

**REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA**

**ANALISIS Y EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDROGEOLOGICOS
VALLE DEL RIO COPIAPO - III REGION**

MODELACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS

TOMO I DE II

MODELO DE RECURSOS HIDRICOS:

CONSTRUCCION, AJUSTE Y OPERACION DEL MODELO

DICIEMBRE - 1987

ALAMOS Y PERALTA INGENIEROS CONSULTORES LTDA.

CON LA ASESORIA DE : IPLA LTDA. E HIDRELEC LTDA.

INDICE GENERAL DEL ESTUDIO

<u>TOMO I</u>	MODELO DE RECURSOS HIDRICOS : CONSTRUCCION, AJUSTE Y OPERACION DEL MODELO
<u>TOMO II</u>	ESTUDIOS BASICOS : HIDROLOGIA DEMANDAS DE AGUA HIDROGEOLOGIA GENERAL DEL VALLE
<u>TOMO ANEXO 1</u>	Estadísticas Hidrológicas Infraestructura de Riego Planos de Uso Actual y Potencial del Suelo
<u>TOMO ANEXO 2</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector Piedra Colgada - Angostura
<u>TOMO ANEXO 3</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector Copiapó - Piedra Colgada
<u>TOMO ANEXO 4</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector Malpaso - Copiapó
<u>TOMO ANEXO 5</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector La Puerta - Malpaso
<u>TOMO ANEXO 6</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector Embalse Lautaro - La Puerta
<u>TOMO ANEXO 7</u>	Estudio Hidrogeológico Detallado del Sector Manflas, Jorquera y Pulido
<u>TOMO ANEXO 8</u>	Modelo de Recursos Hidricos : Listados de los Modelos Resultados de las Pasadas de Ajuste

TOMO I : MODELO DE RECURSOS HIDRICOS

INDICE

	Página
1. RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo del Estudio	3
1.3 Trabajo Realizado	3
1.3.1 Introducción	3
1.3.2 Estudio Hidrológico	4
1.3.3 Estudio de las Demandas de Agua	5
1.3.4 Estudio Hidrogeológico del Valle	6
1.3.5 Construcción y Ajuste del Modelo de Recursos Hídricos	9
1.3.6 Operación del Modelo de Recursos Hídricos	11
1.4 Conclusiones y Recomendaciones	14
1.4.1 Conclusiones	14
1.4.2 Recomendaciones	17
2. INTRODUCCION AL MODELO DE RECURSOS HIDRICOS	20
2.1 Conocimiento Hidrogeológico del Valle	20
2.2 Relación entre Aguas Superficiales y Subterráneas	22
2.2.1 Mecanismo de Infiltración desde el río	23
2.2.2 Proceso de Infiltración desde el Sistema de Riego	26
2.3 Modelo de Recursos Hídricos	27
2.4 Antecedentes Empleados	28
2.5 Nuevos Antecedentes Aportados por la Modelación	29

INDICE

	Página
3. OBJETO DEL MODELO	30
4. MODELOS HIDROGEOLOGICOS	32
4.1 Aspectos Generales	32
4.2 Selección del Modelo a Emplear	33
4.3 Discretización, Condiciones de Borde y Elementos de Contraste	34
4.3.1 Discretización	34
4.3.2 Condiciones de Borde	35
4.3.3 Elementos de Contraste	38
4.4 Descripción del Modelo y Manual de Operación	39
4.4.1 Aspectos Generales	39
4.4.2 Deducción y Solución del Sistema de Ecuaciones de Diferencias Finitas	42
4.4.3 Elección de la Escala de Tiempo de la Modelación	51
4.4.4 Operación del Modelo	53
4.4.5 Definición de Variables y Parámetros de Entrada	53
4.4.5.1 Datos Generales	53
4.4.5.2 Datos Malla Bordes Permeables	55
4.4.5.3 Datos sobre Mallas Exteriores	55
4.4.5.4 Datos para el Contraste Piezométrico	56
4.4.5.5 Datos para la Simulación de la Relación Río-Acuífero	56
4.4.5.6 Datos sobre Vertientes	57
4.4.5.7 Datos sobre Bombeos e Infiltraciones	58
4.4.6 Formato de Entrada de Datos	59
4.5 Proceso de Introducción de los Datos de Entrada	67
4.5.1 Introducción	67
4.5.2 Datos Generales	68
4.5.3 Cota de Terreno	69
4.5.4 Contraste Piezométrico	70
4.5.5 Relación Río - Acuífero	71
4.5.5.1 Infiltración del Río	74
4.5.6 Infiltración desde la Red de Riego	87
4.5.7 Extracciones por Medio de Bombeos	88
4.5.8 Entradas y Salidas por Bordes Laterales	88
4.5.9 Infiltraciones por Lluvias	89

INDICE

	Página
4.6 Proceso de Ajuste	90
4.6.1 Introducción	90
4.6.2 Relación de Pasadas del Sector Manflas, Jorquera y Pulido	92
4.6.3 Relación de Pasadas del Sector Embalse Lautaro - La Puerta	97
4.6.4 Relación de Pasadas del Sector La Puerta - Potrero Seco	100
4.6.5 Relación de Pasadas del Sector Potrero Seco - Malpaso	104
4.6.6 Relación de Pasadas del Sector Malpaso - Paipote	108
4.6.7 Relación de Pasadas del Sector Paipote - Copiapó	113
4.6.8 Relación de Pasadas del Sector Copiapó - Piedra Colgada	117
4.6.9 Relación de Pasadas del Sector Piedra Colgada - Angostura	120
4.6.10 Conclusiones	122
5. MODELO HIDROLOGICO	132
5.1 Aspectos Generales	132
5.2 Selección del Modelo a Emplear	133
5.3 Discretización, Condiciones de Borde y Elementos de Contraste	134
5.3.1 Discretización Espacial	134
5.3.2 Discretización Temporal	135
5.3.3 Condiciones de Borde	140
5.3.4 Elementos de Contraste	141
5.4 Descripción del Modelo y Manual de Operación	143
5.4.1 Aspectos Generales	143
5.4.2 Descripción del Modelo	143
5.4.3 Efectos del Embalse Lautaro	149
5.4.4 Manual de Operación	155
5.4.5 Preparación de los Datos de Entrada	155
5.4.6 Formato de Entrada de Datos	158
5.5 Proceso de Ajuste	165
5.5.1 Aspectos Generales	165
5.5.2 Relación de Pasadas	166
5.6 Conclusiones	194

INDICE

	Página
6. MODELO HIDROLOGICO MENSUAL	196
6.1 Introducción	196
6.2 Descripción y Preparación de los Datos de Entrada	197
6.2.1 Estadísticas Fluviométricas	197
6.2.2 Demandas de Agua por el Sistema de Riego	198
6.2.3 Infiltraciones de la Red Canales	200
6.2.4 Caudales Bombeados	200
6.2.5 Datos Correspondientes al Embalse Lautaro	200
6.2.6 Relación del Río con el Embalse Subterráneo	202
6.2.7 Datos Generales	202
6.3 Condiciones de Borde del Modelo	202
6.4 Proceso de Simulación del Modelo	203
6.5 Proceso de Ajuste del Modelo	204
6.5.1 Sector de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido hasta Copiapó en Pastillo	205
6.5.2 Sector Copiapó en Pastillo - Embalse Lautaro	206
6.5.3 Sector Embalse Lautaro - San Antonio	208
6.5.4 Sector San Antonio - La Puerta	210
6.5.5 Sector La Puerta - Malpaso	214
6.5.6 Sector Malpaso - Copiapó	217
6.5.7 Sector Copiapó - Piedra Colgada	222
6.5.8 Sector Piedra Colgada - Angostura	226
6.6 Análisis y Discusión de los Resultados	226
6.7 Conclusiones	229

INDICE

	Página
7. ALTERNATIVAS FUTURAS DE EXPLOTACION	230
7.1 Introducción	230
7.2 Uso Actual y Potencial del Suelo	230
7.3 Proyección de las Demandas de Agua Potable e Industrial	234
8. OPERACION DEL MODELO	235
8.1 Introducción	235
8.2 Norma de Uso de los Recursos Hídricos	238
8.3 Descripción del Proceso de Simulación Efectuado	239
8.4 Estimación de las Cotas Piezométricas en los Bordes Permeables de cada Modelo Hidrogeológico	240
8.5 Resultados Obtenidos	245
8.5.1 Balance Másico	245
8.5.2 Fluctuación de Niveles	253
8.5.3 Depresiones Residuales	255
8.6 Conclusiones	256
8.6.1 Propositiones para la Red Piezométrica y de Calidad Química	259

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Estudio Hidrogeológico del Sector Nantoco - Copiapó para el Mejoramiento Integral del Servicio de Agua Potable de Copiapó, ALAMOS Y PERALTA Ingenieros Consultores Ltda., ISAMU KODAMA Ingenieros Civiles Consultores - SENDOS, Junio 1986.
2. Informe Hidrológico e Hidrogeológico de la Hoya del río Manflas del Copiapó, Estancia Hacienda Manflas, INYGE, Diciembre 1985.
3. Catastro de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas Concedidas, en Trámite y sin Solicitar en la Hoya Hidrográfica del río Copiapó. Dirección General de Aguas - M.O.P., Agosto 1985.
4. Balance Hídrico Nacional, Regiones III y IV. IPLA, Dirección General de Aguas - M.O.P., 1984.
5. Catastro de Pozos de la Región de Atacama. Dirección General de Aguas - M.O.P., Mayo 1983.
6. Plan Maestro de Acción Inmediata para el Desarrollo de los Recursos de Agua y Suelo de Valle de Copiapó. Región de Atacama. Uri Hammer y Asociados, Dirección de Riego - M.O.P., 1980.
7. Tasa de Riego de Uso Racional y Beneficioso y Rol de Regantes del Valle de Copiapó. Domingo Queirolo Díaz, Dirección General de Aguas - M.O.P., Diciembre 1977.
8. Proyecto Mejoramiento Servicio de Agua Potable de Copiapó. Factibilidad. Tomo I. J.V.C., SENDOS - M.O.P., Noviembre 1979.
9. Estadísticas de Análisis Químicos y de Sedimentos 3a. Región. Dirección General de Aguas - M.O.P., Julio 1978.
10. Catastro de Pozos al 31 de Mayo de 1971. Hoya Nº 302 Copiapó. Departamento de Recursos Hidráulicos - CORFO, 1971.
11. Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos en el Valle de Copiapó. Gastón Mahave y otros - Dirección de Riego - M.O.P, Julio 1969.
12. Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos en el Valle de Copiapó. Relación General, 2 Tomos, ITALCONSULT Argentina, CORFO, Diciembre 1963.
13. Recursos de Agua del Valle de Copiapó. P. Kleiman y J. Torres, CORFO, Marzo 1962.

14. Antecedentes Generales sobre la Evolución del Litoral de Chile del Norte durante el Plioceno y el Cuaternario. R. Pascoff, Universidad de Chile, 1967.
15. Los Cambios Climáticos Plio-Cuaternarios en la Franja Costera de Chile Semi-Árido. R. Pascoff, Universidad de Chile, 1967.
16. Geología de las Hojas Copiapó y Ojos del Salado. K. Segerstrom, IIG - Boletín N° 24, 1968.
17. Le Chili Semi-aride. R. Pascoff, Bordeaux - Francia, 1970.
18. Cordillera de la Costa entre Chañaral y Caldera. Carta Geológica de Chile Escala 1:100.000. M. Mercado, IIG, 1978.
19. Evolución Geomorfológica del Desierto de Atacama entre los 26° y 33° de Latitud Sur. Revisión Cronológica. J.Naranjo y R.Pascoff, Revista Geológica de Chile, 1980.
20. Hojas Vallenar y parte Norte de La Serena. Carta Geológica de Chile Escala 1:250.000. R.Moscoso, P.Nasi, P.Salinas, SERNAGEOMIN, 1982.
21. Hojas Taltal y Chañaral. Carta Geológica de Chile Escala 1:250.000. J.Naranjo y A.Puig, SERNAGEOMIN.
22. Norma Chilena de Agua Potable NCh 409/1 Of.84.
23. Water Quality Sourcebook. A Guide to Water Quality Parameters. R.N.McNeely, V.P.Neimanis and L.Dwyer, Water Quality Branch, Minister of Supply and Services Canada, Ottawa, Canada, 1979.
24. Calidad Química de las Aguas de la IV Región. Proyecto CHI-535, Investigación de Recursos Hidráulicos en la IV Región, SERPLAC - DGA - ONU - CORFO, Abril 1979.
25. Las Necesidades de Agua de los Cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 24. J.Doorenbos y W.O.Pruitt, FAO - ONU, 1986.
26. Estudio Hidrogeológico del Valle del río Choapa. Sector Salamanca - Cuncumen. Informe Final. Anexo N° 3 de 4. Análisis y Resultados de las Infiltraciones por Regadío. ALAMOS Y PERALTA Ingenieros Consultores Ltda., ANACONDA CHILE S.A., Noviembre 1982.
27. Antecedentes del Catastro Vitivinícola y Declaraciones al 31 de Diciembre de 1985. Valle de Copiapó. Uva Vinífera y Uva de Mesa. Sin autor, sin fecha.

- 1 -

1. RESUMEN GENERAL DEL ESTUDIO1.1 Introducción

Tradicionalmente el Valle del río Copiapó ha orientado su actividad económica hacia la minería, siendo la agricultura y demás actividades menos importantes como fuerzas productivas de la zona.

La agricultura en particular, limitada siempre por el recurso agua, hasta hace poco se desarrollaba en función de las disponibilidades de agua en el río Copiapó, casi la única fuente de abastecimiento al regadío. El Embalse Lautaro, ubicado en la cabecera del río ha tenido poca función reguladora desde el inicio de sus operaciones, en 1939, debido fundamentalmente a los extensos períodos de sequía que han afectado el valle y el escurrimiento naturalmente regulado del río Copiapó.

Al iniciarse la década de los 60 se llevó a cabo una fuerte exploración de los recursos subterráneos, hasta entonces casi no empleados. Se perforó entonces una serie de pozos profundos, descubriendo en el Valle de Copiapó un acuífero de excelentes condiciones para la extracción de agua. Algunos de los pozos perforados se habilitaron como piezómetros de control y se comenzó a medir los niveles de la napa subterránea. Otros se construyeron con fines de riego, especialmente como refuerzo frente a la escasez de aguas superficiales.

Poco a poco fue aumentando el uso de las aguas subterráneas, hasta llegar a fines de la década de los años 70 a unos 24 millones de metros cúbicos anuales, (equivalentes a $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal continuo). De ellos cerca de la mitad se empleaban en riego, poco menos de un tercio en agua potable y el resto en la minería.

En esa época hubo un cambio violento producto de un nuevo enfoque que se daba a la agricultura de todo el país, abriendo la producción hacia mercados extranjeros. Allí se descubrió que el Valle del Copiapó tenía excelentes condiciones

- 2 -

climáticas, que permiten que la uva de mesa salga muy temprano al exterior, consiguiendo así buenos precios de venta. Como consecuencia se ha tenido un cambio explosivo en la agricultura de Copiapó, que se ha volcado hacia el cultivo de la uva, llegando hoy en día la superficie plantada a más de 4500 há.

Asociado al cambio de cultivo ha venido un cambio en los recursos y métodos de riego empleados. Actualmente casi la totalidad de los parronales existentes emplean para el riego la técnica del goteo, que permite una alta eficiencia en el aprovechamiento del agua y una simplificación en el manejo de las plantaciones. Esto último se muestra en el alto grado de automatización de las instalaciones de goteo que se ha hecho y la posibilidad de agregar los fertilizantes que requieren las plantas directamente en el agua de riego.

En cuanto a los recursos de agua que se está empleando en el riego de los parronales, un alto porcentaje proviene del embalse subterráneo. Esto tiene dos causas importantes que son la seguridad de abastecimiento que da el agua subterránea y la limpieza de las aguas, primordial en la delicada técnica del riego por goteo. Como consecuencia desde 1980 a la fecha se ha perforado una gran cantidad de pozos en el valle, incluso en sectores que se encuentran muy al interior del valle. Luego ha venido la petición de derechos de aprovechamiento para el agua alumbrada en cada pozo, hasta tener en Agosto de 1985 concedidos derechos por un total de más de 11.000 litros por segundo.

Considerando que el caudal medio del río Copiapó no supera los 2.500 litros por segundo en ninguna de las secciones en que se controla, apareció como obvio que la explotación de las aguas subterráneas, de acuerdo a los derechos concedidos, podría llevar a un agotamiento del acuífero. Partiendo de esta base se ha planteado la necesidad de un estudio que, a través de un completo análisis y evaluación de los recursos hídricos del valle, pueda entregar las bases para una política razonable de explotación de las aguas.

- 3 -

1.2 Objetivo del Estudio

El objetivo principal del estudio ha sido conocer la situación de los recursos hídricos del valle, las relaciones que existen entre las aguas superficiales y subterráneas y los usos que se da al agua, con el fin de tener una base que permita planificar el mejor aprovechamiento de los recursos existentes.

Para cumplir este objetivo se ha desarrollado un estudio apoyado en un modelo de simulación, con el fin de tener una herramienta que permita seguir evaluando la situación de los recursos hídricos a futuro.

1.3 Trabajo Realizado

1.3.1 Introducción

El trabajo realizado ha consistido, sintéticamente en construir un modelo matemático que represente adecuadamente el funcionamiento de los recursos hídricos del valle del río Copiapó. Con él se ha evaluado lo qué ocurriría a futuro con distintos niveles de demanda de agua, para los diferentes sectores del valle. Esto, que al decirlo suena sencillo, ha significado 14 meses de labores ininterrumpidas, dedicados a las actividades que se describe a continuación.

La calidad de un modelo matemático es función de la información de base que exista para construirlo. En el valle del río Copiapó existen bastantes antecedentes de sus recursos hídricos, encabezados primeramente por no menos de 6 estudios realizados entre 1962 y 1986. A ellos se suman las estadísticas de los controles fluviométricos de 9 secciones en el río Copiapó y sus afluentes y el control de niveles de la napa subterránea en cerca de 40 piezómetros a lo largo del valle. Existen luego otros antecedentes, recopilados en forma menos sistemática que los anteriores, referentes a la calidad química de las aguas superficiales y subterráneas, pérdidas y recuperaciones en ríos y canales, superficies cultivadas, caudales conducidos por los canales, volúmenes explotados en pozos y las características constructivas y de rendimiento de los pozos.

- 4 -

A estos antecedentes se sumaron los recogidos expresamente para el presente estudio. Entre ellos destacan la realización de una amplia campaña de geofísica de resistividad eléctrica, donde se hizo 224 sondeos eléctricos distribuidos a lo largo de unos 120 km. del valle del río Copiapó y sus afluentes. También son importantes el exhaustivo catastro de pozos del valle, que incluyó una encuesta de los volúmenes actualmente bombeados en cada uno de ellos. Para conocer las demandas de agua se hizo un detallado estudio de uso actual del suelo, como también de los otros consumos de agua del valle.

A continuación se describe brevemente cómo se analizó estos antecedentes y la forma en que fueron incluidos en la construcción del modelo.

1.3.2 Estudio Hidrológico

Bajo este título se llevó a cabo un estudio hidrológico de las precipitaciones y caudales superficiales controlados en el valle.

El estudio del régimen de precipitaciones significó la recopilación de antecedentes de 11 estaciones. Sus estadísticas fueron primeramente rellenas, para luego analizar su consistencia y homogeneidad mediante curvas doble acumuladas. Posteriormente se hizo un análisis de frecuencias y finalmente se construyó las isoyetas para probabilidades de excedencia 20, 50 y 80%.

El estudio del régimen de caudales se basó en la información recogida en las 10 estaciones fluviométricas que existen en la cuenca del río Copiapó. De ellas 7 se ubican en el río Copiapó, mientras que las 3 restantes lo hacen en cada uno de sus afluentes, los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.

El estudio del régimen de caudales partió con el relleno y extensión de las estadísticas mediante correlaciones entre estaciones cercanas. De esta manera se dispuso de 6 estadísticas completas, con una extensión de 42 años para 5 de ellas y 35 años la restante. Las estadísticas restantes no se extendieron ya

- 5 -

sea por la mala calidad de su información, como Copiapó en Embalse Lautaro que ha tenido un caudal no registrado en el agua que extrae el Canal Turbina, la corta extensión de su registro, como Copiapó en Copiapó, o el régimen absolutamente diferente, como Copiapó en Angostura. Esta información, no obstante, se ha incluido en el proceso de modelación, particularmente en el ajuste, por la importancia que significa cualquier antecedente sobre los recursos hídricos del valle.

Una vez completas las estadísticas se evaluó su homogeneidad empleando el método de las curvas Doble Acumuladas, comprobando que las estadísticas consideradas son homogéneas y consistentes.

Posteriormente, y para analizar las características del régimen de caudales, se dedujo el régimen natural de caudales para la estación más fiable y de estadística observada más completa, Copiapó en La Puerta. Con estos antecedentes se construyó curvas de Duración General del Caudal medio anual y de Variación Estacional del caudal medio mensual.

El análisis de los recursos hídricos concluyó con la generación estocástica de caudales para la suma de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Esto tuvo por objeto producir diferentes series de caudales y con ellas modelar diferentes condiciones hidrológicas.

1.3.3 Estudio de las Demandas de Agua

El estudio de las demandas de agua es un punto fundamental de conocer para poder evaluar cuánto pueden abastecer los recursos hídricos disponibles.

En esta etapa del estudio se procedió entonces a cuantificar las diferentes demandas de agua, tanto para las condiciones actuales como para diferentes alternativas futuras.

- 6 -

En primer lugar se analizó la situación del regadío, poniendo en planos escala 1:10.000 las superficies cultivadas por rubro (Uso Actual del Suelo), basadas en un catastro hecho expresamente para el presente estudio. Se ha obtenido así que actualmente hay bajo canal 7.931 há en todo el valle, de las cuales 4.690 há se cultivan con vides, 2.779 há con hortalizas, 386 há con frutales y 76 há son de praderas. Se estudió luego los consumos de agua de cada cultivo y las eficiencias de riego, incluyendo las necesidades de lavado de suelo por procesos de acumulación de sales, con lo cual pudo conocerse la demanda de agua para riego. Luego se analizó la potencialidad de cultivo de los suelos del valle, estableciéndose que habilitando tierras con limitaciones moderadas se puede llegar a cultivar 11.159 há, cifra que subiría a 17.850 há si se pudiera cultivar las tierras con limitaciones más severas. Estas superficies se han llevado a un Plano de Uso Potencial, y han sido la base para calcular la demanda potencial de riego.

Respecto del agua potable, se determinó la demanda actual según los antecedentes proporcionados por SENDOS. Luego se hizo proyecciones de demanda para los distintos centros poblados del valle, de los cuales son relevantes las localidades de Tierra Amarilla, Copiapó, Caldera, Chañaral y algunas localidades costeras ubicadas entre estas dos últimas.

Las demandas de agua para industria y minería provienen fundamentalmente de la Fundición Paipote y una serie de plantas mineras que producen los concentrados para la fundición. Los consumos actuales y futuros se conocieron a través de la encuesta directa a cada uno de los centros de consumo.

1.3.4. Estudio Hidrogeológico del Valle

Es uno de los aspectos más relevantes del estudio realizado, especialmente por el grado de detalle con que ha sido abordado. No podía ser de otro modo tampoco, ya que está claro que los recursos subterráneos del Valle de Copiapó son los

- 7 -

que permiten realmente regular las disponibilidades de agua.

El estudio hidrogeológico parti6 con la divisi6n del valle en 6 grandes sectores. Estos son:

1. Ríos Manflas, Jorquera y Pulido y río Copiap6 hasta el Embalse Lautaro
2. Embalse Lautaro - La Puerta
3. La Puerta - Malpaso
4. Malpaso - Copiap6
5. Copiap6 - Piedra Colgada
6. Piedra Colgada - Angostura

Cada uno de estos tramos fue objeto de un acabado análisis, el cual se bas6 fundamentalmente en los siguientes aspectos:

- Estudios anteriores
- Levantamiento hidrogeológico del valle
- Estadísticas de control de Recursos Hídricos (variación de niveles en por análisis químicos de las aguas y aforos del río y vertientes)
- Inventario de puntos acuíferos
- Prospección geofísica, que comprendió 224 sondeos eléctricos, distribuidos a lo largo de 120 km. del valle.
- Prospección mecánica, consistente en la construcción de 14 piezómetros en la parte baja del valle.
- Medición en pozos de Niveles Estáticos y Conductividades
- Actualización del Catastro de Pozos y Encuesta de Volúmenes Bombeados.

Estos antecedentes fueron la base de 6 estudios hidrogeológicos de detalle; uno para cada sector en que se dividió el valle, compuestos a su vez de un informe y 11 planos (escala 1:25.000, 1:20.000 ó 1:10.000, según el sector). Tres de los planos se refieren a la geometría del embalse subterráneo (Isopacas, Basamento Rocos y Geología Superficial), dos a las constantes elásticas del acuífero (Transmisividad y Caudal Específico), cuatro a las características de la napa (Isoprofundidad del Nivel Estático, Equipotenciales, Calidad Química y Variación

- 8 -

del Nivel Estático) y uno a la estratigrafía de los sondeos perforados.

Sólo con fines de ilustrar el panorama del uso de las aguas subterráneas en el Valle del río Copiapó, se incluye el cuadro siguiente con un resumen de las principales cifras por sector.

USO ACTUAL DEL AGUA SUBTERRANEA EN EL VALLE DEL
RIO COPIAPO (FEBRERO 1987)

SECTOR	1	2	3	4	5	6	TOTAL
Pozos Existentes	16	43	55	70	66	41	291
Pozos en Uso	3	25	25	18	20	7	98
Agua Potable	0	4	3	5	3	2	17
Industria	0	0	3	12	1	1	17
Regadío	3	21	19	1	16	4	64
Volúmenes extraf- dos. (Miles m ³ /año)							
Total	2.102	7.520	9.604	16.029	8.110	2.250	45.615
Agua Potable	0	0	0	9.660	1.930	0	11.590
Industria	0	0	884	5.649	0	0	6.533
Riego	2.102	7.520	8.720	720	6.180	2.250	27.492

Estos valores muestran que sólo un tercio de los pozos perforados en el valle se explotan realmente, siendo el volumen bombeado anual de casi 46 Mm³, equivalente a 1,46 m³/s de caudal continuo.

1.3.5 Construcción y Ajuste del Modelo de Recursos Hídricos

Con el objeto de tener una herramienta flexible y sencilla de abordar, se desarrolló un modelo compuesto de un modelo de simulación de las aguas superficiales de todo el valle y 8 modelos hidrogeológicos. Los modelos hidrogeológicos, idénticos en cuanto a su base conceptual, se hicieron coincidir con la sectorización del valle hecha en el Estudio Hidrogeológico, salvo por la subdivisión en dos de los sectores La Puerta - Malpaso y Malpaso-Copiapó.

Se construyeron entonces los modelos hidrogeológicos y el hidrológico general, sobre la base de los antecedentes recogidos y elaborados según lo explicado en los capítulos precedentes. Luego se procedió al ajuste de los modelos, usando para ello la información de contraste disponible.

Los modelos hidrogeológicos se ajustaron sobre la base de hacer coincidir la situación modelada y la medida, dentro de un margen razonable, respecto de las variaciones piezométricas, los caudales de recuperaciones del río y de vertientes y las entradas y salidas subterráneas entre sectores vecinos. El ajuste se hizo a nivel anual para el período histórico de 25 años que va de 1962/63 a 1986/87. El modelo hidrológico se ajustó a través de la coincidencia de los caudales superficiales medidos y simulados en el río Copiapó. El ajuste se hizo a nivel anual para el período 1962/63 - 1986/87.

La tercera fase del ajuste consistió en volver a calibrar los parámetros característicos de cada modelo, de modo de hacer compatibles los modelos hidrogeológicos con el modelo hidrológico y de este último con los primeros.

Finalmente, para estudiar la sensibilidad del modelo a la escala de tiempo ocupada, se ajustó el modelo hidrológico a nivel mensual para el período 1983/84 - 1986/87, que es cuando mayores han sido los caudales superficiales en los últimos

- 10 -

30 años. Como resultado se obtuvo que el modelo hecho a escala anual representa razonablemente bien el fenómeno, siendo apropiada para el análisis requerido.

Sin ánimo de entrar en mucho detalle, las principales conclusiones que entregan los modelos sobre el funcionamiento del sistema hídrico del Valle del río Copiapó son las siguientes:

- Existe un amplio embalse subterráneo en el Valle del río Copiapó, con relleños cuyas potencias van desde 100 a más de 500 metros.
- 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 y, principalmente, del río, son las fuentes de recarga más importantes. No son influyentes los caudales subterráneos que aportan las quebradas laterales al valle.
- Cuando la recarga superficial es poca los niveles bajan, lo que se debe fundamentalmente a que el acuífero se vacía naturalmente hacia sus sectores más bajos producto de la alta transmisividad del acuífero. Hasta ahora el bombeo ha influido en mucho menor grado en los descensos de nivel, que el vaciamiento natural señalado.
- Actualmente la mayoría de los pozos perforados no supera los 80 metros de profundidad, lo que representa un porcentaje pequeño frente al espesor saturado disponible. Como consecuencia, los pozos actuales no pueden aprovechar una parte muy importante de la capacidad de regulación que tiene el embalse subterráneo.

1.3.6 Operación del Modelo de Recursos Hídricos

Una vez que ha quedado construido el modelo de recursos hídricos, se ha simulado el comportamiento del sistema frente a diferentes condiciones hidrológicas y de demanda.

Para estudiar otras hidrologías se ha generado 50 series estocásticas de 50 años de largo cada una, basadas en la estadística histórica de 45 años registrada en los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Los resultados obtenidos permiten establecer, bajo la perspectiva de este análisis, que la estadística histórica tendría una probabilidad de excedencia superior al 90%, es decir, la historia registrada en los últimos 50 años incluye un período de sequía altamente improbable. Se ha elegido entonces simular con la serie de caudales histórica, con el objeto de analizar la situación bajo condiciones desfavorables.

En cuanto a la demanda, se ha supuesto que se pondría en riego todas las superficies potencialmente regables aguas arriba de Copiapó y un alto porcentaje de ellas desde Copiapó hacia el poniente, llegando a cultivarse un total de 13.117 há. Por sectores la situación queda como se muestra en la tabla a continuación.

VALLE DEL RIO COPIAPOSUPERFICIES CULTIVADAS (HA)

SECTOR	1	2	3	4	5	6	TOTAL
Superf. Actual	522	1.626	2.018	1.731	1.425	608	7.930
Superf. Futura	750	2.134	2.887	2.311	2.923	2.112	13.117
Aumento de Superficie	228	508	869	580	1.498	1.504	5.187

- 12 -

Como se ve la demanda supuesta para el futuro considera incorporar al cultivo casi 5.200 há, de las cuales 3.000 há se ubicarían aguas abajo de Copiapó. En cuanto a las especies cultivadas, se ha supuesto que todos los cultivos tradicionales se sustituyen por uva de exportación.

Bajo estas condiciones se realizó la simulación del sistema hídrico del Valle del río Copiapó para un período de 50 años, tomando como norma básica el uso conjunto de los recursos superficiales y subterráneos. Para la simulación se ha considerado que las aguas subterráneas se usarán sólo como complemento de las superficiales, cuando las demandas sean superiores a los recursos que trae el río. El Embalse Lautaro, por su parte, operará también como una reserva, entregando sus aguas sólo cuando los recursos superficiales sean insuficientes.

Los resultados obtenidos se pueden resumir en lo siguiente:

- Frente a la situación actual hay cambios importantes sólo aguas abajo de Malpaso, fundamentalmente respecto de las recuperaciones al río que, durante los años secos, casi desaparecen frente a la ciudad de Copiapó y en Piedra Colgada.

Esto no debe extrañar ya que el bombeo adicional que permite regar, con seguridad 100%, las explotaciones simuladas, obtiene sus recursos del almacenamiento de la napa y, por lo tanto afectan a las recuperaciones al río. Debe tenerse en cuenta sin embargo, que con ello es posible aumentar en 2200 há la superficie regada aguas arriba de Copiapó y en 1500 há la superficie de riego entre Copiapó y Piedra Colgada.

- En cuanto a las fluctuaciones máximas de los niveles subterráneos, los valores obtenidos son bastante similares a los registrados históricamente. Sólo aguas abajo de Paipote comienzan a superarse las fluctuaciones históricas, a lo que se une un descenso permanente de niveles, lo que no ocurre en

- 13 -

el resto del valle. Estos descensos no superan los 30 metros, cifra comparable con los 40 metros de fluctuación histórica que se ha dado en algunos sectores del valle aguas arriba de Paipote.

En síntesis el acuífero es sensible a la explotación adicional simulada, como es razonable que ocurra. Pero, mirado desde el punto de vista global de los recursos hídricos del valle, los superficiales y subterráneos en conjunto, un buen manejo de las aguas permitiría aumentar sustancialmente la superficie actual cultivada y explotarla con seguridad durante 50 años, aún bajo condiciones hidrológicas extremadamente adversas. Esto obliga, claro, a que el riego que se abastecía de las recuperaciones en el sector bajo del valle, deba regar ahora con agua de pozo.

Finalmente, los resultados expuestos son válidos a la luz de la situación hidrológica considerada que, como se ha dicho, es extremadamente desfavorable. Por lo tanto, bajo condiciones más favorables las disminuciones en las recuperaciones y los descensos de niveles deberían ser mucho menos importantes.

- 14 -

1.4 Conclusiones y Recomendaciones

1.4.1 Conclusiones

El estudio realizado permite asegurar que el valle del río Copiapó dispone de un gran embalse subterráneo, con una capacidad de regulación aún poco aprovechada.

El funcionamiento del embalse subterráneo se sintetiza en una recarga principal proveniente de las infiltraciones del río Copiapó y sus afluentes así como del sistema de riego, y descargas que provienen del bombeo de pozos, las recuperaciones del río y vertientes y la evaporación y evapotranspiración en zonas de vegas. Los aportes subterráneos desde quebradas laterales como Pai-pote, Cerrillos y Chamonate, por nombrar las más importantes, son decididamente poco relevantes frente a las fuentes de recarga ya señaladas.

Actualmente, cuando la recarga es poca, bajan los niveles de la napa. Esto se debe fundamentalmente al desplazamiento subterráneo del agua hacia los sectores más bajos del valle y no a las extracciones del bombeo de pozos. Como conclusión se ha obtenido que el régimen hidrológico del río Copiapó y sus afluentes y la alta permeabilidad del relleno que forma el embalse subterráneo son los factores determinantes en el funcionamiento del acuífero, muy por sobre lo que significan las extracciones por bombeo de pozos.

El modelo desarrollado permitió simular el comportamiento del sistema frente a condiciones hidrológicas y de explotación ficticias. La simulación efectuada se hizo considerando una hidrología igual a la histórica, que el análisis de caudales mostró como una situación de sequía altamente improbable, y una condición de explotación que llevó la actual superficie cultivada de 8000 há a una de 13.000 há. Los resultados obtenidos señalan que en los sectores altos del valle hasta La Puerta, casi no habría cambios respecto de la situación actual. Aguas abajo de esta localidad empiezan a notarse algunos efectos, siendo el más

- 15 -

importante la disminución de las recuperaciones en el sector de Malpaso, Copiapó y Piedra Colgada, cuando se tiene largos períodos de sequía. Esto era de esperar, ya que sin duda se está modificando las condiciones originales de funcionamiento del acuífero. No obstante la disminución de recuperaciones, que perjudica a los regantes que usan esas aguas, se puede reemplazar por el bombeo de pozos habilitados con ese fin y administrados por todos los usuarios del sistema.

Se ve entonces que los sistemas hídricos superficial y subterráneo están claramente relacionados y que no es posible tratarlos como elementos separados. En efecto, las infiltraciones del río significan una pérdida de aguas superficiales, pero son las que alimentan el acuífero. Por otra parte, el bombeo del embalse subterráneo genera disminución de las vertientes y recuperaciones al río, pero permite explotar un volumen embalsado considerablemente mayor que las vertientes que afecta. Las vertientes son análogas a lo que en un embalse superficial es el vertedero de rebalse y, está claro, cuando deja de haber rebales, aún queda mucha agua embalsada disponible.

Se concluye que una explotación más intensa del embalse subterráneo permite un mejor aprovechamiento de las aguas como un recurso hídrico global, sin que en un horizonte de 50 años y frente a condiciones hidrológicas extremadamente secas vayan a producirse descensos realmente importantes en los niveles de la napa. Ahora, sin duda que esta política de uso significa que algunos usuarios del agua se vean afectados. No obstante en esos casos se podrá restituir las aguas con el bombeo de pozos habilitados con ese fin.

La consecuencia lógica de lo dicho anteriormente es que las aguas deben manejarse como un todo, lo que hace necesario un organismo que controle y analice periódicamente el estado del sistema y regule el funcionamiento de los pozos que deban restituir disminuciones de las vertientes. Este organismo deberá además contar con la participación activa de todos los usuarios del agua, ya que es responsabilidad de todos velar y tutelar por el mejor aprovechamiento del recurso.

- 16 -

Finalmente, estas conclusiones se apoyan sobre dos aspectos básicos que vale la pena comentar.

La hidrología considerada en la simulación, se ha dicho incluye una condición de sequía poco probable. Esto se basa en los antecedentes existentes y, como siempre en hidrología, no es un asunto cierto sino probabilístico. Por lo tanto se recomienda realizar una reevaluación periódica del sistema, incorporando cada vez los antecedentes hidrológicos recopilados hasta la fecha. Actualmente el embalse subterráneo se encuentra en un estado que podría llamarse "lleno". Esto garantiza un abastecimiento seguro de agua por una serie de años, aún cuando sobreviniera una sequía importante. No obstante, será igualmente necesario seguir estudiando y evaluando el sistema hídrico, para llegar a conocer mejor su funcionamiento y poder decidir las acciones más convenientes de realizar en cada época.

El otro aspecto básico considerado es la superficie potencialmente cultivable. Para la simulación se ha supuesto que las actuales 8000 há cultivadas suben a 13.000 há y que en el futuro casi todo el valle debería dedicarse a la uva de exportación. La superficie potencial cultivable adoptada constituye un límite físico a la extensión máxima del valle, incluyendo el piedemonte y las quebradas donde llegan al valle. Efectivamente, no hay más tierra cultivable en el Valle del río Copiapó y las demandas por agua de riego tienen un límite claro y definido. Sólo queda entonces la posibilidad de la exportación de aguas fuera del valle, alternativa que actualmente no se visumbra económica. En realidad hoy se efectúa en pequeña escala con el abastecimiento de agua potable de la aducción Caldera-Chañaral, pero este es un caso excepcional y con un crecimiento lento y limitado en un futuro de corto y mediano plazo. Resumiendo, las demandas de agua en el valle tienen un límite claro, demandas que pueden ser abastecidas por el sistema hídrico del valle.

1.4.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que siguen a continuación se refieren todas a las mediciones y controles requeridos para poder administrar adecuadamente los recursos hídricos del valle.

El modelo desarrollado representa adecuadamente el funcionamiento del sistema hídrico del valle, pero su precisión es función de la información que se ha tenido disponible para alimentarlo. Un buen manejo de los recursos hídricos en el futuro obliga a mejorar la precisión lograda. Para ello se requiere llevar un sistema de medidas periódicas, de acuerdo al detalle que sigue:

a) Control Fluviométrico

Se debe mantener el control en todas las estaciones fluviométricas que actualmente están activas. A ellas debe sumarse tres nuevas estaciones en el río Copiapó que deberían ubicarse en los siguientes lugares:

- Río Copiapó aguas arriba Embalse Lautaro
- Río Copiapó en Alianza
- Río Copiapó en Piedra Colgada

El objetivo de las nuevas estaciones es conocer con mayor precisión las pérdidas y recuperaciones en el río.

b) Control de Niveles Estáticos de la Napa

Debe mantenerse un control mensual en todos los pozos que se miden actualmente y en los que se han agregado a raíz del presente estudio. Estos últimos son los que individualiza en el capítulo 8 de este Tomo.

- 18 -

c) Catastro de Cultivos

Sobre la base de los planos existentes y dada la dinamicidad que hay en la extensión y variedades de cultivos, se necesita contar con un catastro anual de las superficies cultivadas por rubro.

d) Medidas de Pérdidas y Recuperaciones

Es necesario realizar corridas de aforo en los ríos y canales del valle, para determinar el régimen de pérdidas y recuperaciones. Estas corridas deberán hacerse una vez al mes.

f) Control de Caudales Derivados por Canales

Esta acción tiene por objeto conocer los volúmenes de agua superficial de rivados para riego y compararlo con los consumos de los cultivos. También podrá servir para la medida de pérdidas y recuperaciones, si se instala secciones de control adecuadas con vertederos que permitan medir con preci sión los caudales. En todo caso el control de caudales deberá hacerse al menos una vez al mes.

g) Medidas de Infiltración en Canales de Riego

Son necesarias para analizar la eficiencia del sistema de riego y conocer la magnitud de las recargas por este concepto hacia el acuífero. Deberá hacerse corridas de aforo diferenciales al menos trimestralmente.

h) Calidad Química de Agua

Se recomienda una medición semestral de la conductividad eléctrica de las aguas en los pozos donde sea posible y en las aguas superficiales del río, en los sitios donde se ubican las estaciones fluviométricas. Una vez al año deberá hacerse al menos tres análisis químicos, de los elementos más representativos a las aguas superficiales de distintos puntos en el río y tres a las aguas subterráneas de diferentes pozos.

- 19 -

Adicional a estas mediciones periódicas se recomienda efectuar una explotación de los estratos más profundos del embalse subterráneo, actualmente muy poco estudiados. Efectivamente, los pozos construídos hasta la fecha en general no superan los 70 u 80 metros, y sólo dos o tres han llegado hasta los 140 metros de profundidad. La geofísica realizada en el marco del presente estudio sugiere la existencia de un potente relleno, que superaría en algunas zonas los 500 metros. Naturalmente que tener una confirmación de este hecho y conocer la capacidad de explotación de los estratos más profundos del embalse subterráneo es de gran interés. Por ello es que se recomienda perforar pozos de estudio de una profundidad no menor de 200 metros, los que deberían ser habilitados cuidadosamente de manera de poder probar las posibilidades de explotación de los estratos más profundos.

Finalmente en la medida que se vaya teniendo más información del sistema hídrico será recomendable incorporar al modelo desarrollado los nuevos datos obtenidos con el objeto de mejorar su precisión y, en consecuencia, obtener predicciones más ajustadas a la realidad.

- 20 -

2. INTRODUCCION AL MODELO DE RECURSOS HIDRICOS

El Valle del río Copiapó, constituye un potencial de desarrollo agrícola, con un aumento progresivo de su superficie regada enmarcado dentro de una tendencia al crecimiento. Todo ello como producto de la alta rentabilidad de sus cultivos en especial la uva de mesa para exportación. El factor limitante lo constituye el recurso agua.

El recurso agua se presenta dentro de sus dos formas, a saber: aguas superficiales y aguas subterráneas. Con respecto a las primeras se dispone de un conocimiento adecuado como para definir su cuantía en los años, con distinta probabilidad de ocurrencia. No obstante existen dos grandes incógnitas que es necesario dilucidar con el objeto de hacer un uso racional de los recursos de agua y además para que la Dirección General de Aguas posea los elementos de juicio necesarios para el otorgamiento de los derechos de agua correspondientes. El primero de los factores desconocidos se refiere a las condiciones de existencia y las posibilidades de explotación de las aguas subterráneas y el segundo al mecanismo de interacción cualitativo y cuantitativo entre las aguas superficiales y subterráneas.

2.1. Conocimiento Hidrogeológico del Valle

En una etapa anterior en la confección del presente estudio, se hizo entrega de un informe denominado Hidrogeología General del Valle.

Dicho estudio comprende un análisis detallado de las condiciones de existencia del agua subterránea en el valle, del funcionamiento hidrológico de los embalses subterráneos y sus posibilidades de explotación. Por razones de orden práctico y atendiendo a una mejor presentación se subdividió el valle en seis sectores, teniendo como límites áreas naturales que coincidían con estrechamientos del valle.

- 21 -

Los sectores en que se dividió el valle son los siguientes;

- Ríos Manflas, Jorquera y Pulido, hasta Copiapó en Lautaro.
- Embalse Lautaro - La Puerta
- La Puerta - Mal Paso
- Mal Paso - Copiapó
- Copiapó - Piedra Colgada
- Piedra Colgada - Angostura

Para cada sector se confeccionó un informe independiente, teniendo en cuenta que en el futuro, con miras a un manejo de los recursos, el valle deberá asimismo dividirse en sectores, del mismo modo que para el manejo de las aguas superficiales se divide en secciones.

Los capítulos que contempla cada informe de sector de valle se refieren a:

- Geología
- Características Geométricas del Embalse Subterráneo
- Características Hidráulicas del Embalse Subterráneo
- Características de la Napa, que incluye a su vez
 - Profundidad del nivel estático
 - Sentido de escurrimiento
 - Variación temporal del nivel estático
 - Calidad Química
- Funcionamiento del Embalse Subterráneo
- Balance Hídrico

- 22 -

Se incluyen además los anexos con los datos de base empleados y un total de 12 planos que constituyen documentos gráficos que se explican por si solos y corresponden a:

- Estratigrafía de los Sondeos Existentes
- Geología de Superficie
- Isoprofundidad del Basamento Rocoso
- Perfiles Transversales Hidrogeológicos
- Isopacas (isoespesor de acuífero)
- Isoprofundidad del Nivel Estático
- Caudales Específicos
- Isotransmisibilidad
- Calidad Química
- Conductividad

Todo lo anterior constituye un análisis detallado y completo de cada uno de los embalses subterráneos existentes en el Valle del río Copiapó.

2.2. Relación entre las Aguas Superficiales y Subterráneas

Los recursos de agua son uno solo, no obstante se tratan a veces en forma independiente las aguas superficiales de las subterráneas, como un mero proceso de análisis, pero que en el estudio del funcionamiento de cada uno aparecen los elementos comunes que ligan a ambas. Antes de entrar a detallar estos elementos comunes conviene puntualizar las grandes diferencias entre ellos, que inciden en el manejo de los recursos.

En primer lugar, la velocidad de circulación de las aguas superficiales se mide en metros por segundo, no obstante la de las aguas subterráneas se mide en metros por día. Esto que aparece como algo tan sencillo tiene importantes repercusiones a la hora de considerar su empleo. Ello significa que las aguas subterráneas tienen una gran inercia en

- 23 -

comparación con las aguas superficiales, sólo así se explica que los procesos de recarga y descarga de las aguas subterráneas en el valle del río Copiapó tengan lugar en lapsos de varios años, no obstante una onda de crecidas del río tarda sólo horas en recorrer todo el valle y alcanzar el mar.

En segundo lugar, las aguas subterráneas se encuentran ligadas en su existencia a verdaderos embalses subterráneos que las alojan en su interior, embalses que por lo demás son de considerable magnitud lo que unido a la ya mencionada inercia de las aguas subterráneas, constituyen la posibilidad de ser empleadas como elementos de regulación hiperanual. Este aspecto cobra especial importancia en el caso del valle del río Copiapó, donde la hidrología superficial se ha caracterizado por presentar ciclos de años húmedos interrumpidos por largos períodos de sequía. Esto muestra la necesidad de contar con una importante capacidad reguladora como la que tiene el embalse subterráneo.

Las relaciones más importantes que existen entre las aguas superficiales y subterráneas son:

- Procesos de infiltraciones y recuperaciones desde y hacia el lecho del río y hacia y desde el acuífero respectivamente.
- Procesos de infiltración desde el sistema de riego efectuado con aguas superficiales.

2.2.1 Mecanismos de Infiltración desde el río

Existe una continuidad hidráulica entre el lecho del río y el embalse subterráneo. Esto hace que cuando el nivel del agua del río es superior al nivel de saturación del embalse subterráneo, el agua infiltra desde el río hacia el acuífero y en caso contrario el agua descarga desde el acuífero hacia el río.

La cantidad de agua que es capaz de pasar en uno u otro sentido, depende de los siguientes factores:

- 24 -

- Diferencia relativa de cotas entre el río y el agua subterránea (Carga hidráulica)
- Permeabilidad del lecho del río
- Permeabilidad del relleno que conforma el acuífero
- Superficie de contacto del agua superficial con el acuífero
- Estado de humedad del suelo

En relación con la diferencia de cotas, cabe citar que cuando hay descargas desde el acuífero éstas son directamente proporcionales al desnivel entre ambas. No obstante en el caso de la infiltración desde el lecho del río, es proporcional sólo cuando el nivel de saturación del agua subterránea se encuentra cercano al lecho del río y hasta unos 4 metros por debajo del mismo. Para niveles más profundos se produce un proceso de percolación, y en tal caso el caudal que percola no depende de la diferencia de cotas entre ambas aguas.

La permeabilidad del lecho del río, es un elemento fundamental en el proceso de infiltración, porque constituye el primer obstáculo que debe salvar el agua subterránea para pasar hacia el acuífero. Esta permeabilidad aparentemente decrece con el tiempo como producto de la colmatación a que se ve sometido el lecho al depositarse en él los sólidos en suspensión. Sin embargo, en las épocas de crecidas, este material es removido bruscamente, restituyéndose el valor primitivo de la permeabilidad. Una vez que el agua atraviesa el lecho, sigue escurriendo hacia abajo de acuerdo con el gradiente hidráulico existente y con la permeabilidad de la formación acuífera. Normalmente para el caso del valle del río Copiapó, esta permeabilidad es superior o igual a la del lecho del río.

La cantidad de agua que pasa desde el río hacia el acuífero, es directamente proporcional a la superficie de contacto, es decir ésta aumenta mientras mayor sea la superficie. La situación es enteramente análoga

- 25 -

al proceso de infiltración artificial estudiado en lagunas especiales para tal efecto.

Los tres parámetros antes descritos son los que rigen el proceso de infiltración y sobre la base de estas consideraciones se ha estructurado el proceso de simulación que rige las relaciones río-acuífero.

Existiría por lo tanto una cantidad de agua que pasa al acuífero como infiltración desde el río, aspecto que de alguna manera quedará reflejado en la variación de niveles del agua subterránea. Durante el proceso de simulación se ajustarán los valores de infiltración de acuerdo con dos elementos de contraste, a saber, los valores puntuales medidos en diferentes fechas para distintos sectores del río y las variaciones de niveles observados. Todo esto basado además en los caudales del río, los que se diferenciarán para escurrimiento normal y eventual. En el primer caso la superficie de contacto es menor y corresponde al lecho habitual del río, mientras que en el segundo caso se trata de un lecho bastante más extenso correspondiente al área de inundación eventual del río.

El proceso de descarga desde el acuífero hacia el río, tiene lugar cuando el nivel del agua subterránea supera al nivel del lecho del río y se rige por el mismo mecanismo que en el caso anterior. Existen algunas diferencias que cabe señalar, las que se refieren a la permeabilidad del lecho que es casi constante, ya que la diferencia de presiones impide la depositación de elementos finos que colmatan el lecho. Por otra parte las zonas en que se produce este fenómeno están marcadas en la geomorfología del terreno, ya que corresponden a áreas con vegetación freatofita.

- 26 -

Existiría en consecuencia una cantidad de agua que pasa desde el embalse subterráneo hacia el río, como descarga del primero. Durante el proceso de simulación se trata de conseguir que los sectores por donde sale esta agua correspondan a lo que en la realidad figura como zona de vertientes. Además desde el punto de vista cuantitativo, las salidas por vertientes deben coincidir con los valores de recuperación, medidos en el río en fechas esporádicas. Por otra parte, los valores obtenidos a partir de los caudales que pasan por las diferentes secciones del río, llevan un caudal aportado por las recuperaciones, valores que sirven como elementos de contraste dentro del proceso de simulación.

2.2.2. Proceso de Infiltración desde el Sistema de Riego

Otra de las relaciones importantes entre las aguas superficiales y subterráneas, se refieren al proceso de riego. Las aguas derivadas desde el río, circulan por canales principales, luego por canales secundarios, después son aplicadas al predio para producir un regadío a nivel predial. Las aguas no utilizadas son devueltas al río, por los canales matrices o secundarios.

En todo este proceso el agua se encuentra en contacto con la parte superior del acuífero, el cual es permeable y como el nivel de saturación del agua subterránea, se encuentra por debajo, se produce el paso de agua superficial hacia el embalse subterráneo.

Este proceso de infiltración tiene lugar de tres formas diferentes, a saber:

- Infiltración en canales matrices
- Infiltración en canales secundarios
- Infiltración como producto del proceso de regadío a nivel predial.

- 27 -

La infiltración en canales matrices, ha sido comprobada mediante la realización de aforos diferenciales por tramo de canal, de estos valores se han obtenido coeficientes de infiltración por kilómetro, los que se traducen en porcentaje del caudal. Esto ha podido considerarse así debido a la relativa homogeneidad del tipo de terreno por el que circula el agua.

La infiltración en canales secundarios, es muy difícil de medir por no ser constantes los caudales, ya que su funcionamiento es esporádico. De acuerdo con ello y basado en experiencias realizadas en otros valles, tales como el del Choapa y el Elqui, se ha considerado un valor similar al del regadío predial, ya que se encuentra directamente relacionado con éste.

La infiltración en el predio, corresponde a un porcentaje del agua aplicada y se produce porque el riego no es 100% eficiente, así pues una parte del agua aplicada infiltra, percola y alcanza el nivel de saturación del agua subterránea. En el capítulo referente a los datos de entrada, se encuentra explicado el valor de dicho coeficiente, el que en general no supera el 20%.

2.3. Modelo de Recursos Hídricos

Una manera de integrar todos los procesos que afectan a la existencia de los recursos de agua, como también las interrelaciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas, es a través de la construcción de un modelo matemático que represente numéricamente todas las características físicas del sistema y permita en consecuencia poseer una herramienta de cálculo que posibilite conocer las respuestas del sistema frente a diferentes condiciones externas. Las respuestas

- 28 -

del sistema se refieren a los caudales superficiales escurrentes en las diferentes secciones del río , los caudales derivados y derivables para regadío, los valores de infiltración y recuperaciones del río para distintos tramos, como también a la posición del nivel de saturación del agua subterránea y su variación en el tiempo.

El proceso de simulación debe hacerse en dos etapas, que coinciden con la discusión realizada en los apartados anteriores. En primer lugar, se trata de representar numéricamente la situación de los embalses subterráneos y en segundo lugar, integrar el funcionamiento de éstos dentro de un modelo hidrológico general del valle en que figuren los caudales superficiales y su variación espacial y temporal.

2.4. Antecedentes Empleados

En el informe que sigue a continuación se describen en qué consisten y cómo se han ajustado los modelos hidrogeológicos y el hidrológico. En él se cita regularmente los que se han denominado Estudios Básicos de este proyecto, que han sido el punto de partida de la modelación de los recursos hídricos. Los Estudios Básicos señalados se han entregado en el Tomo N° 2, denominado Estudios Básicos, y los Tomos Anexos 1 al 7. El citado Tomo N° 2 contiene los estudios de hidrología, demandas de agua e hidrogeología general del valle. Los Tomos Anexos contienen a su vez lo siguiente:

<u>TOMO ANEXO N°</u>	<u>NOMBRE</u>
1	Infraestructura de Riego
2	El Embalse Subterráneo del sector Piedra Colgada - Angostura
3	El Embalse Subterráneo del sector Copiapó Piedra Colgada.

- 29 -

<u>TOMO ANEXO N°</u>	<u>NOMBRE</u>
4	El Embalse Subterráneo del sector Malpaso-Copiapó
5	El Embalse Subterráneo del sector La Puerta-Malpaso
6	El Embalse Subterráneo del sector Embalse Lautaro - La Puerta
7	El Embalse Subterráneo del sector Manflas, Jorquera y Pulido

2.5 Nuevos Antecedentes Aportados por la Modelación

Es necesario destacar que la información incluida en los estudios señalados ha sido la base de los modelos desarrollados. Sin embargo, como es natural, el mejor conocimiento de la Hidrogeología e Hidrología del valle que ha permitido el ajuste de los modelos, ha cambiado varias de las condiciones iniciales. En particular debe destacarse que algunas materias tratadas en el tomo de Infraestructura de Riego como las infiltraciones del río, las infiltraciones del Embalse Lautaro y las filtraciones del mismo embalse, han sido modificadas por los modelos. En el caso de la hidrogeología se ha cambiado los valores de la transmisividad y coeficiente de almacenamiento incluidos en los Estudios Básicos. En el futuro, por lo tanto, deberá considerarse como más fidedignos los resultados obtenidos de la modelación, superando los de los Estudios Básicos que han sido los mejores que se pudo lograr con el conocimiento que en ese momento se tenía. De todas maneras, en las materias en que no haya nuevos antecedentes producto de los modelos, se mantienen los de los Estudios Básicos como los más confiables.

- 30 -

3. OBJETO DEL MODELO

Se pretende contar con un instrumento de cálculo que represente la realidad física del sistema hidrológico del Valle del río Copiapó. Se entiende por realidad física al conjunto de variables que intervienen en el proceso de entradas y salidas de agua del valle, tanto superficiales como subterráneas. Se entiende por sistema hidrológico al conjunto de ecuaciones que rigen el movimiento del agua y las relaciones entre ellas.

Las ecuaciones fundamentales en que se basan las relaciones se refieren a la continuidad de masas y el escurrimiento en medios permeables. Existen además otra serie de relaciones empíricas que se emplean para definir aspectos específicos del movimiento.

El objeto del modelo es integrar dentro de un solo esquema de cálculo todo el proceso por el cual se rige la existencia y el movimiento del agua del valle, de manera de obtener una herramienta de cálculo que sirva para predecir el comportamiento del sistema frente a diferentes situaciones externas.

Las situaciones externas más importantes que se requiere analizar, son las siguientes:

- Respuesta del sistema frente a distintos años hidrológicos que generen diferentes valores de la escorrentía superficial.
- Respuesta del sistema frente a distintos modos de empleo de las aguas superficiales y subterráneas, en particular a las formas de regadío y al bombeo de aguas subterráneas.
- Predicción de los estados inicial y final del sistema hidrológico para las distintas formas de explotación de los recursos de agua del valle, bajo las distintas situaciones hidrológicas.

