelación



### **Modelo Matemático de Visual Modflow**

VISUAL MODFLOW es un programa computacional basado en el esquema de diferencias finitas que permite modelar un sistema acuífero en tres dimensiones.

VISUAL MODFLOW trabaja con un sistema finito de celdas representado por una grilla sobrepuesta al terreno que se desea modelar. Cada una de las celdas componentes de esta grilla posee propiedades hidrogeológicas particulares incorporadas al programa mediante la pantalla.

Entre las posibilidades que ofrece VISUAL MODFLOW se tienen:

- a) Permite la modificación del tramado de la malla en forma directa desde la pantalla, tanto para filas, columnas y estratos incorporados en sentido vertical. A su vez, permite el suavizado de la grilla para minimizar errores asociados a dispersión numérica y garantizar la estabilidad numérica de la solución del modelo.
- b) Permite ubicar en forma directa desde la pantalla las captaciones de aguas subterráneas.
- c) Permite el trazado de áreas de parámetros hidrogeológicos similares, las cuales se visualizan como zonas de distintos colores en la pantalla. Entre estos parámetros se incluyen las distribuciones de permeabilidades, coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico, recargas superficiales, evapotranspiración, etc.
- d) Los cauces y captaciones horizontales (Drenes) se enlazan de manera directa con los acuíferos por medio de parámetros de conductancia y nivel de agua.
- e) Las formas de los basamentos rocosos en modelos tridimensionales, las napas y la superficie del terreno, pueden ser importadas a través de la lectura de archivos de datos o través de la importación de archivos binarios de extensión GRD obtenidos a partir de SURFER. A partir de esto es posible representar fielmente las formas de los estratos que componen el sistema subterráneo y las condiciones iniciales del nivel de agua subterránea.



- f) Permite la incorporación de condiciones de borde que condicionan el comportamiento del sistema hidrogeológico.
  
- g) Es posible definir zonas de interés y efectuar balances volumétricos. Esta capacidad permite determinar flujos pasantes, aportes desde ciertos sectores, calibración de recargas, etc.

La salida de VISUAL MODFLOW permite observar en pantalla curvas isofreáticas, curvas de isodepresión, líneas de flujo, trayectorias de trazadores, vectores de velocidad, isócronas, etc. Por otro lado, es posible ver cortes transversales de la napa que permiten establecer conos de depresión de las captaciones cuando la malla posee un refinamiento adecuado. Estas posibilidades permiten que este modelo tenga aplicaciones en temas como: Determinación de Perímetros de Protección de Pozos, Estimación de Zonas de Recarga, Curvas de Saturación, Distribución de Contaminantes debido a la Componente Advectiva, Tiempos de Propagación y Líneas de Trayectoria, entre otros.

El programa posee una estructura modular, que consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes entre sí llamadas módulos. Estos módulos están agrupados en paquetes (Packages) asociados a una componente específica de la hidrología del sistema o al algoritmo de solución con que se resolverá el sistema de ecuaciones que describe el sistema modelado.

- **Modelo Matemático**

El movimiento tridimensional de agua subterránea de densidad constante a través un material de medio poroso puede describirse por la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. 2.33})$$

donde:

$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$	permeabilidades según X, Y, Z ( $LT^{-1}$ )
$h$	nivel piezométrico (L)
$W$	flujo por unidad de volumen ( $T^{-1}$ )
$S_s$	Almacenamiento Específico del Material Poroso ( $L^{-1}$ )
$t$	tiempo (T)

La ecuación (2.33) describe el escurrimiento impermanente en un medio heterogéneo y anisotrópico, y en conjunto con las condiciones de borde y las condiciones iniciales describe el sistema del flujo de agua subterránea.

Existen varios enfoques numéricos para resolver esta ecuación, uno de ellos es el método de diferencias finitas que consiste en representar el sistema continuo descrito por la ecuación anterior a través de un conjunto discreto y finito de puntos en el espacio y tiempo. El proceso conduce a un sistema de ecuaciones lineales cuya solución entrega los valores del nivel piezométrico en aquellos puntos y para ciertos instantes. Estos valores constituyen una aproximación a la solución analítica de la ecuación (2.33).

Para llevar a cabo esta discretización se divide el acuífero en bloques formados por un conjunto de líneas paralelas y ortogonales entre sí, cuyo espaciamiento dependerá del sistema modelado. El centro de cada celda definida en la grilla del modelo representa el nodo para la solución.

La ecuación de diferencias finitas que describe el sistema tiene la siguiente forma para una celda particular  $i, j, k$  y se obtiene del proceso de discretización antes mencionado.

$$\begin{aligned}
& CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^2 - h_{i,j,k}^2) \\
& CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^2 - h_{i,j,k}^2) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^2 - h_{i,j,k}^2) + P_{i,j,k} * h_{i,j,k}^2 + Q_{i,j,k} \\
& = SS_{i,j,k} \frac{(\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) (h_{i,j,k}^2 - h_{i,j,k}^1)}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ec. 2.34})
\end{aligned}$$

donde:

$CR_{i,j-\frac{1}{2},k}$  Conductancia según eje Y entre la celda  $(i,j,k)$  y la celda  $(i,j-1,k)$

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}}$$

$CR_{i,j+\frac{1}{2},k}$  Conductancia según eje Y entre la celda  $(i,j,k)$  y la celda  $(i,j+1,k)$

$$CR_{i,j+\frac{1}{2},k} = KR_{i,j+\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j+\frac{1}{2}}}$$

$CC_{i-\frac{1}{2},j,k}$  Conductancia según eje X entre la celda  $(i,j,k)$  y la celda  $(i-1,j,k)$

$$CC_{i-\frac{1}{2},j,k} = KC_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_i \Delta v_k}{\Delta c_{i-\frac{1}{2}}}$$

$CC_{i+\frac{1}{2},j,k}$  Conductancia según eje X entre la celda  $(i,j,k)$  y la celda  $(i+1,j,k)$

$$CC_{i+\frac{1}{2},j,k} = KC_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{\Delta r_i \Delta v_k}{\Delta c_{i+\frac{1}{2}}}$$

$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}}$  Conductancia según eje Z entre la celda  $(i,j,k)$  y la celda  $(i,j,k-1)$

$$CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k-\frac{1}{2}} \frac{\Delta c_i \Delta r_j}{\Delta v_{k-\frac{1}{2}}}$$

$CV_{i,j,k+\frac{1}{2}}$  Conductancia según eje Z entre la celda (i,j,k) y la celda (i,j,k+1)

$$CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} = KV_{i,j,k+\frac{1}{2}} \frac{\Delta c_i \Delta r_j}{\Delta v_{k+\frac{1}{2}}}$$

$KR_{i,j-\frac{1}{2},k}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje Y entre la celda (i,j,k) y (i,j-1,k)

$KR_{i,j+\frac{1}{2},k}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje Y entre la celda (i,j,k) y (i,j+1,k)

$KC_{i-\frac{1}{2},j,k}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje X entre la celda (i,j,k) y (i-1,j,k)

$KC_{i+\frac{1}{2},j,k}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje X entre la celda (i,j,k) y (i+1,j,k)

$KV_{i,j,k-\frac{1}{2}}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje Z entre la celda (i,j,k) y (i,j,k-1)

$KV_{i,j,k+\frac{1}{2}}$  Coeficiente de Permeabilidad según eje Z entre la celda (i,j,k) y (i,j,k+1)

$h_{i,j,k}^1$  Nivel piezométrico de la celda (i,j,k) en el instante  $t_1$

$h_{i,j,k}^2$  Nivel piezométrico de la celda (i,j,k) en el instante  $t_2$

$P_{i,j,k}$  Agrupa los coeficientes que ponderan a los niveles piezométricos en la componente que depende del nivel, en los términos que describen los flujos externos.

$Q_{i,j,k}$  Agrupa los valores constantes de las expresiones que describen los flujos externos.

$SS_{i,j,k}$  Almacenamiento específico, que corresponde al cociente entre el coeficiente de almacenamiento y la variación de nivel que ocurre entre  $t_2$  y  $t_1$ .

$\Delta r_j$  Dimensión según Y de la celda

$\Delta c_i$  Dimensión según X de la celda

$\Delta v_k$  Dimensión según Z de la celda

$t_2, t_1$  Tiempos 2 y 1, respectivamente

Se plantea una ecuación de este tipo para cada celda existiendo 7 incógnitas por ecuación (Nivel piezométrico de la celda y de las 6 celdas que la rodean). Si existen “n” celdas activas hay “n” ecuaciones y “n” incógnitas, por lo tanto este sistema puede ser resuelto simultáneamente para cada intervalo de tiempo, partiendo de los datos obtenidos en el instante previo, los que al inicio del proceso corresponden a las condiciones iniciales. Para cada intervalo de tiempo es necesario resolver el sistema de ecuaciones obteniéndose un conjunto de niveles piezométricos que representan los valores al final de ese intervalo de tiempo. El sistema se resuelve a través de iteraciones sucesivas hasta que la solución satisfaga el sistema de ecuaciones con un cierto error previamente definido (criterio de convergencia). En el modelo el criterio de convergencia resulta aproximadamente de un orden de magnitud menor que el grado de precisión requerido en los resultados.

El sistema que se plantea tiene la siguiente forma:

$$[A] * \{h\} = \{q\} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

$\{h\}$  es el vector con los niveles piezométricos al final del intervalo de tiempo,  $\{q\}$  es el vector que agrupa todos los términos constantes,  $[A]$  es la matriz de coeficientes que ponderan los niveles piezométricos.

- **Desarrollo del Modular Flow Package (MFP)**

- a) Tipos de Celdas y Simulación de Condiciones de Borde. El modelo trabaja con tres tipos de celdas:
  - Celdas activas o celdas de nivel piezométrico variable son aquellas donde el nivel piezométrico varía. Cada celda activa aporta una ecuación al sistema.
  - Celdas de nivel piezométrico constante son aquellas donde el valor del nivel piezométrico permanece constante durante el período de simulación. Se usan para simular condiciones de borde tipo Dirichlet y Neumann.
  - Celdas inactivas o sin flujo.

Las condiciones de borde tipo Neumann se simulan a través de las celdas activas mediante la asignación de un nivel constante a lo largo del tiempo o variable en el tiempo de acuerdo al ingreso mediante pantalla.

Existe otra alternativa de condición de borde denominada General Head Boundary (GHB) que establece una condición de flujo dependiente del nivel piezométrico de la celda y de la conductancia asociada a la interfase entre las celdas de condición especificada y un punto característico. Esto genera que el flujo varíe linealmente respecto a un nivel fijo de la fuente de flujo y al nivel piezométrico de la celda. Dependiendo de la diferencia entre los niveles piezométricos de la fuente y de la celda, el flujo corresponderá a una recarga o descarga puntual.

#### b) Estructura Global del Programa

El programa esta conformado por una unidad principal (MAIN) y un gran número de subrutinas llamadas módulos (MODULES) los que se agrupan en paquetes (PACKAGES) y procedimientos (PROCEDURES).

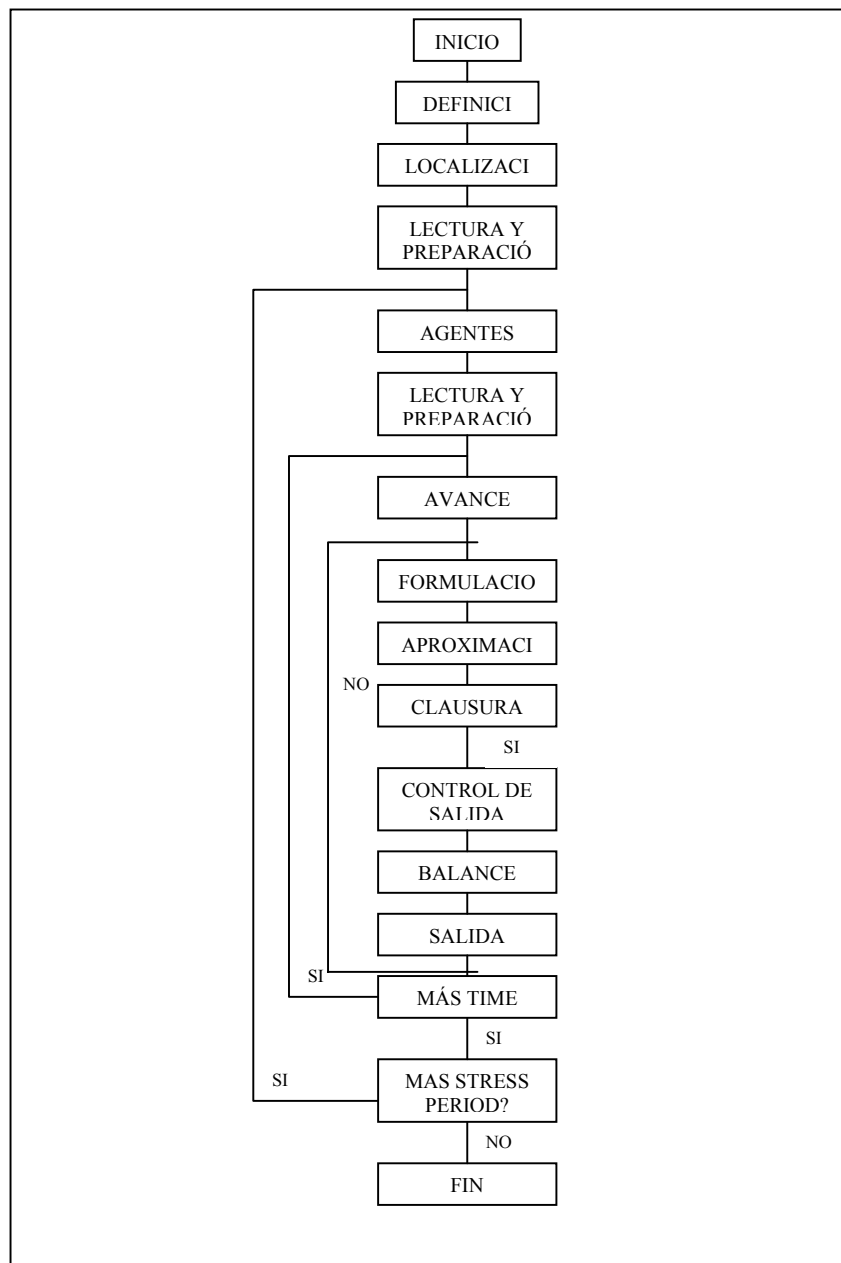
El tiempo de simulación se divide en períodos de stress (STRESS PERIOD), definido como el período mínimo dentro del cual los parámetros asociados a componentes del flujo externos al acuífero (STRESS PARAMETERS) permanecen constantes.

Cada uno de estos períodos es dividido en una serie de pasos o intervalos de tiempo (TIME STEPS). El sistema de ecuaciones de diferencias finitas es formulado y resuelto para obtener los niveles en cada nodo al final de cada paso de tiempo.

Las funciones y procedimientos que se realizan en una simulación típica se presentan en la figura 2.8. Cada celda corresponde a un procedimiento. Inicialmente, en el procedimiento de definición, se define el problema, a través de las dimensiones de la malla, si el flujo es permanente o impermanente, el número de períodos de stress, las opciones hidrológicas y el esquema de solución escogido. En el procedimiento de localización se escoge una cierta ubicación en la memoria, la cual se prepara para recibir la información requerida. En el

procedimiento lectura y preparación se leen todos los datos independientes del tiempo tales como condiciones de borde, condiciones iniciales, coeficientes de permeabilidad o de transmisibilidad y almacenamiento. En este procedimiento se realizarán algunos cálculos preliminares.

Figura 2.8: Esquema de Simulación de VISUAL MODFLOW



- **Compatibilidades de Visual Modflow con otros Programas**

Las compatibilidades del programa se pueden dar a nivel de entrada y salida. A nivel de entrada Visual Modflow puede importar archivos generados en otros software tales como:

Compatibilidad con SURFER: Los archivos creados en SURFER con formato GRD pueden ser importados directamente. Generalmente se utiliza para ingresar modelos tridimensionales como datos de superficie o formas del terreno, basamento rocoso, etc.

Compatibilidad con AUTOCAD: Este software es capaz de generar archivos con formato DXF, los que son leídos directamente por Visual Modflow. La utilidad en general es bastante similar a SURFER.

Además, puede tener interfase directa con cualquier programa o editor que genere archivos con formato ASCII.

Los resultados que genera el modelo en Visual Modflow tienen como salida varios archivos con diversas extensiones, en su mayoría con formato binario y ASCII, y que pueden ser leídos sólo por el mismo software. Sin embargo, al igual que los archivos de entrada al modelo, Visual Modflow permite exportar archivos con extensiones ASC y DXF que pueden ser usados por SURFER y AUTOCAD respectivamente.



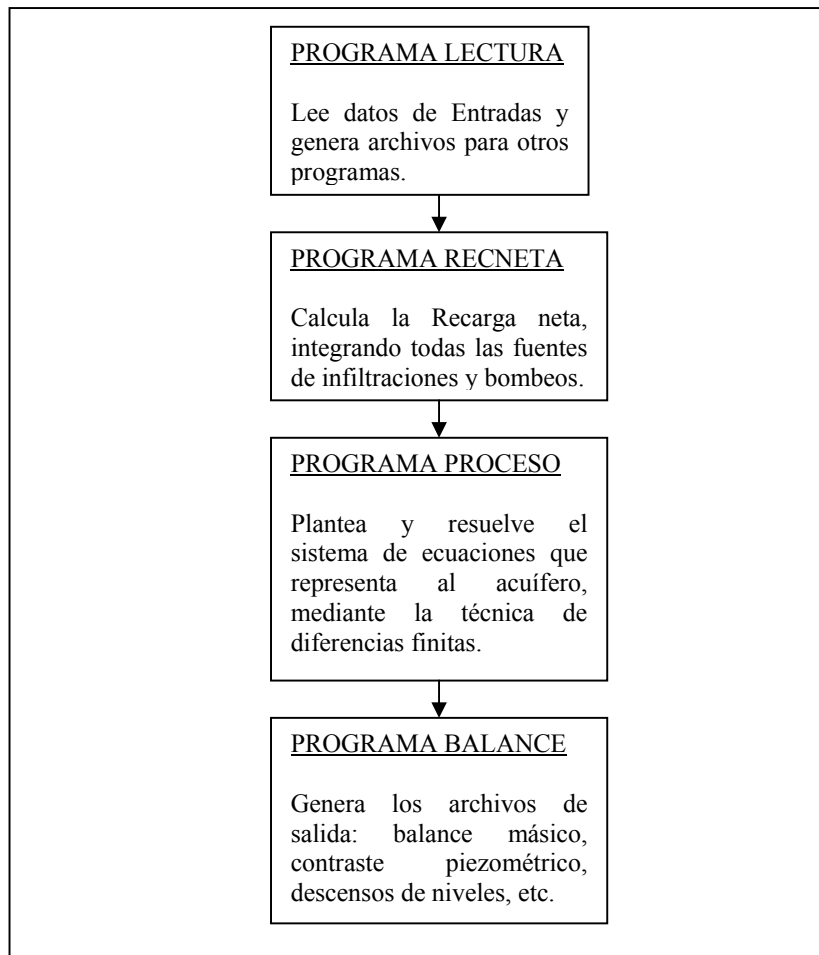
### **Modelo de Referencia para la Región**

La necesidad de crear una correspondencia entre la realidad física y una realidad virtual del comportamiento del agua (superficial y subterránea), es que se han originado en el tiempo diversas alternativas de simulación. Para el caso específico del valle del río Copiapó, se tiene como patrón el modelo SIMAC-4 creado por la Consultora Álamos y Peralta en 1987. Algunas referencias de este modelo se detallan a continuación:

El modelo SIMAC-4 es un programa computacional escrito en idioma FORTRAN, creado con el objeto de reproducir las condiciones de funcionamiento del embalse subterráneo. La construcción de este modelo tomó como base la publicación N°55 del año 1971 del Illinois State Water Survey de los autores T.A.Prickett y D.G.Lonnquist titulada "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation". Sobre dicha base se preparó SIMAC-4, simulador de acuíferos, adecuado para ser empleado en la representación del embalse subterráneo en el valle del río Copiapó.

El modelo SIMAC-4 se compone de 4 subprogramas, denominados LECTURA, RECNETA, PROCESO y BALANCE. La estructura del programa se sintetiza en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 2.9: Esquema General del Programa SIMAC-4



SIMAC-4 al igual que Visual Modflow plantea discretizar la zona de estudio a través de celdas activas e inactivas, condiciones de borde, zonas de recarga y descarga. La temática en definitiva, entre ambos modelos es la misma.

La ventaja de Visual Modflow sobre SIMAC-4, obviando las nuevas alternativas tecnológicas y la mejoría en la interacción usuario-computador, se debe principalmente a que Visual Modflow plantea el movimiento del agua como flujo tridimensional respecto del enfoque bidimensional.

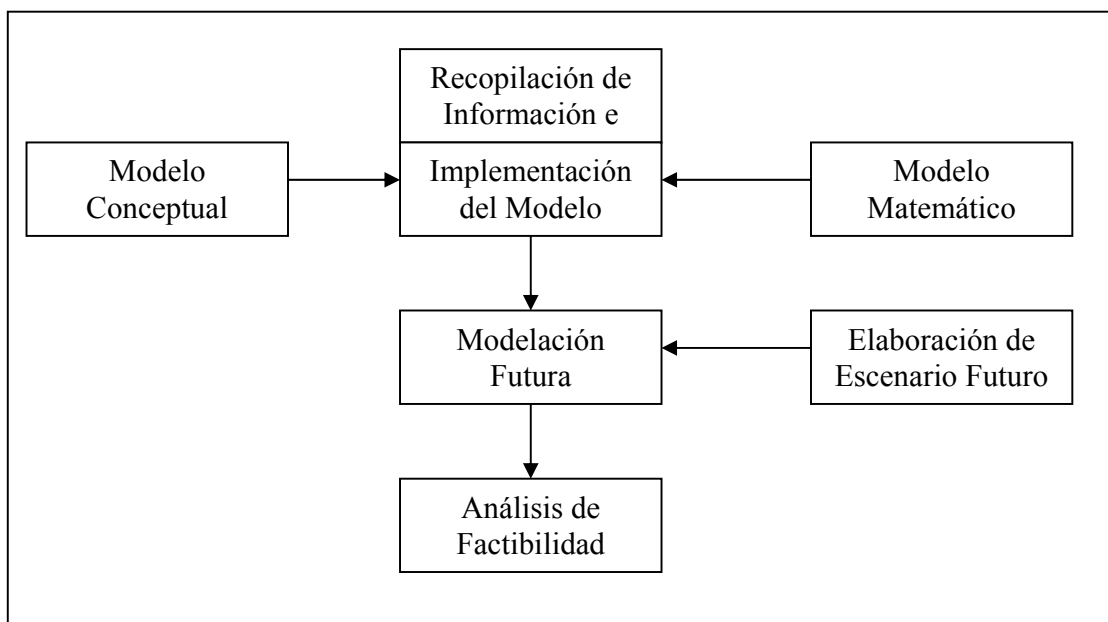
### 3. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

#### 3.1 Marco General

El objetivo es evaluar la factibilidad de abastecimiento del recurso hídrico subterráneo, en función de la demanda, utilizando un modelo de balance hídrico del acuífero que permita simular los efectos de las proyecciones de demandas a corto plazo (6 a 10 años) en la disponibilidad del recurso.

Para lo anterior, la metodología a ser aplicada (figura 3.1) considera la construcción de un modelo hidrogeológico de la cuenca en estudio, el cual es la herramienta esencial para comprender el funcionamiento del agua subterránea en el valle y que permitirá simular diferentes escenarios de aprovechamiento de agua. Con los resultados obtenidos del modelo más los parámetros y variables que se identificarán, se determinará la escasez o no del recurso agua en el futuro.

Figura 3.1: Metodología General

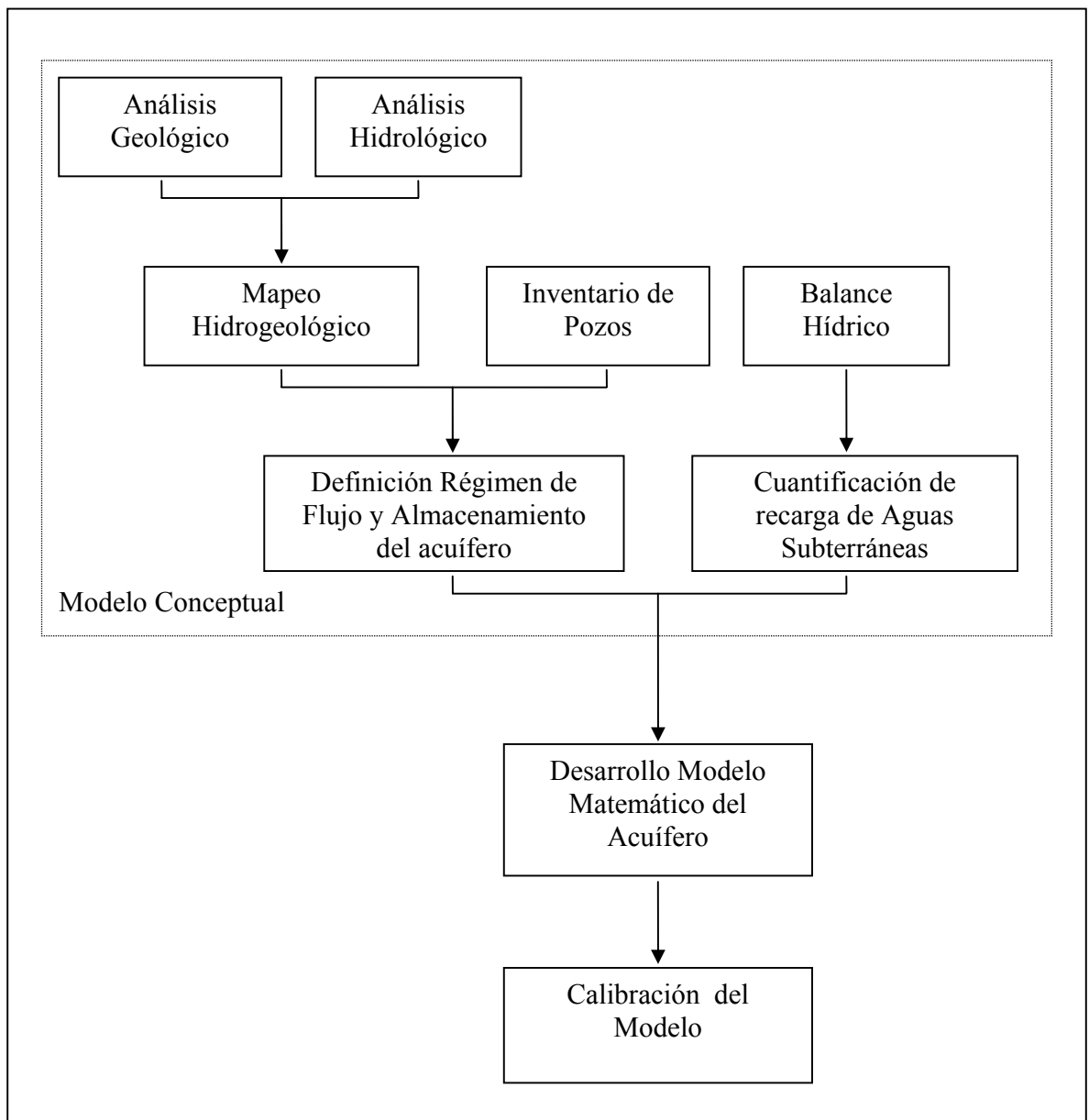


## 3.2 Metodologías Específicas

### Implementación del Modelo

La figura 3.2 presenta un esquema que sintetiza las principales variables y los procedimientos a considerar en la implementación del modelo de aguas subterráneas.

Figura 3.2: Esquema Metodológico de la Construcción del Modelo



Inicialmente resulta indispensable tener un acabado conocimiento del “sistema aguas subterráneas” de la cuenca en estudio, es decir, se requiere conocer y comprender la estructura y funcionamiento del acuífero subterráneo en la cuenca. Para lograr este objetivo, los pasos a seguir son los siguientes:

- 1) Se debe comenzar por recopilar toda la información geológica del sector en estudio, de manera de establecer la distribución y configuración de los acuíferos que conforman la estructura de la cuenca. Este estudio debe ser apoyado con cartografía geológica detallada, con base topográfica precisa tanto de la superficie como del basamento rocoso, y perfiles estratigráficos en el sector de estudio.

La información geológica recopilada es fundamental en este tipo de estudio, ya que forma parte de los factores que condicionan la escorrentía, la alimentación natural y las descargas de los acuíferos. Dentro de esta información es relevante contar con los espesores y continuidad de cada unidad acuífera (si es que existe), así como de la extensión del sistema acuífero.

- 2) Asimismo, se requiere recopilar y analizar la información del comportamiento hidrológico de la cuenca. La información esencial en este tema la constituye el estudio de las propiedades hidráulicas del sistema. Estas propiedades permiten definir el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores.

Las principales propiedades a analizar son:

Transmisividad (T)

Permeabilidad (k)

Coefficiente de Almacenamiento (Sy)

Coefficiente de Almacenamiento Específico (Ss).

Con la información geológica e hidrológica, se puede tener una caracterización hidrogeológica de la cuenca que dará cuenta de la estructura y funcionamiento de esta.

- 3) Posteriormente, es necesario realizar un inventario de pozos existentes en la cuenca y realizar un análisis de la información de los niveles piezométricos disponible de dichos pozos, lo que permite, entre otras cosas, determinar fluctuaciones de los niveles de agua subterránea, cuantificar el cono de depresión causado por la extracción de agua y estimar volúmenes de recarga y descarga. Esta información permite la construcción de un mapa de isopiezas (equipotenciales de la superficie piezométrica), lo que significa tener un estudio global de la morfología de la superficie piezométrica y una interpretación de las fluctuaciones de los niveles del agua.
- 4) Los antecedentes recopilados en los puntos anteriores, permitirán realizar un balance hídrico de la cuenca, es decir, determinar los volúmenes de recarga y descarga que se producen en la cuenca. El establecimiento del balance hídrico requiere de los límites y dimensiones de la cuenca, tanto en superficie como en profundidad, localización de las capas acuíferas a distintas profundidades, estudios de las reservas de aguas subterráneas y de su variación, estudio e interpretación de los datos relativos a los factores climáticos, etc.. Es importante contar para este estudio con mapas geológico, litológico, piezométrico y de suelos.

Se debe identificar además, los flujos de agua que conforman el sistema acuífero:

- a) Flujos areales de ingreso, a través de la superficie del terreno, tales como recarga por infiltración de lluvias.
- b) Flujos areales de salida, a través de la superficie del terreno, tales como descarga por evaporación y evapotranspiración.
- c) Flujos que ingresan lateralmente a la cuenca, correspondiente a aguas producidas en la cuenca superficial afluyente.
- d) Flujos subterráneos de ingreso y salida, desde y hacia otras cuencas.

Con toda esta información se puede establecer el régimen de flujo y almacenamiento del acuífero, además conocer la recarga de las aguas subterráneas, quedando el sistema aguas subterráneas de la cuenca caracterizado.

En resumen, para desarrollar el modelo conceptual se requiere conocer el sistema geológico, el sistema hidrológico, el dominio del sistema acuífero, las características hidráulicas, las recargas y extracciones, y el balance hídrico del sistema acuífero.

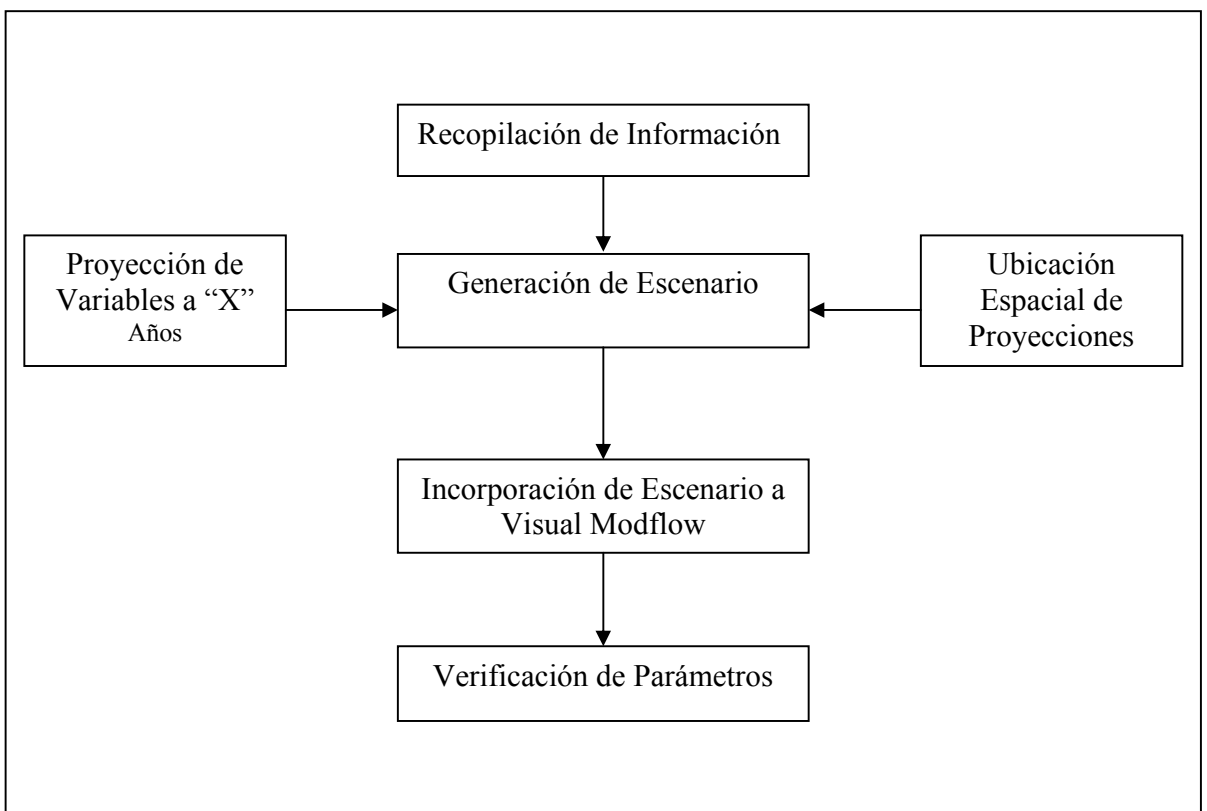
- 5) Con el modelo conceptual definido, se selecciona el programa computacional a utilizar para la modelación, de acuerdo al tamaño del sistema a modelar y los objetivos a alcanzar con la modelación.
- 6) Posteriormente, se procede a desarrollar el modelo matemático, el que consiste en realizar una discretización espacial del área de estudio y una discretización temporal acorde a los comportamientos de fluctuaciones de agua. Además, incorporar las condiciones iniciales y de borde (parámetros de los acuíferos, flujos de entrada y salida) que constituyen el estado inicial de la cuenca.
- 7) Con los datos de niveles de agua subterránea existentes en el área, se realizará la calibración del modelo para ajustar los parámetros que intervienen en la modelación, de manera de igualar los niveles que generará el modelo de simulación.
- 8) El paso siguiente, es realizar un análisis de sensibilidad que permite evaluar las incertidumbres del modelo.

Completados estos pasos, el modelo estará preparado para ser operado y simular las alternativas de explotación del recurso aguas subterráneas en la cuenca en estudio.

### Elaboración y Modelación de Escenario Futuro

La aplicación en este caso, se refiere a determinar la capacidad del acuífero para abastecer las demandas de agua subterránea en el futuro. La figura 3.3 presenta un esquema que sintetiza las principales variables y los procedimientos para generar escenarios futuros de demandas:

Figura 3.3: Esquema Metodológico de la Aplicación





## 1) Recopilación de Información

Esta etapa consiste básicamente en la búsqueda de la mayor cantidad posible de datos y estudios relacionados, los que servirán como información base para ingresar al modelo o como referencia para proyectarla en el tiempo. Teniendo en consideración que las demandas de agua son independientes entre las actividades productivas del valle del río Copiapó, es posible dividir la información requerida en cinco grupos: Hidrología base, Catastro de pozos, Demandas del sector agrícola, Demandas del sector minero y Demandas de agua potable.

- a) **Demandas del Sector Agrícola:** Con el fin de establecer las demandas de agua del sector agrícola se necesita obtener información de superficie cultivada, tipo de cultivo, tasas de evapotranspiración y recarga por cultivo. Es necesario, contar con proyecciones de superficie por cultivo.
- b) **Demandas del Sector Minero:** Se requiere establecer las futuras demandas de este sector, para ello se deben conocer las inversiones futuras proyectadas por este sector, además de su ubicación.
- c) **Demandas de Agua Potable:** Como la producción total de Agua Potable para Copiapó, Tierra Amarilla, Caldera y Chañaral proviene del recurso subterráneo del valle del río Copiapó, entonces para estimar la producción futura es necesario considerar las proyecciones de inversión (producción y pérdidas) de la Empresa de Servicios Sanitarios de Atacama (EMSSAT S. A.) en el valle.

## 2) Proyección de Variables en el Tiempo

Con el fin de generar un escenario de desarrollo se requiere cuantificar las demandas futuras, por lo que es necesario proyectar las variables en el tiempo, para ello se espera contar con las proyecciones de algunas, idealmente todas, pero en el caso que esto no ocurra se procederá utilizando una metodología acorde al comportamiento lógico de la variable y de las reales posibilidades que ofrece el medio físico del valle del río Copiapó.

### 3) Ubicación Espacial de las Variables Proyectadas

Se requiere georeferenciar las nuevas demandas, esto es, establecer la ubicación de nuevos cultivos, de nuevas inversiones mineras, de demandas de agua potable y su punto de extracción. Como el área de interés es de una extensión considerable, la ubicación de cada variable será según el sector donde se encuentre.

### 4) Incorporación del Escenario al Modelo Hidrogeológico

Esta etapa consiste en ingresar las variables proyectadas al modelo hidrogeológico previamente construido. Para ello las variables se deben individualizar, georeferenciar y cuantificar en cada periodo que cubra la totalidad del tiempo a modelar.

### 5) Verificación de Parámetros

El modelo hidrogeológico anteriormente generado, utilizando el software Visual Modflow, se encuentra calibrado y validado para un período de catorce años y medio, es decir veintinueve semestres, comprendidos entre los años 1987 y 2001. Al agregar información de períodos futuros el modelo se mantiene en equilibrio, pero es necesario verificar nuevamente la variación de los parámetros para los períodos que han sido incorporados de manera de optimizar los resultados.

### **Análisis de Factibilidad**

La utilización de un modelo para predecir el comportamiento del agua subterránea frente a futuros eventos de explotación, entregará resultados que determinarán la factibilidad del recurso para un periodo de 10 años.

La capacidad del acuífero de abastecer las demandas futuras, se determinará de acuerdo a los resultados que entregue el modelo según los siguientes criterios:

- **Niveles de Agua**

Cada pozo de observación entregará series de niveles simulados por periodo de estrés. Estos datos en contraste con el nivel del último periodo de estrés observado, serán analizados y se determinará el descenso o aumento de los niveles de la napa en la zona donde se encuentra ubicado el pozo.

Por otro lado, se calcula para cada pozo de observación la tasa de descenso medio (m/año) en el periodo de observación (1987-2001). Conjuntamente, si el pozo presenta un descenso significativamente mayor a la tasa de descenso medio, se calculará el periodo de descenso crítico, por medio de la curva niveles observados v/s niveles calculados durante cada periodo de estrés. Si la variación de niveles no se debe a causas externas, entonces la zona en que se ubica, será declarada como zona crítica.

En caso contrario, si el pozo presenta una variación de nivel menor a la tasa de descenso, se calificará como zona no crítica.

La factibilidad del recurso frente a demandas futuras, dependerá de la visión global de las zonas a lo largo del valle.

- **Balance de Masa por Sector**

La disponibilidad sostenible del recurso en el tiempo, también es posible evaluarla a través de los volúmenes de agua por unidad de tiempo. Para determinar una disponibilidad mínima del recurso hídrico subterráneo, se confrontan los balances de masa de los años proyectados respecto del patrón considerado en el año 2001.

De este análisis se concluirá respecto de la factibilidad de abastecimiento de demandas. El criterio a priori es si la disponibilidad disminuye más de un 50%, en ese caso la situación del embalse subterráneo sería crítica o infactible, lo que significaría que la tasa de bombeo es mayor a lo que soporta el acuífero.

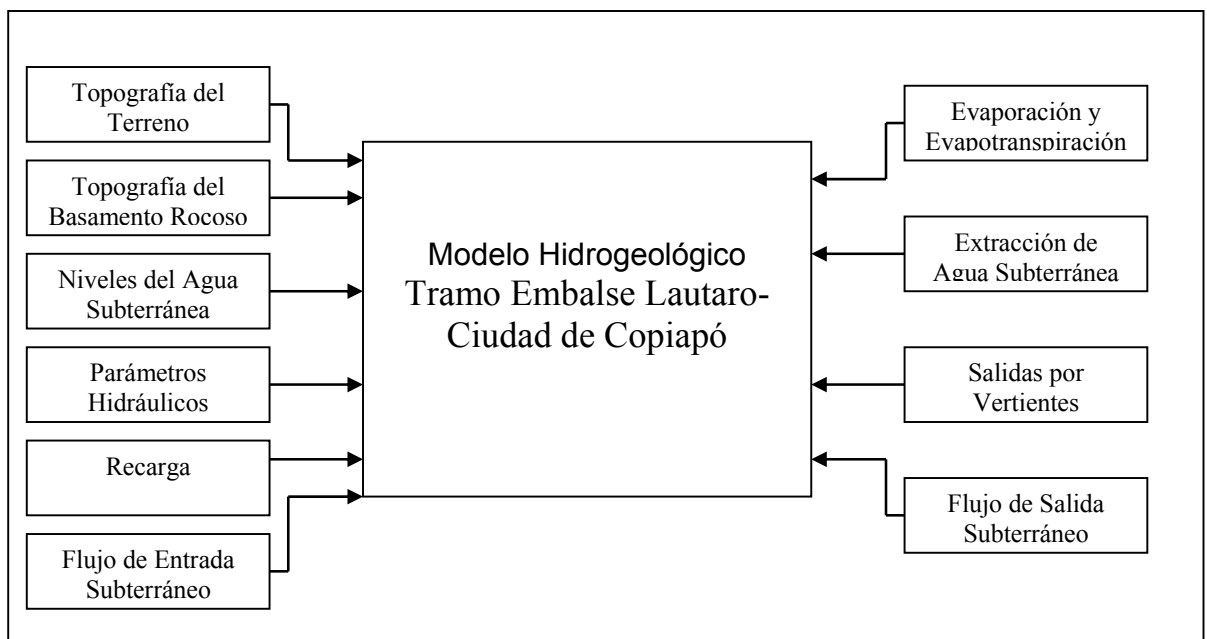
## 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN

La construcción del modelo de aguas subterráneas es el proceso de transformar el modelo conceptual en una forma matemática. Típicamente, el modelo de flujo consta de dos partes: el conjunto de datos necesarios para ingresar al programa computacional y la implementación y calibración del modelo en el software.

### 4.1 Información para la Modelación

La primera parte tiene como objetivo determinar variables y parámetros para comprender el funcionamiento del agua subterránea en la cuenca en estudio, y que permitirá simular diferentes escenarios de aprovechamiento de agua. La información necesaria para alimentar el modelo consta de datos de entrada, tal como se aprecia en la figura 4.1:

Figura 4.1: Esquema General de datos de Entrada que requiere el Modelo

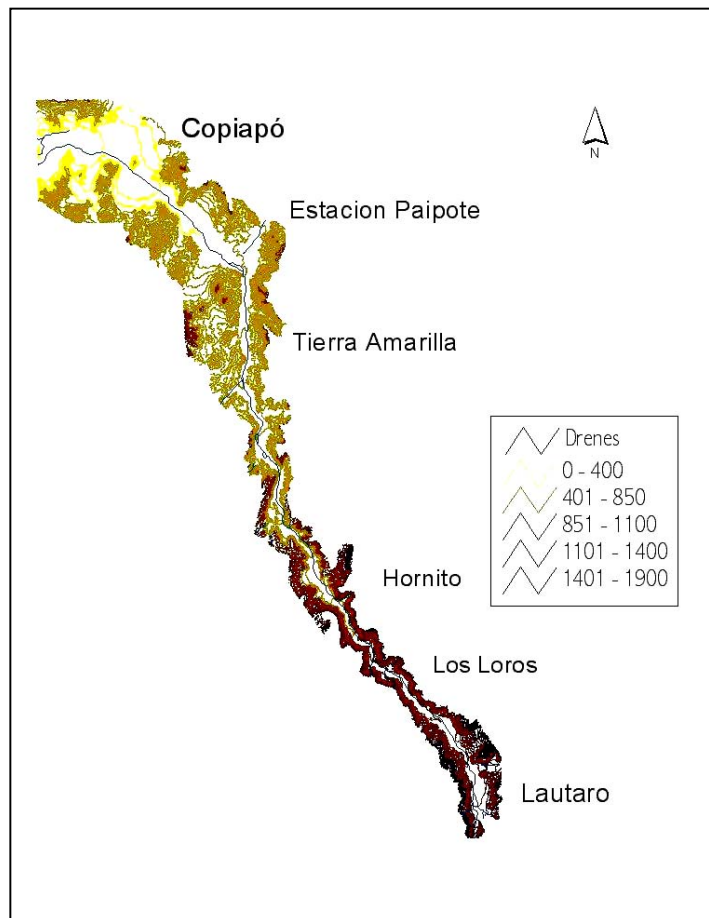


### Topografía del Terreno

Con respecto a la carta topográfica se puede señalar que el sistema está representado de oeste a este por la quebrada de Paipote y los ríos Jorquera, Pulido y Manflas, principales tributarios del río Copiapó. Topográficamente los cerros se muestran menos escarpados y más bajos ha medida que el valle se ensancha, mientras que en los sectores más angostos como Hornito-La Puerta-San Antonio las formas del relieve son más abruptas, en el sector de Piedra Colgada hacia Angostura la característica geomorfológica está representada por una extensa planicie litoral.

De acuerdo a la figura 4.2, las cotas van desde 300 metros en el sector de Copiapó (representado con color amarillo claro), hasta los 1500 metros en los sectores altos cercanos al embalse Lautaro (color café oscuro)

Figura 4.2: Topografía del Valle del río Copiapó



### **Topografía del Basamento Rocoso**

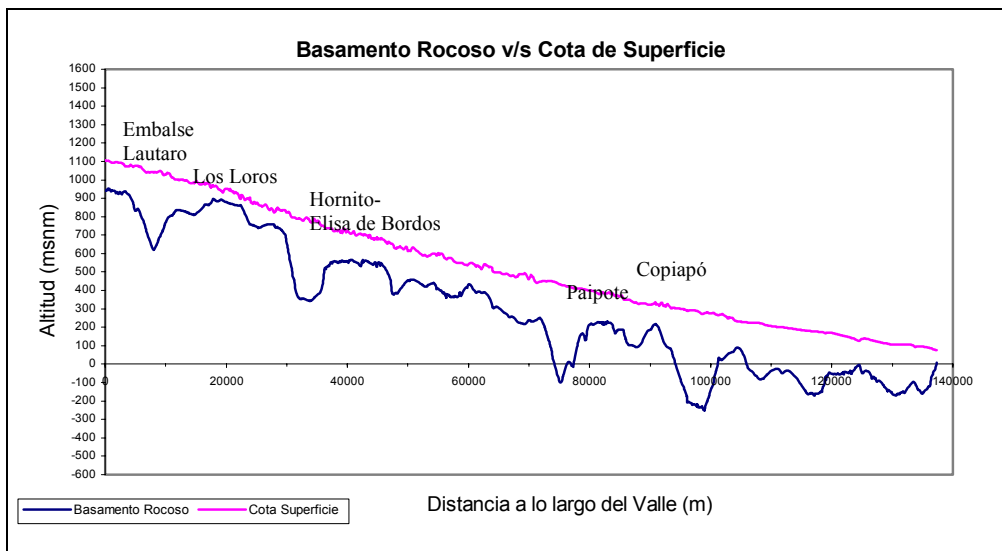
La historia geológica del valle es tal que ha dado lugar a estructuras del tipo horst (Bloque de la corteza terrestre elevado entre fosas tectónicas y delimitado por fallas) y graben, siendo estas últimas las que al estar rellenas por material aluvial, dan origen a los mayores espesores del acuífero, hasta 500 metros. Por el contrario, en las zonas de horst, los espesores llegan al mínimo, obteniéndose valores de 40 a 80 metros.

El valle del río Copiapó está conformado por un relleno aluvial detrítico, permeable que yace sobre la roca basal impermeable. En cuanto al relleno se diferencian tres tipos de distinta permeabilidad; un relleno aluvial detrítico antiguo, es de permeabilidad media a alta y en algunos sectores se encuentra directamente sobre la roca basal, puede alcanzar espesores de hasta 200 ó 300 metros.

Un relleno detrítico más moderno de permeabilidad alta a muy alta compuesto de gravas, arenas y bolones, con espesores comprendidos entre los 100 y 250 metros; y unas intercalaciones de material aluvial, producto de los acarreo de las quebradas laterales que han producido capas de material de permeabilidad media, entremedio de las anteriores.

El embalse subterráneo formado por estos tres tipos de materiales conforma una sola unidad y es de naturaleza libre, es decir, no existen acuíferos confinados. De acuerdo con esto, se tiene que en sentido longitudinal del valle existe un escurrimiento de agua subterránea desde aguas arriba hacia aguas abajo a lo largo de todo el valle.

Figura 4.3: Profundidad del basamento Rocoso v/s Cota de la Superficie



De acuerdo a la figura 4.3, se observa que las zonas con mayor espesor corresponden al segmento ubicado en torno a Hornito – Elisa de Bordos, Paipote y Copiapó. El menor espesor de relleno sedimentario se encontraría en torno al sector de Los Loros y La Puerta.

Los tramos ubicados en las zonas extremas del segmento de estudio, se caracterizan por una morfología de basamento impermeable fuertemente contrastante, con una silueta de basamento que evidenciaría la presencia de amplias depresiones (“gravens”) vinculadas a zonas de falla y/o fractura, que separan estrechos altos (“horst”) en zonas donde la sección del valle es mínima. El segmento central (Elisa de Bordos – Paipote), se caracteriza por presentar una morfología de basamento mucho más homogénea y regular en cuanto a las variaciones que muestra la profundidad de su basamento. En detalle las características morfológicas del basamento rocoso para los tramos: Embalse Lautaro – Elisa de Bordos y Elisa de Bordos – Paipote, son:



a) Embalse Lautaro – Elisa de Bordos

En este sector las variaciones en la morfología del basamento impermeable describen una silueta de basamento con forma de “W”. A partir del Embalse Lautaro la profundidad aumenta gradualmente hacia el sector de Goyo Díaz, desde donde disminuye progresivamente hasta el sector de San Antonio. Aguas abajo de esta localidad, entre Los Loros y La Puerta, la profundidad del basamento, caracterizada por un alto de basamento (“horst”), es muy homogénea y mínima en una zona donde el valle desarrolla marcados estrechamientos en su sección transversal. Desde La Puerta y hacia el sector de Hornito, la profundidad del basamento aumenta gradualmente, para disminuir drásticamente en el sector de Elisa de Bordos.

b) Elisa de Bordos – Paipote

La morfología del basamento impermeable es muy homogénea y subhorizontal con valores que fluctúan aproximadamente entre los 108 y 265 metros de profundidad. El tramo Tierra Amarilla – Paipote, la profundidad del basamento tiende a aumentar con valores máximos de 200 metros. Este sector que evidencia un aumento en la profundidad del basamento rocoso impermeable, coincide con una zona de gran demanda de aguas subterráneas.

## **Estratigrafía**

Se cuenta con un total de 100 pozos y/o norias con su respectiva estratigrafía (Álamos y Perlata, 1987) para la zona en estudio. Las profundidades perforadas van desde los 6 hasta los 170 metros, de ellos se observa que en ningún caso la cantidad de arcilla presente supera el 50%, y en general se encuentra en compañía de arena y grava (en distintos porcentajes y tamaños), por lo que no se evidencian estratos impermeables, y la diferencia granulométrica media entre estratos en general no es muy considerable.

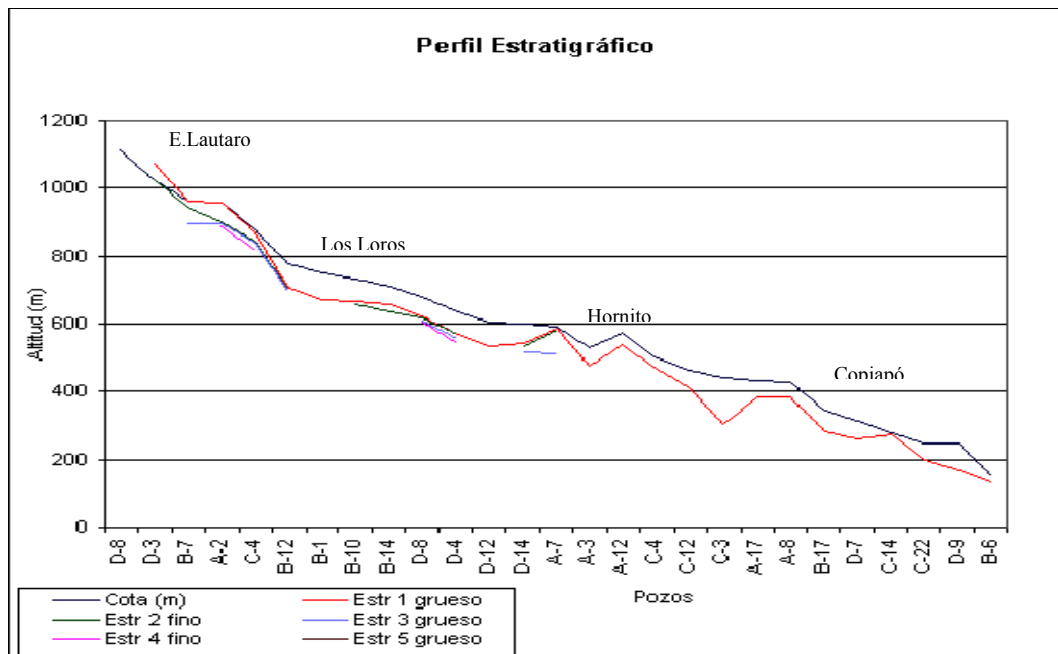
Las texturas de mayor presencia a lo largo del valle son: arenosa, franco arenosa, franco limosa y franco arcillosa.

Por otra parte, con el fin de establecer la estratificación del relleno del valle del río Copiapó se muestra la figura 4.4 “Perfil Estratigráfico Longitudinal”, en la que se han seleccionado los pozos más representativos divididos en sectores con su respectiva estratigrafía (anexos). Los estratos se han dividido en dos tipos de textura: gruesa y fina. El criterio utilizado para diferenciar entre uno y otro ha sido el siguiente:

Estrato con más de 33% de arcilla      ⇒ textura fina

Estrato con menos de 33% de arcilla      ⇒ textura gruesa

Figura 4.4: Perfil Estratigráfico Longitudinal



De la figura 4.4 se observa que no existe continuidad a lo largo del valle, ni en un determinado sector, de los estratos denominados finos. Además, el espesor alcanzado por estos resulta ser ínfimo al compararlo con los estratos denominados gruesos, por lo que al parecer estos no se desarrollan como estratos de sedimentos finos, sino más bien como bolsones de sedimentos finos.

Por lo tanto, parece recomendable asumir el relleno acuífero como mono-capa debido a su continuidad tanto en sentido longitudinal como vertical.

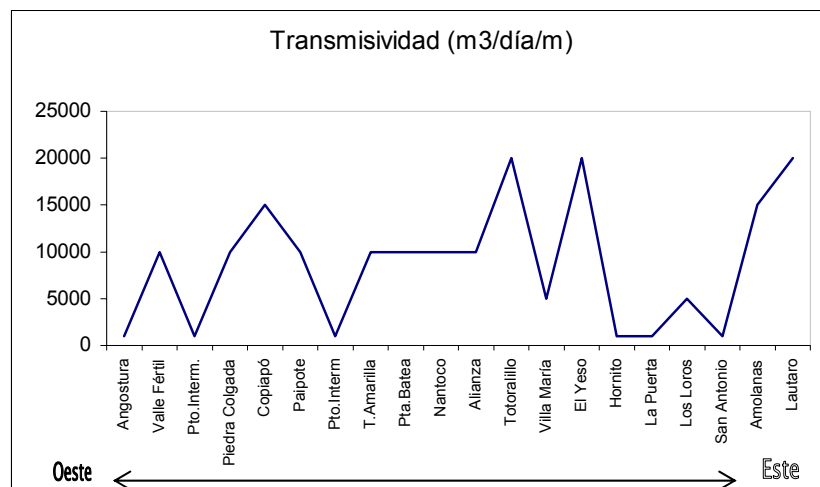
## Propiedades Hidráulicas

### • Transmisividad (T)

Los valores de transmisividad (datos extraídos de Álamos y Peralta, 1987), que aparecen en la figura 4.5, muestran que las transmisividades del valle en general oscilan entre los 1.000 (m<sup>3</sup>/día/m) hasta los 20.000 (m<sup>3</sup>/día/m).

El perfil longitudinal de la transmisividad en la cuenca muestra marcadas zonas de disminución drástica de los valores, estas zonas de disminución se presentan en los sectores Villa María, Hornitos, La Puerta, Los Loros y San Antonio; las mayores transmisividades se dan en los sectores Lautaro, El Yeso y Totoralillo.

Figura 4.5: Perfil longitudinal de Transmisividad Media a lo largo del Valle.



- **Permeabilidad (k)**

Los datos de permeabilidad son calculados a partir de los datos de transmisividad y niveles de agua subterránea, por la fórmula:

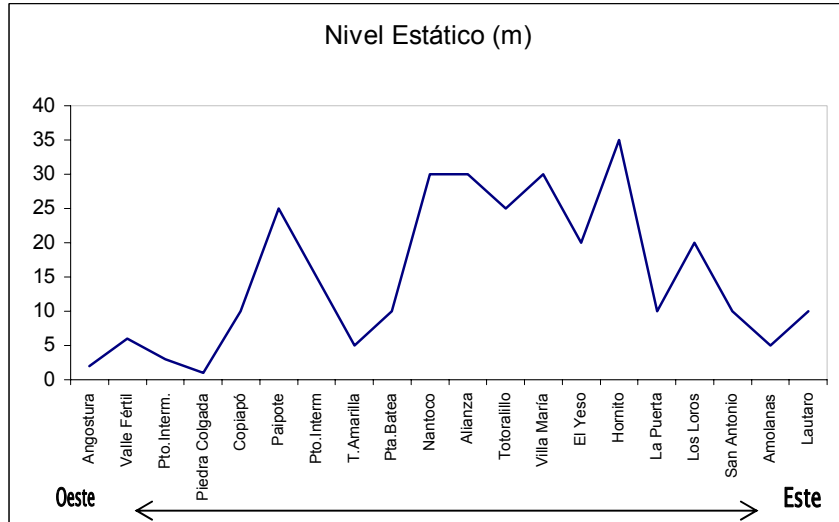
$$\text{Permeabilidad} = \frac{\text{Transmisividad}}{\text{Nivel Estático}}$$

Según la figura 4.6, el nivel estático presenta una secuencialidad de bajo-alto-bajo, debido al ensanche y angostamiento del valle en los diferentes puntos, destacándose así que los niveles estáticos se sitúan a diversas profundidades, en directa relación con la profundidad del basamento rocoso.

El nivel más profundo, alrededor de 35 metros, se encuentra en el sector de Hornitos, siguiéndole Nantoco y Paipote. Los niveles de menor profundidad se presentan en los sectores de Amolanas y Tierra Amarilla.

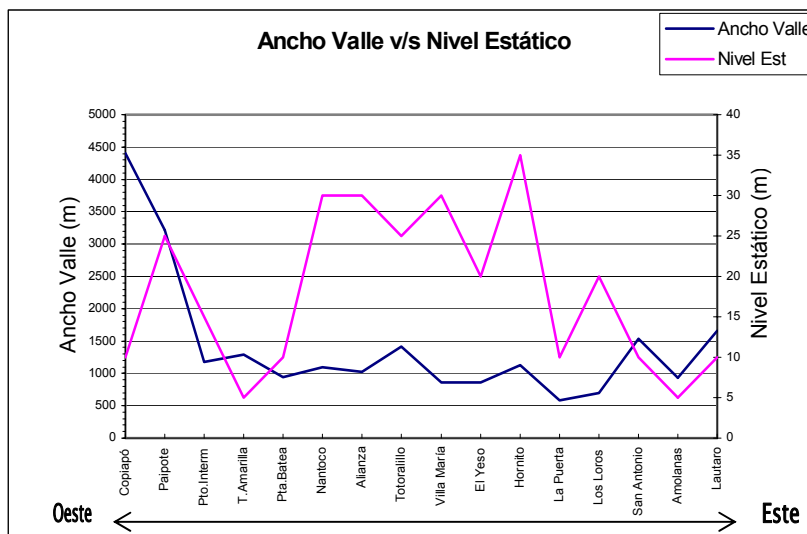
Además, existen en el valle de Copiapó amplias zonas de vegas. Normalmente, estas se desarrollan sólo en la caja del río, en sectores de niveles poco profundos, menores de 10 metros. Los sectores donde se ha detectado vegas son San Antonio, Tierra Amarilla-Nantoco y Copiapó.

Figura 4.6: Perfil longitudinal del Nivel Estático Medio a lo largo del Valle.



De acuerdo a la figura 4.7, el comportamiento del Nivel del agua del acuífero es atribuible en gran medida a la forma del valle, específicamente a su ancho. Es así, como se aprecia que a mayor ancho del valle, el nivel estático se acerca a la superficie y viceversa, esta observación se apoya en un coeficiente de correlación de  $-0.362$  entre ambas variables.

Figura 4.7: Correlación Ancho del Valle v/s Nivel Estático



- **Coefficiente de Almacenamiento (S)**

El coeficiente de almacenamiento es el volumen del agua que un acuífero puede entregar o retener del depósito general por unidad de superficie del acuífero y por unidad de cambio en la componente normal a esa superficie. En un acuífero no confinado el coeficiente de almacenamiento se denomina como  $S_y$ .

Para la determinación del coeficiente de almacenamiento se cuenta con muy poca información, los datos disponibles (Álamos y Peralta, 1987) señalan cifras entre 0.016 y 0.11. Otros datos (Álamos y Peralta, 1995) indican valores medios de 0.05, 0.10 y 0.15. Por otra parte, se tiene que por la naturaleza libre descubierta en embalses subterráneos estudiados, cabe esperar que este coeficiente se ubique ente 0.10 y 0.20. Por lo tanto, como una manera de adoptar una cifra conservadora se estima un valor medio para este coeficiente en un 0.10.

Con un coeficiente de almacenamiento igual 0.10, los volúmenes de agua embalsados, considerando sólo los primeros 200 metros de profundidad del acuífero, alcanzan a 5.270 Mm<sup>3</sup>. De ellos hay 1.670 Mm<sup>3</sup> en el sector aguas arriba de Copiapó y 3.600 Mm<sup>3</sup> aguas abajo de Copiapó.

Si el coeficiente de almacenamiento varía de 0.10 a 0.05, las reservas de acuífero descienden de 6.890 Mm<sup>3</sup> a 3.445 Mm<sup>3</sup>.

Las tablas presentadas a continuación muestran los volúmenes embalsados por el acuífero dividido en sectores (se considera un espesor máximo de 200 metros):

Tabla 4.1: Volúmenes Acuíferos y de Agua Embalsada, sector “E.Lautaro-La Puerta”

Espesor Acuífero	Volumen Mm <sup>3</sup> Acuífero	Volumen Agua Almacenada		
		S=5%	S=10%	S=15%
Terreno a 100 m.	2.040	100	200	300
Terreno a 200 m.	3.400	170	340	510
Terreno a 300 m.	4.200	210	420	630

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Tabla 4.2: Volúmenes Acuíferos y de Agua Embalsada, sector “La Puerta-Mal Paso”

Espesor Acuífero	Volumen Mm <sup>3</sup> Acuífero	Volumen Agua Almacenada		
		S=5%	S=10%	S=15%
Terreno a 100 m.	3.300	160	330	500
Terreno a 200 m.	4.700	240	470	710
Terreno a 300 m.	5.400	270	540	810

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Tabla 4.3: Volúmenes Acuíferos y de Agua Embalsada, sector “Mal Paso-Copiapó”

Espesor Acuífero	Volumen Mm <sup>3</sup> Acuífero	Volumen Agua Almacenada		
		S=5%	S=10%	S=15%
Terreno a 100 m.	5.220	260	520	780
Terreno a 200 m.	8.600	430	860	1290
Terreno a 300 m.	10.400	520	1.040	1.560

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995



## Recarga

### • Infiltraciones Directas de Precipitaciones

En la cuenca de río Copiapó hay ocho estaciones que registran precipitación pluvial y una mide precipitación nival. La tabla 4.4 señala la ubicación, período de registro y la institución que lo controla. La Figura 4.8 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas mencionadas.

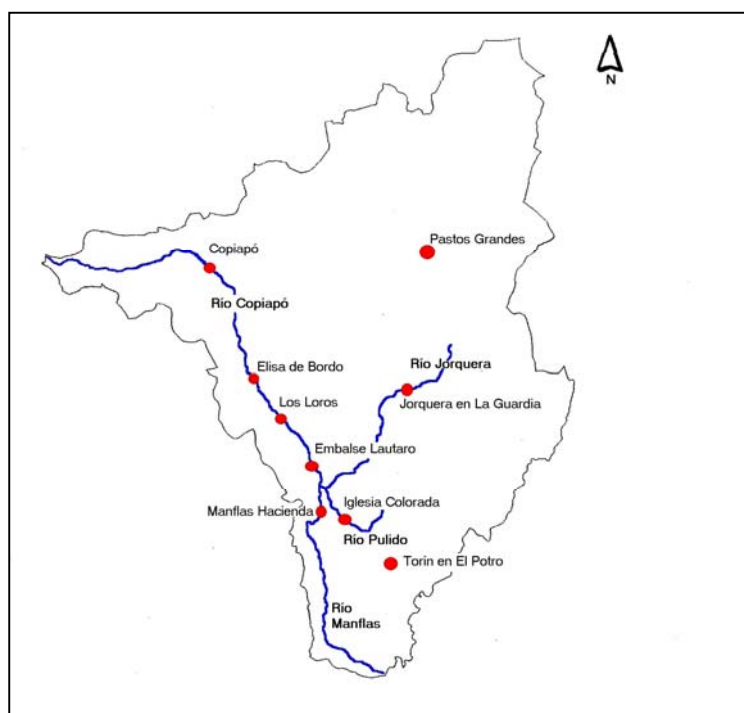
Tabla 4.4: Estaciones Pluviométricas de la Cuenca del río Copiapó

Estación	Años de Registro		Ubicación			Control
			Latitud S	Long. O	Altitud (msnm)	
Caldera	92-00	8	27° 04'	70° 22'	10	DGA
Jorquera en La Guardia	66-00	34	27° 43'	69° 34'	2.500	DGA
Torín en el Potro	90-92	2	27° 16'	69° 45'	3.000	DGA
Iglesia Colorada	88-00	13	28° 10'	69° 52'	1950	DGA
Hacienda Manflas	66-00	34	27° 04'	70° 01'	1.410	DGA
Embalse Lautaro	30-00	70	27° 59'	70° 00'	1.199	DMC* -DGA
Los Loros en Retén	67-00	33	27° 51'	70° 05'	948	DMC-DGA
Elibor Campamento	78-00	22	27° 41'	70° 14'	745	DGA
Pasto Grande	66-00	34	27° 06'	69° 32'	2.000	DGA
Copiapó	71-00	29	27° 21'	70° 21'	380	DMC

Fuente: DGA, 1987

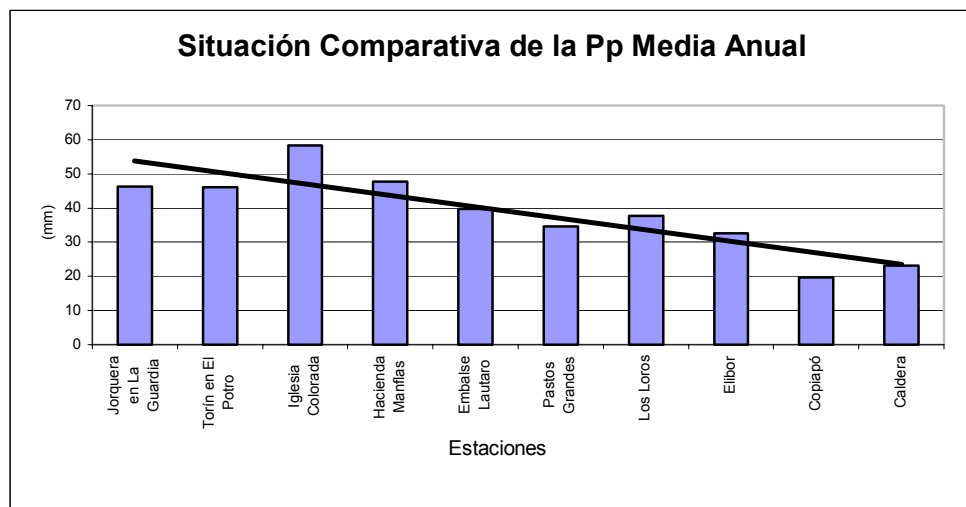
\* Dirección Meteorológica de Chile

Figura 4.8: Ubicación de las Estaciones Pluviométricas según DMC y DGA.



En la cuenca del río Copiapó la tendencia de las precipitaciones es aumentar de mar a cordillera, y que al parecer la orografía no provoca grandes cambios a esta regla a lo largo del valle (figura 4.9). La precipitación media anual, aguas abajo del embalse Lautaro, es de alrededor de 23.5 mm.

Figura 4.9: Precipitación Media Anual de Estaciones de la Cuenca Copiapó.



La variación estacional establece si existen períodos de sequía o precipitaciones a lo largo del año. Para este análisis se consideró que una precipitación mensual igual o inferior a 1,5 mm pertenece a un período seco, ya que su grado de infiltración es mínimo y el de escurrimiento es insignificante. La tabla 4.5 muestra un resumen de las condiciones pluviométricas medias a lo largo del año. De él se desprende lo siguiente:

En las estaciones de la parte baja y media del valle; Caldera, Copiapó, Elibor y Los Loros, en promedio hay ocho meses con ausencia casi total de precipitaciones, este período va desde Septiembre a Abril, mientras que las estaciones de la parte alta del valle; Embalse Lautaro, Jorquera en La Aguada, Hacienda Manflas e Iglesia Colorada, presentan entre cinco y seis meses con ausencia de precipitaciones, este período va desde Septiembre-Octubre a Febrero.

Cabe destacar que se han excluido las estaciones Pastos Grandes por hallarse fuera y muy alejada del valle por lo que se consideró que no influye en el ciclo hídrico del valle del río Copiapó, y Torín en El Potro por tener registros de solo tres años, lo que puede representar un sesgo muy grande.

Tabla 4.5: Períodos de Secos-Húmedos a lo largo del año

ESTACIÓN / MES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Caldera	S	S	S	S	H	H	H	H	S	S	S	S
Copiapó	S	S	S	S	H	H	H	H	S	S	S	S
Elibor	S	S	S	S	H	H	H	H	H	S	S	S
Los Loros	S	S	S	S	H	H	H	H	S	S	S	S
Embalse Lautaro	S	S	H	H	H	H	H	H	H	S	S	S
Jorquera en la Aguada	S	S	H	H	H	H	H	H	H	S	S	S
Hacienda Manflas	S	S	H	H	H	H	H	H	S	S	S	S
Iglesia Colorada	S	S	H	H	H	H	H	H	S	S	S	S

Fuente: Álamos y Peralta, 1995

S = Períodos Secos

H = Períodos Húmedos

De lo anteriormente expuesto, se puede extraer que es posible diferenciar claramente entre dos períodos a lo largo de un año, uno con casi ausencia total de precipitaciones o “seco” que va desde Octubre a Marzo y otro con precipitaciones o “húmedo” que va desde Abril a Septiembre.

Finalmente, para el área de estudio las lluvias son tremendamente escasas, por esto se considera irrelevante su aporte al acuífero, particularmente por su irregularidad en el tiempo.

- **Infiltraciones del río Copiapó**

El río Copiapó escurre de acuerdo a una dirección general SE a NW, según una trama de tipo dendrítica secundaria. Los ríos en esta zona tienen un régimen fluvial mixto con crecidas en invierno por lluvia y en verano por deshielo. Según IGM (1984) los glaciares Los Helados, Marancel y el Cerro del Potro (5.830 msnm) en la alta cordillera, constituyen la mayor fuente del recurso hidrológico del río Copiapó.

Los antecedentes sobre escorrentía superficial en la cuenca del río Copiapó corresponden a mediciones efectuadas en 10 estaciones fluviométricas por la DGA. De este conjunto de estaciones, ocho de ellas se han categorizado como primarias y dos secundarias. La figura 4.10 y la tabla 4.6 muestra la ubicación espacial y años de registro de las estaciones, respectivamente.