- 31 -

- Los estados inicial y final se refieren a volúmenes embalsados en embalse Lautaro, niveles máximos y mínimos de agua por sectores de valle y valores de pérdidas y recuperaciones del río por sectores de valle.
- Las predicciones deben ser suficientemente explícitas como para que los encargados del manejo del sistema hidrológico, puedan tomar las medidas que estimen convenientes y orientar en lo que respecta al mejor uso de los recursos y prevenir las bruscas disminuciones de disponibilidades de agua que puedan presentarse.
- Por otra parte debe dar los elementos de juicio técnico necesarios para que la Dirección General de Agua otorgue los derechos de agua tanto eventuales como permanentes, de acuerdo con el conocimiento hidrológico del valle.
- Por otra parte el modelo debe ser lo suficientemente flexible, como para permitir un paulatino aumento de su precisión, basado en los nuevos datos que se obtengan de la observación y estadística de las principales variables del sistema.
- De acuerdo con lo anterior, el modelo entregará asimismo una pauta de las variables que deben continuar midiéndose o comenzar a medirse, como también de la periodicidad de las medidas y de los informes de análisis y síntesis que deban realizarse periódicamente.
- Finalmente el modelo entregará las pautas sobre su futuro tratamiento para aumentar la precisión del mismo y en consecuencia poder ajustar en mejor forma las predicciones que se efectúen.

- 32 -

4. MODELOS HIDROGEOLOGICOS4.1. Aspectos Generales

Con el fin de cumplir con el objeto del modelo de recursos hídricos, se debe en primer lugar proceder a construir modelos hidrogeológicos que representen fielmente la realidad física de las condiciones de existencia del agua subterránea en el valle y que sean asimismo capaces de definir las condiciones de explotación de ésta.

El valle del río Copiapó desde el punto de vista geomorfológico es estrecho y alargado, tiene una longitud de 169 kilómetros en el sector comprendido entre las partes bajas de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido y la localidad de Angostura. El ancho medio para el sector aguas arriba de Copiapó es menos de 1 Km. y para el sector aguas abajo del mismo, sube a 4 Km. Esta situación hace que la modelación, basada en celdas rectangulares, sea difícil de realizar y casi imposible para tramos largos. A ello se agregan los cambios de dirección que tiene el río en grandes tramos. Lo anterior ha obligado a subdividir el valle en ocho sectores en vez de seis, que fueron los estudios hidrogeológicos. Esto se consiguió mediante la subdivisión en dos partes de dos sectores, a saber:

- El sector La Puerta-Mal Paso se subdividió en La Puerta - Potrero Seco y Potrero Seco - Mal Paso y el sector Mal Paso Copiapó se subdividió en Mal Paso - Paipote y Paipote - Copiapó.

- 33 -

4.2 SELECCION DEL MODELO A EMPLEAR

La primera etapa en la construcción de un Modelo Hidrogeológico es seleccionar el tipo de modelo a emplear.

Luego, partiendo de las características particulares del acuífero a modelar, se debe adecuar las ecuaciones que representan el fenómeno y discretizarlas espacial y temporalmente para hacer posible su resolución mediante métodos numéricos.

En este caso se ha seleccionado como base un modelo transitorio de diferencias finitas, que en esta etapa se ha adecuado para ser capaz de simular el comportamiento del embalse subterráneo del valle del río Elqui en el sector Las Rojas-Punta de Piedra. El modelo elegido es enormemente versátil y permite simular acuíferos de una o más capas, con una discretización espacial y temporal tan pequeña como permitan los antecedentes de terreno recopiladas.

Además el modelo está capacitado para considerar cualquier fuente de recarga o descarga del acuífero, ya sea infiltraciones de cualquier tipo, como las salidas al río, descarga por vertientes, bombeos o extracción de agua por drenes.

Se ha tomado como base el modelo de Prickett y Lonquist al cual se le han hecho algunas modificaciones que permiten operar en la forma antes descrita. Se adjunta un listado del programa el cual se explica por si solo. Internamente se le ha denominado SIMAC-4. Este modelo está suficientemente probado en varias simulaciones ejecutadas por nuestra firma, en los valle de Choapa, Elqui, Casablanca, Maipo-Mapocho y Chacabuco. El nivel de precisión que se obtiene está explicado en la parte correspondiente a la explicación del modelo, particularmente en la escala de tiempo que emplea para las iteraciones.

- 34 -

4.3. Discretización, Condiciones de Borde y Elementos de Contraste

4.3.1. Discretización

Dado que un modelo matemático necesita efectuar una correspondencia numérica entre una realidad física y un valor de cada parámetro se requiere dividir el elemento físico en un número determinado de celdas, de modo de asignar un valor a cada parámetro en cada celda, esto se denomina discretización espacial.

Del mismo modo se requiere indicar la escala de tiempo en que operará el modelo, es decir definir el lapso en el cual se van a analizar las variaciones de las variables consideradas.

Para el caso que nos ocupa, en el valle del río Copiapó se han efectuado divisiones del embalse subterráneo en celdas de tipo rectangular cuyos anchos varían entre 200 metros y 3.000 para los diferentes casos. El ancho y largo de cada celda es función de varios aspectos entre los cuales cabe señalar los siguientes:

- Homogeneidad o Heterogeneidad del embalse subterráneo.
- Situación de las condiciones de borde
- Empleo actual del embalse y posibilidades de uso futuro

De acuerdo con lo anterior se ha procedido a dividir en celdas rectangulares cada uno de los ocho sectores del valle en que se ha subdividido para su modelación. Ello queda de manifiesto en los planos respectivos y se traduce en el siguiente número de mallas para cada sector.

- 35 -

<u>SECTOR</u>	<u>N° DE MALLAS</u>
Manflas, Jorquera, Pulido	1.088
Lautaro - La Puerta	1.088
La Puerta - Potrero Seco	462
Potrero Seco - Mal Paso	1.160
Mal Paso - Paipote	240
Paipote - Copiapó	406
Copiapó - Piedra Colgada	527
Piedra Colgada - Angostura	348

En cuanto a la discretización temporal, se ha optado por un lapso de 1 año con el objeto de emplear toda la estadística de variación piezométrica y efectuar una simulación acorde con el comportamiento del embalse subterráneo el cual lo hace como un embalse de regulación hiperanual. Por otra parte, de la observación de variación de niveles observada en la confección de los estudios hidrogeológicos se ha podido comprobar que las variaciones a escala mensual carecen de significación en el comportamiento del embalse subterráneo y que sólo son importantes las variaciones a nivel anual. Tal y como se dijo en apartados anteriores de este informe los descensos y ascensos de niveles tienen lugar en forma paulatina en lapsos que varían entre los 5 y los 8 años. Cuando se ha dispuesto de un registro mensual a lo largo de un año, se ha considerado el valor promedio de las medidas, para asignárselo al año correspondiente.

4.3.2. - Condiciones de Borde

Las condiciones de borde del modelo matemático constituyen un aspecto fundamental a definir y se refieren tanto a los límites físicos del embalse subterráneo, como a las relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.

- 36 -

De acuerdo con lo anterior se han tenido en cuenta tres tipos de condiciones de borde, a saber:

- Límites laterales y de fondo del embalse subterráneo
- Situación relativa del río dentro del acuífero
- Situación de las vertientes

Los límites laterales, comprenden el contacto en planta entre el relleno detrítico permeable y la roca basal impermeable. Así pues las mallas serán de relleno o de roca, teniendo las últimas permeabilidad nula. Ahora bien para simular la situación de borde se supone un coeficiente de almacenamiento infinito, lo que provoca una inamovilidad del nivel piezométrico en la malla de borde.

El límite de fondo está implícitamente tenido en cuenta en los valores de la Transmisibilidad. La condición de borde en ambos casos se simula de manera de impedir el paso de agua desde y hacia la roca.

El río constituye otra condición de borde, pues existe un nivel de agua en su lecho, de modo que al variar el nivel del agua subterránea se puedan producir los pasos de agua hacia y desde el acuífero. El caudal que puede pasar a través de la capa del lecho viene dada por la expresión de Prickett, y Lonquist, que dice:

$$Q = \frac{P}{m} \cdot h \cdot s \text{ en que}$$

Q = Caudal en m³/día

m = espesor de la capa en m

h = diferencia de nivel entre el acuífero y el río en metros

s = superficie del río en la malla considerada expresada en m²

P = permeabilidad del lecho del río (m/día)

- 37 -

Para el caso de la cuantía de los volúmenes entregados por las vertientes, el modelo calcula en la forma antes indicada, el volumen de vertientes de cada malla en el lapso considerado. Se considera que hay ajuste cuando los valores de vertientes coinciden los calculados con los reales.

Se deja constancia que para que se considere ajustado un determinado modelo, se deben cumplir simultáneamente todas y cada una de las tres condiciones antes anotadas.

De acuerdo con lo anterior, es fácil comprender, que la bondad del ajuste del modelo depende en forma directa de la cantidad y calidad de información de contraste de que se pueda disponer.

En el caso del valle del río Copiapó, se ha dispuesto de un registro de niveles piezométricos de 25 años de duración y de buena calidad, lo que es una garantía del adecuado ajuste del modelo.

La ubicación de vertientes es asimismo una condición que indica un buen ajuste. En cuanto a los volúmenes de vertientes, las mediciones que se tienen son esporádicas y no continuas, por lo tanto es el elemento más débil como contraste. No obstante se debe considerar que estas vertientes tienen pocas variaciones bruscas de caudal.

- 38 -

Las vertientes constituyen otra condición borde, la que se ha simulado poniendo la cota del terreno como límite máximo al que puede ascender el nivel estático, y se ha colocado una condición interna en el modelo tal que toda altura extra de agua sobre dicho límite se transforma en volumen descargado según el coeficiente de almacenamiento correspondiente.

Debe dejarse en claro que en las zonas de vegas se combinan dos fenómenos diferentes que son los afloramientos de agua desde la napa y la evapotranspiración de la vegetación freatófita. Ambos están directamente ligados a la profundidad de la napa respecto del nivel de terreno y quedan bien modelados como vertientes, del modo como se ha indicado en el párrafo anterior.

4.3.3 Elementos de Contraste

El calaje del modelo consiste en ajustar los parámetros hidrogeológicos por medio de iteraciones sucesivas. Para ello se requiere tener elementos de comparación entre los valores observados en terreno y los valores calculados por el modelo. Se trata en consecuencia de llegar a una concordancia entre ambos.

Los elementos de contraste empleados se refieren a:

- Variaciones del nivel estático
- Ubicación de las vertientes
- Cantidades de agua entregadas por las vertientes

En el caso de las variaciones de nivel estático, se dispone de un cierto número de pozos con registro de niveles en ciertas mallas, a esas mallas se les pide la variación del nivel calculado y en cada pasada de ajuste se dibujan ambas en el mismo gráfico, el ajuste termina cuando existe un adecuado paralelismo entre ambas.

- 39 -

En el caso de la ubicación de vertientes, se dispone físicamente de las mallas en que están contenidas las vertientes que existen en el terreno. Al modelo se le da la posibilidad de que existan vertientes en cualquier malla. El proceso de ajuste termina cuando hay coincidencia entre la realidad y lo que se obtiene del modelo.

4.4 DESCRIPCION DEL MODELO Y MANUAL DE OPERACION

4.4.1 Aspectos Generales

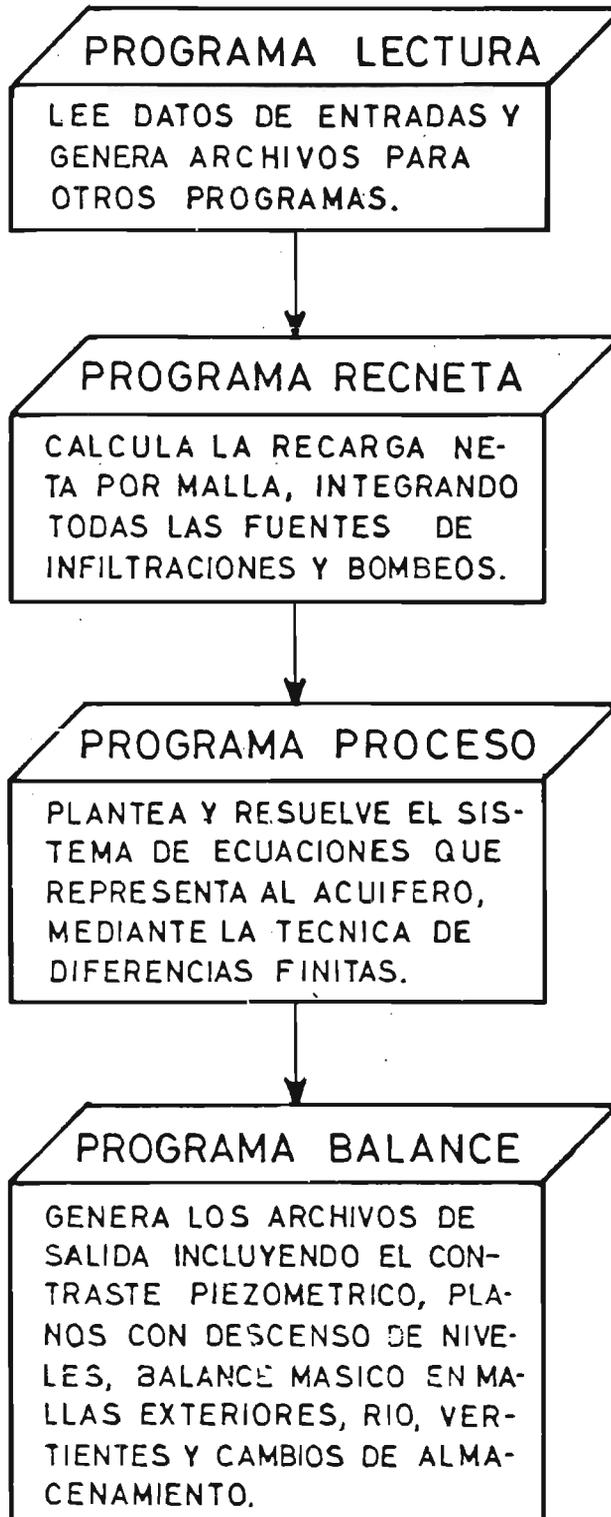
La preparación del modelo matemático, consiste en preparar un programa de computación que sea capaz de reproducir las condiciones de funcionamiento del embalse subterráneo y que permita operarlo introduciendo en él diferentes condiciones de explotación.

Para ello se tomó como base la publicación N° 55 del año 1971 del Illinois State Water Survey de los autores T.A. Prickett y D.G. Longquist titulada "Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation". Sobre dicha base se preparó un modelo llamado SIMAC 4, simulador de acuíferos, adecuado por nuestra empresa para ser empleado en la representación del embalse subterráneo que existe en el Valle del río Copiapó. El modelo consiste en un programa de computación escrito en idioma FORTRAN, y ha sido preparado específicamente para funcionar en un computador personal. Su manejo se ha hecho en un computador compatible con IBM marca MULTITECH PC-AT, que tiene memoria principal de 512 KB y un disco duro de 20 MB para el almacenamiento de información.

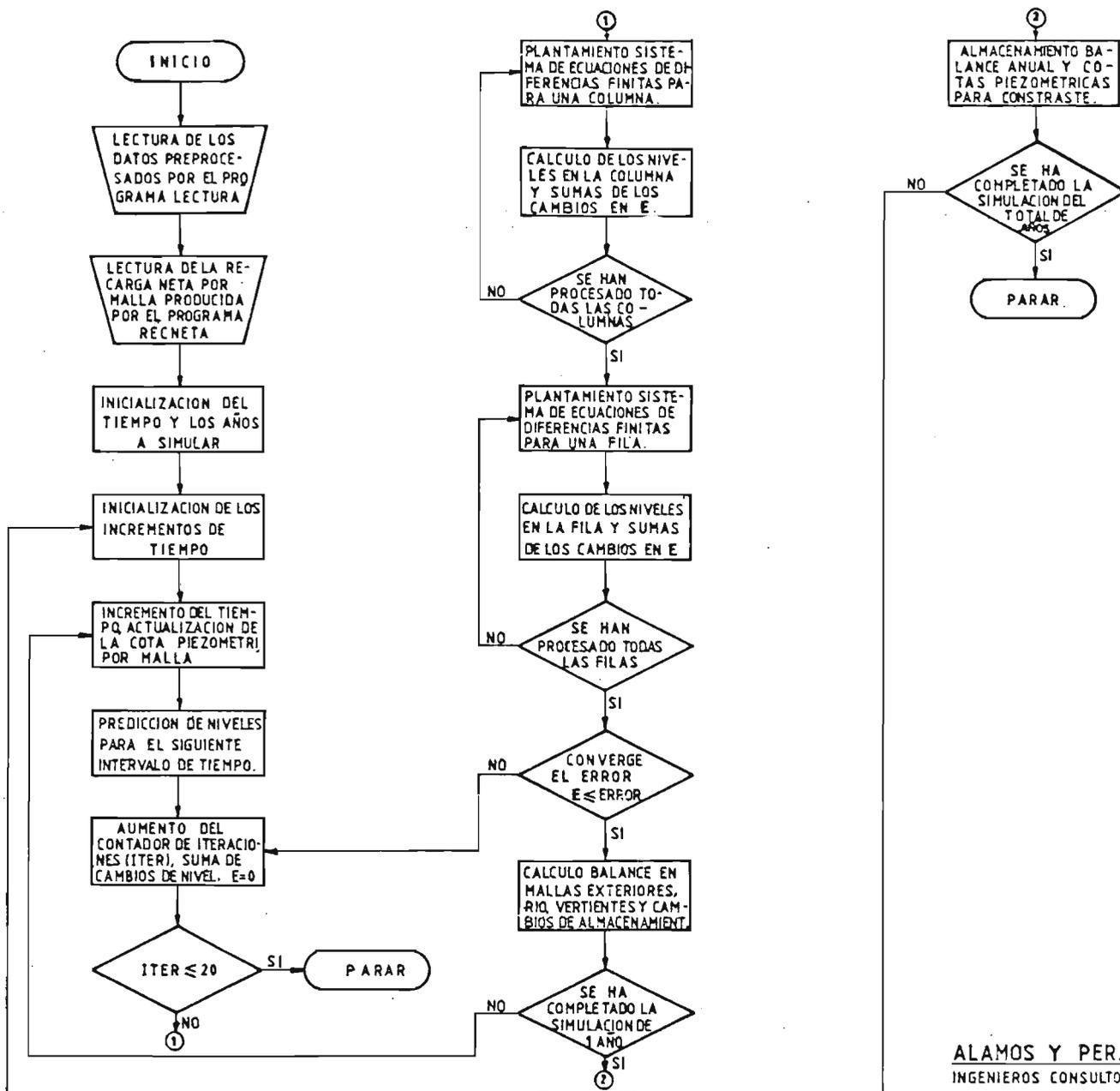
El modelo SIMAC 4 se compone a su vez de 4 subprogramas, denominados LECTURA, RECNETA, PROCESO y BALANCE, con los cuales se ha conseguido optimizar las capacidades de memoria y velocidad de procesamiento de equipo empleado. En las figuras adjuntas se presenta diagramas de flujo que sintetizan la estructura del programa.

MODELO HIDROGEOLOGICO

ESQUEMA GENERAL DEL PROGRAMA SIMAC 4



ESQUEMA DEL PROGRAMA PROCESO



4.4.2 Deducción y Solución del Sistema de Ecuaciones de Diferencias Finitas

Deducción de las ecuaciones de diferencias finitas

La ecuación diferencial en derivadas parciales que describe el flujo bidimensional en régimen transitorio, en un acuífero confinado, heterogéneo e isótropo es:

$$\frac{\partial(T\frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(T\frac{\partial h}{\partial y})}{\partial y} = S\frac{\partial h}{\partial t} + Q$$

donde:

T = transmisividad del acuífero

h = altura piezométrica

t = tiempo

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero

Q = diferencia entre los caudales extraídos y recargados por unidad de área

x, y = coordenadas rectangulares

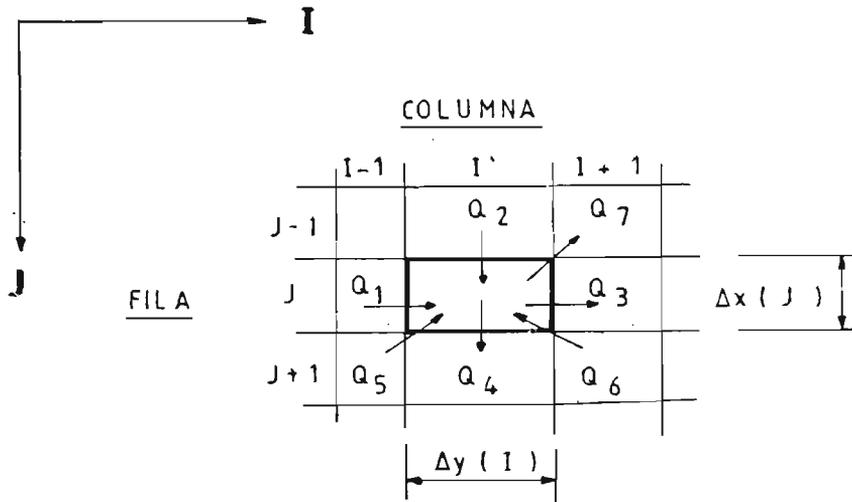
No existe una solución matemática general para esta ecuación; sin embargo, puede obtenerse una solución numérica por medio de un planteamiento en diferencias finitas.

Las ecuaciones de diferencias finitas pueden deducirse por dos caminos desde el punto de vista físico, a partir de la ley de Darcy y del principio de conservación de la masa, o mediante un tratamiento matemático sustituyendo las derivadas de la ecuación diferencial, que se muestra más arriba, por diferencias finitas aproximadas. Los dos métodos de deducción conducen al mismo resultado. A continuación se presenta la deducción desde el punto de vista físico pretendiendo de esta manera dejar más claro el origen de las ecuaciones.

Sobre el mapa del acuífero a modelar se superpone una malla rectangular. De esta forma el acuífero queda dividido en volúmenes prismáticos de base rectangular, de lados Δx y Δy y altura igual al espesor del acuífero.

- 43 -

Para una malla cualquiera de coordenadas (I, J), correspondiente a la intersección de la columna I con la fila J, se tiene:



La ecuación de balance másico viene dada por:

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 = Q_4 + Q_3 + Q_7 + \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

donde:

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 = transferencias de agua de una malla a otra

Q_5 = diferencia entre caudales extraídos y recargados a la malla (I, J)

Q_6 = caudal que ingresa o sale del acuífero en su interacción con los cauces superficiales de importancia.

Q_7 = caudal que sale del acuífero a través de vertientes

- 44 -

Aplicando la ley de Darcy se obtiene que:

$$Q_1 = T(I-1, J, 1) \cdot [H(I-1, J) - H(I, J)]$$

$$Q_2 = T(I, J-1, 2) \cdot [H(I, J-1) - H(I, J)]$$

$$Q_3 = T(I, J, 1) \cdot [H(I, J) - H(I+1, J)]$$

$$Q_4 = T(I, J, 2) \cdot [H(I, J) - H(I, J+1)]$$

donde $T(I, J, 1) = T_{ij1} \cdot \Delta x(J) / [0,5 \cdot (\Delta y(I) + \Delta y(I+1))]$

$T(I, J, 2) = T_{ij2} \cdot \Delta y(I) / [0,5 \cdot (\Delta x(J) + \Delta x(J+1))]$

siendo

T_{ij1} la transmisividad del acuífero entre los nudos (I, J) y $(I+1, J)$

T_{ij2} la transmisividad del acuífero entre los nudos (I, J) y $(I, J+1)$

$H(I, J)$ = altura piezométrica en el nudo (I, J) para un instante de tiempo t .

Por su parte

$$Q_5 = \frac{\text{Recarga Anual}(I, J)}{(12 \text{ meses})} - \frac{\text{Bombeo Anual}(I, J)}{(12 \text{ meses})}$$

El caudal que infiltra un río al acuífero o recibe el río desde acuífero viene dado por:

$$Q_6 = R(I, J) \cdot [RH(I, J) - H(I, J)] \text{ si } H(I, J) > RD(I, J)$$

$$\text{ó } Q_6 = R(I, J) \cdot [RH(I, J) - RD(I, J)] \text{ si } H(I, J) \leq RD(I, J)$$

- 45 -

donde

RD (I, J) = cota del lecho del río para la malla (I, J)

RH (I, J) = cota de agua en el río para la malla (I, J)

R (I, J) = factor que caracteriza la permeabilidad del lecho del río para la malla (I, J) y que vale

$$R = \frac{K}{e} \cdot A$$

con K = permeabilidad del lecho (m/día)

e = espesor del lecho (m)

A = área del lecho (m²) ocupada efectivamente por el río

El caudal que sale por vertientes viene dado por

$$Q_7 = RV (I, J) \cdot [H (I, J) - RDV (I, J)] \text{ si } H (I, J) > RDV (I, J)$$

$$Q_7 = 0 \text{ si } H (I, J) \leq RDV (I, J)$$

donde: RDV (I, J) = cota piezométrica mínima de vertimiento. Normalmente se toma igual a la de terreno.

RV (I, J) = factor de vertimiento que viene dado por:

$$RV = \frac{S (I, J) \cdot \Delta x (J) \cdot \Delta y (I)}{\Delta t}$$

- 46 -

con $S(I, J)$ = coeficiente de almacenamiento del acuífero en la malla (I, J)
 Δt = intervalo de tiempo transcurrido desde el último cálculo de al
 turas piezométricas.

Δx y Δy = son las dimensiones de la malla

Finalmente el término $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ de la ecuación

de balance corresponde al caudal de agua que se incorpora o sale del almacenamien-
 to del acuífero, y viene dado por:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = S(I, J) \cdot \left[\frac{H(I, J) - H_0(I, J)}{\Delta t} \right]$$

donde $S(I, J)$ = coeficiente de almacenamiento en el nudo (I, J)

$H(I, J)$ = altura piezométrica en el nudo (I, J) en el instante de
 tiempo t .

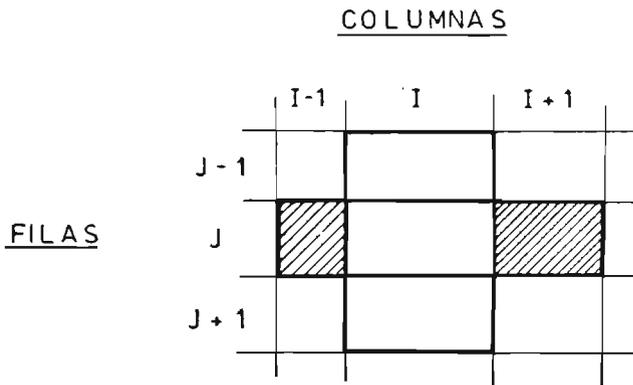
$H_0(I, J)$ = altura piezométrica en el nudo (I, J) en el instante de
 tiempo $(t - \Delta t)$

Así se obtiene finalmente la ecuación de balance másico para cada malla en térmi-
 nos de diferencias finitas. Plantéando este procedimiento para cada malla del
 modelo se genera un sistema de ecuaciones, que en este caso se resuelve con el
 método iterativo implícito en dirección alternante (IADI) de Peaceman y Rachford
 (1955), que se describe a continuación.

Solución del sistema de ecuaciones

El método de resolución empleado simplifica la solución del sistema de ecuaciones al resolver varios sistemas más pequeños para cada intervalo de tiempo.

En primer lugar se procede por columnas; resolviendo el sistema de ecuaciones para cada una de ellas separadamente. Para cada columna se supone variables las alturas piezométricas de los nudos de la columna que se está procesando, mientras que los de las columnas adyacentes se consideran constantes. Esquemáticamente se ve de la siguiente manera:



Al procesar la columna I, en el planteamiento de la ecuación de balance para el nudo (I, J), las alturas piezométricas $H(I, J-1)$, $H(I, J)$ y $H(I, J+1)$ se toman como incógnitas mientras que $H(I-1, J)$ y $H(I+1, J)$ se suponen conocidas, empleándose los valores de la iteración anterior.

- 48 -

Planteando la ecuación de balance para el nudo (I, J) se tiene:

$$Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 = Q_4 + Q_3 + Q_7 + \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} & T(I-1, J, 1) \cdot [H(I-1, J) - H(I, J)] + T(I, J-1, 2) \cdot [H(I, J-1) - H(I, J)] \\ & + Q_5(I, J) + R(I, J) \cdot [RH(I, J) - H(I, J)] = \\ & T(I, J, 1) \cdot [H(I, J) - H(I+1, J)] + T(I, J, 2) \cdot [H(I, J) - H(I, J+1)] \\ & + RV(I, J) \cdot [H(I, J) - RDV(I, J)] + \frac{S(I, J) \cdot [H(I, J) - H_0(I, J)]}{\Delta t} \end{aligned}$$

Ordenando términos se llega a

$$\begin{aligned} & H(I, J) \cdot [-T(I-1, J, 1) - T(I, J-1, 2) - R(I, J) - T(I, J, 1) - \\ & T(I, J, 2) - RV(I, J) - \frac{S(I, J)}{\Delta t}] + H(I, J-1) \cdot [T(I, J-1, 2)] + \\ & H(I, J+1) \cdot [T(I, J, 2)] = \\ & -T(I-1, J, 1) \cdot H(I-1, J) - R(I, J) \cdot RH(I, J) - T(I, J, 1) \cdot H(I+1, J) \\ & - RV(I, J) \cdot RDV(I, J) - \frac{S(I, J) \cdot H_0(I, J)}{\Delta t} - Q_5(I, J) \end{aligned}$$

Llamando - BB al término que acompaña a H (I, J),

- AA al que va junto a H (I, J-1),

- CC al que multiplica H (I, J + 1) y

- DD a toda la parte derecha de la ecuación, que es constante, se llega

a:

$AA \cdot H(I, J-1) + BB \cdot H(I, J) + CC \cdot H(I, J+1) = DD$

- 50 -

Como se ve se llega a un sistema tridiagonal, el cual se resuelve por el método de eliminación de Gauss.

Así se resuelve el sistema de ecuaciones columna a columna, luego se pasa a aplicar el mismo procedimiento a las filas, considerando en este caso variables las alturas piezométricas de la fila que está siendo procesada y constantes las de las filas adyacentes.

Cuando se concluye el proceso con las filas se ha completado una iteración.

Se inicia luego una nueva iteración y así sucesivamente hasta conseguir la convergencia de los resultados. Recién entonces se podrá incrementar al tiempo en un nuevo intervalo Δt , repitiéndose todo el proceso.

4.4.3 Elección de la Escala de Tiempo de la Modelación

Para elegir la escala de tiempo de la modelación se debe tener en cuenta dos factores fundamentales. Estos son las variaciones reales observadas de niveles y la precisión requerida.

Los niveles de la napa, controlados por el conjunto de piezómetros que hay en el valle, indican que las variaciones son relevantes anualmente, sin que se tenga situaciones importantes ni sistemáticas dentro de cada año. Esto puede observarse en los Planos de Variación de Niveles, que acompañan el Estudio Hidrogeológico que se ha hecho para los distintos sectores en que se ha dividido el valle.

Lo anterior significa que el embalse subterráneo funciona como un sistema de regulación hiperanual. Esto ocurre en parte porque las fuentes de recarga y descarga del acuífero presentan poca variación estacional, no debe olvidarse que el valle del río Copiapó se cultiva todo el año, y también porque las características físicas y de funcionamiento del embalse subterráneo no producen variaciones importantes dentro de cada año.

En cuanto a la precisión requerida por el modelo, para efectos de procesamiento se subdivide el intervalo de simulación elegido de manera de conseguir una precisión adecuada. Así se tiene que la escala de tiempo anual elegida no significa que las ecuaciones de diferencias finitas se planteen y resuelvan sólo una vez al año, sino que la entrega de resultados del modelo se hace cada año. El procesamiento, en cambio, subdivide cada año en una serie de períodos, los cuales van creciendo en forma exponencial con un coeficiente dado. A su vez el modelo itera varias veces para cada uno de estos períodos, hasta conseguir que la suma de las diferencias de cotas piezométricas entre una y otra iteración sea menor a un valor dado. Se tiene entonces que hay un número de períodos por año que optimiza el tiempo total de procesamiento, minimizando el producto de

- 52 -

las iteraciones por período con el número de períodos por año.

Luego de tantear con diversas alternativas se ha obtenido que para este caso la solución óptima son 12 períodos por año, partiendo con un período inicial de 0,1 mes. Esto da como resultado un coeficiente $\alpha = 1,37618$, de modo que la suma $t = 0,1 + 0,1 \cdot 1,37618 + 0,1 \cdot (1,37618)^2 + \dots + 0,1 \cdot (1,37618)^{11}$ dé 12 meses exactos.

Como conclusión se tiene entonces que el funcionamiento del embalse subterráneo, reflejado fundamentalmente en sus variaciones piezométricas, no justifica elegir una escala de tiempo en la simulación menor a un año. Por otra parte se ha adaptado el modelo de modo de obtener una simulación precisa y eficiente, subdividiendo cada año en unidades menores para efectos del procesamiento, aún cuando las salidas del modelo se hagan anuales.

4.4.4 Operación del Modelo

La operación misma del modelo no reviste mayor dificultad y consiste básicamente en lo siguiente.

Primeramente se debe disponer en un disco de los 4 programas que componen el modelo, en formato de archivos ejecutables. Esto se logra compilando cada programa con un compilador FORTRAN, para conseguir los siguientes archivos:

LECTURA 4.EXE	RECNETA 4.EXE
PROCESO 4.EXE	BALANCE 4.EXE

Luego es necesario preparar los datos de entrada en un archivo llamado DATOS.PRO, de acuerdo a las pautas y formatos que se presentan más adelante en este capítulo. Una vez completos los datos de entrada, el modelo se opera ejecutando los programas que lo componen en el orden siguiente:

LECTURA 4	RECNETA 4	PROCESO 4	BALANCE 4
-----------	-----------	-----------	-----------

Los resultados se obtienen en 3 archivos que son:

SALIDA.PRO = Contiene los resultados detallados mes a mes
 BMASICO.PRO = Contiene sólo el resumen del Balance Másico
 CONTPIEZ.PRO = Contiene los resultados a nivel anual y el contraste piezométrico.

A continuación se describe la preparación de los Datos de Entrada, incluyéndose además el formato y orden de entrada de ellos.

Se incluye además el listado del programa empleado en el Tomo Anexo N° 8

4.4.5 Definición de Variables y Parámetros de Entrada

4.4.5.1 Datos Generales

Estos se refieren al número de mallas del modelo, sus dimensiones, identificación según un sistema de ejes (I, J), y valor por malla de los parámetros físi-

- 54 -

cos principales: transmisividad, almacenamiento y cota piezométrica inicial.

Además se incluye el período de simulación, factores de corrección para los parámetros físicos, la cota de error para la convergencia del modelo y el nombre de los años simulados.

Las variables utilizadas por el modelo para estos datos son las siguientes:

TITULO : Título del trabajo
LO : Número total de mallas activas, incluyendo las de condiciones de borde exteriores.
NC : Número de Columnas (dirección I)
NR : N° de Filas (dirección J)
ERROR : Cota para la convergencia del modelo. Suele tomarse ERROR = $0,1 \times LO$ (metros)
RM : Nombre de los años simulados
NANOS : N° de años a simular
IDIMX : Dimensión, en metros, de las mallas según la dirección I
IDIMY : Dimensión, en metros, de las mallas según la dirección J
FAC1 : Factor que multiplica el valor original de la transmisividad, según la dirección I.
FAC2 : Lo mismo que FAC1, pero con la transmisividad en la dirección J.
T1 : Transmisividad según la dirección I para la malla (I, J) ($m^3/día/m$).
T2 : Transmisividad según la dirección J para la malla (I, J) ($m^3/día/m$)
SF : Coeficiente de almacenamiento para la malla (I, J) (0/1)
H : Cota piezométrica en la malla (I, J) para el instante de tiempo t (m).
FACSF : Factor que multiplica el valor original del coeficiente de almacenamiento.

- 55 -

4.4.5.2 Datos Malla Bordes Permeables

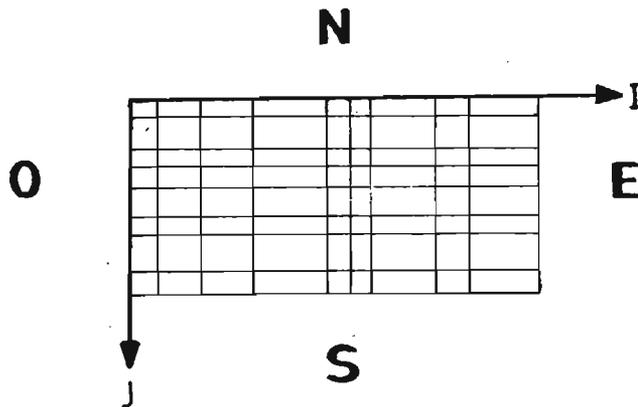
Corresponden a los datos de las mallas de borde donde los ingresos o salidas al sistema modelado son importantes, y es necesario incluir la variación de niveles históricamente observada en esas mallas para simular adecuadamente el fenómeno.

Las variables empleadas son:

- NP : N° de mallas de borde permeables
- (IP,JP) : Coordenadas de cada malla de borde permeable
- HB : Cota piezométrica estimada para cada malla de borde permeable (IP,JP); se requiere un valor anual. (m).

4.4.5.3 Datos sobre Mallas Exteriores

Corresponde a la información sobre cuáles son las mallas con condiciones de borde exteriores, y su orientación respecto de un sistema arbitrario. Este último se compone de las cuatro direcciones cardinales, que normalmente se ubican según el siguiente esquema:



- 56 -

Las variables utilizadas son:

- NMEN : N° de mallas exteriores que ingresan al modelo desde la dirección Norte.
- NMEE : N° de mallas exteriores que ingresan al modelo desde la dirección Norte, más las que lo hacen desde el Este.
- NMES : N° de mallas exteriores que ingresan al modelo por el Norte, más las del Este y Sur.
- NMEW : N° total de mallas exteriores
- (IM, JM) : Coordenadas de cada malla exterior.

4.4.5.4 Datos para el Contraste Piezométrico

Estos consisten en identificar las mallas elegidas para el contraste entre la piezometría medida y la modelada, además de las cotas piezométricas mensuales registradas en los pozos correspondientes.

Las variables empleadas son:

- ND : N° de mallas donde se hará el contraste piezométrico
- (ID, JD) : Coordenadas de las mallas elegidas para este efecto.
- HOD : Cota piezométrica medida para cada malla (ID, JD); se requiere de un valor por año (m).

4.4.5.5 Datos para la Simulación de la Relación Río-Acuífero

Se trata de identificar las mallas donde existe interrelación entre los cauces superficiales y el acuífero, incluyendo para cada una de ellas los parámetros que caracterizan esta relación.

Las variables utilizadas son:

- 57 -

- NQR : N° de mallas con relación río-acuífero
 (IR, JR) : Coordenadas de cada malla con relación río-acuífero
 RD : Cota del lecho del río para la malla
 RH : Cota del agua en el río para la malla (IR, JR) (m)
 R : Factor que caracteriza la permeabilidad del lecho del río para la malla (IR, JR)

$$R = \frac{K}{e} \times A \quad (\text{m}^3/\text{día}/\text{m})$$

donde K = permeabilidad del lecho (m/día)

e = espesor del lecho (m)

A = área del lecho ocupada por el río (m²)

4.4.5.6 Datos sobre Vertientes

Se refiere a la información de las mallas donde existen afloramientos de la napa subterránea.

Se acostumbra suponer la posibilidad de afloramientos en todas las mallas de la cuenca simulada, como un elemento más de contraste.

Las variables empleadas son:

- NVER : N° de mallas con vertientes
 (IV, JV) : Coordenadas de cada malla con vertientes
 RDV : Cota piezométrica mínima de vertimiento. Normalmente se toma igual a la cota de terreno (m).

- 58 -

4.4.5.7 Datos sobre Bombeos e Infiltraciones

Se trata de la información sobre las diferentes fuentes de descarga desde la superficie del acuífero, incluyendo para cada caso el número de mallas afectadas, el volumen anual que se infiltra o bombea por cada una de las mallas, y la distribución mensual de ese volumen.

Las variables que se agregan entonces son:

- TITULR : Denominación de la fuente de descarga o recarga considerada
- NP : N° de mallas con determinada recarga o descarga
- ICL : Clasificación del tipo de situación de que se trata (Ej. Infiltraciones por lluvias, infiltraciones de riego, bombeos por industrias, etc.)
- FC : Factor multiplicador del volumen anual de recarga o descarga. Sirve para modificar los datos en forma global.
Para infiltraciones debe ser positivo, mientras que para los bombeos debe ser negativo (- 1.0 si se quiere trabajar con los valores originales).
- FD : Coeficiente de distribución respecto de un año dado del volumen anual de recarga o descarga (un valor por año)
- (IP,JP) : Coordenadas de la malla afectada de una descarga o recarga determinada.
- P : Volumen anual que se infiltra o bombea, según sea el caso, para la malla (IP, JP) (miles m³/año).

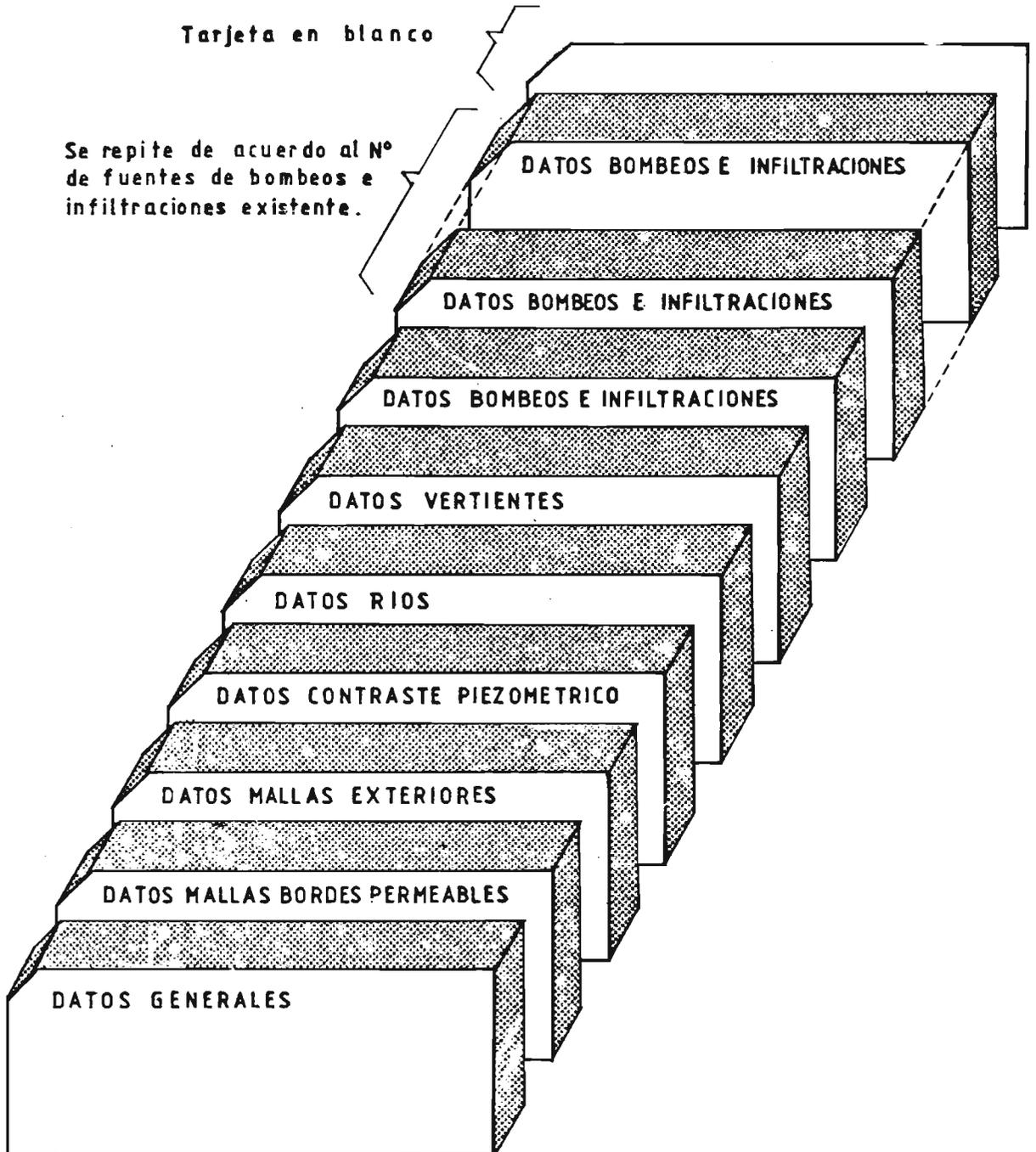
- 59 -

4.4.6 Formato de Entrada de Datos

Se presentan a continuación los esquemas para el ingreso de los datos del modelo al computador.

En primer lugar se indica el orden en que debe ubicarse los diferentes grupos de datos. Posteriormente se da el formato de entrada de cada variable, y el orden de las tarjetas en cada grupo. Cuando el manejo de datos se hace mediante archivos en disco, cada tarjeta equivale a una línea.

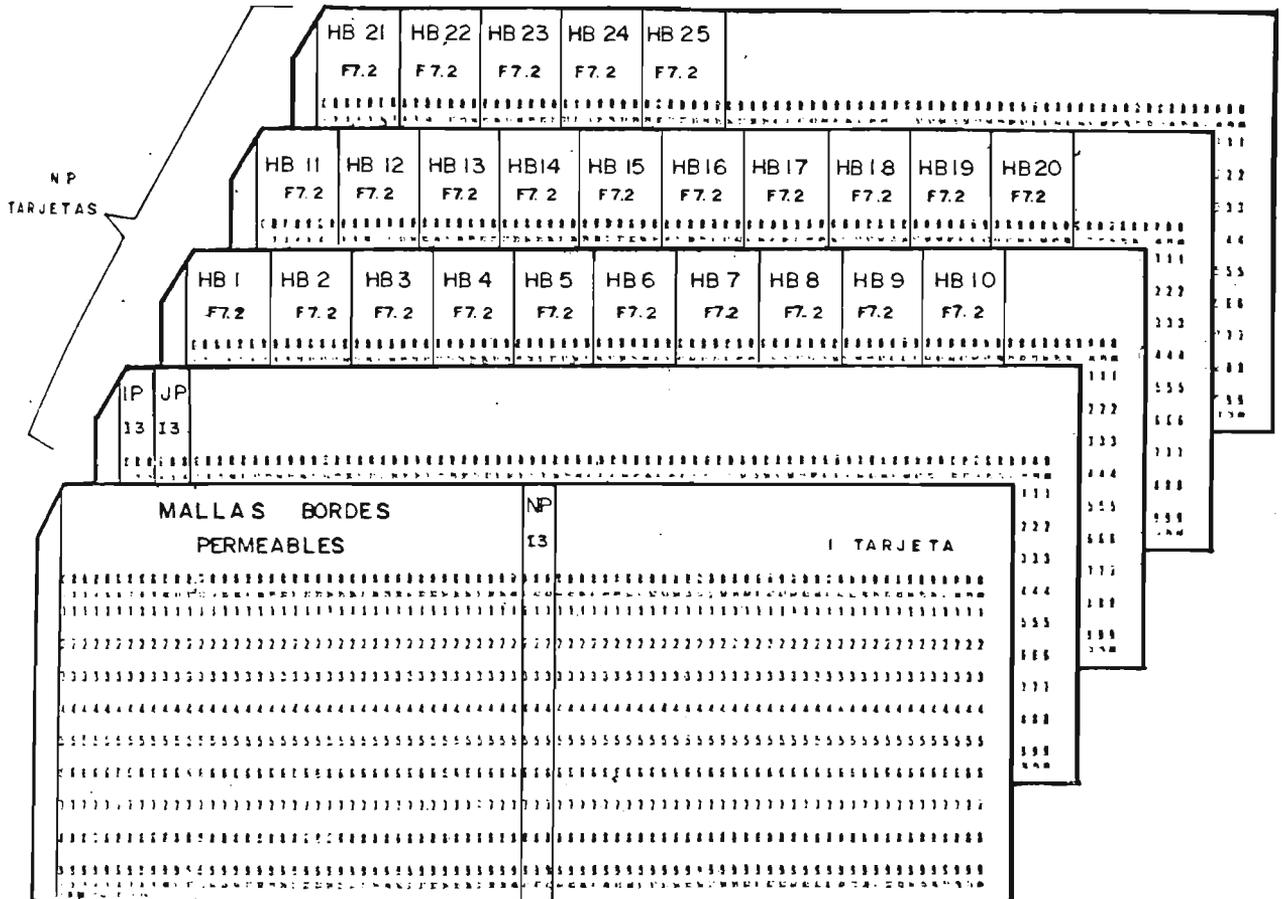
ESQUEMA ENTRADA DE DATOS



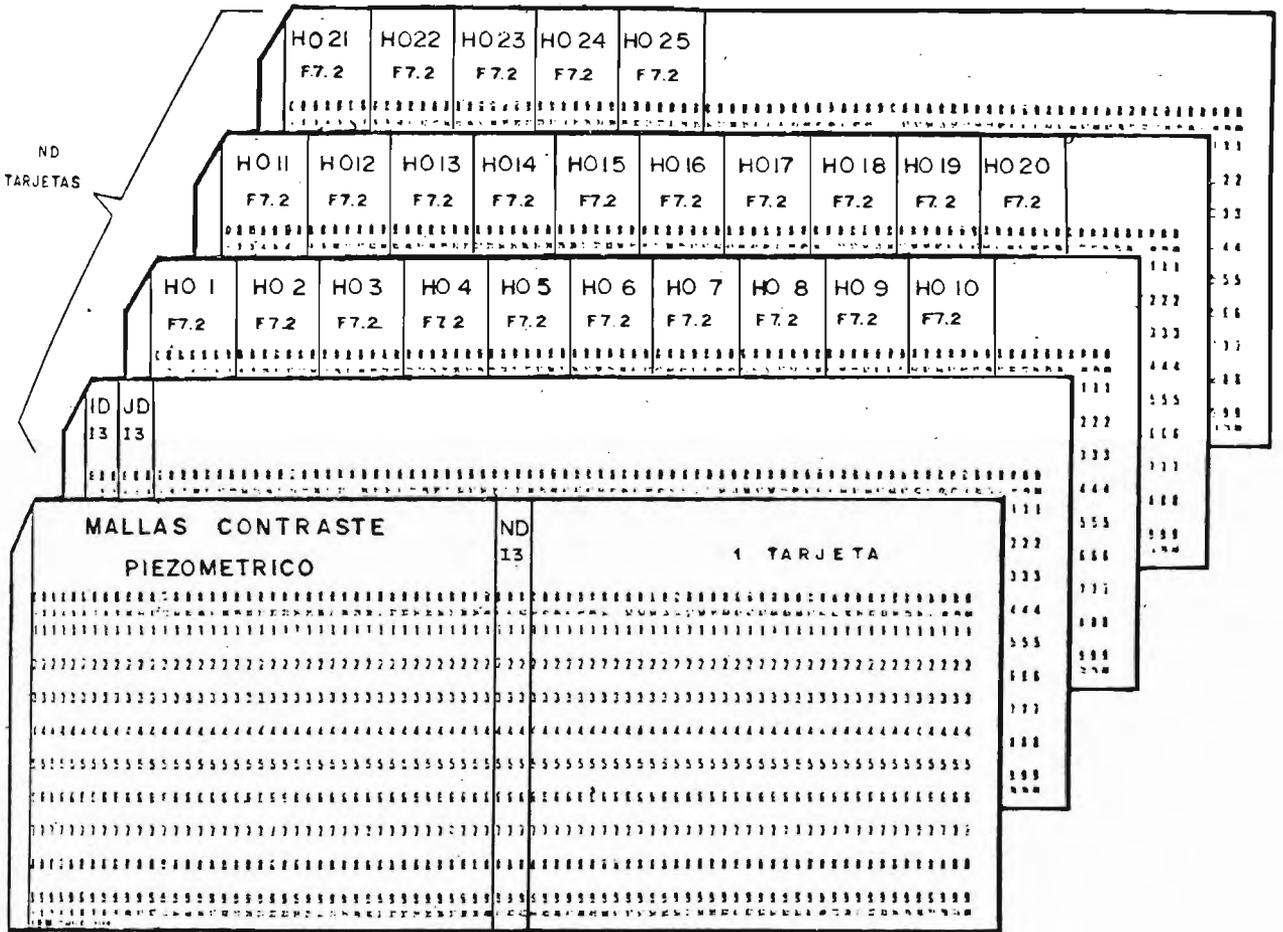
DATOS GENERALES

I I3	J I3	T1 E8.1	T2 E8.1	SF E8.1	H F8.2	PARAMETROS FISICOS LO TARJETA						
FAC1 F5.1	FAC2 F5.1	FAC3 F5.1	FACTORES DE CORRECCION DE PARAMETROS FISICOS 1 TARJETA									
IDIMY I5	DIMENSION MALLAS DIRECCION J NR TARJETAS											
IDIMX I5	DIMENSION MALLAS DIRECCION I NC TARJETAS											
RM 25 A3	NOMBRE AÑOS SIMULADOS I TARJETA											
RM 13 A3	RM 14 A3	RM 15 A3	RM 16 A3	RM 17 A3	RM 18 A3	RM 19 A3	RM 20 A3	RM 21 A3	RM 22 A3	RM 23 A3	RM 24 A3	NOMBRE AÑOS SIMULADOS I TARJETA
RM1 A3	RM2 A3	RM3 A3	RM4 A3	RM5 A3	RM6 A3	RM7 A3	RM8 A3	RM9 A3	RM10 A3	RM11 A3	RM12 A3	NOMBRE AÑOS SIMULADOS I TARJETA
LO I4	NC I3	NR I3	ERROR F6.1	NANOS L.4	DATOS GENERALES 1 TARJETA							
TITULO 1 TARJETA												

DATOS MALLAS BORDES PERMEABLES



DATOS CONTRASTE PIEZOMETRICO



- 67 -

4.5. Proceso de Introducción de los datos de entrada

4.5.1. Introducción

La modelación de embalses subterráneos mediante el uso de computadores permite conocer, en forma rápida, las respuestas o reacciones que tendrá el embalse ante diferentes estímulos.

Estas respuestas se ajustan a la realidad dependiendo de la calidad de la información entregada al computador, información que define tanto las características físicas del acuífero, como sus características de funcionamiento.

Dentro de las características físicas corresponde nombrar el coeficiente de transmisividad, coeficiente de almacenamiento, dimensiones físicas del acuífero (ancho, longitud, espesor) y cotas de terreno.

Por otro lado las características de funcionamiento son aquellas que se refieren a las entradas, salidas y movimientos del agua dentro del acuífero. Entre ellas se cuentan las infiltraciones de ríos, canales y riego, extracciones por bombes, cotas piezométricas, etc.

Por esto mismo la recopilación de los datos de entrada es una etapa de suma importancia dentro del proceso de modelación, puesto que a partir de éstos se llevará a cabo el proceso de ajuste.

La fuente de origen de esta información es, en la mayoría de los casos mediciones realizadas en terreno, y en los otros, informes de trabajos realizados con anterioridad.

El origen de cada parámetro y la forma de procesarlo para transformarlo en un dato de entrada son explicados a continuación.

- 68 -

4.5.2 Datos Generales

El primer paso requerido para la generación de datos de entrada es la confección del mallaje. Este se utilizará para discretizar espacialmente el área de estudio, de manera de poder asignar a cada sector el valor correspondiente a cada parámetro.

Los datos generales se refieren al número de columnas y filas que componen el mallaje, a las dimensiones de cada malla y al número total de éstas.

Además dentro de ellos se entregan datos de control del programa como son el error admisible y la duración total de la simulación.

Transmisividad, cota piezométrica inicial y coeficiente de almacenamiento.

Basándose en los planos con curvas de isotransmisividad, isopiezas y geológicos del área de estudio se ha determinado la transmisividad y la cota piezométrica de cada malla que compone el reticulado.

Estos planos fueron realizados para los estudios hidrogeológicos de cada área estudiada y la explicación de cómo se obtuvieron se encuentra detallada en los informes correspondientes.

Con respecto a la piezometría inicial, se ha elegido las cotas piezométricas de Marzo de 1962 como las iniciales de la modelación. Para esta fecha prácticamente no hay información de la piezometría del valle, por lo que ha debido hacerse una estimación. Partiendo de los antecedentes existentes de 1962, se puede comprobar que en esta época el embalse subterráneo estaba en un estado que podría llamarse lleno. Como la situación de 1986 es muy similar, se ha supuesto que la piezometría obte-

- 69 -

nida de una corrida de mediciones de niveles hecha en Diciembre de 1986 coincide con la inicial del período a simular. Es necesario aclarar que esto es sin duda aproximado y que podría afectar la exactitud del modelo sólo en el primer año modelado, ya que rápidamente el modelo converge a las condiciones naturales que impone el funcionamiento hidrogeológico. En síntesis, se ha tomado como piezometría inicial la de Diciembre de 1986, asimilándola a la que existía en Marzo de 1962. El error que se comete no debiera ser importante ya que en ambas fechas el embalse subterráneo se ha encontrado en condiciones similares y porque las posibles diferencias que pudiera haber, se ven rápidamente corregidas por el modelo al incorporar los distintos elementos que simulan el funcionamiento del acuífero.

Por último, el dato correspondiente a cada malla se ha obtenido superponiendo el reticulado a cada plano de isopiezas, y por medio de interpolación se ha determinado el valor en el centro de la malla.

Con respecto al coeficiente de almacenamiento, no se cuenta con información tan completa. Por ello es que se ha hecho estimaciones basadas en el carácter libre del acuífero y la experiencia de estos consultores.

4.5.3 Cota de Terreno

Se determina la cota de terreno en cada malla superponiendo el mallaje a planos topográficos e interpolando para obtener el valor correspondiente al centro de la malla.

Este parámetro se incluye para simular lo que ocurre en las zonas de vegas, donde el nivel de la napa subterránea se aproxima a la superficie del terreno. Allí, como se ha dicho antes, se genera un doble fenómeno, constituido por los afloramientos de la napa subterránea y la evapotranspiración de la vegetación freatófita. Dado el origen común de ellos, que es la profundidad a que se encuentre el nivel estático, am-

- 70 -

Los se han simulado como un sólo efecto que se ha llamado vertientes. El modelo calcula los volúmenes aflorados por estas vertientes a través de la sobreelevación que alcanza la cota piezométrica sobre la del terreno, afectada claro por el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

De esta manera se tiene otro elemento de contraste en el proceso de ajuste, pudiendo confrontar el modelo y la realidad en cuanto a la ubicación de las zonas de vegas y a los volúmenes que allí descarga el acuífero.

4.5.4 Contraste Piezométrico

Una parte fundamental del proceso de ajuste corresponde a la comparación de los registros de niveles existentes con los niveles simulados.

Estos registros de niveles corresponden a los niveles medios anuales medidos en pozos existentes en el área de estudio. Para esto se ha escogido los pozos con registros de niveles más extensos y confiables, los cuales no son muchos en cada uno de los sectores estudiados, pero que en alguna forma permiten realizar el proceso de ajuste con la precisión requerida.

La ubicación de cada pozo se transcribe al mallaje, permitiendo así conocer la malla correspondiente a cada pozo utilizado en el contraste.

4.5.5 Relación Río - Acuífero

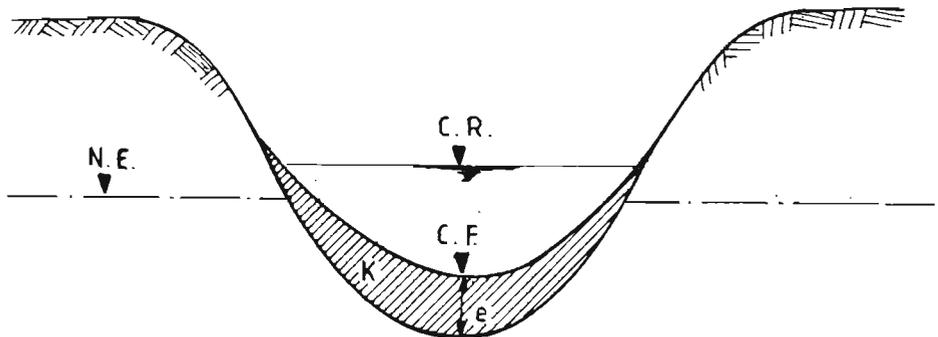
No cabe duda que el embalse subterráneo del valle del río Copiapó está fuertemente relacionado con el escurrimiento superficial de los ríos Manflas, Jorquera, Pulido y, sobre todo, el propio río Copiapó. Esto lo avalan los diferentes estudios que ha hecho y los antecedentes y análisis de ellos que se ha ido haciendo en el presente proyecto.

Existen en el valle de Copiapó zonas donde el río infiltra hacia la napa y otras donde recupera aguas desde la napa. Estas zonas están claramente diferenciadas y son muy poco variables en el tiempo. La razón de ello es que las recuperaciones se dan donde los niveles de la napa son superficiales, lo que ocurre en zonas donde el acuífero encuentra algún obstáculo para seguir escurriendo en forma subterránea. Allí se produce un efecto similar al de un vertedero, donde los niveles de la napa varían muy poco y, por lo tanto, las superficies de vegas son más o menos constantes. Teniendo en cuenta estas características, en especial la poca variabilidad en el tiempo de los tramos con recuperaciones e infiltraciones, la simulación de la relación río-acuífero se ha abordado a través de 3 diferentes maneras. Estas son:

- a) Donde la napa se ubica siempre más profunda de 5 metros que el fondo del lecho del río, se ha impuesto un valor de infiltración variable de un año a otro y dependiente sólo de los caudales que lleva el río. Estas infiltraciones se han determinado inicialmente del modo que se describe más adelante en este capítulo. Posteriormente ha reemplazado estas cifras a medida que se ha ido desarrollando el proceso de ajuste, para finalmente adoptar los valores obtenidos del ajuste final del modelo hidrológico superficial.

- 72 -

- b) Donde claramente se tiene una zona de vegas, lo que generalmente se da cuando el nivel estático de la napa está entre 0 y 2 metros bajo el fondo del lecho del río, las recuperaciones del río se han modelado como vertientes, siguiendo la metodología ya explicada para ese caso.
- c) Cuando se ha tenido un sector donde los niveles subterráneos son tales que permiten en distintos períodos que haya recuperaciones o infiltraciones, la relación río-acuífero se ha simulado de acuerdo al siguiente esquema.



El caudal intercambiado entre el río y el acuífero depende de la posición de la napa respecto de la cota del lecho del río. Cuando el nivel estático está sobre el lecho del río, el caudal infiltrado o recuperado por el río viene dado por la expresión:

$$Q = \frac{K}{e} \cdot A \cdot H \quad (\text{m}^3/\text{día})$$

con $H =$ Cota piezométrica - cota agua río (CR) (m)

$K =$ Permeabilidad del lecho (m/día)

$e =$ Espesor del lecho (m)

$A =$ Area inundada del lecho (m^2)

- 73 -

El río recupera cuando el nivel estático es superior a su cota de agua e infiltra cuando esta última supera el nivel de la napa. En caso de tener el nivel estático bajo el nivel del lecho, el río infiltra al acuífero en forma independiente de la posición de la napa. El caudal infiltrado viene dado entonces por:

$$Q = \frac{K}{e} \cdot A \cdot H \quad (\text{m}^3/\text{día})$$

$$\text{con } H = \text{Cota agua río (CR)} - \text{Cota lecho (CF)} \quad (\text{m})$$

conservando el significado anterior los demás términos de la expresión.

Para preparar estos datos de entrada se ha hecho lo siguiente:

La cota del lecho se ha obtenido directamente a partir de la topografía de los planos 1:5.000, donde existen, y las planchetas 1:50.000, junto a lo registrado en terreno, donde no hay cartografía 1:5.000.

La cota del agua se ha estimado de acuerdo a lo observado en terreno, lo mismo que el área inundada del lecho.

En cuanto a la permeabilidad y espesor del lecho, se han estimado a partir de lo observado en otras zonas, en especial el río Elqui.

En lo que sigue se describe cómo se ha estimado las infiltraciones del río a la napa, situación que corresponde a la primera de las planteadas como relación río-acuífero.

4.5.5.1 Infiltración del RíoANALISIS DE INFILTRACION - SECTOR 1

Para realizar el análisis de la infiltración en este sector, se consideró la ecuación obtenida del estudio Plan Maestro de Acción Inmediata para el Desarrollo de los Recursos de Aguas y Suelo del Valle de Copiapó realizado en el año 1980 por Uri Hammer M. y Asociados. (Ref.6) La ecuación a que se hace referencia se obtuvo para el tramo La Puerta - Mal Paso en el río Copiapó y se adaptó a las condiciones prevalecientes en el sector de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.

Para utilizar la ecuación obtenida anteriormente, primero se le independizó del caudal entrante, luego consideró el caudal infiltrado por unidad de longitud (km) y por último se le realizó una corrección por la diferencia de pendiente que existía entre el tramo que se utilizó para el estudio inicial y la de estos ríos.

La ecuación obtenida originalmente (Fig. 4.19 - Ref.6)

$$I = 0,17 \cdot Q_E + 0,272$$

donde $I =$ Infiltración en m^3/s

$$Q_E = \text{Caudal entrante en } m^3/s$$

para independizarla del caudal entrante se dividió Q_E por el caudal medio histórico que fue de $1,85 m^3/s$, por lo que la ecuación obtenida quedó:

$$I = (0,0919 \cdot Q_E) \times \bar{Q} + 0,272 (m^3/s)$$

luego esta ecuación se dividió por la longitud total del río que podía

- 75 -

infiltrar para así dejar la infiltración en $m^3/s/km$. La longitud total de infiltración es 32 km, de donde se obtuvo:

$$I = (0,0029 \times Q_E) \times \bar{Q} + 0,0085 \text{ (m}^3\text{/s/km)}$$

como los dos sectores no son totalmente iguales y para hacer coincidir ciertos aforos de caudales que se habían realizado, se corrigió esta ecuación y con lo cual se llegó a la siguiente ecuación general para el sector de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.

$$I = (0,006 \times Q_E) \times \bar{Q} + 0,01$$

siendo:

$$I = \text{Infiltración (m}^3\text{/s/km)}$$

$$Q_E = \text{Caudal entrante (m}^3\text{/s)}$$

$$\bar{Q} = \text{Caudal medio histórico (m}^3\text{/s) y que se fija una sola vez para cada río.}$$

con esto se calcularon las ecuaciones de infiltración para cada uno de los ríos ($m^3/s/km$).

Jorquera en Vertedero	$I = 0,0050 \times Q_E + 0,01$
Pulido en Vertedero	$I = 0,0084 \times Q_E + 0,01$
Manflas en Vertedero	$I = 0,0030 \times Q_E + 0,01$
Sector Junta de Jorquera y Pulido	$I = 0,0130 \times Q_E + 0,01$
Copiapó en Pastillo	$I = 0,0126 \times Q_E + 0,01$

Como se quiere calcular la infiltración como un porcentaje con respecto a la infiltración que se produjo en el año 1986, entonces hubo primero que calcular la infiltración para el año 1986.

- 76 -

Como no se tienen los datos de ese año para las estaciones de aforo que se consideraron, se vió que en otras zonas del río en que se tenían registros más completos, que los caudales del año 1986 son muy similares al promedio entre los años 1982 - 1983 y con esta base se calculó el caudal entrante para las distintas estaciones en el año 1986.

Aplicando estos valores en las respectivas ecuaciones para cada río; se obtuvieron las siguientes infiltraciones en $m^3/s/km$ para el año 1986 (considerado como infiltración base).

Río Jorquera	0,013
Río Pulido	0,028
Río Manflas	0,013
Junta Jorquera y Pulido	0,045
Copiapó	0,047

Con los datos de la infiltración del año 1986 y con los caudales entrantes en cada uno de los ríos, para cada año, se calculó la infiltración entre los años 1962 - 1986 para los distintos ríos como un coeficiente del año 1986.

INFILTRACIONES DESDE CAUCES SUPERFICIALES EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR RIOS MANFLAS, JORQUERA Y PULIDO

COEFICIENTE RESPECTO DE LA INFILTRACION ESTIMADA PARA EL AÑO 1986

ANO	JORQUERA EN VERTEDERO	PULIDO EN VERTEDERO	JUNTA JORQUERA Y PULIDO	MANFLAS EN VERTEDERO	COPIAPO EN PASTILLO
1962	1,04	0,65	0,70	0,86	0,61
1963	1,05	0,77	0,83	0,85	0,62
1964	1,08	0,62	0,71	0,84	0,62
1965	1,03	0,71	0,76	0,87	0,76
1966	1,10	0,77	0,86	0,90	0,82
1967	0,99	0,55	0,57	0,85	0,52
1968	0,98	0,59	0,60	0,83	0,52
1969	0,93	0,53	0,51	0,84	0,48
1970	0,91	0,47	0,44	0,83	0,41
1971	0,91	0,47	0,44	0,83	0,42
1972	0,97	0,64	0,64	0,97	0,71
1973	1,14	1,09	1,19	0,97	1,14
1974	1,02	0,59	0,63	0,85	0,61
1975	0,99	0,60	0,63	0,84	0,57
1976	0,95	0,56	0,55	0,84	0,52
1977	0,93	0,59	0,56	0,84	0,53
1978	0,95	0,57	0,56	0,83	0,52
1979	0,93	0,57	0,54	0,82	0,51
1980	0,93	0,59	0,56	0,91	0,63
1981	1,06	1,16	1,20	0,97	0,99
1982	0,96	0,67	0,66	0,90	0,69
1983	1,05	1,28	1,30	1,09	1,27
1984	1,32	1,67	1,86	1,27	2,04
1985	1,21	1,42	1,55	1,14	1,69
1986	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Inf. Base ■3/s/k■	0,013	0,028	0,045	0,013	0,047

- 78 -

SECTOR 2: LAUTARO - LA PUERTA

El sector N° 2 se dividió en dos tramos. Un primer tramo entre Lautaro y San Antonio y otro tramo entre San Antonio y La Puerta. Dado que en el segundo tramo solo se tiene recuperaciones, nos dedicaremos exclusivamente al estudio de la infiltración en el tramo inicial.

Lo primero que se calculó fue el agua extraída por los canales y que no era de vuelta al río. Para esto se utilizaron los datos determinados por el presente estudio, que se encuentran en el capítulo de Hidrología del Tomo II. De él se sacaron los volúmenes promedios anuales que se consumían en todos los canales en el sector Lautaro - La Puerta.

Ahora, por otra parte, se obtuvieron los derechos en acciones de agua que se tienen para los canales del tramo Lautaro - San Antonio, con respecto a los derechos en acciones totales que existen en todo el sector Lautaro - La Puerta.

Estos datos se sacaron del presente estudio en el análisis hecho de la Infraestructura de Riego, que se encuentra en el Tomo Anexo N° 1.

Acciones tramo Lautaro - San Antonio	:	1.320
Acciones sector Lautaro - La Puerta	:	2.040

Luego el porcentaje de agua que se consume en los canales en el tramo Lautaro - San Antonio es un 64,7% del total. Por lo tanto, con los antecedentes que se tienen del agua consumida en todo el sector y este porcentaje, obtenemos el agua consumida en este tramo.

Para calcular la infiltración en este tramo se utilizó la siguiente relación:

$$I = Q_1 - Q_{s.a} - Q_c$$

- 79 -

siendo I = Infiltración m³/s

Q_L = Caudal en Lautaro m³/s

$Q_{s.a}$ = Caudal en San Antonio m³/s

Q_c = Caudal consumido en los canales m³/s

En el caso de $Q_{s.a}$, no existían datos entre los años 1962 - 1967 para lo cual se realizó una regresión entre los caudales existentes en Lautaro y San Antonio y se obtuvo la siguiente relación:

$$Q_{s.a} = 1,4850 \times Q_L - 0,4961$$

que dió un coeficiente de correlación $r = 0,97$ con el cual se completaron las estadísticas.

Por último se entregaron las infiltraciones como un coeficiente de una infiltración base, que fue la producida en el año 1980.

$$I = 0,156 \text{ m}^3/\text{s}$$

Si se considera la longitud del cauce de 14 km, entonces tenemos como infiltración base:

$$I = 0,011 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$$

INFILTRACIONES DESDE CAUCES SUPERFICIALES EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR EMBALSE LAUTARO - SAN ANTONIO

AÑO	CONSUMO EFECTIVO MEDIO EN CANALES		RIO COPIAPO	RIO COPIAPO	COEF. INFILTRACION RESPECTO VALOR BASE	
	Miles m ³ /mes	(m ³ /s)	EN LAUTARO (m ³ /s)	EN SAN ANTONIO (m ³ /s)		
1962	178,5	0,069	1,16	1,23	-----	(1)
1963	207,7	0,080	0,84	0,75	0,064	
1964	151,0	0,058	0,78	0,66	0,397	
1965	226,2	0,087	1,49	1,72	-----	(1)
1966	239,7	0,092	2,07	2,58	-----	(1)
1967	210,8	0,081	1,06	1,08	-----	(1)
1968	199,8	0,077	1,07	0,77	1,429	
1969	198,0	0,076	0,75	0,64	0,218	
1970	139,2	0,054	0,58	0,38	0,936	
1971	117,9	0,045	0,52	0,39	0,545	
1972	164,5	0,063	1,17	1,00	0,686	
1973	503,1	0,194	1,84	1,71	-----	(1)
1974	503,1	0,194	1,14	1,42	-----	(1)
1975	503,1	0,194	0,91	1,07	-----	(1)
1976	503,1	0,194	0,88	0,82	-----	(1)
1977	503,1	0,194	0,87	0,62	0,359	
1978	503,1	0,194	0,91	0,59	0,808	
1979	503,1	0,194	0,80	0,49	0,744	
1980	503,1	0,194	0,96	0,61	1,000	
1981	503,1	0,194	1,79	1,87	-----	(1)
1982	503,1	0,194	1,09	1,47	-----	(1)
1983	503,1	0,194	1,68	2,52	-----	(1)
1984	838,5	0,324	4,17	5,69	-----	(1)
1985	838,5	0,324	3,34	4,55	-----	(1)
1986	838,5	0,324	1,40	2,04	-----	(1)

(1) En estos años no se tiene infiltración sino recuperaciones.

- 81 -

SECTOR 3 LA PUERTA - MAL PASO

Para calcular las infiltraciones en este sector se utilizó una ecuación determinada en el estudio Plan Maestro de Acción Inmediata para el Desarrollo de los Recursos de Agua y Suelo del Valle de Copiapó y realizado por Uri Hammer y Asociados en el año 1980 (Fig. 4.19) (Ref.6)

La referida ecuación es la siguiente:

$$I = 0,17 \cdot Q_{L.P} + 0,272 \quad (*)$$

siendo $I =$ Infiltración en m^3/s

$Q_{L.P} =$ Caudal en La Puerta m^3/s

Como queremos la infiltración por unidad de longitud, dividimos (*) por la longitud infiltrable en este sector y que es de 32 km obteniéndose la siguiente ecuación:

$$I = 0,0053 \times Q_{L.P.} + 0,0085$$

$I =$ Infiltración en $m^3/s/km.$

Finalmente, queremos la infiltración en los diferentes años como un coeficiente de la infiltración del año 1986, y que fue de $0,023 m^3/s/km$, obteniéndose los siguientes resultados.

INFILTRACIONES DESDE CAUCES SUPERFICIALES EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR LA PUERTA - MALPASO

ANO	CAUDAL EN LA PUERTA (m ³ /s)	INFILTRACION (m ³ /s/Km)	CDEF. INFILT. RESPECTO BASE
1962	1,50	0,016	0,72
1963	1,83	0,018	0,80
1964	1,39	0,016	0,70
1965	1,66	0,017	0,76
1966	2,18	0,020	0,88
1967	1,47	0,016	0,72
1968	1,39	0,016	0,70
1969	1,14	0,015	0,64
1970	0,87	0,013	0,58
1971	0,86	0,013	0,57
1972	1,27	0,015	0,67
1973	2,28	0,021	0,90
1974	1,90	0,019	0,82
1975	1,49	0,016	0,72
1976	1,32	0,016	0,68
1977	1,03	0,014	0,61
1978	1,04	0,014	0,62
1979	0,94	0,013	0,59
1980	1,03	0,014	0,61
1981	2,60	0,022	0,98
1982	2,20	0,020	0,89
1983	3,08	0,024	1,09
1984	6,72	0,044	1,94
1985	5,37	0,037	1,62
1986	2,70	0,023	1,00

- 83 -

SECTOR 4 MAL PASO - COPIAPO

Para realizar el análisis de las infiltraciones en este sector, se consideraron dos períodos de tiempo. El primero entre el año 1962-1969, en que no existía el Canal Mal Paso, y un segundo período que comienza el año 1970 con la puesta en funcionamiento del canal Mal Paso.

En el primer caso, la infiltración se calculó en base a un ajuste hecho a la fórmula calculada por Uri Hammer y Asociados, (Ref. 6) y que se ha hecho mención en la determinación de las infiltraciones en los otros sectores.

$$I = (0,009 \times Q_{M.P.}) \bar{Q}_E + 0,0085$$

siendo I = Infiltración en $m^3/s/km$

$Q_{M.P.}$ = Caudal en Mal Paso m^3/s

\bar{Q}_E = Caudal promedio histórico en Mal Paso, que es de $0,83 m^3/s$

además se ha hecho una corrección para reflejar las condiciones no totalmente similares a las de la zona donde se determinó la fórmula, obtenemos que

$$I = 0,0039 \times Q_{M.P.} + 0,0085$$

esta ecuación es válida para $Q_{M.P.} \geq 0,4 m^3/s$.

Para $Q_{M.P.} < 0,4 m^3/s$ se considerará que todo el caudal que pasa por Mal Paso se infiltra antes de llegar a Copiapó.

En el segundo caso, o sea desde 1970 en adelante, entra en funcionamiento el Canal Mal Paso, las condiciones de escurrimiento en el río cambian.

- 84 -

El canal Mal Paso necesita abastecer una necesidad de agua de aproximadamente $1 \text{ m}^3/\text{s}$, que se desglosa en:

Riego	=	$0,68 \text{ m}^3/\text{s}$
Infiltración en Canales	=	$0,17 \text{ m}^3/\text{s}$
Pérdidas por no usar riego tecnificado	=	$0,17 \text{ m}^3/\text{s}$
		$1,02 \text{ m}^3/\text{s} \approx 1 \text{ m}^3/\text{s}$

Estos datos fueron obtenidos del capítulo de Hidrología del Tomo II.

De lo cual se deduce que si por el río Copiapó pasa menos de ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) todo el caudal es desviado al canal Mal Paso. Por el contrario, el exceso de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ seguiría por el cauce del río y de infiltración se determinará con las mismas ecuaciones del primer caso.

Se considerará como infiltración base la del año 1986 y que es de $0,012 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$.

INFILTRACIONES DESDE DALCES SUPERFICIALES EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR MAL PASO - COPIAPO

ANO	CAUDAL EN MAL PASO (m ³ /s)	COEF. INFILT. RESPECTO BASE
1962	0.86	0.96
1963	0.81	0.95
1964	0.77	0.93
1965	0.74	0.92
1966	1.75	1.12
1967	0.89	0.97
1968	0.71	0.91
1969	0.59	0.88
1970	0.37	---
1971	0.31	---
1972	0.67	---
1973	0.37	---
1974	0.82	---
1975	0.59	---
1976	0.42	---
1977	0.36	---
1978	0.32	---
1979	0.27	---
1980	0.32	---
1981	0.92	---
1982	0.75	---
1983	1.21	0.71
1984	4.19	1.70
1985	3.55	1.43
1986	1.98	1.00

- 86 -

SECTOR COPIAPO - ANGOSTURA

Debido a los datos que se tienen de la estación Copiapó en Copiapó, se considera que solo habrá infiltraciones en los años 1984 y 1985.

Por la poca información que se tiene, pero considerando el comportamiento que tiene el río durante esos años en zonas ya estudiadas se determinaron infiltraciones para este sector de:

$$1984 : I = 0,030 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$$

$$1985 : I = 0,025 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$$

Estas infiltraciones solo se considerarán para el tramo Copiapó - Toledo ya que desde ahí en adelante existen recuperaciones.

- 87 -

4.5.6. Infiltración desde la Red de Riego

Se considera que estas infiltraciones corresponden a las producidas por la conducción de las aguas superficiales a través de la red de canales matrices, su distribución por medio de la red de canales secundarios y la infiltración producida por el riego mismo.

La forma en que se determinó la magnitud de estas infiltraciones está claramente explicada en el capítulo "Balance Hídrico del Embalse Subterráneo" de cada uno de los estudios hidrogeológicos por sectores que se presenta en los Tomos Anexos N° 2 al N° 7.

Para la determinación del valor correspondiente para cada malla se utilizaron los planos, de uso actual de los suelos y red de canales, sobre los que se sobrepuso el mallaje correspondiente y se aplicó las tasas de infiltración determinadas para cada caso.

Como resumen del método aplicado para calcular cada uno de los 3 tipos de infiltración se puede decir que para los canales matrices se aplicó una tasa de infiltración de 2,5 a 5% del caudal de entrada al canal, por kilómetro de longitud. En cuanto a los canales secundarios, ésta se estimó en un valor similar al de la infiltración a nivel predial producida en los sectores regados por surcos o bordes. Por último, la infiltración a nivel predial producida por el riego se estimó en un 50% de la diferencia entre la tasa de riego y la evapotranspiración real del cultivo para los sectores regados por surcos o bordes. En el caso de riego por goteo, se consideró que la infiltración correspondía al 100% de dicha diferencia.

La tasa de riego se ha calculado como la evapotranspiración de los cultivos, afectada con la eficiencia del sistema de riego.

Para la determinación de la infiltración a nivel predial, se ha dividido según los tipos de cultivos, de manera de poder manejar en mejor forma las tasas de evapotranspiración de cada uno. Los tipos de cultivos estudiados son los siguientes: Hortalizas, Frutales, Praderas y Parronales.

4.5.7. Extracciones por medio de Bombeos

Para determinar la magnitud de las extracciones de agua subterránea por medio de los sondeos existentes en el área estudiada, se realizó una encuesta de uso actual y pasado de cada uno. Así, basándose en ella se dividió en bombeos destinados al abastecimiento de agua potable, bombeos destinados al uso industrial del agua y bombeos destinados al riego, los que se dividieron en tres diferentes períodos de tiempo.

De esta manera, y ubicando los pozos en el mallaje se determinó el volumen extraído por cada tipo de bombeo en cada malla del reticulado.

4.5.8 Entradas y Salidas Subterráneas por Bordes Laterales

El modelo simula dos tipos de bordes exteriores o laterales. Estos son los bordes impermeables y los permeables. Los primeros se dan donde el sector de acuífero modelado, limita con la roca, que en este caso se puede considerar impermeable.

Los bordes laterales son los que se dan en el límite del tramo modelado con otras unidades acuíferas, ya sea la continuación del valle aguas arriba y aguas abajo del sector estudiado o la unión con los embalses subterráneos generados por el relleno de quebradas, piedemonte u otros. Estos bordes se han modelado imponiendo en las mallas correspondientes un nivel fijo y estableciendo la conexión con el acuífero a través de una transmisividad distinta de cero. El nivel piezométrico fijo se con

- 89 -

sigue asignando un coeficiente de almacenamiento muy alto a cada mal de borde. Por otra parte los niveles fijos, aunque no varían al procesarse el modelo, pueden modificarse externamente si es necesario. Esto se ha hecho así en el caso de las entradas y salidas laterales en los bordes que limitan con el acuífero del propio valle, donde existen fuertes variaciones de niveles a lo largo de los años las que, además se han controlado en los piezómetros del valle. En estos bordes laterales se ha impuesto entonces para cada año un nivel piezométrico diferente. Estos niveles se han obtenido de las mediciones hechas en el piezómetro más cercano al borde considerado. Por su parte los bordes laterales que limitan con acuíferos que no son el principal del valle se han simulado con un nivel fijo para todos los años. Esto se ha hecho así considerando que estos aportes han resultado ser bastante pequeños y que no hay antecedentes que permitan conocer la variación que han experimentado los niveles subterráneos en estos bordes. Este mismo es el criterio adoptado para las entradas subterráneas al primer sector de aguas arriba, Manflas, Jorquera y Pulido, debido a que el registro de niveles existente cubre sólo un año y no hay, por lo tanto, información suficiente para estimar las variaciones de niveles en ese borde.

4.5.9 Infiltraciones por Lluvias

En la modelación del embalse subterráneo del valle de Copiapó no se ha considerado la infiltración que pueda haber producto de la lluvia, debido a que las escasas y esporádicas lluvias que se producen no alcanzan a llegar a la napa. Esto se basa en diversos estudios hechos en diferentes lugares del mundo y la experiencia de estos consultores, que señalan que la recarga directa por lluvia ocurre sólo cuando se tienen tormentas que descargan cantidades importantes. En el valle del Copiapó esto prácticamente no ha ocurrido desde que existe control piezométrico. En particular el período 1962/1986 presenta sólo 2 meses que superan los 50 mm en la estación de Los Loros. En la ciudad de Copiapó, para el mismo período, sólo 3 meses superan los 20 mm pero ninguno los 31 mm. Esta situación permite suponer, con bastante certeza,

que la lluvia no recarga el acuífero y que si lo hace en estos pocos meses excepcionales, no son magnitudes que se acerquen a las de las otras fuentes de recarga.

4.6 PROCESO DE AJUSTE

4.6.1 Introducción

El proceso de ajuste o calaje tiene como objetivo conseguir que el Modelo Hidrogeológico represente en la mejor forma posible el embalse subterráneo modelado. Esto se consigue por aproximaciones sucesivas, mediante modificaciones en los valores asignados a las características hidráulicas y de borde del acuífero. El contraste entre la simulación y la realidad, que señala el grado de aproximación entre el modelo y el acuífero en estudio, se realiza basándose en tres diferentes aspectos. Estos son:

- Contraste Piezométrico

Los niveles simulados deben tener una razonable concordancia con los niveles medidos en los piezómetros existentes en el área de estudio. Esta concordancia sobre todo debe presentarse en las variaciones de los niveles en el tiempo, que son las que reflejan el funcionamiento del embalse subterráneo.

- Salidas por Vertientes

Los sitios donde existen vertientes y los volúmenes aflorados deben ser concordantes entre la situación mostrada por el modelo y lo detectado en terreno.

Los datos de terreno empleados provienen básicamente de dos fuentes:

- 91 -

- Los aforos hechos por la DGA en una serie de canales ubicados aguas abajo de la ciudad de Copiapó, los cuales se abastecen normalmente de recursos provenientes de las recuperaciones de la napa. Los caudales aforados se han presentado ya en los tomos de los estudios hidrogeológicos de cada sector, hechos como parte del proyecto actual.
- Las superficies de las zonas de vegas, registradas en diferentes estudios anteriores y medidas también en este proyecto. Con ellas se ha podido calcular los volúmenes que evapotranspira la vegetación freatófita, fenómeno que también se ha simulado como salidas por vertientes.
- Balance Másico

Los diferentes elementos del balance másico que evalúa la simulación, deben guardar relación con los volúmenes estimados en el balance a nivel anual presentado en los informes anteriores. En el caso de este sector, debido a la imposibilidad de un contraste piezométrico este punto es de mucha importancia.

El proceso de ajuste, como se ha dicho, consiste en conseguir el mejor parecido entre lo simulado y lo observado, similitud que se comprueba en los tres elementos de contraste antes señalados. Para ello se debe modificar las características acuíferas en el parámetro que parezca poder corregir las deficiencias existentes. Por ejemplo si aparecieran vertientes en un sector donde en realidad no existen habría, seguramente, que aumentar la transmisividad en el sector para permitir que el agua siga escurriendo subterráneamente sin aflorar. Este tipo de cambios se van haciendo gradualmente, afectando sólo un parámetro por vez.

En el capítulo que sigue a continuación se describe el proceso de ajuste del Modelo Hidrogeológico del sector Manflas, Jorquera y Pulido.

En él se presenta y analiza los resultados de cada pasada de ajuste, pa

- 92 -

ra luego discutir los cambios realizados para la siguiente pasada.

Para ilustrar el proceso de ajuste se incluye en el Tomo Anexo N° 8, la siguiente información para cada sector modelado.

- Resumen del Balance Másico para cada pasada
- Esquema de los volúmenes que entran y salen subterráneamente de cada sector por los bordes permeables para cada pasada.
- Esquema de las transmisividades adoptadas por malla en la primera y última pasada de ajuste.
- Gráfico de las variaciones piezométricas medidas y simuladas en los piezómetros de contraste para la primera y última pasada de ajuste.

Es necesario aclarar también que se ha resumido varias pasadas en una, de manera de lograr una presentación más sintética y comprensible. Para ello se ha agrupado en una las pasadas que hayan perseguido un mismo objetivo o bien aquellas donde los cambios realizados haya sido similares.

Finalmente se adjunta también un plano, donde se presenta, por sector y para la pasada de ajuste final, un detalle de los volúmenes involucrados en cada fuente de entrada o salida al acuífero.

4.6.2 Relación de Pasadas - Sector Manflas, Jorquera, Pulido

Pasada N° 1

Se efectuó con los datos de entrada preparados de acuerdo a lo descrito anteriormente. El resumen del balance másico se entrega en el Tomo Anexo N° 8.

- 93 -

De este resumen se puede observar que en la simulación se han producido vertientes con un valor de 417.46 Mm^3 para el período de 25 años, vertientes que en realidad no existen. Por otro lado, los caudales infiltrados por los ríos durante las crecidas exceden en forma importante a los valores obtenidos del modelo superficial, por último, el error obtenido en el balance másico es de una magnitud de importancia, en especial si se considera que este modelo se ajustará basándose especialmente en el balance másico.

En cuanto a las entradas laterales, no se tienen quebradas que aporten en forma significativa al acuífero, sólo se produce recarga subterránea a través de los valles de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Al ser simulado este punto, se producen algunos efectos que no concuerdan con la realidad. Por ejemplo, en los ríos Jorquera y Manflas se producen entradas y salidas de agua subterránea en su sección superior.

Para la Pasada N° 2 se cambiará las infiltraciones de los ríos del sector, ajustándola al valor entregado por el modelo superficial, para esto se adoptará una infiltración igual al 40% del dato original.

Con esto se espera disminuir las vertientes existentes en el sector y eliminar los "rebalses" que se producen en los sectores altos de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.

Pasada N° 2

Habiéndose corregido los valores de la infiltración del río según los resultados del modelo superficial, se ejecutó una nueva pasada. Los resultados más importantes de ésta son los siguientes:

- Las vertientes disminuyeron de 417.46 Mm^3 a 164.26 Mm^3 en el período de 25 años.
- El error del balance másico del período y de cada año disminuyó considerablemente.

- 94 -

- Desapareció el "rebalse" que se producía en los sectores altos de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.
- Se observa que las vertientes se producen, en casi su totalidad, en unas pocas mallas, lo que se debe a que los datos de cota de terreno tienen errores. La razón de la existencia de dichos errores es que estos valores se obtuvieron de un plano a escala 1:50.00 con curvas de nivel cada 25 mts., precisión que no es suficiente para un trabajo de esta naturaleza.
- Por último, el aporte subterráneo desde el río Jorquera está bajo lo calculado para ese sector, y los aportes subterráneos de los valles de los ríos Pulido y Manflas exceden a los valores calculados con anterioridad.

Para la pasada N° 3 se corregirán las cotas de terreno de las mallas que parezcan tener error, lo que se hará promediando las cotas de las mallas vecinas. Además, se aumentará el coeficiente de almacenamiento en un 50%, de manera de concordar con los otros modelos realizados en otros sectores del valle del Copiapó.

Por último se modificará las transmisividades desde "la junta" hasta los comienzos de cada río afluente, de manera de ajustar los caudales subterráneos entrantes del estudio. Además se restringirá el criterio de convergencia para disminuir el error del balance másico.

Los resultados del balance másico de esta pasada se entregan en el Tomo Anexo N° 8.

Pasada N° 3

Una vez realizados los cambios indicados, los resultados obtenidos de

- 95 -

mayor importancia son los siguientes:

- Se ha eliminado las vertientes del sector, siendo así, la simulación un reflejo de la realidad.
- Los volúmenes de agua subterránea ingresados al sistema son similares a los obtenidos en el balance másico del estudio hidrogeológico del sector.

El error del balance másico se ha disminuído a valores concordantes con la precisión de este trabajo.

Por último, los resultados del contraste piezométrico, aunque se tiene datos de un solo año, son aceptados y se puede considerar que están dentro de los rangos de precisión previstos para este sector.

Para la pasada N° 4, se ajustará los valores de los parámetros superficiales, como infiltración desde los ríos y riego, con los valores del modelo superficial, esto se debe a los últimos ajustes que tuvo este modelo.

Pasada N° 4

Los resultados de los cambios impuestos luego de la pasada N° 3, se pueden observar en el resumen del balance másico entregado en el Tomo Anexo N° 8. Los cambios, en general, consistieron en una redistribución de las infiltraciones, lo cual, no influyó en los volúmenes entrantes del sistema. No obstante obtener errores de pequeña magnitud en el balance másico, además de un contraste piezométrico aceptable y no tener vertientes en el sector, se considera que el modelo no está todavía calado ya que existe una diferencia importante entre el volumen subterráneo que sale del sector 1 y el que entra al sector siguiente, que va desde el Embalse Lautaro hasta La Puerta. Por este motivo se ha programado una pasada adicional que subsane este problema.

- 96 -

Pasada N° 5

Bajo esta denominación se agrupan una serie de pasadas con cambios sucesivos en la transmisividad del acuífero. Estos cambios han consistido invariablemente en una disminución de los valores que se tenía en los valles Manflas, Jorquera y Pulido, hasta llegar a las cifras que se muestran en los esquemas del Tomo Anexo N°8. Con esto se ha llegado finalmente a unas salidas subterráneas de 944 Mm³ para el período 1962/1986, bastante similares a los 898 Mm³ que se obtuvo de entradas subterráneas en el sector siguiente.

4.6.3 Proceso de Ajuste Sector Lautaro - La Puerta

Introducción

El proceso de ajuste de este sector correspondió fundamentalmente a un retoque de las transmisibilidades, puesto que el resto de los parámetros habían sido suficientemente ajustados. En la primera etapa de calaje, el decir previo a la sincronización con el modelo hidrológico.

Relación de Pasadas

Al tratar de compaginar el modelo hidrogeológico con el modelo hidrológico del sector, apareció una discordancia en el sentido de que existen unas recuperaciones en el sector San Antonio - La Puerta del orden de 500 l/s como media, las que suelen subir hasta 1.300 l/s los años de alto nivel estático, pues bien estas recuperaciones eran menores en el modelo hidrogeológico.

Para poder lograr la coincidencia tanto en mallas con vertientes, como en los caudales involucrados se debió aumentar paulatinamente la transmisibilidad de modo de permitir la escorrentía subterránea que tiene lugar aguas abajo del embalse Lautaro. En las primeras pasadas, el grueso de las vertientes se situaban entre Lautaro y San Antonio, lo que no concordaba con la realidad física observada.

En atención a lo anterior se fue aumentando la transmisibilidad en el centro del valle, de modo de dar salida al agua hacia abajo. Todo esto se realizó teniendo en cuenta, las características geométricas del embalse subterráneo. Por otra parte se consideró factible subir desde valores comprendidos entre 1.000 y 3.000 m²/día hasta valores cercanos a los 10.000 m²/día, los que son usuales en el relleno aluvial del valle del río Copiapó. La operación antes indicada consumió cinco pasadas de ajuste. Quedó así demostrada la existencia de una vía preferencial de circulación del agua subterránea en el tramo considerado.

- 98 -

Es preciso añadir que durante las primeras pasadas se corrigieron errores de apreciación y de transcripción de los datos de entrada. Por ejemplo se menciona el hecho de que las entradas desde las quebradas laterales no resultaron ser tan importantes como a primera vista había parecido. Esto tiene su explicación en una baja permeabilidad de los materiales como producto de la mala clasificación de los materiales granulares que la componen, sin embargo, todos estos ajustes conservaron intacto el funcionamiento hidrogeológico establecido en los Informes Hidrogeológicos anteriores.

Por otra parte cabe señalar que el análisis del modelo hidrológico superficial, detectó la existencia de ciertas recuperaciones en el sector comprendido entre Lautaro y San Antonio.

Con todo lo anterior se logró un primer ajuste calificado como básico.

En un etapa posterior, se retocaron los valores de infiltración desde el río y desde el sistema de riego y se ajustó las recuperaciones a los valores que indicaba el modelo hidrológico superficial. En este aspecto se ha considerado como predominante los valores obtenidos en el modelo hidrológico superficial, debido al contraste de caudales con las medidas reales.

En conjunto con lo anterior se ajustó la infiltración desde el Embalse Lautaro, también de acuerdo con el modelo superficial.

Finalmente se recalculó la pérdida por evapotranspiración desde la caja del río, acorde con la existencia de recuperaciones. Todo esto se incorporó en la última pasada con lo que se logró un buen ajuste, que fue considerado como válido.

El ajuste conseguido da una buena concordancia entre los valores medidos en la realidad y los calculados por el modelo en cuatro aspectos a saber:

- 99 -

- Variación piezométrica
- Ubicación y caudales de las vertientes
- Correspondencia con los valores de infiltraciones y recuperaciones obtenidas en el modelo hidrológico superficial.
- Concordancia en los límites con los modelos hidrogeológicos anterior y posterior al sector Lautaro - La Puerta

En el Tomo Anexo N° 8 se presenta las diferentes salidas del computador, que incluyen:

- Balance másico con inclusión de los valores anuales de todas las variables
- Datos de entrada finales
- Posición y valores de las variables que intervienen en el funcionamiento
- Gráfico de comparación de valores piezométricos entre valores medidos y calculados.

- 100 -

4.6.4. Relación de Pasadas La Puerta Potrero SecoPasada N° 1

Se efectuó con los datos de entrada preparados de acuerdo a lo descrito anteriormente en el capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

El resultado de esta pasada se resume en el balance másico entregado en el Tomo Anexo N° 8, el cual tiene errores, para cada año no superiores a los 0.6 Mm^3 . valor que es muy pequeño debido a la estrictez del error admisible. Para próximas pasadas se aumentará el error admisible de manera de demorar menos el tiempo de ejecución de cada pasada. Afinándolo nuevamente cuando el proceso de calaje esté casi completo.

Por otro lado, en esta pasada se obtuvo como resultado la existencia de afloramientos en forma de vertiente con un volumen total para el período de 25 años de 4.13 Mm^3 . Este valor, pese a ser de una pequeña magnitud es importante eliminar, puesto que indica la existencia de niveles estáticos muy altos. Esto último se ve confirmado por el contraste piezométrico en el que el nivel simulado, para cada pozo, está muy por encima del nivel medido.

Por último, los valores de los aportes de las quebradas laterales son muy grandes, existiendo incluso, "rebalses" hacia estas quebradas, lo que lógicamente no se produce en la realidad. Además, con respecto a los ingresos de agua subterránea en el sentido longitudinal del valle, se tiene un ingreso de 27.3 Mm^3 para el período de 25 años, contrastados con la salida de 400 Mm^3 para igual período del Modelo Lautaro-La Puerta, ubicado inmediatamente hacia aguas arriba.

- 101 -

Para mejorar estos problemas se cerrarán las entradas laterales bajando la transmisividad de esas mallas, además se aumentará la transmisividad del sector de La Puerta, de manera de aumentar el ingreso de aguas subterráneas en el sentido longitudinal del valle.

Pasada N° 2

Luego de modificar las transmisividades de las mallas de aportes laterales, tal como se indicó en la pasada anterior, se obtuvo los siguientes resultados:

- Las vertientes disminuyeron a $2.01 \text{ Mm}^3/25$ años, valor que pese a ser muy bajo indica la presencia de un nivel estático alto en sectores que en realidad no lo tiene.
- Las entradas y salidas laterales disminuyeron notablemente, pero se mantienen salidas hacia quebradas laterales, lo que no puede ser.
- Las entradas de agua subterráneas en el sentido longitudinal del valle aumentaron a $415.7 \text{ Mm}^3/25$ años.
- Según el contraste piezométrico, existen sectores con nivel estático más alto que lo real.

Para la pasada N° 3 se aumentará el coeficiente de almacenamiento un 50%, de manera de tener $S = 0.15$, esto para evitar algunas inestabilidades que se observan en los niveles simulados.

Por otro lado, se hará modificaciones a los valores de transmisividad de algunas mallas de manera de evitar las vertientes que aparecen en sectores incorrectos.

- 102 -

Pasada N° 3

El resultado más significativo, luego de aplicar los cambios propuestos en la pasada N° 2, es que las vertientes han desaparecido en los sectores que en la realidad no existen, sólo se ha mantenido la existencia de éstas en el sector inmediatamente superior a la Puerta, sector que en realidad tiene afloramientos de aguas subterráneas.

Por otro lado, no se ha eliminado el efecto de rebalse del valle central hacia algunas quebradas laterales, lo que debe lograrse en la próxima pasada.

Con respecto al contraste piezométrico, en la zona baja del sector estudiado, los niveles reales y simulados se parecen bastante. En cambio, a medida que se acerca al sector superior del área estudiada, los niveles simulados van haciéndose cada vez más altos con respecto a los medidos.

Es por esto último que para la siguiente pasada sólo se hará modificaciones de las transmisividades de manera de hacer bajar los niveles del sector superior del área estudiada y de cuadrar las entradas subterráneas con las salidas del modelo que sigue hacia aguas arriba.

Junto a esto se aumentará el coeficiente de almacenamiento a un 20%. Además se ajustarán las infiltraciones según los resultados del Modelo superficial de manera de tener un calaje para éste modelo concordante con el modelo inmediatamente ubicado hacia aguas arriba y con el modelo superficial.

- 103 -

Pasada N° 4

Luego de hacer los cambios propuestos en la pasada anterior, se ejecutó nuevamente el Modelo. En esta pasada los resultados obtenidos son bastante satisfactorios.

En relación al balance másico se puede decir que existe una concordancia de los datos de entrada con los resultados del Modelo superficial y el resultado de éste tiene un error aceptable para el grado de precisión de los datos de entrada.

Por otro lado, sólo se tiene vertientes en el sector ubicado aguas arriba de La Puerta, donde en la realidad éstas existen. No teniendo vertientes en otros sectores del área estudiada, tal como es en la realidad.

Por último, con respecto a las entradas de agua subterránea desde quebradas laterales, tienen una magnitud acorde a lo esperado para quebradas similares. Junto a esto, las entradas de agua subterránea en el sentido longitudinal del valle son de una magnitud similar a las salidas del Modelo Lautaro-La Puerta ubicado inmediatamente hacia aguas arriba.

En esta pasada, se ha ejecutado el modelo considerando las descargas por evaporación directa, lo que no había sido considerado en las pasadas anteriores.

4.6.5 Proceso de Ajuste Sector Potrero Seco-Mal PasoRelación de PasadasPasada N° 1

En esta pasada se ha utilizado los datos de entrada preparados y obtenidos según lo descrito anteriormente en el capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

Una vez ejecutado el modelo se puede observar una serie de errores que deberán ser corregidos para la siguiente pasada. De esta pasada se pueden resumir los resultados más importantes. Estos son:

- Existe un error en la designación de las mallas de borde, puesto que la malla 24 - 15 aparece como una de ellas sin serlo.
- El volumen de vertientes existentes en el área modelada es superior al simulado.
- Por otro lado, las entradas de agua subterránea desde las quebradas laterales excede al valor estimado para ellas. En cambio, las entradas en el sentido longitudinal del valle son muy inferiores a lo que deben ser, incluso se producen salidas por las mallas que deberían ser de entradas.

Para solucionar estos problemas se modificará los datos de identificación de la malla 24-15 para que deje de aparecer como malla de borde. Además se modificará la transmisividad de algunas mallas, en especial las del sector superior del área estudiada y se disminuirá la transmisividad de las mallas de entradas laterales para disminuir las entradas generadas por este concepto.

Con estos cambios se pretende, especialmente, aumentar el flujo de entradas de aguas subterráneas en el sentido longitudinal del valle y disminuir las entradas laterales.

- 105 -

Pasada N° 2

Luego de aplicar las modificaciones propuestas en la pasada anterior se ha logrado disminuir hasta valores razonables el volumen aportado subterráneamente por las quebradas laterales. Por otro lado, las entradas de agua subterránea en el sentido longitudinal del valle aumentaron, pero no hasta el volumen necesario.

Con respecto a las vertientes, éstas se producen, en la simulación, en la mayor parte del área modelada. Esto no concuerda con la realidad, puesto que en este sector del valle sólo se tiene vertientes en el sector de Nantoco.

Por último, en el contraste piezométrico se observa una inestabilidad bastante marcada, lo que no permite observar claramente las tendencias de los niveles simulados.

Para la próxima pasada se aumentará los valores de transmisividad para las fallas del sector superior, de manera de aumentar aún más las entradas de agua subterráneas en el sentido longitudinal del valle. Además se aumentará el valor del coeficiente de almacenamiento de un 10% a un 15%, ésto para disminuir la inestabilidad que se observa en los niveles simulados. Por último se modificará transmisividades para localizar las vertientes donde realmente ocurre

Pasada N° 3

Luego de ejecutar el modelo con las modificaciones indicadas en la pasada anterior se ha obtenido las siguientes respuestas del modelo.

Las vertientes han tendido a localizarse en el sector mas cercano a Mal Paso lo que es mas similar a la realidad, pese a esto falta precisar en cuanto a su magnitud y ubicación.

- 106 -

Con respecto a las entradas desde el sector de aguas arriba, éstas han aumentado, pareciéndose más a los valores estimados para ellas.

Por último, en el contraste piezométrico se mejoró mucho, puesto que la inestabilidad casi desapareció, manteniéndose solamente en un piezómetro. En los demás pozos, la tendencia de los niveles simulados es similar a la de los niveles observados.

Para la próxima pasada se abrirá un poco la salida de aguas subterráneas mediante un aumento de la transmisividad de las mallas del sector de salida. Esto se hará para disminuir la cota de los niveles simulados, esperando lograr un mejor contraste piezométrico. No se espera con esta medida que desaparezca la inestabilidad de los niveles simulados para el piezómetro 2730-7010 B1. Para esto se aumentará el coeficiente de almacenamiento a un 20%.

Pasada N° 4

Una vez hechas las correcciones anteriores y ejecutado el modelo, los resultados obtenidos han sido los esperados.

Así, los niveles simulados han descendido hasta situarse junto a los observados o muy cerca de ellos. Además la inestabilidad en el piezómetro 2730-7010 B1 ha disminuido, y las tendencias se han mantenido similares.

Con ésto solo cabe esperar los resultados del modelo superficial para hacer un calaje con él. Es por esto que la próxima pasada tendrá las modificaciones necesarias para que coincidan los valores de infiltraciones y vertientes de ambos modelos, además se hará pequeños ajustes de las transmisividades para lograr un perfecto calaje con el modelo inmediatamente de aguas arriba.

- 107 -

Pasada N° 5

En esta pasada, tal como se dijo anteriormente, se ha introducido los w de infiltración y descarga en forma de vertientes aportados por el modelo superficial. Además se ha agregado la simulación de la descarga por medio de la evaporación y se hicieron los ajustes necesarios para calar las entradas subterráneas con las salidas del modelo La Puerta-Potrero Seco.

Los resultados obtenidos son satisfactorios para modelos de este tipo, en especial si se considera el número de mallas de éste en especial.

- 108 -

4.6.6 PROCESO DE AJUSTE SECTOR MAL PASO-PAIPOTERelación de PasadasPasada N° 1

Se efectuó con los datos de entrada preparados de acuerdo a lo descrito anteriormente en el Capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

En el resumen del balance másico de esta pasada, que se entrega en el Tomo Anexo se observa que el desbalance medio que asciende a $1.28 \text{ (Mm}^3/\text{año)}$ corresponde a un error de un 6.1% respecto a las salidas medias anuales. Valor que se podría considerar aceptable para un modelo hidrogeológico. En cambio, al observar el resumen del balance másico se ve que el desbalance máximo producido para un año en particular es de $4.60 \text{ (Mm}^3/\text{año)}$, valor que corresponde a un 21.9% de error respecto a las salidas medias de los 25 años. Error que se considera muy alto.

Por otro lado, se observa en los resultados de esta pasada que existen vertientes en mallas que en realidad no las tienen, lo que debe mejorarse en las siguientes pasadas.

Además se produce el absurdo de que hayan salidas a través de mallas exteriores laterales, desde las cuales deberían haber entradas, por pertenecer éstas a las llegadas al valle de algunas quebradas laterales. Por último, en el contraste piezométrico se observa tendencias similares en los niveles observados y simulados, pero se tiene diferencias importantes de cotas de ambos niveles, lo que obliga a cambiar algunos datos de transmisividades.

Para la Pasada N° 2 se cambian los siguientes datos:

- Se reduce la transmisividad de las entradas laterales a la mitad de su valor original, debido a la magnitud de los ingresos de aguas subterráneas por éstas.

- 109 -

- Se cambió el valor de la transmisividad de 2 celdas pertenecientes a la entrada al valle en el sentido longitudinal.

Pasada N° 2

Una vez realizados los cambios indicados en la pasada número uno se obtuvieron los siguientes resultados:

- La cantidad de agua subterránea aportada por las quebradas laterales disminuyó los 3.32 ($Mm^3/año$) en salidas, que no deben existir, y los 4.18 ($Mm^3/año$) en entradas, a 1.14 ($Mm^3/año$) y 3.22 ($Mm^3/año$) respectivamente.
- La entrada de aguas subterráneas en el sentido longitudinal del valle no cambió en la cantidad, sólo se redistribuyó haciendo que ésta fuera más constante en el sentido transversal del valle.
- La descarga por vertientes aumentó en un 5%, lo que indica que se requiere una mayor transmisividad en la salida del valle.

Los cambios hechos no tuvieron resultados favorables de importancia, manteniéndose un ingreso de aguas subterráneas muy alto desde las quebradas laterales. Por otro lado, la existencia de vertientes y de salidas subterráneas laterales se puede deber a una transmisividad muy baja en la salida longitudinal del valle.

Por último, se observa en los gráficos de contraste piezométrico una inestabilidad en los niveles simulados que puede eliminarse aumentando el coeficiente de almacenamiento.

Basándose en lo anteriormente expuesto se realizarán los siguientes cambios para la Pasada N° 3.

- 110 -

- Se aumentará al doble la transmisividad de la salida longitudinal del valle.
- Se restringirá las entradas y salidas laterales del valle, dividiendo por 10 las transmisividades de las mallas laterales.
- Se aumentará el coeficiente de almacenamiento de un 10% a un 15%.

Pasada N° 3

Una vez realizados los cambios indicados en la Pasada N° 2 se obtuvo los siguientes resultados:

- Se disminuyó sustancialmente las salidas laterales que existían en las pasadas anteriores.
- Se disminuyó las entradas laterales de $3.22 \text{ (Mm}^3\text{/año)}$ a $1.12 \text{ (Mm}^3\text{/año)}$
- Se eliminaron las vertientes que aparecían en las pasadas anteriores.

Por otro lado, en el contraste piezométrico se tiene tendencias similares entre los niveles simulados y observados, manteniéndose la diferencia de cota entre ellos.

Se ha mantenido, pero en menor escala, el problema de la existencia de vertientes y de la salida lateral, para eliminarlo se deberá aumentar la facilidad de salida del agua subterránea, lo que se consigue aumentando el valor de la transmisividad en el sector de la salida.

Por otro lado, se ajustará las cotas piezométricas del sector superior del modelo, con el objeto de calar el contraste piezométrico.

Concretamente, los cambios que se realizarán para la Pasada N° 4 son los siguientes:

- Aumentar la transmisividad del sector inferior del modelo en un 50%
- Subir la cota piezométrica de las mallas de entrada en 5 mts., ajustando las mallas vecinas para no producir gradientes muy grandes.

- 111 -

Pasada N° 4

En esta pasada se ha realizado los cambios propuestos en la Pasada N° 3, ad se ha disminuído el valor del error admisible con el objeto de ajustar más los valores del balance másico.

Luego de estos cambios se ha eliminado totalmente las vertientes que apare en las pasadas anteriores. Además se hizo desaparecer las salidas laterales que ocurrían, las que en realidad no existen.

Por último se ha logrado un calaje piezométrico acorde con la precisión del delo.

En cuanto al balance másico, del cuadro resumen se puede decir que tanto el error medio anual como el de cada año está dentro de lo aceptable siendo el glose de este balance el siguiente.

Por último, se realizará una última pasada para el modelo, pasada que conta los cambios de infiltraciones y recuperaciones necesarias para hacer concordar los modelos subterráneos con el modelo superficial.

Estos cambios se refieren a la magnitud y distribución de los volúmenes infiltrados por el río y por el sistema de riego completo, los cuales no son de magnitud pero deben realizarse para lograr el calaje del sistema de modelos contempla el estudio completo.

Pasada N° 5

Una vez impuestos las infiltraciones indicadas por el modelo superficial, resultados del modelo son concordantes con lo observado en la realidad.

- 112 -

Así, el balance másico tiene errores aceptables para trabajos de este tipo, las vertientes han sido eliminadas, tal como ocurre en la realidad, y por último, el contraste piezométrico es bastante aceptable para la precisión de los datos de entrada con que se trabajó.

4.6.7 PROCESO DE AJUSTE SECTOR PAIPOTE-COPIAPO

El sector Malpaso-Copiapó se ha dividido en dos, debido a que el valle del río Copiapó cambia bruscamente de dirección en Paipote, poco aguas arriba de donde llega la Quebrada de Paipote al valle. Esto aconsejó la construcción de dos modelos, debido a lo inmanejable y poco eficiente que sería un modelo único.

Relación de Pasadas

Pasada N° 1

Se efectuó con los datos de entrada preparados según lo señalado en el Capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

La principal característica de los resultados obtenidos de esta pasada es una fuerte inestabilidad de niveles, en principio atribuida a una mala relación Transmisividad/Almacenamiento y a un exceso de entradas y salidas en los bordes laterales.

Pasada N° 2

Para corregir lo anterior se hizo una serie de pasadas diferentes, que aquí se agrupan como una sola, tendientes a corregir las deficiencias más importantes indicadas anteriormente. Las pasadas consideraron las siguientes situaciones respecto de los datos iniciales:

- S = 20%, cierre T en borde norte
- S = 10%, T x 2 respecto datos originales
- S = 10%, T x 0,5 respecto datos originales
- S = 20% y T = 10 (m³/día/m) en bordes norte y sur
- S = 30%, T = 10 (m³/día/m) en bordes norte y sur

S = Coeficiente de Almacenamiento T = Transmisividad
y otras combinaciones intermedias con cambios menores.

- 114 -

Ninguna de estas alternativas pudo eliminar la inestabilidad de niveles, aunque sí se corrigió los excesos de entradas y salidas por mallas de borde.

Finalmente la inestabilidad pudo eliminarse, al bajar la cota del error admisible en 10 veces. Esto significa que los problemas eran más que nada de precisión del modelo antes que hidrogeológicos propiamente tales.

Pasada N° 3

Una vez superado el problema de la inestabilidad se comenzó a realizar el ajuste más fino. Ya en este nivel los piezómetros estaban bastante bien calados, faltando solamente llevar a valores reales algunos elementos del balance másico tales como vertientes y recuperaciones del río y las entradas y salidas laterales en el relleno del valle. Con este fin se hizo un conjunto de pasadas, que en síntesis significaron los siguientes cambios:

- S = 20%, T = Original, salvo bordes donde en general se ha bajado notablemente (a 10 y 100 (m³/día/m))
- Multiplicación del coeficiente de permeabilidad del lecho río por 1000.
- Disminución a la mitad de la cota de error de la pasada anterior.

Todo esto llevó a un buen ajuste en piezometría y balance másico, aunque los niveles simulados eran menores a los observados en los últimos años modelados, cuando suben notablemente.

Pasada N° 4

Para arreglar el problema piezométrico señalado, hacer concordante las entradas y salidas del sector con las de los sectores vecinos y llevar el balance másico a las cifras correspondientes, se realizó una secuencia de pasadas con los siguientes cambios:

- 115 -

- Infiltración del río se multiplicó por 3.
- Las infiltraciones de parte del sistema de riego, representado por los canales, las matrices, canales secundarios y riego predial con aguas superficiales se aumentaron 1,5 veces.
- Cierre transmisividad en mallas del borde poniente, para obtener mayores recuperaciones del río.
- Aumento permeabilidad del lecho del río en 1,6 veces.

Estos cambios, y otros menores no detallados, se fueron haciendo uno a uno en diferentes pasadas, para finalmente integrarlos y obtener un muy buen ajuste previo, eso sí, al modelo hidrológico superficial.