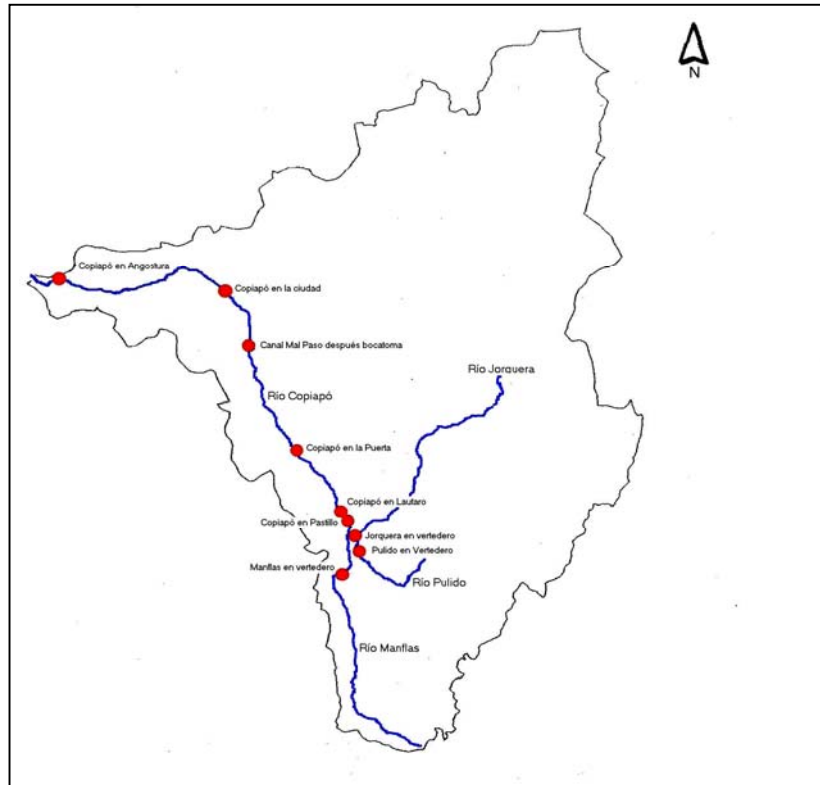
El escurrimiento del río Copiapó actualmente está influenciado por diversos factores artificiales: operación del Embalse Lautaro (desde 1939) y extracciones del agua mediante pozos, norias, canales para riego y uso en procesos mineros.

Tabla 4.6: Estaciones Fluviométricas de la Cuenca del río Copiapó.

Estación	Años de Registro		Ubicación			Área (Km <sup>2</sup> )
			Latitud S	Long. O	Altitud (msnm)	
Jorquera en Vertedero	47-00	53	28° 02'	69° 58'	1.250	4.150
Pulido en Vertedero	64-00	36	28° 03'	69° 58'	1.310	2.108
Manflas en Vertedero	64-00	36	28° 04'	70° 00'	1.550	1.180
Manflas antes Junta	85-86	1	28° 08'	70° 00'	-	-
Copiapó en Lautaro	31-00	69	27° 59'	70° 04'	1200	8.348
Copiapó en Sn Antonio	27-88	61	27° 52'	70° 05'	850	7.816
Copiapó en Pastillo	27-00	73	28° 03'	69° 59'	1.300	7.467
Copiapó en La Puerta	27-00	73	27° 48'	70° 08'	758	8.348
Copiapó en el Bosque	18-31	13	27° 43'	69° 39'	-	-
Copiapó en Pabellón	27-31	4	27° 31'	70° 15'	-	-
Copiapó en Mal Paso	29-00	71	27° 31'	70° 17'	431	10.186
Copiapó en Copiapó	83-00	17	27° 05'	68° 05'	-	-
Copiapó en Angostura	63-00	37	27° 20'	70° 54'	48	18.324

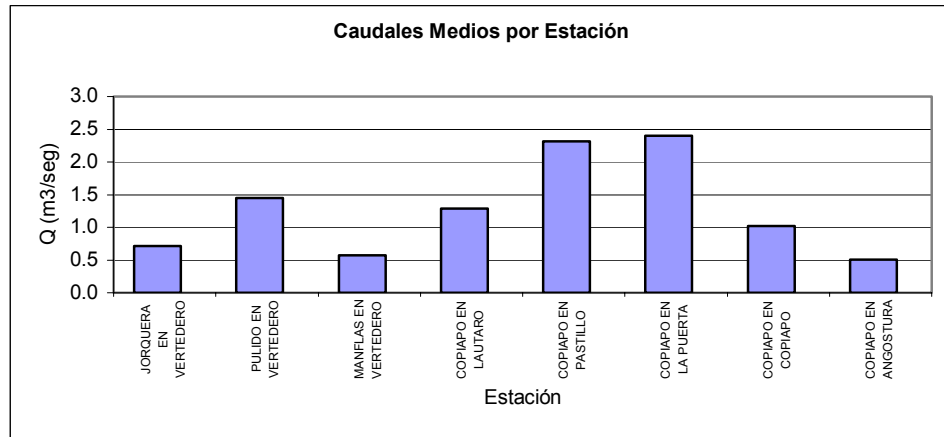
Fuente: DGA, 1995.

Figura 4.10: Ubicación de las Estaciones Fluviométricas según DGA.



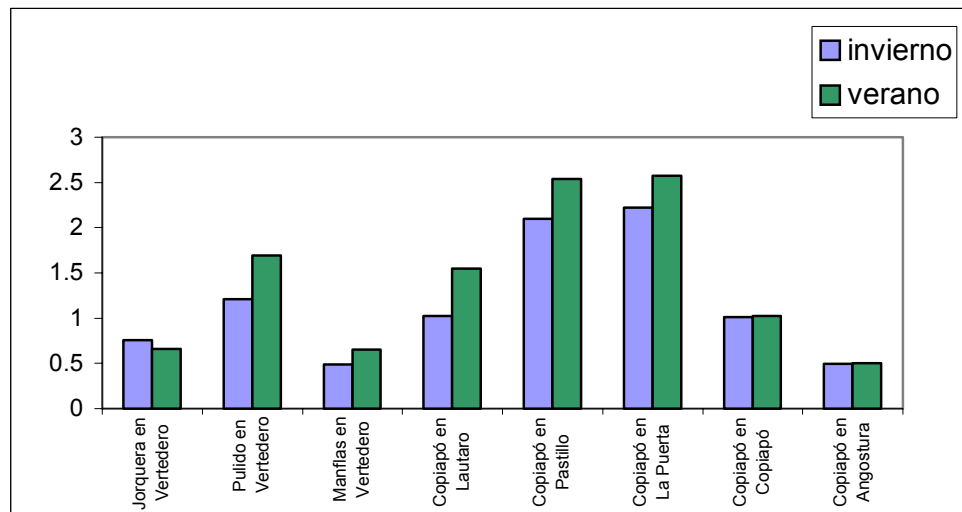
Los caudales medios por estación, tal como se observa en la figura 4.11, varían según la ubicación, es así como las estaciones Copiapó en La Puerta y Copiapó en Pastillo muestran el mayor nivel de caudal ya que se encuentran en una sección del río en la que el valle se estrecha produciéndose un afloramiento rocoso (zona de vertientes), entonces se podría afirmar que, en este sector prácticamente toda el agua escurre superficialmente. Además, se observa que los ríos Manflas y Jorquera en comparación con el río Pulido, son menores en aporte superficial al río Copiapó.

Figura 4.11: Resumen de Caudales Medios por Estación



Al igual que las lluvias, el río Copiapó muestra estacionalidades, en el periodo de años considerado para el estudio, para las diferentes estaciones fluviométricas ubicadas en el valle del río Copiapó (Figura 4.12).

Figura 4.12: Caudal medio en período Verano - Invierno por estaciones



Las infiltraciones del río Copiapó constituyen una de los principales fuentes de recarga al acuífero. Estas recargas se producen en sectores donde la profundidad del nivel estático permite la infiltración, lo que junto a una buena comunicación hidráulica existente en el río y el acuífero permite que este infiltre caudales importantes.

Los valores obtenidos de infiltración, dividido en sectores, son:

Tabla 4.7: Infiltraciones del río Copiapó

SECTOR	CAUDAL (l/s)	CAUDAL (Mm <sup>3</sup> /año)
Emb.Lautaro-La Puerta	26	0.82
La Puerta-Mal Paso	750	23.65
Mal Paso-Copiapó	170	5.36

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Se observa que la menor infiltración se produce en el sector “Embalse Lautaro-La Puerta”, debido a que en este sector el fondo del acuífero se acerca a la superficie o corta con los niveles de saturación del acuífero, esto recordando que es en este sector donde se producen los afloramientos de la napa subterránea.

#### • **Infiltraciones de Canales**

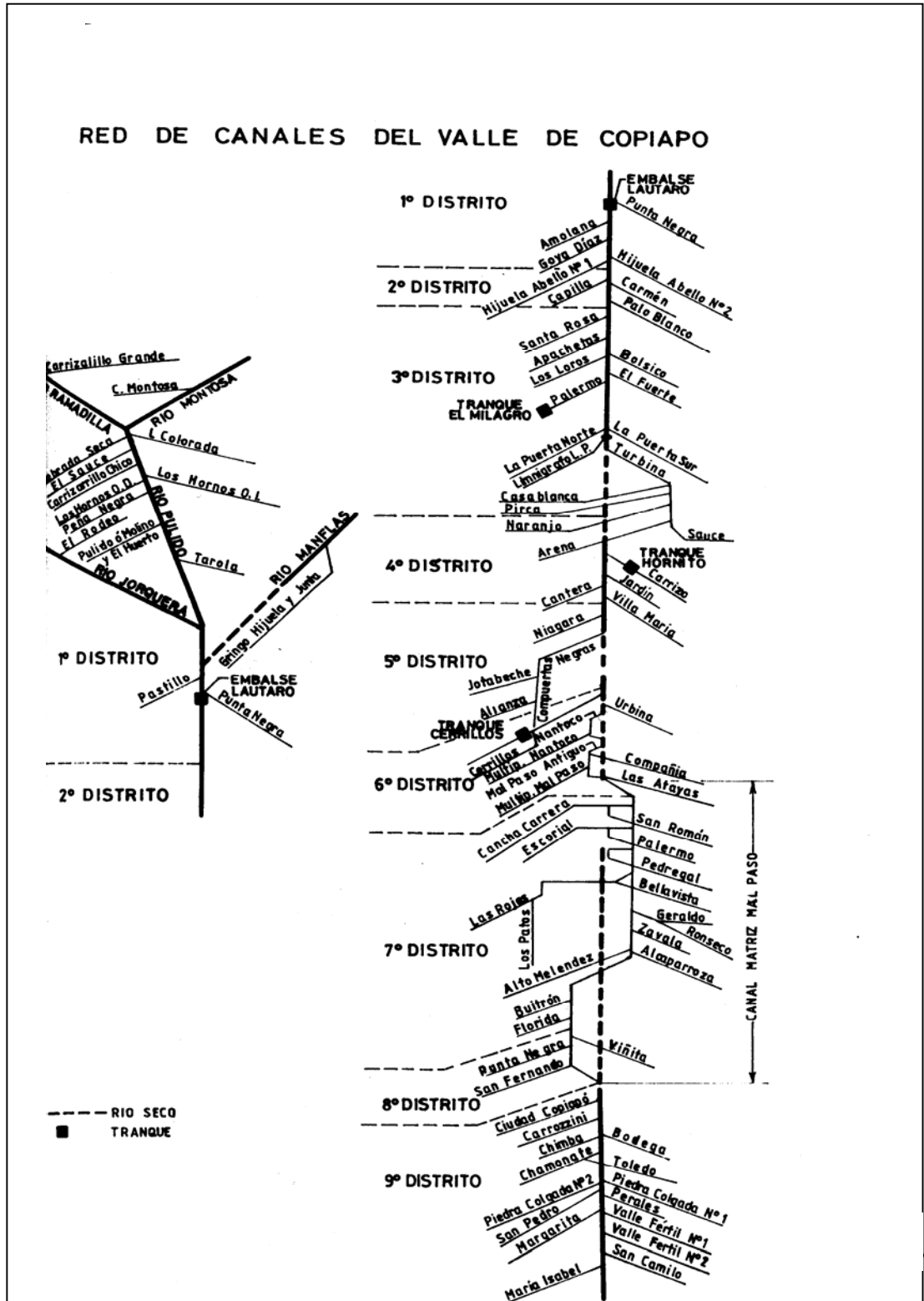
Las tablas de situación de canales por sector (anexos), entrega el rol de canales de los afluentes del Copiapó y de sus nueve distritos, el que establece que cada acción equivale a 10 minutos de riego con 1/5 del caudal del río, cada 14 días, y su respectiva división por distrito o sector. Además incorpora, el número de acciones por sector o distrito y su equivalencia en tiempo de riego y la información sobre los canales existentes y en operación.

Se entrega un listado de los canales que extraen sus aguas desde el río Copiapó y sus afluentes, divididos por sectores. Para cada sector se cuenta con la siguiente información:

- Número de distrito
- Nombre del canal
- Ribera de la Bocatoma
- Número de Acciones
- Tiempo de Riego (en horas y minutos)
- Estado (Operativo, No Operando, Destruído Sin Bocatoma)
- Caudal en Bocatoma (l/s)

La figura 4.13 muestra un diagrama de los afluentes del río Copiapó en sus nueve distritos.

Figura 4.13: Diagrama Unifilar de red de Canales del Valle de Copiapó.

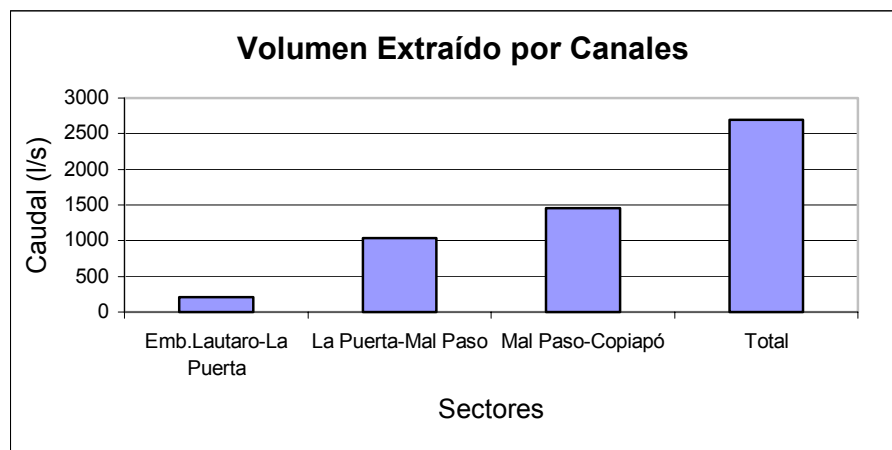


Fuente: Álamos y Peralta, 1995



En el valle de Copiapó hasta el año 1995, existen en total 76 canales que extraen su agua del río y de sus afluentes. La figura 4.14, resume el caudal extraído del río Copiapó y de sus afluentes en cada sector y en todo el valle.

Figura 4.14: Caudal Extraído del río Copiapó y sus Afluentes



- En el sector Embalse Lautaro-La Puerta, existe un total de 16 canales, de los cuales sólo uno no está operativo, que poseen en conjunto 1902,00 acciones, las que se representan una extracción de 208,52 (l/s).
- Del sector La Puerta- Mal Paso, nacen 16 canales con un total de 3.654,00 acciones, de ellos solamente uno no está operativo. El caudal extraído es de 1.036,31 (l/s).
- Del sector Mal Paso-Copiapó, nacen 15 canales que totalizan 5.148,00 acciones, que representan un caudal de extracción de 1.453,71 (l/s), de ellos uno no está en operación.
- El total de agua que es posible extraer mediante canales es de 2.698,64 (l/s) (Álamos y Peralta, 1995), cifra que puede disminuir o aumentar dependiendo del estado de los canales y del caudal del río Copiapó.

Los valores obtenidos de infiltración, dividido en sectores, son:

Tabla 4.8: Infiltraciones producidas por Canales

SECTOR	INFILTRACIÓN	CAUDAL (l/s)	CAUDAL (Mm <sup>3</sup> /año)
E.Lautaro-La Puerta	Canales Matrices	126	3.97
	Canales Secundarios	96	3.03
La Puerta-Mal Paso	Canales Matrices	120	3.78
	Canales Secundarios	30	0.95
Mal Paso-Copiapó	Canales Matrices	110	3.47
	Canales Secundarios	60	1.89

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Los valores de infiltración señalan que, la segunda fuente de infiltración importante al acuífero subterránea son las producidas por los canales, tanto primarios como secundarios, con un total de 542 (l/s).

#### • **Infiltraciones de Riego**

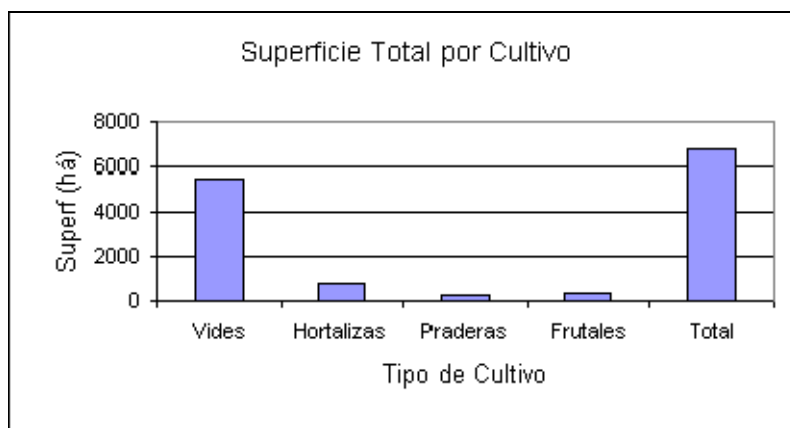
Las principales actividades realizadas en el valle del río Copiapó que dan lugar a un determinado uso del suelo son: minería, agrícola y urbano. La minería se encuentra diseminada a lo largo del valle, pero su espacialidad es puntual, o sea, no ocupa gran territorio. Lo urbano queda representado por la ciudad de Copiapó y de pueblos como Tierra Amarilla y Los Loros que representan un área ínfima del total del valle. La agricultura por su extensión y por otros factores como generación de empleo en el ámbito productivo y comercial y por ser la principal actividad consumidora de agua se presenta como la actividad de mayor importancia para el presente estudio.

De la figura 4.15, es posible observar los principales tipos de cultivo presentes en el valle, donde destacan ampliamente las vides con 5.473,1 há, la siguen las hortalizas con 739,9 há, luego los frutales con 372 há y por último las praderas con 75 há, lo que arroja un total de 6.820 há dedicadas a la actividad agrícola en forma permanente, pero que pueden potencialmente llegar a ser 7.930 dependiendo de la disponibilidad de agua.

Figura 4.15: Superficie Total por Tipo de Cultivo.

Cultivo	Superf. (há)
Vides	5473.1
Hortalizas	739.9
Praderas	235
Frutales	372
Total	6820

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995



Los valores de infiltración, dividida en sectores, son:

Tabla 4.9: Infiltraciones producidas por Riego Predial

SECTOR	CAUDAL (l/s)	CAUDAL (Mm <sup>3</sup> /año)
Emb.Lautaro-La Puerta	100	3.15
La Puerta-Mal Paso	80	2.52
Mal Paso-Copiapó	180	5.68

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

#### • Infiltraciones de Agua Potable

Las pérdidas de Agua Potable del sector Mal Paso-Copiapó, se calcularon en base a los datos proporcionados por EMSSAT (anexos). Las pérdidas en promedio llegan a 14905,01 m<sup>3</sup>/día en la ciudad de Copiapó; 757,6 m<sup>3</sup>/día en Tierra Amarilla y a 445,87 m<sup>3</sup>/día en Paipote, pero dado que en esta última localidad existe servicio de Agua Potable desde hace solo cinco años, se estima en 142,99 m<sup>3</sup>/día como valor medio para un período de 15 años (duración del período a modelar). Por lo tanto se tiene un total de 5,77 Mm<sup>3</sup>/año, equivalente a 183 l/s que pasan a recargar el acuífero en esta zona.

### **Evaporación y Evapotranspiración**

La evapotranspiración se calculó en base a las hectáreas regadas y la evapotranspiración real de los cultivos ( $ET_c$ ), esta se ha calculado de acuerdo a los valores de Coeficiente de Cultivos  $K_c$  y de la Evapotranspiración de referencia  $ET_0$  del estudio DGA-IPLA 1994. El estudio DGA-IPLA 1994, no hace referencia al modelo utilizado para el cálculo de la evapotranspiración.

Tabla 4.10: Evapotranspiración debida a cultivos en cada sector

SECTOR	EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL	
Embalse Lautaro – La Puerta	13,78 Mm <sup>3</sup> /año	440 (l/s)
La Puerta - Mal Paso	14,38 Mm <sup>3</sup> /año	456 (l/s)
Mal Paso – Copiapó	10,09 Mm <sup>3</sup> /año	320 (l/s)

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Para el cálculo de la evapotranspiración en zona de Vegas, se diferencian tres tipos de éstas:

- Tipo A: matorrales y suelos húmedos.
- Tipo B: matorrales con suelos menos húmedos.
- Tipo C: matorrales ralos.

Al comparar los estudios DGA Álamos y Peralta 1987 y 1995, se constata que los niveles estaban más superficiales en el primer estudio, y se había identificado 64 há de suelos con totorales y suelos húmedos (Vegas tipo A). Así, se estima que en la actualidad estos valores alcanzan la mitad de dichas cifras y estas áreas se ubican frente a la ciudad de Copiapó.

Los valores  $K_c$  utilizados para las vegas tipo A, B y C fueron 1,0; 0,7 y 0,5 respectivamente, los que se muestran en la tabla a continuación.

Tabla 4.11: Cuadro resumen de evapotranspiración y evaporación en zona de vegas por sector.

SECTOR	SUPERFICIE (há)			Evapotranspiración Potencial (m <sup>3</sup> /há/año)	Evaporación Total (Mm <sup>3</sup> - l/s)
	Vega A	Vega B	Vega C		
E.Lautaro-La Puerta	70	60	190	16.440	3,47/110
La Puerta-Mal Paso	69	31,5	170	13.690	2,52/80
Mal Paso-Copiapó	32	0	0	13.690	0,9/28

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

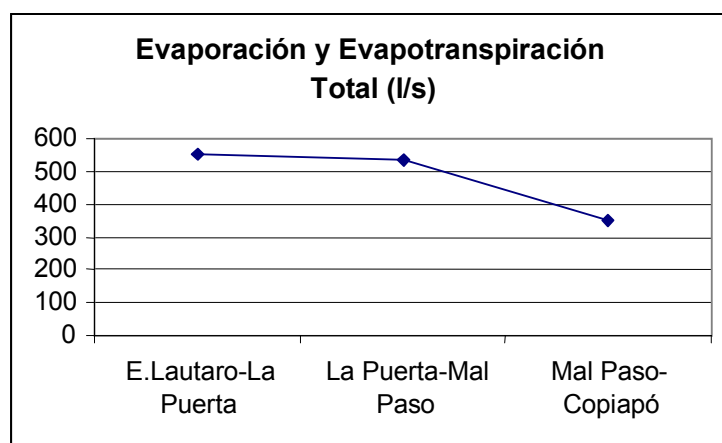
En los sectores donde la napa presenta altos niveles estáticos, se producen descargas tanto por evaporación directa como por evapotranspiración (ETp) de la vegetación natural que se alimenta de las aguas del acuífero.

En el valle existen numerosas zonas con estas características, normalmente circunscritas a la caja del río en las áreas de altos niveles estáticos. De acuerdo a la figura 4.16 se pueden mencionar:

- San Antonio y Los Loros, en el sector Embalse Lautaro-La Puerta.
- Cerrillos y Nantoco, en el sector La Puerta-Mal Paso.
- Ciudad de Copiapó, en el sector Mal Paso-Copiapó.

Figura 4.16: Evapotranspiración y Evaporación por Sector

SECTOR
E.Lautaro-La Puerta
La Puerta-Mal Paso
Mal Paso-Copiapó



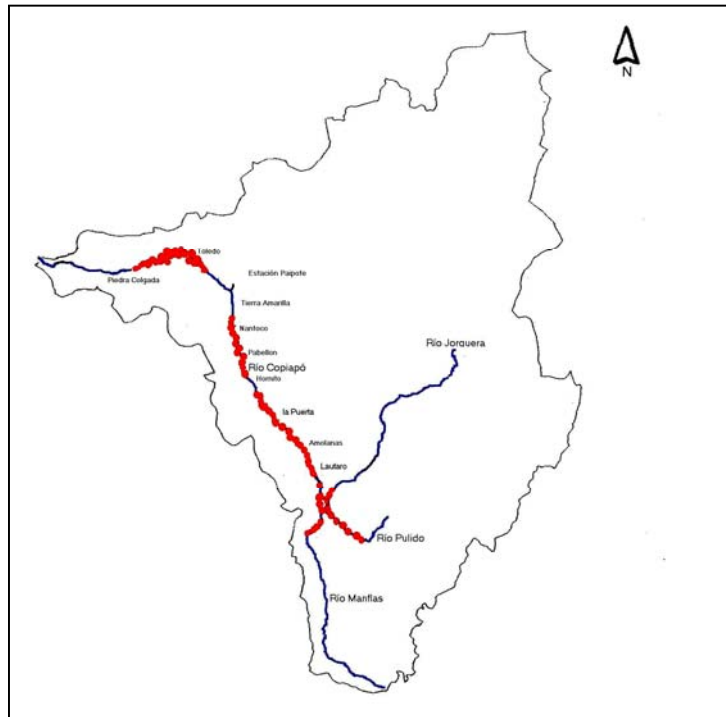
### **Extracción de Agua Subterránea (Bombeo)**

La base de datos a utilizar es el complemento entre la información recopilada por el estudio realizado por Álamos y Peralta en 1995 y su actualización por parte de la DGA en campañas de terreno en el periodo 2000-2001. Para cada pozo se entrega la siguiente información:

- Ubicación en Coordenadas Geográficas (Lat., Long.)
- Número Asignado en el Estudio
- Rol en el Registro BNA
- Coordenadas UTM (Norte, Este)
- Comuna
- Predio
- Propietario
- Número de Expediente
- Situación de Derechos (Concedidos, En Trámite, Sin Derechos)
- Resolución DGA (Caudal en l/s, Número, Fecha)
- Uso (Riego, Potable, Minería, Industrial, Pozos de Observación, Sin Identificación)
- Estado (Operativo, Sin Uso)

En la figura 4.17 se muestra la ubicación de los pozos en la zona en estudio. El catastro de pozos y norias se presenta en anexos.

Figura 4.17: Ubicación de Pozos en Cuenca del río Copiapó



De acuerdo a la figura 4.17, el valle del río Copiapó posee en toda su extensión gran cantidad de perforaciones de pozos, lo que señala la existencia de información abundante en cuanto a niveles estáticos.

En cuanto a los caudales de extracción, el caudal mínimo concedido es de 4 l/s en el sector Copiapó y el máximo es de 288 l/s en el sector de La Puerta-Mal Paso (de uso minero), la suma total de extracción de todos los pozos en el valle, excluyendo aquellos sin uso, es de 10.461,87 l/s.

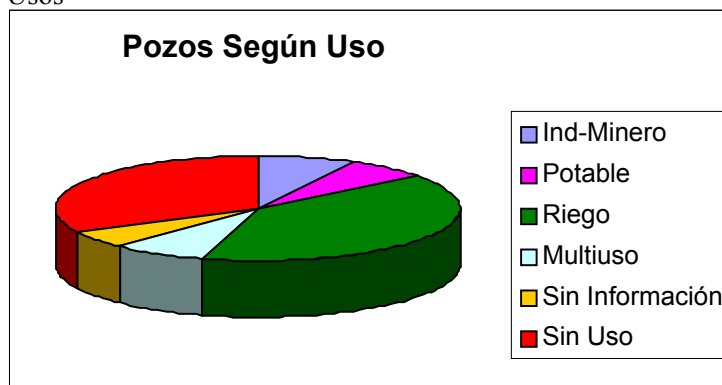
Según la figura 4.18 es posible observar que el uso de los pozos principalmente es riego, siguiéndole el uso minero. Además, la mayoría de los pozos hasta la fecha del catastro se mantiene operativo.

Figura 4.18: Clasificación de Pozos según Usos

	Número de Pozos	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Industrial-Minero	31	1376.6
Potable	26	297.4
Riego	159	7140.07
Multiuso*	30	1385.8
Sin Información	22	262
Sin Uso	129	0
Total	397	10461.87

\* Uso Potable y Riego

Fuente: DGA, 2001



El agua potable se abastece fundamentalmente de pozos ubicados en el sector Mal Paso-Copiapó y en localidades rurales del área.

La industria representada esencialmente por plantas concentradoras de minerales se abastece exclusivamente con aguas subterráneas.

Por último, el regadío está empleando cada vez más las aguas subterráneas en Copiapó, normalmente para regar parronales mediante la técnica del goteo. Las tablas 4.12 y 4.13 muestran los valores de caudal extraídos en los años 1995 y 2000, según su uso:

Tabla 4.12: Pozos y Bombeos según Catastro 1995

SECTOR	TOTAL	RIEGO	POTABLE	INDUSTRIAL	OBSERVACIÓN
Embalse Lautaro - La Puerta	55	46	3	0	6
	EN USO				
	32	29	3	0	-
Caudal	20.68 Mm <sup>3</sup> /año (656 l/s)				
La Puerta - Mal Paso	93	77	6	5	5
	EN USO				
	69	60	6	3	-
Caudal	24.01 Mm <sup>3</sup> /año (760 l/s)				
Mal Paso - Copiapó	110	30	25	44	11
	EN USO				
	51	17	9	23	-
Caudal	46.72 Mm <sup>3</sup> /año (1480 l/s)				

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995



Tabla 4.13: Pozos y Bombeos según Catastro 2001

SECTOR	TOTAL	RIEGO	POTABLE	INDUSTRIAL	OBSERVACIÓN
Embalse Lautaro - La Puerta	56	45	3	1	6
	EN USO				
	40	37	3	0	-
Caudal	29.46 Mm3/año (934 l/s)				
La Puerta - Mal Paso	96	77	7	5	7
	EN USO				
	72	63	5	4	-
Caudal	41.11 Mm3/año (1.303 l/s)				
Mal Paso - Copiapó	112	30	28	43	11
	EN USO				
	53	15	15	23	-
Caudal	44.95 Mm3/año (1.425 l/s)				

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

### Descarga por Vertientes

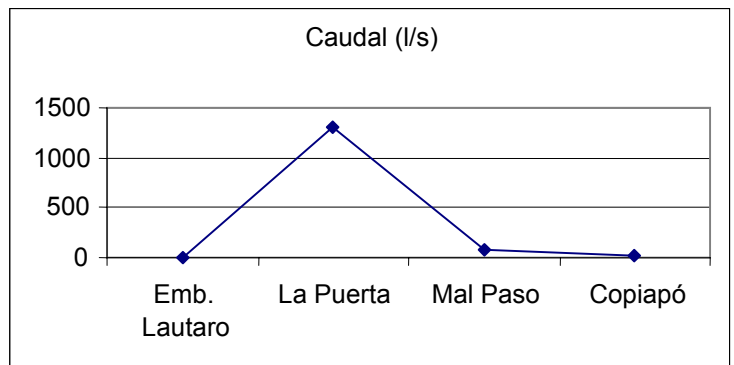
Asociada a las zonas con altos niveles estáticos se encuentran las vertientes, que corresponden a los afloramientos de la napa cuando no puede seguir escurriendo en forma subterránea.

De la figura 4.19, se aprecian las descargas del acuífero debido a vertientes, cuantificadas para cada sector del valle. El caudal total de descarga del área de estudio es de 1.910 l/s y de ellos casi el 70%, 1.300 l/s, afloran desde el sector Embalse Lautaro-La Puerta. Lamentablemente, las fuentes de esta información no especifican en que lugar de cada sector se producen los afloramientos.

Figura 4.19: Descarga de Acuífero por Vertientes

Sector	Caudal de Descarga (l/s)
La Puerta	1300
Mal Paso	75
Copiapó	25

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995



### Flujo Lateral de Agua Subterránea

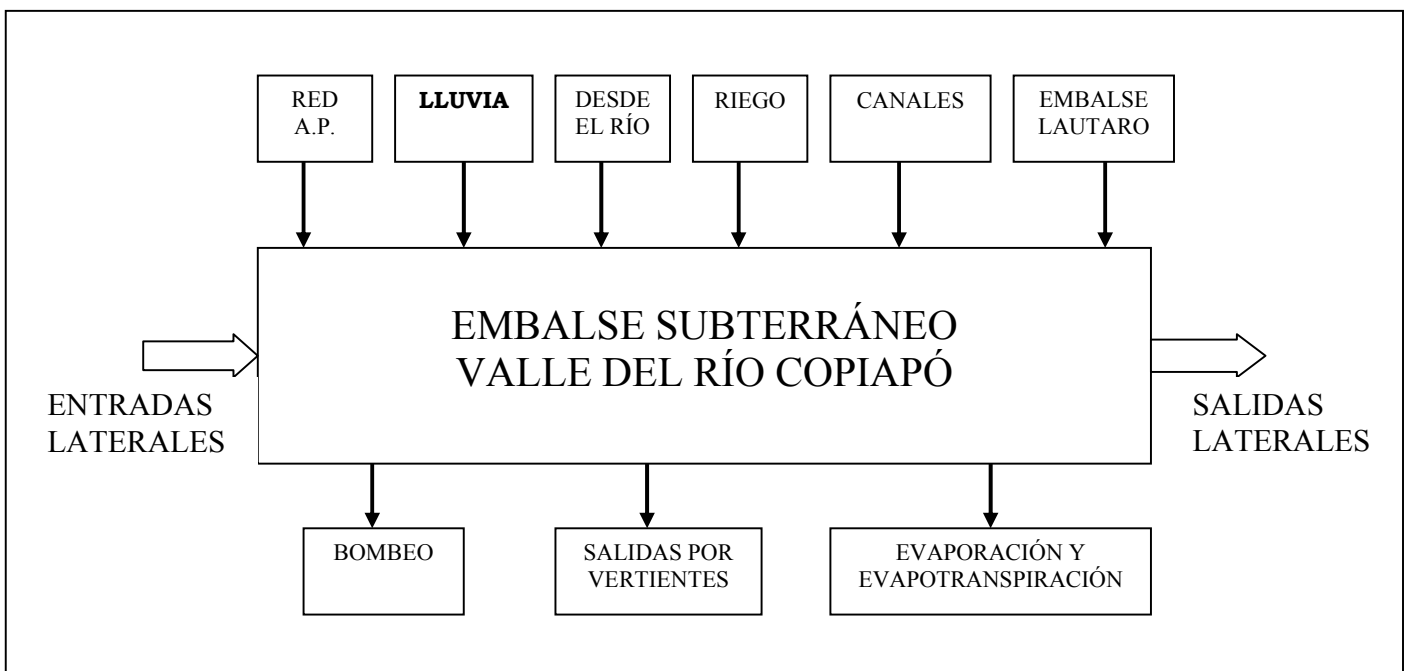
Estos se refieren a dos tipos de flujos laterales, los que provienen del escurrimiento subterráneo del acuífero aguas arriba y aquella que entregan subterráneamente las quebradas que llegan al valle del río Copiapó.

La primera depende de la situación del embalse subterráneo aguas arriba, normalmente su valor es relativamente constante tanto mensual como anualmente, el promedio histórico se encuentra alrededor de los 1.000 l/s.

Los flujos que ingresan en forma subterránea desde quebradas pequeñas están muy influenciados por el régimen de lluvias, y corresponden al drenaje de las aguas lluvias que logran infiltrarse en el relleno permeable bajo sus cauces. Por su origen esta recarga es tan esporádica y de bajo caudal como las lluvias que los provocan. Las quebradas principales son Calquis con un aporte medio de 50 l/s; Cerrillos con un aporte medio de 50 l/s y Paipote que aporta en promedio 250 l/s.

En resumen, el funcionamiento del embalse subterráneo, y las variables que lo conforman se describen a continuación:

Figura 4.20: Funcionamiento del Embalse Subterráneo



## **4.2 Construcción del Modelo**

### **Límites de la Zona a Modelar**

La zona considerada en el modelo corresponde al sector hidrogeológico comprendido entre el muro del embalse Lautaro, inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido, hasta la ciudad de Copiapó. Dicha zona está comprendida aproximadamente entre las coordenadas UTM Norte 6.974.000 por el Norte, Norte 6.904.000 por el Sur, Este 366.000 por el Oeste y Este 402.000 por el Este. La zona comprende el sector medio de la cuenca del Copiapó, en que el río escurre siguiendo una dirección mayoritariamente Nor-poniente desde el embalse Lautaro hasta el sector de Nantoco para después escurrir en franca dirección Norte, hasta el sector de Paipote; lugar donde nuevamente toma la dirección Nor-poniente hasta la ciudad de Copiapó.