Pasada N° 5

Partiendo de la base de los datos de la última pasada, se introdujo las condiciones de infiltraciones determinadas con el modelo hidrológico superficial. Esto produjo un cierto desajuste, especialmente marcado por variaciones de las más atenuadas que las que se observan en los piezómetros. Luego de distintas pasadas con diferentes cambios cada una de ellas, se logró un buen ajuste al corregir las entradas subterráneas desde la Quebrada Paipote. La corrección realizada consistió en introducir la variabilidad de estas entradas a lo largo de los años, aspecto que no se había tenido en cuenta hasta ahora.

Junto a esto se aumentó las infiltraciones del río en el período 1983-1986. Esto se ha compensado, para concordar con el modelo hidrológico, con una disminución de estas infiltraciones en el mismo período en el sector Malpaso-Paipote. En definitiva se ha trasladado infiltraciones de un sector a otro, lo que tiene su explicación física en la existencia del Canal Malpaso. En efecto, el canal que va desde Malpaso hasta Paipote, ha cumplido en parte el papel del río en los años lluviosos, disminuyendo las infiltraciones ya que el río lleva menos agua en ese tramo.

- 116 -

Con respecto a la Pasada N° 4, el principal elemento perturbador introducido por los datos del modelo hidrológico fue la constancia de las superficies cultivadas, lo que se refleja directamente en las infiltraciones del sistema de riego. Esto es un aspecto que en el mismo modelo hidrológico no es demasiado preciso, debido a que los antecedentes existentes sobre las superficies cultivadas es poca.

Como consecuencia, la recopilación de información más completa en el futuro puede mejorar el ajuste logrado el que, no obstante, es bastante bueno.

4.6.8 PROCESO DE AJUSTE SECTOR COPIAPO-PIEDRA COLGADARelación de PasadasPasada N° 1

Se efectuó con los datos de entrada preparados de acuerdo a lo descrito en el Capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

Como en el sector Paipote-Copiapó, inicialmente el principal problema fue la inestabilidad de niveles, que se presenta con grandes variaciones entre años consecutivos. Fuera de esto hay algunos errores menores producto de datos ingresados, que también es importante corregir. Esto es lo que se ha abordado con los cambios que se hizo para la Pasada N° 2, donde el más importante ha sido subir el coeficiente de almacenamiento a 20%.

Pasada N° 2

Producto de los cambios hechos, se consiguió eliminar la inestabilidad de niveles que se presentaba. Una vez conseguido este objetivo comenzó el ajuste de los piezómetros, que mostraban niveles con mayores variaciones que los simulados. Para corregir este comportamiento se realizó una serie de pasadas, bajo diferentes hipótesis, que son las que se describe a continuación.

Pasada N° 3

Las pasadas realizadas han considerado los siguientes cambios,

- Disminución a la décima parte de la T (Transmisividad) en el borde norte, eliminar así un exceso de entradas subterráneas por este lado.
- Aumento de T en la angostura del cerro Pichincha y en Piedra Colgada, para eliminar exceso de elevación de niveles en el área.
- Cierre de la Transmisividad a 1000 ($m^3/día/m$) en los bordes oriente (colgado con el sector Paipote-Copiapó) y sur.

- 118 -

Estos cambios, que se han hecho en pasadas sucesivas, han perseguido eliminar las fuentes de estabilización de niveles. Luego de diferentes pruebas, varias de ellas sin éxito, se ha logrado finalmente un mejor ajuste. Aunque todavía no se consigue la magnitud de las variaciones de los niveles observados, se ha podido reproducir bastante bien la forma de las variaciones.

Pasada N° 4

El objetivo de esta pasada, que en realidad corresponde a una serie de pasadas, ha sido seguir avanzando en el ajuste de los piezómetros. Para ello se trabajó fundamentalmente en los bordes, afinando transmisividades y los niveles. Finalmente se obtuvo buenos resultados al imponer niveles variables en el borde norte (que es donde el llano de Chamonate llega al valle), lugar donde inicialmente se habían supuesto constantes por la poca trascendencia que podían tener. El ajuste fue mejorando paulatinamente en la medida que se aumentó las variaciones de niveles en este borde, hasta llegar a unas variaciones piezométricas muy parecidas a las observadas.

Pasada N° 5

Luego de conseguido un buen ajuste piezométrico, se ha perseguido mejorar el balance másico. Para ello se ha realizado un conjunto de pasadas que, en definitiva, han significado los siguientes cambios:

- La infiltración del río se ha multiplicado por 3.
- La infiltración por canales matrices, secundarios y por riego predial se ha multiplicado por 1,5.
- La transmisividad de borde oriente se ha subido de 1000 ($m^3/día/m$) a 2000 ($m^3/día/m$).
- La cota del error se ha bajado de 50 a 10 metros.

Con estas medidas se ha logrado un excelente calaje, sin duda el mejor del valle y uno de los más precisos de todos los realizados por esta oficina consultora y sus profesionales

- 119 -

Pasada N° 6

Una vez ajustado el modelo superficial, se ha traspasado sus valores de las i filtraciones como dato del modelo hidrogeológico. Estos datos han producido que el calaje logrado siga siendo igualmente excelente, con lo que se ha da: por completo el proceso en este sector.

4.6.9 PROCESO DE AJUSTE SECTOR PIEDRA COLGADA-ANGOSTURARelación de PasadasPasada N° 1

Se realizó con los datos de entrada preparados según lo indicado anteriormente en el Capítulo Proceso de Introducción de los Datos de Entrada.

En esta pasada se ha obtenido resultados bastante razonables, exceptuando algunos problemas en los bordes.

Pasada N° 2

Para conseguir una mejor representación piezométrica, se bajó el coeficiente de almacenamiento de 10 a 5%. Los resultados obtenidos son una leve mejoría.

Pasada N° 3

En esta etapa se incorporó las cifras de infiltraciones obtenidas del modelo hidrológico superficial. Junto a ello se aumentó las variaciones de los niveles en las mallas del borde oriente, que colinda con el sector Copiapó-Piedra Colgada, se disminuyó el coeficiente de permeabilidad del lecho del río a la mitad y se cerró el borde sur.

Los cambios señalados han apuntado a mejorar el contraste piezométrico, bajar las entradas subterráneas desde las quebradas del lado sur y conseguir mayores volúmenes en las salidas por vertientes, objetivos que se han cumplido parcialmente.

Pasada N° 4

Complementando la pasada anterior se ha corregido la cota piezométrica de las mallas del borde sur, lo mismo que se ha bajado a $100 \text{ (m}^3/\text{día/m)}$ la transmisividad en estas mallas. También se ha aumentado la transmisividad en el sector

- 121 -

San Pedro, poco aguas abajo de Piedra Colgada, para establecer una continuidad de paso del agua que proviene subterráneamente desde más arriba en el valle. Finalmente se ha cerrado la transmisividad a $15 \text{ (m}^3/\text{día/m)}$ en las mallas de borde poniente, en Angostura, para obtener mayores vertientes, lo que se ha complementado con una nueva disminución de la permeabilidad del lecho del río.

Todos estos cambios han llevado finalmente a un buen ajuste, tanto desde el punto de vista piezométrico como del balance másico.

4.6.10 Conclusiones

Luego de un intenso trabajo se ha completado el ajuste de los 8 modelos hidrogeológicos con que se ha representado el embalse subterráneo del valle del río Copiapó.

El ajuste ha conseguido una buena representación del sistema modelado, lo que se refleja en una razonable coincidencia en las variaciones piezométricas y los elementos del balance másico del modelo con la realidad.

Como comentarios generales respecto del comportamiento del acuífero se puede decir lo siguiente:

- Las quebradas laterales no aportan subterráneamente cantidades importantes.
- La fuente de recarga más importante del acuífero parece ser la infiltración desde el río.
- Subterráneamente escurren por el valle caudales bastante altos y constantes. Sólo en La Puerta se hacen menores llegando a cerca de 250 (l/s) como promedio.
- Existen importantes recuperaciones del río en diferentes sectores. Las hay en el tramo San Antonio-La Puerta, en Qda. Cerrillos-Malpaso, Copiapó, Piedra Colgada y en la parte baja del valle. Las mayores recuperaciones se dan en el primero de ellos.

A continuación se incluye un conjunto de esquemas que ilustran los diferentes elementos componentes del Balance Másico por sector. El Balance se ha hecho para el período de 25 años simulados, presentándose los diferentes volúmenes, de entradas y salidas al acuífero, en millones de metros cúbicos (Mm³). Los esquemas se resumen a su vez en un plano que se anexa, donde además se grafica con claridad la sectorización efectuada.

- 123 -

Los esquemas son suficientemente claros como para aclarar cualquier explicación adicional. Sólo cabe señalar algunas diferencias que ocurren entre las salidas de un sector y las entradas en el sector que sigue hacia aguas abajo. En general los valores de ambas son razonablemente parecidos.

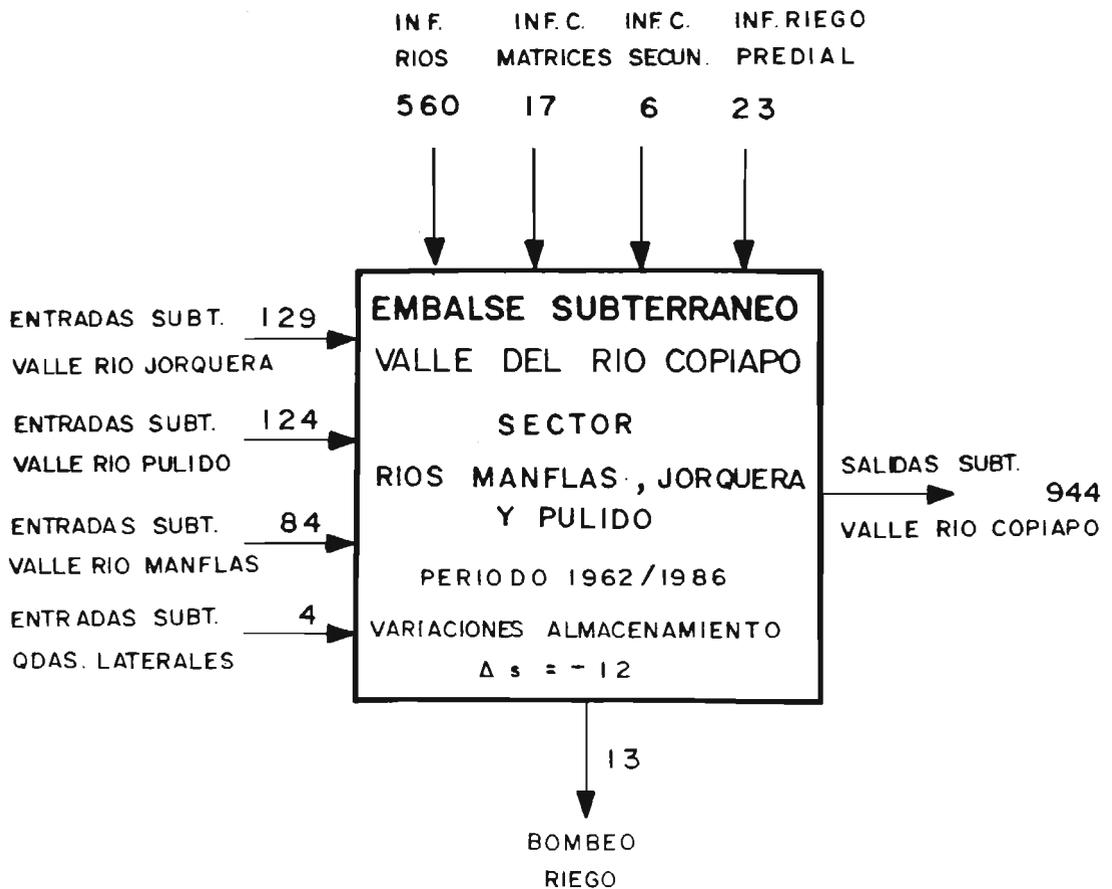
Ahora bien, la bondad del ajuste es un reflejo de la calidad y cantidad de información de terreno existente. Los antecedentes existentes en el valle de río Copiapó son bastante completos, por lo que se puede asegurar que el ajuste logrado es plenamente satisfactorio para los fines que se persiguen. No obstante es necesario seguir perfeccionando el modelo, de manera de obtener una herramienta más completa. En particular los registros piezométricos de los pozos altos del valle son actualmente cortos, especialmente en el área de los afluentes Manflas, Jorquera y Pulido donde se tiene sólo un año de mediciones. También se recomienda, vista la importancia que tienen las infiltraciones y recuperaciones del río, iniciar una campaña sistemática de corridas de aforo para estudiar este fenómeno. Los aforos se deberían hacer a lo largo de todo el río, partiendo con los afluentes, sectorizando de acuerdo a los tramos señalados por el modelo donde se producen recuperaciones e infiltraciones. Esto debería hacerse a la brevedad para aprovechar los años de altos caudales que se están produciendo, que es cuando mayores son, en general, las infiltraciones río a la napa.

Por otra parte será de gran importancia tener un control periódico, al menos anual, de los volúmenes bombeados desde el acuífero, como también de las superficies cultivadas según tipo de cultivo y origen de las aguas de riego. En algunos casos el mejor sistema es efectuar una encuesta directa a los productores de la zona.

BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR I

VALORES EN Mm³
(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962-1986)



TOTAL ENTRADAS	=	959
TOTAL SALIDAS	=	957
DESBALANCE	=	2

- 125 -

BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

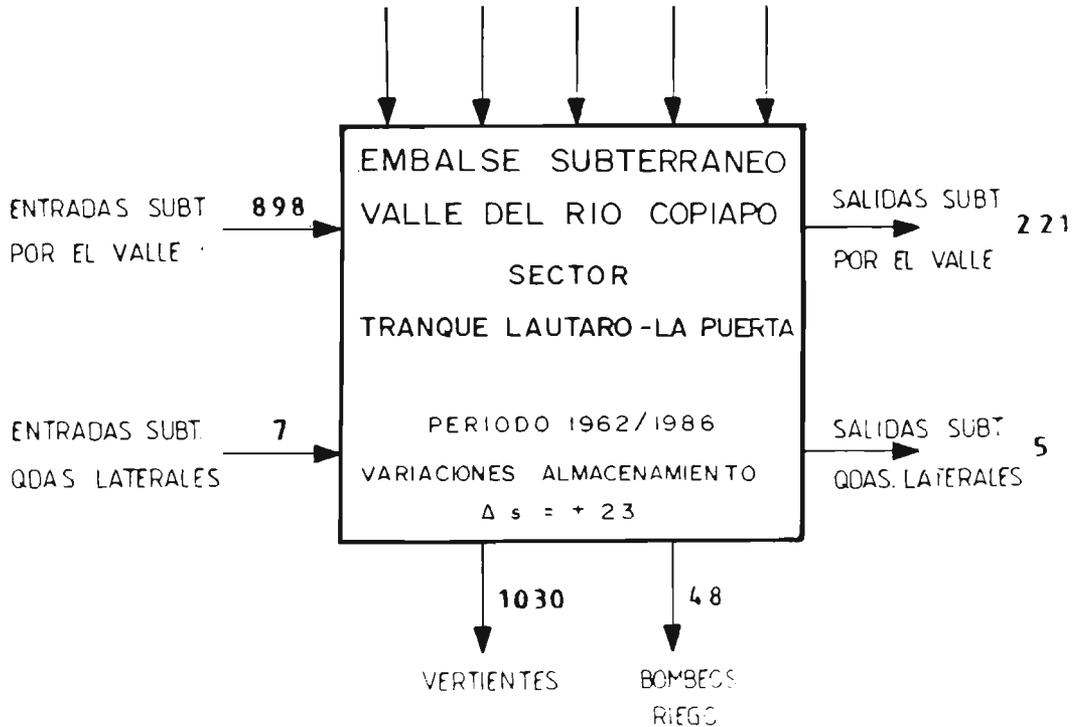
SECTOR 2

VALORES EN Mm.³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962 - 1986)

INF. RIO INF. C. MATRICES INF. C. SECUND INF. RIEGO PREDIAL INF. EMB. LAUTARO

21 100 76 69 130



TOTAL ENTRADAS	=	1 301
TOTAL SALIDAS	=	1 304
DESBALANCE	=	2 6

- 126 -

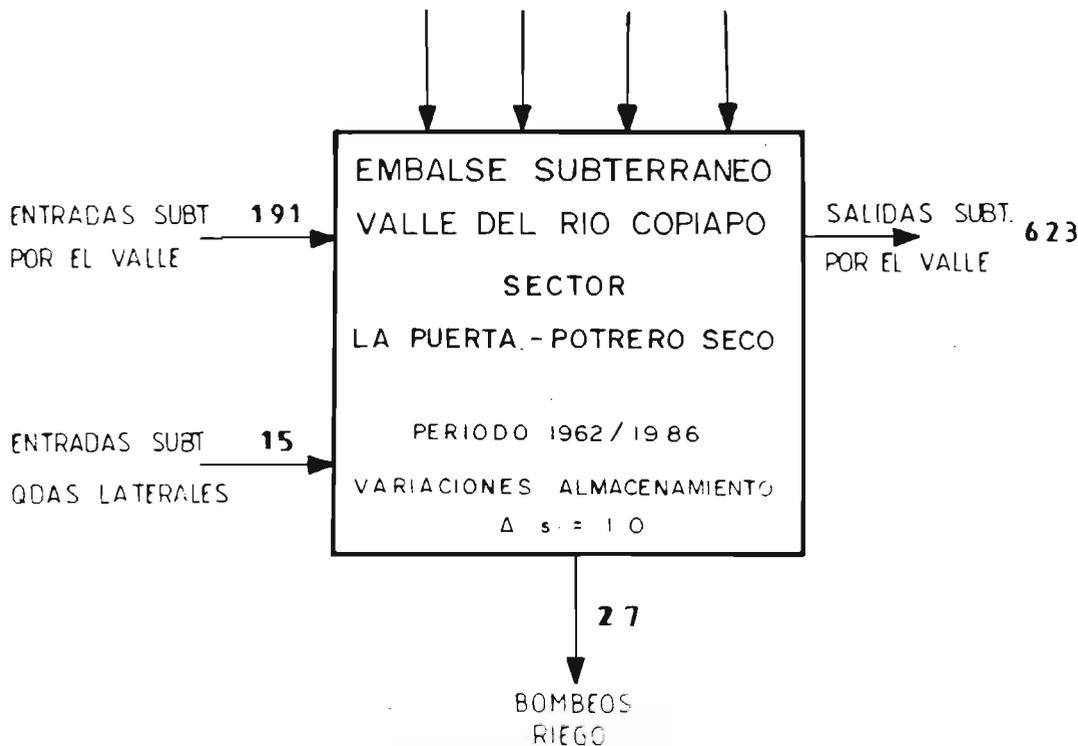
BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR 3 a

VALORES EN M³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962-1986)

INF. RIO	INF. C. MATRICES	INF. C. SECUND.	INF. RIEGO PREDIAL
370	49	12	27



TOTAL ENTRADAS	=	664
TOTAL SALIDAS	=	650
DESBALANCE	=	4

- 127 -

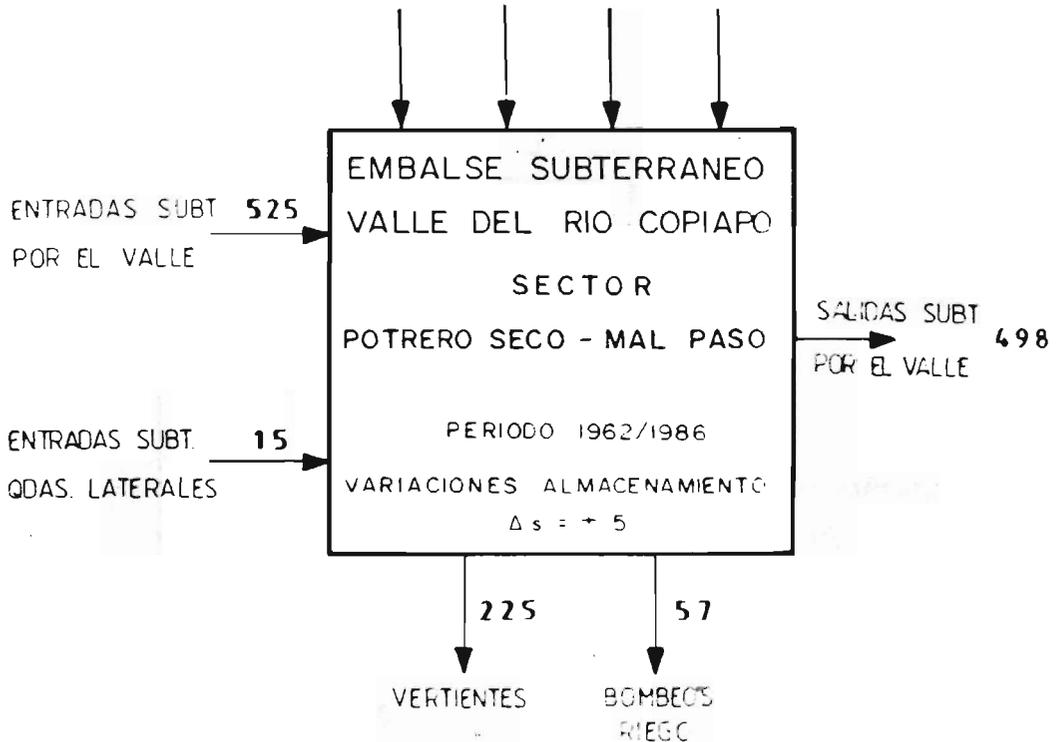
BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR 3 b

VALORES EN M³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962-1986)

INF RIO	INF C MATRICES	INF. C. SECUND.	INF RIEGO PREDIAL
177	49	12	27



TOTAL ENTRADAS	=	805
TOTAL SALIDAS	=	780
DESBALANCE	=	20

- 128 -

BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR 4 a

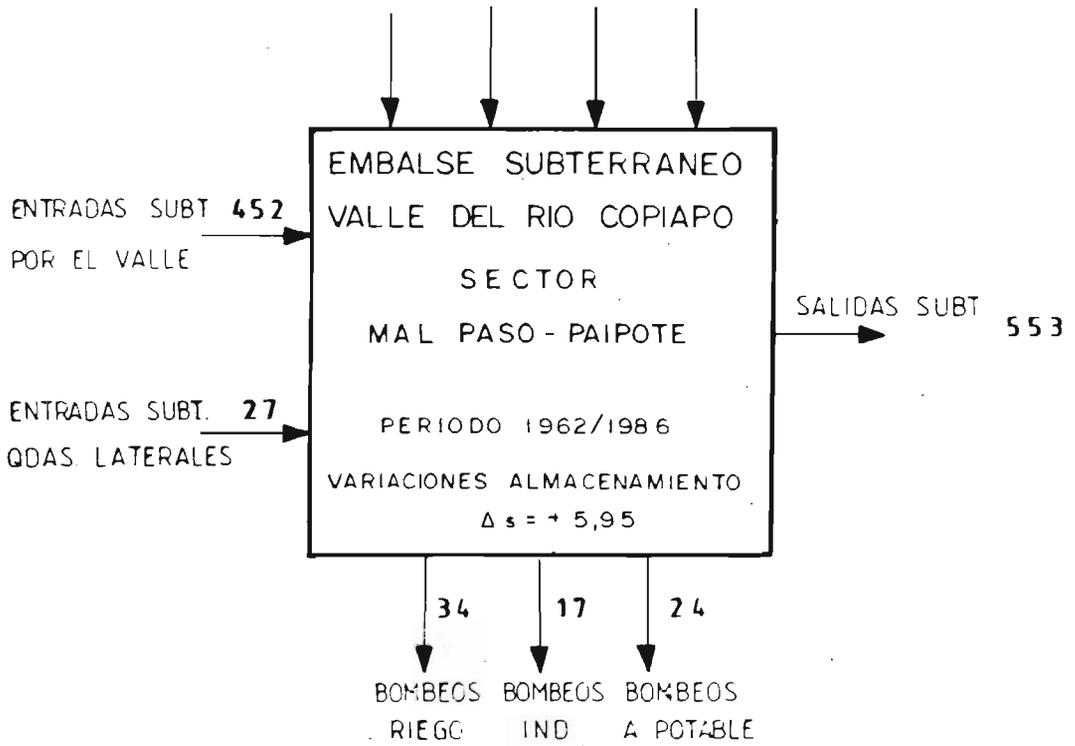
VALORES EN M³ =

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962 - 1986)

INF RIG INF C INF C INF RIEGO

MATRICES SECUND PREDIAL

36 50 33 32



TOTAL ENTRADAS	=	630
TOTAL SALIDAS	=	629
DESBALANCE	=	5

- 129 -

BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

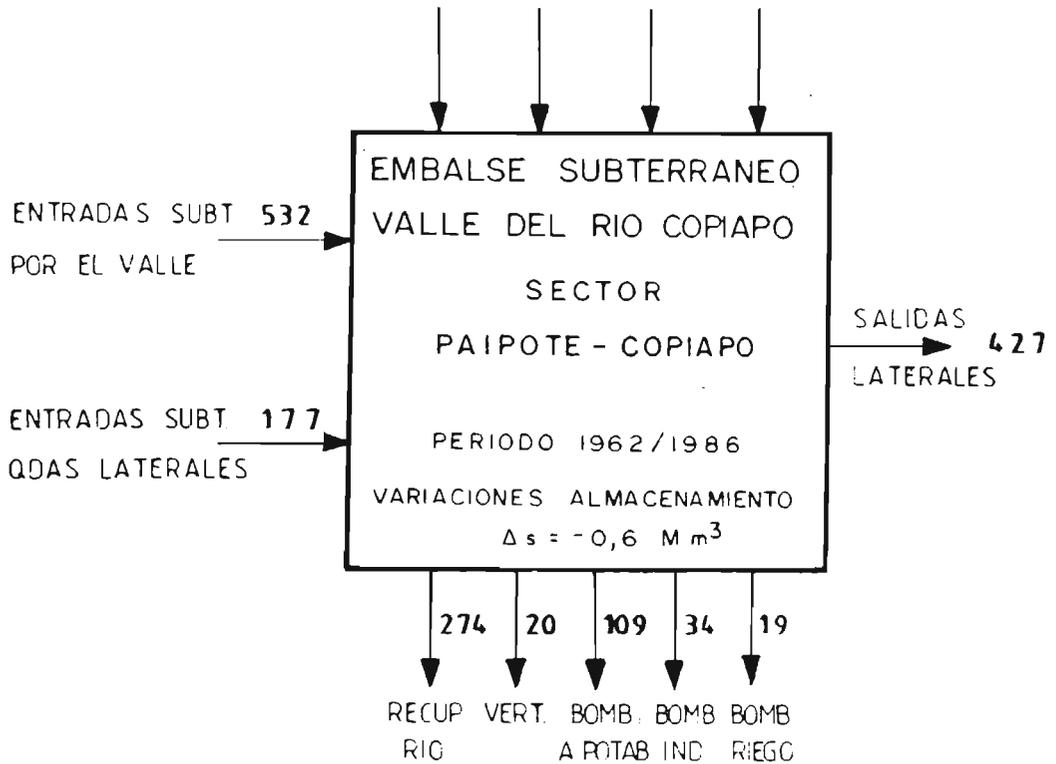
SECTOR 4 b

VALORES EN M m³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962-1986)

INF RIO INF C INF C INF RIEGO
MATRICES SECUND PRECIAL

99 40 16 31



TOTAL ENTRADAS	=	895
TOTAL SALIDAS	=	883
DESBALANCE	=	13

- 130 -

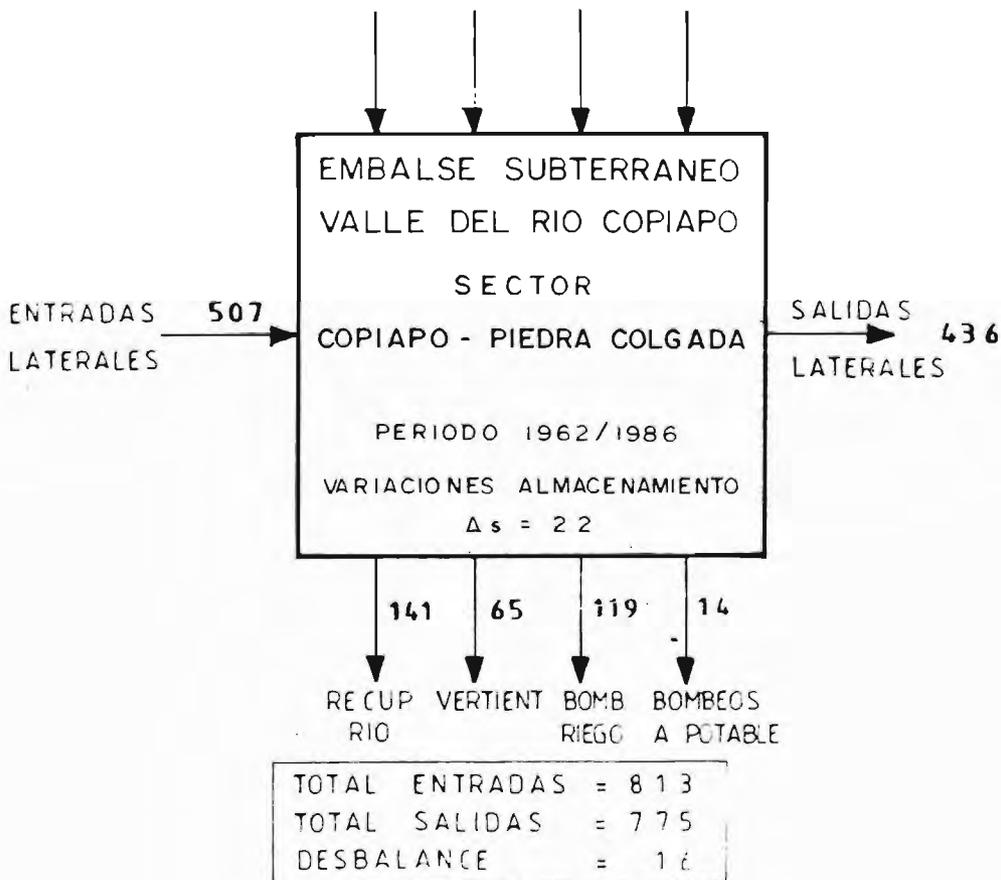
BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR 5

VALORES EN M³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962-1986)

INF RIO	INF C	INF C	INF RIEGO
MATRICES	SECUND	PREDIAL	
178	58	35	35



- 131 -

BALANCE MASICO
PASADA AJUSTE FINAL

SECTOR 6

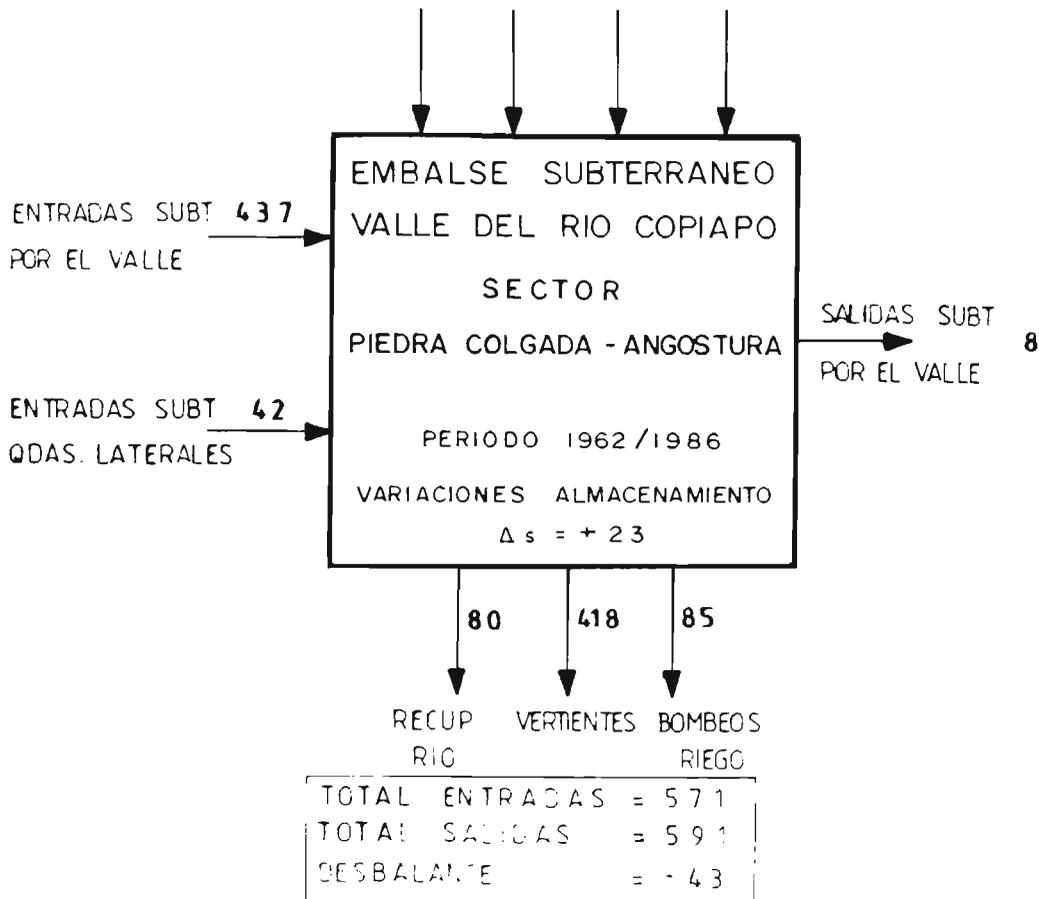
VALORES EN M³

(PARA UN PERIODO DE 25 AÑOS 1962 - 1986)

INF RIO INF C. INF C. INF RIEGO

MATRICES SECUND PREDIAL

0 34 29 29



- 132 -

5. MODELO HIDROLOGICO5.1. Aspectos Generales

El modelo hidrológico del Valle del Río Copiapó es la herramienta matemática construida para representar el comportamiento de las aguas superficiales que escurren por los ríos y canales del valle, incluyéndose en él además la interrelación que tiene con el embalse subterráneo, que se refleja en las infiltraciones de ríos, canales y predios a la napa subterránea, las recuperaciones de la napa al río y los bombeos de aguas subterráneas.

El modelo desarrollado se basa en la ecuación de continuidad de caudales planteada en forma explícita por nudos, nudos que coinciden con los sitios donde se dispone de información fluviométrica del río Copiapó y sus afluentes y con la sectorización establecida para la modelación hidrogeológica.

En los capítulos que siguen, se presenta las características del modelo, la forma cómo operarlo y la preparación de sus datos de entrada. Luego se describe los pasos seguidos hasta conseguir su calibración, es decir lograr que el modelo represente la realidad hidrológica del valle.

La calibración o ajuste del modelo se ha desarrollado para el período histórico 1962/1986, período que se ha elegido básicamente en función de la información disponible sobre el comportamiento de las aguas subterráneas. Este aspecto es muy importante, ya que en esencia se pretende del modelo hidrológico saber cómo se relacionan las aguas superficiales con las subterráneas. En el caso del Valle del río Copiapó hay intercambio entre estos sistemas hídricos a través de las

- 133 -

infiltraciones del río, las infiltraciones del sistema de riego y las recuperaciones o vertientes de la napa.

5.2. Selección del Modelo a Emplear

El modelo empleado es un modelo matemático basado en la ecuación de continuidad.

El sistema hidrológico se ha discretizado tanto espacial como temporalmente, del modo como se describe más adelante en este capítulo.

El sistema hidrológico se ha dividido espacialmente en tramos, denominándose nudos a los extremos de estos tramos. El modelo aplica la ecuación de continuidad a cada uno de estos tramos, partiendo de las demandas a nivel predial calculadas a través de las superficies cultivadas en cada sector y las demandas de los cultivos. Estas demandas se llevan al río, luego de afectarlas de todas las pérdidas que tiene el sistema de riego; estas son: derrames de riego, infiltración predial, infiltración de la red de canales secundarios y la infiltración de los canales matrices.

En el río se ve si los derechos disponibles para los canales del sector analizado alcanzan a cubrir la demanda. Cuando no es así, se debe bombear desde la napa subterránea para abastecer el déficit.

El río, luego de entregar parte de sus aguas para el riego, tiene pérdidas por infiltración directa hacia el acuífero y recuperaciones de la napa subterránea en los sectores donde los niveles piezométricos están cercanos a la superficie del terreno. También recupera el río los derrames de riego, factor que, sumado a los anteriores, permite determinar el caudal en el nudo siguiente, punto de entrada al tramo que sigue hacia aguas abajo.

- 134 -

En síntesis se ha desarrollado un modelo matemático basado en la continuidad de caudales y discretizado por tramos del sistema hídrico. Las ecuaciones planteadas se resuelven en forma directa partiendo del sector de más aguas arriba y avanzando secuencialmente hacia aguas abajo

5.3. Discretización, Condiciones de Borde y Elementos de Contraste

5.3.1. Discretización Espacial

Como se ha dicho antes, se ha dividido en tramos el sistema hídrico, que se compone del río y el sistema de riego.

En total se ha separado en 8 sectores individualizados a continuación en el Cuadro 5-1.

CUADRO 5-1

SECTORIZACION DEL SISTEMA HIDRICO PARA LA MODELACION HIDROLOGICA

SECTOR N°	TRAMO
1	Ríos Manflas, Jorquera y Pulido, hasta río Copiapó en Pastillo.
2	Río Copiapó desde Pastillo hasta By-Pass Embalse Lautaro
3	Río Copiapó desde By-Pass Lautaro hasta S. Antonio
4	Río Copiapó S. Antonio - La Puerta
5	Río Copiapó La Puerta - Mal Paso
6	Río Copiapó Mal Paso - Copiapó
7	Río Copiapó Copiapó - Piedra Colgada
8	Río Copiapó Piedra Colgada - Angostura

- 135 -

Esta sectorización se ha elegido así tomando en cuenta los siguientes factores:

- Ubicación de las estaciones fluviométricas en la Cuenca del río Copiapó. Se ha hecho coincidir cada estación con un nudo del sistema.
- Sectorización del embalse subterráneo. Se ha hecho coincidir los tramos del modelo hidrológico con los sectores en que se ha dividido la modelación hidrogeológica.
- Influencia del Embalse Lautaro. Un tramo se ha establecido para considerar allí sólo las características de operación y funcionamiento del Embalse Lautaro, especialmente para modelar las infiltraciones del embalse a la napa subterránea.

5.3.2. Discretización Temporal

La modelación del fenómeno hídrico que es continuo, obliga a elegir una discretización de la variable tiempo. La definición de la unidad mínima de tiempo a modelar es muy importante y de gran complejidad, ya que involucra en ella una serie de elementos que deben ser considerados.

Entre los aspectos más relevantes que se han analizado en torno a este punto, se cuentan los siguientes:

- Calidad y tipo de estadísticas fluviométricas disponibles, que permitan en definitiva los datos de entrada y elementos de contraste del modelo.
- Variabilidad de los caudales medidos en estaciones fluviométricas.
- Variabilidad de los niveles subterráneos y de las recuperaciones de la napa.

- 136 -

- Calidad y tipo de información disponible sobre superficies cultivadas, dotaciones de riego, pérdidas de riego (predial y del sistema en general), técnicas de riego y otros antecedentes respecto del sistema de regadío del valle.

- Objetivo del modelo desarrollado.

Estos aspectos se analizan más detalladamente a continuación:

a) Calidad y tipo de estadísticas fluviométricas.

Para el período elegido para la calibración, que va de 1962 a 1986, se dispone de un buen conjunto de estadísticas fluviométricas a nivel mensual.

Algunas de ellas son más cortas que este período, como Copiapó en San Antonio que parte en 1968 y Copiapó en Copiapó que sólo se inicia en 1983, y en las demás se ha debido hacer el relleno de algunos meses sin información.

Respecto de la calidad de las estadísticas, el presente estudio y los hechos anteriormente, señalan que son razonablemente homogéneas.

En cuanto al Embalse Lautaro, se dispone de un registro de volúmenes embalsados al final de cada mes. La estadística es, sin embargo, incompleta, sin que haya antecedentes medidos entre 1962 y 1972. Se ha hecho una estimación para este período, pero que en realidad tiene poco apoyo por cuanto no se conoce los volúmenes infiltrados desde el embalse al acuífero.

- 137 -

- b) Variabilidad de los caudales medidos en las estaciones fluviométricas.

Una característica muy importante de tener en cuenta es la rapidez con que varían los caudales en el tiempo. Las estadísticas disponibles señalan que el río Copiapó y sus afluentes son cauces afectados por un importante efecto regulador, efecto cuyo origen desconoce. Esto es así para los años de probabilidad de exceder superiores al 50%, es decir, años normales y secos. En años húmedos, en cambio, se tiene en general caudales más o menos parecidos entre Mayo y Diciembre, los que aumentan notablemente entre Enero y Abril. Esta situación se va amortiguando en la medida que se avanza hacia el mar, encontrándose bastante atenuado en Malpaso casi inexistente en Angostura.

- c) Variabilidad de los niveles subterráneos y de las recuperaciones de la napa.

Los registros de niveles subterráneos indican claramente que el balse subterráneo es sensible a cambios anuales, sin que se noten variaciones mensuales o incluso semestrales. Esto indica que el régimen de recargas y descargas así como la inercia del acuífero hacen que los eventos hidrogeológicos sean relevantes sólo a escala anual.

- d) Calidad y tipo de información disponible sobre el sistema agrícola y de riego.

Existe muy poca información sobre los aspectos más relevantes del sistema agrícola y de riego del Valle de Copiapó. Respecto de superficies cultivadas, se tiene antecedentes sólo en informes

- 138 -

recursos hídricos hechos en 1962, 1969, 1977 y el actual, además de un catastro frutícola de la superficie de uva plantada de 1981 a 1985.

La información que de allí se obtiene no es siempre concordante de un estudio a otro y no hay mayores antecedentes de cómo se ha desarrollado la agricultura en los últimos 6 años, período en que el panorama agrícola ha variado extraordinariamente en el valle con el aumento en el cultivo de los parronales.

Otros antecedentes, tales como eficiencias de riego a nivel predial, pérdidas en canales y sistema de distribución de las aguas de riego, existen sólo a nivel de estimación. El estudio actual ha profundizado, dentro de sus límites en estos puntos, pero aún quedan vacíos y tampoco se tiene información histórica.

Es necesario destacar, no obstante, algunas medidas esporádicas hechas por la D.G.A., particularmente de caudales de recuperaciones de la napa y algunos canales. Estas mediciones, sin embargo, en general son aisladas y sin mayor continuidad en el tiempo.

e) Objetivo del Modelo Desarrollado

El objetivo fundamental del modelo desarrollado es, de acuerdo a las bases del estudio, "contar con un modelo integral de simulación, confiable, flexible, de fácil manejo que permita planificar el aprovechamiento del recurso hídrico, esencialmente a través del control y manejo del embalse subterráneo, concebido como un embalse de regulación interanual.

- 139 -

" Se pretende conocer y representar todos los procesos importantes a que es sometida el agua en su paso por el valle, en especial los procesos relacionados con el riego y los mecanismos de recarga y descarga del acuífero, de modo de poder evaluar la respuesta del embalse subterráneo frente a diversas políticas de explotación y diversas condiciones hidrológicas. En base al conocimiento del acuífero, la operación del modelo permitirá establecer criterios racionales de restricción para su explotación.

En síntesis, interesa poder planificar el uso del embalse subterráneo como un embalse de regulación hiperanual.

Ya se ha dicho en este capítulo, y lo avala la información disponible sobre variación de niveles de la napa, presentada en los Estudios Hidrogeológicos hechos como parte de este proyecto, que el embalse subterráneo prácticamente no muestra variaciones mensuales estacionales sino anuales. Es decir, hay cambios significativos en el estado del embalse subterráneo de un año a otro, sin que estos sean relevantes a escala mensual o incluso estacional.

Las razones de este comportamiento se encuentran en varios aspectos que son:

- Poca variabilidad de los caudales de los ríos, lo que lleva a recargas al acuífero también poco variables.
- Explotación pareja casi a lo largo de todo el año de las aguas subterráneas. Esto se da porque, cuando no se trata de bombeo para agua potable o minería que son de por sí constantes, las extracciones se hacen para el riego de parronales que consumen a tasas relativamente parejas casi todo el año.

- 140 -

- Alta capacidad de almacenamiento del embalse subterráneo, que permite amortiguar notablemente las pocas variaciones del sistema de recargas y descargas.

Esto es particularmente notorio en años donde se ha tenido altos caudales en el río, efecto que se ha traducido en alzas de los niveles subterráneos pero no con la rapidez con que han variado los caudales.

Tomando en cuenta todos los aspectos discutidos en los puntos anteriores, especialmente los objetivos perseguidos con el modelo y la escala del tiempo relevante para el embalse subterráneo, se ha elegido una discretización temporal anual. Esto significa que los datos de entrada y los resultados obtenidos de la operación del modelo serán anuales, aún cuando en su procesamiento interno las unidades de tiempo son menores, para conseguir una adecuada precisión.

No obstante lo dicho en los párrafos anteriores, se ha decidido verificar la modelación a escala anual con una modelación mensual para un período relevante. El objeto principal es comprobar que el modelo a escala anual es suficientemente preciso y representa adecuadamente los fenómenos hidrológicos del valle.

El Modelo Hidrológico Mensual se describe con todo detalle en el capítulo 6 de este Tomo, presentándose a continuación la modelación anual.

5.3.3. Condiciones de Borde

Las condiciones de borde son los valores que se impone a las variables de estado del sistema en un determinado punto del espacio o instancia de tiempo.

- 141 -

En este caso una condición de borde son los caudales que se tiene en la entrada al primer tramo de aguas arriba. Estos se han impuesto para cada uno de los años simulados, como la suma de los caudales medios anuales de las estadísticas de los ríos Manflas, Jorquera y Puelido en sus respectivos vertederos.

Aunque no es propiamente una condición de borde, también se ha impuesto, como una condición fija del sistema para el proceso de calaje, los volúmenes embalsados al final de cada año y los volúmenes medios almacenados en ese mismo período en el Embalse Lautaro.

En ambos casos se ha considerado años hidrológicos.

5.3.4. Elementos de Contraste

El calaje de un modelo se basa en contrastar los valores obtenidos de la simulación con los observados en la realidad, hasta conseguir entre ellos un razonable parecido.

En este caso los elementos de contraste han sido las estadísticas de caudales con que se cuenta en el valle del río Copiapó. Estas son las del río Copiapó en Pastillo, By - pass Lautaro (Aguas abajo de la descarga del Embalse Lautaro), San Antonio, La Puerta, Malpaso, Copiapó (junto a la ciudad) y Angostura. Las estadísticas se encuentran traducidas por la DGA hasta 1984, pero, la importancia que revisten los últimos años que son de gran caudal, se ha hecho una traducción propia de la información hasta Abril de 1987. Esta información, con los registros extendidos hasta 1987, se presentan en el Tomo Anexo N° 1.

- 142 -

Los antecedentes empleados son, fuera de la actualización de los últimos años, las estadísticas extendidas y rellenadas que se presentó en el tomo de Recursos Hídricos de este estudio. A esto se agrega la extensión de la estadística del río Copiapó en San Antonio, hecha por correlación de caudales medios anuales con Copiapó en La Puerta (régimen medido).

Aunque el contraste se base en los elementos señalados anteriormente, se ha tenido en cuenta algunos aspectos auxiliares que han cumplido un papel de importancia. Estos han sido la comparación entre los volúmenes realmente bombeados y los necesarios de bombear según el modelo, para suplir la escasez de recursos superficiales y la estimación de las recuperaciones de la napa a través de las variaciones de niveles subterráneos medidos.

El primero de estos elementos ha permitido saber el grado de aproximación con que se ha estimado las demandas y pérdidas del sistema de riego. En efecto, si el bombeo requerido según el modelo es muy diferente al obtenido de las encuestas, será un índice de una mala estimación de las superficies cultivadas o de los factores de ineficiencia de riego.

En cuanto a las recuperaciones de la napa, más que estimar sus volúmenes, se ha apoyado en las variaciones de niveles subterráneos la forma como cambian las recuperaciones de un año a otro. Así cabe esperar poca recuperación en un año de niveles profundos, las que deberían ir en aumento si los niveles suben o disminuir si continúan descendiendo.

- 143 -

5.4. Descripción del Modelo y Manual de Operación

5.4.1. Aspectos Generales

La preparación del modelo hidrológico ha consistido en construir un programa de computación capaz de representar el sistema hídrico superficial del Valle del río Copiapó.

El modelo plantea la ecuación de continuidad para cada tramo en que se ha dividido el sistema, resolviéndola en forma explícita desde arriba hacia aguas abajo para cada intervalo de tiempo. Este método obliga a imponer los caudales en la entrada del primer tramo para cada año simulado.

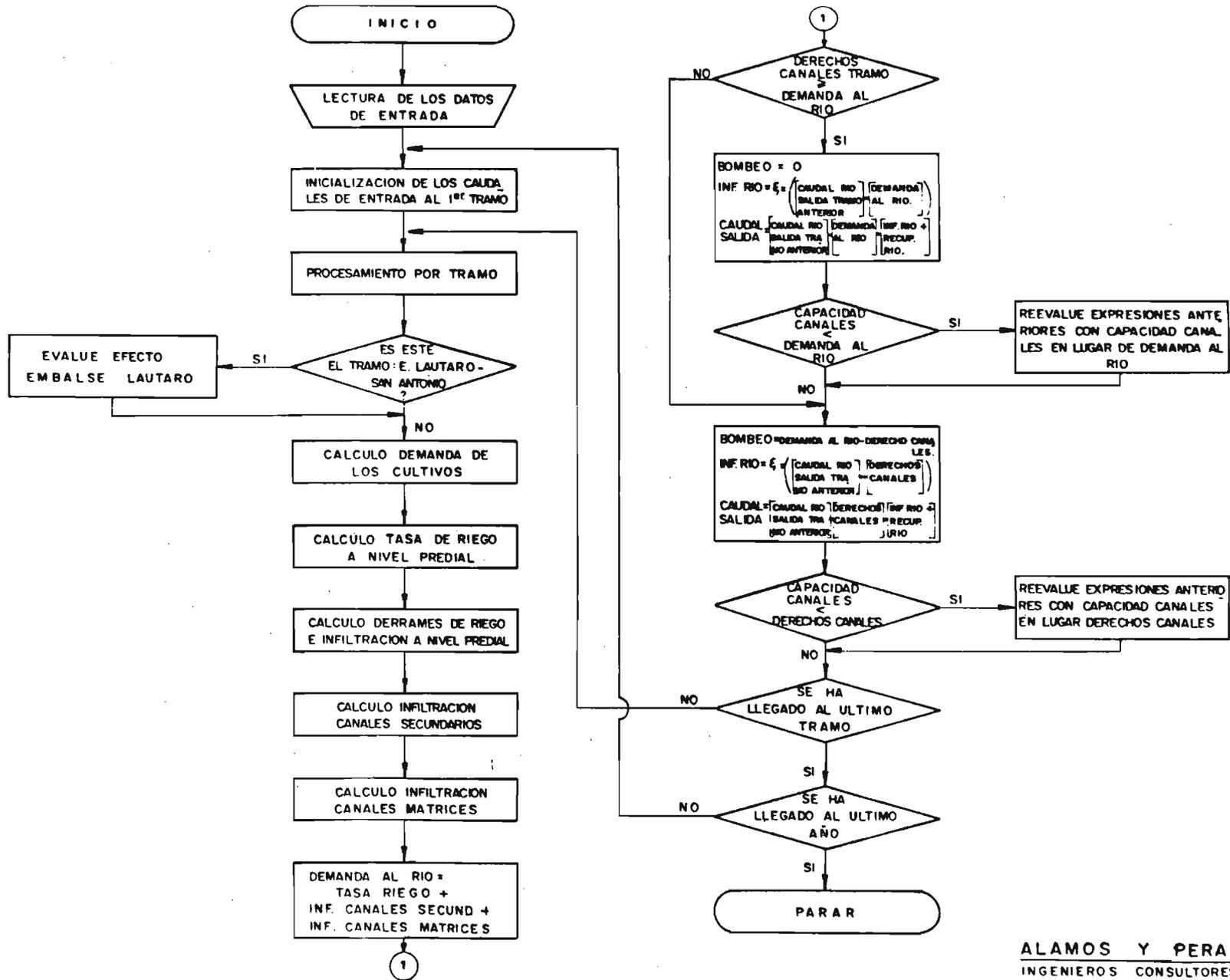
Partiendo de la base de satisfacer las demandas de riego por tramo, sujeto a los derechos superficiales existentes y recursos disponibles, se ha desarrollado un programa de computación en lenguaje BASIC denominado SUPERCOP. Este modelo ha sido diseñado en un computador MULTIM compatible con un IBM-PC, aún cuando puede ser adaptado fácilmente para operar en otros equipos.

El tiempo que el programa demora en ser procesado depende bastante del equipo en que se corra, pero fluctúa entre 1 y 5 minutos. El último valor es el que se obtiene en un IBM-PC compatible de 4,77 MHZ de velocidad de proceso y operando con diskettes.

Para completar esta presentación, se adjunta a continuación un esquema que describe cómo opera el modelo. También, en el Tomo Anexo N° 8, se entrega un listado del programa empleado.

5.4.2. Descripción del Modelo

En este punto se aclara algunos términos y procedimientos de cálculo que emplea el modelo.



- 145 -

La demanda de los cultivos se calcula haciendo la suma del producto de las superficies cultivadas y la evapotranspiración de cada cultivo. Las superficies cultivadas se han establecido por cada sector y año para 5 tipos de cultivos: Hortalizas, Praderas, Vides, Frutales y Cereales. La información de base empleada son las encuestas incluidas en 4 estudios hechos en el valle. Estos son el ITALCONSULT, (Realizado por la Dirección de Riego en 1969, (Ref. 11) el QUEIROLO (Ref. 7) y el presente estudio. Ellos tienen información de las superficies cultivadas en 1962, 1966, 1976 y 1986 respectivamente. A continuación se presenta el Cuadro 5-2, con una síntesis de los antecedentes indicados.

En cuanto a la evapotranspiración de los cultivos, se ha empleado los datos presentados por sectores en el Capítulo Demandas de Agua del Tomo II del presente estudio.

Por otra parte, y como es bien sabido, el panorama agrícola del valle ha cambiado radicalmente en los últimos años con la plantación de una importante cantidad de parronales, en su mayoría destinados a producir uva de mesa para la exportación. Para conocer la evolución que ha tenido la superficie de uva plantada, se ha contado con la información del Catastro Vitivinícola y Declaraciones, con antecedentes al 31 de Diciembre de 1985. (Ref.27).

La tasa de riego a nivel predial se ha calculado como la suma del producto de las superficies cultivadas y la evapotranspiración, dividida por la eficiencia del método de riego empleado.

Las eficiencias de riego predial consideradas han sido las siguientes

- 146 -

CUADRO 5-2
SUPERFICIES CULTIVADAS (Ha.) EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO
SEGUN DIFERENTES ESTUDIOS

	S E C T O R						TOTAL	ESTUDIO
	1	2	3	4	5	6		
HORTALIZAS	1,0	30,0	43,5	153,7		211,0	439,2	1
							777,8	2
Incluye huertos caseros	23,0	125,2	138,3	242,1		420,0	948,6	3
	3,1	120,5	66,3	1.600,0		1.092,3	2.882,2	4
PRADERAS	321,5	101,5	139,5	23,9		536,0	1.122,4	1
							229,0	2
	94,5	59,7	12,6	95,2		61,8	323,8	3
	6,3	62,0	0,0	7,7		0,0	76,0	4
VIDES	0,0	41,2	173,6	121,8		67,1	405,7	1
							459,2	2
	0,0	127,4	144,9	144,6		69,1	486,0	3
	513,2	1.430,5	1.806,1	102,9		837,3	4.690,0	4
FRUTALES	1,2	10,2	66,7	39,7		155,2	273,0	1
							381,9	2
	1,3	34,3	50,6	73,3		180,1	339,6	3
	0,0	13,0	145,7	20,0		207,3	386,0	4
CEREALES	33,0	147,9	359,8	245,6		474,0	1.260,3	1
							3.254,5	2
	27,5	150,9	242,9	180,1		0,0	601,4	3
	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	4
TOTAL	356,7	330,8	785,1	584,7		1.443,3	3.500,6	1
	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	5.102,4	2
	146,3	497,5	589,3	735,3		731,0	2.699,4	3
	522,6	1.626,0	2.018,1	1.730,6		2.136,9	8.034,2	4

IDENTIFICACION DE LOS ESTUDIOS CONSULTADOS

1. APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO. CORFO - ITALCONSULT ARGENTINA 1963 (Ref. 12)
2. APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRAULICOS EN EL VALLE DE COPIAPO M.O.P. - DIRECCION DE RIEGO JULIO DE 1969 (Ref. 11)
3. TASA DE RIEGO DE USO RACIONAL Y BENEFICIOSO Y ROL DE REGANTES DEL VALLE DE COPIAPO. M.O.P. DIRECCION GENERAL DE AGUAS - DOMINGO QUERIOLO - DICIEMBRE 1977 (Ref. 7)
4. ESTE PROYECTO, ACTUALMENTE EN DESARROLLO POR ALAMOS Y PERALTA I.C. LTDA.

NOTA: SE HA HECHO LA SIGUIENTE ASIMILACION CON LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL VALLE.

SECTOR 2 - DISTRITOS 1, 2 y 3; SECTOR 3 - DISTRITOS 4, 5 y 6; SECTOR 4 - DISTRITOS 7, 8 y 9.

- 147 -

CUADRO 5-3EFICIENCIAS DE RIEGO PREDIAL CONSIDERADASEN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

CULTIVO	EFICIENCIA %
Hortalizas	50
Praderas	45
Frutales	45
Parronales (goteo)	80
Cereales	50

Los derrames de riego y la infiltración de riego predial, se han estimado, cada una, como la mitad de la diferencia entre la tasa de riego y la demanda de los cultivos.

Las pérdidas en canales secundarios se han evaluado como una proporción del caudal en la cabecera de estos canales. La proporción se estableció de manera de conseguir que estas pérdidas sean similares a las de infiltración de riego predial.

Las pérdidas en canales matrices se han estimado como un porcentaje del caudal total derivado por el conjunto de canales principales de cada sector. Para obtener estos porcentajes se ha empleado la información de infiltración en canales presentada en los estudios hidrogeológicos hechos como parte de este estudio.

- 148 -

En cuanto a los derechos que los canales de cada tramo tienen sobre las aguas del río, se ha ocupado las cifras, incluidas en el capítulo sobre Infraestructura de Riego del Tomo Anexo N° 1 del estudio actual, sobre las acciones a que tiene derecho cada canal. Estas son las que se incluyen a continuación.

CUADRO 5-4DERECHOS EN ACCIONES DE LOS CANALESDEL VALLE DEL RIO COPIAPO

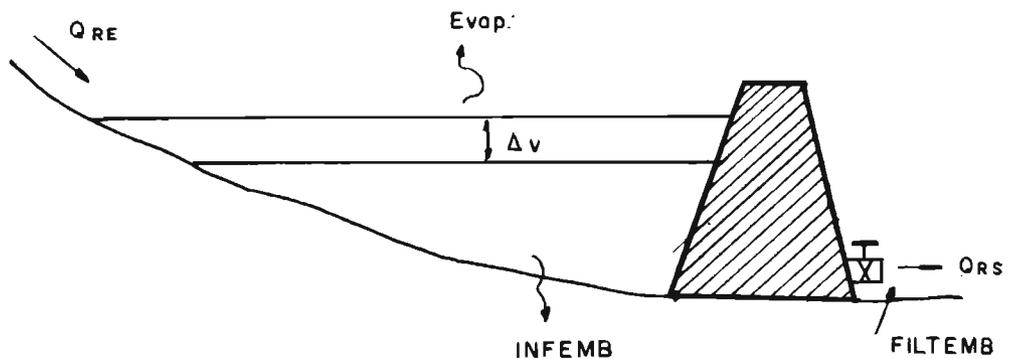
N°	SECTOR	DERECHOS EN ACCIONES
1	Manflas, Jorquera y Pulido, hasta Portillo	840
2	Pastillo - Embalse Lautaro	24
3	Embalse Lautaro - San Antonio	1.344
4	San Antonio - La Puerta	720
5	La Puerta - Mal Paso	3.371
6	Mal Paso - Copiapó	5.125
	Total	11.424

Aguas abajo de Copiapó no existen derechos permanentes sino eventuales solamente.

- 149 -

5.4.3. Efectos del Embalse Lautaro

Pocas veces, desde su construcción, ha tenido el Embalse Lautaro alguna participación sobre el manejo de los recursos hídricos del valle. Ultimamente, sin embargo, durante el período de años húmedos que se ha tenido, el embalse ha llegado a tener importantes volúmenes almacenados. Esto ha ocasionado que el régimen hidrológico e hidrogeológico altere los efectos de regulación e infiltración a la napa fundamentalmente. Esquemáticamente el funcionamiento del embalse queda descrito como sigue:



Donde:

 Q_{RE} → Caudal medio afluente al embalse Q_{RS} → Caudal medio efluente del embalse ΔV → Variación del volumen embalsado para un período determinado

EVAP → Evaporación desde la superficie del agua

INFEMB → Infiltración a la napa subterránea

FILTEMB → Filtraciones que afloran aguas abajo del muro.

- 150 -

Para efectos de ajuste del modelo, se conoce como dato el caudal medio efluente y los volúmenes embalsados. Existen además mediciones auxiliares, que permiten estimar con cierta precisión la evaporación desde el embalse y las filtraciones a través del muro y a pozos. En el primer caso se cuenta con un evaporímetro instalado junto al embalse, donde se controla diariamente la evaporación. Respecto de las filtraciones, se tiene un control diario de ellas, lo mismo que de los volúmenes almacenados y el agua entregada.

Para la evaporación, se ha llevado al gráfico de la Figura 4-1 los valores medidos por el evaporímetro entre 1981 y 1985. En él se descubre que tanto la evaporación mensual como la total anual varían muy poco de un año a otro, por lo que se ha adoptado un valor anual constante, el promedio del período 1981 - 1985, de 2.835 (mm/año).

La evaporación del embalse se ha calculado como:

$$EVAP = 2.810 * Superficie\ espejo\ agua * 0,7/1000 \text{ (Mm}^3\text{)}$$

donde 0,7 es un factor que afecta la evaporación medida en bandeja, para que refleje las condiciones del embalse. La superficie del espejo de agua se ha obtenido de la curva de Superficie Inundada incluida en el informe que hizo la Dirección de Riego en 1969. (Ref.11)

Para hacer el proceso en forma automática, se ha obtenido las siguientes relaciones, a partir de la curva mencionada y la Curva de Volúmenes Embalsados publicada en el informe señalado.

$$S = 70 + h \cdot 139,855$$

S = superficie inundada (Miles m²)

h = altura del agua en el embalse (m)

VALLE DEL RIO COPIAPO

EVAPORACION EN EMBALSE LAUTARO

EVAPORACION
(mm.)

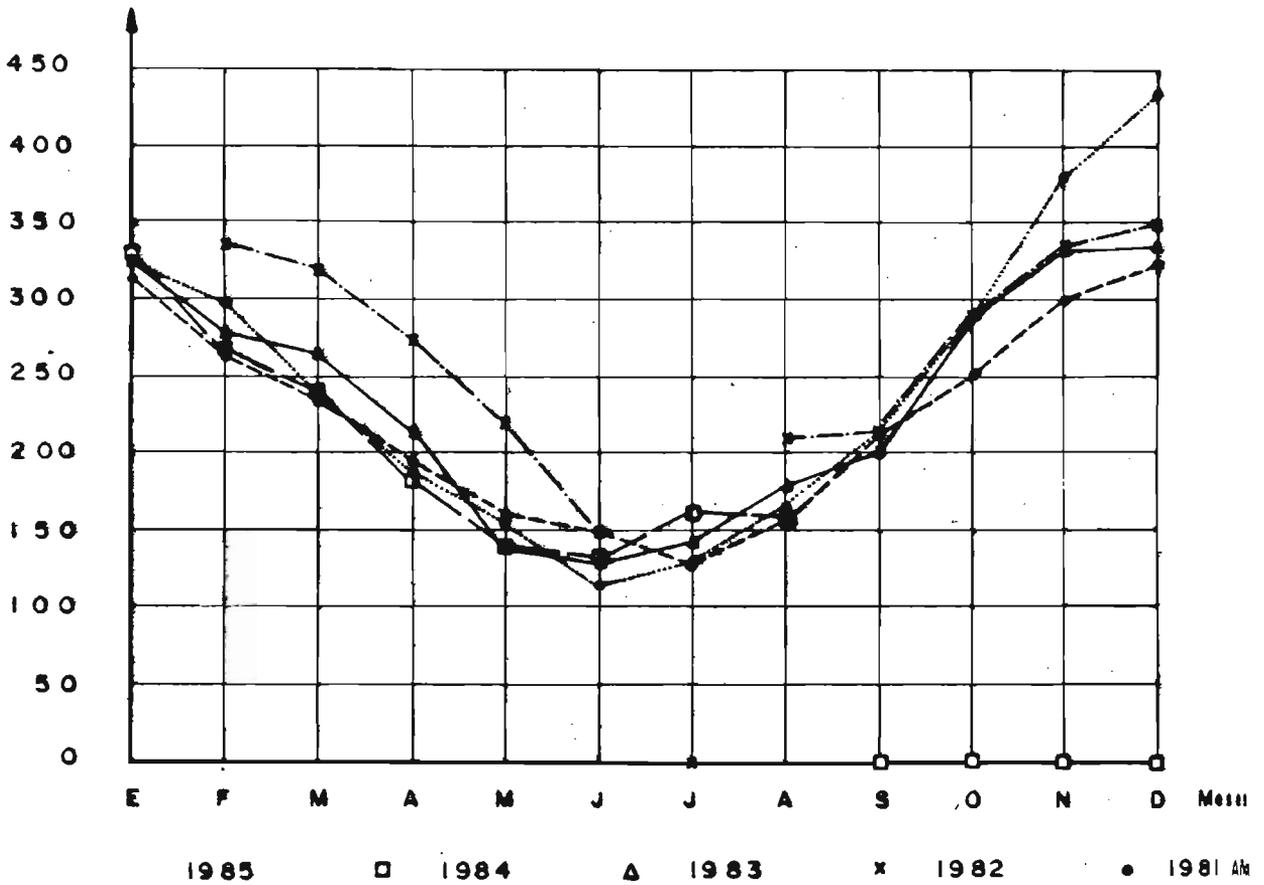


FIGURA 4-1

- 152 -

$$h = 3,7683 \cdot v^{0,48795}$$

v = Volumen embalsado (Millones m³)

h = Altura del agua en el embalse (m)

En cuanto a las filtraciones, se ha hecho el gráfico de filtraciones contra altura de agua en el embalse que se presenta en la Figura 4-2. Allí se encuentran los datos recogidos por la Dirección de Riego en la década 1940 - 1950 y la información recopilada en el presente estudio para los años 1984, 1985 y 1986, que se presenta en el Tomo Anexo N° 1, capítulo Infraestructura de Riego.

Tomando en cuenta sólo estos últimos antecedentes, por ser los más actuales, se ha obtenido la siguiente relación:

$$\text{FILTEMB} = \frac{0,475}{5,2} \cdot h \quad \text{para } h > 16,8 \quad (\text{m})$$

con FILTEMB = filtraciones desde el embalse (m³/s)

h = altura de agua en el embalse (m)

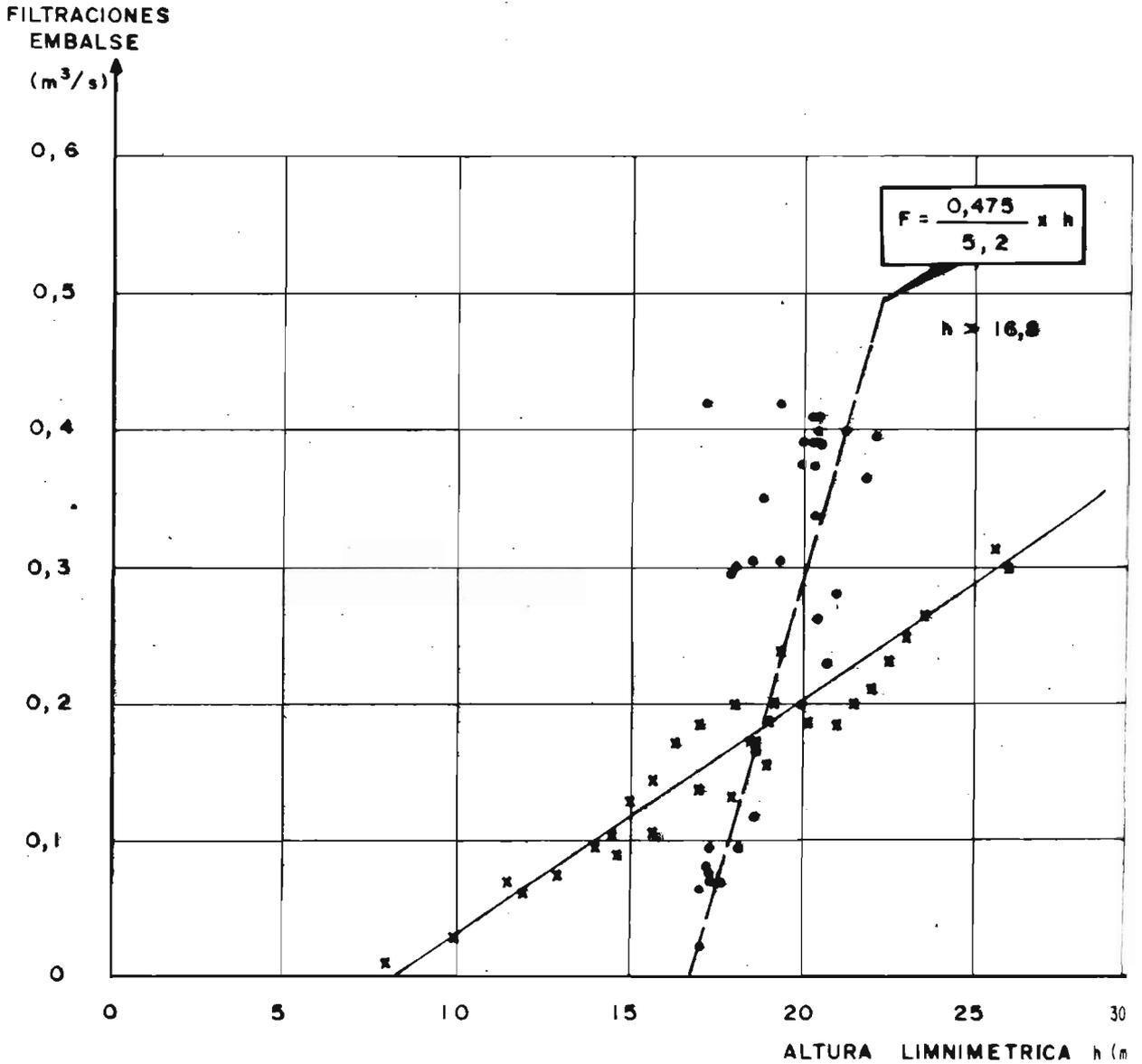
Posteriormente, como se verá en la descripción del proceso de ajuste del modelo, la relación se ha modificado a:

$$\text{FILTEMB} = \frac{0,475}{5,2} \cdot 0,2 \cdot h \quad \text{para } h > 15,0 \quad (\text{m})$$

con la cual se ha conseguido el calaje del fenómeno de las filtraciones

Revisando ahora la ecuación de balance planteada anteriormente para el embalse, se descubre que son incógnitas el caudal afluente y las infiltraciones a la napa. Ambos aspectos ha sido posible conocerlos sólo a través del proceso de ajuste. Como punto de partida se ha considerado que los caudales afluentes al embalse son los caudales medidos en

FILTRACIONES EMBALSE LAUTARO



FUENTE :

● = DATOS DEL PRESENTE ESTUDIO , TOMO INFRAESTRUCTURA DE RIEGO (PERIODO 1984 - 1988)

x = DATOS DIRECCION DE RIEGO 1942 - 1950

FIGURA 4 - 2

- 154 -

Pastillo menos las infiltraciones del río en el sector Pastillo-Lautaro, pérdidas que no son despreciables ya que el tramo alcanza a una longitud nada pequeña, cercana a los 5 Km. Respecto de las infiltraciones del embalse a la napa, se ha planteado una relación con más significado físico que la presentada previamente en la Infraestructura de Riego. (Tomo Anexo N° 1. La relación elegida deriva de la ecuación de Darcy para flujo en medios permeables de acuerdo a lo que sigue:

$$\begin{aligned} \text{INFEMP} &= \text{Superficie inundada} \cdot \text{velocidad infiltración} \\ &= \text{Sup. inundada} \cdot K \cdot i \\ &= \text{Sup inundada} \cdot K \cdot \frac{h}{L} \end{aligned}$$

entonces

$$\text{INFEMB} = \text{Superficie inundada} \cdot h \cdot \text{cte.}$$

A su vez la superficie inundada depende del nivel del embalse, de acuerdo con la relación presentada anteriormente, $S = 70 + h \cdot 139,855$. Por su parte la cte dependerá de la permeabilidad del lecho del embalse, que puede ser variable de acuerdo a la depositación en el fondo del material fino que arrastra el río. Se estima que en la medida que el embalse reciba y almacene grandes caudales, sin duda de aguas turbias, debería irse produciendo la colmatación de su lecho.

5.4.4 Manual de Operación

Operar el modelo desarrollado es bastante sencillo. Hay dos caminos posibles de seguir. El primero es cargar en la memoria del computador un compilador BASIC (el programa se ha desarrollado con el compilador TURBO-BASIC de Borland) y ejecutar el modelo corriendo el programa SUPERCOP.BAS. El segundo es generar a partir del archivo SUPERCOP.BAS, un paquete ejecutable que se denominará SUPERCOP.EXE. Esto se puede hacer fácilmente con el compilador antes señalado. Luego el programa se ejecuta simplemente escribiendo en la pantalla:

SUPERCOP.

Previo a esto es necesario haber preparado los datos de entrada en un archivo llamado DENTRADA.BAS, de acuerdo a las pautas y formatos que se presentan más adelante en este capítulo.

Los resultados del modelo se obtienen en un archivo llamado RESUL.

5.4.5 Preparación de los Datos de Entrada

Se hace presente que el modelo se ha operado para años hidrológicos partiendo Mayo y terminando en Abril.

a) Datos Generales

Son los que identifican las principales características del sistema hidrológico modelado. Las variables empleadas son las siguientes:

TITULO : Título del Trabajo

NSEC : Número de Sectores Modelados

NANOS : Número de Años Modelados

QRF : Caudales de entrada al sector de más aguas arriba del sistema modelado (m^3/s)

- 156 -

En este caso han correspondido a la suma de los caudales medios anuales de las estaciones fluviométricas: Manflas en Vertedero, Jorquera en Vertedero y Pulido en Vertedero. Las estadísticas se han obtenido del tomo de Recursos Hídricos del presente estudio.

VOLEMB: Volúmenes almacenados en el Embalse Lautaro al final de cada año. (Mm^3)

VOL : Volúmenes medios anuales almacenados en el Embalse Lautaro (Mm^3).

RM : Nombre de los años modelados

b) Datos por Sectores

Son los datos que caracterizan, para cada sector, el manejo de los recursos superficiales y el interrelacionamiento que existe entre las aguas superficiales y las subterráneas. Las variables y parámetros empleados son:

TITSEC : Nombre del sector

ALFA : Proporción del caudal del río derivado por canales matrices. Este valor corresponde a los derechos de los canales del sector.

BETA : Factor de pérdidas en canales matrices, como proporción del caudal total en bocatoma.

GAMA : Factor de pérdidas en canales secundarios, como proporción del caudal en bocatoma menos las pérdidas en canales matrices.

DELTAES : Factor de pérdidas por escurrimiento superficial (derrames) en el riego predial.

DELTAPP : Factor de pérdidas por infiltración a la napa en el riego predial

QBCT : Capacidad máxima de los canales en bocatoma ($Mm^3/año$)

Los anteriores son valores fijos para cada sector, invariables en el tiempo. A ellos se agregan los siguientes, que tienen la posibilidad de variar de un año a otro.

ETA : Factor de pérdidas por infiltración en el río, considerado como un porcentaje del caudal del río en la cabecera del sector, excluyendo la extracción por canales.

QCMO : Caudal derivado por canales matrices cuando no es una proporción

- 157 -

del caudal en el río sino un valor fijo (m^3/s).

RECRIO : Recuperaciones de la napa al río, en los sectores con el agua terránea cercana a la superficie ($Mm^3/año$).

BOMBOB5 : Volúmenes bombeados desde el embalse subterráneo, de acuerdo los antecedentes recogidos por diferentes encuestas. ($Mm^3/año$)

c) Superficies Cultivadas por Sector

Para cada sector se debe incluir los datos de las superficies cultivadas cada uno de los años del período simulado. Se ha considerado 5 tipos de cultivos: Hortalizas, Praderas, Viñas, Frutales y Cereales.

Las variables empleadas son:

HORT : Superficies cultivadas con hortalizas (Há)

PRAD : Superficies cultivadas con praderas (Há)

PARRON : Superficies cultivadas con parronales (Há)

FRUT : Superficies cultivadas con frutales (Há)

CEREAL : Superficies cultivadas con cereales (Há)

d) Evapotranspiración por Sector y Cultivo

Para calcular las demandas de riego de los cultivos es necesario entregar también el valor de la evapotranspiración potencial (ETP) anual por sector.

En este caso las variables consideradas son

EVHOR : ETP Hortalizas ($m^3/há/año$)

EVAPRAD : ETP Praderas ($m^3/há/año$)

EVPAR : ETP Parronales ($m^3/há/año$)

EVFRU : ETP Frutales ($m^3/há/año$)

EVCEREAL : ETP Cereales ($m^3/há/año$)

- 158 -

e) Caudales de Contraste

Son los datos de caudales medios anuales observados en distintas estaciones fluviométricas de la cuenca del río Copiapó, que constituyen la base sobre la cual se ha ajustado el modelo.

Las variables son en este caso:

- ND : Número de nudos donde se llevará a cabo el contraste de caudales
- TITQRO: Nombre de la estadística de caudales (o el nudo) con que se hará el contraste.
- KD : Número del sector en cuyo nudo de aguas abajo se realizará el contraste.
- QRO : Valor de los caudales medios anuales observados en cada estación fluviométrica (m^3/s).

5.4.6 Formato de los Datos de Entrada

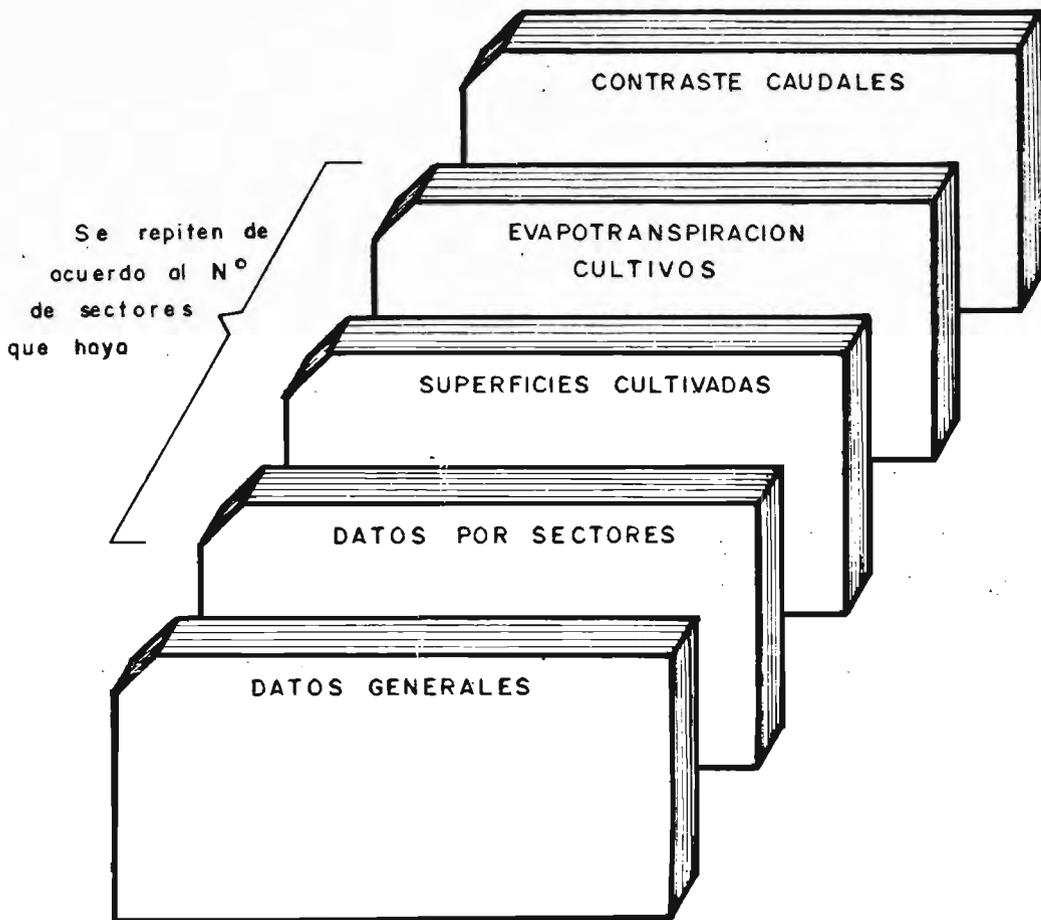
A continuación se presenta el formato en que debe ingresarse los datos del modelo al computador y en particular cómo deben ir ordenados los diferentes grupos de datos. Respecto al formato de entrada de cada variable, el BASIC permite que sea bastante libre. Sólo debe respetarse las siguientes normas:

- Las variables numéricas que toman diferentes valores para distintos períodos, requieren separar esos valores con espacios en blanco. Ej. 25,10 22,02 21,19. No hay límite al número de valores que pueden ir por línea, pero por comodidad no conviene que se ubiquen más allá de la columna 80.
- Las variables alfanuméricas, títulos o nombres, deben ir delimitadas por comillas dobles. Ej: "Este es un título".

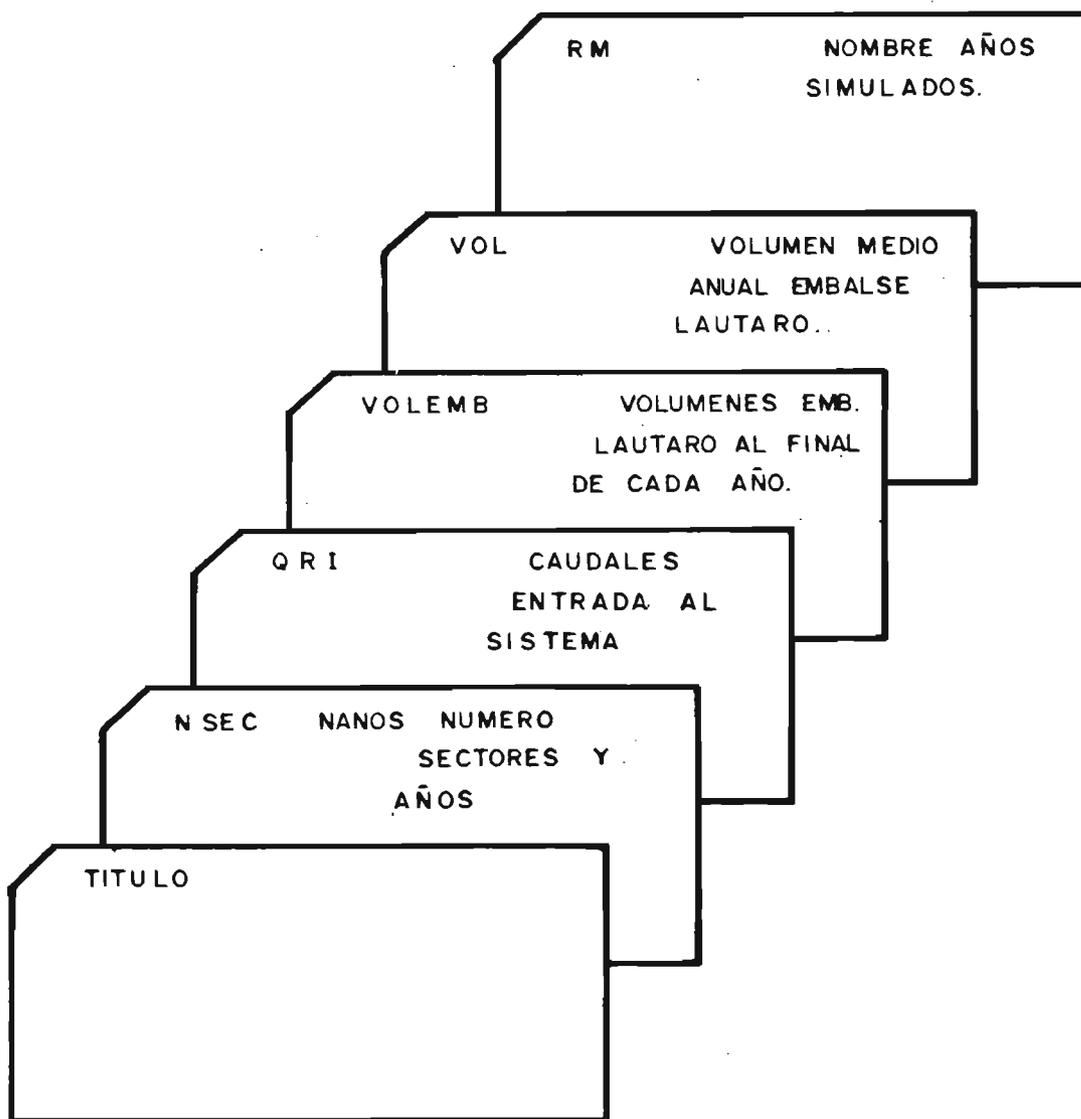
Los esquemas que siguen se muestran como tarjetas, cada una de las cuales equivale a una línea cuando se emplea archivos en disco ingresados a través de una pantalla.

MODELO HIDROLOGICO

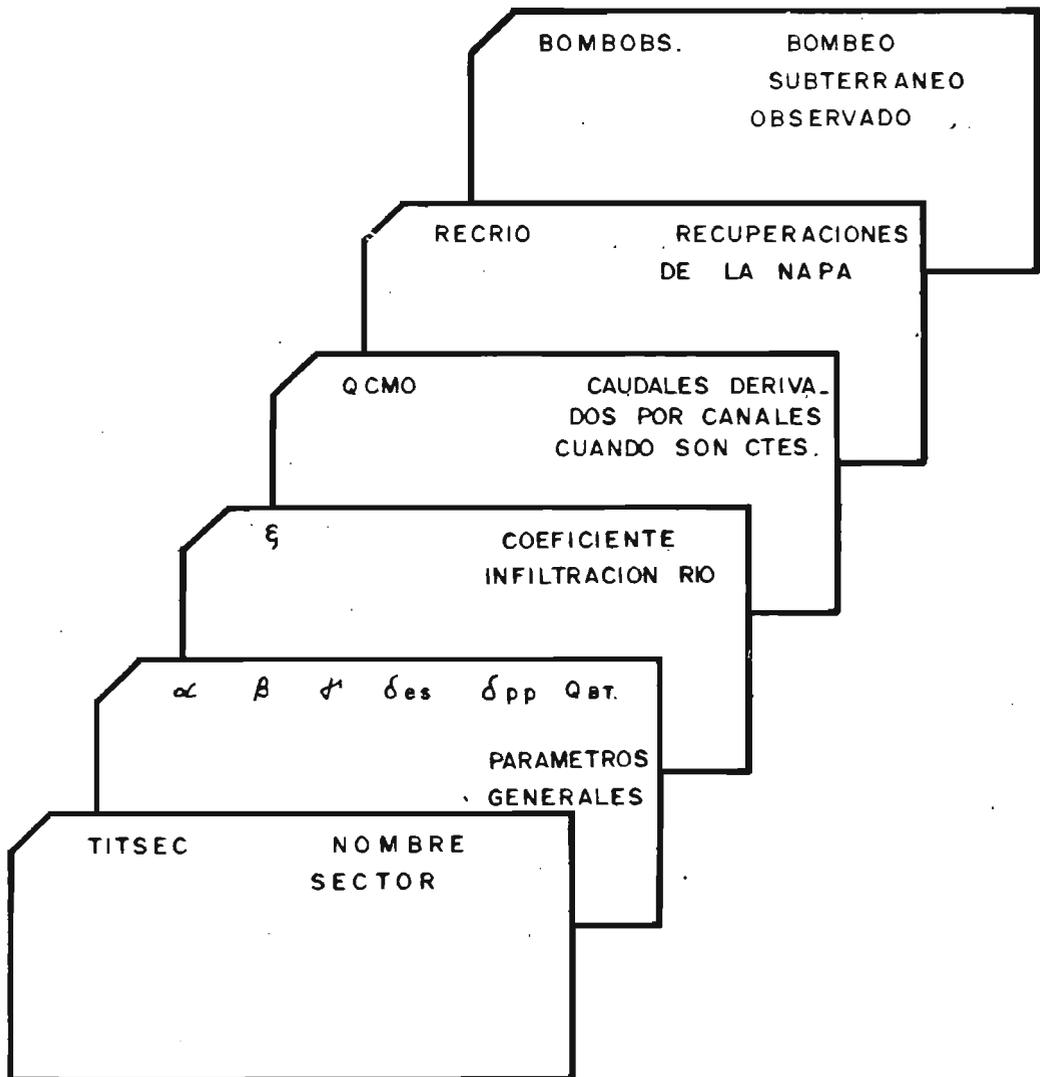
ESQUEMA ENTRADA DE DATOS



DATOS GENERALES



DATOS POR SECTORES



EVAPOTRANSPIRACION POR
SECTOR Y CULTIVO

EVHOR, EVPRAD, EVAPOTRANSPIRA-
EVPAR, EVFRU, CION POR SECTOR
EVCEREAL

CAUDALES DE CONTRASTE

QRO

CAUDALES DE
CONTRASTE

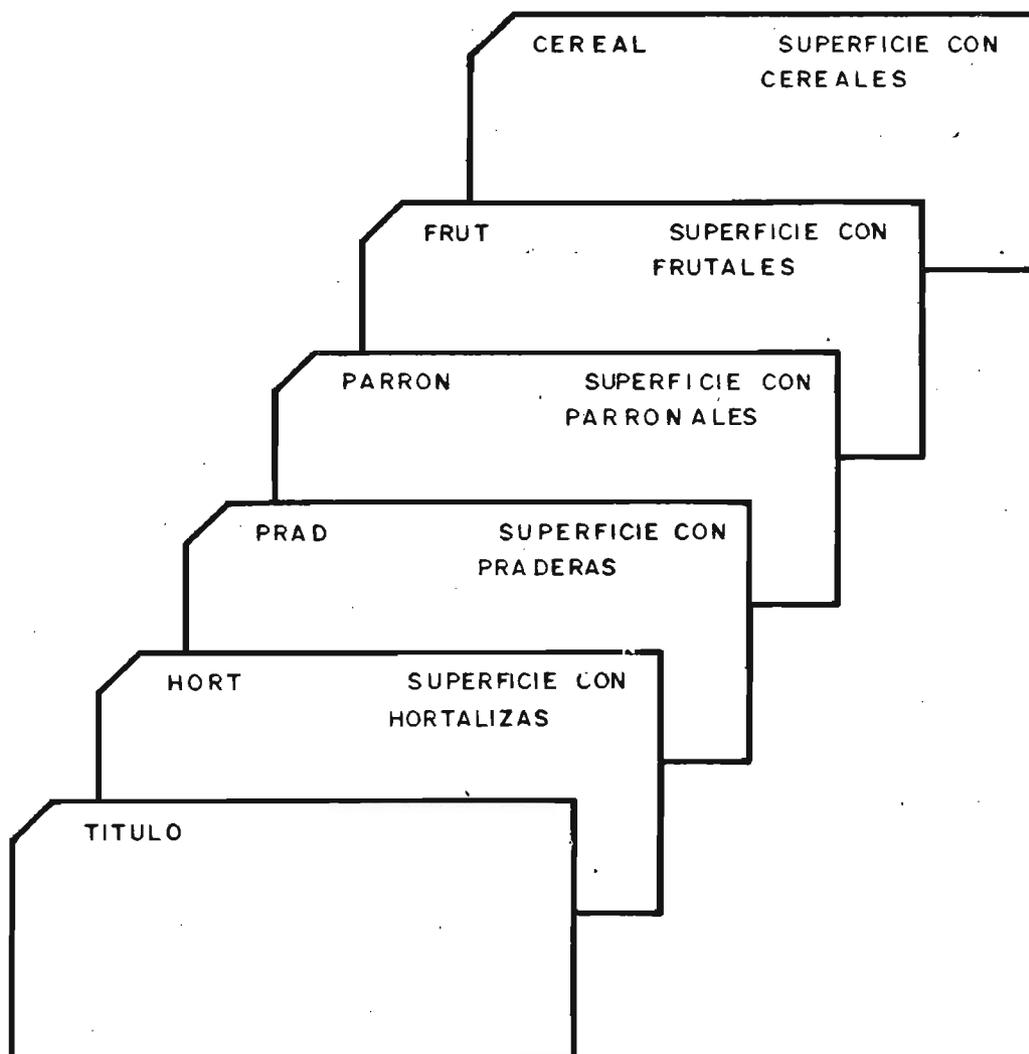
TITQRO, KD

TITULO Y N°
DEL SECTOR

ND

N° DE NUDOS
DE CONTRASTE

SUPERFICIES CULTIVADAS



- 165 -

1.5 Proceso de Ajuste

1.5.1 Aspectos Generales

El proceso de ajuste o calaje tiene como objeto conseguir que el modelo hidrológico desarrollado represente de la mejor manera el sistema hídrico superficial del valle del río Copiapó.

Para ajustar el modelo se ha debido modificar, mediante aproximaciones sucesivas, algunos de los parámetros que caracterizan el sistema. En este caso han sido fundamentalmente las infiltraciones y recuperaciones del río, las infiltraciones desde el Embalse Lautaro y las superficies cultivadas.

Los parámetros de ajuste o elementos de contraste son los que permiten comparar la calidad de la representación que el modelo entrega del sistema hidrológico. Aquí el contraste se ha hecho a través de los siguientes elementos:

- Caudales medios anuales controlados en las distintas estaciones fluviométricas existentes en el río Copiapó. Las estadísticas de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido no pueden ser empleadas para contraste, porque han sido usadas como condición de entrada al sistema.
- Bombeos controlados de pozos profundos que, al ser comparados con el déficit de abastecimiento para riego que calcula el modelo, permite saber si las demandas de riego al río estimadas son las reales.

No se ha incluido en la modelación hidrológica las entradas laterales superficiales por quebradas ni el aporte a la escorrentía que producen las lluvias, ya que ambos elementos son irrelevantes en este caso.

Como caudales de entrada al sistema se ha tomado la suma de los caudales controlados en las estaciones fluviométricas que existen en los ríos Manflas, Jorquera y Pulido.

- 166 -

La modelación se ha hecho a escala anual sobre períodos hidrológicos que comienzan en Mayo y terminan en Abril. El período de ajuste elegido ha sido 1962-1986, elección que se ha fundamentado en la información hidrogeológica existente.

En el capítulo que sigue a continuación se describe cómo se fue realizando el proceso de ajuste del modelo hidrológico. En él se analiza la secuencia de ajuste, los cambios realizados y los resultados obtenidos entre diferentes pasadas de ajuste.

5.5.2 Relación de Pasadas

El proceso de ajuste se ha hecho por sectores, partiendo del primero de aguas arriba. Sin embargo, como en los modelos hidrogeológicos, en muchas oportunidades fue necesario realizar un nuevo ajuste, al ir descubriendo situaciones físicamente inexplicables en sectores ubicados aguas abajo del ya calado.

A continuación se describe los pasos más importantes que se ha seguido en el ajuste de cada sector.

a) Ajuste sector Manflas, Jorquera y Pulido

Inicialmente se ha partido con una infiltración del río igual al 10% del caudal de entrada al sector, excluida la extracción de los canales, cifra que constituye una estimación basada en la experiencia. Con esto se consiguió un buen ajuste para casi todos los años del período 1962-1986, exceptuando los años 1983 y 1984. Estos años se ha tenido los caudales más altos del período de ajuste, con cifras de 5,61 y 6,22 (m³/s) respectivamente.

En un principio el sector se dió por ajustado, pero luego se vió la necesidad de pulir la situación de los años 1983 y 1984, particularmente por el importante efecto que tienen en la recarga del embalse subterráneo y en el funcionamiento del Embalse Lautaro. También se decidió afinar el ajuste de otros años con caudales altos, como son 1972-1973 y 1980-1981.

- 167 -

Luego de algunos tanteos se llegó finalmente a un calaje satisfactorio, que se obtuvo de imponer los siguientes porcentajes como infiltración del río en el tramo.

CUADRO 5-3
INFILTRACION DEL RIO EN EL
SECTOR MANFLAS, JORQUERA Y PULIDO-PASTILLO

AÑO	PORCENTAJE INFILTRACION (%)
1972	18
1973	5
1980	15
1981	5
1983	25
1984	15
1985	0
1986	5

El resto de los años tiene un porcentaje igual a 10%.

En la figura 4-3 se ha graficado las infiltraciones del río en el tramo en (m^3/s), en función de los caudales de entrada al sector. En ella se observa que en años con caudales de entrada inferiores a $3,5 (m^3/s)$, las infiltraciones en general son un 10% de estos caudales. No se cumple esta norma los años que suceden aquellos de caudal superior a $3,5 (m^3/s)$, en los cuales la infiltración llega al 5% del caudal. Cuando los caudales son superiores a $3,5 (m^3/s)$ y el año anterior no ha sido del mismo tipo, las infiltraciones se

- 168 -

regirán aproximadamente por la ley $INFRIO = 0,42 Q_{río} - 1,11 (m^3/s)$, $Q_{río}$ (m^3/s).

No corresponde con ninguna de estas situaciones lo ocurrido en 1984 y 1985, que han tenido infiltraciones menores a lo esperado, aunque, claro, la probabilidad de excedencia de los caudales de 1983 y 1984 es inferior al 10%. Pareciera entonces que los grandes caudales, sin duda de aguas turbias, producen en el río un efecto impermeabilizante que disminuye las infiltraciones hacia la napa.

Luego el escurrimiento natural del río comenzaría a lavar esta capa impermeable, hasta volver el lecho a sus condiciones normales de infiltración.

Esta interpretación es sólo una hipótesis, ya que en realidad un conocimiento cabal del fenómeno requiere de una investigación detallada que escapa de los límites del estudio actual.

Para efectos de modelación, no obstante, interesa saber sólo cómo se desarrolla el proceso y no cuáles son sus causas. Así es, ya que la infiltración del río se modela mediante un coeficiente único, que puede variar de valor según las condiciones, englobando los diferentes parámetros físicos involucrados en el fenómeno.

El fenómeno descrito anteriormente se ha presentado así los años 72-73 y 80-81. Los años 83-84-85-86 pareciera que cumplen un ciclo más largo, debido a la magnitud de los caudales que el río llevó al principio de este período.

Otros aspectos importantes de señalar son los siguientes:

- Las demandas del sistema de riego parecen estar bien estimadas ya que, como corresponde, el bombeo adicional requerido es cero o muy cercano a cero.
- En este sector no existen recuperaciones de la napa, aspecto que corroboran las medidas en los piezómetros del área y el modelo hidrogeológico allí desarrollado.

INFILTRACION RIO

SECTOR: MANFLAS, JORQUERA Y PULIDO - PASTILLO

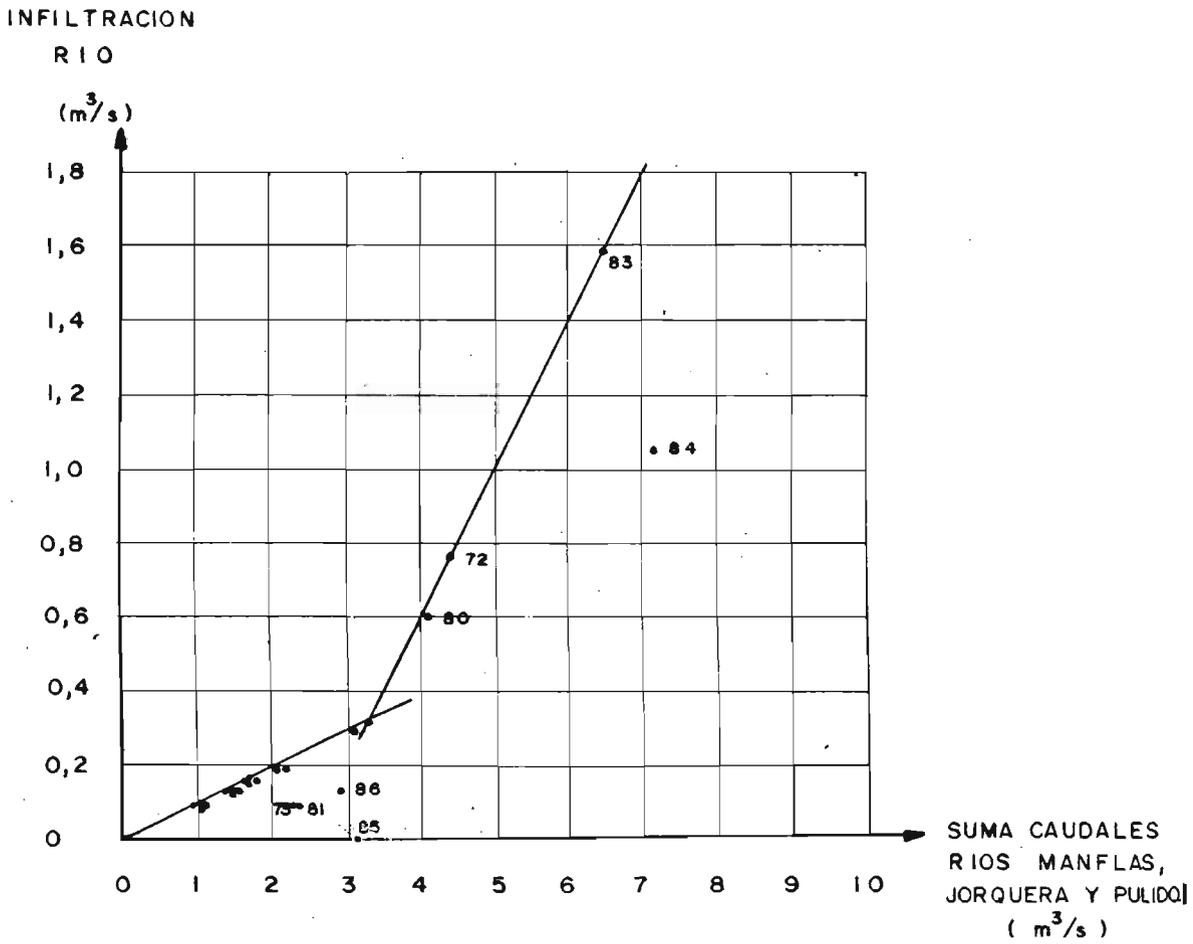


FIGURA 4 - 3

- 170 -

b) Ajuste sector Pastillo - Embalse Lautaro

Este sector se ha modelado con una doble intención. La primera, aprovechar la existencia de la estadística del río Copiapó a la salida del Embalse Lautaro y, la segunda, analizar separadamente de otros elementos los efectos que el embalse produce en los recursos hídricos del valle. Se ha considerado entonces que en el tramo no se cultivan las tierras ni se bombea agua de acuífero. En realidad hay un canal que extrae aguas en este tramo para llevarlas aguas abajo del embalse, pero los caudales que saca son tan pequeños que, para simplificar, conviene no considerarlo. Esto queda claro en las cifras presentadas en el Tomo Anexo N° 1, capítulo Infraestructura de Riego, donde se indica que la superficie bajo este canal es sólo 22 há.

En el capítulo anterior ya se detalló sobre cómo se han considerado los diferentes efectos que produce el Embalse Lautaro. A ellos se agrega un elemento muy importante, que es la infiltración del río entre Pastillo y Lautaro, que ha sido quizá lo más difícil de ajustar particularmente por la inesperada magnitud de estas infiltraciones, que alcanzaron un promedio de 430 (l/s) para el período 1962/86.

Las primeras pasadas de ajuste se hicieron suponiendo infiltraciones del río de un 5% del caudal de entrada al sector, cifra que corresponde a una estimación basada en la experiencia y la longitud del tramo. Esto produjo que los caudales de salida simulados fueran mayores que los observados, sin que fuera posible atribuir esta diferencia a mayores infiltraciones desde el embalse, ya que prácticamente ha estado vacío desde 1962 a 1980. Consecuencia ha sido necesario aumentar las infiltraciones del río hasta un 20%. Luego se ha ido ajustando los valores para años de condiciones hidrológicas especiales, hasta llegar a las cifras que se muestran en el Cuadro 5-4.

- 171 -

CUADRO 5-4

INFILTRACION DEL RIO
EN EL SECTOR PASTILLO - E. LAUTARO

AÑO	PORCENTAJE INFILTRACION %
1965	40
1964	5
1972	35
1973	35
1980	35
1983	10
1984	10

Los años que no aparecen en este cuadro tienen un porcentaje de infiltración del 20%.

Paralelamente ha sido necesario ir ajustando el funcionamiento del embalse, particularmente respecto de sus infiltraciones hacia el acuífero. No se ha modificado en cambio, las evaporaciones desde la superficie del embalse, conservándose el criterio presentado en el punto 5.4.3, que fue el inicial. Respecto de las filtraciones, rápidamente se descubrió que eran excesivas, por lo que se redujeron a la quinta parte de las supuestas originalmente. También se redujo de 16,8 (m) a 15 (m) la altura mínima de agua en el embalse para la cual comienzan a producirse estas filtraciones.

Las infiltraciones del embalse a la napa subterránea son un fenómeno complejo, para el cual se ha hecho en este modelo un sinnúmero de hipótesis diferentes.

- 172 -

Inicialmente se supuso válida la relación presentada en el tomo Infraestructura de Riego del presente estudio, que es una relación lineal de dos tramos de pendiente de la altura del agua en el embalse. Como no se obtuviera buenos resultados se planteó una condición más ligada a la física del problema. Esta es la que se presenta en el punto 4.4.3. Allí se indica que

$$\text{INFEMB} = S \cdot h \cdot \text{cte.}$$

con INFEMB = Infiltración desde el embalse

S = Superficie Inundada

h = Altura de agua en el embalse

cte. = Constante dependiente de la permeabilidad del lecho del embalse y la altura de agua fundamentalmente.

En esta relación no se ha considerado una posible influencia de la napa subterránea, debido que ésta se ubica suficientemente profunda como para independizarla de la infiltración desde el embalse. Como apoyo se tiene las mediciones de niveles piezométricas hechas en Diciembre de 1986, que muestran en las vecindades del Embalse Lautaro niveles entre 5 y 10 metros bajo el terreno. Esto ocurre para una fecha en que se ha tenido prácticamente los máximos niveles subterráneos que se haya registrado. Por otra parte, el piezómetro clasificado como 2750-6950/C1, ubicado justo aguas abajo del Embalse Lautaro, presenta una situación bastante clara. En 1982, cuando el Embalse estuvo casi vacío, los niveles del piezómetro fluctuaron en torno a los 13 metros de profundidad. En 1981 y 1983 a la fecha, en cambio, cuando se ha tenido embalsados importantes volúmenes de agua, los niveles de este pozo han estado entre 0 y 1 metro bajo el terreno. Esto estaría indicando que el nivel regional de la napa, que sería aproximadamente el registrado en 1982, se encuentra bastante por debajo del fondo del embalse. Con posterioridad a 1982 el nivel regional de la napa subterránea ha subido, como evidencian los demás piezómetros del área, pero nunca de la forma ni en la magnitud como ha ocurrido en este pozo junto al muro del embalse. Aquí los altos niveles son un índice de las infiltraciones que ocu-

- 173 -

ren desde el embalse y muestran en parte la forma que toma el cono de infiltración hacia la napa.

Como la superficie inundada es lineal respecto de la altura, según las relaciones presentadas anteriormente en este capítulo, lo mismo que la cte., se tendría que las infiltraciones serían del tipo

$$\text{INFEMB} = \alpha_1 \cdot h^2 + \alpha_2 \cdot h^3$$

Sobre esta base se desarrolló una serie de alternativas, incluso imponer una cte para la superficie inundada el último año y otra para el año anterior, cuando aumenta el volumen almacenado. Con esto se pretendió representar mejor el efecto de la depositación de materiales poco permeables en el lecho del embalse, dándole mayor permeabilidad al área recién inundada que aquella cubierta por las aguas desde un período anterior. A lo largo del ajuste se fue modificando esta hipótesis, bastante complicada de manejar, y poco a poco fue surgiendo que ambas constantes eran una sola. Finalmente entonces se estableció que la cte era única y, luego de probar diferentes valores, se llegó a las siguientes cifras:

Años 1962 - 1982	cte. = $7,0 \times 10^{-8} \text{ (S}^{-1}\text{)}$
Año 1983	cte. = $2,3 \times 10^{-8} \text{ (S}^{-1}\text{)}$
Años 1984 - 1986	cte. = $0,7 \times 10^{-8} \text{ (S}^{-1}\text{)}$

En ellas se descubre que efectivamente se ha ido produciendo un efecto de impermeabilización del lecho del embalse, a tal grado que en los últimos tres años se tiene la décima parte de la capacidad de infiltración que hubo antes del último período de años húmedos.

Para completar este análisis se presenta el Cuadro 4-5, donde aparecen los volúmenes medios almacenados, la infiltración, las filtraciones y evaporación en los últimos 6 años. No se ha incluido el período anterior porque en él la actuación del embalse ha sido irrelevante.

CUADRO 5-5

VOLUMENES MEDIOS ALMACENADOS
INFILTRACION, FILTRACIONES Y EVAPORACION EN
EL EMBALSE LAUTARO

AÑO	VOLUMEN MEDIO ALMACENADO (Mm ³)	INFILTRACION A LA NAPA (Mm ³)	FILTRACIONES (Mm ³) *	EVAPORACION (Mm ³)
1980	1,26	6,15	0	1,30
1981	3,76	17,08	0	2,12
1982	3,67	16,69	0	2,09
1983	17,30	24,38	8,73	4,30
1984	27,83	11,56	11,00	5,39
1985	26,75	11,12	10,79	5,29
1986	19,08	8,04	9,15	4,51

* Las filtraciones caen al río Copiapó, por lo que no constituyen una pérdida o un paso de agua superficial a subterránea.

Finalmente, volviendo a las infiltraciones del río, en la Figura 4-4 se las ha graficado en función del caudal medio anual observado del río Copiapó en Pastillo. De allí se obtiene que, en general, las infiltraciones alcanzan al 20% del caudal del río. Valores mayores se dan sólo en años con abundancia de caudales antecedentes, eso sí, de un año más seco. Esto es lo que ocurre los años 1965, 1972, 1980 y 1973, este último fuera de la norma establecida anteriormente, ya que 1972 fue un año con caudales mayores. Situación aparte es la de los años 1983, 1984 y 1966, que presentan infiltraciones menores a las esperadas. No es posible explicar estos casos, salvo indicar que los caudales de 1983 y 1984 son lejos superiores a los demás del período 1962 - 1986. Tampoco

INFILTRACION RIO

SECTOR PASTILLO - EMBALSE LAUTARO

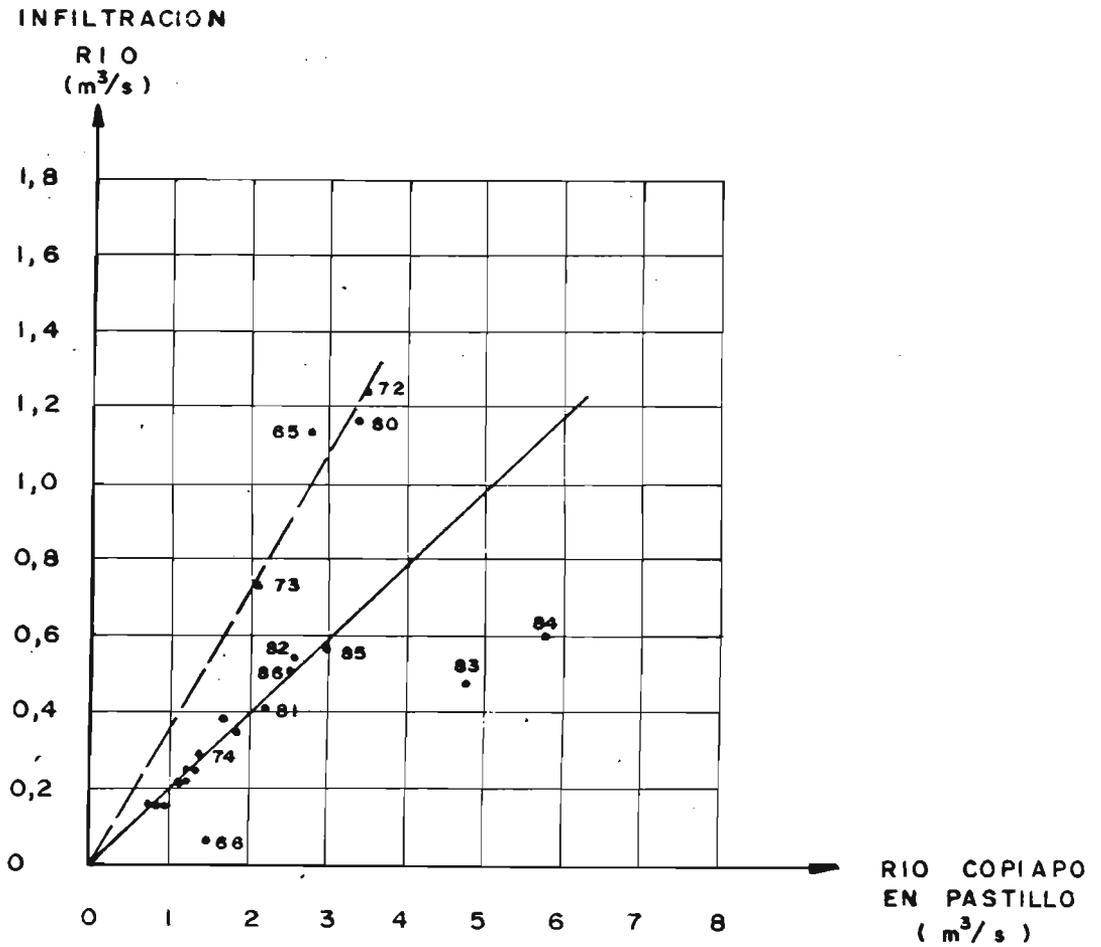


FIGURA 4 - 4

- 176 -

puede atribuirse este caso a un mal ajuste de las infiltraciones del Embalse Lautaro, ya que estas concuerdan para los años previos y posteriores a 1983-1984.

Como en el caso de las infiltraciones desde el Embalse Lautaro, no se ha considerado que las infiltraciones del río en este tramo estén afectadas por la napa subterránea. Esto se apoya en los niveles piezométricos medidos, que muestran que la napa se ubica aquí entre 5 y 10 metros bajo el nivel del terreno, y en las visitas hechas a terreno que han permitido comprobar la inexistencia de zonas de vegas.

c) Ajuste sector Embalse Lautaro - San Antonio

En este sector se ha tenido una situación originalmente no contemplada; la existencia de recuperaciones de la napa al río. Revisando las curvas de isopropundidad del nivel saturado hechas en el presente estudio con datos de Diciembre de 1986, se descubre que efectivamente hay zonas donde la napa podría estar aflorando, especialmente en el área más cercana a San Antonio. Esta situación la confirma el modelo hidrogeológico desarrollado entre el Embalse Lautaro y La Puerta, que presenta un volumen importante de recuperaciones aguas arriba de la localidad de San Antonio.