En el área de estudio quedan comprendidas las localidades de Lautaro, Amolanas, San Antonio, Los Loros, La Puerta, 3 Puentes, La Turbina, Hornito, El Yeso, Villa María, Pabellón, Totoralillo, Alianza, Nantoco, Tierra Amarilla, Paipote y la ciudad de Copiapó.

### **Funcionamiento General del Sistema Modelado**

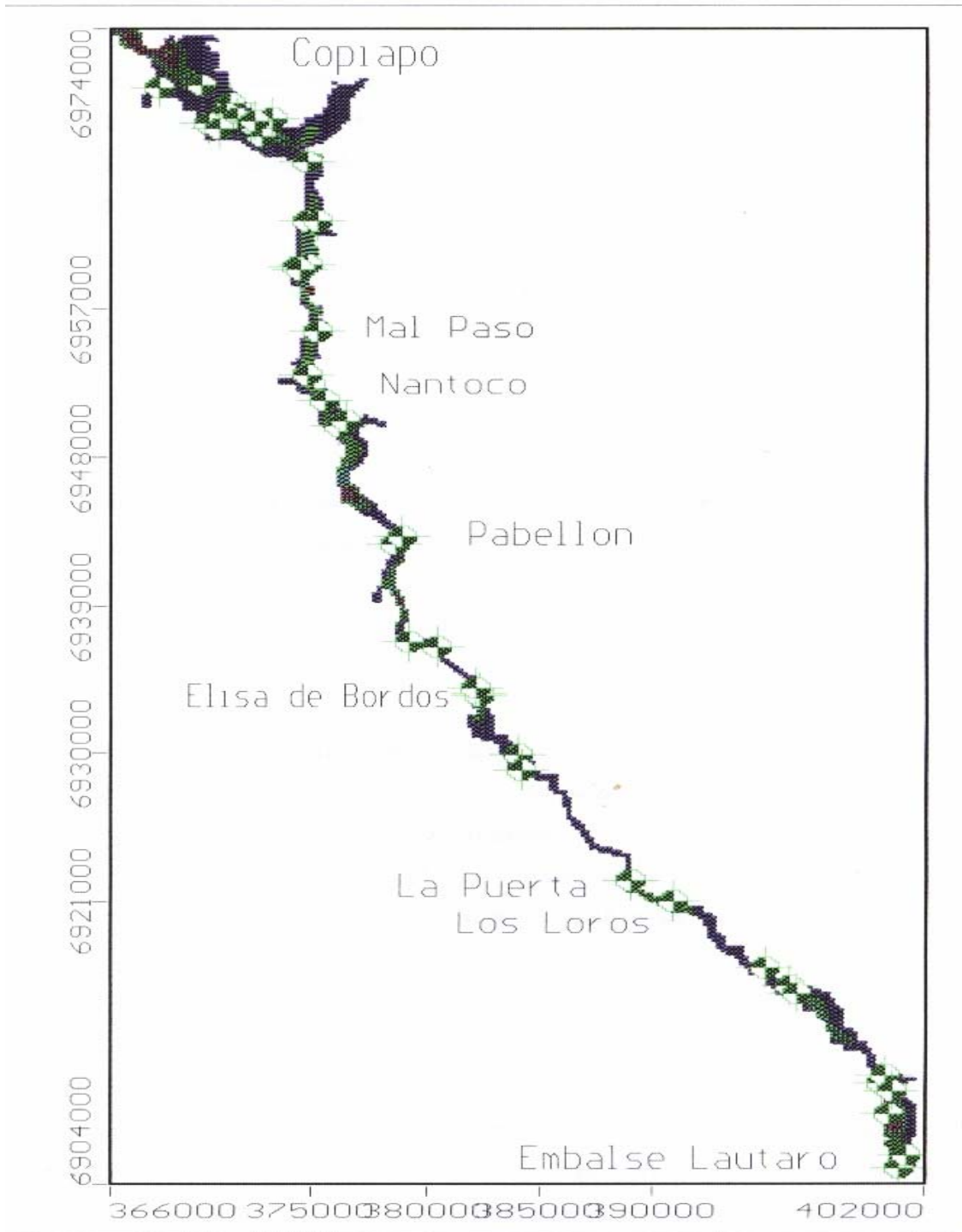
La zona modelada presenta un acuífero no confinado, con niveles de agua subterránea que en general se encuentran a profundidades de entre 2 m. en el sector de Amolanas y 96 m. en el sector de Paipote siguiéndole con 75 m en el sector de Hornito.

En cuanto a variaciones estacionales, la variable externa que más condiciona la evolución temporal y espacial del sistema son los bombeos o extracciones de agua, dada su condición de desequilibrio dinámico.

De acuerdo a la información recopilada destinada a determinar la condición de explotación del acuífero, se ha definido como periodo de calibración y validación del modelo el comprendido entre abril de 1987 y septiembre del 2001. Esto debido a que a partir del año 1987 se presenta mejor calidad de información en cuanto a cantidad y consistencia.

Como flujos de entrada al área de estudio, se han identificado las recargas provenientes de percolaciones de riego, de los aportes de los cauces superficiales a la napa subterránea, de los aportes laterales por quebradas y del aporte producido en el sector del Embalse Lautaro, la precipitación constituye un aporte marginal frente a los mencionados anteriormente; como flujo de salida, se tiene el flujo propio de la napa en el extremo de aguas abajo del valle (sector ciudad de Copiapó), los afloramientos (vertientes), la evapotranspiración y las extracciones desde pozos y norias.

Figura 4.21: Límites de la Zona Modelada.



## **Discretización Espacial y Temporal**

- **Discretización en Planta**

La discretización en planta del modelo se refiere a la forma en que éste está subdividido en celdas rectangulares, las que son definidas por filas y columnas horizontales y verticales, respectivamente. La zona modelada se extiende entre los siguientes límites, expresados en coordenadas UTM:

Límite Norte	: UTM – Norte	6.974.000 m
Límite Sur	: UTM – Norte	6.904.000 m
Límite Oeste	: UTM – Este	366.000 m
Límite Este	: UTM – Este	402.000 m

Para la representación en planta del modelo, se utilizaron los planos otorgados por SERNAGEOMIN, previamente digitalizados, y los planos digitalizados mediante ARCInfo escala 1:20.000 y escala 1:25.000; generándose un archivo .DXF o procesándose con el software SURFER según sea el caso, los resultados fueron ingresados al modelo de simulación Visual ModFlow.

En planta, el área ha sido subdividida en celdas de 200 metros por 200 metros en la mayor parte del área. En sectores donde existe aglomeración de pozos y es necesario un análisis más fino se dividieron celdas de 100 metros por 100 metros y celdas de 50 metros por 50 metros. El número definido de columnas (sentido Oeste - Este) es de 198 y el número de filas (sentido Norte – Sur) es de 377, lo que entrega un total de 74.646 celdas.

- **Discretización en sentido Vertical**

Para representar el área de estudio en sentido vertical, se consideró el relieve superficial del terreno otorgado por SERNAGEOMIN, con curvas de nivel cada 200 metros, la profundidad del basamento rocoso escala 1:25.000 otorgado por el estudio realizado por Álamos y Peralta (1987), digitalizado en ARCInfo y posteriormente procesado en SURFER, además de la información estratigráfica.

El sistema, en profundidad está integrado por un acuífero no confinado. El límite de separación entre la superficie y la roca está compuesto principalmente por estratos de carácter grueso a nivel superficial y a medida que desciende hacia el basamento varia de grueso a fino y nuevamente a grueso. Sin embargo, se define un sólo gran acuífero pues los estratos finos identificados no corresponden a la clasificación de granulometría impermeable o a estructuras impermeables como duripanes.

En la figura 4.22 se muestra la superficie generada por el software SURFER del basamento rocoso. Las figuras 4.23 y 4.24 muestran diferentes cortes de la zona con el objetivo de mostrar la discretización espacial en sentido vertical.



# BASAMENTO ROCOSO

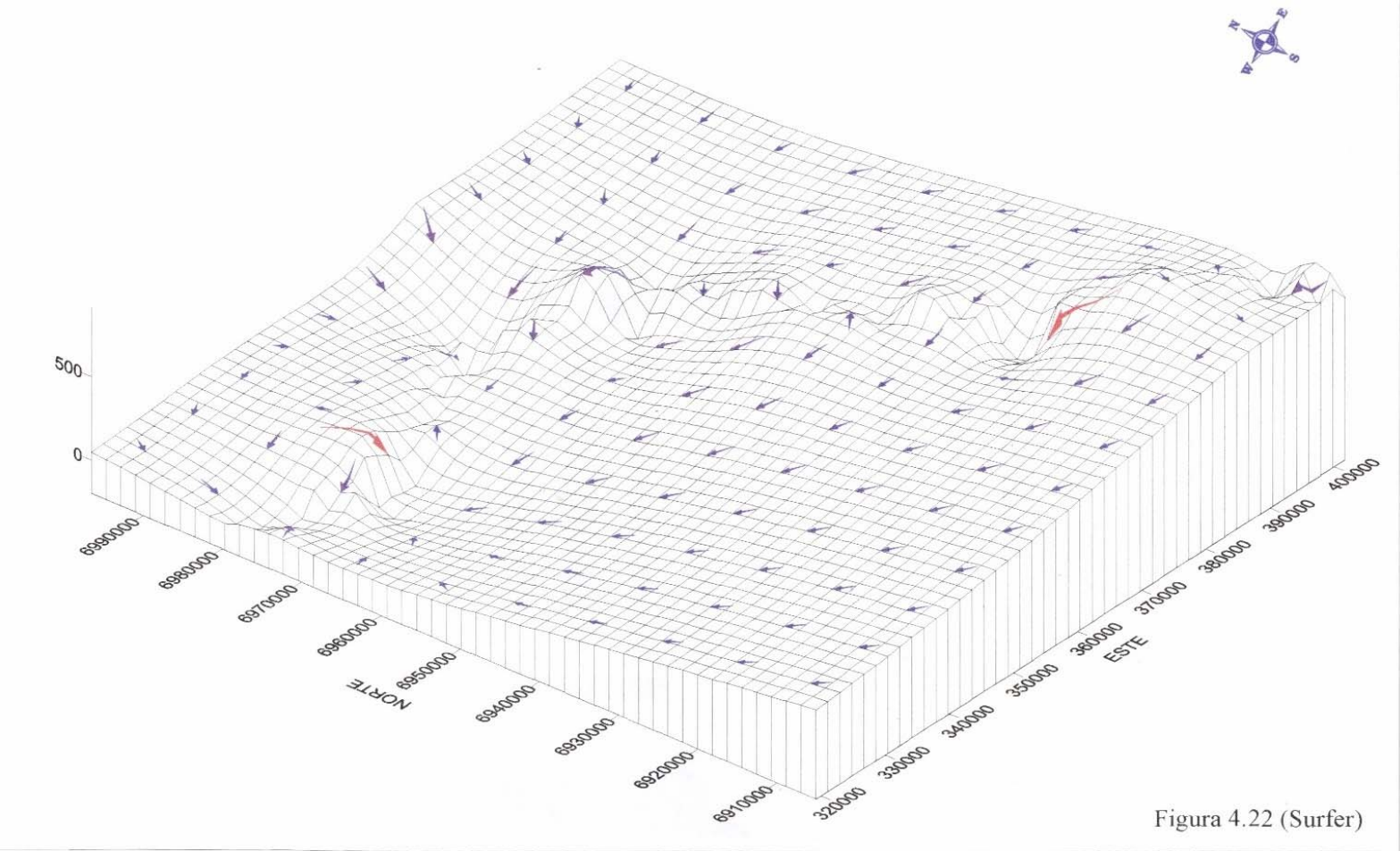


Figura 4.22 (Surfer)

Figura 4.23: Perfil Longitudinal Valle Copiapó

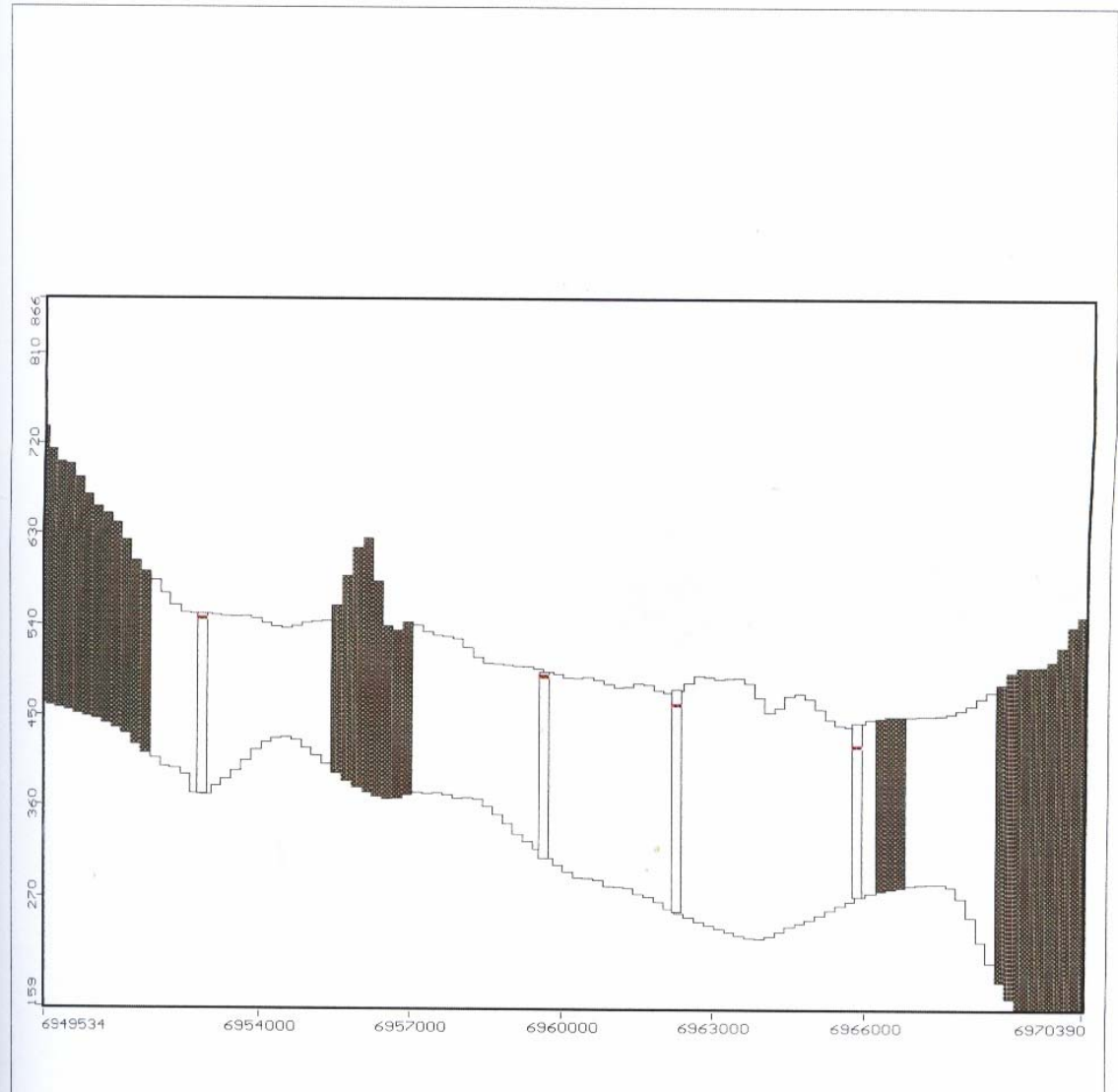
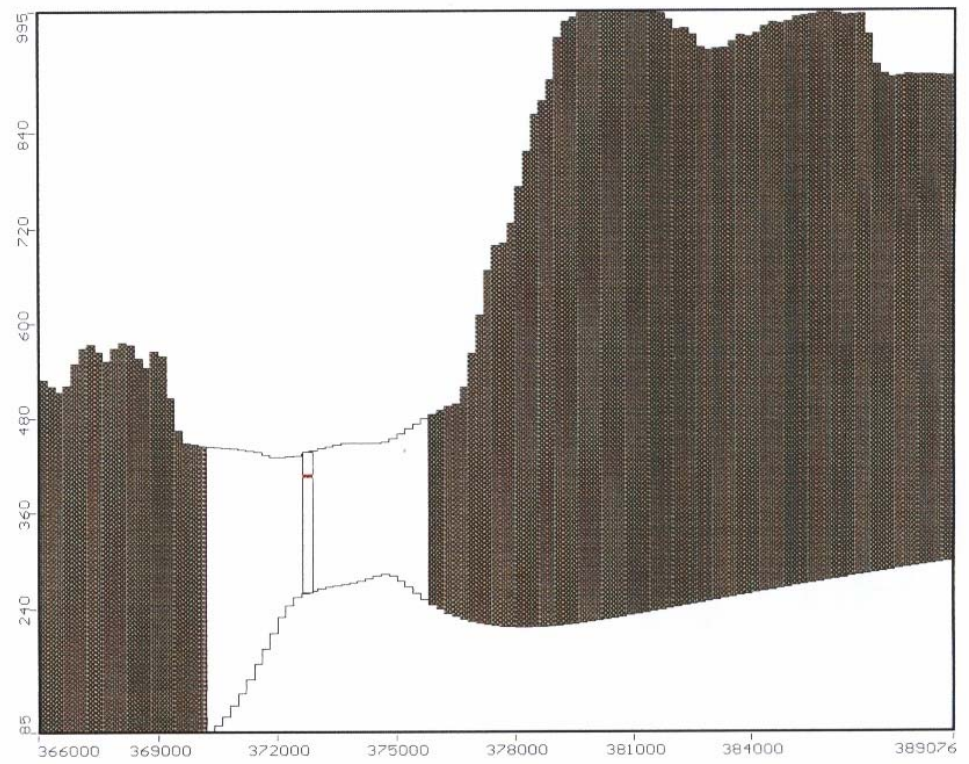


Figura 4.24: Perfil Transversal Valle Copiapó



- **Discretización Temporal**

El periodo seleccionado para efectuar la calibración y validación del modelo corresponde al lapso de 174 meses comprendidos entre 01 de Abril de 1987 y el 30 de Septiembre del 2001. La discretización en dicho periodo en intervalos está determinado por las reglas de bombeo y recargas, por cuanto el modelo asume que dichas variables son constantes en cada intervalo (*stress period*). De acuerdo con dichos factores, el intervalo fue establecido en 6 meses, por lo que el modelo opera para un total de 29 intervalos o *stress period*. Cada uno de estos intervalos fue subdividido a su vez en 10 pasos de tiempo (tabla 3.38), los cuales corresponden a pasos de cálculos internos del modelo.

En la tabla 4.14 se muestra en detalle la discretización temporal considerada, mostrándose las fechas de inicio y término de cada periodo.

Tabla 4.14: Discretización Temporal considerada para el Modelo

PERIODOS DE STRESS	SEMESTRES	DIAS ACUMULADOS	DIA INICIAL	DIA FINAL	FECHA INICIAL	FECHA FINAL
SP1	183	183	0	183	01-04-87	30-09-87
SP2	183	366	183	366	01-10-87	31-03-88
SP3	183	549	366	549	01-04-88	30-09-88
SP4	182	731	549	731	01-10-88	31-03-89
SP5	183	914	731	914	01-04-89	30-09-89
SP6	182	1096	914	1096	01-10-89	31-03-90
SP7	183	1279	1096	1279	01-04-90	30-09-90
SP8	182	1461	1279	1461	01-10-90	30-03-91
SP9	183	1644	1461	1644	01-04-91	30-09-91
SP10	183	1827	1644	1827	01-10-91	30-03-92
SP11	183	2010	1827	2010	01-04-92	30-09-92
SP12	182	2192	2010	2192	01-10-92	30-03-93
SP13	183	2375	2192	2375	01-04-93	30-09-93
SP14	182	2557	2375	2557	01-10-93	30-03-94
SP15	183	2740	2557	2740	01-04-94	30-09-94
SP16	182	2922	2740	2922	01-10-94	30-03-95
SP17	183	3105	2922	3105	01-04-95	30-09-95
SP18	183	3288	3105	3288	01-10-95	30-03-96
SP19	183	3471	3288	3471	01-04-96	30-09-96
SP20	182	3653	3471	3653	01-10-96	30-03-97
SP21	183	3836	3653	3836	01-04-97	30-09-97
SP22	182	4018	3836	4018	01-10-97	30-03-98
SP23	183	4201	4018	4201	01-04-98	30-09-98
SP24	182	4383	4201	4383	01-10-98	30-03-99
SP25	183	4566	4383	4566	01-04-99	30-09-99
SP26	183	4749	4566	4749	01-10-99	30-03-00
SP27	183	4932	4749	4932	01-04-00	30-09-00
SP28	182	5114	4932	5114	01-10-00	30-03-01
SP29	183	5297	5114	5297	01-04-01	30-09-01

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.15: Pasos de Tiempo

PASO	DÍA
1	7
2	15
3	25
4	37
5	52
6	70
7	91
8	116
9	146
10	183

Fuente: Elaboración Propia

### **Parámetros Hidráulicos del Sistema Acuífero**

La definición previa de los parámetros elásticos del sistema hidrogeológico implica la asignación de un valor de permeabilidad y del coeficiente de almacenamiento a cada una de las celdas activas del área de estudio. Estos valores son los de partida del modelo y posteriormente pueden ser modificados en el proceso de calibración.

Para evaluar la permeabilidad se utilizan los valores de transmisividad y niveles del agua subterránea extraídos del estudio Álamos y Peralta (1987) escala 1:20.000 digitalizados en ARCInfo y traspasados a formato .DXF. Considerando que la permeabilidad se define como la transmisividad hidráulica dividida por el espesor saturado del acuífero, las isolíneas de transmisividad y la isoprofundidad del relleno, fueron ingresadas al software SURFER (sistema de información geográfica) y en él se determinó una estimación de la permeabilidad para cada una de las celdas definidas en la discretización espacial.

Los valores anteriores fueron asignados a las permeabilidades horizontales. A la permeabilidad vertical se le asignó un valor no mayor a un décimo de la permeabilidad horizontal.

En cuanto al valor del coeficiente de almacenamiento y la porosidad, debido a que no se disponen de antecedentes para definir los valores de dichos coeficientes, estos fueron determinados en forma indirecta, ya que dependen de la naturaleza del acuífero, si es libre o confinado, y además de la granulometría del mismo. Los valores adoptados inicialmente son de: 0.00001 y 0.0001 (l/m) para el coeficiente de almacenamiento específico  $S_s$ , de 0.1 – 0.16 y 0.2 para el rendimiento específico o porosidad efectiva  $S_y$ , y un valor estimado de la porosidad total igual a 0.08 – 0.1 y 0.18.

## **Recargas y Descargas**

Se utilizaron diferentes fuentes para evaluar las recargas y descargas al sistema. Para el caso de las extracciones artificiales, se utilizaron los datos de los catastros 1995, 2001 y los expedientes de cada pozo para evaluar los caudales extraídos por sondajes, norias y drenes. Los datos de recargas por infiltración de la precipitación, por riego y por pérdidas desde canales fueron extraídas del estudio Álamos y Peralta (1995).

### **• Recargas**

Entre las fuentes de recarga al sistema se cuenta con:

- El flujo propio de la napa entrante por el extremo Sur-Oriente de la malla (sector E. Lautaro).
- Flujos propios subsuperficiales aportados por quebradas laterales.
- Infiltración del río y canales de riego.
- Infiltración de excedentes de riego, precipitación.

Respecto de los valores estimados para las recargas, todos ellos fueron incorporados al modelo considerando un valor dinámico para cada periodo de estrés dependiendo del año y la estación (cálida-fría) en la que se encuentre. Los valores asignados corresponden a la suma de las fuentes de recarga, las que varían dependiendo del sector donde se encuentre.

### **• Descargas**

Entre las descargas se tiene:

- El flujo propio de la napa que sale del sistema (sector cerro La Cruz, ciudad de Copiapó).
- La extracción de agua desde pozos y norias.
- Las recuperaciones de agua subterránea en cauces superficiales por afloramientos.
- Evapotranspiración

Las principales descargas en la zona corresponden a bombeos de pozos y norias, estos datos fueron determinados a partir de encuestas en terreno 2001.



Figura 4.25: Ubicación de Pozos y Norias en el Modelo





## **Condiciones de Borde**

Las condiciones de borde del modelo corresponden a las condiciones iniciales o de partida de éste y a las condiciones que condicionan el flujo definidas para cada uno de los periodos de estrés para la simulación en régimen transiente.

- **Condiciones Iniciales**

Para su operación en régimen transiente, el modelo de simulación requiere la definición de una superficie inicial del nivel freático en todo el dominio del modelo. Esta información fue obtenida del estudio Álamos y Peralta (1987), digitalizada en ArcInfo y transformada a formato .DXF.

- **Condiciones de Borde**

Se han representado como condiciones de borde, los flujos propios de la napa de entrada (sector embalse Lautaro) y salida del sistema (salida ciudad de Copiapó), así como los aportes laterales de quebradas como Paipote, Cerrillos y Calqui.

En el sector aguas arriba (embalse Lautaro) se definió un nivel constante de 1.108 m para todo el periodo de simulación. Para el sector aguas abajo (salida de ciudad Copiapó) se definió un nivel correspondiente a 385 m, constante para todo el periodo de estrés. Asimismo, las quebradas Paipote, Cerrillos y Calqui poseen condiciones de nivel constante para todo el periodo con valores de 415, 565 y 1.070, respectivamente.

## **Dren**

Se ingresaron 2 elementos hidráulicos en Visual ModFlow con funcionamiento de dren: dren río Copiapó desde sector embalse Lautaro-La Puerta y dren río Copiapó sector salida ciudad de Copiapó hasta la última celda por el norte del modelo. Para representar un funcionamiento de dren, el cálculo de caudal alumbrado por cada celda definida como dren es calculado mediante la relación:

$$C_d = \frac{K \cdot B \cdot L}{M} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$C_d$  = Conductancia de la interface entre el acuífero y el dren.

$K$  = Conductancia hidráulica en la interface (m/día)

$L$  = Largo del tramo (aprox. 200 metros)

$B$  = Ancho del dren (aprox. 5 metros)

$M$  = Espesor de la zona alterada bajo el dren (m)

El dren ha sido asignado en su mayoría con una conductancia de 700 m<sup>2</sup>/día, existiendo además zonas con valores de 710 y 550 m<sup>2</sup>/día.

### **4.3 Calibración**

El proceso de calibración del modelo consiste en reproducir los niveles del agua subterránea medidos en terreno en el valle del río Copiapó.

Se utilizaron como parámetros de calibración los parámetros elásticos del sistema acuífero (permeabilidad hidráulica “ $k$ ” y coeficiente de almacenamiento “ $S_s$ ” y “ $S_y$ ”).

La calibración se realizó en régimen transiente.

#### **Patrón de Ajuste para la Calibración**

Para controlar el comportamiento de los niveles de agua del embalse subterráneo que entregue el modelo, se cuenta con los niveles históricos medidos en los 21 pozos de observación existentes en el dominio del modelo. Utilizando estos niveles como patrón de ajuste es posible contrastar los niveles y observar su consistencia. La tabla 4.16 muestra un resumen de información de los pozos de observación.

Tabla 4.16: Resumen de Pozos de Observación

POZO Nombre	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	NIVEL ESTÁTICO Promedio (msnm)	DESVIACIÓN ESTANDAR (m)
C1-Embalse Lautaro	400989.88	6904783.07	1109.777	0.614
D2-El Calqui	400070.36	6910134.69	1060.775	0.386
B2-San Antonio	396062.67	6915940.84	994.511	1.979
B1-El Giro	394940.00	6916990.00	976.638	0.786
C1-Escuela Los Loros	390953.00	6921077.74	931.780	0.610
C4-La Puerta	389102.98	6922219.95	907.761	0.381
D1-Hornitos	384185.00	6929890.00	741.752	12.851
B3-Elisa de Bordos	382347.09	6933673.52	710.752	12.851
B4-Villa María	379235.15	6936713.41	670.361	11.685
D1-Pabellon	378695.51	6942607.30	613.674	10.634
B1-Qda. Cerrillos	376262.00	6949828.97	575.878	5.305
A1-Pc8-Nantoco	374774.19	6952848.34	542.931	2.928
A3-Mal Paso	375217.80	6955618.44	524.766	2.208
C9-Fundo Palermo	374784.48	6959637.75	487.492	2.854
C17-Alcaparrosa	374763.85	6962257.05	457.339	6.753
C16-Punta del Cobre	374734.00	6965860.00	423.080	4.725
A17-El Sauce	372778.80	6967436.77	407.752	4.058
A8-Las Casas	372361.33	6968170.51	398.915	6.879
A18-San Fernando	371406.00	6969470.00	398.772	5.269
A19-Plazuela Sierralta	370131.03	6970431.21	389.063	4.628
A48-Castellon	368298.35	6970408.16	384.625	2.110

Fuente: Elaboración Propia

Por otro lado, el modelo debe ajustar al balance másico de aguas. Este se ha dividido en los tres sectores hidrogeológicos que abarca el modelo y estos a su vez se han zonificados en la medida que se ha contado con la información necesaria para ello.

Tabla 4.17: Balance por Sector (l/s)

SECTOR	E.Lautaro-La Puerta	La Puerta-Mal Paso	Mal Paso-Copiapó
Total Ingresos	2630	2460	2080
Total Salidas	3010	2397	2655
Total Intercambios de Entrada	513	1048	754
Total Intercambios de Salida	2087	1285	1550

Fuente: Elaboración Propia

En resumen, al sistema acuífero entran 3.868 l/s y salen 4.384 l/s, lo que implica un desembalse promedio de 16,3 Mm<sup>3</sup>/año. Los datos detallados se encuentran en anexos.

Los sectores y el valor que debe alcanzar cada variable dentro del modelo son los siguientes:

- **Sector I: Embalse Lautaro-La Puerta**

Este sector comienza en la estación fluviométrica Embalse Lautaro, aguas abajo del muro del embalse, llegando hasta la estación fluviométrica La Puerta, ubicada en dicha localidad. El sector se ha dividido en tres zonas, cuyos valores medios esperados son:

1. Valle: Ingresos (recarga 488 l/s); Salidas (Evapotransp. 440 l/s, Bombeos 672 l/s).
2. Condición de Nivel Embalse Lautaro: Ingreso (Cond. de Nivel 1.000 l/s).
3. Río Copiapó como Dren y Quebrada Calqui: Ingresos (Recarga 73 l/s, Cond. de Nivel 35 l/s); Salidas (Dren 800 l/s, Evapotransp. 110 l/s, Bombeos 115 l/s).

- **Sector II: La Puerta-Mal Paso**

Este sector comienza en la estación fluviométrica La Puerta, en la localidad del mismo nombre y termina en la estación Mal Paso. El sector ha sido dividido en dos zonas, las que se detallan a continuación con sus respectivos valores medios:

1. Valle: Ingreso (Recarga 1.048 l/s); Salidas (Evapotransp. 536 l/s, Bombeos 1.060 l/s).
2. Condición de Nivel Quebrada Cerrillos: Ingreso (Cond. de Nivel 50 l/s).

- **Sector III: Mal Paso-Copiapó**

Este sector esta comprendido entre la estación fluviométrica Mal Paso y la angostura producida frente al cerro La Cruz en la ciudad de Copiapó. El sector se ha dividido en cuatro zonas de balance, las que se describen a continuación:

1. Valle: Ingreso (Recarga 854 l/s); Salidas (Evapotransp. 320 l/s, Bombeos 1.152 l/s).
2. Condición de Nivel Quebrada Paipote: Ingreso (Cond. de Nivel 270 l/s).
3. Río Copiapó como Dren frente a la ciudad: Salidas (Dren 25 l/s, Evapotransp. 28 l/s, Bombeos 33 l/s).
4. Condición de Nivel de Salida del Modelo: Salida (Cond. de Nivel 530 l/s).

### Calibración del Modelo

Con el objetivo de obtener un balance másico lo más acorde al patrón utilizado y alcanzar niveles piezométricos lo más parecido a los observados, se procedió al ajuste de algunos parámetros. A continuación se describen los ajustes efectuados al modelo.

- **Recarga**

Los nuevos valores de recarga que han sido incorporados a los sectores definidos como zonas de balance se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 4.18: Propiedades de Recarga

RECARGA (m/día)	SECTOR	OBSERVACIÓN
0.0000835 a 0.0007929	1, 2 y 3	<b>La recarga va aumentando</b> Progresivamente en cada período
0.0020308 0.0021	1 y 2	Semestre de invierno Semestre de verano
0.0013357 0.001336	1, 2 y 3	Semestre de invierno Semestre de verano
0.003092 0.0031	1 y 2	Semestre de invierno Semestre de verano
0.0023 0.0024	2 y 3	Semestre de invierno Semestre de verano
0.0000000	1, 2 y 3	Ambos semestres
0.0041522 0.00416	1 y 2	Semestre de invierno Semestre de verano
*0.00145	3	Ambos semestres
*0.001336 0.00147	3	Períodos de stress 1 al 20 Períodos de stress 21 al 29
*0.0023 0.00243	3	Períodos de stress 1 al 20 Períodos de stress 21 al 29
*0.0026668	3	Ambos semestres
*0.00285	3	Ambos semestres

Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que las propiedades señaladas con (\*) corresponden a sectores con recuperaciones desde la red de agua potable y de alcantarillado.

- **Evapotranspiración**

Los valores de evapotranspiración se ajustaron de acuerdo a las características de cada sector, así se llevo a las propiedades y combinaciones siguientes:

Tabla 4.19:Propiedades de Evapotranspiración

SECTOR	ETP (m/día)	EXTINCIÓN DEPTH* (m)
2 y 3	0.000000	
1, 2 y 3	0.001	5
1, 2 y 3	0.0015	5
1, 2 y 3	0.00200013	5
1, 2 y 3	0.0025	5
1	0.0030247	4
3	0.0035	5

Fuente: Elaboración Propia

\*Profundidad máxima del suelo en que el agua puede ser evaporada

- **Dren**

A las celdas identificadas como elemento dren se les realizó dos tipos de modificaciones, la primera esta referida a la elevación de la celda y la segunda al valor de conductancia de cada una de ellas.

Con respecto a la elevación de las celdas que representan el dren, se les disminuyó su elevación en base a dos razones: la primera es que la cartografía utilizada para representar el relieve del terreno tiene curvas de nivel cada 200 metros, lo que sumado a una interpolación en celdas de 200x200 metros, VM arroja un rango muy grande de valores y por ello mucha incertidumbre, un ejemplo de ello es que se dio el caso de pozos cuya cota era superior a la del dren. La segunda razón se fundamenta en la inspección realizada en terreno, esto debido a que se constató que la caja del río Copiapó se encuentra encajonada entre los sectores de Amolanas (aguas abajo de la quebrada Calqui) y La Puerta, un ejemplo de ello es que en el sector de Los Loros el río esta a una cota alrededor de 20 metros inferior a la del camino y la del pueblo.

En cuanto a la conductancia del dren, se aumentaron los valores en base al valor de la permeabilidad, al ancho del río y al espesor saturado. Así se diferencia claramente del dren existente entre el embalse Lautaro y La Puerta donde los valores de conductancia oscilan alrededor de los 3000 m<sup>2</sup>/día y del existente frente a la ciudad de Copiapó donde los valores de conductancia solo llegan a los 300 m<sup>2</sup>/día.

- **Condiciones de Nivel**

En el modelo existen cinco condiciones de nivel y todas ellas fueron ajustadas. De ellas sólo la condición de nivel de entrada del embalse Lautaro no es constante en el tiempo. A continuación se muestran como quedaron las condiciones de nivel:

Tabla 4.20: Condiciones de Nivel

CONDICIÓN DE NIVEL	PERÍODO (Días)	ELEVACIÓN (msnm)
Embalse Lautaro	0-731	1.121,5
	731-4018	1.120,5
	4018-4383	1121,5
	4383-5297	1122,0
Quebrada Calqui	0-5297	1.069,0
Quebrada Cerrillos	0-5297	603,0
Quebrada Paipote	0-5297	431,0
Salida Modelo	0-5297	290,0

Fuente: Elaboración Propia

- **Coefficiente de Almacenamiento**

En general se puede decir que la caja del río presenta la mayor capacidad de almacenamiento, el que disminuye hacia las laderas del valle, la excepción a la regla la constituye la zona ubicada entre las localidades de Los Loros y La Puerta, lugar donde el basamento rocoso se acerca bruscamente a la superficie, lo que reduce notablemente la capacidad del relleno para almacenar agua. Las propiedades utilizadas para cada sector se muestran a continuación:



Tabla 4.21: Coeficiente de Almacenamiento

SECTOR	Ss 1/m	Sy	Eff. Por.	Tot. Por.
1, 2 y 3	0,00001	0,1	0,16	0,2
1, 2 y 3	0,00001	0,07	0,1	0,18
1, 2 y 3	0,00001	0,08	0,1	0,18
1, 2 y 3	0,00001	0,05	0,08	0,15
1, 2 y 3	0,00001	0,12	0,16	0,2
1	0,000001	0,02	0,16	0,2
1 y 3	0,00001	0,15	0,16	0,2

Fuente: Elaboración Propia

### • Permeabilidad

Los valores de permeabilidad originales se cambiaron, ya que al ser contrastados con valores calculados en las pruebas de bombeo de los expedientes de los pozos se encontró que los valores estaban sobrevalorados, por lo que se procedió a reducirlos utilizando como criterio básico que el valor de permeabilidad disminuye desde la caja del río hacia las laderas del valle y teniendo en cuenta los valores de las pruebas de bombeo.

En líneas generales el valle presenta valores de permeabilidad que fluctúan entre 1.5 m/día y los 18.0 m/día, valores que aumentan al ensancharse el valle, es decir, desde Paipote a Copiapó donde los valores llegan incluso hasta los 60 m/día. A continuación se detallan las propiedades utilizadas y los sectores donde se ubican:

Tabla 4.22: Propiedades de Permeabilidad

SECTOR	Kx=Ky (m/día)	Kz (m/día)
1, 2 y 3	3,0	0,2
1, 2 y 3	3,5	0,25
1, 2 y 3	4,0	0,3
1, 2 y 3	8,0	0,7
3	27,0	2,0
3	40,0	3,0
1 y 3	18,0	1,6
1 y 2	1,5	0,05
1	2,5	0,2
2 y 3	7,0	0,5
3	60,0	5,0
1	2,0	0,1

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados de la Calibración**

Como resultado de esta simulación se obtuvo series de niveles simulados de agua en cada pozo de observación (anexos).

De la tabla 4.23 se aprecia que los errores alcanzados varían entre  $-3.77$  y  $3.12$  metros aproximadamente, obteniendo los siguientes resultados por pozo de observación:

Tabla 4.23: Niveles calculados en pozos de observación

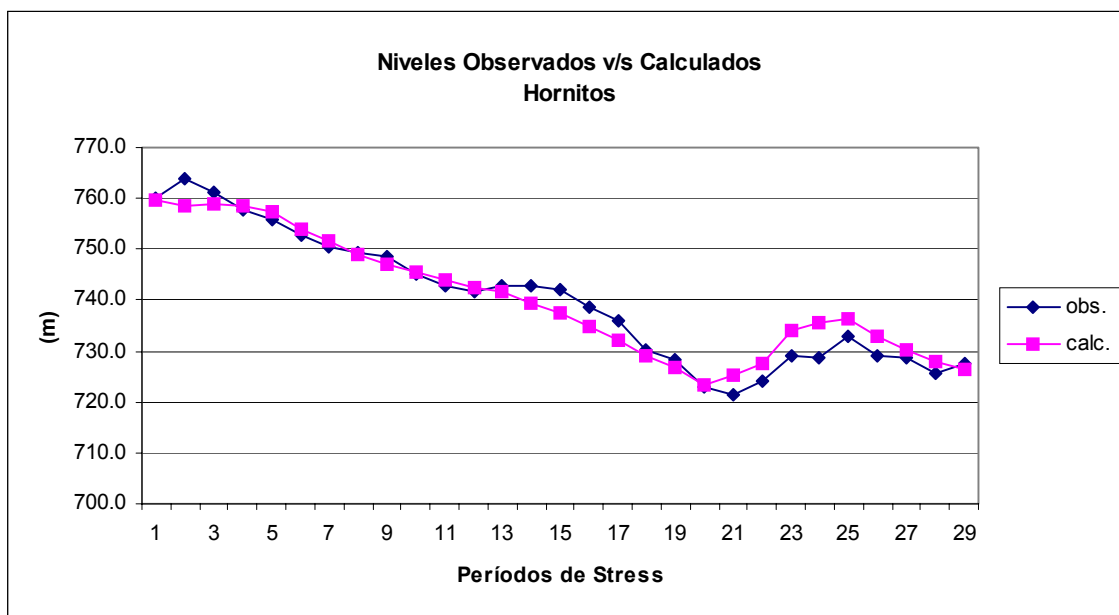
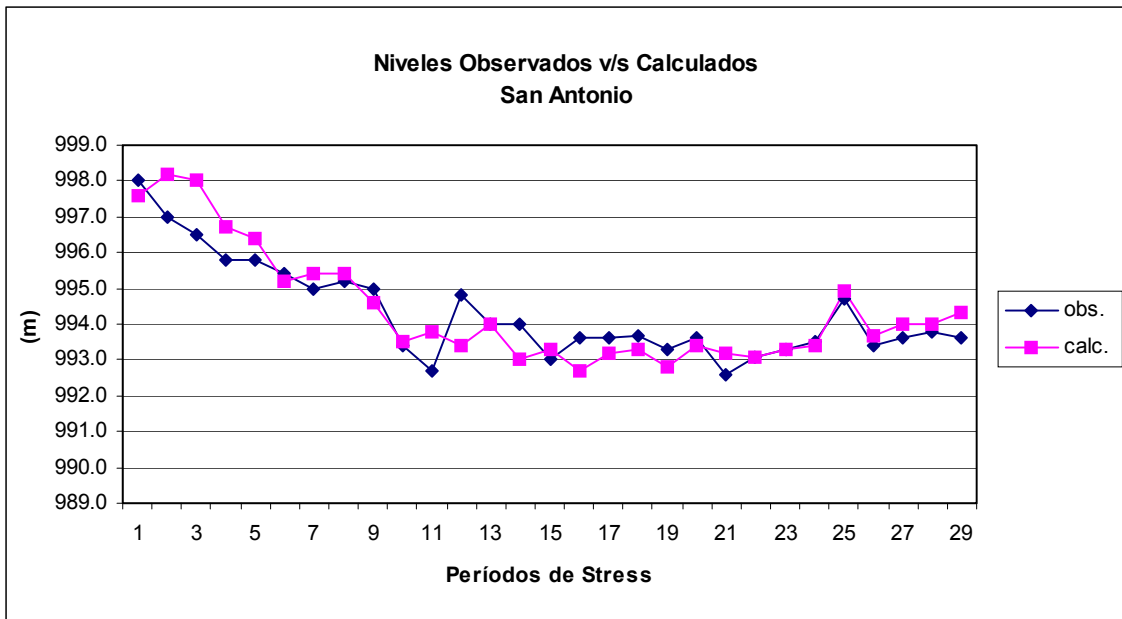
POZO Nombre	NIVEL ESTÁTICO Promedio (msnm)	DESVIACIÓN ESTANDAR (m)	ERROR MEDIO $\Delta$ (calc. – obs.) (m)
Embalse Lautaro	1109.78	0.614	0.00
El Calqui	1059.75	0.495	-0.92
San Antonio	994.51	1.273	0.20
El Giro	977.47	0.495	0.84
Los Loros	923.51	0.424	0.69
La Puerta	908.46	1.414	0.74
Hornitos	740.25	23.476	0.23
Elisa de Bordos	712.17	28.567	3.12
Villa María	661.79	15.486	-3.77
Pabellón	610.98	19.940	-0.99
Qda. Cerrillos	575.63	7.778	1.61
Pc8-Nantoco	541.57	6.222	-0.33
Mal Paso	521.35	3.394	-2.95
Fundo Palermo	486.06	0.354	0.08
Alcaparrosa	453.54	5.303	-2.00
Punta del Cobre	415.63	6.859	-0.43
El Sauce	401.79	5.798	-0.74
Las Cañas	398.79	5.162	0.62
San Fernando	395.08	5.869	-1.31
Plaz. Sierralta	388.52	4.596	-0.31
Castellón	383.89	5.021	-0.45

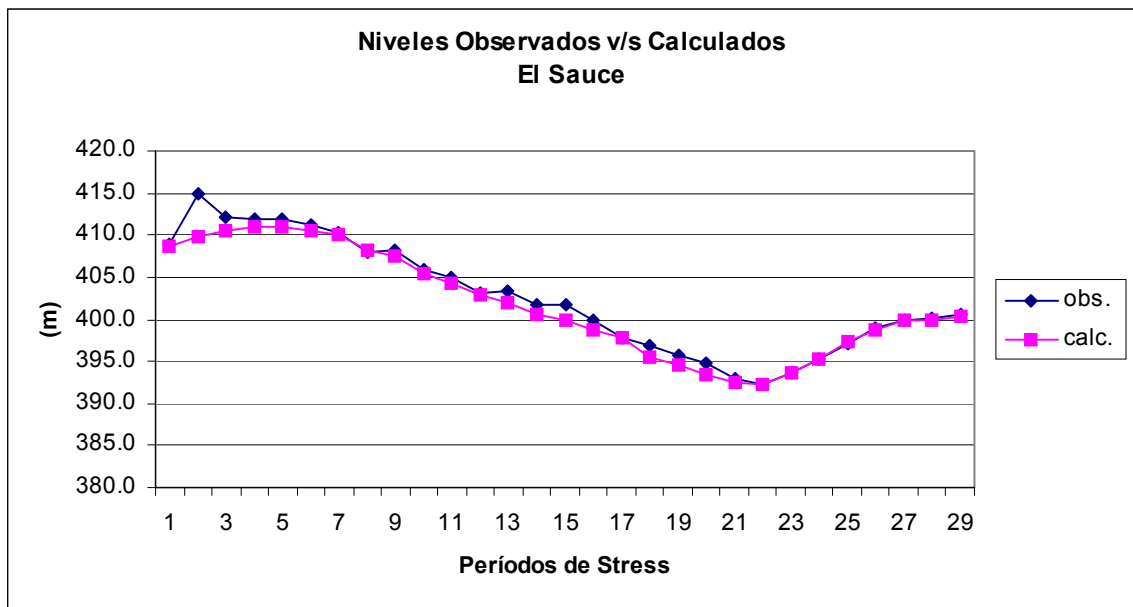
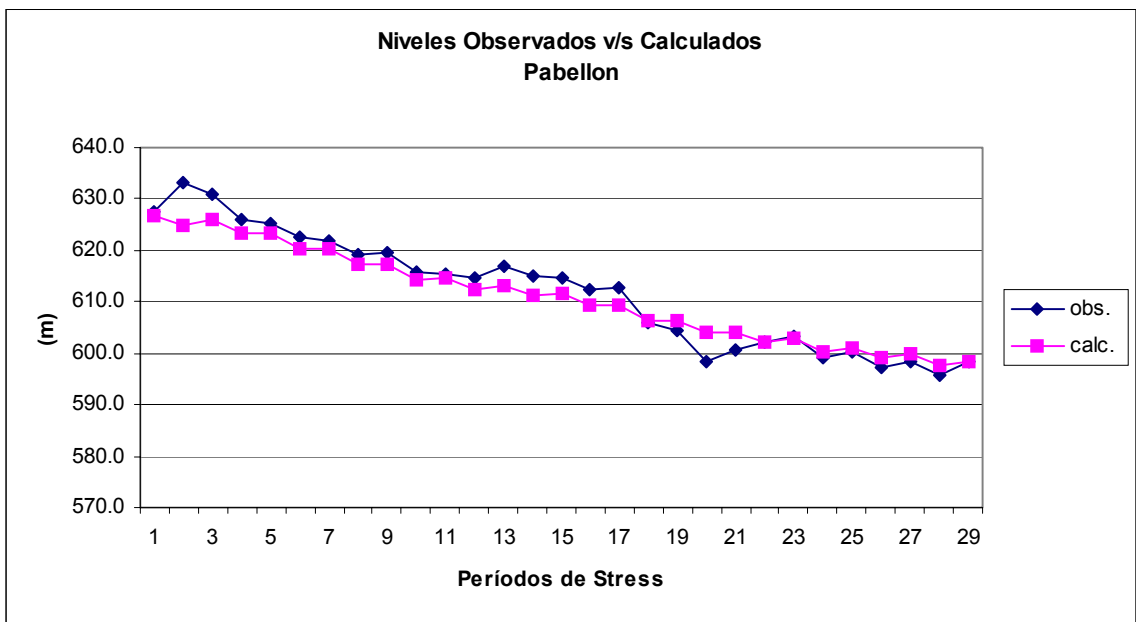
Fuente: Elaboración Propia

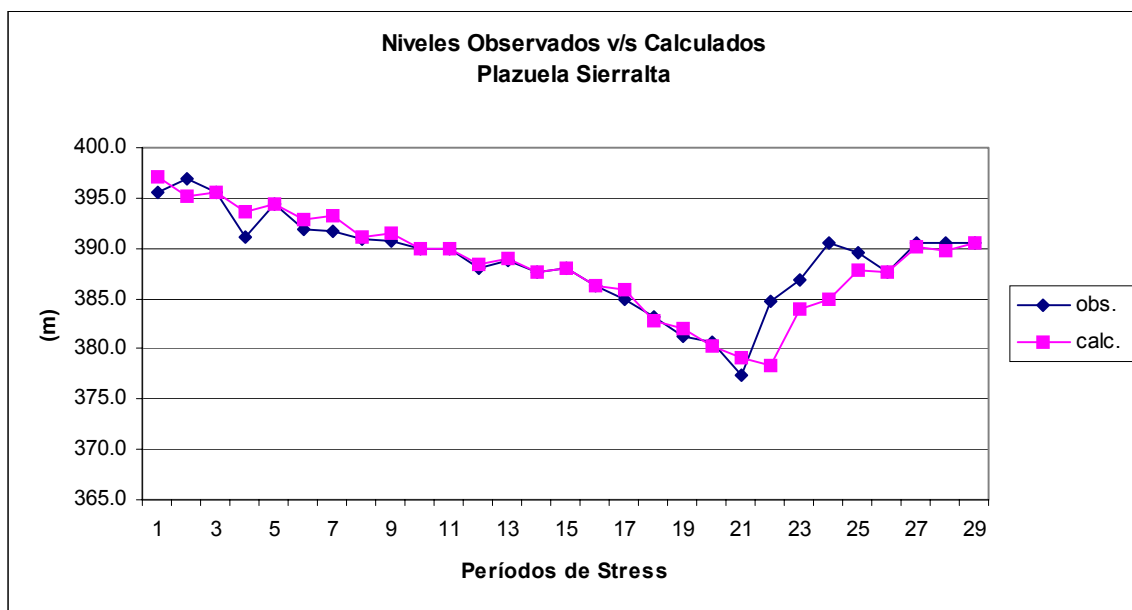
El Error Promedio en los niveles del sistema modelado es de 0.29 metros.

La diferencia en el nivel del agua subterránea en los pozos de observación y el nivel simulado por el modelo para el período de calibración (1987 – 2001) se muestran en las siguientes figuras.

Figura 4.21: Contraste de niveles observados y simulados de pozos representativos







Los volúmenes de agua por unidad de tiempo, que están ingresando y saliendo del sistema modelado, resultantes del proceso de calibración se presentan en la tabla 4.24.

El caudal total en régimen transiente de ingreso al sistema es de 3.900 l/s y el caudal de salida es de 4.409 l/s, lo cual implica un desembalse de aproximadamente 16,05 Mm<sup>3</sup>/año. Mientras tanto, que en la zona comprendida entre las localidades de La Puerta y Copiapó el caudal de ingreso alcanza los 2.261 l/s y el de salida a los 2.862 l/s, lo que se traduce en un desembalse aproximado de 18,95 Mm<sup>3</sup>/año.

Tabla 4.24: Balance de Masa en la Zona Modelada.

VARIABLE	CAUDAL ENTRANTE	CAUDAL SALIENTE
<b>Sector I: Embalse Lautaro – La Puerta</b>	(l/s)	(l/s)
Recarga en valle	490.00	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	32.16
Bombeos en valle	0.00	671.94
Condición de Nivel del Emb. Lautaro	1082.33	0.00
Recarga en dren	72.82	0.00
Condición de Nivel de Qda. Calquis	34.66	0.00
Dren	0.00	818.75
Evapotranspiración en dren	0.00	25.99
Bombeos en dren	0.00	114.26
<i>Total sector I</i>	<i>1679.81</i>	<i>1663.10</i>
<b>Sector II: La Puerta – Mal Paso</b>		
Recarga en valle	1048.00	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	37.87
Bombeos en valle	0.00	1059.07
Condición de Nivel de Qda. Cerrillos	47.01	0.00
<i>Total sector II</i>	<i>1095.01</i>	<i>1096.94</i>
<b>Sector III: Mal Paso – Copiapó</b>		
Recarga en valle	854.00	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	14.82
Bombeos en valle	0.00	1151.26
Condición de Nivel de Qda. Paipote	271.61	0.00
Dren	0.00	25.75
Evapotranspiración en dren	0.00	5.35
Bombeos en dren	0.00	33.28
Condición de Nivel de salida	0.00	535.49
<i>Total sector III</i>	<i>1125.61</i>	<i>1765.95</i>
<b>Total</b>	<b>3900.43</b>	<b>4409.80</b>

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, completados los pasos de ingreso de las diferentes variables y parámetros al sistema y su posterior calibración y ajuste, tal como se detalla en el capítulo anterior, el modelo estará preparado para ser operado y simular las alternativas de explotación del recurso aguas subterráneas en el valle del río Copiapó.

## **5. GENERACIÓN Y MODELAMIENTO DE ESCENARIOS FUTUROS**

En esta sección se establecen escenarios de demanda futura cuya finalidad es establecer el caudal a satisfacer en el tiempo. Así, se generan dos escenarios los cuales se diferencian por la variación en la oferta de agua, el primero supone condiciones meteorológicas promedio y el segundo supone condiciones de sequía, siendo la demanda igual en ambos casos.

Se establece el año 2010 como año de corte, por lo que se proyecta cada variable a nueve años.

### **5.1 Proyección de Demandas**

Con el fin de proyectar las variables se genera un escenario tendencial, es decir, se supone que el comportamiento futuro de la demanda seguirá la tendencia mostrada en los últimos años. En este sentido es posible identificar tres tipos de demandas: riego, minera e industrial y producción de agua potable.

#### **Riego**

La actividad agrícola es la que genera mayor demanda hídrica en el valle, además de ser la de mayor dinamismo con la constante incorporación de terrenos al cultivo de uvas de mesa, un ejemplo de ello es que en el área en estudio entre los años 1987 y 2001 el volumen anual extraído aumentó en un 93,2%.

Es necesario señalar, que si bien la actividad agrícola no sólo se realiza en el área de estudio, sino, que también aguas arriba de ésta, la existencia del embalse Lautaro amortigua el efecto de esta actividad en los volúmenes de agua del área en estudio.



La demanda debida al riego de cultivos se calcula sobre la base de la siguiente información:

Tabla 5.1: Superficie de Cultivo

Sector	En 2001 (há)	Potencial (há)	Por cultivar (há)	ETP (m <sup>3</sup> /há/año)
Embalse Lautaro-La Puerta	1.625	2.740	722	11.415
La Puerta-Mal Paso	1.731	2.090	359	12.322
Mal Paso-Copiapó	2018	1.878	253	9.985

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Tabla 5.2: Volumen de Bombeos

Sector	Año 1987	Año 2001	Tasa de Crecimiento
Embalse Lautaro-La Puerta	20,68 Mm <sup>3</sup> /año	30,28 Mm <sup>3</sup> /año	0,6857 Mm <sup>3</sup> /año
La Puerta-Mal Paso	22,61 Mm <sup>3</sup> /año	44,19 Mm <sup>3</sup> /año	1,54 Mm <sup>3</sup> /año
Mal Paso-Copiapó	4,43 Mm <sup>3</sup> /año	8,06 Mm <sup>3</sup> /año	0,26 Mm <sup>3</sup> /año

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Del cociente entre la ETP (evapotranspiración media) y la tasa anual de bombeo se obtienen las hectáreas promedio de tierras cultivadas que se incorporan por año y estas quedan sujetas a la restricción de superficie disponible para cultivar, de esta manera los bombeos futuros quedan de la siguiente forma:

Tabla 5.3: Caudal de Extracción Proyectado

Año	Embalse Lautaro-La Puerta		La Puerta-Mal Paso		Mal Paso-Copiapó	
	Superficie (há)	Bombeo (Mm <sup>3</sup> /año)	Superficie (há)	Bombeo (Mm <sup>3</sup> /año)	Superficie (há)	Bombeo (Mm <sup>3</sup> /año)
2001	1.625	30,28	2.018	44,19	1.731	8,06
2002	1.685,07	30,9657	2.172,23	45,73	1.752,1	8,32
2003	1.745,14	31,6514	2.326,46	47,27	1.773,2	8,58
2004	1.805,21	32,3371	2.480,69	48,81	1.794,3	8,84
2005	1.865,28	33,0228	2.634,92	50,35	1.815,4	9,1
2006	1.878	33,168	2.740	51,89	1.836,5	9,36
2007	1.878	33,168	2.740	51,89	1.857,6	9,62
2008	1.878	33,168	2.740	51,89	1.878,7	9,88
2009	1.878	33,168	2.740	51,89	1.899,8	10,14
2010	1.878	33,168	2.740	51,89	1.920,9	10,4

Fuente: Elaboración Propia

La ubicación espacial de las nuevas demandas o puntos de extracción de agua para riego de cultivos se han asignado a pozos existentes, los cuales están aun sin uso o en su defecto poseen capacidad para una mayor extracción. La selección de este tipo de pozos se realizó tomando en cuenta los siguientes aspectos: el pozo debe estar ubicado en un fundo de cultivo intensivo, el pozo debe estar a nombre del propietario del fundo, el pozo debe tener concedido un caudal extra al de bombeo actual y por último, según las inspecciones en terreno el fundo debe tener superficies en preparación para ser cultivadas. De esta manera los pozos seleccionados fueron los siguientes:

Tabla 5.4: Pozos Seleccionados

Sector Embalse Lautaro – La Puerta		
Pozo	Fundo	Propietario
55	Canelo Bajo	Uniagri
60	Amolanas	UAC
99	El Fuerte	Soc. Agr. El Fuerte
100	El Fuerte	Soc. Agr. El Fuerte
Sector La Puerta – Mal Paso		
Pozo	Fundo	Propietario
104	Tres Soles	Prohens
109	El Mirador	Prohens
118	Deliber	Deliber
124	Parcela 24	Agrícola Oasis
125	Parcela 24	Agrícola Oasis
138	Villa María	Ruiz-Tagle
145	Pabellón	Soc. Agr. del Norte
153	Colina	Ruiz-Tagle
162	Alianza	Alianza
Sector Mal Paso - Copiapó		
Pozo	Fundo	Propietario
222	Viñita El Dátil	Octavio Vallejos
240	Viñita	Angel Revello

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Por último, las proyecciones de la demanda en los distintos puntos de extracción se distribuyeron como se detalla a continuación al ser ingresadas al modelo.

En el sector Embalse Lautaro-La Puerta los bombeos se han dividido en partes iguales en los cuatro pozos.

En el sector La Puerta-Mal Paso los bombeos se han repartido en dos grupos de pozos, dividiéndose el caudal extraído en partes iguales dentro de cada grupo. En el primer grupo están los pozos de los grandes productores de uva del valle, que al momento del catastro realizado el año 2001 realizaban trabajos para la incorporación de nuevos suelos a la actividad agrícola, estos pozos son 138, 145, 153 y 162, con ellos se cubren las nuevas extracciones por completo hasta el año 2004. El segundo grupo de pozos cubre las extracciones faltantes desde el año 2005 en adelante, los pozos son 104, 109, 118, 124 y 125.

En el sector Mal Paso-Copiapó las nuevas extracciones quedan cubiertas con los dos pozos seleccionados, los que se dividen el caudal a partes iguales.

### **Minera e Industrial**

En el área de interés, la actividad industrial esta directamente relacionada a procesos mineros como chancados, refinерías y fundiciones, por lo que queda implícita la proporcionalidad de estas actividades.

Esta actividad se realiza mayoritariamente en el sector denominado Mal Paso-Copiapó, y obtiene la totalidad del recurso hídrico requerido desde el acuífero en estudio. Los grandes extractores de agua subterráneo son Cía. Minera Candelaria para la explotación y procesamiento de cobre, con baterías de pozos en el sector de Tierra Amarilla y Enami para el procesamiento y fundición de cobre en Paipote, lugar donde posee su batería de pozos.

Las demandas futuras se calcularon considerando los proyectos de nuevas instalaciones mineras o ampliaciones de proyectos existentes:

Tabla 5.5: Demandas Mineras Proyectadas

Proyecto	Bombeo Estimado
Candelaria (ampliación 2001)	55 (l/s)
Amolanas (2001)	50 (l/s)
Atacama-Kozan (2003)	65 (l/s)
<b>Total</b>	<b>170 (l/s) equivalente a 5,36 Mm<sup>3</sup>/año</b>

Fuente: Datos extraídos de proyectos de actuales y futuras inversiones en la III Región. Recopilados en Sernageomin, Cochilco, Enami y la Corporación de Desarrollo de Bienes de Capital.

La ubicación espacial o puntos de extracción de estas nuevas demandas están claramente identificados:

- El Proyecto Candelaria es una ampliación de las instalaciones existentes por lo que la extracción se llevará a cabo desde la batería de pozos existente, los que poseen derechos y capacidad por sobre la explotación actual. De la misma Cía. minera es el proyecto Amolanas y se encuentra ubicado en el sector de Tierra Amarilla, pero en la ribera opuesta del río al de la mina Candelaria, por lo que todo indica que la extracción se realizará del mismo sector.
- El proyecto de la Cía. minera Atacama-Kozan con una inversión de 130 millones de dólares para la extracción de cobre se ubica 15 kilómetros al sur-este de la ciudad de Copiapó, vecino a al mina Candelaria.

Para ingresar las demandas al modelo, se distribuyen las proyecciones en los diferentes puntos de extracción de la siguiente forma:

- La producción futura de los proyectos Candelaria y Amolanas se cubren con la incorporación a la explotación de tres pozos sin uso de la batería que posee la Cía. Minera en Tierra Amarilla. Los pozos son 401, 402 y 403 y extraen caudales similares.
- La producción para el proyecto Atacama-Kozan se resuelve con la incorporación de dos nuevos puntos de extracción en la zona del proyecto, los pozos 444 y 443 que se dividen la explotación en partes iguales.

### Agua Potable

La producción de agua potable para la ciudad de Copiapó, las localidades de Paipote y Tierra Amarilla, y las ciudades de Caldera y Chañaral se realiza en su totalidad con recurso subterráneo extraído del sector Mal Paso-Copiapó. En los últimos años la empresa encargada del suministro, Emssat S.A., ha introducido nuevas tecnologías logrando mejorar la eficiencia el sistema.

Para establecer la demanda futura se contó con la siguiente información proporcionada por Emssat S.A.:

Tabla 5.6: Demanda de Agua Potable

Año	Producción (m <sup>3</sup> /año)	Facturación (m <sup>3</sup> /año)	% Perdidas
1995	16.122.489	9.103.745	43,5
1996	15.952.110	9.396.095	41,1
1997	15.039.889	9.674.194	35,7
1998	14.153.205	9.686.369	31,6
1999	13.884.446	9.719.112	30,0
2000	13.935.811	9.887.077	29,1
2001	14.755.482	10.254.269	30,51

Fuente: Datos otorgados a la DGA por parte de Emssat S.A., III Región.

De la información anterior no es posible estimar en forma directa la producción futura, esto debido al efecto provocado por la constante disminución en el nivel de perdidas, las que según Emssat S.A. se mantendrán en promedio en torno al 30%, valor que es considerado por ellos como de máxima eficiencia del sistema para la zona que abastece. Debido a lo anterior es que se estimó la producción futura utilizando la información de la facturación, cuyo volumen aumenta en promedio a una razón anual de 1,02875 y teniendo presente un nivel de perdidas del 30%. De esta forma la producción futura de agua potable en la zona es la siguiente:

Tabla 5.7: Demanda de Agua Potable Proyectada

Año	Producción (m <sup>3</sup> /año)	Facturación (m <sup>3</sup> /año)	% Perdidas
2002	15.070.113	10.549.079	30,0
2003	15.503.379	10.852.365	30,0
2004	15.949.100	11.164.370	30,0
2005	16.407.637	11.485.346	30,0
2006	16.879.357	11.815.550	30,0
2007	17.364.639	12.155.247	30,0
2008	17.863.871	12.504.710	30,0
2009	18.377.459	12.864.221	30,0
2010	18.905.810	13.234.067	30,0

Fuente: Elaboración Propia

La ubicación espacial o puntos de captación de las nuevas demandas han sido asignadas a pozos existentes que están subexplotados en la actualidad, por lo que es posible aumentarles considerablemente el caudal bombeado. Los pozos seleccionados de propiedad de Emssat S.A. son:

Tabla 5.8: Puntos de Captación

Pozo	Recinto
200	Rosario
201	Rosario
203	San Miguel
204	San Miguel

Fuente: Elaboración Propia

El ingreso de las proyecciones en los diferentes puntos de extracción se llevó a cabo de manera que los cuatro pozos seleccionados aumentan su extracción en partes iguales.



Finalmente, se incorporan al modelo 18 nuevos periodos de estrés, que corresponden a los años 2001 al 2010. La tabla 5.9 muestra en detalle la discretización temporal.

Tabla 5.9: Discretización Temporal del escenario generado

PERIODOS DE STRESS	DÍAS	DIAS ACUMULADOS	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	DIA INICIAL	DIA FINAL
SP30	182	5479	01-10-01	30-03-02	5297	5479
SP31	183	5662	01-04-02	30-09-02	5479	5662
SP32	182	5844	01-10-02	30-03-03	5662	5844
SP33	183	6027	01-04-03	30-09-03	5844	6027
SP34	183	6210	01-10-03	30-03-04	6027	6210
SP35	183	6393	01-04-04	30-09-04	6210	6393
SP36	182	6575	01-10-04	30-03-05	6393	6575
SP37	183	6758	01-04-05	30-09-05	6575	6758
SP38	182	6940	01-10-05	30-03-06	6758	6940
SP39	183	7123	01-04-06	30-09-06	6940	7123
SP40	182	7305	01-10-06	30-03-07	7123	7305
SP41	183	7488	01-04-07	30-09-07	7305	7488
SP42	183	7671	01-10-07	30-03-08	7488	7671
SP43	183	7854	01-04-08	30-09-08	7671	7854
SP44	182	8036	01-10-08	30-03-09	7854	8036
SP45	183	8219	01-04-09	30-09-09	8036	8219
SP46	182	8401	01-10-09	30-03-10	8219	8401
SP47	183	8584	01-04-10	30-09-10	8401	8584

Fuente: Elaboración Propia

## **5.2 Generación de Escenarios**

Utilizando como base el punto anterior, se generan dos escenarios futuros, el primero denominado escenario tendencial, supone condiciones meteorológicas promedio, es decir, el comportamiento futuro de la oferta de agua seguirá la tendencia de los últimos años.

El segundo, escenario con periodo de sequía, supone condiciones meteorológicas extremas lo que se traduce en una disminución en la oferta de agua debido a un período de sequía. Esta situación se simuló bajando los niveles de entrada de agua a la zona acuífera en estudio (condiciones de borde), de manera tal que dichos niveles se llevaron al mínimo observado entre 1987 y 2001. De esta forma, la diferencia entre el promedio histórico del nivel freático en las distintas condiciones de borde y el nivel utilizado en esta proyección es la siguiente: Embalse Lautaro  $-3.00$  m., Qda. Calquis y Qda. Cerrillos  $-4.00$  m. y Qda. Paipote  $-8.00$  m.

## **6. EVALUACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO**

### **6.1 Introducción**

Tal como se ha mencionado en el capítulo anterior, la capacidad del acuífero para abastecer demandas futuras será determinado a través de los resultados que se obtengan en ambos escenarios (escenario tendencial y escenario en periodo de sequía).

Las diferentes alternativas de oferta del recurso hídrico, serán analizadas para los intervalos de tiempo de 1 a 10 años, comenzando en el año 2001, de manera de estudiar y evaluar los descensos esperados de la superficie del agua subterránea.

Por otra parte, cabe señalar que el área de interés del presente estudio es el comprendido por los sectores hidrogeológicos denominados La Puerta – Mal Paso y Mal Paso – Copiapó, esto debido a que en los sectores aguas arriba de la localidad de La Puerta no se han detectado registros con descensos significativos del nivel estático de la napa.

A continuación se hace un breve análisis del balance del período patrón 1987-2001:

El balance de agua para la zona modelada entre los años 1987 – 2001 entrega valores para el caudal de entrada por un total de 3.900,43 l/s y de 4.525,99 l/s como caudal de salida, lo que implica que en los últimos catorce años el acuífero se ha estado desembalsando a una tasa de 19,73 Mm<sup>3</sup> por año, es decir, por cada año que pasa las reservas del acuífero disminuyeron en ese volumen. Considerando que las reservas del acuífero en este sector se cuantifican en alrededor de 1.980 Mm<sup>3</sup>, se tiene que se le ha extraído anualmente, en promedio, el 0.99% de sus reservas.

En el área de interés entre La Puerta y la ciudad de Copiapó se tienen valores para el caudal de entrada por un total equivalente a 2.220,61 l/s y de 2.862,89 l/s como caudal de salida, lo que implica desembalse a ritmo de 20,25 Mm<sup>3</sup>/año.

Esta entrega de reservas por parte del acuífero se ha desarrollado en forma disímil entre los dos sectores hidrogeológicos que conforman esta área, esto debido a que en el sector La Puerta – Mal Paso el desembalse se ha producido a un ritmo promedio de 0,06 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que el sector Mal Paso – Copiapó el desembalse se produjo a un ritmo de 20,19 Mm<sup>3</sup>/año. La razón de tal diferencia se debe hallar en que el primer sector es eminentemente agrícola, por lo que el fuerte de las extracciones se realizan en verano (el volumen extraído es el doble que en invierno), dándole así en temporada de invierno un “descanso” al acuífero para recuperar sus reservas, por el contrario en el segundo sector se desarrolla la actividad agrícola, minera y urbana donde estas últimas explotan el acuífero en verano e invierno en proporciones similares, por lo que se somete a estrés los 365 días del año a este sector del acuífero.

## 6.2 Escenario Tendencial

La incorporación del escenario de proyección futura del comportamiento de la demanda al modelo, arroja los resultados que a continuación se presentan.

En la tabla 6.1 se detalla la variación media de cambio anual del nivel estático de los pozos de observación para el período 2001-2010.

Tabla 6.1: Variación anual media del nivel estático

SECTOR	POZO Nombre	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	VARIACIÓN ANUAL Promedio (m)
La Puerta - Mal Paso	Hornitos	384185.00	6929890.00	+0.04
	Elisa de Bordos	382347.09	6933673.52	+0.07
	Villa María	379235.15	6936713.41	+0.50
	Pabellón	378695.51	6942607.30	-0.72
	Qda. Cerrillos	376262.00	6949828.97	-0.83
	Pc8-Nantoco	374774.19	6952848.34	-0.97
	Mal Paso	375217.80	6955618.44	-0.94
Mal Paso - Copiapó	Fundo Palermo	374784.48	6959637.75	-1.87
	Alcaparrosa	374763.85	6962257.05	-1.45
	Punta del Cobre	374734.00	6965860.00	-0.39
	El Sauce	372778.80	6967436.77	+0.03
	Las Cañas	372361.33	6968170.51	+0.02
	San Fernando	371406.00	6969470.00	+0.02
	Plaz. Sierralta	370131.03	6970431.21	+0.09
	Castellón	368298.35	6970408.16	-0.04

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla, los mayores descensos se registran en los pozos “Fundo Palermo” y “Alcaparrosa” que se encuentran en el sector de Mal Paso-Copiapó, y que corresponden precisamente al sector donde se concentran los pozos de uso minero. Los restantes pozos no registran variación media significativa.

Las series de niveles piezométricos esperados, tabulados para cada pozo de observación para el período 2001-2010 se encuentra en anexos.

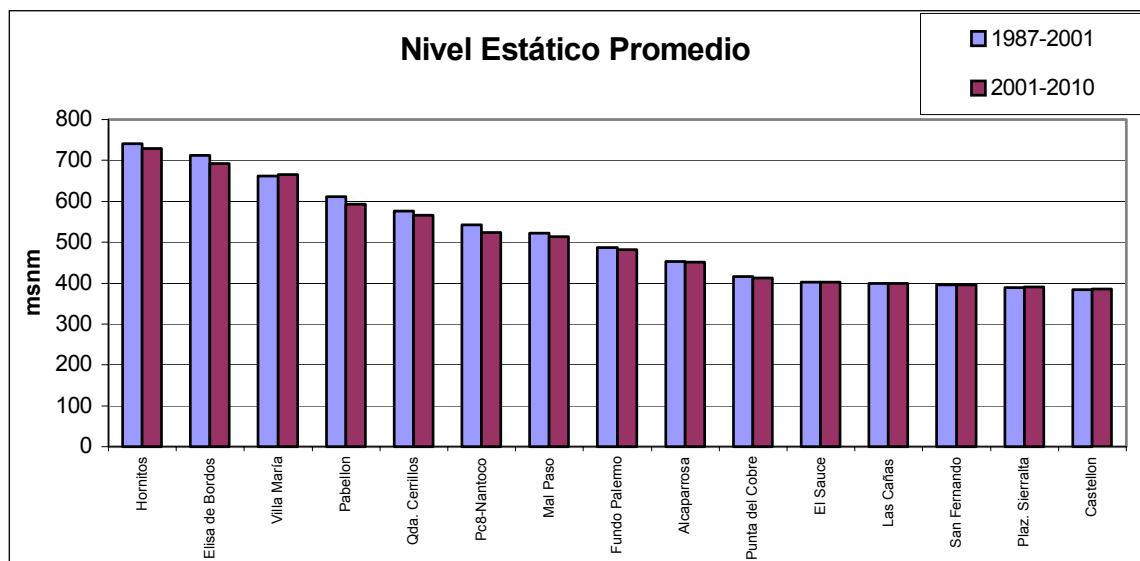
La tabla 6.2 compara el nivel piezométrico medio en cada pozo de observación en ambos periodos, con y sin proyección de demanda.