En las primeras pasadas del modelo, se supuso, de acuerdo a la experiencia, que para este sector las infiltraciones del río eran un 10% del caudal en la entrada al tramo, excluyendo claro las extracciones de los canales. Posteriormente se redujo este porcentaje a un 5%, parejo para todos los años, con lo cual se obtuvo buenos resultados. Sin embargo, siempre se mantenía un déficit notable de caudal algunos períodos, especialmente los años posteriores a uno más húmedo que lo común. Por la forma y características del déficit, se pensó en la posibilidad de recuperaciones de la napa. Entonces se impuso valores para estas recuperaciones, basándose en las variaciones

- 177 -

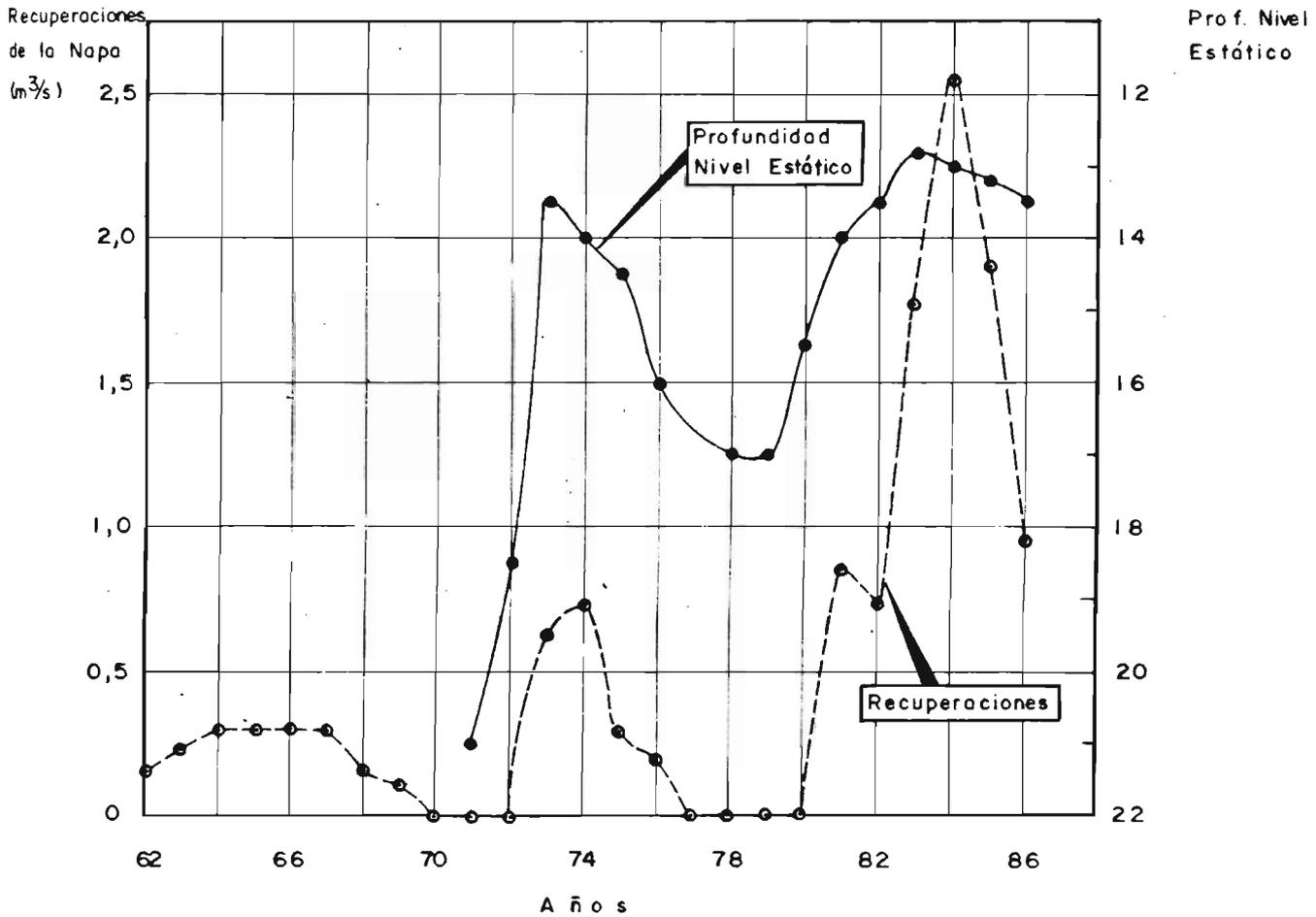
observadas de los niveles de la napa subterránea, en particular las controladas en los pozos 2750-7000 D2 (Qda. Calquis) y 2750-7000 B1 (San Antonio). Finalmente se ha llegado a un buen ajuste con un porcentaje de infiltración del río de 5%, parejo para todo el período excepto los años de niveles de la napa altos, 1973, 1974 y 1981 - 1986, cuando no se ha tenido infiltraciones. Respecto a las recuperaciones, sus valores se presentan a continuación en la Figura 4-5 junto a los niveles piezométricos registrados en el pozo 2750-7000 D2 (Qda. Calquis). Allí se observa la clara relación que existe entre los niveles de la napa y las recuperaciones, quizá un poco desfasadas las últimas respecto de las primeras. Esto indicaría que el mayor volumen de recuperaciones ocurre aguas abajo del pozo considerado, llegando el efecto del alza de niveles con un cierto retraso.

Un último aspecto del ajuste fue modificar el valor del porcentaje del río derivado por los canales. Según los derechos establecidos, un 12% de las acciones del río Copiapó se derivarían en este tramo. La modelación, sin embargo, descubrió que, para abastecer las superficies cultivadas, era necesario que el caudal derivado por canales fuera mayor. Esto obligó a subir el porcentaje antes señalado a 30%, entendida esta cifra como la proporción del agua descargada desde el Embalse Lautaro al río Copiapó que se deriva para el riego del sector Lautaro - San Antonio. Esto no está necesariamente en conflicto con los derechos establecidos, porque ellos se refieren al agua pasante por una sección determinada del río que no es la considerada en este caso.

RECUPERACIONES DE LA NAPA

SECTOR: EMBALSE LAUTARO - SAN ANTONIO

POZO
2750-7000 D-2



Notas: - La Profundidad del Nivel Estático es el medido en algún pozo determinado.

- Las Recuperaciones son los valores de ajuste dados por el modelo hidrológico.

- 179 -

d) Ajuste del Sector San Antonio - La Puerta

Es una característica bien conocida del río Copiapó, que parte importante del caudal que pasa por la localidad de La Puerta proviene de recuperaciones de la napa subterránea. El modelo hidrológico ha confirmado este hecho, comprobando además que las recuperaciones fluctúan, como en el tramo anterior, con los niveles piezométricos. Los valores de las recuperaciones son relativamente parejos, variando en el período 1962-1986 entre 450 (l/s) y 1100 (l/s), con un valor promedio de 700 (l/s). En este sentido la situación es bien diferente a la observada en el tramo Lautaro - San Antonio, donde las recuperaciones cambian notablemente de un período a otro.

El calaje de este sector ha sido menos complicado que otros, ya que sólo ha debido ajustarse las recuperaciones. En la Figura 4-6 se muestra cómo han variado las recuperaciones en el tiempo y cómo lo han hecho los niveles estáticos registrados en el pozo 2750-7000 B2, ubicado en San Antonio. Aunque estos niveles son los medidos en un punto bien localizado del tramo con recuperaciones, es un índice de lo que ocurre con el acuífero. La figura muestra una buena concordancia entre ambos fenómenos.

Finalmente, como en el sector anterior, se ha hecho un ajuste de la proporción del río derivada por los canales. En este caso se ha determinado que la demanda de los cultivos requiere que esta proporción sea un 15%, cifra que supera el doble de los derechos asignados al tramo que da un 6% para este valor. Como antes no significa que los derechos estén mal asignados, sino que refleja que estos se han determinado sobre el caudal que el río lleva en una sección distinta de aquella donde los canales toman el agua.

También, aunque no se ha dicho, se entiende que en el sector el río sólo recupera, sin que éste infiltre hacia la napa.

RECUPERACIONES DE LA NAPA AL RIO

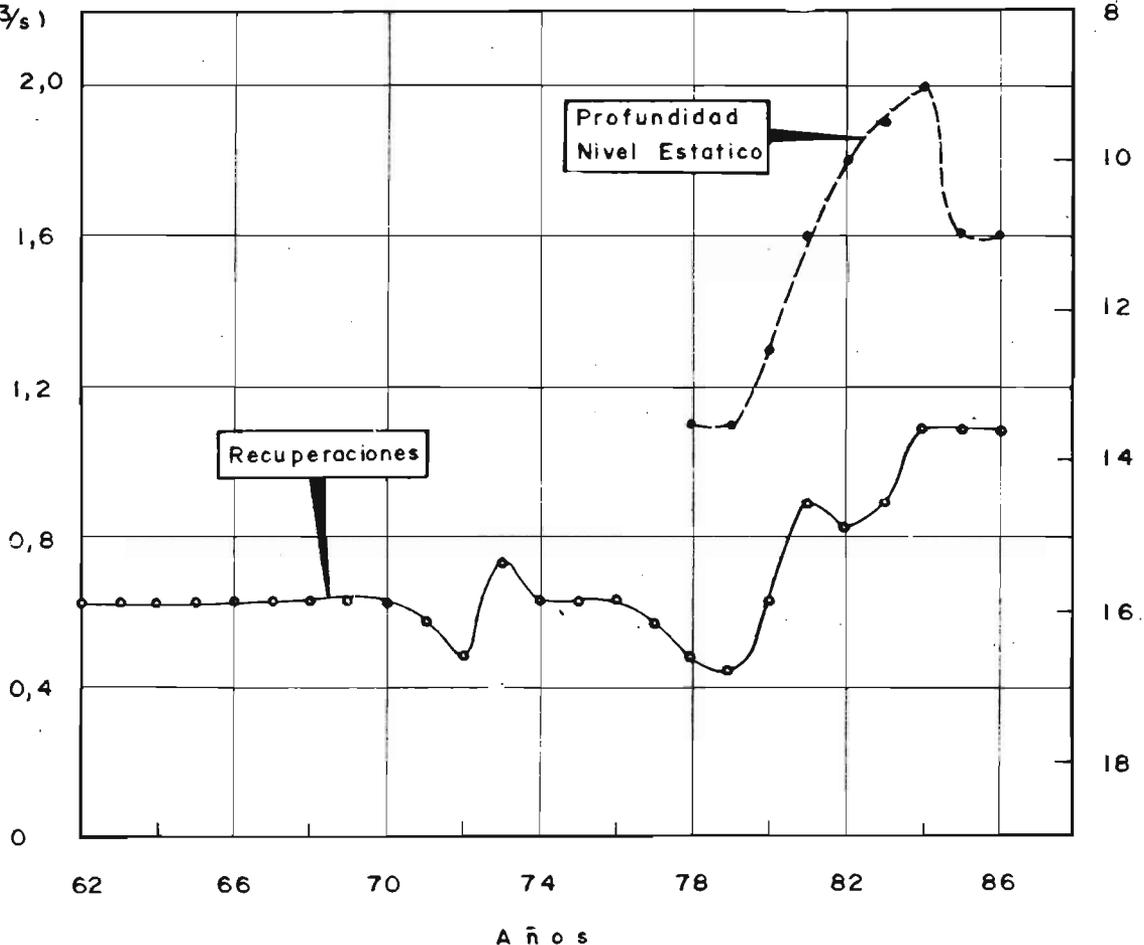
SECTOR : SAN ANTONIO - LA PUERTA

POZO
2750-7000 B-2

Recuperaciones
de la Napa

(m³/s)

Prof. Nivel |
Estático
(mts.)



Notas: - La Profundidad del Nivel Estático es el medido en algún pozo determinado.
- Las Recuperaciones son los valores de ajuste dados por el modelo hidro-lógico.

FIGURA 4-6

- 181 -

e) Ajuste del Sector La Puerta - Malpaso

El sector La Puerta - Malpaso es una larga y estrecha faja de longitud cercana a los 40 Km. En él hay tanto infiltración del río a la napa como recuperaciones de la napa al río. Las primeras ocurren desde La Puerta hasta la Quebrada Cerrillos, aguas arriba de Nantoco, mientras que las recuperaciones ocurren en una amplia zona de vegas desde la Quebrada Cerrillos hasta Malpaso. Estas zonas están claramente delimitadas y varían poco en el tiempo porque, en el sector de las recuperaciones, los niveles subterráneos tienen poca fluctuación.

Inicialmente las infiltraciones se han calculado como un 40% del caudal del río en La Puerta, excluidas las extracciones de riego. Luego de 1974 este valor se ha subido a un 60%, debido al cambio experimentado en el valle respecto de los turnos de riego. En efecto, a partir de Enero de 1974 se modificó el sistema turnal de repartición de agua, reemplazándolo por una distribución continua de caudales. Esto ha significado que desde entonces el río siempre escurra, no como antes que cuando entraban en turno los sectores más altos del valle, derivaban por sus canales la totalidad del agua disponible. Es razonable pensar entonces en una mayor infiltración del río, ya que el agua circula actualmente por el lecho durante un mayor tiempo que cuando se tenía el sistema de turnos.

En las pasadas anteriores se fue ajustando las infiltraciones de acuerdo a la magnitud de los caudales del río. Finalmente se obtuvo las cifras que se presentan en el Cuadro -6.

- 182 -

CUADRO 5-6

INFILTRACION DEL RIO SECTORLA PUERTA - MALPASO

AÑOS	PORCENTAJE INFILTRACION %
1970	50
1973	50
1974	60
1975	60
1976	70
1977	70
1978	70
1979	70
1980	60
1981	60
1982	60
1983	60
1984	30
1985	20
1986	40

En el período 1962-1973 la infiltración fue de un 40%, salvo las excepciones presentadas en el Cuadro.

Se ha hecho un gráfico de las infiltraciones en función del caudal del río medido en La Puerta, que se presenta en la Figura 4-7. Allí se nota claramente lo señalado anteriormente respecto de las mayores infiltraciones con posterioridad a 1974. Algunas situaciones excepcionales son las siguientes:

INFILTRACION RIO

SECTOR : LA PUERTA - MAL PASO

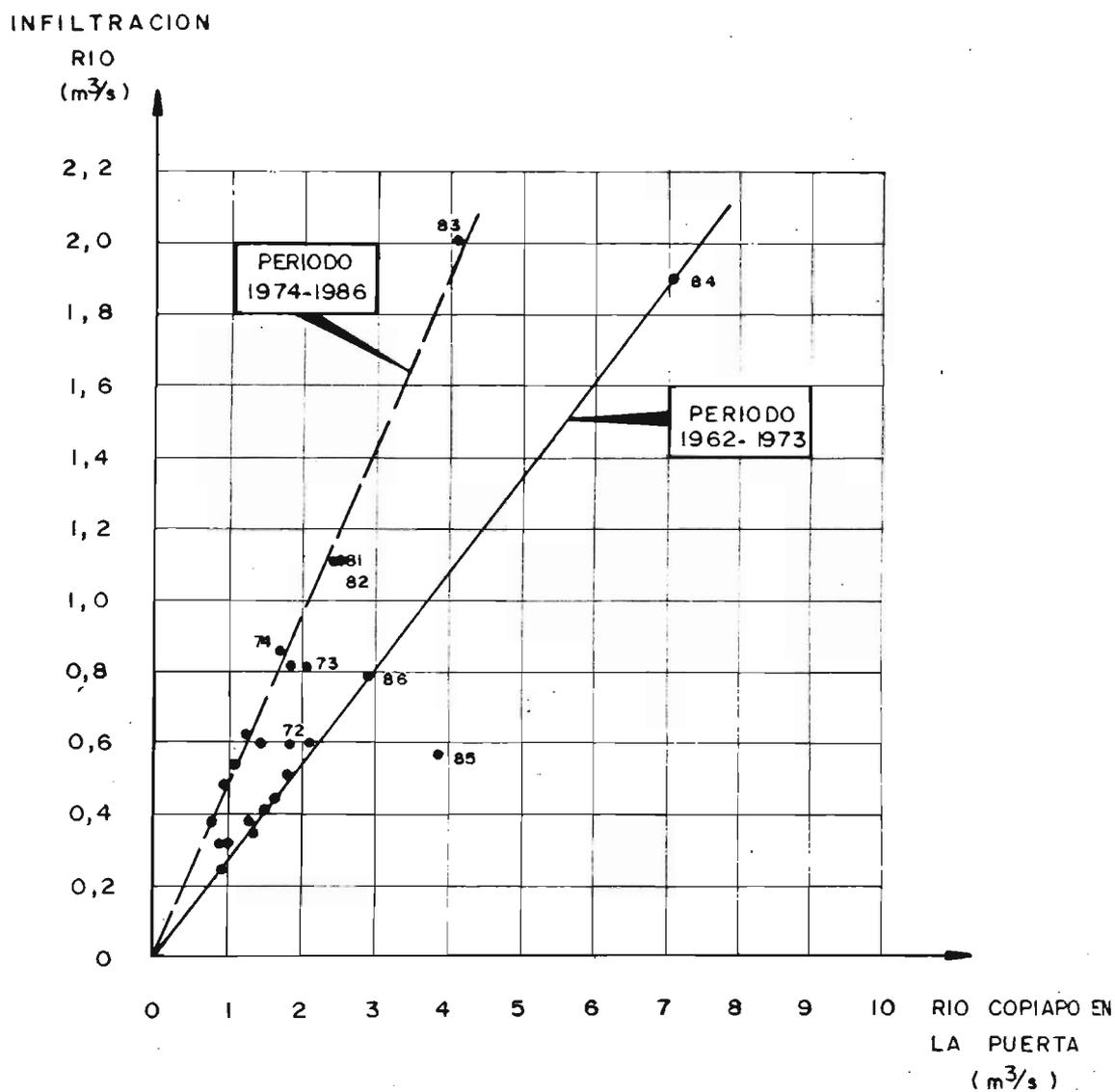


FIGURA 4 - 7

- 184 -

- El año 1973, que fue más húmedo que los anteriores, presenta mayores infiltraciones que el promedio del período previo.
- El año 1984, con el mayor caudal del período 1962-1986, infiltra menos que los años precedentes y aún menor es el aporte a la napa el año 1985. En cambio en 1986 vuelve a subir el porcentaje de infiltración.

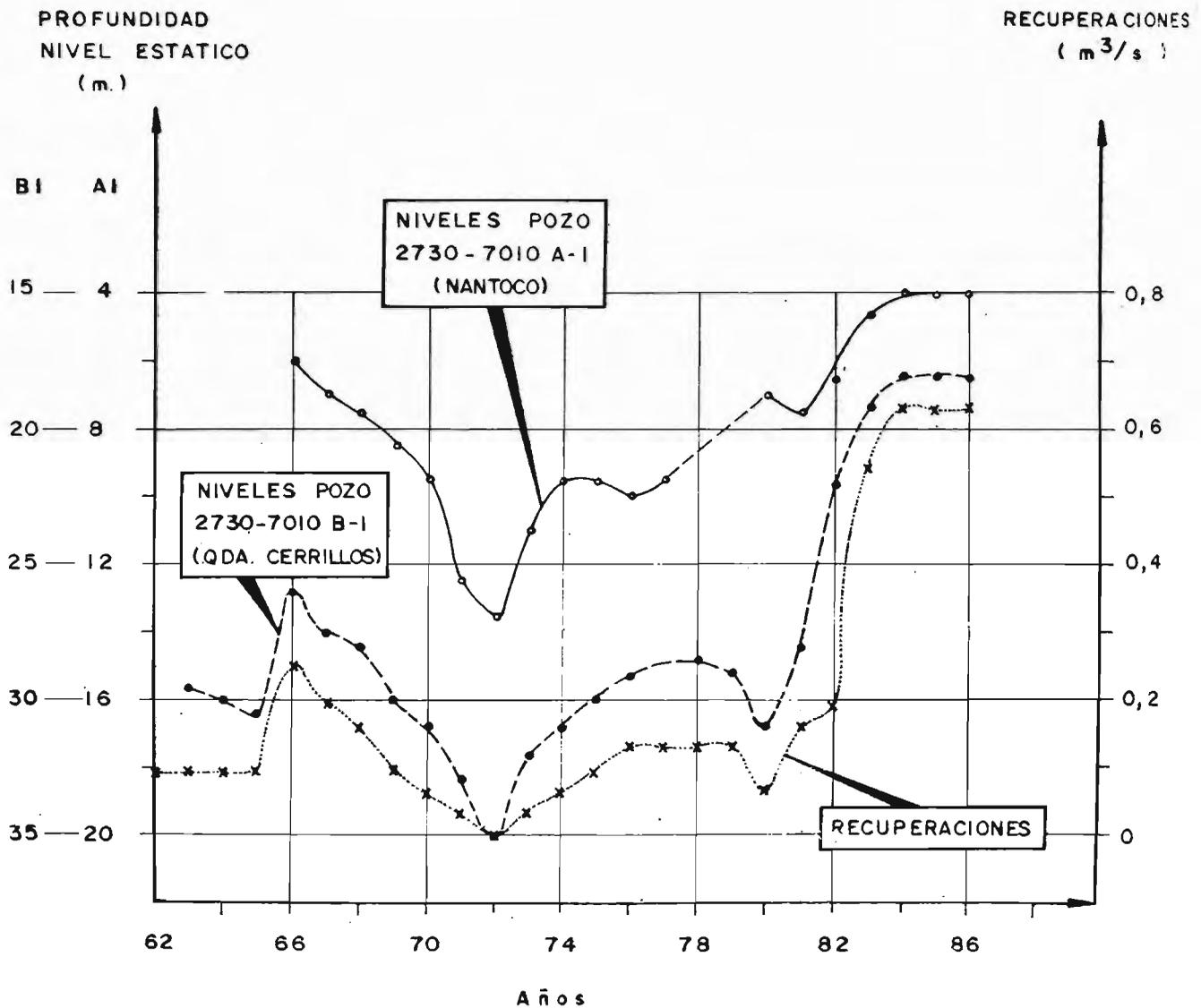
Como interpretación se supone que, como en otros sectores de aguas arriba, después de un año de caudales altos el lecho del río se impermeabiliza. Luego, cuando el régimen de años lluviosos pasa, el río iría progresivamente lavando su lecho hasta volver a la situación original. Este ciclo parecería darse los años 1983-1986, siendo 1983 y 1984 los años en que se habría producido la depositación en el cauce, mientras que de 1985 en adelante se estaría limpiando el lecho.

Respecto de las recuperaciones, sus valores se han ajustado de acuerdo con la variación de niveles estáticos observados. En la Figura 4-8 se presenta los valores modelados de la recuperación y los niveles piezométricos registrados en 2 pozos del sector Nantoco. Allí se ve la clara correlación de ambas, corroborando con ello los valores adoptados en el calaje.

Finalmente en cuanto al agua del río derivada por canales, no ha sido necesario hacer los ajustes de los sectores anteriores. Esto significa que en este caso los derechos establecidos representan adecuadamente la proporción del río que los canales derivan para el riego. Además corrobora lo dicho anteriormente respecto de la sección del río al cual están referidos los derechos del valle, que, según esto, sería La Puerta.

RECUPERACIONES DE LA NAPA AL RIO

SECTOR: LA PUERTA - MAL PASO



Notas:-La Profundidad del Nivel Estático es el medido en algún pozo determinado.

-Las Recuperaciones son los valores de ajuste dados por el modelo hidrológico.

- 186 -

f) Ajuste del Sector Malpaso - Copiapó

Malpaso es el sitio en el cual se localiza la bocatoma del canal del mismo nombre, que es el que conduce y reparte las aguas de riego prácticamente hasta la ciudad de Copiapó. En este punto también, desaparece el área de vegas que produce las recuperaciones del sector La Puerta - Malpaso. Luego no se tendrá recuperaciones en el río hasta llegar a Copiapó, donde aflora nuevamente la napa subterránea para alimentar los canales que riegan las tierras que están aguas abajo de la ciudad.

En este sector las infiltraciones del río han tenido un cambio notable con la construcción del Canal Malpaso, hecho en 1969, capaz de conducir hasta 3 (m³/s). La obra, un canal trapecial revestido con hormigón, reemplaza totalmente el río en años de escasos recursos, disminuyendo así las pérdidas de agua hacia la napa. Partiendo de esta base se impuso inicialmente un porcentaje de infiltración del 30% parejo, salvo el período 1969-1980 donde se consideró que no hubo infiltraciones. Luego de algunas pasadas de ajuste se llegó finalmente a que el porcentaje de infiltración era realmente mayor, alcanzando para el común de los años al 50% del caudal en el río, excluidas las extracciones por canales. Se descubrió también que en los años 1972 y 1973, que fueron menos secos que los demás de ese período, se permitió que no toda el agua circulara por el Canal Malpaso sino también parte por el río, produciéndose infiltraciones. En el Cuadro 4-7 se presenta un resumen de los porcentajes obtenidos.

CUADRO 5-7

INFILTRACIONES DEL RIO EN ELSECTOR MALPASA-COPIAPO

AÑO	PORCENTAJE INFILTRACION %
1972	20
1973	20
1981	50
1982	50
1983	50
1984	20
1985	30
1986	50

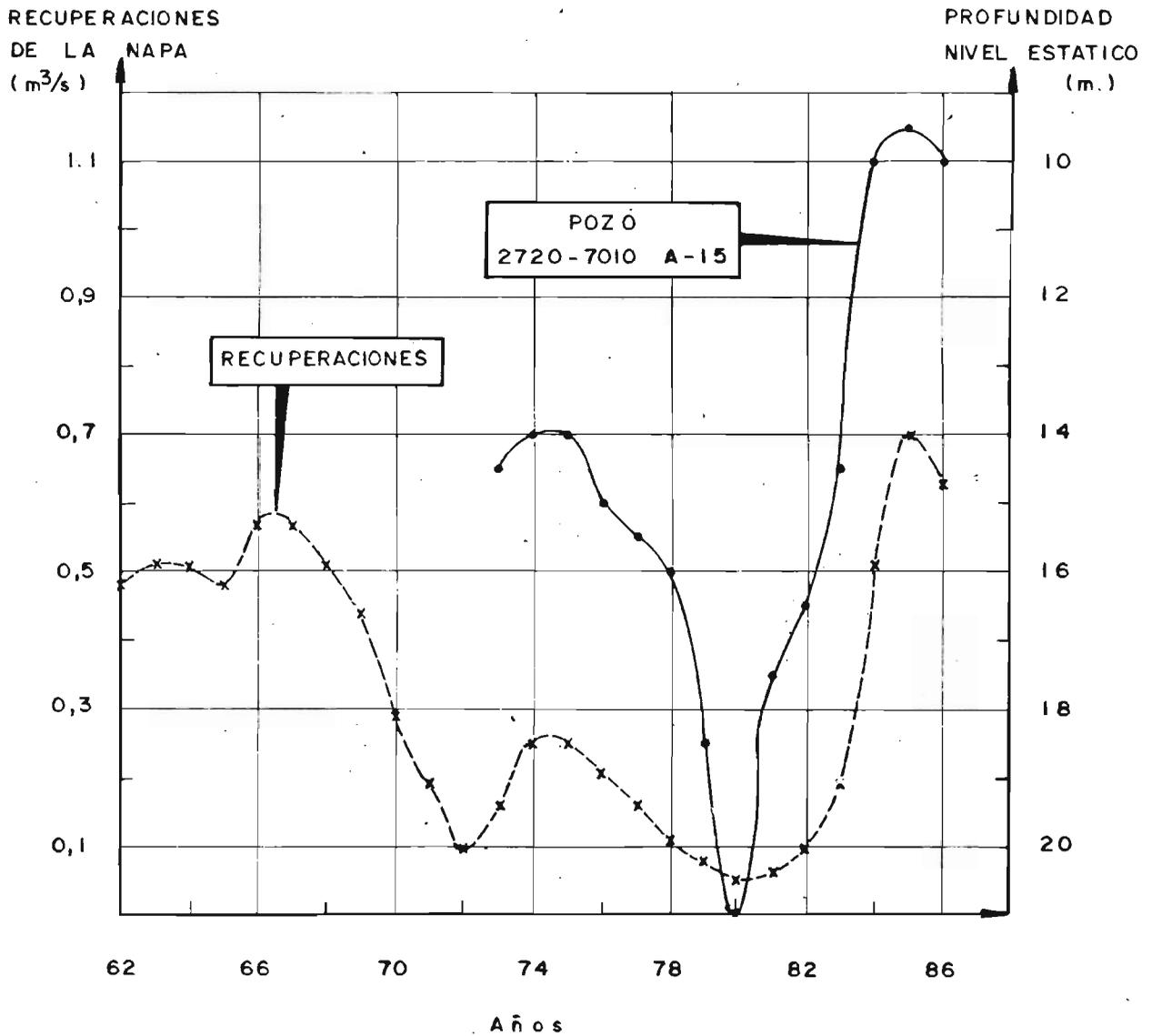
Los años que no aparecen en la tabla tienen un porcentaje de infiltración 50% salvo los del período 1969-1980 que no tienen infiltración.

Nuevamente, como en otros sectores de aguas arriba, se cumple que los porcentajes de infiltración son parejos salvo los años 1984 y 1985, que vienen después de un año de grandes caudales, donde bajan un poco por efecto de la impermeabilización del lecho. Luego, en 1986, ya el río ha recuperado su capacidad de infiltración original.

Respecto de las recuperaciones, la Figura 4-9 muestra las variaciones del nivel estático controladas en un pozo cercano a la ciudad de Copiapó y las recuperaciones simuladas. Claramente se descubre allí la relación entre ambos y lo sensibles que son las recuperaciones a la profundidad a que se encuentre la napa subterránea. Las recuperaciones fluctúan, en el período 1962-1986,

RECUPERACIONES DE LA NAPA AL RIO

SECTOR : MAL PASO - COPIAPO



Notas: - La Profundidad del Nivel Estático es el medido en algún pozo determinado.
 - Las Recuperaciones son los valores de ajuste dados por el modelo hidrológico.

FIGURA 4-9

entre 700 (l/s) y 50 (l/s), con un promedio de 320 (l/s).

Es necesario aclarar que para el ajuste de este sector se ha contado como elementos de contraste los caudales medidos en la estación fluviométrica Copiapó en Copiapó, con registros que comienzan sólo en 1984, y algunos aforos aislados de las recuperaciones en Copiapó. El resto del calaje se ha debido apoyar indirectamente en la estadística que se controla en Angostura.

Finalmente, las extracciones que efectúan los canales ha sido necesario ajustarlas, estableciendo que ellos pueden captar la totalidad de la demanda requerida por los cultivos del sector. Aún cuando los derechos que tienen los canales del tramo permitirían extraer sólo un 45% del caudal del río, también la repartición de derechos termina en Copiapó, disponiendo los sectores que están aguas abajo de la ciudad solamente de las recuperaciones de la napa y las aguas superficiales que eventualmente escurren por el río. En consecuencia los regantes del sector Malpaso-Copiapó pueden extraer todas las aguas del río si los recursos disponibles son inferiores a las necesidades de los cultivos. Una vez más se descubre entonces que la traducción en acciones que se ha hecho de los derechos del río está referido al caudal pasante por una sección determinada que, aparentemente, sería La Puerta.

- 190 -

g) Ajuste del Sector Copiapó - Piedra Colgada

Al igual que los dos sectores precedentes, el tramo Copiapó-Piedra Colgada presenta infiltraciones del río a la napa y recuperaciones del acuífero al río. Las últimas se localizan en la zona baja del sector, en las inmediaciones de Piedra Colgada.

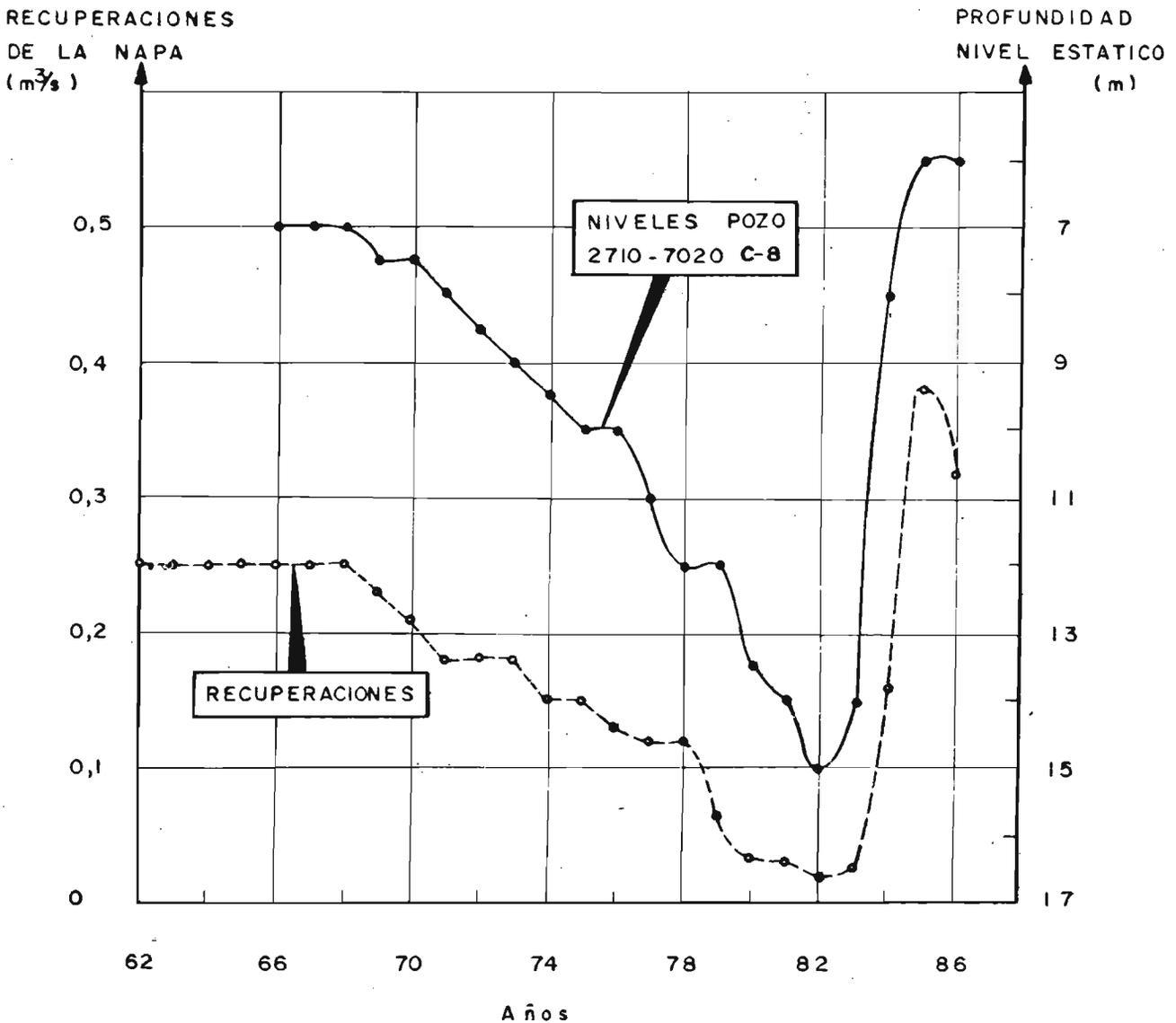
Las infiltraciones del río son elevadas en porcentaje del caudal en la entrada al sector, aunque reducidas en volumen ya que prácticamente toda el agua disponible se deriva por los canales. En realidad en el período 1962-1986 pareciera que el río ha escurrido hasta Piedra Colgada con aguas cordilleranas sólo los años 1965, 1966 y 1983-1986.

Los porcentajes de infiltración son bastante parejos y llegan al 70%, exceptuándose sólo los años 1984 con un 60% y 1985 con 50%. Esto se debería, como en el resto del río, a una relativa impermeabilización del lecho producto de los altos caudales ocurridos en 1984. En 1986 este porcentaje vuelve a subir al 70%, evidenciando que se ha lavado el lecho hasta llegar a condiciones similares a las anteriores a la crecida.

Las recuperaciones se han obtenido de los aforos, bastante regulares, que la DGA viene haciendo desde 1973 en los canales que aprovechan estas aguas, el Canal San Pedro y los Canales Piedra Colgada 1 y Piedra Colgada 2. Para el período 1962-1986 se ha tenido una recuperación media de 178 (l/s), tomando un valor máximo de 381 (l/s) en 1985 y uno mínimo de 20 (l/s) en 1982. En la Figura 4-10 se ha representado las recuperaciones simuladas para el período 1962-1986. Como antes se ha incluido las variaciones del nivel estático de la napa, registradas en un pozo que está en la cabecera del área donde se producen las recuperaciones. También en este caso existe una clara concordancia entre la posición de la napa y las recuperaciones.

RECUPERACIONES DE LA NAPA AL RIO

SECTOR: COPIAPO - PIEDRA COLGADA



Notas: - La Profundidad del Nivel Estático es el medido en algún pozo determinado.
 - Las Recuperaciones son los valores de ajuste dados por el modelo hidrológico.

FIGURA 4-10

- 192 -

Para completar este análisis es necesario decir algo respecto de las superficies cultivadas y, por lo tanto, de las demandas de riego. Aunque no se tiene un buen contraste de caudales para los años anteriores a 1973, que es cuando comienzan los aforos de la DGA en Piedra Colgada, la situación reflejada en Angostura, donde sí hay una larga estadística, indica que en los sectores ubicados aguas abajo de Copiapó, las superficies cultivadas dependen mucho del tipo de año que se tenga. Esto no debe extrañar porque los derechos disponibles son sólo eventuales, dependiendo del agua que traiga el río. Aún más, como prácticamente todas las aguas de riego del área provienen de recuperaciones, no es difícil predecir cómo vendrá un año sabiendo lo que ocurrió el anterior. En síntesis, las superficies cultivadas históricamente han dependido de los recursos de agua disponibles, lo que no ocurre aguas arriba de Copiapó. Ahora bien, como actualmente parte importante de la agricultura tradicional se ha reemplazado por parronales que se riegan por goteo con aguas subterráneas (en la zona de Bodega hay más de 800 há de parronales más o menos recientes), lo dicho anteriormente podría no seguir siendo así.

h) Ajuste del Sector Piedra Colgada - Angostura

El sector Piedra Colgada-Angostura difiere notablemente del resto del valle de Copiapó, ya que normalmente las aguas que lleva el río provienen solamente de recuperaciones de la napa subterránea. Esto se refleja en lo increíblemente constantes que son los caudales del río en Angostura, donde el cierre del valle obliga las aguas subterráneas a emerger a la superficie. Durante el período 1962-1986 los caudales del río fluctuaron entre 110 y 140 (l/s), salvo los años 1984 y 1985, cuando se superó los 1000 (l/s), evidenciando que el río escurrió con aguas cordilleranas hasta el mar. Poco varían también las recuperaciones con los cambios que experimentan los niveles estáticos en el área de Piedra Colgada, lo que estaría indicando que el espesor saturado del embalse subterráneo es considerable y que efectivamente en Angostura estaría aflorando prácticamente todo el esturrimiento sub

- 193 -

terráneo.

En cuanto a infiltraciones desde el río, la posición de la napa y el escaso escurrimiento superficial permiten suponer que no existen. Esta hipótesis ha sido confirmada por el modelo.

Respecto de las superficies cultivadas, en forma similar a cómo ocurre en el sector Copiapó - Piedra Colgada, dependen mucho de las disponibilidades de agua. Parte importante de las tierras que se encuentran al poniente de Piedra Colgada se riegan con las recuperaciones que aparecen en esa localidad. Estas, como ya se dijo, dependen de los niveles de la napa, que varían lentamente permitiendo predecir los recursos que habrá para la temporada siguiente.

5.6. Conclusiones

El modelo hidrológico desarrollado ha permitido representar adecuadamente el funcionamiento y aprovechamiento de los recursos hídricos del valle del río Copiapó. Con él se ha estudiado y ajustado las infiltraciones y recuperaciones del río hacia y desde el embalse subterráneo, procesos que sin duda caracterizan la hidrología del valle.

El modelo ha sido especialmente importante en el ajuste de los modelos hidrogeológicos, particularmente por la visión integradora que permite dar a los mecanismos de recarga y descarga del acuífero en sus distintos tramos.

Se ha podido obtener leyes de comportamiento bastante coherentes para las infiltraciones del río, descubriendo que son proporcionales a los caudales que el río lleva en la entrada a los sectores modelados. Esta regla no se cumple sólo después de años excepcionalmente caudalosos, cuando aparentemente las aguas turbias del río depositan en su lecho una capa impermeabilizante que hace disminuir las infiltraciones respecto de un año común. Posteriormente, al disminuir nuevamente los caudales, el agua lava el lecho, volviendo a las condiciones de infiltración originales.

Esta interpretación es sólo una hipótesis, ya que para conocer realmente el fenómeno sería necesario desarrollar una investigación detallada que supera los límites del estudio. No obstante, cualquiera sea el mecanismo físico de estas infiltraciones, el fenómeno se presenta con un coeficiente de proporcionalidad que disminuye después de años con caudales del río excepcionalmente altos.

Las recuperaciones, por su parte, dependen claramente de los niveles estáticos de la napa subterránea. Con esta base y los antecedentes entregados por el modelo hidrológico, se ha podido representar adecuadamente este fenómeno en los modelos hidrogeológicos, que son los que simularán posteriormente el comportamiento del acuífero.

- 195 -

En cuanto al embalse Lautaro, el ajuste realizado permite decir que las pérdidas más importantes que tiene son las infiltraciones hacia la napa. No obstante, los grandes volúmenes embalsados en los últimos años habrían producido un efecto de colmatación del fondo, reduciendo notablemente el problema. De todas maneras la recarga al acuífero por este concepto ha sido siempre bastante inferior a la generada por las infiltraciones del río.

Finalmente es necesario destacar que en la medida que se cuente con mayores antecedentes de terreno, mejor será el ajuste que se pueda hacer del modelo y, por lo tanto, más cercana a la realidad hidrológica será la representación del modelo. No significa esto que el ajuste actual no sea adecuado para los fines que se persiguen con el presente estudio, pero mayor información de terreno permitiría afinar su precisión. En particular se sugiere iniciar una campaña de control de las infiltraciones y recuperaciones del río, labor que debe basarse en corridas de aforo sistemáticas en el río Copiapó y sus afluentes. Particularmente importantes serán los aforos que se haga en períodos de altos caudales en los ríos, que es cuando mayores son las infiltraciones hacia la napa.

6. MODELO HIDROLOGICO MENSUAL

6.1 Introducción

Como una forma de verificar o validar los datos de entrada y el proceso de ajuste del Modelo Hidrológico del Valle de Copiapó simulado a nivel anual, se ha realizado las modificaciones necesarias para simular a nivel mensual y se ha recopilado la información requerida para una modelación a dicho nivel.

Una vez preparados los programas computacionales y sus datos de entrada, se ha simulado el comportamiento hidrológico del valle a nivel mensual, a manera de poder comparar los parámetros de ajuste de este modelo con los obtenidos anteriormente en el modelo anual.

En este informe no se pretende entregar un manual de operación del modelo mensual, puesto que éste no difiere del modelo anual. De igual forma, el proceso de simulación se ha mantenido sin variaciones, por lo tanto sólo se hará una breve descripción de las bases de cálculo empleadas. En cambio, el informe incluye una descripción detallada del proceso de obtención de los datos de entrada y de determinación de las condiciones de borde. Además se describe el proceso de ajuste, indicándose los parámetros utilizados y las variaciones que han tenido para obtenerse un calaje correcto.

Por último se entrega una discusión sobre los resultados obtenidos y una comparación de éstos con los obtenidos a nivel anual.

El período simulado corresponde a los años hidrológicos 1983 a 1986, es decir, Mayo de 1983 a Abril de 1987, período que ha sido escogido por los altos caudales que se ha tenido, con la importancia que esto significa como recarga del acuífero.

Los capítulos que siguen corresponden a los siguientes temas:

- Descripción y preparación de los datos de entrada
- Descripción de las condiciones de borde
- Descripción del proceso de simulación
- Descripción del proceso de ajuste
- Análisis y discusión de los resultados
- Conclusiones

6.2. Descripción y Preparación de los Datos de Entrada

6.2.1. Estadísticas Fluviométricas

Para simular el comportamiento hidrológico, el valle se ha dividido en 8 sectores, cada uno de los cuales está limitado por estaciones fluviométricas, salvo el caso de Piedra Colgada. Además, esta división corresponde a los límites de los distintos sectores simulados hidrogeológicamente, de manera de poder ligar ambos modelos.

Las estaciones fluviométricas consideradas son las siguientes:

- 198 -

- Manflas en Vertedero
- Jorquera en Vertedero
- Pulido en Vertedero
- Copiapó en Pastillo
- Copiapó en Lautaro
- Copiapó en San Antonio
- Copiapó en La Puerta
- Copiapó en Mal Paso
- Copiapó en Copiapó
- Copiapó en Angostura

De las 10 estaciones nombradas, las 3 primeras son utilizadas como dato de partida para la simulación. En cambio, las restantes son usadas como elementos de contraste para los caudales simulados el modelo para el río en la salida de cada sector.

El período considerado de la estadística de cada una de estas estaciones corresponde a los años hidrológicos de 1983 a 1986, es decir, de Mayo de 1983 a Abril de 1987.

6.2.2 Demandas de Agua por el Sistema de Riego

Para este punto se ha recopilado información correspondiente a las superficies cultivadas y a los cultivos realizados durante el período de simulación.

Con respecto a los primeros, se puede decir que no hay estacionalidad, es decir, que las superficies cultivadas no varían a lo largo del año. Esto se debe a la existencia de grandes superficies de parronales que lógicamente no varían mes a mes. Además, debido al clima privilegiado que tiene el valle de Copiapó, se logra mantener cultivadas durante todo el año, mediante rotaciones adecuadas, las superficies destinadas al cultivo de hortalizas, praderas y cereales.

- 199 -

Para determinar la evapotranspiración mensual en cada sector se ha utilizado la información a nivel anual entregada en el apartado sobre Demandas de Agua del Tomo II del presente estudio, y los datos de evaporación diaria del evaporímetro de bandeja ubicado junto al embalse Lautaro. Así, utilizando ambos antecedentes y suponiendo que la distribución mensual de las evaporaciones es similar en todos los sectores del valle, se ha determinado la evapotranspiración mensual en cada uno de los sectores simulados.

En cada sector se ha determinado entonces la superficie cultivada y la evapotranspiración mensual. A estos datos debe agregarse los correspondientes a las eficiencias de riego predial que se consideran en el cálculo de la tasa de riego.

Las eficiencias consideradas son las siguientes:

EFICIENCIAS DE RIEGO PREDIAL

<u>CULTIVO</u>	<u>EFICIENCIA %</u>
Hortalizas	50
Praderas	45
Frutales	45
Parronales (Goteo)	80
Cereales	50

Como resumen, los datos de entrada que se ha generado en este punto son:

- Superficies cultivadas por sector y por cultivo
- Evapotranspiración anual por sector y por cultivo
- Coeficiente de distribución mensual de la evapotranspiración anual
- Eficiencia de riego para cada tipo de cultivo

6.2.3 Infiltraciones de la Red de Canales

Tal como se ha indicado otras veces en este estudio, las infiltraciones de la red de canales se han dividido entre las producidas desde los canales principales y las que provienen de la red de canales secundarios.

En ambos casos, el valor de dicha infiltración corresponde a un factor del caudal de entrada de cada canal. Así, en la red de canales matrices o principales este factor ha sido determinado basándose en aforos diferenciales realizados en distintos canales de cada sector. En cambio, en la red de canales secundarios el factor de infiltración ha sido determinado de manera que se obtenga una infiltración similar a la infiltración de riego predial.

6.2.4 Caudales Bombeados

Basándose en informaciones de superficies cultivadas y tasas de riego, además de encuestas realizadas en terreno, se ha determinado los caudales bombeados anualmente en cada sector. Para llevar estos datos a nivel mensual se ha dividido el valor anual por 12, debido a que no se tiene información que permita evaluar mensualmente dichas extracciones y a que la magnitud del error producido por el supuesto de considerar extracciones parejas a lo largo del año no es importante frente a las magnitudes de los caudales simulados.

6.2.5 Datos Correspondientes al Embalse Lautaro

Para la simulación del funcionamiento hidrológico del valle de Copiapó debe considerarse el efecto producido por el Embalse Lautaro. Para esto, el modelo utilizado requiere algunos datos de entrada que corresponden a diferentes elementos que rigen su funcionamiento. Estos datos son los siguientes:

- 201 -

- Volúmenes Almacenados al Final de cada mes
- Volúmenes Medios Mensuales
- Filtraciones del Embalse
- Evaporación directa desde la superficie del Embalse
- Infiltración del Embalse

De estos datos, sólo los volúmenes finales de cada mes y los volúmenes medios mensuales ha sido obtenidos directamente de la estadística existente. En el caso de las filtraciones, la estadística se ha utilizado para confeccionar una relación entre las filtraciones medidas y la altura de agua en el embalse, relación que es usada en el proceso de simulación.

En cuanto a las evaporaciones, se utiliza la estadística de evaporaciones medidas en un evaporímetro de bandeja ubicada junto al embalse y una relación entre superficie del espejo de agua y altura del agua en el embalse.

Con respecto a las infiltraciones del embalse, se ha tomado como punto de partida que las infiltraciones son parejas durante el año y que su valor corresponde al valor obtenido en el modelo hidrológico superficial realizado a nivel anual.

Como resumen de este punto se puede decir que tanto los volúmenes medios como finales de cada mes son obtenidos de estadísticas preparadas por la Dirección de Riego. La estadística de filtraciones ha servido para generar una relación que simule éstas durante la operación del modelo. La evaporación ha sido obtenida a través de la estadística de evaporaciones de bandeja y es modificada a través de relaciones matemáticas para obtener la evaporación desde el Embalse. Por último, las infiltraciones del embalse se han supuesto iguales a las infiltraciones anuales, divididas por 12 para ser llevadas a nivel mensual.

6.2.6 Relación del Río con el Embalse Subterráneo

Entre los datos de entrada se encuentran las infiltraciones y recuperaciones del río Copiapó. Ambos valores son incógnitos, pese a la existencia de algunas mediciones de recuperaciones. Inicialmente los valores adoptados corresponden al equivalente mensual del valor anual de dichos parámetros aplicado en el Modelo Hidrológico a nivel anual.

6.2.7 Datos Generales

De la misma manera que en el modelo anual, el programa computacional requiere algunos datos generales de entrada, estos son: número de sectores por simular, número de períodos a simular y nombre de los períodos a simular.

6.3 Condiciones de Borde del Modelo

Debido a que el modelo hidrológico mensual es similar al anual, las condiciones de borde del sistema permanecen constantes. Por lo tanto, las condiciones de borde del modelo mensual son la suma de los caudales mensuales de las estadísticas de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido y la capacidad del Canal Malpaso.

La primera de éstas condiciona los caudales escurrientes en todo el sistema, ya que a partir de esta estadística se simula el comportamiento hidrológico de todo el valle. Por otro lado, se ha considerado que el Canal Malpaso capta un caudal máximo de $0.8 \text{ (m}^3/\text{s)}$, caudal que corresponde aproximadamente a la demanda de riego de la superficie regada por el canal.

6.4. Proceso de Simulación del Modelo

En este capítulo se entrega una descripción general del proceso de simulación. La información detallada al respecto se entregó en el informe del modelo hidrológico anual y, por la similitud que tiene con el modelo mensual, no se considera necesario repetirla.

En resumen, el modelo determina la demanda al río que produce el sistema de riego, la que se determina a partir de la tasa de riego y de las pérdidas de conducción de los sistemas de canales principales y secundarios.

Así:

$$D_{\text{Río}} = T_R + P_{\text{CM}} + P_{\text{CS}}$$

en que:

$D_{\text{Río}}$ = Demanda de Agua al Río

T_R = Tasa de Riego

P_{CM} = Pérdidas de Conducción en Canales Matrices

P_{CS} = Pérdidas de Conducción en Canales Secundarios

Por otro lado, la tasa de riego se define como:

$$T_x = \sum_{i=1}^{NCULT} \frac{DC_i}{E_{fi}}$$

en que:

$$DC_i = S_i \cdot E_{vi}$$

- 204 -

donde:

NCULT = Número de Cultivos

DCi = Demanda de Agua del Cultivo i

EFi = Eficiencia de Riego Asignada al Cultivo i

Si = Superficie Cultivada con Cultivo i

Evi = Evapotranspiración Real del Cultivo i

Basándose en este valor ($D_{Río}$), se realizan comparaciones con la capacidad de los canales del sector y con los derechos correspondientes, las cuales definen los bombeos requeridos, y junto a los caudales entrantes a cada sector se determina los caudales escurrientes en el río, las infiltraciones de éste y el caudal de salida de cada sector.

Todo lo anterior se realiza para cada tramo y para cada mes, generándose así una estadística de caudales simulados en la salida de cada sector, estadística que es contrastada con los caudales medidos en las estaciones fluviométricas, ubicadas en cada uno de los puntos simulados. Basado en este contraste se lleva a cabo el proceso de ajuste del modelo que se explica a continuación.

6.5 Proceso de Ajuste del Modelo

De la misma manera que en el modelo hidrológico anual, el proceso de ajuste corresponde a la determinación de algunos parámetros y a la variación de algunos datos de entrada que permitan obtener una estadística de caudales simulados similar a la estadística de caudales observados. Estos parámetros y datos de entrada son el porcentaje de infiltración del río, las recuperaciones del río y la infiltración del Embalse Lautaro.

El proceso de ajuste se realizó por sectores, partiendo del sector comprendido por los ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta la estación fluviométrica de Pastillo y terminando en el sector comprendido entre Piedra Colgada y Angostura.

- 205 -

A continuación se entregan los resultados del proceso de ajuste de cada uno de los sectores en que se dividió el valle, y por último se entrega los gráficos de comparación de los caudales observados y simulados en el Tomo Anexo N° 8.

6.5.1. Sector de los Ríos Manflas, Jorquera y Pulido hasta Copiapó en Pastillo
(Sector 1)

El proceso de ajuste del modelo hidrológico mensual ha dado resultados que corresponden con los del modelo anual en cuanto a las infiltraciones del río.

Es así que en Enero y Febrero de 1984 el porcentaje infiltrado aumenta de un 20 a un 25%, para luego disminuir a un 10%. Posteriormente en Noviembre y Diciembre del mismo año, el porcentaje vuelve a aumentar de un 10 a un 30%, disminuyendo a un 0% por algunos meses. Finalmente este porcentaje retoma su valor original de 10%.

Por otro lado, los promedios anuales de los porcentajes de infiltración se han mantenido casi sin variación, aunque el valor correspondiente a cada mes varía de acuerdo a lo explicado anteriormente. Los valores obtenidos de los modelos anual y mensual son los siguientes:

- 206 -

% DE INFILTRACION DEL RIO

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	25	20,8
84	15	15,8
85	0	0,0
86	5	10,0
	11,25	11,7

Los valores de infiltración se ven graficados en función de los caudales entrantes en la figura 6-1, que se entrega al final de este punto.

Con respecto a las recuperaciones, calaje ha señalado que no existen a lo largo del tramo, lo que corresponde a la realidad observada.

6.5.2 Sector comprendido entre Río Copiapó en Pastillo y Embalse Lautaro (Sector 2)

En este sector, tal como ocurrió en la simulación anual y como ocurre en la realidad, se obtuvo como resultado de la simulación la no existencia de recuperaciones en el río.

Por otro lado, las infiltraciones tienen un comportamiento levemente diferente a las existentes en el sector número 1, comportamiento que se mantiene a lo largo de los siguientes sectores del valle.

En este caso, tal como ocurre en el sector N° 1, durante 1983 el porcentaje de infiltración permanece constante hasta Diciembre donde aumenta de un 20 a un 30%

valor que se mantiene durante Enero. Luego de pasar la crecida, este valor comienza a disminuir hasta llegar a un 0% entre Diciembre de 1984 y Mayo de 1985, sólo los meses de Marzo y Abril de 1984 no siguen esta tendencia por alguna razón inexplicable hasta el momento. Por último se tiene un aumento del porcentaje de infiltración durante el año hidrológico 1985, manteniéndose constante en 1986.

Este comportamiento, que difiere al del sector 1, puesto que no hay un aumento del porcentaje de infiltración para la crecida de Diciembre de 1984, se puede deber a que la pendiente del valle es menor que en el sector 1, por lo que las velocidades alcanzadas no son suficientes para remover la depositación dejada por la primera crecida, en especial la dejada en las áreas inundadas fuera del cauce. Por otro lado, el sector número 1 comprende 3 ríos de comportamientos diferentes, incluso de orígenes diferentes. Por lo que la cantidad de barro que cada uno trae es totalmente distinta, produciendo un comportamiento de infiltraciones, depositación de material y remoción de éstos diferente al de los 3 ríos juntos que forman el río que escurre en el Sector 2.

Como se ha dicho otras veces a lo largo del presente estudio, el origen que se ha postulado para el comportamiento de las infiltraciones del río es sólo una hipótesis. Naturalmente existirán una serie de factores, además del efecto de colmatación y lavado del lecho que aquí se ha planteado, condicionando el fenómeno de las infiltraciones. Descubrir cuáles son esos factores y cómo se desarrolla el fenómeno físico requiere de una investigación que escapa de los límites de este proyecto. No obstante aquí se queda en claro cómo se presenta el fenómeno frente a las variaciones de caudal en el río, aún cuando no se conozcan sus causas físicas.

En cuanto a los promedios anuales de los porcentajes de infiltración aplicados se puede decir que éstos no varían considerablemente con respecto a los valores aplicados al modelo anual. En la siguiente tabla se entregan ambos valores para cada uno de los años simulados en el modelo mensual.

% DE INFILTRACION DEL RIO

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	10,0	19,6
84	10,0	6,7
85	20,0	16,7
86	20,0	20,0
PROM.	15	15,75

Por último, los valores de infiltración simulados para cada mes se ven en el gráfico de la Figura 6-1 donde se presenta los valores de infiltración en función del caudal de entrada al sector, descontado el caudal extraído por el sistema de riego.