Tabla 6.2: Niveles Piezométricos Medios en pozos de observación.

POZO Nombre	NIVEL ESTÁTICO Promedio (1987-2001) (msnm)	NIVEL ESTÁTICO Promedio (2001-2010) (msnm)	DESVIACIÓN ESTANDAR (1987-2001) (m)	DESVIACIÓN ESTANDAR (2001-2010) (m)
Hornitos	740.25	729.32	23.476	0.290
Elisa de Bordos	712.17	692.36	28.567	0.488
Villa María	661.79	665.59	15.486	3.507
Pabellón	610.98	592.91	19.940	4.589
Qda. Cerrillos	575.63	565.26	7.778	5.317
Pc8-Nantoco	541.57	524.60	6.222	6.180
Mal Paso	521.35	512.87	3.394	6.039
Fundo Palermo	486.06	480.88	0.354	11.929
Alcaparrosa	453.54	450.69	5.303	9.214
Punta del Cobre	415.63	413.47	6.859	2.503
El Sauce	401.79	401.86	5.798	0.169
Las Cañas	398.79	399.95	5.162	0.148
San Fernando	395.08	396.07	5.869	0.120
Plaz. Sierralta	388.52	391.06	4.596	0.573
Castellón	383.89	385.64	5.021	0.276

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.1: Nivel Piezométrico Medio en Periodos Observado y Proyectado



El gráfico muestra que los niveles medios no presentan una notable alteración al confrontar el periodo de calibración 1987-2001, con el periodo extendido al 2010. Por otro lado, el sector La Puerta-Mal Paso es el que presenta mayores descensos en el nivel estático que van desde los 10 hasta los 20 metros tal como se aprecia en el pozo denominado “Elisa de Bordes”.

Las desviaciones estándar para ambos periodos no muestran dispersiones significativas, lo que se verifica en que el mayor coeficiente de variación (desviación estándar/media) toma un valor de 0.04 para el pozo “Elisa de Bordes”.

Otro factor a analizar son los volúmenes de agua por unidad de tiempo, que están ingresando y saliendo del sistema modelado resultantes del proceso de simulación los que se presentan en la tabla 6.3.

El caudal total en régimen transiente de ingreso al sistema es de 4.185 l/s y el de salida es de 4.787 l/s, lo que implica un desembalse aproximado de 18,98 Mm<sup>3</sup>/año. Asimismo, el caudal de ingreso a la zona acuífera comprendida entre La Puerta y Copiapó asciende a 2.482 l/s y el de salida alcanza los 3.074 l/s, lo que implica un desembalse de 18,86 Mm<sup>3</sup>/año.

Tabla 6.3: Balance de Masa en la Zona Modelada. Escenario Tendencial

VARIABLE	CAUDAL ENTRANTE	CAUDAL SALIENTE
<b>Sector I: Embalse Lautaro – La Puerta</b>	(l/s)	(l/s)
Recarga en valle	512.24	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	40.07
Bombes en valle	0.00	680.84
Condición de Nivel del Emb. Lautaro	1081.89	0.00
Recarga en dren	73.02	0.00
Condición de Nivel de Qda. Calquis	35.66	0.00
Dren	0.00	838.22
Evapotranspiración en dren	0.00	26.29
Bombes en dren	0.00	127.31
<i>Total sector I</i>	<i>1702.81</i>	<i>1686.44</i>
<b>Sector II: La Puerta – Mal Paso</b>		
Recarga en valle	1195.91	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	66.36
Bombes en valle	0.00	1172.08
Condición de Nivel de Qda. Cerrillos	51.76	0.00
<i>Total sector II</i>	<i>1247.67</i>	<i>1238.44</i>
<b>Sector III: Mal Paso – Copiapó</b>		
Recarga en valle	965.00	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	18.92
Bombes en valle	0.00	1193.42
Condición de Nivel de Qda. Paipote	269.77	0.00
Dren	0.00	29.34
Evapotranspiración en dren	0.00	5.84
Bombes en dren	0.00	52.72
Condición de Nivel de salida	0.00	535.85
<i>Total sector III</i>	<i>1134.77</i>	<i>1811.34</i>
<b>Total</b>	<b>4085.25</b>	<b>4736.22</b>

Fuente: Elaboración Propia



El balance para el Escenario Tendencial entrega valores para el caudal de entrada por un total de 4.185,25 l/s y de 4.787,26 l/s como caudal de salida, lo que implica que entre los años 2001 y 2010 el acuífero entregará sus reservas a un ritmo de 18,98 Mm<sup>3</sup> por año, es decir, por cada año que pase las reservas del acuífero disminuirán en ese volumen. Considerando que las reservas del acuífero en este sector se cuantifican en alrededor de 1.980 Mm<sup>3</sup>, se tiene que las extracciones anuales alcanzaran en promedio el 0.95% de sus reservas. A este ritmo de desembalse el acuífero habrá entregado todas sus reservas al cabo de 104,3 años.

En el área de interés entre La Puerta y la ciudad de Copiapó se tienen valores para el caudal de entrada por un total equivalente a 2.482,44 l/s y de 3.074,53 l/s como caudal de salida, lo que implica desembalse a ritmo de 18,67 Mm<sup>3</sup>/año. Este volumen es menor al estimado para el período 1987 – 2001, por lo que existe algún fenómeno que está provocando una desaceleración en el volumen de desembalse.

En el sector hidrogeológico La Puerta – Mal Paso se produce un embalse promedio de 0,10 Mm<sup>3</sup>/año, debido a que a pesar que aumentan los bombeos y la evapotranspiración, también aumentan la recarga por riego y la quebrada Cerrillos es capaz de aportar mayor caudal debido al efecto “esponja” producido por la mayor necesidad de agua en el valle. Por otra parte, se debe tener en cuenta que ya no existe un aumento explosivo de superficie cultivada, esto debido a que la superficie que resta por cultivar es poca y en general el estado en que se encuentra requiere de faenas previas para su incorporación a la actividad agrícola. Esto indica que al parecer en este sector el acuífero puede alcanzar un nuevo punto de equilibrio dinámico.

En el sector Mal Paso – Copiapó se produce un desembalse a ritmo de 18,96 Mm<sup>3</sup>/año. Este desembalse se produce por la fuerte actividad agrícola de la zona, unida a una constante extracción para procesos mineros y producción de agua potable. Sin embargo, el desembalse es menor que el producido entre los años 1987 y 2001, esto se debe netamente a que el sector aguas arriba al estar en un proceso de embalsaje de agua esta siendo capaz de entregar mayor caudal hacia aguas abajo.

### 6.3 Resultados Escenario con Período de Sequía

El escenario consiste en una disminución en la oferta de agua debido a un periodo de sequía, esto se simula bajando los niveles al mínimo observado entre 1987 y 2001. Los resultados que se obtienen son los que a continuación se presentan.

Se obtuvo la serie de niveles piezométricos esperados, tabulados para cada pozo de observación para el período 2001-2010 (anexos).

En la tabla 6.4 se detalla la variación media de cambio anual del nivel estático de los pozos de observación para el período 2001-2010.

Tabla 6.4: Variación anual media del nivel estático

SECTOR	POZO Nombre	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	VARIACIÓN ANUAL Promedio (m)
La Puerta - Mal Paso	Hornitos	384185.00	6929890.00	+0.02
	Elisa de Bordos	382347.09	6933673.52	+0.06
	Villa María	379235.15	6936713.41	+0.53
	Pabellón	378695.51	6942607.30	-0.97
	Qda. Cerrillos	376262.00	6949828.97	-1.11
	Pc8-Nantoco	374774.19	6952848.34	-1.07
	Mal Paso	375217.80	6955618.44	-0.99
Mal Paso - Copiapó	Fundo Palermo	374784.48	6959637.75	-2.58
	Alcaparrosa	374763.85	6962257.05	-2.16
	Punta del Cobre	374734.00	6965860.00	-0.57
	El Sauce	372778.80	6967436.77	-0.15
	Las Cañas	372361.33	6968170.51	-0.14
	San Fernando	371406.00	6969470.00	-0.12
	Plaz. Sierralta	370131.03	6970431.21	-0.03
	Castellón	368298.35	6970408.16	-0.14

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la tabla, los mayores descensos nuevamente se registran en los pozos “Fundo Palermo” y “Alcaparrosa”, los que responden a la lógica de desnivel puesto que los pozos son representativos del sector de extracción para uso minero. Además, el pozo Quebrada Cerrillos, representativo de la quebrada del mismo nombre, también presenta un descenso mayor con respecto a los otros pozos, esto implica que el aporte lateral de la quebrada a la napa subterránea disminuye en condiciones de sequía.

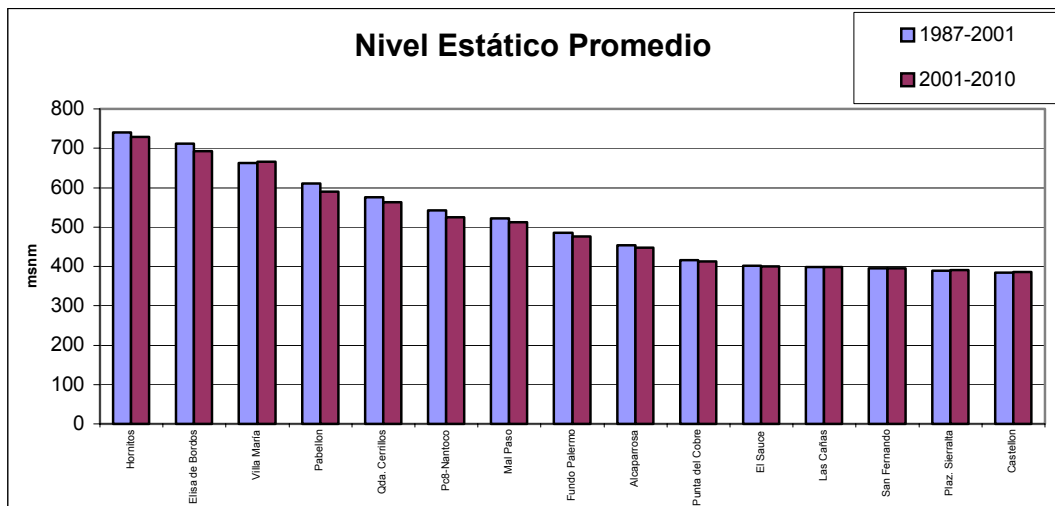
La tabla 6.5 muestra un resumen de los valores obtenidos para los niveles piezométricos esperados en cada pozo de observación en ambos periodos (con y sin proyección).

Tabla 6.5: Niveles Proyectados Esperados en pozos de observación

POZO Nombre	PIEZOMETRÍA Promedio (1987-2001) (msnm)	PIEZOMETRÍA Promedio (2001-2010) (msnm)	DESVIACIÓN ESTANDAR (1987-2001) (m)	DESVIACIÓN ESTANDAR (2001-2010) (m)
Hornitos	740.25	729.32	23.476	0.183
Elisa de Bordos	712.17	692.70	28.567	0.424
Villa María	661.79	665.25	15.486	3.422
Pabellón	610.98	589.80	19.940	6.222
Qda. Cerrillos	575.63	562.08	7.778	7.113
Pc8-Nantoco	541.57	524.21	6.222	6.816
Mal Paso	521.35	512.23	3.394	6.328
Fundo Palermo	486.06	475.91	0.354	16.419
Alcaparrosa	453.54	446.65	5.303	13.781
Punta del Cobre	415.63	412.30	6.859	3.684
El Sauce	401.79	400.72	5.798	0.997
Las Cañas	398.79	399.03	5.162	0.947
San Fernando	395.08	395.46	5.869	0.813
Plaz. Sierralta	388.52	390.60	4.596	0.205
Castellón	383.89	385.32	5.021	0905

Fuente: Elaboración Propia

Figura 6.2: Nivel Piezométrico Medio en Periodos Observado y Proyectado



Al igual que en el escenario anterior, el gráfico no muestra mayores variaciones en los niveles en un periodo futuro. El sector La Puerta – Mal Paso nuevamente es el que presenta mayores descensos alcanzando los 21 metros en el pozo Pabellón siguiéndole el pozo Elisa de Bordos. Se puede decir que un fenómeno de sequía genera el mismo comportamiento en los descensos de los niveles que si se siguiera un patrón tendencial.

Asimismo, las desviaciones estándar para ambos periodos no muestran dispersiones significativas, lo que se verifica en que el mayor coeficiente de variación (desviación estándar/media) toma un valor de 0.04 para el pozo “Elisa de Bordos”.

La tabla 6.6 presenta los volúmenes de agua por unidad de tiempo que están ingresando y saliendo del sistema modelado resultantes del proceso de simulación.

El caudal total en régimen transiente de ingreso al sistema es de 4.049 l/s y el de salida es de 4.704 l/s, lo que implica un desembalse promedio aproximado de 20,65 Mm<sup>3</sup>/año. Asimismo, el caudal de ingreso a la zona acuífera comprendida entre La Puerta y Copiapó asciende a 2.450 l/s y el de salida alcanza los 3.038 l/s, lo que se traduce en un desembalse promedio de 18.55 Mm<sup>3</sup>/año.

Tabla 6.6: Balance de Masa en la Zona Modelada. Escenario en Periodo de Sequía

VARIABLE	CAUDAL ENTRANTE	CAUDAL SALIENTE
<b>Sector I: Embalse Lautaro – La Puerta</b>	(l/s)	(l/s)
Recarga en valle	512.24	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	39.66
Bombeos en valle	0.00	680.84
Condición de Nivel del Emb. Lautaro	979.69	0.00
Recarga en dren	73.01	0.00
Condición de Nivel de Qda. Calquis	34.15	0.00
Dren	0.00	795.87
Evapotranspiración en dren	0.00	22.38
Bombeos en dren	0.00	127.31
<i>Total sector I</i>	<i>1599.09</i>	<i>1666.06</i>
<b>Sector II: La Puerta – Mal Paso</b>		
Recarga en valle	1195.91	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	56.56
Bombeos en valle	0.00	1172.08
Condición de Nivel de Qda. Cerrillos	49.95	0.00
<i>Total sector II</i>	<i>1245.86</i>	<i>1228.64</i>
<b>Sector III: Mal Paso – Copiapó</b>		
Recarga en valle	965.00	0.00
Evapotranspiración en valle	0.00	17.36
Bombeos en valle	0.00	1193.42
Condición de Nivel de Qda. Paipote	239.92	0.00
Dren	0.00	18.00
Evapotranspiración en dren	0.00	3.87
Bombeos en dren	0.00	52.72
Condición de Nivel de salida	0.00	524.85
<i>Total sector III</i>	<i>1204.92</i>	<i>1810.22</i>
<b>Total</b>	<b>4049.87</b>	<b>4704.92</b>

Fuente: Elaboración Propia

El balance para el Escenario con Período de Sequía entrega valores para el caudal de entrada por un total de 4.049,87 l/s y de 4.704,92 l/s como caudal de salida, lo que implica que entre los años 2001 y 2010 el acuífero entregaría sus reservas a un ritmo de 20,65 Mm<sup>3</sup> por año, es decir, por cada año que pase las reservas del acuífero disminuirán en ese volumen. Considerando que las reservas del acuífero en este sector se cuantifican en alrededor de 1.980 Mm<sup>3</sup>, se tiene que las extracciones anuales alcanzarán en promedio el 1.04% de sus reservas actuales. A este ritmo de desembalse el acuífero habrá entregado todas sus reservas al cabo de 95,88 años.

En el área de interés entre La Puerta y la ciudad de Copiapó se tienen valores para el caudal de entrada por un total equivalente a 2.450,78 l/s y de 3.038,86 l/s como caudal de salida, lo que implica desembalse a ritmo de 18,54 Mm<sup>3</sup>/año. En el sector hidrogeológico La Puerta – Mal Paso se produce un embalse promedio de 0,54 Mm<sup>3</sup>/año. Mientras que en el sector Mal Paso – Copiapó se produce un desembalse a ritmo de 19,09 Mm<sup>3</sup>/año.

El valor de desembalse estimado para el área comprendida entre La –Puerta y la ciudad de Copiapó es menor que en el escenario Tendencial y el embalse producido en el sector La Puerta – Mal Paso es mayor al del escenario Tendencial, por lo que se procede a comparar cada variable en ambos escenarios con la finalidad de determinar que factores influyen en estos resultados que aparentemente son ilógicos, ya que al entrar un menor caudal al valle es de esperarse un mayor desembalse.

En la tabla 6.7 se contrastan los caudales de cada variable en ambos escenarios en el sector hidrogeológico La Puerta – Mal Paso.

Tabla 6.7: Caudales Esperados Sector La Puerta – Mal Paso

VARIABLE	ESCENARIO TENDENCIAL (l/s)	ESCENARIO CON SEQUÍA (l/s)
Bombeos en valle	1172.08	1172.08
ETP en valle	66.36	56.56
Recarga en valle	1195.91	1195.91
Cond. Nivel Qda. Cerrillos	51.76	49.95
$\Delta (In - Out)$	$+0.10 \text{ Mm}^3/\text{año}$	$+0.54 \text{ Mm}^3/\text{año}$

Fuente: Elaboración Propia

El caudal entrante esta dado por la recarga y la condición de nivel de la quebrada Cerrillos y el caudal saliente esta dado por los bombeos y la evapotranspiración. En ambos escenarios el caudal bombeado es el mismo debido a la necesidad de riego de la misma cantidad de superficie cultivada, por la misma razón la recarga se mantiene constante.

El flujo subterráneo que entra por la quebrada Cerrillos disminuye, como es de esperarse en un período de sequía, pero sólo lo hace en 1,81 l/s. Esta disminución es ínfima en comparación a los alrededor de 50 l/s que ingresan al sector por la quebrada, esto al parecer es posible debido a la mayor necesidad de agua en el valle, lo que permite aumentar la velocidad del flujo entrante contrarrestando la disminución de la sección de entrada.

Por otro lado, la evapotranspiración disminuye en 9,8 l/s, esto representa una disminución en aproximadamente un 15% con respecto al valor esperado en el escenario Tendencial. Como la evapotranspiración representa la transpiración de las plantas y la evaporación desde el suelo, entonces es posible deducir que la disminución se produce en la variable evaporación, esto debido a que la necesidad de agua de las plantas sigue siendo la misma. Al disminuir los volúmenes de agua superficial en un período de sequía disminuye también la humedad del suelo por lo que la posibilidad de que exista evaporación en dichos lugares es menor.

En la tabla 6.8 se contrastan los caudales de cada variable en ambos escenarios en el sector hidrogeológico Mal Paso – Copiapó.

Tabla 6.8: Caudales Esperados Sector La Puerta – Mal Paso

VARIABLE	ESCENARIO TENDENCIAL (l/s)	ESCENARIO CON SEQUÍA (l/s)
ETP en valle	18.92	17.36
Bombeos en valle	1193.42	1193.42
Dren	29.34	18.00
ETP en dren	5.84	3.87
Bombeos en dren	52.72	52.72
Salida del modelo	535.85	524.85
Recarga en valle	965.00	965.00
Cond. Nivel Qda. Paipote	269.77	239.92
$\Delta (In - Out)$	$-18.96 \text{ Mm}^3/\text{año}$	$-19.09 \text{ Mm}^3/\text{año}$

Fuente: Elaboración Propia

El caudal entrante esta dado por la recarga y la condición de nivel de la quebrada Paipote y el caudal saliente esta dado por los bombeos, la evapotranspiración, el dren y el caudal saliente del modelo. En ambos escenarios el caudal bombeado es el mismo debido a la necesidad de riego de la misma cantidad de superficie cultivada, por la misma razón la recarga se mantiene constante.

El flujo subterráneo que entra por la quebrada Paipote disminuye, como es de esperarse en un período de sequía, en 29,85 l/s. Esta disminución representa alrededor del 11% con respecto al caudal de ingreso en el escenario Tendencial.

Por otro lado, la evapotranspiración tanto en el valle como en el elemento dren, el mismo dren y la condición de salida disminuyen su caudal. Entre el valle y el dren existe una disminución en la evapotranspiración de 3,53 l/s, el dren entrega 11,34 l/s menos al lecho del río y la condición de salida del modelo disminuye en 11 l/s el caudal aportado hacia aguas abajo de la ciudad de Copiapó, esto se traduce en un ahorro de 25,87 l/s que logran equiparar casi por completo el menor flujo entrante por la quebrada Paipote. Este ahorro es posible gracias a que el dren aporta menor caudal al flujo superficial debido a la menor reserva acuífera, esto a su vez provoca menor evaporación, además de entregar menor recurso a la sección acuífera de aguas abajo.



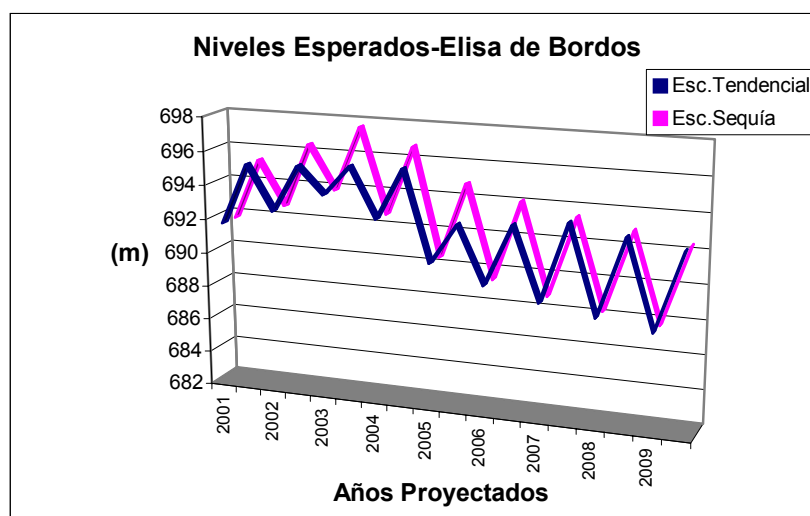
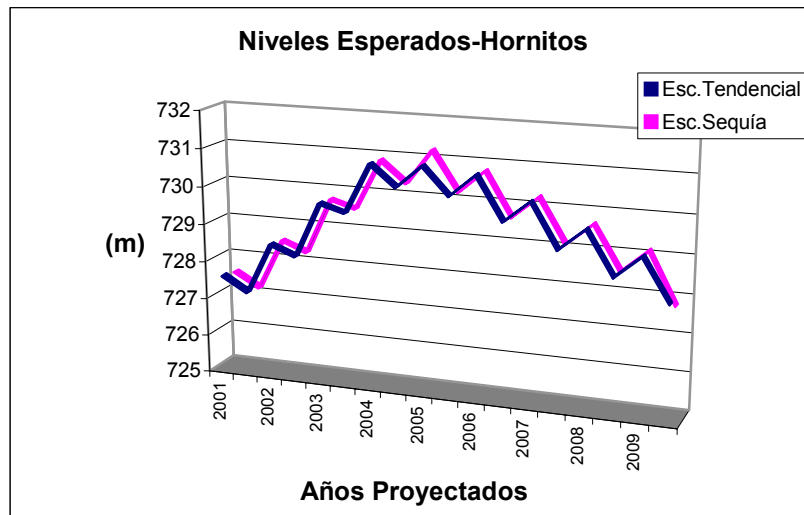
Al parecer, a pesar de que se está en presencia de un desembalse paulatino de esta zona acuífera, la etapa crítica ya quedó atrás al observarse tasas anuales de desembalse menores que las ocurridas en el período 1987 – 2001, incluso el sector denominado La Puerta – Mal Paso muestra signos de una paulatina recuperación de sus reservas.

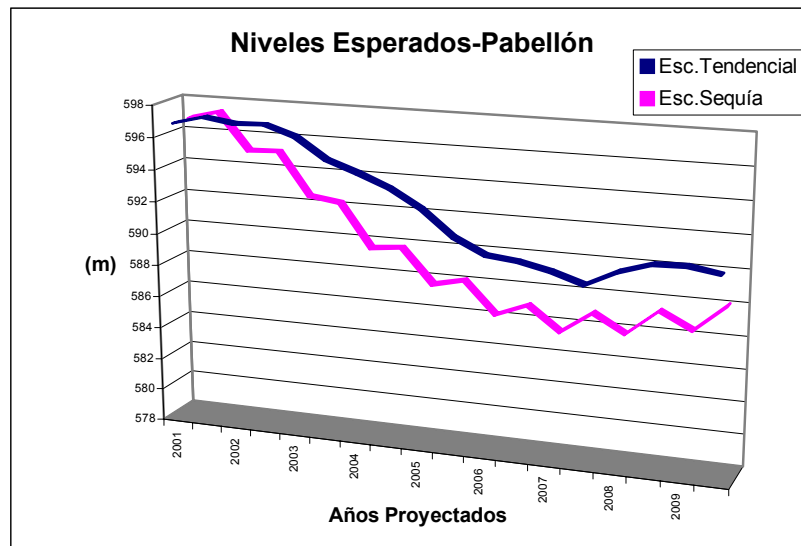
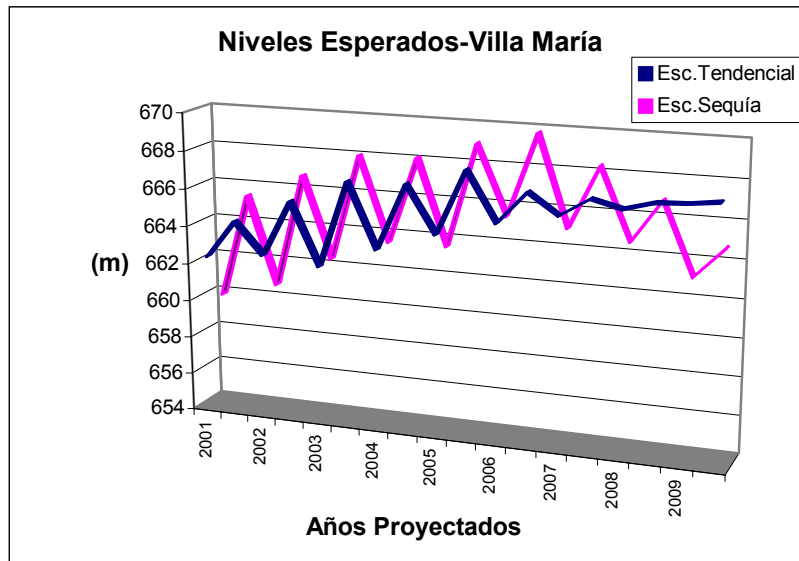
El acuífero muestra una capacidad de autorregulación, es decir, tiende por medio de mecanismos internos a buscar el equilibrio. En otras palabras posee la capacidad, dentro de ciertos límites, de regularse en forma natural.

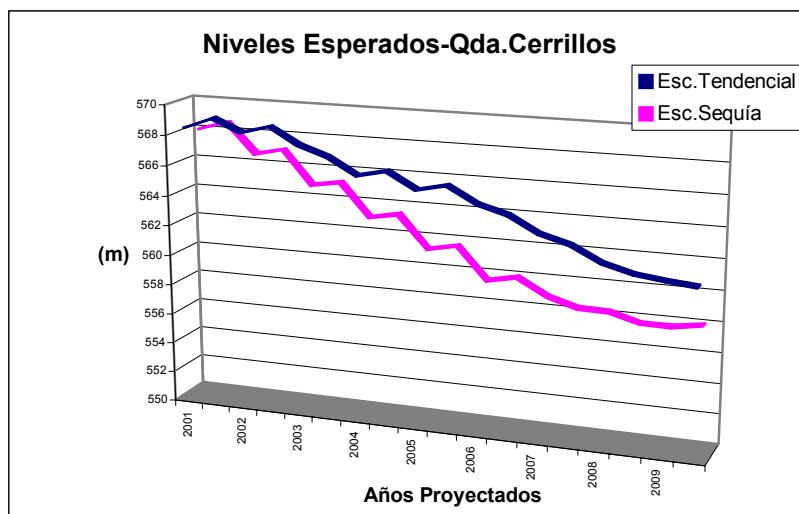
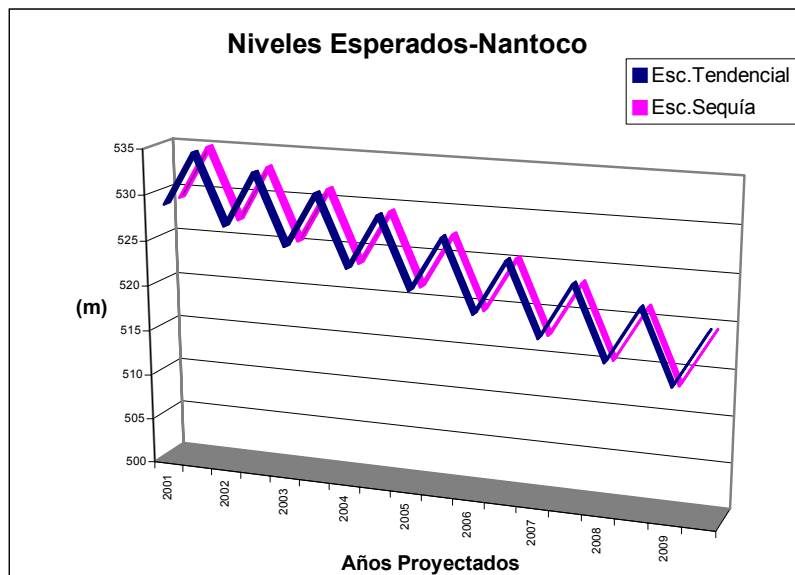
## 6.4 Comparación entre escenarios

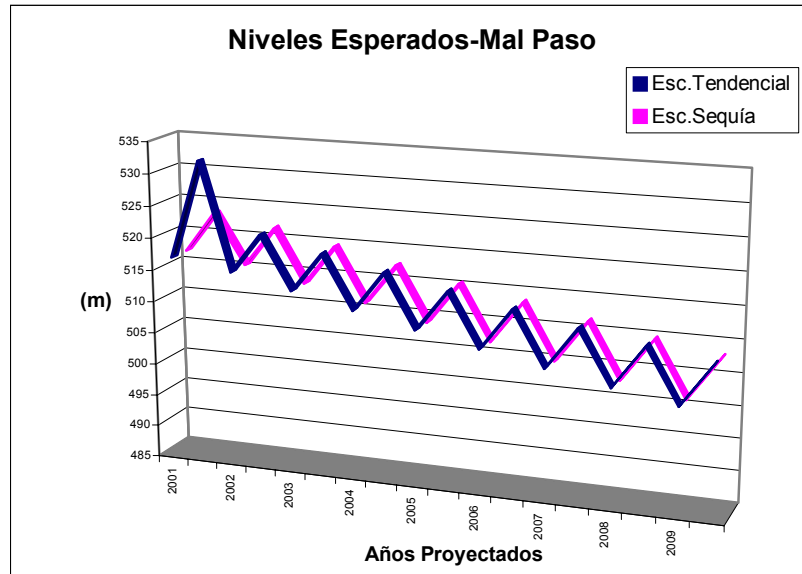
Los resultados que entrega el modelo, en ambos escenarios de proyección, acerca de la variación de los niveles piezométricos por periodos de estrés en los diferentes pozos de observación, se aprecian en las siguientes figuras.

Figura 6.3: Niveles Piezométricos Esperados en los Pozos de Observación. Sector La Puerta-Mal Paso





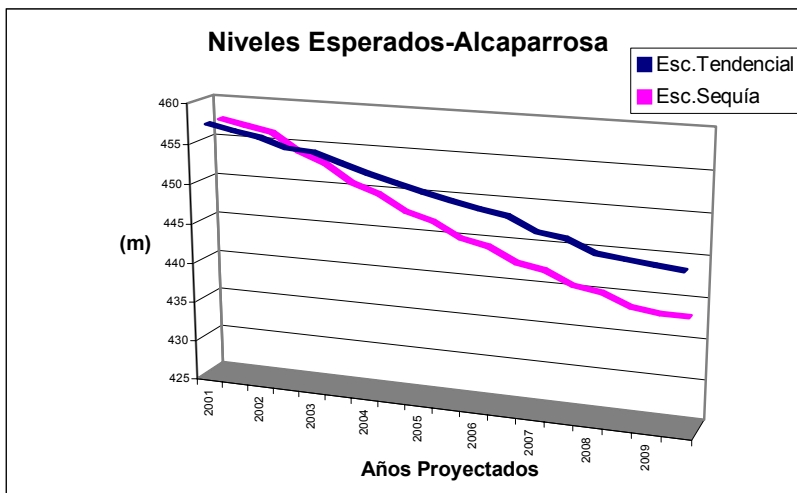
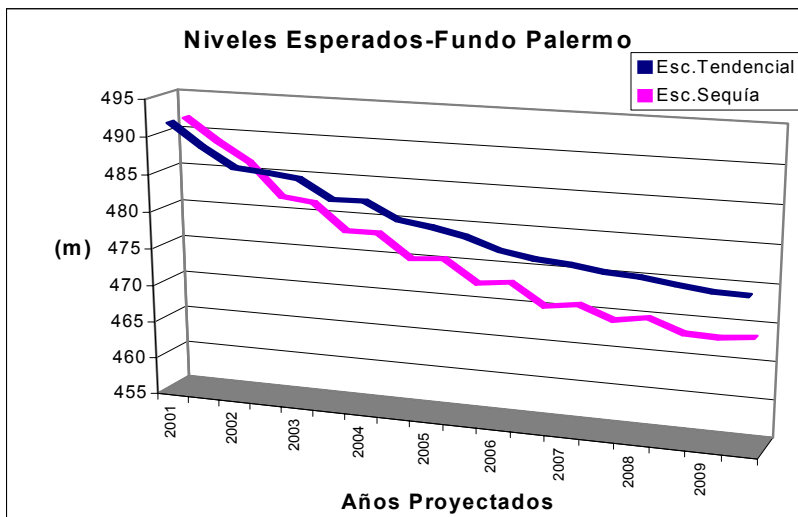


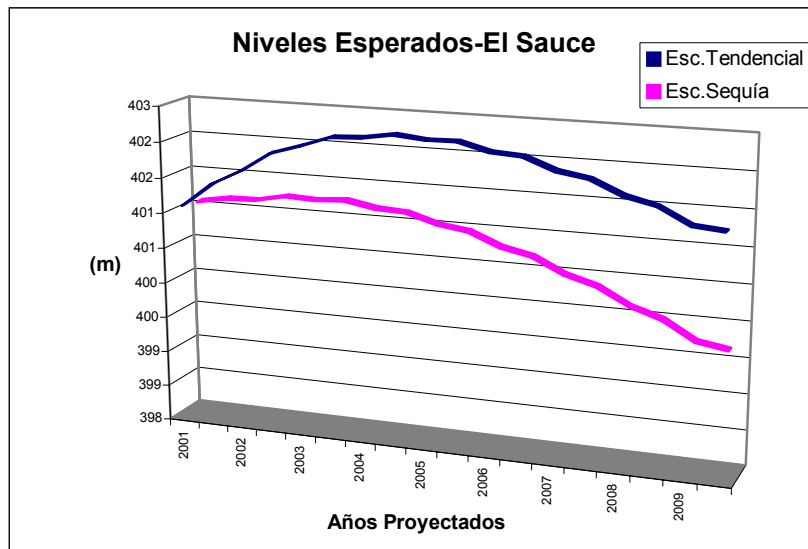
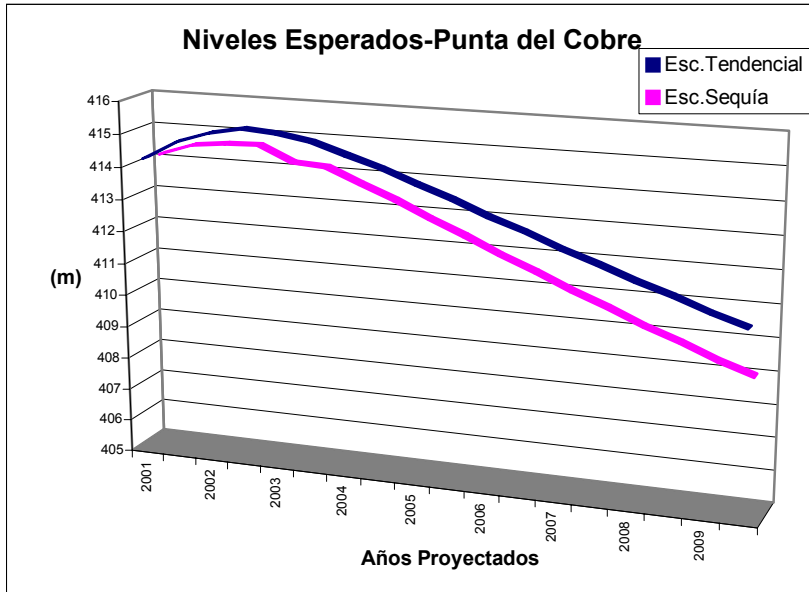


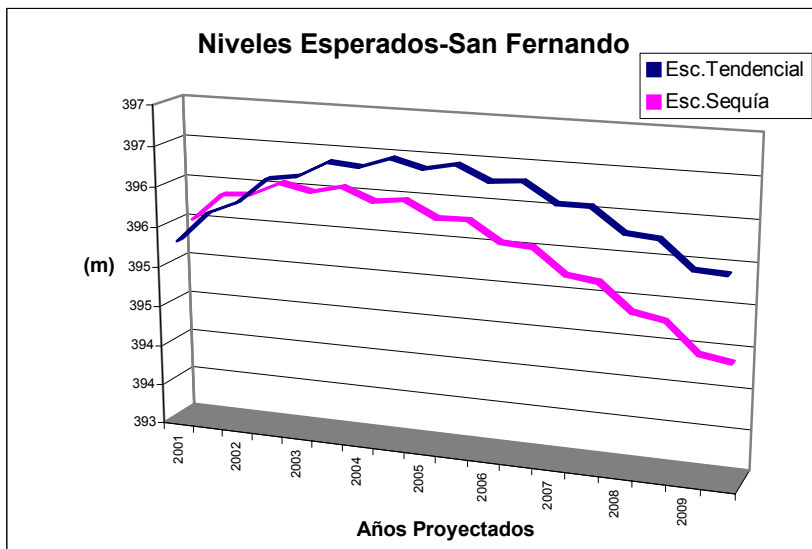
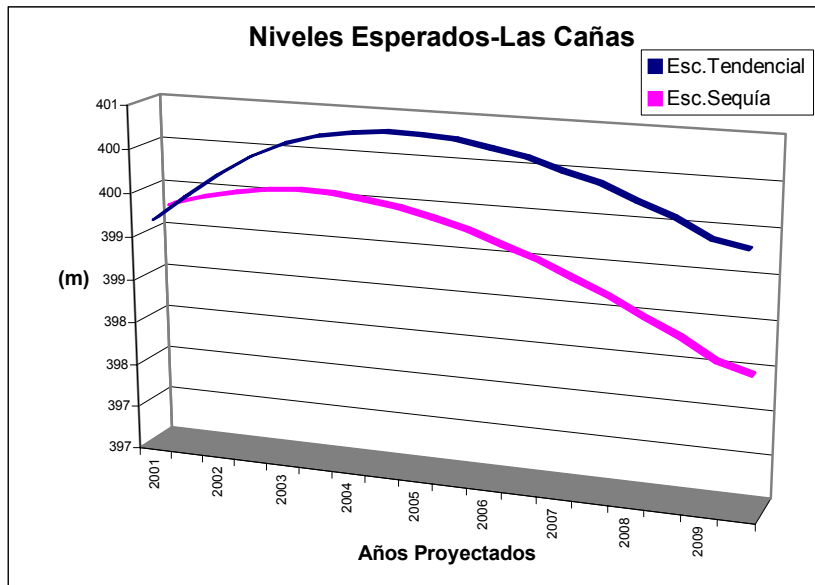
En el sector La Puerta – Mal Paso los niveles piezométricos en ambos escenarios no presentan mayores variaciones. Las excepciones las presentan los pozos “Pabellón” y “Quebrada Cerrillos” que muestran un marcado desfase entre ambos escenarios, con una amplitud máxima de 5 metros en los años 2004 y 2005 para “Pabellón”, y 5 metros en el año 2006 para “Quebrada Cerrillos”, esto se debe principalmente a que ambos pozos se encuentran cercanos a quebradas laterales y cuyos niveles dependen del aporte de éstas, las que a su vez se abastecen principalmente de las precipitaciones.