6.5.3 Sector comprendido entre Embalse Lautaro y San Antonio (Sector 3)

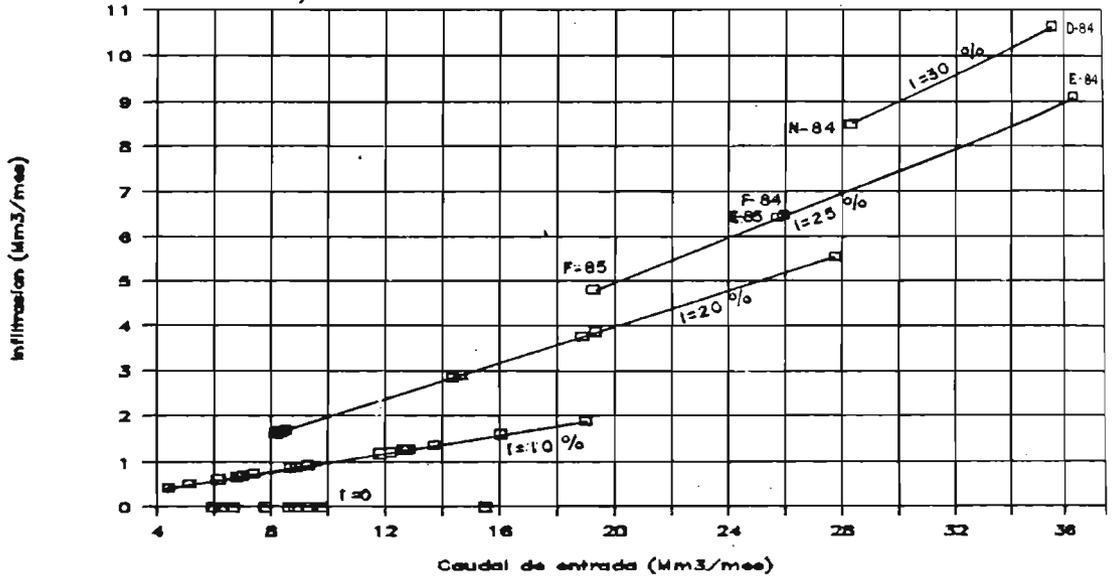
En este sector, tal como ocurrió en el modelo hidrológico anual, no se producen infiltraciones del río, al contrario, es el río el que aumenta su caudal por medio de recuperaciones, las que se manifiestan en forma de vertientes a lo largo del cauce.

El promedio anual de las recuperaciones mensuales coincide bastante bien con los valores simulados en el modelo anual, y el total de los 4 años simulados mensualmente difiere en un 5% del valor total para el mismo período en la simulación anual. Los valores correspondientes a cada año y el total del período se entregan en el cuadro siguiente:

MODELO HIDROLOGICO MENSUAL

INFILTRACIONES RIO

SECTOR : MANFLAS , JORQUERA Y PULIDO - PASTILLO



INFILTRACIONES RIO

SECTOR : PASTILLO - EMBALSE LAUTARO

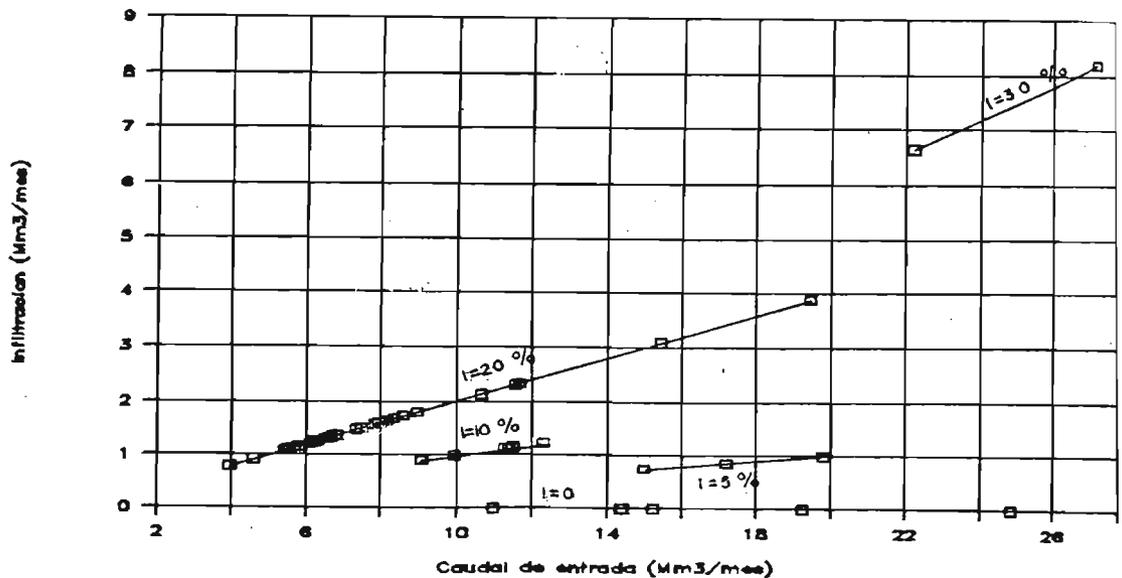


FIGURA 6 - 1

RECUPERACIONES (Mm³/mes)

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	56,0	52,4
84	80,0	67,7
85	60,0	56,1
86	30,0	39,4
TOTAL	226,0	215,6

Por otro lado, se ha graficado las recuperaciones mensuales junto a las variaciones del nivel estático del pozo 27° 50' - 70° 00' D-2 ubicado dentro de este sector, obteniéndose una concordancia entre el aumento de profundidad del nivel estático y la disminución de las recuperaciones simuladas. En la Figura 6-2 se observa también un desfase entre el nivel estático más alto (Marzo-83) y el máximo de las recuperaciones (Marzo-84), lo que se debe a la inercia del embalse subterráneo, ya que el pozo está ubicado en la mitad superior del sector y las recuperaciones se producen especialmente en la zona baja de éste. Esto se ve confirmado por la variación de niveles del pozo 2750-7000 B-2, ubicado en San Antonio y que no se graficó por tener menos datos que el pozo D-2, donde el máximo nivel estático se produce para el período Diciembre de 1983 - Marzo 1984.

4.5.4 Sector comprendido entre San Antonio y La Puerta. (Sector 4)

Al igual que en el sector anterior éste es un sector de recuperaciones y no de infiltraciones, recuperaciones de caudal en forma de vertientes en el lecho del río, las que se producen a lo largo de todo el tramo entre San Antonio y La Puerta.

NIVELES ESTATICOS / RECUPERACION
SECTOR N° 3

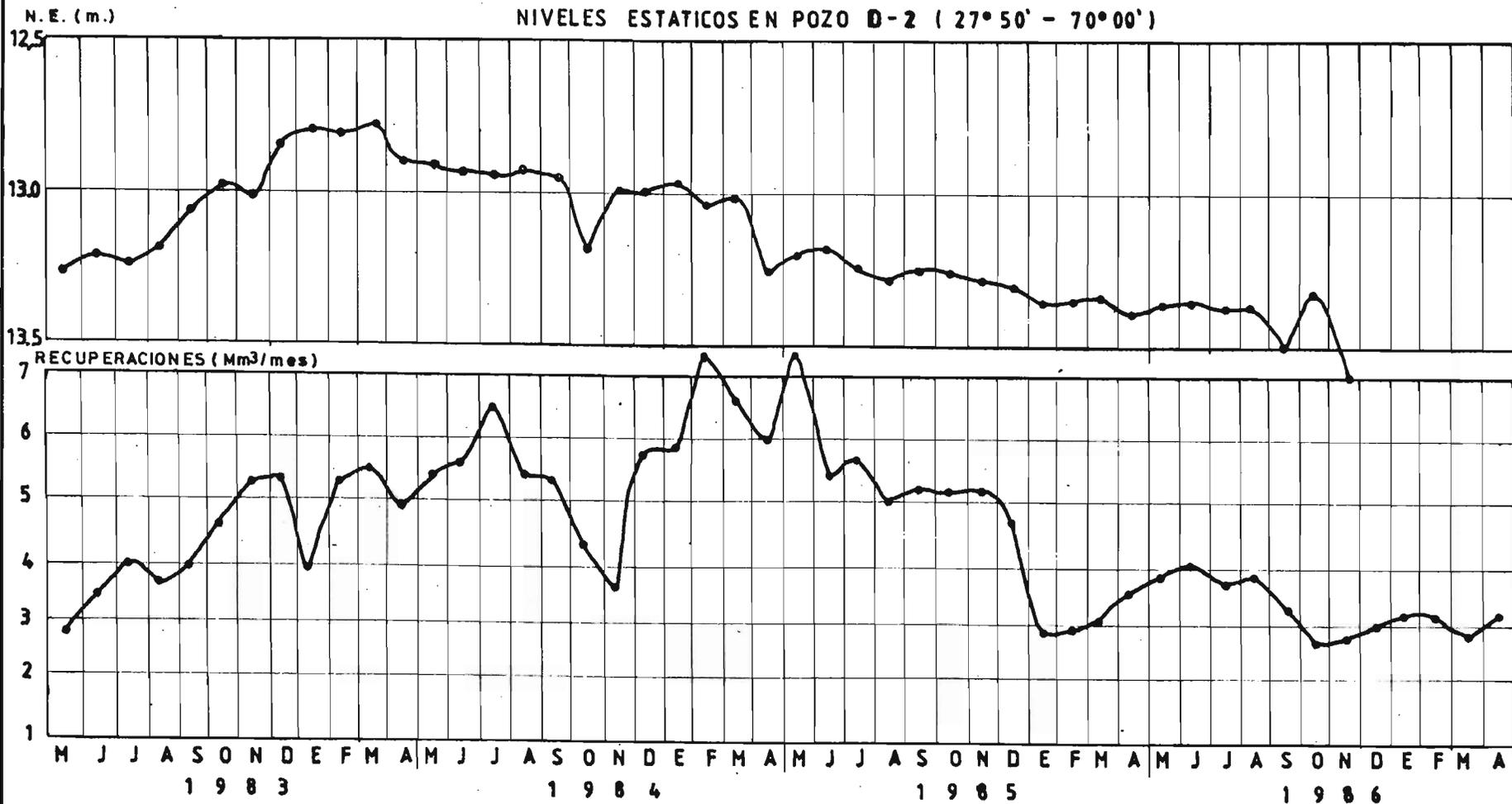


FIGURA 6-1

- 212 -

Estas recuperaciones son muy constantes a lo largo de los años, puesto que son producto del vaciamiento del Embalse Subterráneo ubicado aguas arriba de La Puerta, que se produce por la barrera subterránea natural que existe en ese lugar. Este vaciamiento varía muy lentamente debido a la inercia del embalse subterráneo, lo que se ve numéricamente en la tabla de comparación de las recuperaciones anuales simuladas por los modelos hidrológicos mensual y anual.

RECUPERACIONES (Mm³/mes)

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	28	24,3
84	34	40,0
85	34	29,4
86	34	34,5
TOTAL	130	128,2

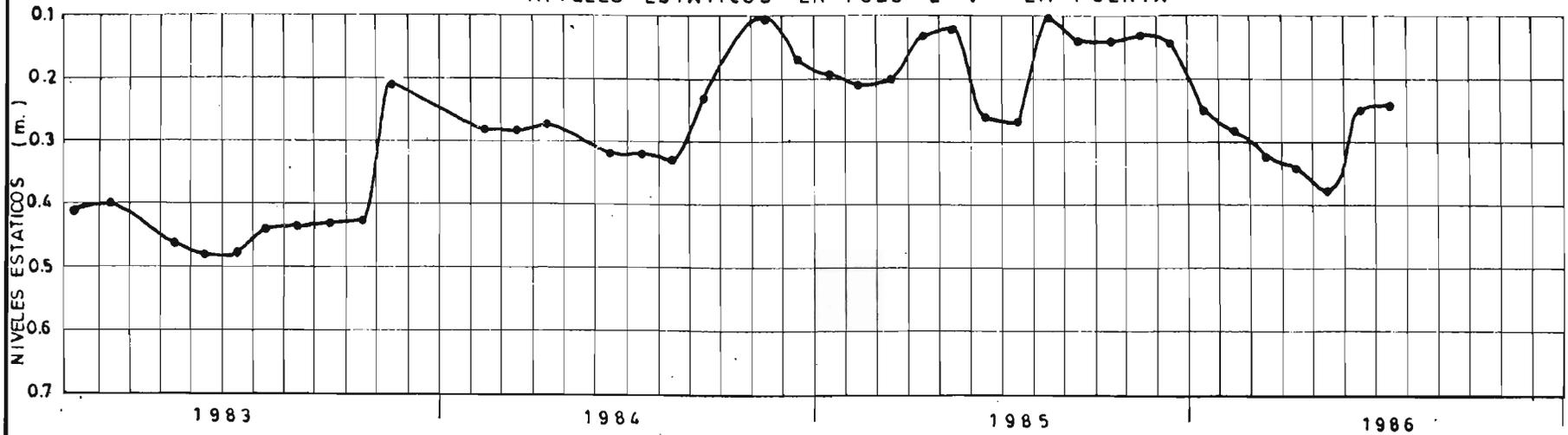
Del cuadro anterior se puede decir que pese a algunas diferencias en algunos años, el error máximo (17%) se considera aceptable, en especial si se tiene en cuenta que el error total del período simulado no alcanza al 2%.

En la Figura 6-3 se ha graficado las recuperaciones en el sector estudiado junto a las variaciones de niveles del pozo 27° 40'-70°00' C-4, de manera de poder comparar las variaciones de ambas curvas. Del análisis de este gráfico es poco lo que se puede concluir, ya que las variaciones de nivel estático del pozo

NIVELES ESTATICOS / RECUPERACION

SECTOR N° 4

NIVELES ESTATICOS EN POZO C-4 LA PUERTA



RECUPERACIONES

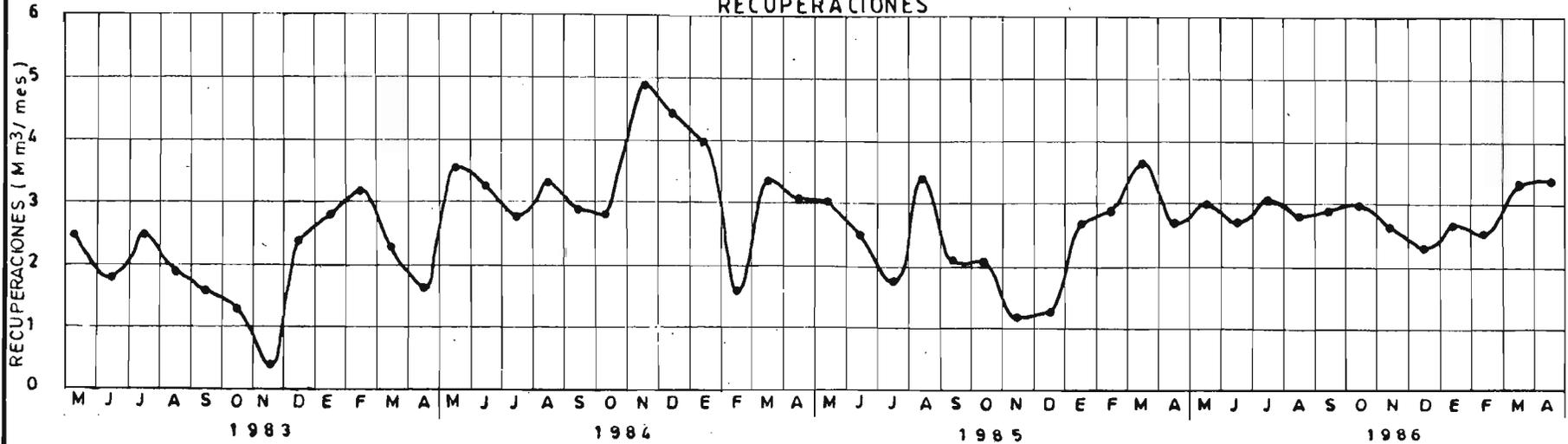


FIGURA 6-3

- 214 -

están comprendidas en un rango de \pm 15 cm. En todo caso se observa claramente la estabilidad de los niveles y de las recuperaciones, lo que confirma lo anteriormente señalado.

6.5.5. Sector comprendido entre La Puerta y Mal Paso (Sector 5)

A lo largo de este sector se tiene comportamiento diferentes en lo que se refiere a la relación río-acuífero. Inicialmente se tiene infiltraciones, para luego producirse recuperaciones en forma de vertientes en el sector más cercano a Mal Paso.

Estudiaremos primero el fenómeno de las infiltraciones producidas en la mitad superior del sector, que se ilustra con el gráfico de la Figura 6-4.

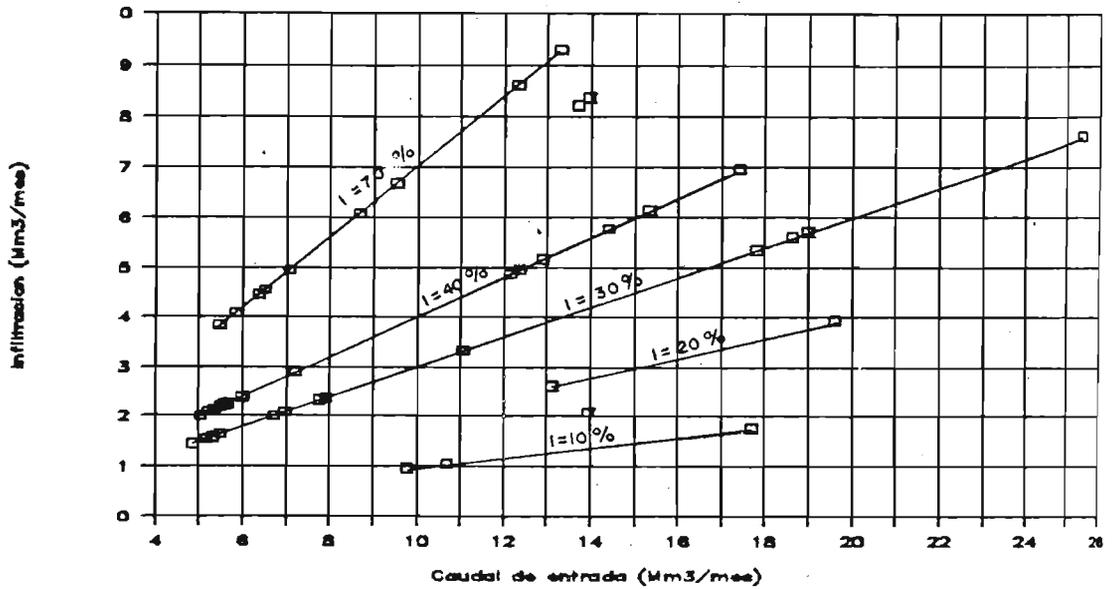
Siguiendo en parte el comportamiento del Sector 2 aunque más acentuado, este sector comienza el año 1983 con un porcentaje de infiltración muy alto (70%), lo que se debería a la inexistencia de una capa impermeabilizante en el lecho y a la limpieza de las aguas escurrientes que no la forman, limpieza que se debe a que estas aguas provienen en parte importante de las vertientes del sector San Antonio-La Puerta.

A medida que los años fueron siendo más caudalosos el escurrimiento comenzó a ser cada vez más turbio, con la consiguiente depositación de barro y la aparente formación de una capa impermeabilizante que disminuye el porcentaje de infiltración. Este proceso continúa hasta Julio de 1985 en que los caudales del río comienzan a disminuir y a escurrir aguas más limpias. Esto último contribuye a limpiar el cauce y a aumentar nuevamente el porcentaje de infiltración.

Por otro lado, los valores medios anuales de los porcentajes de infiltración mensuales concuerdan bastante bien con los aplicados en el modelo de simulación anual. Estos valores se ven contrastados en el siguiente cuadro:

- 215 -

MODELO HIDROLOGICO MENSUAL
INFILTRACIONES RIO
SECTOR : LA PUERTA - MAL PASO



INFILTRACIONES RIO
SECTOR : MAL PASO - COPIAPO

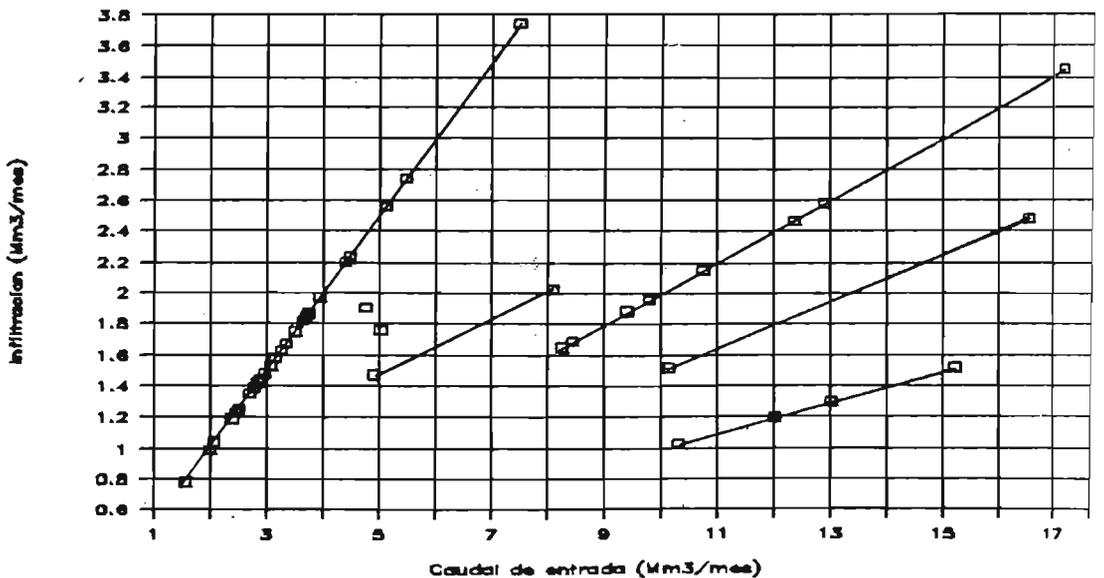


FIGURA 6-4

- 216 -

% DE INFILTRACION DEL RIO

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	60	66
84	30	31
85	20	25
86	40	40
PROM.	38	41

Con respecto a las recuperaciones, tal como se dijo anteriormente se producen en la mitad inferior del sector estudiado, en forma de vertientes en el lecho del río y muy parejas en cuanto a caudal durante los 4 años simulados.

Los valores simulados para cada año por el modelo mensual se contrastan con los del modelo anual en el siguiente cuadro. En él se incluye también el total de recuperaciones de los 4 años simulados con ambos modelos.

- 217 -

RECUPERACIONES (Mm³/mes)

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	17	19,3
84	20	20,5
85	20	19,0
86	20	19,0
TOTAL	77	77,8

Como se aprecia, los valores de ambos modelos concuerdan plenamente en especial el valor total de los 4 años de simulación, para el que se tiene un error de un 1%.

En la Figura 6-5 se ha graficado las recuperaciones mensuales junto a los niveles estáticos del pozo 27°30'-70°10' A-1. Allí se observa una fuerte concordancia entre las variaciones del nivel estático y las recuperaciones para los años hidrológicos 1983 y 1984. Para los años 1985 y 1986 no se tiene datos de niveles de este pozo, pero en otros pozos del sector, los niveles se mantienen relativamente constantes a partir de 1984, lo que coincidiría con el comportamiento de las recuperaciones en esos años.

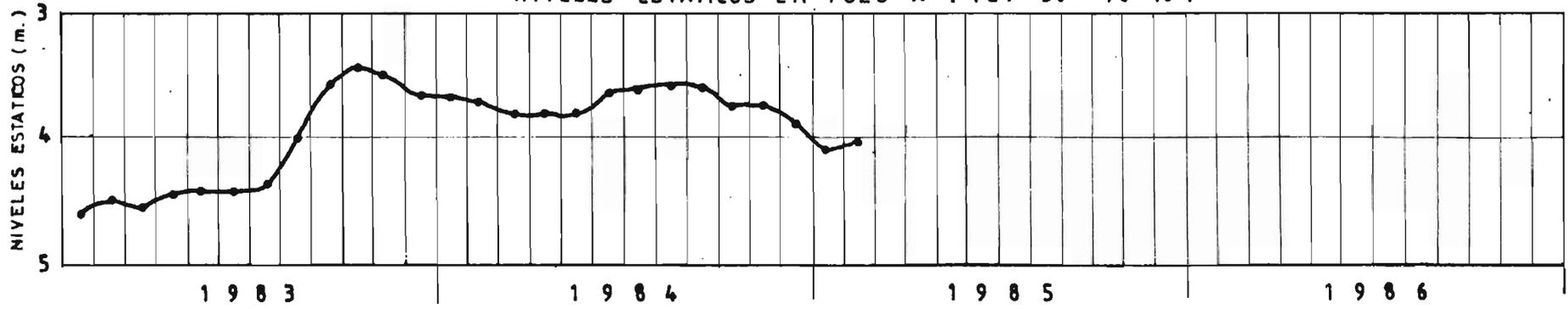
6.5.6 Sector comprendido entre Mal Paso y la Ciudad de Copiapó. (Sector 6)

Al igual que en el sector 5, aquí se tiene infiltraciones en la zona superior y recuperaciones en las proximidades de la ciudad de Copiapó.

En régimen de las infiltraciones tiene un comportamiento similar al del sector anterior, con variaciones del porcentaje de infiltración similares, es decir,

NIVELES ESTATICOS / RECUPERACION
SECTOR N° 5

NIVELES ESTATICOS EN POZO A-1 (27° 30' - 70° 10')



RECUPERACIONES

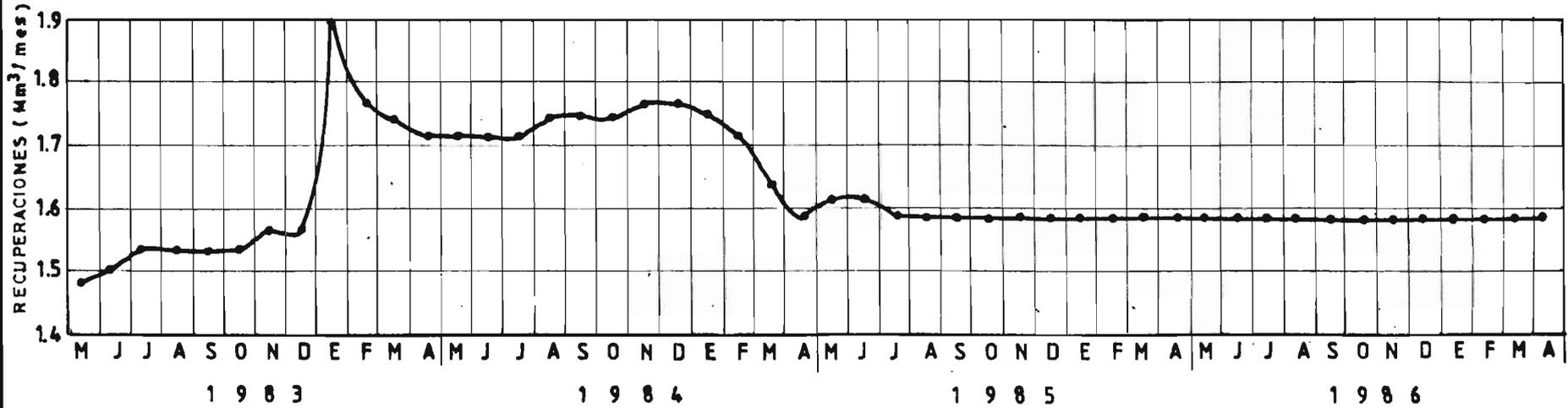


FIGURA 6 - 5

manteniéndose durante 1983, disminuyendo durante 1984 y volviendo a aumentar a partir de mediados de 1985 para mantenerse constante durante 1986. En la Figura 6-4 se presenta un gráfico ilustrando esta situación.

Los promedios medios anuales de los porcentajes de infiltración mensual se contrastan con los porcentajes de infiltración simulados en el modelo anual en el cuadro siguiente:

% DE INFILTRACION DEL RIO

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	50	50
84	20	17
85	30	36
86	50	50
PROM.	37.5	38.3

Como se observa estos valores coinciden bastante bien, y los valores mensuales conforman el valor anual indicado en la columna de simulación mensual son muy parejos y sin cambios bruscos, que es lo esperable en el caso de las infiltraciones cuando ya se ha tenido un efecto de regulación de las crecidas por el recorrido de éstas por el valle.

Con respecto a las recuperaciones se puede decir que éstas van en aumento durante 1985 y 1986. Los valores anuales de recuperación simulados mensual y anualmente se presentan en el cuadro siguiente:

- 220 -

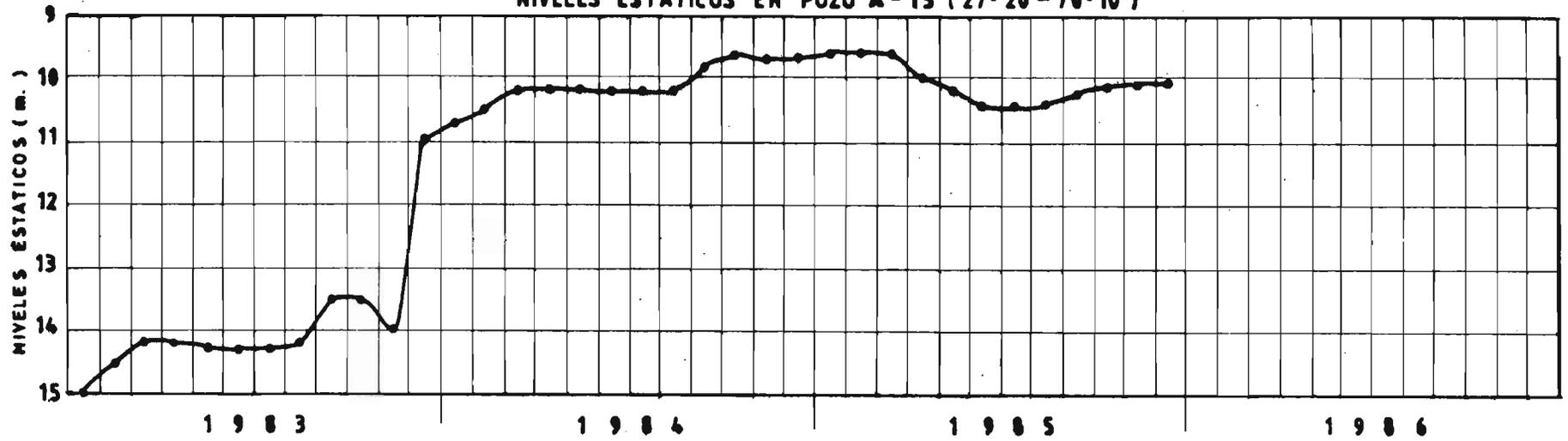
RECUPERACIONES (Mm³/mes)

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	6	6
84	16	16
85	18	18,2
86	18	17,6
TOTAL	58	57,8

Como se ve, los resultados de las recuperaciones de ambos modelos son los mismos, pero se debe tener en cuenta que el valor indicado para la simulación mensual es la suma de los valores mensuales de cada año hidrológico, los cuales tienen una variación que debe ser estudiada. Para ello se ha graficado en la Figura 6-6 los valores de las recuperaciones mensuales junto a los datos de nivel estático del pozo 27°20'-70°10' A-15. En este gráfico se puede observar que, pese a haber impuesto un valor constante a las recuperaciones de los años 1983 y 1984, la tendencia de los niveles estáticos es la misma. Para los años 1985 y 1986 los valores de las recuperaciones tienen una inestabilidad, pero su tendencia media (línea punteada) es similar a la de los niveles del pozo graficado.

NIVELES ESTATICOS / RECUPERACION
SECTOR Nº 6

NIVELES ESTATICOS EN POZO A-15 (27° 20' - 70° 10')



RECUPERACIONES

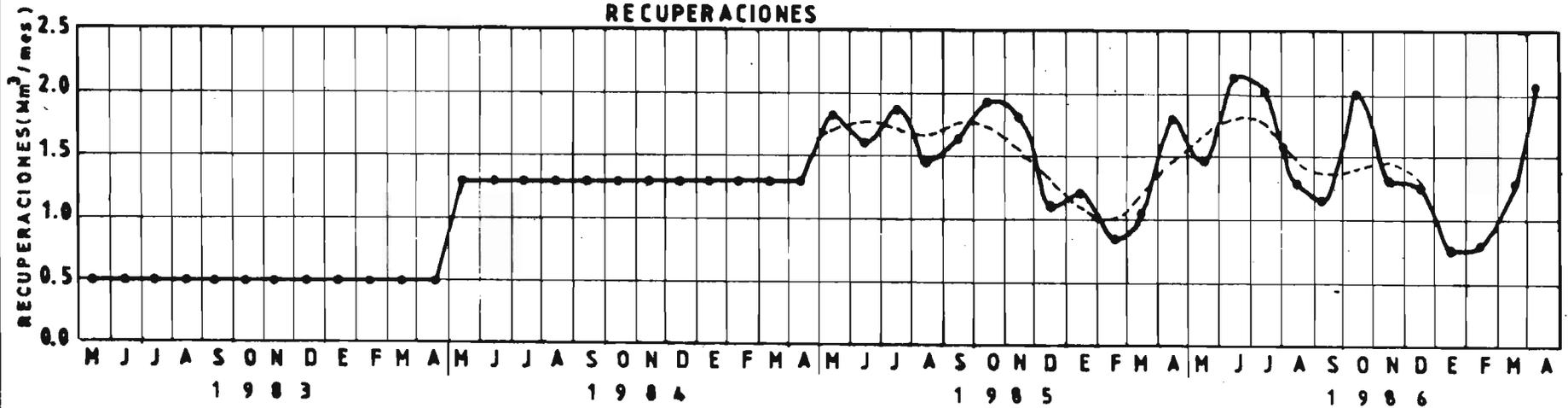


FIGURA 6 - 6

6.5.7. Sector comprendido entre Copiapó y Piedra Colgada. (Sector 7)

En este sector, al igual que en los 2 anteriores, se tiene infiltraciones y recuperaciones. Las primeras se producen en el sector comprendido entre la ciudad de Copiapó y Chamonate, y las recuperaciones se producen a partir de Chamonate, aumentando a medida que uno se acerca a Piedra Colgada.

Analizando inicialmente las infiltraciones, se observa un comportamiento similar al de los sectores anteriores. Solamente varía la rapidez con que cambia el porcentaje de infiltración de los períodos previos a las crecidas al período de crecida y posterior a ella, siendo más brusco en este caso. En la Figura 6-7 se muestra gráficamente esta situación. Esto se debe a que a este altura del valle sólo las crecidas muy grandes llegan a influir, mientras que el escurrimiento normal del río se compone sólo de aguas limpias, provenientes de recuperaciones.

Los valores medios anuales del porcentaje de infiltración mensual se comparan con los valores aplicados en el modelo anual en el cuadro siguiente:

§ INFILTRACION DEL RIO

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	70	70
84	60	54
85	50	56.7
86	70	70
PROM.	62.5	62.7

Como se ve, estos valores concuerdan bastante bien, en especial si se compara el valor promedio del porcentaje de infiltración para el período analizado.

MODELO HIDROLOGICO MENSUAL

INFILTRACIONES RIO

SECTOR : COPIAPO - PIEDRA COLGADA

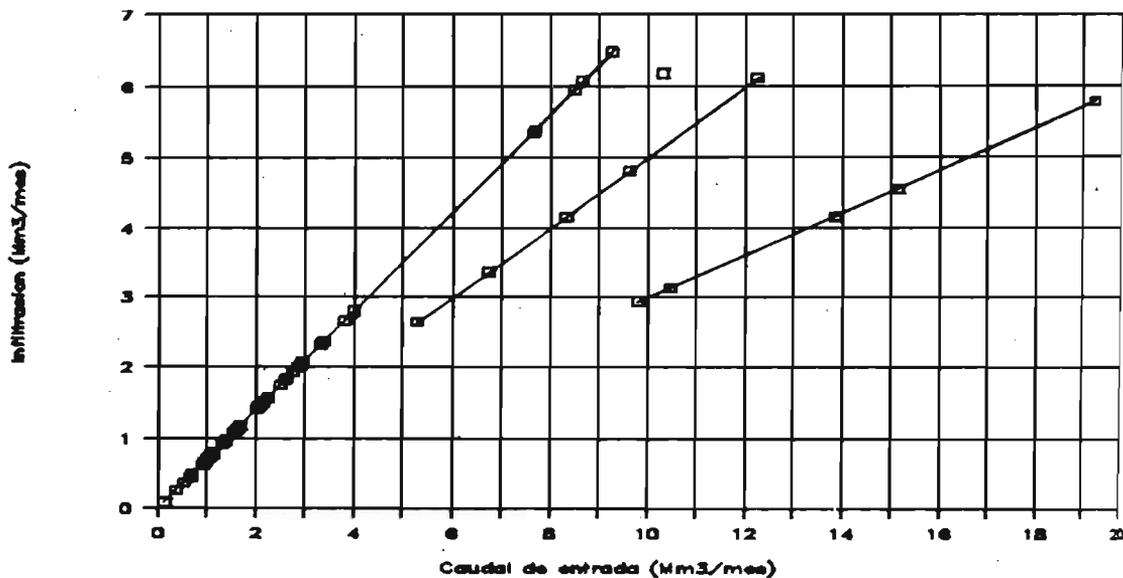


FIGURA 6-7

- 224 -

Por otro lado, los valores simulados para las recuperaciones mensuales van en un aumento paulatino desde 1983 a 1984 manteniéndose durante 1985 y 1986.

La comparación de las recuperaciones simuladas mensual y anualmente se entrega en el cuadro siguiente, en el cual se entrega el valor de las recuperaciones de cada año y el del período 1983-1986.

RECUPERACIONES (Mm³/mes)

AÑO	MODELO DE SIMULACION	
	ANUAL	MENSUAL
83	0,8	0,9
84	5,0	8,9
85	12,0	12,0
86	10,0	12,0
TOTAL	27,8	33,8

Como se ve existe una similitud en las tendencias, aunque hay algunas diferencias en las magnitudes. En particular el año 1984 tiene una diferencia importante entre ambos valores.

Ahora bien, al observar la Figura 6-8, con el gráfico de variación del nivel estático del pozo 27°10'-70°20' C-8 y compararlo con los valores de las recuperaciones mensuales simuladas, se nota claramente que existe una relación entre ellos.

NIVELES ESTATICOS / RECUPERACION
SECTOR N° 7

NIVELES ESTATICOS EN POZO C-8 (27° 10' - 70° 20')

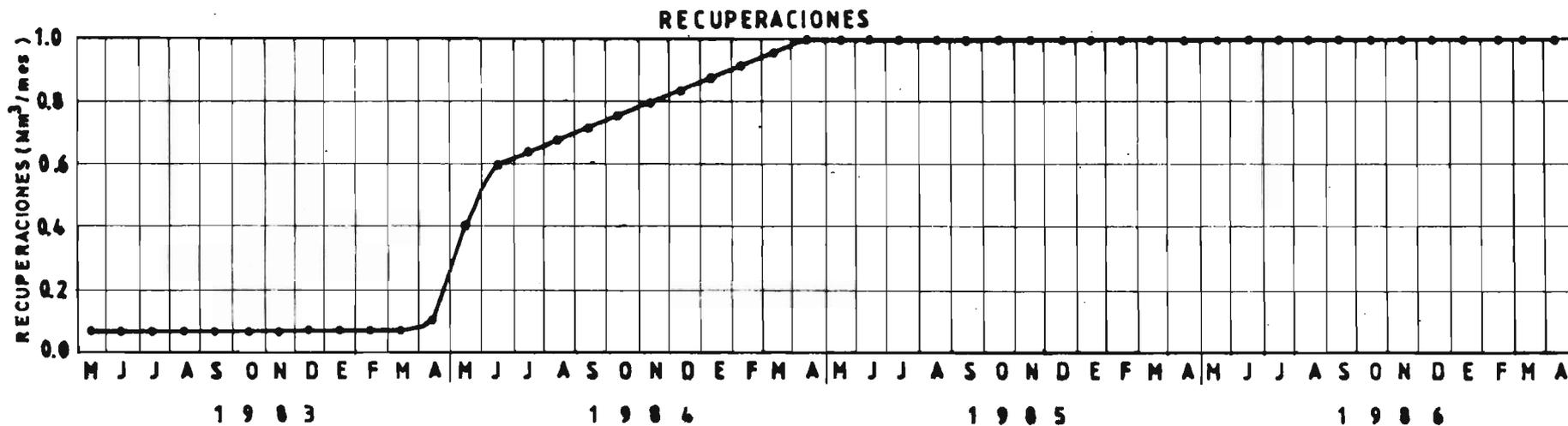
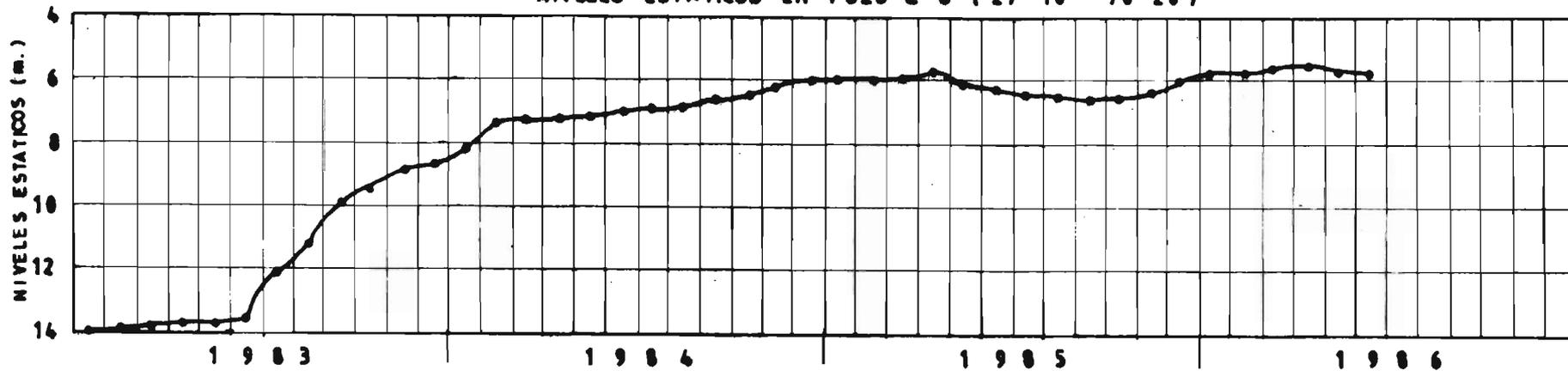


FIGURA 6-8

6.5.8. Sector comprendido entre Piedra Colgada y Angostura (Sector 8.)

Este sector tiene un comportamiento diferente al de los sectores previos, ya que en él sólo se tiene recuperaciones, que alimentan el río a lo largo de su recorrido en forma de vertientes. Las recuperaciones del tramo se han considerado iguales al caudal del río Copiapó en Angostura, ya que todo el caudal del río Copiapó en Piedra Colgada es captado por los canales de riego.

Para los años de crecida, se ha considerado que las recuperaciones permanecen constantes, lo que no se puede alejar mucho de la realidad debido a la poca variación histórica que tiene el río Copiapó en Angostura.

6.6. Análisis y Discusión de los Resultados

Una vez terminado el proceso de ajuste se ha obtenido como resultado los caudales simulados en cada una de las estaciones fluviométricas, caudales que se han contrastado con los caudales medidos en cada estación a través de los gráficos que se entregan en el Tomo Anexo N° 8.

Los resultados obtenidos son muy buenos para modelos de simulación de este tipo, superando lo esperado dado el grado de precisión de los datos de entrada.

Tal como se puede ver, en algunos gráficos de contraste de caudales se producen algunas pequeñas diferencias, que se deben al grado de precisión de los datos de entrada y el grado de detalle que el modelo es capaz de dar.

Por otro lado, los resultados obtenidos, tanto para las infiltraciones como las recuperaciones, son bastante buenos. Debe tenerse en cuenta que, tal como se indicó en el punto anterior en el análisis de cada tramo, los porcentajes infiltrados del caudal de entrada del río no varían en forma importante con respecto al resultado obtenido del modelo anual.

- 227 -

Con respecto a las recuperaciones se puede decir que se ha obtenido una relación bastante buena entre los volúmenes recuperados y las variaciones del nivel estático en las zonas de recuperaciones.

Todo lo anterior sirve para mostrar que el modelo de simulación hidrológica a nivel mensual ha sido calado teniéndose en cuenta una gran parte de los factores que influyen en el comportamiento hidrológico real del valle, y que los datos de entrada han sido trabajados con la precisión necesaria para este tipo de modelos de simulación.

A continuación se entrega dos cuadros resumen. En ellos están los resultados obtenidos en cuanto a infiltraciones y recuperaciones, para cada uno de los sectores en que se dividió el valle y para cada uno de los años que conforman el período simulado. Junto a ellos se entrega los resultados obtenidos por el modelo de simulación anual, de manera de hacer fácil la comparación de ambos.

INFILTRACIONES DEL RIO (Mm³/año)

SECTOR	AÑO								Total	
	83		84		85		86			
	A	M	A	M	A	M	A	M	A	M
1	50	43	33	41	0	0	4	8.6	87	93
2	15	33	19	10	18	15	16	15	68	73
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	68	74	60	62	18	22	25	77	171	185
6	20	20	28	23	22	22	18	20	88	85
7	15	15	69	64	26	25	9	15	119	119
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- 228 -

A : Modelo de Simulación Anual

M : Modelo de Simulación Mensual

RECUPERACIONES (Mm³/año)

SECTOR #	A Ñ. O								Total	
	83		84		85		86			
	A	M	A	M	A	M	A	M	A	M
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	56	52	80	68	60	56	30	39	226	215
4	28	24	34	40	34	29	34	34	130	127
5	17	19	20	21	20	19	20	19	77	78
6	6	6	16	16	22	18	20	18	64	58
7	0.8	0.9	5	9	12	12	10	12	27.8	33.9
8	4.4	1.7	4.4	2.1	4.4	1.9	4.4	1.6	17.6	7.3

A : Modelo de Simulación Anual

M : Modelo de Simulación Mensual

Como se puede observar en los 2 cuadros, los resultados obtenidos en ambos modelos son muy parecidos, en especial si se observan los totales del período considerado.

- 229 -

Esto último es de mucha importancia, ya que este modelo sirve para generar datos de entrada a los diferentes modelos hidrogeológicos en que se dividió el valle, y dadas las dimensiones de los embalses subterráneos estudiados, se debe pensar en un funcionamiento de ellos en forma hiperanual.

Por consiguiente, si existe alguna diferencia en algunos años, ésta será compensada en los siguientes, obteniéndose valores finales similares que regirán el comportamiento del agua subterránea.

6.7 Conclusiones

Estando los modelos calados y habiéndose analizado los resultados obtenidos se puede concluir que la simulación a nivel anual tiene perfecta validez.

Esto se puede afirmar tan categóricamente debido a que los resultados obtenidos, expuestos en el punto anterior, así lo indican.

Se debe mencionar la importancia que ha tenido el modelo de simulación mensual para reafirmar las hipótesis de comportamiento de los procesos de infiltración y recuperación, ya que pese a cambiar la escala de trabajo (anual a mensual) éstas se han mantenido, obteniéndose excelentes resultados.

Además de lo anterior, el solo hecho de tener un punto de comparación de los resultados e hipótesis aplicadas en el modelo anual es de gran valor.

ALTERNATIVAS FUTURAS DE EXPLOTACION

1.1 Introducción

Tan importante como determinar qué situaciones hidrológicas se simulará, es saber cuáles serán las alternativas futuras de explotación que se supondrá para el valle del río Copiapó.

De acuerdo a los antecedentes recogidos en la parte Demandas de Aguas del Tomo II de este proyecto, el mayor crecimiento en la demanda de recursos hídricos proveniría de la agricultura, seguido del abastecimiento para agua potable.

Respecto de las nuevas demandas que puede generar la agricultura, parte importante de los cambios en las superficies cultivadas corresponden a sustitución de cultivos tradicionales por parronales. Esto significa que las nuevas demandas podrían no ser notablemente superiores a las actuales, ya que sólo se estaría cambiando un cultivo por otro. Además la sustitución estaría incorporando riego tecnificado, fundamentalmente goteo, que mejora notablemente la eficiencia en el uso del agua.

En el capítulo que sigue se desarrollan estos aspectos, hasta obtener una hipótesis sobre las demandas hídricas que se tendrá a futuro.

1.2 Uso Actual y Potencial del Suelo

En el capítulo Demandas de Agua, que forma parte de los Estudios Básicos presentados en el Tomo II, se ha hecho un amplio análisis de la situación actual y potencial del uso del suelo en el Valle del río Copiapó. En el Cuadro 7-1 se resume los resultados más importantes.

- 231 -

CUADRO 7-1USO ACTUAL Y POTENCIAL DEL SUELO (1985/86)VALLE DEL RIO COPIAPO

RUBRO	USO ACTUAL SUP. (HA)	USO POTENCIAL SUP. (HA)
Hortalizas	3.119	47
Praderas	76	1.104
Vides	4.690	9.357
Frutales	386	651
Matorral	2.825 *	-
Vegas	483 *	-
TOTAL	8.271	11.159

* No se han considerado en el TOTAL

- 232 -

Las variaciones que se observa por rubro entre el uso actual y potencial obedecen a lo siguiente:

- Las hortalizas irían progresivamente sustituyéndose por vides, especialmente en el sector Malpaso - Copiapó donde hoy casi no existen parronales.
- En el área de los afluentes Manflas, Jorquera y Pulido y en el Valle de Copiapó hasta Malpaso, las superficies con vides aumentarían fundamentalmente por expansión del área cultivada hacia los faldeos de los cerros. Esto generaría, por lo tanto, un incremento en la superficie cultivada.
- Entre Copiapó y Piedra Colgada se daría una combinación de los casos anteriores, ocurriendo tanto la sustitución de cultivos tradicionales por vides como la habilitación de zonas con matorrales para ser usadas como praderas.
- En el sector Piedra Colgada - Angostura se ha considerado, en cambio, que la superficie cultivada no aumentaría, dándose sólo una sustitución de hortalizas por frutales.

Se tiene, en síntesis, una superficie actual de cultivos de 8.271 (Há) y potencialmente se podría llegar a explotar 11.159 (Há). Sin embargo, esta última cifra sube a 17.841 (Há) si se considera la habilitación de áreas con limitaciones moderadas a severas, de las cuales 5.830 (Há) equivalentes al 87% de estas áreas, son sectores ubicados aguas abajo de Copiapó. No obstante, la incorporación de estas tierras al cultivo obliga a realizar fuertes inversiones, lo que se justifica sólo para cultivos muy rentables. Especialmente cierto es esto en el sector Piedra Colgada-Angostura, donde se concentra la mayor parte de este potencial, área hasta ahora no tocada para la producción de tales cultivos.

En el Cuadro 7-2, a continuación, se presenta el uso potencial del suelo por sector, considerando por separado las alternativas planteadas anteriormente.

CUADRO 7-2USO POTENCIAL DEL SUELOVALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR	SUPERFICIE POR RUBRO (Há)				TOTAL
	HORTALIZAS	PRADERAS	VIDES	FRUTALES	
1	-	-	750,1	-	750,1
2	4,8	36,0	1.826,4	12,2	1.879,4
3	5,8	52,8	2.637,0	41,6	2.737,2
4	-	14,4	2.075,7	-	2.090,1
5	14,4	755,5	2.067,5	85,6	2.923,0
6	22,4	245,5	-	511,2	779,1
TOTAL	47,4	1.104,2	9.356,7	650,6	11.158,9
SITUACION INCORPORANDO AREAS CON LIMITACIONES MODERADAS A SEVERAS					
1	-	-	750,1	-	750,1
2	4,8	36,0	2.133,9	62,2	2.236,9
3	5,8	52,8	2.887,0	51,6	2.997,2
4	-	14,4	2.310,7	-	2.325,1
5	14,4	755,5	3.870,0	813,1	5.453,0
6	22,4	245,5	1.612,5	2.198,7	4.079,1
TOTAL	47,4	1.104,2	13.564,2	3.125,6	17.841,4

Fuente: Capítulo "Demandas de Agua" del Tomo II del presente proyecto.

- 234 -

En forma resumida este cuadro nos dice dos cosas fundamentales:

- a) Se espera para el futuro que el valle se cultive casi exclusivamente con vides y frutales, especialmente las primeras que podrían llegar a cubrir más del 75% de la superficie total cultivable.
- b) Visto por sectores se descubre que, en la práctica, la totalidad del valle entre los afluentes Manflas, Jorquera y Pulido y la ciudad de Copiapó se cultivaría con parronales.

Se deja en claro además que no se ha incluido como uso potencial las grandes quebradas que llegan al valle tales como Calquis, Cerrillos, Paipote, Cardones, entre otras. Esto porque su riesgo no podría hacerse, por lejanía, con aguas del valle, sino con pozos perforados en la quebrada correspondiente y, como se ha visto en el ajuste del modelo, las quebradas funcionan de una manera bien diferente al acuífero del valle y tampoco aportan a este último volúmenes de importancia.

7.3 Proyección de las Demandas de Agua Potable e Industrial

Para el futuro se estima que las actuales demandas de agua potable deberían crecer en la medida que aumente la población. Como parte de los Estudios Básicos se ha hecho una proyección de las demandas futuras, donde se ha considerado también las expectativas económicas del valle. En el capítulo Demandas de Agua del Tomo II se ha tratado con gran detalle el tema resumiéndose en el Cuadro N° 25 la situación del valle. Para la simulación se empleará estos mismos valores, considerando un crecimiento parejo de 10% cada 5 años con posterioridad al año 2015.

Respecto de las futuras demandas de agua para la Industria y Minería, se supondrá que se mantendrán similares a las actuales.

OPERACION DEL MODELO1. Introducción

Partiendo del análisis hecho en los capítulos precedentes, se ha llevado a cabo la simulación de los recursos hídricos del valle del río Copiapó frente a diferentes condiciones hidrológicas y distintos niveles de explotación.

Se ha adoptado la serie histórica registrada como la situación hidrológica a simular que, de acuerdo con lo presentado en el Tomo II al respecto de la generación estocástica de caudales, es una de las condiciones de sequía prolongada más extrema que se puede dar. El período simulado ha sido 50 años, por lo cual ha sido necesario extender la estadística de la suma de Manflas Jorquera y Pulido en 5 años. Esto se ha hecho basado en correlaciones con las precipitaciones registradas en Los Loros, presentándose los resultados obtenidos en las estadísticas del Tomo Anexo N° 1.

En cuanto a las condiciones de explotación simuladas, inicialmente se impuso cultivar la mayor superficie posible que, de acuerdo a las cifras presentadas en el capítulo anterior, podría llegar a las 17.841 há en todo el valle. La primera simulación, sin embargo, permitió saber que esta era una condición demasiado exigente, para los sectores ubicados aguas abajo de la ciudad de Copiapó. Se fué modificando entonces las superficies a cultivar en esta zona, hasta conseguir demandas de riego factibles de ser abastecidas. Estas superficies se presentan a continuación en el Cuadro 8-1 y se comparan con las actualmente cultivadas, según las cifras recogidas en los Estudios Básicos, Capítulo Demandas de Agua, que forman parte del Tomo II de este proyecto.

CUADRO N° 8-1

SUPERFICIES POTENCIALMENTE CULTIVABLES

EN EL VALLE DEL RIO COPIAPO

SECTOR	USO ACTUAL (Há)	USO POTENCIAL, (Há)	AUMENTO (Há)
1	522	750	228
2	1626	2134	508
3	2018	2887	869
4	1731	2311	580
5	1425	2923	1498
6	608	2112	1504
TOTAL	7930	13117	5187

Aquí se descubre una superficie potencial total de 13.117 Há, cifra superior a las 11.159 Há planteadas en el capítulo Demandas de Agua del Tomo II e inferior a las 17.841 Há. establecidas como el tope máximo cultivable en el valle. Como criterio para decidir sobre las superficies presentadas en el cuadro anterior, se ha supuesto lo siguiente:

- Aguas arriba de la ciudad de Copiapó se llegará a cultivar la totalidad de las tierras disponibles, incluyendo las áreas con limitaciones moderadas a severas. Esto significa un aumento de 2.185 Há. respecto de la situación actual para este sector.

- 237 -

- Entre Copiapó y Piedra Colgada se cultivará hasta 1.500 Há. sobre la superficie actual, que llega a 1.425 Há. Con este aumento se estaría explotando un 54% del área total cultivable de este sector.
- Entre Piedra Colgada y Angostura se cultivará hasta 1.500 Há. Con este aumento se llegaría a explotar un 52% de la superficie total cultivable en este sector.

Como se ha dicho antes, aguas abajo de Copiapó ha debido restringirse las nuevas superficies de cultivos por limitaciones del recurso agua. Las superficies futuras de cultivo adoptadas son las que han permitido que en el embalse subterráneo no se produzcan fluctuaciones superiores a 30 metros.

Estas cifras significan un aumento global de la superficie cultivada del 65% respecto de la situación actual, aumento que concentra más de la mitad de las nuevas hectáreas en la zona ubicada aguas abajo de Copiapó.

Respecto del tipo de cultivos, se ha supuesto que el valle entero se dedicará a la uva de exportación regada por goteo, salvo 500 Há. de frutales que se ha considerado para el Sector 6 (Piedra Colgada-Angostura). Así no sólo se espera para el futuro un aumento del área agrícola explotada, sino también que se sustituya casi por completo los cultivos tradicionales por uva.

Respecto de las otras demandas de recursos hídricos, agua potable e industrial, se ha supuesto que las industrias y minería mantendrán consumos similares a los actuales, mientras que el consumo de agua potable crecerá con la población de acuerdo a las proyecciones establecidas en el presente estudio.

8.2 Norma de Uso de los Recursos Hídricos

Actualmente el riego del valle se rige bajo una norma en el empleo del agua superficial, que es la distribución de aguas establecidas por los derechos de aprovechamiento que tienen los distintos usuarios. El agua subterránea, por su parte, no tiene más restricción que el caudal máximo otorgado a cada pozo en el derecho de aprovechamiento.

Para llevar a cabo la simulación se requiere fijar una norma racional del uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas. Como criterio general se ha supuesto que las aguas subterráneas se emplearán sólo para suplir el déficit de recursos superficiales, distribuidas de acuerdo con los derechos actualmente existentes. De esta manera los pozos funcionarán sólo cuando las aguas derivadas de los ríos sean insuficientes para cubrir la demanda de los cultivos sumadas también las ineficiencias del sistema de riego.

En cuanto al Embalse Lautaro, se ha diseñado la siguiente norma de operación:

- Cuando haya déficit de aguas superficiales, se cubrirá el volumen requerido hasta completar la demanda con los recursos almacenados en el embalse. Se bombeará desde el acuífero cuando el volumen de agua en el Embalse Lautaro no alcance para cubrir la totalidad de la demanda. Esto no se aplica a los sectores ubicados aguas abajo de la ciudad de Copiapó, que sólo tienen derechos eventuales sobre las aguas del río. Como consecuencia, el déficit que se genere aguas abajo de Copiapó no será abastecido por el Embalse Lautaro.
- En caso de haber abundancia de recursos superficiales, el embalse acumulará los excedentes hasta un volumen máximo de 40 millones de metros cúbicos, correspondiente a la capacidad del embalse. Los excedentes, a su vez, se canalizan como el volumen de agua superficial que pasa por el río Copiapó a la altura de la ciudad de Copiapó. Se excluye por lo tanto las recuperaciones que aparecen frente a la ciudad, que son parte de los recursos que emplean para regar los sectores de Bodega, Chamonate y Toledo.