En general, para el sector La Puerta – Mal Paso el comportamiento de los niveles es bastante semejante, lo que implica que la variable hidrológica como condición mínima, es decir en condiciones de sequía, no es significativa para el modelo y como consecuencia la napa subterránea es capaz de recargarse en el tiempo.

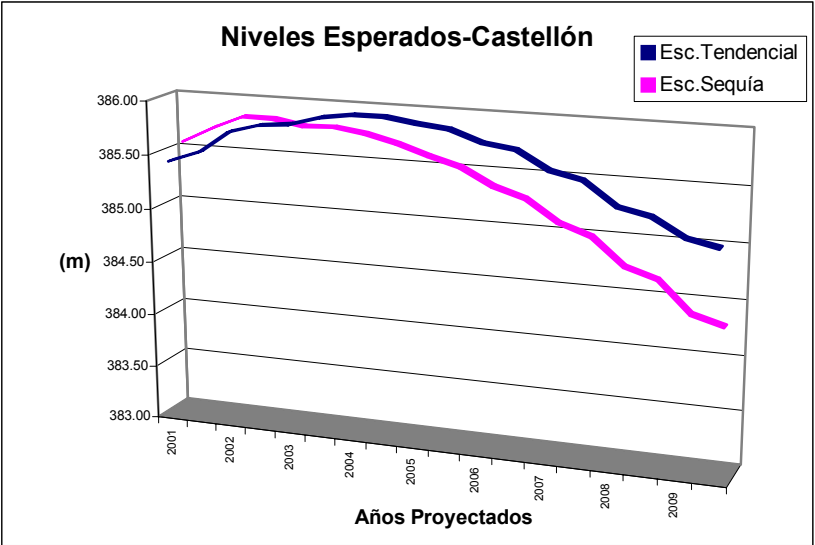
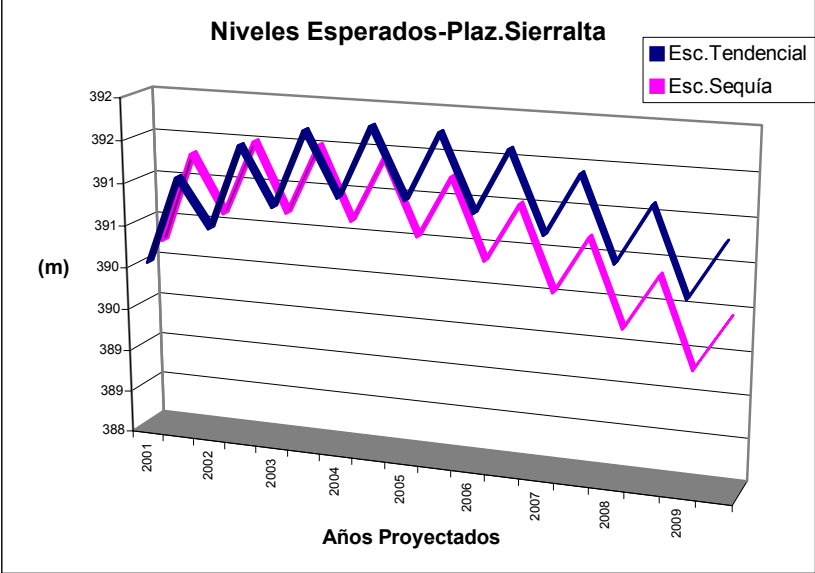
Figura 6.4: Niveles Piezométricos Esperados en Pozos de Observación. Sector Mal Paso-Copiapó











La figura 6.4 muestra que los niveles piezométricos para el sector Mal Paso – Copiapó varían según el escenario. La variación o separación de la tendencia de los niveles se marca entre los años 2001 y 2003, donde se observa que en el escenario de sequía los niveles disminuyen con mayor fuerza que en el escenario tendencial.

La separación entre los niveles piezométricos es creciente, el mayor desfase se presenta en el pozo “Fundo Palermo” y “Alcaparrosa” con valores máximos de 7.34 metros y 6.68 metros respectivamente en el año 2009.

Por otro lado, el único pozo cuyos niveles mantienen un comportamiento similar es “Plazuela Sierralta”, ubicado inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Copiapó, con valores de desfase que no superan el metro.

En resumen, el sector Mal Paso - Copiapó presenta una variación en los niveles dependiendo del escenario que se proyecte. Esto significa que al modificar la variable hidrológica a un valor mínimo como condición en el tiempo, se observa claramente una disminución en los niveles, es decir, la capacidad de abastecer las demandas futuras en este sector se verá influenciada por las condiciones hidrológicas.

## 6.5 Análisis de Factibilidad

La utilización del modelo para predecir el comportamiento del agua subterránea frente a futuros eventos de explotación, entrega resultados que determinan la factibilidad del recurso para un periodo de 10 años.

La capacidad del acuífero de abastecer las demandas futuras, se determinará de acuerdo a las variaciones anuales de niveles. Si el pozo presenta un descenso significativamente mayor a la tasa de descenso medio obtenida en el periodo observado, entonces se determinará el periodo de descenso crítico por medio de la curva niveles observados v/s niveles calculados. Si la variación de niveles no se debe a causas externas, entonces la zona en que se ubica será declarada como **zona crítica**.

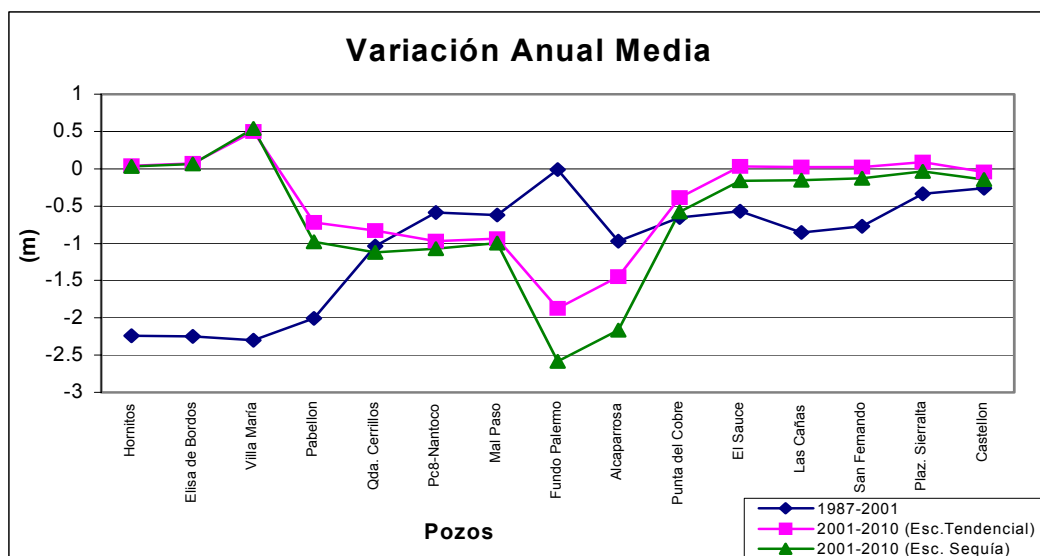
En caso contrario, si el pozo presenta una variación de nivel menor a la tasa de descenso, se calificará como **zona no crítica**. La tabla a continuación presenta las variaciones anuales medias por pozos para el periodo observado y el periodo de proyección en ambos escenarios.

Tabla 6.9: Variación Anual por Pozo

SECTOR	POZO Nombre	ESC.PATRÓN	ESC. TENDENCIAL	ESC. EN SEQUÍA
		Variación Anual Media (1987-2001) (m)	Variación Anual Media (2001-2010) (m)	Variación Anual Media (2001-2010) (m)
La Puerta - Mal Paso	Hornitos	-2.24	+0.04	+0.04
	Elisa de Bordos	-2.25	+0.07	+0.07
	Villa María	-2.30	+0.50	+0.50
	Pabellon	-2.01	-0.72	-0.72
	Qda. Cerrillos	-1.04	-0.83	-0.83
	Pc8-Nantoco	-0.59	-0.97	-0.97
	Mal Paso	-0.62	-0.94	-0.94
Mal Paso - Copiapó	Fundo Palermo	-0.01	-1.87	-1.87
	Alcaparrosa	-0.97	-1.45	-1.45
	Punta del Cobre	-0.65	-0.39	-0.39
	El Sauce	-0.57	+0.03	+0.03
	Las Cañas	-0.85	+0.02	+0.02
	San Fernando	-0.77	+0.02	+0.02
	Plaz. Sierralta	-0.34	+0.09	+0.09
	Castellon	-0.26	-0.04	-0.04

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 6.5: Variación Anual de Niveles**



De acuerdo al criterio los pozos que presentan un descenso en la tasa de variación en ambos escenarios son “Nantoco”, “Mal Paso”, “Fundo Palermo” y “Alcaparrosa”. El resto de los pozos no presentarían desnivel al proyectar las demandas.

La significancia en el desnivel no es muy importante, la amplitud va desde los 0.32 metros en “Mal Paso” a 1.86 metros en “Fundo Palermo” en el escenario tendencial; y 0.078 metros en “Quebrada Cerrillos” a 2.57 metros en “Fundo Palermo” en el escenario en periodo de sequía. Se puede decir que el pozo que presenta un descenso significativamente mayor a la tasa de descenso medio es “Fundo Palermo”. Esto se debe principalmente porque este pozo se encuentra ubicado en un sector representativo de pozos de extracciones para uso minero. Por otro lado, es necesario señalar que la proyección de demanda incorpora 5 pozos adicionales para uso minero, 3 de ellos para cubrir la demanda futura de la ya existente minera Candelaria y el resto para cubrir la demanda del proyecto de extracción de cobre de la Compañía Minera Atacama-Kozan en un sector vecino a la minera Candelaria. El total estimado de bombeo es de 170 l/s.

Por lo tanto, los descensos en los niveles piezométricos en la zona mencionada, específicamente en el pozo “Fundo Palermo” responde a la lógica de desnivel, lo que significa que la zona de Tierra Amarilla, sector donde se ubica el pozo, es zona posible a declarar como **zona crítica**.

## 7. CONCLUSIONES

Del desarrollo y aplicación del presente estudio se obtienen las siguientes conclusiones:

El avance y la multivariabilidad de las actuales técnicas y modelos de simulación hidrogeológicos, como Modflow, constituyen actualmente una fuerte herramienta, para representar el funcionamiento de sistemas hídricos de agua subterránea, y por lo tanto su uso es fundamental para la correcta gestión de recursos donde existen complejas relaciones entre los distintos componentes del ciclo hidrológico.

Los objetivos planteados se lograron satisfactoriamente a medida que se avanzó en el desarrollo del estudio. La recopilación, revisión y evaluación de los antecedentes necesarios para incorporar al modelo y por otro lado para determinar las demandas por uso, permitió elaborar un marco teórico y una metodología base fundamental para alcanzar los objetivos específicos y conjuntamente el objetivo general del trabajo que es determinar la factibilidad de abastecimiento en función de un modelo hidrogeológico.

La metodología es aplicada al valle del río Copiapó con el objetivo de evaluar la factibilidad de abastecimiento del recurso hídrico subterráneo, en función de la demanda. El desarrollo de ésta se basa en los aspectos físicos y económicos de oferta y demanda que rigen el comportamiento del acuífero. De esta manera, aplicar esta metodología permite simular los efectos de futuras demandas de aprovechamientos del recurso.

La simulación se obtiene a través de información que permite construir un modelo conceptual el cual fue implementado en el software Visual Modflow obteniéndose así el modelo matemático, el que permite simular diferentes alternativas de comportamiento del acuífero en función de la demanda. Para este caso las simulaciones se efectuaron suponiendo un comportamiento tendencial del recurso hídrico (oferta) y por otro lado, condiciones de sequía.

Como resultado de las simulaciones en condiciones normales y de sequía se obtienen las siguientes conclusiones:

Los usos que se le da al agua subterránea están relacionados a tres sectores productivos del valle de Copiapó, estos son: agricultura, minería y producción de agua potable. La repartición del total extraído en la actualidad tiene la siguiente forma: riego agrícola 80%, minería 16% y agua potable 4%, donde en el período 1987-2001 las extracciones para riego se incrementaron en un 93.2%, las mineras en un 44% y las de agua potable disminuyeron en un 8%.

Por otro lado, el recurso hídrico subterráneo en el valle de Copiapó acusa un desbalance entre las entradas y las salidas producto de su funcionamiento histórico en el último tiempo, de acuerdo con la tendencia a la baja de los niveles freáticos. En los últimos años las recargas han sido inferiores a las extracciones netas; pero el acuífero opera como un embalse de regulación multianual, con largos períodos de sequía, en los que se desembalsa, para posteriormente rellenarse en las épocas de abundancia de aguas superficiales; así esta situación puede continuar durante varios años más, hasta que se produzcan nuevas avenidas del río Copiapó, época en la cual se volverá a producir el relleno del acuífero por infiltración de estas aguas.

A futuro se prevé la incorporación de nuevos puntos de captación de aguas subterráneas, las que en un plazo de 10 años harán aumentar el caudal extraído para riego en 318 l/s, para agua potable en 131 l/s y para minería en 170 l/s, siendo estos últimos los que pueden provocar mayor desequilibrio al ubicarse en un sector de gran demanda minera.

El sector que puede verse más afectado por la baja de los niveles piezométricos, es sin duda Tierra Amarilla, lugar donde se concentra la mayoría de las extracciones para la minería.

Con respecto a la factibilidad de abastecimiento futuro del recurso hídrico subterráneo, se puede concluir en forma general que:

La factibilidad de que el acuífero sea capaz de satisfacer las demandas en el tiempo, es posible independientemente del escenario en que esto ocurra, debido a que el acuífero por un lado muestra signos de recuperación de niveles en el sector comprendido entre La Puerta y Villa María y por otro lado, posee mecanismos de autocompensación que le permiten mitigar en parte los desbalances. Todo esto es posible en el corto plazo y quizás hasta en un mediano plazo, ya que las reservas acuíferas en el peor de los casos alcanzan para poco más de 95 años, esto sin períodos de abundancia de aguas superficiales.

Sin embargo, si bien el acuífero del valle del río Copiapó, es y será capaz de satisfacer la demanda hídrica generada en la zona, se requiere de una buena planificación y gestión de aprovechamiento para lograr una eficiente localización de nuevos puntos de extracción del recurso hídrico subterráneo con el fin de mitigar los descensos de los niveles freáticos, evitando de esta forma estancamiento o pérdidas a las actividades económicas desarrolladas en la zona.

Finalmente, se concluye que el recurso hídrico subterráneo en el valle del río Copiapó no es un recurso escaso a corto plazo, por lo tanto la **hipótesis planteada “el recurso hídrico subterráneo en el valle del río Copiapó no sería un recurso escaso a corto plazo (periodo de 6 a 10 años), considerando las proyecciones de demandas y el balance hídrico transiente del acuífero”, según los resultados se considera como válida.**

En lo referente a las desventajas de la metodología utilizada en este trabajo, se concluye lo siguiente:

En la actualidad, no se realizan mediciones sistemáticas con fines de planificación respecto del uso y el consumo del agua por sectores. La falta de esta información ha obstaculizado el uso de métodos más perfeccionados para estimar las necesidades futuras. Cuando se han hecho proyecciones, éstas no se han basado en normas uniformes ni en metodologías comparables.

**Se recomienda**, a fin de proyectar las futuras necesidades de agua es conveniente disponer de datos sobre el uso, el consumo y la calidad por tipo de usuario, y también disponer de la información necesaria para estimar el efecto de la aplicación de diferentes instrumentos de política (tarifas, impuestos, etc.) para ejercer influencia sobre los diversos sectores de demanda. La demanda de agua para diferentes propósitos debe ser estimada en diferentes períodos de tiempo de conformidad con los objetivos de desarrollo nacional para suministrar la base y la perspectiva para el desarrollo planificado de los recursos disponibles de agua.

Asimismo, se recomienda que los órganos nacionales encargados de la ordenación de los recursos hídricos consideren a la conservación como una política explícita, teniendo presente los cambios en la demanda e incorporen conceptos como “índices de riesgos”.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

Eduardo Varas C. – Patricio Ferrer A., Programa de Cursos de Especialización en Ingeniería Universidad Católica (1972) “Métodos Estadísticos en Hidrología”

Domingo Queirolo Díaz – DGA, Diciembre (1977) “Tasa de Riego de Uso Racional y Beneficioso y Rol de regantes del valle de Copiapó”.

Agua Ingenieros Consultores Ltda. (1979) “Hidrogeología del Copiapó desde La Puerta hasta Angostura”, Plan Maestro Valle del río Copiapó, Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas.

Custodio E & Llamas, M.R. (1983) “Hidrología Subterránea” (2 tomos).

Álamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda., SENDOS (1986) “Estudio Hidrogeológico del Valle de Copiapó, Sector Nantoco-Copiapó”.

Álamos y Peralta Ing. Consultores Ltda. (1987) “Análisis y Evaluación de los Recursos Hidrogeológicos. Valle del río Copiapó – III Región”.

DGA-IPLA (1994) “Análisis, Uso Actual y Futuro de los Recursos Hídricos de Chile”.

Álamos y Peralta Ing. Consultores Ltda. (1995) “Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos en el Valle del río Copiapó – III Región”.

Humberto Peña Torrealba, Director General de Aguas (Octubre 1997) “Modificaciones al Código de Aguas y su Aporte a la Gestión del Agua”.

Ingendesa con la Asesoría de AC Ingenieros Consultores Ltda. (Marzo 1998) “Modelo de Simulación Hidrogeológico. Valle del río Aconcagua”.

Guillermo Donoso, Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Pontificia Universidad Católica (1998) “El Mercado de Derechos de Aprovechamiento de Agua en Chile”

Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN (1999) “Estudio Hidrogeológico del Valle del Río Copiapó, Segmento Embalse Lautaro – Piedra Colgada, Región de Atacama”.

Departamento de Hidrología, DGA-MOP (2000) “Pronóstico de Disponibilidad de Agua, Temporada de Riego 2000-2001”.

Humberto Peña Torrealba, Director General de Aguas (Septiembre 2001) “Uso Sustentable de los Recursos Hídricos en Chile, Ventajas y Limitaciones del Sistema Institucional Vigente”.

Gastón Sagredo Tapia, Memoria Universidad de Santiago (2001) “Metodología de Manejo y Gestión del Agua Subterránea en Cuencas Hidrográficas”.

F.Javier Sánchez San Román, Departamento de Geología (2001) “Hidráulica Subterránea: Principios Básicos, Conceptos Fundamentales y El Ciclo Hidrológico”.

Sofía Rebolledo, Departamento de Geología Universidad de Chile (2001) “Curso de Recursos Hídricos”.

Carlos Espinoza, Departamento de Hidráulica Universidad de Chile (2001) “Curso de Hidráulica Subterránea y su Aprovechamiento”.

G. Castany, “Prospección y Explotación de las Aguas Subterráneas”.

J.L. Pulido Carrillo, “Hidrogeología Práctica”.

José F. Muñoz, Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile “Modelos de Simulación Hidrogeológica para la Gestión de Acuíferos”.

# **ANEXOS**

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Estratigrafía General del Valle del río Copiapó.....	1
Canales Sector “Embalse Lautaro-La Puerta”.....	2
Canales Sector “La Puerta-Mal Paso”.....	3
Canales Sector “Mal Paso-Copiapó”.....	4
Catastro de Pozos y Norias Valle Copiapó.....	5
Balance Sector “Embalse Lautaro-La Puerta”.....	10
Balance Sector “La Puerta-Mal Paso”.....	11
Balance Sector “Mal Paso-Copiapó”.....	12
Pérdidas de Agua Potable Sector “Mal Paso-Copiapó”.....	13
Niveles Calculados y Observados en Pozos de Control.....	14
Resultado del Escenario Proyectado con Período Tendencial.....	17
Resultado del Escenario Proyectado con Período de Sequía.....	18

Estratigrafía General del valle del río Copiapó (Angostura-Emb.Lautaro)

Sector	Pozo	Ubicación (Km)	Cota (m)	Fondo (m)	Estr 1 grueso	Estr 2 fino	Estr 3 grueso	Estr 4 fino	Estr 5 grueso
Copiapó-Mal Paso	A-8	55.7	428	384	384				
Copiapó-Mal Paso	A-17	56.8	433	385.5	385.5				
Copiapó-Mal Paso	C-3	59.2	439	269.4	303.5	293	269.4		
Copiapó-Mal Paso	C-12	61.6	462	411.5	411.5				
Copiapó-Mal Paso	C-4	65.7	500	464	467.2	464			
Copiapó-Mal Paso	A-12	67.8	573	532.8	538.85				
Mal Paso-La Puerta	A-3	69.8	528	475	475				
Mal Paso-La Puerta	A-7	74.9	592.7	509.7	586.7	580.7	509.7		
Mal Paso-La Puerta	D-14	76.7	598.1	518.1	541.3	535.1	518.1		
Mal Paso-La Puerta	D-12	78.1	603.7	533.7	533.7				
Mal Paso-La Puerta	D-4	81.5	636.7	542.7	570.7	568.4	553.7	542.7	
Mal Paso-La Puerta	D-8	85.7	681	601	620	616	611	605	601
Mal Paso-La Puerta	B-14	88.7	709.6	634.6	658.6	634.6			
Mal Paso-La Puerta	B-10	91.5	731.8	656.8	664.45	656.8			
Mal Paso-La Puerta	B-1	93.7	750	668.5	668.5				
Mal Paso-La Puerta	B-12	96.5	778	697.8	706	701	697.8		
La Puerta-Embalse Lautaro	C-4	110.5	880	804.7	870.7	844	837	817	804.7
La Puerta-Embalse Lautaro	A-2	114.3	956.4	885.4	956.4	901.4	897.4	885.4	
La Puerta-Embalse Lautaro	B-7	119.8	962.5	896.5	962.5	944.85	896.5		
La Puerta-Embalse Lautaro	D-3	129.6	1025	1085	1074	1025			
La Puerta-Embalse Lautaro	D-8	131.8	1110	1050.5					

Canales que nacen en el sector N° 1 “Embalse Lautaro-La Puerta”

DISTRITO	CANAL	RIBERA	ACCIONES	TIEMPO RIEGO		BOCATOMA	
				Hrs.	Min.	Estado	Caudal(l/s)
1	Punta Negra	Izq.	34.50	5	45	Oper.	40
	Amolanitas	Der.	7.00	1	10	Oper.	40
	Amolanas	Der.	154.50	25	45	Oper.	200
	Goyo Díaz	Der.	140.00	23	20	C/B	250
	Hij. Abello Norte 1	Der.	226.80	37	48	N/O <sup>1</sup>	400
	Hij. Abello Sur 2	Izq.	61.20	10	12	Oper.	100
	TOTAL		624.00	104	0	Oper.	
2	La Capilla	Der.	432.00	72	0	Oper.	300
	El Carmen	Izq.	144.00	24	0	Oper.	600
	Palo Blanco	Izq.	144.00	24	0	D S/B	200
	TOTAL		720.00	120	0		
3	Santa Rosa	Der.	108.00	18	0	D S/B	80
	Los Loros	Der.	144.00	24	0	D S/B	80
	Apacheta	Der.	108.00	18	0	Oper.	100
	Bolsico	Izq.	57.60	9	36	D S/B	80
	El Fuerte	Izq.	86.40	14	24	Oper.	80
	La Puerta 1 Sur	Izq.	32.40	5	24	Oper.	100
	La Puerta 2 Norte	Der.	21.60	3	36	Oper.	80
TOTAL		558.00	93	0			
TOTAL			1902.00				

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

<sup>1</sup> C/B N/O: Con Bocatoma pero no operando

Canales que nacen en el sector N° 2 “La Puerta-Mal Paso”

DISTRITO	CANAL	RIBERA	ACCIONES	TIEMPO RIEGO		BOCATOMA	
				Hrs.	Min.	Estado	Caudal(l/s)
3	La Pirca 1	Izq.	23.20	3	52	Oper.	100
	La Pirca 2	Izq.	91.20	15	12	Oper.	100
	Casablanca 1	Izq.	38.10	6	21	Oper.	100
	Casablanca 2	Izq.	9.50	1	35	Oper.	100
	TOTAL		162.00	27	0		
4	El Naranjo	Der.	42.00	7	0	Oper.	120
	La Cantera	Der.	187.00	31	10	C/B N/O	120
	El Sauce	Izq.	30.00	5	0	Oper.	60
	El Jardín	Izq.	180.00	30	0	Oper.	150
	Carrizo	Izq.	281.00	46	50	Oper.	400
	TOTAL		720.00	120	0		
5	Compuert. Negras	Der.	1296.00	216	0	Oper.	1200
	Niágara	Der.	144.00	24	0	D S/B	80
	TOTAL		1440.00	240	0		
6	Cerrillos	Der.	318.00	53	0	Oper.	500
	Nantoco	Der.	540.00	90	0	Oper.	500
	Urbina	Izq.	294.00	49	0	Oper.	180
	Compañía	Izq.	72.00	12	0	Oper.	200
	Las Arayas	Izq.	108.00	18	0	Oper.	200
	TOTAL		1332.00	222	0		
TOTAL			3654.00				

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995

Canales que nacen en el sector N° 3 “Mal Paso-Copiapó”

DISTRITO	CANAL	RIBERA	ACCIONES	TIEMPO RIEGO		BOCATOMA	
				Hrs.	Min.	Estado	Caudal(l/s)
6	San Román	Izq.	108.00	18	0	Oper.	80
	TOTAL		108.00	18	0		
7	Las Rojas	Izq.	288.00	48	0	Oper.	200
	Los Paltos	Izq.	10.10	1	41	Oper.	80
	Escorial	Izq.	108.00	18	0	Oper.	200
	Palermo	Izq.	238.80	39	48	Oper.	200
	Pedregal	Izq.	130.70	21	47	Oper.	200
	Bellavista	Izq.	262.50	43	45	Oper.	200
	Terawaki	Izq.	144.00	24	0	Oper.	200
	Zavala	Izq.	219.90	36	39	Oper.	200
	Alto Meléndez	Izq.	38.00	6	20	Oper.	100
	Buitrón	Izq.	120.00	20	0	Oper.	300
	La Florida	Izq.	240.00	40	0	Oper.	500
	TOTAL		1800.00	300	0		
8	Punta Negra	Der.	468.00	78	0	Oper.	1500
	Viñitas	Izq.	468.00	78	0	Oper.	1000
	San Fernando	Der.	1404.00	234	0	C/B N/O	1000
	TOTAL		2340.00	390	0		
9	Ciudad de Copiapó	Der.	900.00	150	0	D S/B	180
	TOTAL		900.00	150	0		
TOTAL			5148.00				

Fuente: DGA-Álamos y Peralta, 1995



CATASTRO DE POZOS Y NORIAS VALLE DE COPIAPÓ - MODELO COPIAPÓ

POZO N°	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	PROF. (m) PERFOR.	NIVELES		m3/día verano	m3/día invierno
	NORTE	ESTE			ESTÁTICO	DINÁMICO		
46	6905079	401680	1125		2.09		0	0
47	6905317	401780	1120				160.21978	73.7704918
48	6905549	401265	1115	48	6.45		469.978022	62.3213115
49	6905675	401224	1115		3.61		0	0
50	6905762	401302	1115	60	20		3928.76703	1839.83607
51	6907192	401003	1105	60	5.38		2365.71429	1622.4
52	6910412	400691	1105	100	26.86		5080.74725	3456
53	6907337	400427	1095	17	2		94.9450549	64.9180328
54	6910575	400538	1095	90	21.36		6209.8022	4224
55	6910260	400569	1095	90	20.87		2078.50549	1008
56	6907674	400828	1095	55			3247.12088	1189.77049
57	6906237	401013	1092	70		6.74	4968	1968.78689
58	6910222	400757	1090	200		31.91	6473.35385	5234.99016
59	6907605	401265	1090	60		7.49	8070.32967	2006.55738
60	6910453	400283	1090		14.71		0	0
61	6906595	401100	1089	70	9.55		1152	645.245902
62	6908017	401024	1089	70	-0.1		0	0
63	6907921	400742	1080	65	6.83		3302.9011	678.688525
64	6908503	401206	1077	68	3.55		4198.94505	4176
65	6909526	400562	1074	70	6.94		0	0
66	6909913	399924	1060				0	0
67	6911806	399695	1040	65	3.54		2489.14286	1242.88525
68	6912870	398245	1038	40	21.04		0	0
69	6911114	399892	1035			3.2	335.868132	180
70	6913170	398429	1034	70		16.81	868.747253	861.639344
71	6912933	398205	1026	50	19.72		0	0
72	6915034	397868	1023	100	15.26		5790.16484	2430
73	6913659	398269	1022	45	16.1		0	0
74	6913458	398365	1022	60	16.38		242.10989	240.786885
75	6914373	398111	1020	60	17.61		282.461538	280.918033
76	6916109	396448	1020				0	0
77	6913766	398115	1018	60	15.47	17.22	6907.60879	7208.73443
78	6916072	396412	1010			33.05	1760.04396	1584
79	6915622	397201	1009		12.85		502.021978	221.901639
80	6915370	396875	1008			9.8	5104.12747	4593.6
81	6915429	396429	1008		8.26		0	0
82	6915377	397676	1006	45		22.91	3088.08791	1296
83	6917083	394748	987	80	8	14	2864.76923	2044.91803
84	6918060	393954	979	120	2.25		4397.14286	1106.55738
85	6918830	393110	975	66	10.96		1872	928.327869
86	6917656	394130	971	20			0	0
87	6921363	391252	955	42	22.5	25.13	248.4	248.4
88	6921309	391342	955	42	16.12		21.6	21.6
89	6920403	392412	954	71	10.75		1296	247.868852
90	6920842	392460	951	41	12	14.19	735.428571	165.245902
91	6920766	391878	950	50	9.03		347.142857	303.344262
92	6920745	392219	950	70	10.04		0	0
93	6921166	391392	950	40		16.86	457.16044	129.6
94	6920072	392594	943	79		13.23	3402	650.655738
95	6920986	390936	938	70	0.7		1028.49231	739.47541
96	6921489	390996	905	27		14.78	1186.81319	417.04918
97	6921559	390820	901	50		18.67	1091.86813	354.098361
98	6920913	390520	899	33	9.8		683.604396	127.47541
99	6921550	389790	889				0	0
100	6921589	389872	892				0	0



POZO N°	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	PROF.(m) PERFOR.	NIVELES		m3/día verano	m3/día invierno
	NORTE	ESTE			ESTÁTICO	DINÁMICO		
101	6921921	389532	898	60		16.3	1194.72527	354.098361
102	6923770	389027	828			0.5	5223.46154	4590
103	6924332	388361	826	52	27.3		59.8153846	59.4885246
104	6924900	387140	824	100	38.57		783.296703	141.639344
105	6926939	386253	805	80	46.12		1424.17582	368.852459
106	6926500	386800	803	100	45.59		1566.59341	405.737705
107	6927896	385820	802	99		45.62	883.384615	413.114754
108	6928296	385432	795	74		63.67	2276.30769	2139.93443
109	6928068	385306	874	60	42.2		191.907692	105.757377
110	6928926	384334	749	118	41.75		0	0
111	6929016	384566	749	100		78	627.428571	281.311475
112			726		71.29		0	0
113	6929539	384102	760	100		75.83	683.604396	771.934426
114	6931952	382273	724	90			7608.95604	6549.34426
115	6931319	382725	730				2977.41758	2562.78689
116	6930992	382867	727		64.98		5293.18681	4556.06557
117	6930723	383416	740	75	28.2		2977.41758	2562.78689
118	6932921	382485	719	90		59	2315.76923	1993.27869
119	6932705	382528	744	90	58.2		3639.06593	3132.29508
120	6930713	383612	760	100	65	73	1183.96484	513.442623
121	6929648	384448	770	127	75.15		1375.51648	0
122	6932369	382686	730	96	60.27		2074.54945	0
123	6932643	383004	740	100	66.6		6048	1487.21311
124	6933174	382400	725	70			1068.13187	637.377049
125	6933339	382513	721	96	55.24		1068.13187	637.377049
126	6933778	382698	740	96	53.45	61.6	0	0
127	6933555	382436	731	80		55.3	0	0
128	6933711	382380	731	80		53.3	0	0
129			719		52.24		0	0
130	6935600	381600	710	69	52.4		502.021978	266.281967
131	6935290	381544	710	105		53	3459.56044	1298.36066
132	6935520	380900	685	120			2700.87033	1177.18033
133	6935418	380732	685	75	47.49		598.153846	178.465574
134	6936807	380547	665	87	65.23		0	0
135	6936532	379516	690	120	50.03		2926.20659	89.6262295
136	6936595	379498	670	130		68	4539.7978	827.17377
137	6936618	380331	647	120	62		797.538462	4329.44262
138	6937465	378785	668	100	66	71	1393.91209	823.278689
139			668		62.12		0	0
140	6937210	379428	657	120	59.4		2666.76923	743.606557
141	6938500	378950	646		70.62	71.2	1938.46154	94.4262295
142	6938769	378987	650	120	77	79.8	1740.16484	115.377049
143	6939038	379076	638	97			1361.86813	90.295082
144	6939699	378844	639	100		77.4	1561.84615	550.819672
145	6940402	378517	621	105		56.57	1784.96703	629.508197
146	6941245	378520	600	86	57	59.03	465.230769	165.245902
147			598		54.12		0	0
148	6941920	378601	610	90			970.813187	14.1639344
149	6943062	378977	601	100	53.79		0	0
150	6943684	378777	695	70		46.36	1303.91209	288
151	6944687	378159	590	100			0	0
152	6945214	377608	578	80	47.33		1153.58242	0
153	6944179	378317	599	94	53.36	54.79	1654.41758	200.655738
154	6945530	376812	565	84	45.3		3807.61319	450.413115
155	6938715	378838	551	80.43	42.6	45.75	4597.87253	543.895082
156	6946039	376994	546	80	39.31		3448.16703	68.9311475
157	6946539	376437	546	90	32.9		284.835165	66.8852459



POZO N°	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	PROF.(m) PERFOR.	NIVELES		m3/día verano	m3/día invierno
	NORTE	ESTE			ESTÁTICO	DINÁMICO		
158	6947185	376730	551	70		34.48	4343.73626	1728
159	6947401	376756	546	60		33.98	4343.73626	1728
160	6947993	377026	540	80		33.08	5582.76923	3540.98361
161	6948224	377036	540	70	28	29.47	4202.9011	2102.55738
162	6948349	377052	550	70	23.63		303.824176	151.081967
163	6950059	377216	570	100	40.4		3602.57143	1519.08197
164	6950100	376108	554	107	24.05		4433.93407	1869.63934
165	6950237	376084	547	100		21.8	4433.93407	1869.63934
166	6950098	376461	540	49	31.8		0	0
167	6949923	376308	539	72			3240	3240
168	6949712	376881	545	65.5	33.1	39.3	3600	3600
169	6950972	375587	510	25			37.978022	9.44262295
170	6952426	374789	534	60	17.18		5127.03297	2974.42623
171	6952397	374697	526	55	13.72		4785.23077	2776.13115
172	6953402	374662	508	60	11.55		4785.23077	3767.60656
173	6952522	374751	519	45		17.93	3888	2549.5082
174	6953362	374457	519	100		13.63	4842.1978	963.147541
175	6952949	374526	529	100	11.15		4842.1978	963.147541
176	6951595	375288	546	60	19.02		4101.62637	2379.54098
177	6954019	374730	540	19.8	12.76		1296	31.8688525
178	6952633	375166	527	21	16.78		34.1802198	11.3311475
179	6952258	374900	530	48	17.16		22.9824	22.9824
180	6951699	375515	523	35	18	21.1	627.527473	110.95082
181	6951420	375501	535		17.63		0	0
182	6951390	374733	539				3.56043956	1.18032787
183	6952796	374980	539	14			0	0
184	6952804	375033	540				0	0
185	6955955	375285	500	50			0	0
186	6955775	375278	500	100		22.95	1080	1080
187	6955898	375287	500	50		21.6	1080	1080
188	6955706	375140	500			20.72	1080	1080
189	6955920	375275	500	100		23.38	1080	177.04918
190	6952928	374784	540	23	15.96		0	0
191	6954550	374981	540	38	11.16		4187.07692	297.442623
192	6954397	375007	541	9			0	0
193	6954262	374718	544	50	12	15	1438.2	339.786885
194	6955574	375093	539	60		12.91	3788.30769	867.540984
195	6955117	374810	541	60	9		0	0
196	6955383	375114	538	11.5	11.2		296.228571	0
197					11.04		0	0
198	6955838	375339	537	50	26		226.285714	148.327869
199	6957050	375204	526	40	27		0	0
200	6971250	368219	400	60		16.75	922.0036	810.2909
201	6971291	368229	400	60	10.07		1613.50635	1418.009
202	6971222	368222	400		11.89		1613.50635	1418.009
203	6968909	371045	420			28.34	1832.8825	1524.36275
204	6968849	370940	420			27.62	1832.8825	1524.36275
205	6968854	371105	419			28.64	1832.8825	1524.36275
206	6968785	371048	421			27.71	1832.8825	1524.36275
207	6970479	370394	406			25.21	6635.82857	4450.38674
208	6970526	370410	406			20.34	6635.82857	4450.38674
209	6970563	370364	406			21.18	6635.82857	4450.38674
210	6970494	370289	406			22.09	6635.82857	4450.38674
211	6970441	370325	406		19.53		6635.82857	4450.38674
212	6973261	368750	385	60	4.57		0	0
213	6968875	371659	445				0	0
214	6970384	369875	403	54	13.17		747.692308	743.606557



POZO N°	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	PROF.(m) PERFOR.	NIVELES		m3/día verano	m3/día invierno
	NORTE	ESTE			ESTÁTICO	DINÁMICO		
215	6970284	370902	412	32			2030.4	2030.4
216	6968730	371177	430	42	27.95		0	0
217	6969402	371686	440		30.32		0	0
218	6970968	368918	418	13	11.28		51.84	51.84
219	6971015	368869	416	13	10.38		25.92	25.92
220	6968757	371656	443	40		31.4	670.945055	479.213115
221	6968533	373181	440		38.7		0	0
222	6968223	370509	440	50	22.62		0	0
223	6968893	372578	437	50	36.15		1784.96703	1386.88525
224	6967921	372027	420	120	33.8		9936	9936
225	6974579	366362	358				0	0
226	6973535	366795	372	60			66.4615385	66.0983607
227	6972940	366847	382	35			0	0
228	6972817	367309	375	24	17.35		7.12087912	7.08196721
229	6972340	367733	380	55			74.3736264	73.9672131
230	6970428	368228	398	26			119.630769	84.9836066
231	6970110	368693	402		25		11.8681319	11.8032787
232	6970095	369306	410	45			864	864
233	6969293	369886	420	60			1661.53846	1652.45902
234	6971557	368221	400	26			36	36
235	6972022	368176	392				0	0
236	6971641	368225					0	0
237	6967626	372900	450				0	0
238	6968339	372478	450		38.72		0	0
239	6968354	371996	440	50	33		56.967033	0
240	6967869	370959	435		27.98		0	0
241	6968900	371020					0	0
242	6968031	371394	440	65			0	0
243	6968319	371830	440	70	33.74		250.892308	0
244	6969014	371295	430	36.5	29.57		18.989011	18.8852459
245	6969235	370913	430	56	21		0	0
246	6969288	370436	425	50			540	540
247	6971733	369910	420	70	9.3		57.6	57.6
391	6959487	374325	477	50	-	37.6	864	864
392	6959383	374311	478	65	34 - 35	34.08	0	0
393	6959206	375867	481	65	35.12		288	288
394	6959300	375970	495		35		0	0
395	6960850	374561	480.87	100	32.8		4435.2	4032
396	6960778	374408	480.88	100	32.65		4514.4	4104
397	6960778	374416	481	89	32.67		4514.4	4309.2
398	6960570	374657	481	100	32.55		5385.6	5140.8
399	6960576	374469	481	80	32.87		5385.6	5140.8
400	6960650	374430		80	37.88	40.78	5544	1735.08197
401	6960850	374500					0	0
402	6960700	374670					0	0
403	6960573	374550					0	0
404	6959900	375590	508	100			512.703297	509.901639
405	6959206	375067	477	80		37.33	253.186813	214.032787
406	6959138	374244	491			41.25	227.868132	194.754098
407	6962680	374838	448			35.7	7.12087912	7.08196721
408	6962304	375188	468	60	30.82		0	0
409	6962300	374900	445	49	32.15		1230.48791	1223.76393
410	6962358	374563		70			0	0
411	6966657	374160	448		45.42		2305.38462	720.590164
412	6966129	374652	435		39.36		852.48	852.48
413	6965924	374775	439			44.98	648	648
414	6965982	374848	444		38.62		1890	1890
415	6965968	374895	445				3024	2990.95082
416	6965996	374883	449				0	0
417	6966030	374938	451				1993.84615	1982.95082

POZO N°	COORDENADAS UTM		COTA (msnm)	PROF.(m) PERFOR.	NIVELES		m3/día verano	m3/día invierno
	NORTE	ESTE			ESTÁTICO	DINÁMICO		
418	6965965	374973	442				1993.84615	1982.95082
419	6966275	374693	441				1159.2	1159.2
420	6966291	374686	441				0	0
421	6966742	374449	446				664.615385	605.901639
422	6967225	373683	454		46.7		1993.84615	1982.95082
423	6967041	373544	454	71			900	900
424	6966922	373453	454	70	43.09		4320	4320
425	6966787	373381	467	91			90	90
426	6973834	379290	575	128			896.4	759.245902
427	6971616	377154	506	100			2610.98901	2348.85246
428	6971176	377018	505		95.96		2610.98901	2596.72131
429	6967473	373471	455	65		45.08	2610.98901	2348.85246

Los pozos en rojo son de observación

El pozo en azul, es agua de vertiente

Balance Sector Embalse Lautaro – La Puerta

Sector: Embalse Lautaro – La Puerta		
	l/s	Mm <sup>3</sup> /año
<b>Ingresos</b>		
Entradas Superficiales	1410	44.46
Entradas Subterráneas	1000	31.53
Aportes Laterales por quebradas	30	0.95
Filtraciones Embalse Lautaro	200	6.31
<i>Total Ingresos</i>	<i>2630</i>	<i>83.25</i>
<b>Salidas</b>		
Salidas Superficiales	2420	76.30
Salidas Subterráneas	40	1.26
Evapotranspiración por cultivos	440	13.87
Evapotranspiración en zona de vegas	110	3.47
<i>Total Salidas</i>	<i>3010</i>	<i>94.90</i>
<b>Intercambios de Entrada</b>		
Infiltración río	26	0.82
Infiltración canales	222	7.00
Infiltración riego predial	265	4.11
<i>Total</i>	<i>513</i>	<i>11.93</i>
<b>Intercambios de Salida</b>		
Descarga por vertientes	1300	40.99
Descarga artificial por bombeos	787	30.27
<i>Total</i>	<i>2087</i>	<i>71.26</i>

Balance Sector La Puerta – Mal Paso

Sector: La Puerta – Mal Paso		
	l/s	Mm <sup>3</sup> /año
<b>Ingresos</b>		
Entradas Superficiales	2420	76.30
Entradas Subterráneas	40	1.26
Aportes Laterales por quebradas	50	1.58
<i>Total Ingresos</i>	<i>2460</i>	<i>79.14</i>
<b>Salidas</b>		
Salidas Superficiales	1230	38.78
Salidas Subterráneas	600	18.92
Evapotranspiración por cultivos	456	14.38
Evapotranspiración en zona de vegas	80	2.52
Usos mineros	31	0.98
<i>Total Salidas</i>	<i>2397</i>	<i>75.58</i>
<b>Intercambios de Entrada</b>		
Infiltración río	750	23.65
Infiltración canales	150	4.73
Infiltración riego predial	148	4.68
<i>Total</i>	<i>1048</i>	<i>33.06</i>
<b>Intercambios de Salida</b>		
Descarga por vertientes	225	7.09
Descarga artificial por bombeos	1060	44.18
<i>Total</i>	<i>1285</i>	<i>51.28</i>



Balance Sector Mal Paso - Copiapó

Sector: Mal Paso – Copiapó		
	l/s	Mm <sup>3</sup> /año
<b>Ingresos</b>		
Entradas Superficiales	1230	38.78
Entradas Subterráneas	600	18.92
Aportes Laterales por quebradas	250	7.88
<i>Total Ingresos</i>	<i>2080</i>	<i>65.58</i>
<b>Salidas</b>		
Salidas Superficiales	1040	32.79
Salidas Subterráneas	530	16.71
Evapotranspiración por cultivos	320	10.09
Evapotranspiración en zona de vegas	28	0.88
Exportación de aguas (potable y minero)	737	23.25
<i>Total Salidas</i>	<i>2655</i>	<i>83.73</i>
<b>Intercambios de Entrada</b>		
Infiltración río	170	5.36
Infiltración canales	170	5.36
Infiltración riego predial	192	6.04
Infiltración por pérdidas de A.P.	222	7.00
<i>Total</i>	<i>754</i>	<i>23.76</i>
<b>Intercambios de Salida</b>		
Descarga por vertientes	365	11.51
Descarga artificial por bombeos	1185	50.36
<i>Total</i>	<i>1550</i>	<i>61.87</i>



PÉRDIDAS DE AGUA POTABLE SECTOR MAL PASO - COPIAPO

Localidad		Abr-95	May-95	Jun-95	Jul-95	Ago-95	Sep-95	Oct-95	Nov-95	Dic-95	Eno-95	Feb-95	Mar-95
COPIAPO	Producción (m3)	993653	964932	913192	964891	950828	955494	990994	1062604	1125154	1167392	1037130	1100229
	Facturación (m3)	550800	558124	519392	536298	493885	579834	573584	621815	601487	625,714	644849	633737
T.AMARILLA	Producción (m3)	79766	74619	70180	62982	67509	66321	73658	72655	80733	86148	75228	74883
	Facturación (m3)	45472	45252	39614	35978	34093	41665	42040	44899	50317	53949	56831	49157
		Abr-96	May-96	Jun-96	Jul-96	Ago-96	Sep-96	Oct-96	Nov-96	Dic-96	Eno-96	Feb-96	Mar-96
COPIAPO	Producción (m3)	1051937	997915	941151	944321	897517	947431	949293	976678	1054240	1221072	1110018	1165362
	Facturación (m3)	628384	622067	537875	482055	534805	582923	618340	647647	656757	695341	645848	648101
T.AMARILLA	Producción (m3)	67626	60279	66805	71237	72837	74046	78073	68181	75890	75172	70923	72506
	Facturación (m3)	46300	43420	42379	42909	39260	42903	43120	52692	53976	47592	51815	50502
		Abr-97	May-97	Jun-97	Jul-97	Ago-97	Sep-97	Oct-97	Nov-97	Dic-97	Eno-97	Feb-97	Mar-97
COPIAPO	Producción (m3)	976100	943586	819116	885051	845188	890833	1009820	1077125	1095240	1122327	978072	1071840
	Facturación (m3)	655866	601873	566769	501443	656402	521547	617765	682356	721571	695669	705212	667038
T.AMARILLA	Producción (m3)	60285	64087	44299	68457	67374	69909	77380	78990	76170	77058	67897	74717
	Facturación (m3)	44529	42779	38359	38708	42278	33180	44029	47125	54208	49338	60949	52124
		Abr-98	May-98	Jun-98	Jul-98	Ago-98	Sep-98	Oct-98	Nov-98	Dic-98	Eno-98	Feb-98	Mar-98
COPIAPO	Producción (m3)	817577	841079	739293	764480	782284	780392	777612	815723	876708	1089369	881556	851319
	Facturación (m3)	646564	580266	519329	509643	530716	571511	580552	622629	629157	720275	679652	664368
PAIPOTE	Producción (m3)	38923	33477	30874	32140	31855	36163	38432	36451	36188	41672	34882	37930
	Facturación (m3)	24827	23552	20991	19003	19594	20579	22524	24647	22286	25214	31287	22941
T.AMARILLA	Producción (m3)	78825	67796	62526	65089	64512	76410	77988	73731	73440	84503	70642	76816
	Facturación (m3)	54615	44536	39154	40144	35498	43213	42124	44730	44142	54431	56580	53853
		Abr-99	May-99	Jun-99	Jul-99	Ago-99	Sep-99	Oct-99	Nov-99	Dic-99	Eno-99	Feb-99	Mar-99
COPIAPO	Producción (m3)	811109	815613	742717	728657	762825	781292	787360	781264	821187	934880	803967	874513
	Facturación (m3)	5954	8637	8637	7473	6353	6207	7224	8394	8854	7433	7044	6765
T.AMARILLA	Producción (m3)	70718	74487	70685	63795	75436	79049	62092	69872	65232	79602	69395	72643
	Facturación (m3)	42291	38209	37434	35678	38816	41498	40973	43391	46045	49991	48831	47871
		Abr-00	May-00	Jun-00	Jul-00	Ago-00	Sep-00	Oct-00	Nov-00	Dic-00	Eno-00	Feb-00	Mar-00
COPIAPO	Producción (m3)	847831	771262	718922	685435	716388	763273	807494	811702	845482	835429	788794	855869
	Facturación (m3)	634720	599828	553757	501400	491609	547543	630329	671021	674973	674382	686874	675289
PAIPOTE	Producción (m3)	34876	36495	31820	40964	32692	33849	37711	37758	39792	40671	45086	51510
	Facturación (m3)	28388	19942	22611	23245	21082	22490	27112	27204	29284	30063	30576	27583
T.AMARILLA	Producción (m3)	72270	72158	65652	86730	68895	78040	80859	78833	82951	70671	69077	76511
	Facturación (m3)	44525	38550	37055	32993	30783	34900	41972	41851	48362	44283	44477	48565
		Abr-01	May-01	Jun-01	Jul-01	Ago-01	Sep-01	Oct-01	Nov-01	Dic-01	Eno-01	Feb-01	Mar-01
COPIAPO	Producción (m3)	782589	869647	778730	772258	891274	795255	854205	926457	1004737	891080	788092	860619
	Facturación (m3)	647006	580657	574708	572578	566036	589893	617583	688024	710779	693041	648081	680329
PAIPOTE	Producción (m3)	46947	37854	39284	38216	37129	33149	44483	38717	54272	47764	46851	51503
	Facturación (m3)	30602	26758	26507	24673	24069	24776	26870	28795	31316	31919	29736	31731
T.AMARILLA	Producción (m3)	106294	127447	72301	101081	75626	102080	126222	126658	121361	98996	95872	115322
	Facturación (m3)	43727	40070	36925	35702	35015	36325	43468	45261	48416	46975	41388	53893



Niveles Calculados y Observados en Pozos de Control

Pozo SP	El Calqui		San Antonio		El Giro		Los Loros		La Puerta		Hornitos		Elibor		Villa María	
	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.
1	1061.5	1061.6	998.0	997.6	978.8	979.0	932.6	933.2	907.9	910.0	760.0	759.7	729.1	735.7	686.3	687.3
2	1061.4	1060.3	997.0	998.2	977.6	978.0	932.5	932.7	908.1	910.0	763.9	758.6	732.9	732.4	692.0	680.0
3	1060.7	1061.4	996.5	998.0	976.6	978.7	932.0	933.3	907.7	910.0	761.3	759.0	730.4	732.6	688.4	684.0
4	1060.9	1059.2	995.8	996.7	976.8	977.3	932.4	932.7	907.9	909.3	757.6	758.5	726.6	729.9	683.8	677.2
5	1060.7	1062.4	995.8	996.4	976.8	978.3	932.2	933.4	907.8	910.0	755.8	757.4	724.8	730.8	683.0	682.0
6	1060.7	1058.4	995.4	995.2	976.8	976.9	932.2	932.7	907.9	908.9	752.6	753.9	721.6	728.0	679.3	674.4
7	1060.5	1061.4	995.0	995.4	976.4	978.0	931.7	933.4	907.8	909.6	750.4	751.8	719.4	728.2	677.2	677.2
8	1060.8	1058.2	995.2	995.4	976.8	976.8	932.1	932.4	907.9	908.4	749.5	748.9	718.6	724.5	674.3	668.0
9	1060.4	1060.5	995.0	994.6	976.1	977.8	931.5	933.2	907.9	909.0	748.7	747.2	717.8	725.4	675.0	670.7
10	1060.4	1058.3	993.4	993.5	976.2	976.5	931.6	931.8	907.9	908.0	745.2	745.4	714.2	723.2	669.5	661.7
11	1060.3	1060.7	992.7	993.8	975.6	977.5	931.6	932.8	907.8	908.6	742.8	744.0	711.7	724.0	667.5	665.2
12	1060.8	1058.3	994.8	993.4	976.7	976.4	931.9	931.8	907.8	907.9	741.7	742.6	710.7	721.4	666.8	657.9
13	1060.6	1060.7	994.0	994.0	976.2	977.5	931.6	932.8	907.9	908.3	742.8	741.7	712.0	722.0	667.7	662.0
14	1061.0	1058.2	994.0	993.0	976.5	976.5	931.8	931.8	907.8	907.8	743.0	739.3	712.5	715.3	667.0	655.0
15	1060.8	1060.5	993.0	993.3	976.2	977.5	931.4	932.7	907.9	908.3	742.2	737.4	711.4	712.0	665.2	659.1
16	1061.3	1058.1	993.6	992.7	976.5	976.4	931.4	931.7	907.7	907.7	738.7	734.9	707.7	707.5	662.3	653.0
17	1060.7	1060.3	993.6	993.2	976.2	977.6	931.4	932.7	907.8	908.2	736.1	732.1	705.2	706.1	662.2	656.1
18	1060.0	1057.6	993.7	992.3	976.3	976.5	931.0	931.6	907.7	907.7	730.1	728.9	699.2	699.5	657.0	650.2
19	1060.2	1059.9	993.3	992.8	976.2	977.6	930.8	932.6	907.8	908.0	728.2	726.7	697.2	694.8	654.2	652.8
20	1060.3	1057.4	993.6	992.4	976.7	976.7	931.6	931.6	907.7	907.6	723.0	723.2	692.0	684.3	650.7	643.9
21	1060.5	1060.0	992.6	993.2	976.2	977.9	933.1	933.0	907.8	908.1	721.5	725.1	690.4	690.1	651.5	647.5
22	1060.8	1057.8	993.1	993.1	977.9	977.0	932.4	932.2	908.2	907.8	724.2	727.4	693.1	684.9	652.5	643.8
23	1060.5	1060.8	993.3	993.3	975.8	978.1	931.8	932.8	908.0	908.3	728.9	734.1	697.8	703.3	653.2	652.7
24	1061.1	1058.9	993.5	993.4	977.4	977.0	932.2	932.2	908.0	908.0	728.7	735.5	697.6	702.0	652.0	645.2
25	1060.9	1061.2	994.7	994.9	976.9	978.2	931.6	932.8	906.4	908.3	732.9	736.4	701.8	708.0	653.6	654.0
26	1060.1	1059.3	993.4	994.7	976.7	977.2	931.8	931.9	906.7	907.8	728.9	732.8	697.9	698.5	652.0	649.7
27	1060.5	1061.1	993.6	995.5	976.3	978.3	931.1	932.7	907.2	908.0	728.7	730.3	697.7	700.2	651.9	660.6
28	1060.6	1059.3	993.8	995.0	976.6	977.1	931.6	931.6	907.0	907.7	725.7	728.0	694.6	693.1	651.9	655.2
29	1060.5	1060.9	993.6	995.8	976.5	978.3	931.8	932.6	907.7	908.0	727.5	726.5	696.5	695.3	653.0	665.4

Niveles Calculados y Observados en Pozos de Control

Pozo SP	Pabellon		Cerrillos		Nantoco		Mal Paso		Fdo. Palermo		Alcaparrosa		Punta Cobre		El Sauce	
	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.
1	627.6	626.7	580.1	580.6	545.6	545.8	526.4	519.3	490.1	491.5	463.8	463.7	422.6	422.8	408.8	408.6
2	633.1	624.9	580.5	582.5	545.6	544.2	526.1	511.0	489.9	490.7	466.7	466.7	430.0	427.1	414.8	409.9
3	630.8	626.0	580.2	581.4	545.3	546.9	525.7	516.8	489.1	491.0	465.7	468.0	427.8	428.1	412.2	410.5
4	626.0	623.3	579.8	581.3	545.1	543.4	525.8	509.8	489.2	491.4	465.9	469.2	428.1	429.0	411.8	410.9
5	625.2	623.4	580.0	580.3	545.5	546.1	526.3	516.1	489.9	491.7	464.7	469.6	427.3	429.2	411.8	410.9
6	622.5	620.4	579.5	580.3	545.3	542.1	526.1	509.8	490.6	484.5	465.8	466.1	427.9	428.8	411.1	410.5
7	621.8	620.5	579.2	579.5	545.0	545.3	526.4	518.8	489.6	484.8	464.0	463.5	425.3	427.6	410.4	410.1
8	619.3	617.4	578.8	577.3	544.8	541.9	525.9	514.6	487.4	485.7	461.9	459.7	421.8	425.4	408.0	408.2
9	619.7	617.2	578.9	578.0	544.8	544.8	526.0	523.0	487.7	484.6	462.5	457.3	422.8	423.0	408.1	407.4
10	615.7	614.4	578.0	577.3	544.2	541.8	525.0	518.6	485.5	484.6	459.8	454.4	419.1	419.5	405.8	405.4
11	615.5	614.6	577.4	578.0	544.4	545.0	525.1	526.0	484.2	483.5	458.4	452.3	417.8	417.5	404.9	404.3
12	614.7	612.4	577.9	578.9	545.0	542.4	525.1	521.0	483.0	483.0	457.3	449.9	415.9	415.0	403.2	402.9
13	616.8	613.2	578.5	579.1	544.5	545.7	525.0	527.1	482.0	482.0	456.9	448.0	416.2	413.3	403.4	401.9
14	615.0	611.2	577.9	577.4	544.5	543.0	524.9	521.9	481.1	482.0	456.4	445.0	415.3	411.2	401.8	400.5
15	614.5	611.6	577.6	578.6	544.0	546.0	524.7	527.6	481.1	481.1	453.9	445.0	413.3	409.9	401.7	399.9
16	612.2	609.3	575.9	575.9	543.8	542.8	524.3	522.0	481.1	481.1	450.4	443.5	411.3	408.1	399.8	398.8
17	612.7	609.5	574.2	575.9	543.6	545.6	524.4	527.7	480.1	479.5	448.7	442.4	410.3	409.5	397.8	397.8
18	606.1	606.4	572.5	573.3	541.1	541.5	523.3	522.3	481.1	481.1	447.0	441.4	409.3	408.7	396.8	395.5
19	604.3	606.5	570.8	573.9	540.1	543.5	522.3	528.4	480.0	480.0	446.2	442.3	408.1	407.8	395.8	394.5
20	598.2	604.0	569.0	571.3	536.3	536.7	520.2	522.8	482.5	483.2	447.3	443.4	407.0	407.0	394.8	393.4
21	600.5	604.0	567.4	571.0	537.0	540.5	520.8	529.0	483.0	483.3	448.3	445.6	407.3	407.1	393.0	392.5
22	602.3	602.1	567.2	569.2	538.3	535.8	522.8	522.6	486.3	487.0	448.5	447.7	408.1	407.7	392.2	392.2
23	603.4	602.8	570.7	570.6	539.5	541.3	523.3	528.2	486.3	486.3	449.4	449.0	408.0	406.9	393.7	393.7
24	599.0	600.2	569.0	570.6	538.3	533.4	521.4	520.8	489.4	489.6	449.9	449.9	408.0	407.0	395.2	395.2
25	600.3	601.1	567.6	571.5	539.3	539.4	528.1	527.0	488.6	488.2	451.1	451.1	409.0	408.4	397.0	397.4
26	597.2	599.2	565.5	570.2	537.0	533.0	528.1	519.3	489.5	491.2	451.3	452.7	410.1	410.0	399.0	398.8
27	598.3	599.8	564.3	570.5	535.0	535.0	526.6	525.9	489.7	489.7	449.4	453.7	412.0	411.6	400.0	399.9
28	595.8	597.8	563.2	569.3	535.0	535.5	517.2	517.7	490.0	492.5	449.7	455.4	413.0	413.0	400.2	400.0
29	598.5	598.5	565.0	569.6	537.0	537.0	517.4	524.1	490.0	491.0	449.7	456.2	413.2	413.1	400.5	400.4



Niveles Calculados y Observados en Pozos de Control

Pozo SP	Las Cañas		San Fdo.		Sierralta		Castellon	
	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.	obs.	calc.
1	405.1	405.6	403.0	402.9	395.5	397.1	387.4	391.8
2	410.4	406.9	407.5	402.3	397.0	395.2	386.9	388.7
3	407.9	407.2	405.2	402.3	395.5	395.6	386.7	388.2
4	407.5	407.3	405.0	402.0	391.2	393.6	386.6	387.3
5	407.5	407.3	404.8	401.9	394.4	394.4	385.5	387.3
6	406.9	406.9	404.2	401.3	391.9	392.8	385.5	386.4
7	406.2	406.2	403.7	401.0	391.6	393.2	386.2	386.2
8	404.1	404.8	401.8	399.9	390.9	391.2	384.5	385.3
9	404.0	404.0	399.3	401.9	390.8	391.5	385.4	385.4
10	402.0	402.0	399.9	397.6	390.0	389.9	385.9	384.6
11	401.1	401.1	399.5	397.3	390.0	390.0	386.2	385.0
12	399.6	399.6	398.1	396.4	388.0	388.4	385.2	385.0
13	399.9	399.5	398.1	395.9	388.7	389.0	385.7	384.4
14	398.2	398.2	396.8	394.7	387.6	387.6	385.1	384.1
15	398.4	397.5	396.9	394.4	388.0	388.0	384.9	383.5
16	395.5	395.2	394.2	393.1	386.2	386.2	384.4	383.3
17	393.2	394.3	392.0	391.9	384.9	385.9	383.6	382.4
18	390.9	392.0	389.5	388.9	383.2	382.8	382.0	380.6
19	388.8	391.1	388.6	388.3	381.2	382.1	380.9	379.0
20	386.3	389.7	386.1	386.4	380.7	380.2	378.9	378.0
21	385.7	388.7	385.6	385.4	377.4	379.1	379.0	376.4
22	389.6	389.6	386.0	385.4	384.7	378.3	380.7	377.5
23	391.6	391.4	390.5	388.0	386.9	383.9	383.7	379.9
24	393.9	393.2	392.6	389.7	390.6	384.9	384.0	382.0
25	395.4	395.4	394.2	392.1	389.6	387.9	384.8	383.2
26	395.0	396.3	393.9	393.3	387.7	387.7	384.6	384.1
27	395.8	397.4	394.1	394.1	390.6	390.2	384.0	384.0
28	393.4	398.1	392.3	394.2	390.6	389.8	383.9	384.5
29	392.8	398.3	391.8	394.6	390.6	390.6	383.7	384.7

Resultado del Escenario Proyectado: Niveles Esperados en Pozos de Control

Pozo SP	Hornitos (m)	Elibor (m)	Villa María (m)	Pabellon (m)	Cerrillos (m)	Nantoco (m)	Mal Paso (m)	Palermo (m)	Alcaparrosa (m)	Punta (m)	El Sauce (m)	Las Cañas (m)	San Fdo. (m)	Sierralta (m)	Castellon (m)
30	727.59	691.74	662.33	596.83	568.45	528.96	516.84	491.80	457.43	414.23	401.10	399.19	395.32	390.05	385.44
31	727.20	695.29	664.32	597.29	569.17	534.73	532.20	488.80	456.76	414.81	401.43	399.48	395.69	391.09	385.54
32	728.55	692.70	662.65	597.01	568.36	527.08	515.36	486.30	456.15	415.15	401.65	399.75	395.85	390.52	385.74
33	728.30	695.42	665.63	597.09	568.88	533.03	521.51	485.95	455.06	415.35	401.92	399.98	396.17	391.52	385.82
34	729.75	693.87	662.34	596.48	567.81	525.33	513.28	485.46	454.84	415.27	402.05	400.15	396.23	390.83	385.85
35	729.56	695.62	666.89	595.21	567.19	531.27	519.40	483.03	453.79	415.10	402.20	400.26	396.43	391.74	385.93
36	730.88	692.72	663.50	594.56	566.14	523.56	511.13	483.11	452.73	414.77	402.22	400.32	396.40	391.00	385.97
37	730.33	695.70	667.01	593.79	566.55	529.47	517.35	481.03	451.85	414.45	402.29	400.36	396.53	391.84	385.97
38	730.23	690.45	664.54	592.70	565.51	521.73	509.04	480.40	450.99	414.05	402.25	400.35	396.43	391.03	385.93
39	730.21	692.81	667.95	591.15	565.94	527.63	515.39	479.53	450.27	413.69	402.26	400.33	396.51	391.82	385.90
40	730.80	689.47	665.38	590.23	564.92	519.86	507.03	478.08	449.57	413.27	402.15	400.26	396.34	390.95	385.80
41	729.68	693.04	667.07	590.03	564.38	525.77	513.50	477.34	448.99	412.91	402.12	400.19	396.37	391.69	385.76
42	730.24	688.79	666.01	589.63	563.36	517.94	505.07	477.02	447.41	412.49	401.96	400.07	396.14	390.77	385.60
43	729.10	693.43	666.97	589.00	562.84	523.88	511.61	476.37	446.95	412.14	401.89	399.97	396.14	391.48	385.54
44	729.67	688.25	666.58	589.96	561.85	516.08	503.23	476.15	445.48	411.74	401.70	399.81	395.86	390.52	385.33
45	728.54	692.91	667.01	590.58	561.36	522.04	509.94	475.57	445.10	411.40	401.60	399.67	395.83	391.20	385.27
46	729.12	687.76	667.09	590.64	561.09	514.22	501.47	475.04	444.71	411.01	401.38	399.47	395.51	390.20	385.11
47	728.01	692.43	667.29	590.34	560.93	520.22	508.30	474.93	444.40	410.69	401.34	399.40	395.49	390.86	385.05

Resultado del Escenario Proyectado con Período de Sequía: Niveles Esperados en Pozos de Control

Pozo SP	Hornitos (m)	Elabor (m)	Villa Maria (m)	Pabellon (m)	Cerrillos (m)	Nantoco (m)	Mal Paso (m)	Palermo (m)	Alcaparrosa (m)	Punta (m)	El Sauce (m)	Las Cañas (m)	San Fdo. (m)	Sierralta (m)	Castellon (m)
30	727.51	691.70	659.86	596.82	568.03	529.00	516.84	491.75	457.47	414.17	401.06	399.28	395.50	390.22	385.57
31	727.14	695.25	665.34	597.29	568.56	534.75	523.21	488.77	456.77	414.51	401.13	399.39	395.84	391.29	385.71
32	728.49	692.66	660.69	595.02	566.61	527.07	515.38	486.29	456.14	414.63	401.14	399.47	395.87	390.61	385.83
33	728.24	696.38	666.67	595.09	567.01	532.97	521.52	481.94	454.01	414.65	401.23	399.53	396.04	391.49	385.83
34	729.70	693.82	662.37	592.47	564.84	525.21	513.28	481.44	452.74	414.20	401.21	399.56	395.96	390.68	385.78
35	729.51	697.59	667.93	592.19	565.14	531.10	519.39	477.99	450.63	414.13	401.24	399.55	396.05	391.50	385.79
36	730.83	692.68	663.53	589.53	563.00	523.32	511.09	478.05	449.53	413.70	401.16	399.50	395.90	390.65	385.75
37	730.28	696.66	668.04	589.73	563.34	529.18	517.30	474.95	447.60	413.29	401.14	399.45	395.95	391.41	385.68
38	731.18	690.41	663.57	587.62	561.23	521.37	508.95	475.29	446.68	412.80	401.01	399.36	395.76	390.53	385.59
39	730.16	694.77	668.98	588.05	561.60	527.22	515.27	472.40	444.92	412.37	400.95	399.26	395.77	391.25	385.51
40	730.76	689.43	665.40	586.11	559.52	519.38	506.87	472.92	444.17	411.88	400.77	399.12	395.53	390.32	385.36
41	729.63	694.01	669.72	586.88	559.91	525.25	513.31	470.14	442.54	411.46	400.68	398.99	395.50	391.00	385.27
42	730.20	688.76	665.03	585.45	558.84	517.35	504.84	470.79	441.91	410.99	400.47	398.82	395.21	390.03	385.08
43	729.06	693.39	668.29	586.79	558.27	523.24	511.41	469.10	440.40	410.59	400.35	398.66	395.16	390.69	384.98
44	729.63	688.22	664.60	585.72	558.23	515.37	502.92	469.85	439.89	410.14	400.12	398.46	394.84	389.69	384.74
45	728.50	692.88	666.82	587.32	557.69	521.29	509.61	468.23	438.46	409.75	399.98	398.28	394.77	390.33	384.65
46	729.09	687.72	663.10	586.34	557.67	513.40	501.08	468.07	438.03	409.32	399.73	398.05	394.41	389.30	384.37
47	727.77	692.30	664.70	588.02	557.97	519.36	507.89	468.53	437.98	408.96	399.65	397.94	394.35	389.93	384.29