3.3 Descripción del Proceso de Simulación Efectuado

Como ya se ha dicho antes, el modelo desarrollado es un conjunto compuesto por un Modelo Superficial que abarca el valle entero y 8 Modelos Hidrogeológicos, cada uno cubriendo parte del embalse subterráneo del valle del río Copiapó.

Estos modelos se han calibrado de manera de representar adecuadamente la realidad, haciendo también concordantes, dentro de los límites de precisión de la información disponible, los volúmenes intercambiados entre modelos hidrogeológicos vecinos y de cada uno de ellos con el modelo superficial.

Corresponde luego llevar a cabo el proceso de simulación, para lo cual debe operarse el modelo de una manera apropiada. A continuación se describe cómo debe realizarse esta operación.

La operación del modelo parte por preparar los datos de entrada del modelo superficial, imponiendo las nuevas superficies de cultivos para cada sector, los caudales de entrada al sector de más aguas arriba, los factores de infiltración del río y los volúmenes de recuperaciones del mismo. Los factores de infiltración se han determinado de las curvas definidas en el proceso de ajuste, teniendo especial cuidado en los años húmedos que es cuando estos factores varían. Por su parte las recuperaciones inicialmente se han estimado basándose en los resultados del ajuste, para luego adoptar los valores obtenidos de la operación de los modelos hidrogeológicos.

Primeramente se opera el modelo superficial, de donde se obtiene como datos para los modelos subterráneos la infiltración del río, de los canales matrices y secundarios, la infiltración de riego predial, la del embalse Lautaro y los volúmenes de bombeo de aguas subterráneas requeridos. Con estos antecedentes se preparan los datos de entrada de cada modelo subterráneo y luego se hacen funcionar partiendo por el primero de aguas arriba. Como resultado se obtiene nuevos valores

- 240 -

de las recuperaciones del acuífero al río, mediante las cuales se opera nuevamente el modelo superficial. De aquí se desprende que la simulación es un proceso iterativo de operación de los modelos superficial y subterráneos, donde los resultados del primero son datos de entrada para los segundos y viceversa. Afortunadamente la convergencia es rápida y con dos pasadas de cada modelo, para cada sector hidrogeológico, las cifras ya son coincidentes.

Con respecto a los datos de entrada de los modelos subterráneos, las mallas añadidas por las fuentes de recarga y descarga son las mismas que se tenía en el proceso de ajuste, salvo el caso de las infiltraciones de riego predial y los bombes de riego. En el primer caso se ha considerado la sustitución de cultivos tradicionales por parronales y la incorporación al riego de zonas no cultivadas, empleando, para ubicar las áreas afectadas, los planos de Uso Actual y Uso Potencial del Suelo incorporados al Tomo Demandas de Agua del presente proyecto. Respecto de los bombes de riego, se ha supuesto una explotación más o menos uniforme de cada embalse subterráneo, de modo de no tener sectores especialmente afectados. Esto coincide por lo demás con la realidad del regadío, que es más económico cuando las instalaciones están cerca de los cultivos.

8.4 Estimación de las Cotas Piezométricas en los Bordos Permeables de cada Modelo Hidrogeológico

Hay un aspecto no considerado en la descripción hecha en el punto anterior, que se refiere a las cotas piezométricas de los bordes permeables que delimitan los modelos hidrogeológicos vecinos. Este problema debe ser abordado con mucho cuidado, ya que los volúmenes subterráneos que circulan por el valle son importantes frente a los demás elementos del Balance Másico, y una sobre o subestimación de ellos puede llevar a conclusiones erradas.

- 241 -

Las condiciones hidrológicas del período de simulación se han elegido coincidentes con las que han ocurrido históricamente en el período 1937/38 - 1986/87. En la Figura 8-1 se presenta gráficamente los caudales de ese período donde, cabe señalar, los registros parten sólo en 1942. Esto ha hecho necesario estimar lo ocurrido en años previos mediante correlaciones con las precipitaciones registradas en Los Loros.

Por otra parte se ha realizado un análisis de la relación que podría existir entre los caudales que escurren superficialmente y los niveles de la napa subterránea. Luego de estudiar diversas posibilidades se ha determinado que existe una fuerte ligazón entre los caudales superficiales controlados en los ríos Manflas, Jorquera y Pulido y los niveles de la napa. En particular, la forma como varían los volúmenes anuales acumulados de los tres ríos señalados menos el volumen generado por $2,1 \text{ (m}^3/\text{s)}$ de escurrimiento constante es muy similar a cómo fluctúan los niveles subterráneos. Lo anterior indicaría que históricamente el funcionamiento del embalse subterráneo habría estado directamente influenciado por las condiciones de la hidrología superficial, considerando especialmente que, hasta ahora, los bombeos de aguas subterráneas no han sido realmente importantes frente a las magnitudes de las demás fuentes de recarga y descarga del embalse subterráneo.

Mediante los resultados obtenidos del análisis recién señalado, se ha tenido un punto de partida para la estimación de los niveles subterráneos en los bordes permeables. Se ha extrapolado los niveles controlados en el valle a los períodos en que no se han medido, mediante la relación gráfica que se ha podido establecer entre los niveles subterráneos y los volúmenes acumulados excediendo un caudal de $2,1 \text{ (m}^3/\text{s)}$.

Para ilustrar la relación del volumen superficial de entrada al sistema y los niveles subterráneos, se presenta a continuación la Figura 8-2 que muestra las variaciones en el tiempo de ambos fenómenos.

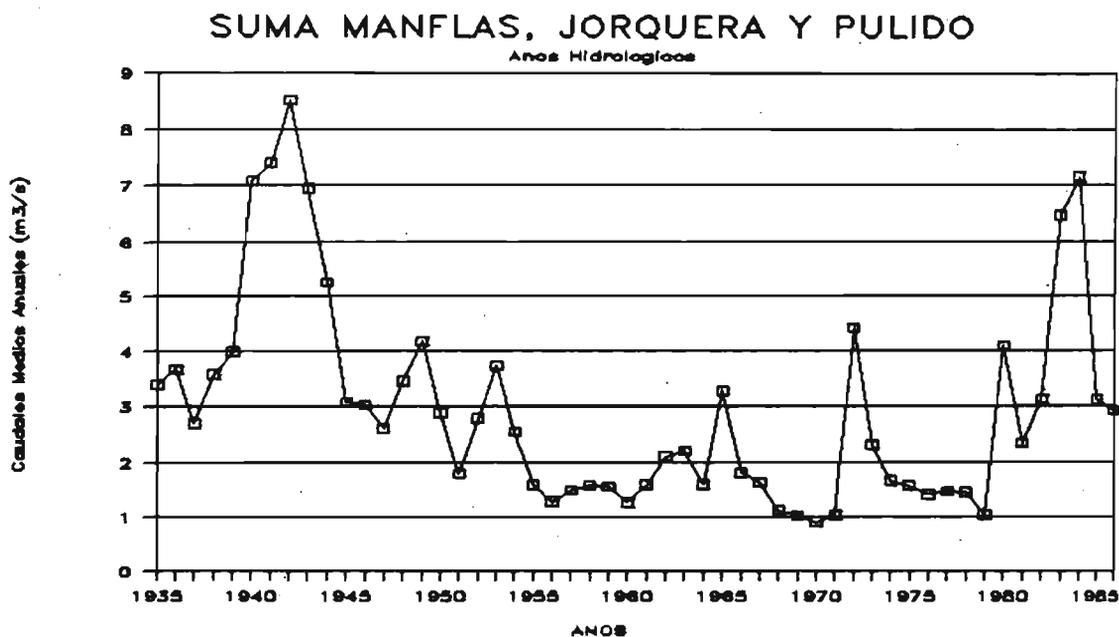
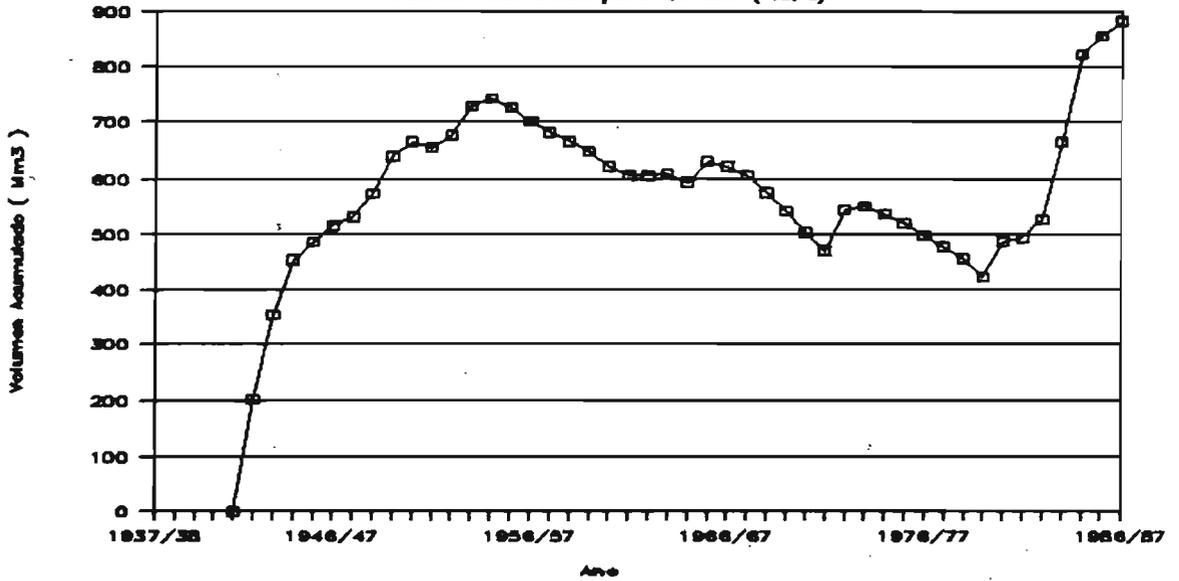


FIGURA 8 - 1

- 243 -

SUMA RIOS MANFLAS, JORQUERA Y PULIDO

Volumen Acumulado para $Q > 2.1$ (m³/s)



VARIACION NIVELES SUBTERRANEOS

Seccion Palpa

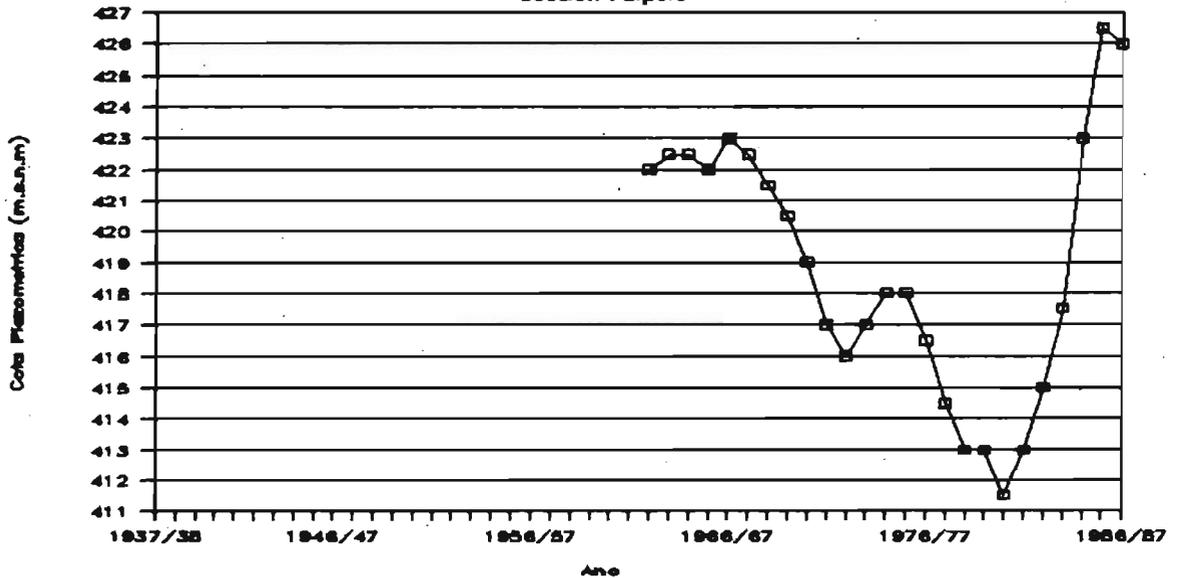


FIGURA 8-2

- 244 -

Esto, sin embargo, no es más que un punto inicial, ya que las intensas condiciones de explotación del acuífero que supone la simulación, modificarán sin duda el funcionamiento del embalse subterráneo. Entonces ha debido procederse por aproximaciones sucesivas entre modelos hidrogeológicos vecinos, variando poco a poco las cotas piezométricas del borde permeable común hasta conseguir una razonable similitud entre los volúmenes subterráneos que salen de uno y las que entran al siguiente. En esta similitud se ha considerado además el grado de precisión logrado en el ajuste de los modelos, que no siempre permitió que estas cifras fueran exactamente iguales.

En síntesis, la estimación de las cotas piezométricas de los bordes permeables es de gran importancia y ha significado un conjunto de pasadas de modelos hidrogeológicos vecinos hasta lograr, mediante aproximaciones sucesivas, una buena concordancia entre lo que sale subterráneamente de un sector y lo que entra al que sigue aguas abajo.

Finalmente, como consecuencia de la simulación se ha obtenido que en el futuro las variaciones de los niveles subterráneos no se relacionarán como hasta ahora con los recursos superficiales en la cabecera del valle, debido a la explotación adicional que se ha supuesto a los recursos del acuífero. Esta situación se ha acentuado, como era de esperar, en los sectores bajos del valle, siendo más importante de Malpaso hacia arriba.

8.5 Resultados Obtenidos

Los resultados obtenidos se resumen en los Balances Hídricos de las Figuras 8-3 a 8-8 y el Plano que se adjunta, donde se presenta por sector un esquema con los volúmenes que entran y salen al sistema superficial y el embalse subterráneo.

8.5.1 Balance Másico

Apoiados en estos esquemas se puede señalar lo siguiente:

- En los primeros dos sectores, es decir, el área que va desde los afluentes Manflas, Jorquera y Pulido hasta La Puerta, no se ven mayormente afectados por las nuevas explotaciones. Sólo las recuperaciones del río antes de La Puerta disminuirán en casi 144 Mm^3 en los últimos 25 años, valor cercano al 14% del total. Estas cifras son respecto de las obtenidas en el proceso de ajuste del modelo, hecho para el período de 25 años 1962/63 - 1986/87.
- En el tramo La Puerta - Malpaso las recuperaciones en Malpaso bajarían al 65% de las que se tiene sin las nuevas explotaciones, mientras que las salidas subterráneas se mantendrían casi inalterables. En este caso las recuperaciones bajarían de 150 Mm^3 a 98 Mm^3 , para un período de 25 años.

Aguas abajo de Malpaso comienza a notarse fuertemente la influencia del mayor bombeo.

- En el tramo Malpaso - Copiapó las recuperaciones observadas en los últimos 25 años alcanzaron una cifra aproximada de 275 Mm^3 . Para un período hidrológico de idénticas características pero frente a las nuevas condiciones de explotación, las recuperaciones bajarían a sólo 10 Mm^3 . Esto significa que el regadío con aguas superficiales abajo de Copiapó prácticamente desaparecería en los años secos, de no ser por la descarga de aguas servidas que se hace en el sector de Bodega. La forma de enfrentar este problema es un asunto ajeno a este proyecto y depende de las políticas de manejo del agua que pretenda implantarse. Una manera podría ser reponer las aguas mediante el bombeo de pozos ubicados en los sectores actualmente regados con estos recursos.

- 246 -

Siguiendo con el análisis, los volúmenes subterráneos que pasan aguas abajo de Copiapó no debieran variar mayormente de acuerdo a los resultados obtenidos.

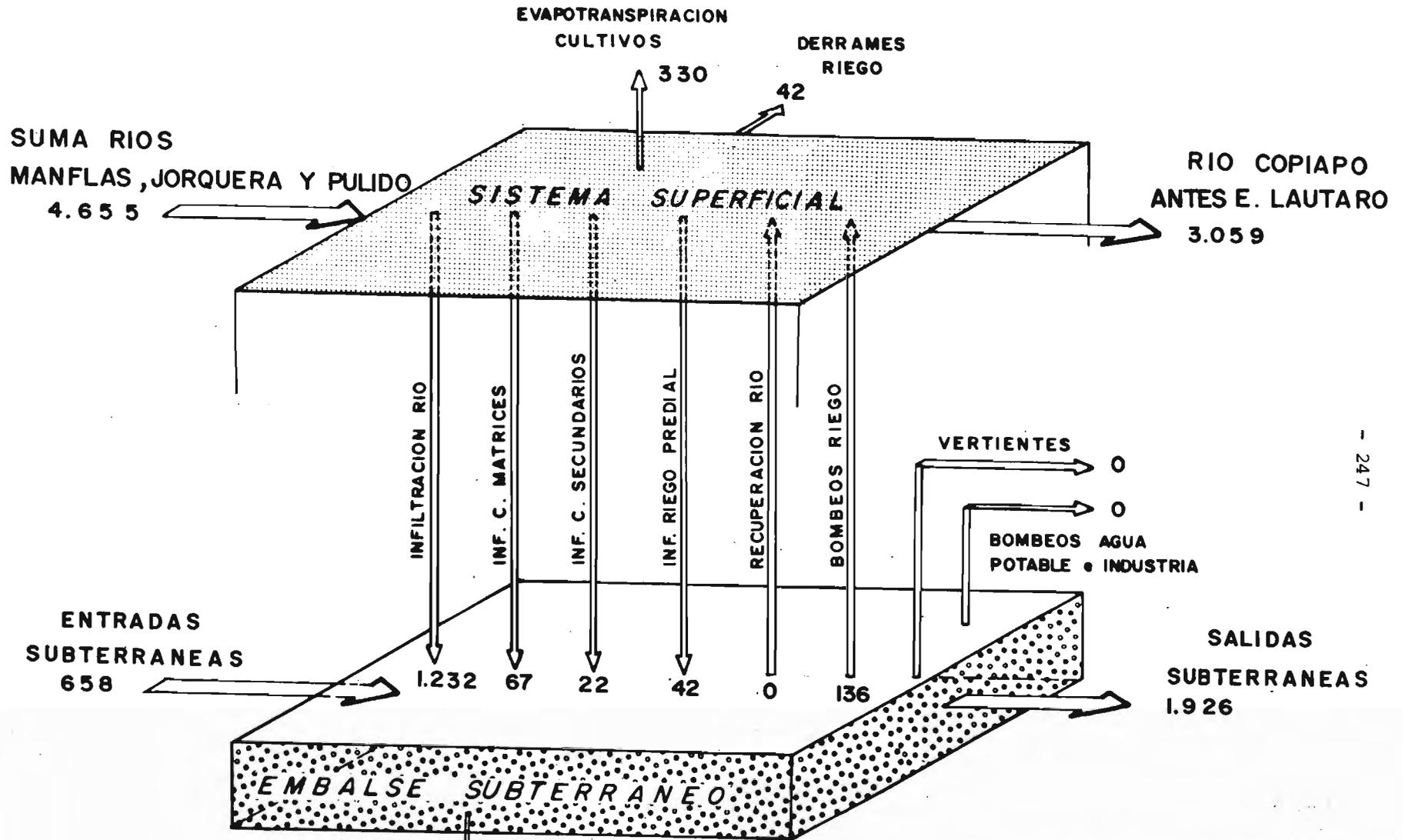
- En el sector Copiapó-Piedra Colgada, las recuperaciones del río para los últimos 25 años simulados llegarían a $3,1 \text{ Mm}^3$, cifra que debe compararse con los 141 Mm^3 medidos en el período 1962/1986. La situación es aquí similar a la ya analizada para el tramo anterior, afectándose en este caso el riego mediante aguas superficiales del área ubicada aguas abajo de Piedra Colgada.

También en este caso, producto del bombeo del sector Piedra Colgada-Angostura, se tendría mayores salidas subterráneas, aumentando de 371 Mm^3 a 448 Mm^3 para un período de 25 años, lo que significa un 21%.

- En el sector Piedra Colgada Angostura las recuperaciones para los últimos 25 años simulados bajarían de 80 a 60 Mm^3 , es decir un 25%. En este caso la situación no es de importancia porque estas aguas ya no se aprovechan y su destino es que lleguen al mar.

En cuanto a los cambios de almacenamiento para el período completo, sólo los sectores ubicados aguas abajo de Copiapó presentan cambios de importancia. Así se tiene en Copiapó - Piedra Colgada un desembalse de 172 Mm^3 y en Piedra Colgada-Angostura de 50 Mm^3 .

SECTOR: RIOS MANFLAS, JORQUERA Y PULIDO



$\Delta s = -10$
 TOTAL ENTRADAS SUBT. = 2.021
 TOTAL SALIDAS SUBT. = 2.062
 DESBALANCE = 5

VALORES EN MILLONES DE M³
 PARA UN PERIODO SIMULADO
 DE 50 AÑOS.

FIGURA 8-3

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRANEO

SECTOR: EMBALSE LAUTARO - LA PUERTA

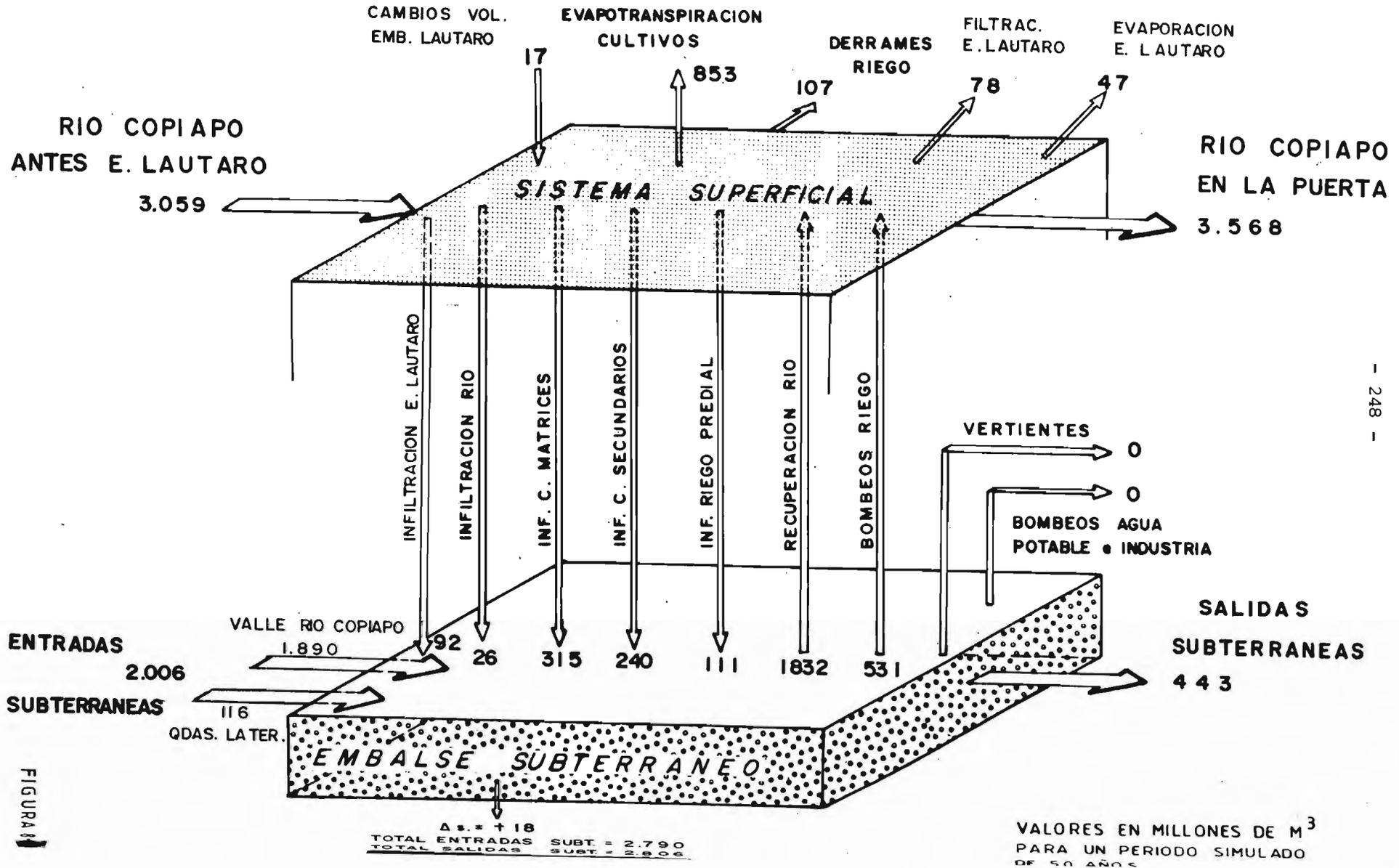


FIGURA 11

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRANEO

SECTOR: LA PUERTA - MAL PASO

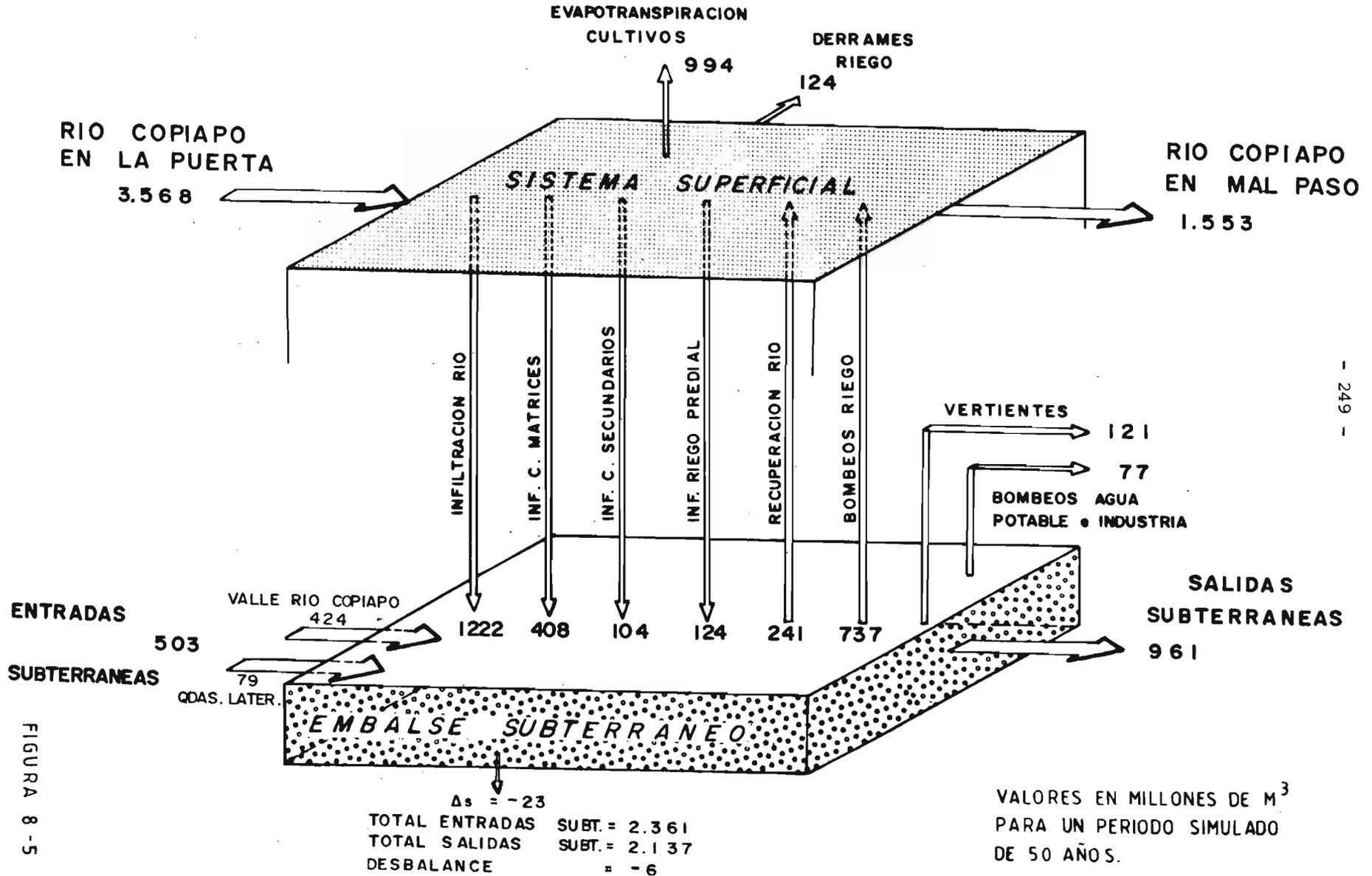


FIGURA 8-5

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRANEO

SECTOR: MAL PASO - COPIAPO

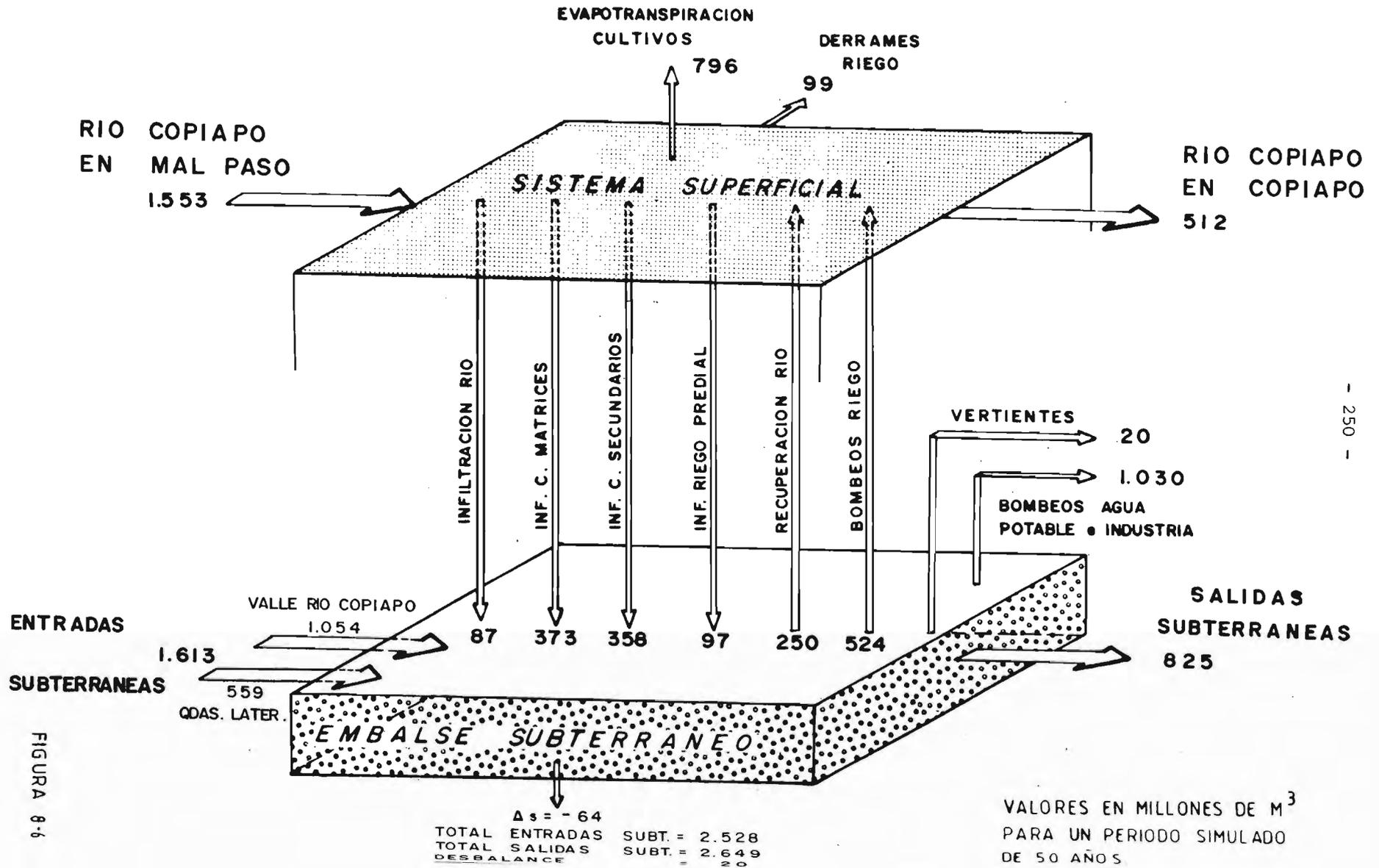


FIGURA 8-6

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRANEO

SECTOR: COPIAPO - PIEDRA COLGADA

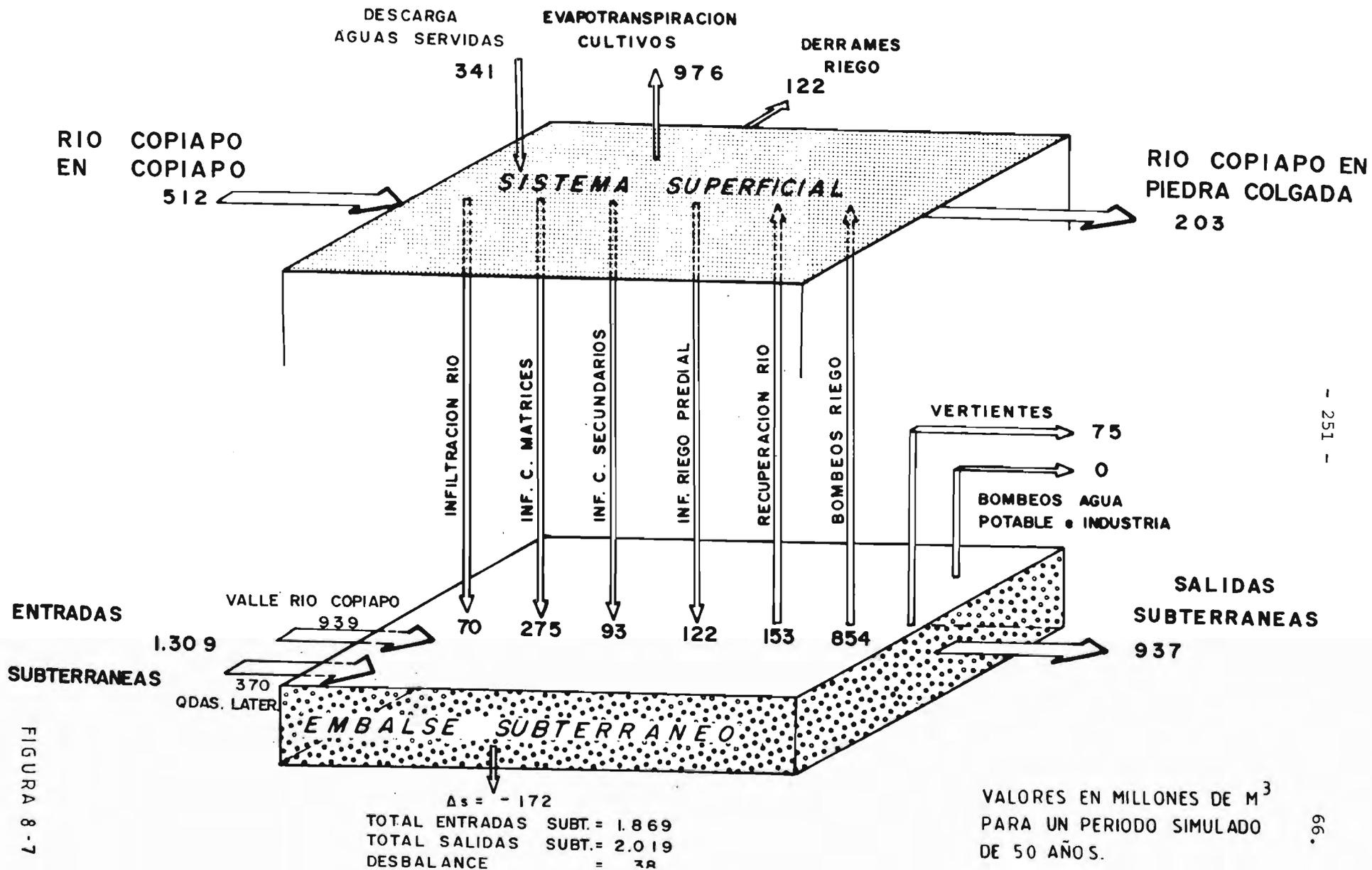


FIGURA 8-7

BALANCE HIDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRANEO

SECTOR: PIEDRA COLGADA - ANGOSTURA

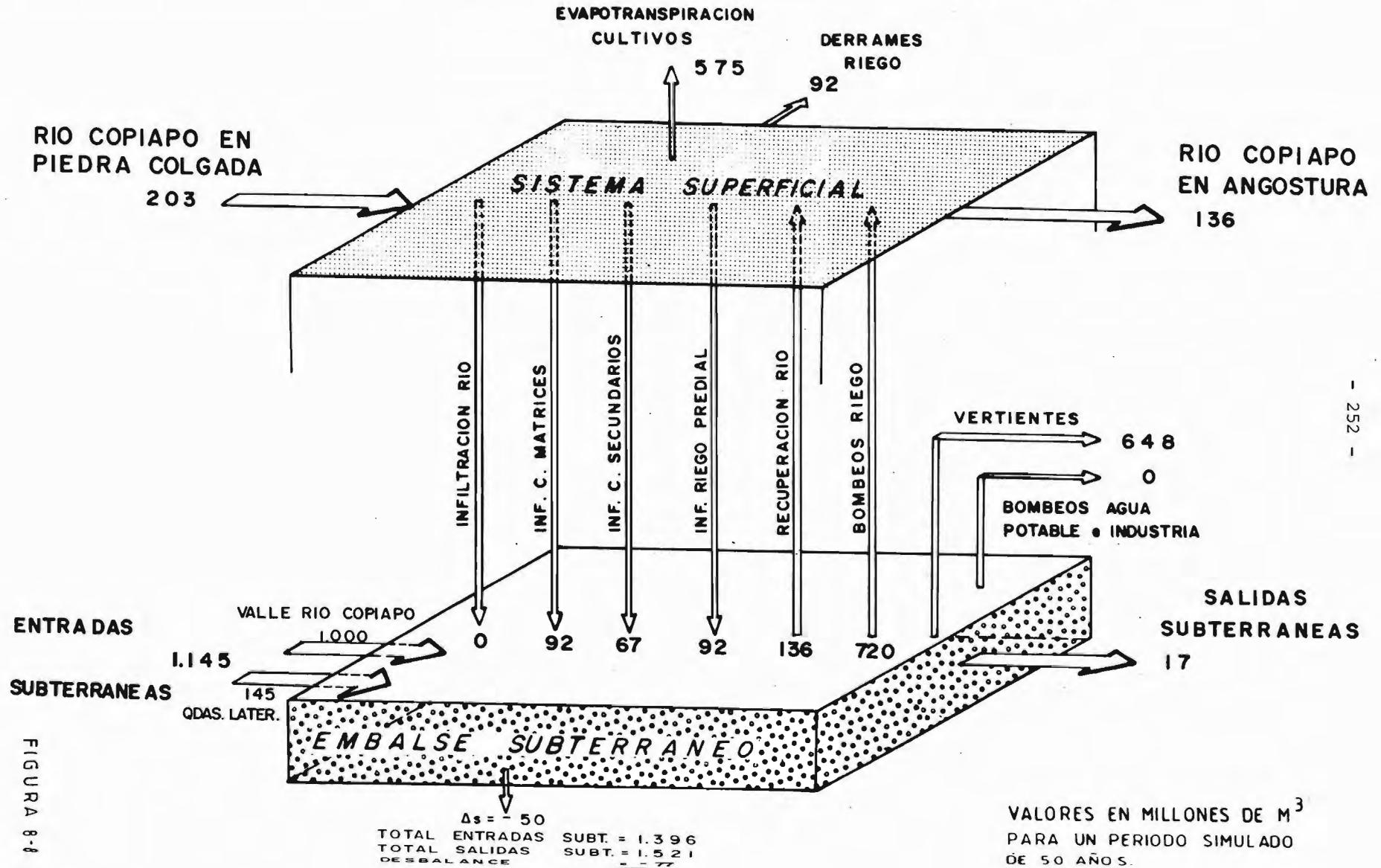


FIGURA 8-4

3.5.2 Fluctuación de Niveles

Siguiendo un comportamiento similar al descrito en el punto anterior, las fluctuaciones de niveles mantienen su tendencia histórica en las partes alta y media del valle. Sólo aguas abajo de Paipote comienza a tenerse casos donde las fluctuaciones son superiores a las vistas hasta ahora. Por sectores, las fluctuaciones que cabe esperar entre los niveles máximos y mínimos son las siguientes.

a) Sector ríos Manflas, Jorquera y Pulido

En este caso hay situaciones bien diferentes. En la cabecera de los ríos las fluctuaciones se acercan a los 40 metros, en cambio, en la confluencia de los ríos y de allí hasta el embalse Lautaro las cifras bajan a 15 metros aproximadamente. En este sector el control piezométrico data sólo de fines de 1985, por lo que no se conoce la fluctuación histórica.

b) Sector Embalse Lautaro - La Puerta

En este tramo casi no cambian los niveles subterráneos. Las mayores variaciones se presentan en las cercanías del Embalse Lautaro con 9 metros entre los niveles máximo y mínimo. Las fluctuaciones históricas máximas son también de 9 metros, en el sector donde llega al valle la Quebrada Calquis.

c) Sector La Puerta - Malpaso

En este caso hay tramos bien diferenciados. El primero es La Puerta - Potrero Seco, donde las fluctuaciones de niveles oscilan entre los 25 y 35 metros. El otro es Potrero Seco - Malpaso que parte con fuertes variaciones cerca de Potrero Seco, las que van disminuyendo gradualmente hasta llegar a 10 metros en el área de la Qda. Cerrillos y 5 metros en Malpaso. Estos valores son muy similares a los observados históricamente, que muestran fluctuaciones entre 30 y 35 metros en el sector Hornitos - Potrero Seco y 10 metros en el sector Nantoco-Malpaso.

- 254 -

d) Sector Malpaso - Copiapó

Luego de Malpaso, donde la fluctuación es mínima, se tiene el tramo Malpaso - Paipote varía casi parejo en 20 metros. Esta situación se mantiene en el área de San Fernando, para luego, en las cercanías de la ciudad de Copiapó, bajar levemente las fluctuaciones a 18 metros.

En resumen, los niveles varían en todo el sector aproximadamente 20 metros. Las fluctuaciones históricas del sector se sitúan normalmente entre 10 y 17 metros, salvo en Malpaso donde se tiene 7 metros y Copiapó con 5 metros.

e) Sector Copiapó - Piedra Colgada

En el sector se desarrollan fluctuaciones importantes, siendo las mayores de 30 metros, en el área de Bodega, y las menores de 20 metros, en la zona de Piedra Colgada. Entre ambas localidades las variaciones de nivel se ubican entre 20 y 30 metros. Las máximas fluctuaciones históricas se han dado en el sector de Bodega con 13 metros, mientras que en Piedra Colgada se han producido las menores con 2,5 metros.

f) Sector Piedra Colgada - Angostura

Las mayores fluctuaciones se encuentran aguas abajo de Piedra Colgada alcanzando los 27 metros. Luego, en la medida que se avanza hacia Angostura, estas variaciones van disminuyendo, hasta hacerse casi inapreciables en las cercanías de Monte Amargo.

Históricamente las mayores fluctuaciones del área, cercanas a los 6 metros, se han producido en el sector de San Pedro, unos 5 Km. aguas abajo de Piedra Colgada.

3.5.3 Depresiones Residuales.

Se ha denominado depresiones residuales a la diferencia generada entre los niveles del último y el primer año simulado. Su valor refleja los descensos permanentes que generaría en el acuífero una explotación y unas condiciones hidrológicas como las simuladas.

La simulación efectuada ha entregado como resultado que no existirían depresiones residuales apreciables desde los afluentes Manflas, Jorquera y Pulido hasta Pai-pote.

Aguas abajo de esta zona se tiene el siguiente panorama:

- En el sector San Fernando y la ciudad de Copiapó las depresiones residuales bordean los 6 metros.
- En el sector Copiapó - Piedra Colgada las depresiones residuales son de 12 metros en las áreas de Toledo, Bodega y Chamonate, para subir a casi 18 metros en la zona de Piedra Colgada.
- En el sector Piedra Colgada - Angostura se presentan depresiones residuales de hasta 25 metros, las mayores concentradas entre Piedra Colgada y Monte Amargo.

La consecuencia de estas depresiones residuales es un desembalse subterráneo neto si se dieran las condiciones hidrológicas y de explotación supuestas. Es de gran importancia destacar este último aspecto, ya que frente a otra hidrología superficial, probablemente más favorable, los descensos permanentes serían bastante menores.

Ahora bien, suponiendo que efectivamente se dan las depresiones señaladas, tampoco son cifras demasiado elevadas para el manejo de un acuífero a lo largo de 50 años.

8.6 CONCLUSIONES

Mediante el Modelo de Recursos Hídricos desarrollado, se ha llevado a cabo la simulación del sistema hídrico del valle del río Copiapó.

Se ha simulado a lo largo de un período de 50 años, que se extendería a partir de 1986/87.

Las condiciones hidrológicas consideradas son las históricas observadas entre el 1937/38 y 1986/87, período durante el cual se produjo una sequía de más de 25 años de duración. De acuerdo a la generación estocástica de caudales que se ha hecho, esta es una de las condiciones menos probable de ocurrir y, por lo tanto, debería mostrar la reacción del sistema frente a una condición extremadamente seca.

En cuanto al uso del suelo, se ha considerado la sustitución de todos los cultivos tradicionales por uva de exportación. Adicionalmente se ha impuesto la incorporación al cultivo de nuevas áreas, llegando a un aumento de 2000 há a aguas arriba de Copiapó y de 3000 há de Copiapó hacia la costa, ambos respecto de la explotación actual.

La simulación se efectuó mediante la operación iterativa del modelo superficial y los 8 modelos hidrogeológicos que componen el Modelo de Recursos Hídricos. De esta manera se consiguió que los datos y resultados de los diferentes modelos fueran compatibles.

Los resultados obtenidos se resumen como sigue:

- 257 -

- Frente a la situación actual, el Balance Másico sufre alteraciones importantes sólo aguas abajo de Malpaso, fundamentalmente respecto de las recuperaciones al río durante los años secos, que prácticamente desaparecen frente a la ciudad de Copiapó y en Piedra Colgada.

Esto no debe extrañar ya que el bombeo adicional que permite regar, con seguridad 100%, las explotaciones simuladas, obtiene sus recursos del almacenamiento del acuífero lo que hace descender los niveles de la napa y, por lo tanto, las recuperaciones al río. Debe tenerse en cuenta sin embargo, que con ello es posible aumentar en 2000 há la superficie regada aguas arriba de Copiapó y en 1500 há la superficie de riego entre Copiapó y Piedra Colgada.

- En cuanto a las fluctuaciones máximas de niveles, es decir la diferencia entre el nivel máximo y el mínimo observados en el período de simulación, los valores obtenidos son bastante similares a los registrados históricamente. Sólo aguas abajo de Paipote comienza a producirse fluctuaciones mayores, a lo que se une un descenso permanente de niveles que no ocurre en el resto del valle. Estas fluctuaciones y los descensos señalados no superan, sin embargo, los 30 metros, cifra que no es en absoluto extraordinaria, especialmente considerando que aguas arriba de Paipote hay sectores del valle donde se ha dado fluctuaciones históricas de incluso 40 metros.

En síntesis, como era razonable esperar, el acuífero nota la explotación adicional, pero su reacción no es digna de alarma, más aún si se recuerda que las condiciones hidrológicas simuladas tienen una baja probabilidad de ocurrencia, según el análisis hecho con la generación de series estocásticas.

Por otra parte la reacción del acuífero es gradual, lo que permite planificar con varios años de anticipación cualquier racionamiento si se visualizara una condición crítica del embalse subterráneo. En todo caso actualmente el acuífero está "lleno" y permite explotarlo intensamente durante un largo período sin que haya peligro alguno.

- 258 -

Es necesario en este punto hacer un alcance de cómo funciona el embalse subterráneo.

La investigación realizada permite asegurar que históricamente el comportamiento del embalse subterráneo del valle del río Copiapó ha estado íntimamente ligado a la hidrología superficial y, en especial, a los caudales que entran al sistema a través de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. En el pasado, cuando se han producido períodos de sequía, los niveles subterráneos han respondido con descensos, sin que existiera explotación del acuífero en ese entonces. Los descensos han alcanzado hasta 30 y 40 metros en algunos sectores ubicados aguas abajo de La Puerta, sitios donde hoy los niveles han vuelto a los máximos valores registrados. Entonces parte importante de los descensos que puedan registrarse a futuro estarán motivados por la situación hidrológica, aspecto que debe tenerse presente especialmente respecto de la profundidad mínima necesaria para los pozos que se construya.

8.6.1 Proposiciones para la Red Piezométrica y de Calidad Química

Una vez realizado el estudio hidrogeológico del valle se ve claramente la necesidad de ampliar la red de mediciones piezométricas y de calidad química.

La red actual contempla mediciones en aproximadamente 40 pozos distribuidos a lo largo del valle. Esto no cumple con la densidad requerida en una red de este tipo y menos en un valle con características tan singulares como éste.

Es por lo anterior que se ha redefinido una red de mediciones, aumentando el número de pozos, con lo que se cubrirá cada uno de los puntos necesarios para conocer cabalmente el comportamiento hidrogeológico del valle.

En cada uno de los pozos escogidos se deberá medir el nivel estático mensualmente y la conductividad de sus aguas en forma semestral.

Con los datos recogidos en esta forma se tendrá los antecedentes suficientes para ajustar nuevamente los modelos y así obtener mejores resultados de ellos.

A continuación se entrega el listado de pozos propuestos para formar la red. Este se entrega separado por sectores, adjuntándose además los niveles estáticos máximos y mínimos y la longitud de los registros, si es que estos existen. En el caso de pozos que no tengan registros de niveles anteriores, se indica que es un pozo de relleno en la columna observaciones.

Los pozos se presentan identificados sólo a través de su clasificación según el formato de la D.G.A. La información completa de cada pozo y su ubicación se encuentran en el Catastro de Pozos hecho como parte del presente estudio.

RECURSOS HIDRAULICOS AGUAS SUBTERRANEAS REGADIO AGUA POTABLE E INDUSTRIAL
 - 260 -

RED PIEZOMETRICA PROPUESTA SECTOR 1 (11)

Ríos Manflas, Jorquera y Pulido

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Min.	Long.Reg.	Observaciones
2800 - 6950 C-4				Relleno
2800 - 6950 A-4	5.5	9.2	01/86-10/86	Relleno
2800 - 6950 A-3	14.2	21.5	01/84-10/86	
2800 - 6950 A-6				Relleno
2800 - 6950 C-2				Relleno
2800 - 6950 C-1				Relleno
2800 - 6950 A-5	50.6	54.3	04/86-10/86	
2800 - 6950 A-1	33.2	45.5	01/86-10/86	
2800 - 6950 A-8				Relleno
2800 - 6950 D-5				Relleno
2800 - 6950 D-3	10.4	11.7	03/86-10/86	
2800 - 6950 D-4				Relleno
2800 - 6950 D-2				Relleno
2800 - 6950 D-1	10.31	10.56	07/86-10/86	

RECURSOS HIDRAULICOS

AGUAS SUBTERRANEAS

REGADIO

AGUA POTABLE E INDUSTRIAL

- 261 -

RED PROPUESTA SECTOR 2 (14)Embalse Lautaro - La Puerta

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Min.	Long.Reg.	Observaciones
740 - 7000 C-4	0.13	0.68	10/80-10/86	
740 - 7000 C-3	9.35	10.2	09/74-08/80	
740 - 7000 C-10				Relleno
750 - 7000 A-2				Relleno
750 - 7000 B-7				Relleno
750 - 7000 B-6				Relleno
750 - 7000 B-1	4.8	6.85	04/71-10/86	
750 - 7000 B-5				Relleno
750 - 7000 B-10				Relleno
750 - 7000 B-4				Relleno
750 - 7000 B-2	8.8	15.8	04/70-10/86	
750 - 7000 B-11				Relleno
750 - 7000 D-2	12.8	22.7	06/71-10/86	
750 - 7000 D-4				Relleno
750 - 7000 D-13				Relleno
750 - 7000 D-3				Relleno
750 - 7000 D-6				Relleno
750 - 7000 D-9				Relleno
750 - 7000 D-11				Relleno
750 - 6950 C-1	0.1	14.1	04/81-10/86	
750 - 6950 C-4				Relleno
750 - 6950 C-3				Relleno

RECURSOS HIDRAULICOS

AGUAS SUBTERRANEAS

REGADIO

AGUA POTABLE E INDUSTRIAL

- 262 -

RED PROPUESTA SECTOR 3-A (8)La Puerta - Potrero Seco.

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Min.	Long.Reg.	Observaciones
2730 - 7010 D-7				Relleno
2740 - 7010 B-4	22.0	56.5	04/75-10/86	
2740 - 7010 B-10				Relleno
2740 - 7010 B-3	13.5	48.0	09/74-10/86	
2740 - 7010 B-2				Relleno
2740 - 7010 B-9				Relleno
2740 - 7010 B-7				Relleno
2740 - 7010 B-6				Relleno
2740 - 7010 D-1	34.0	68.0	09/74-10/86	
2740 - 7010 D-3				Relleno
2740 - 7000 C-2				Relleno

RECURSOS HIDRAULICOS

AGUAS SUBTERRANEAS

REGADIO

AGUA POTABLE E INDUSTRIAL

- 263 -

RED PROPUESTA SECTOR 3B (11)Potrero Seco - Malpaso

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Min.	Long.Reg.	Observaciones
2730 - 7010 A-2				Relleno
2730 - 7010 A-14				Relleno
2730 - 7010 A-1	3.5	13.6	08/66-06/86	
2730 - 7010 A-15				Relleno
2730 - 7010 A-8				Relleno
2730 - 7010 B-1	11.6	40.0	03/63-10/86	Red DGA
2730 - 7010 A-7				Relleno
2730 - 7010 D-15				Relleno
2730 - 7010 D-13				Relleno
2730 - 7010 D-6				Relleno
2730 - 7010 D-5				Relleno
2730 - 7010 D-10				Relleno
2730 - 7010 D-4				Relleno
2730 - 7010 D-1	19.5	48.8	11/78-10/86	
2730 - 7010 D-2				Relleno
2730 - 7010 D-8				Relleno

RECURSOS HIDRAULICOS

AGUAS SUBTERRANEAS

REGADIO

AGUA POTABLE E INDUSTRIAL

- 264 -

RED PROPUESTA SECTOR 4 A (12)Malpaso - Paipote

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Mín.	Long. Reg.	Observaciones
2720 - 7010 A- 9	18.3	23.6	01/61-01/71	
2720 - 7010 A-11	23.0	30.2	02/61-11/73	
2720 - 7010 A- 6	25.6	33.5	04/61-11/73	
2720 - 7010 A- 7	25.8	34.5	09/61-06/73	
2720 - 7010 A- 8	24.3	39.4	09/61-05/86	
2720 - 7010 A-10	25.5	32.9	04/62-09/74	
2720 - 7010 A-12	29.7	36.5	01/63-06/73	
2720 - 7010 A-17	26.2	42.1	10/66-04/86	
2720 - 7010 A-22				Relleno
2720 - 7010 A-26				Relleno
2720 - 7010 C-16	21.5	37.5	03/70-04/86	
2720 - 7010 C- 2	25.4	29.5	08/61-03/70	
2720 - 7010 C-12	18.0	21.0	10/70-03/75	
2720 - 7010 C-17	6.6	20.1	08/74-05/86	
2720 - 7010 C- 6	5.3	14.6	10/65-02/75	
2720 - 7010 C-11				Relleno
2720 - 7010 C- 9	7.0	22.3	10/66-05/86	
2720 - 7010 C-10	14.7	19.1	06/70-06/73	
2720 - 7010 C- 4				Relleno
2730 - 7010 A- 3	0.98	7.7	11/70-10/86	Red D.G.A.

- 265 -

RED PIEZOMETRICA PROPUESTASECTOR 4b (10)Paipote - Copiapó

COORDENADAS	N.E. Máx.	N.E. Mín.	Long. Reg.	Observaciones
2720 - 7020 B-13				Relleno
2720 - 7010 A-36				Relleno
2720 - 7020 B- 7	5.1	9.0	10/74-8/85	
2720 - 7010 A-24	8.8	10.3	01/80-02/82	
2720 - 7010 A-43				Relleno
2720 - 7010 A-32				Relleno
2720 - 7010 A-13	7.5	13.6	01/63-03/75	
2720 - 7010 A- 2	8.7	14.7	01/63-12/74	
2720 - 7010 A- 5	13.8	19.9	01/73-09/80	Red D.G.A.
2720 - 7010 A-14	5.0	6.1	02/63-10/68	
2720 - 7010 A-15	9.5	20.9	01/73-04/86	
2720 - 7010 A-30				Relleno
2720 - 7010 A-41				Relleno
2720 - 7010 A-47				Relleno
2720 - 7010 A-18				Relleno

- 266 -

RED PIEZOMETRICA PROPUESTA SECTOR 5 (12)Copiapó - Piedra Colgada

COORDENADA	N.E. Máx.	N.E. Mín.	Long. Reg.	Observaciones
27.10 - 7020 C-20				Piezómetro A y P (12)
2710 - 7020 C-16	0.98	6.86	05/82-10/86	
2710 - 7020 C-19				Piezómetro A y P (13)
2710 - 7020 C- 7	4.0	7.8	07/66-08/80	
2710 - 7020 C- 1	3.1	8.57	10/80-10/86	Red D.G.A.
2710 - 7020 C-18				Piezómetro A y P (14)
2710 - 7020 C- 2	4.0	8.6	08/62-01/77	
2710 - 7020 C- 6	6.2	9.9	07/66-08/74	
2710 - 7020 C- 8	5.5	14.9	10/66-10/86	
2710 - 7020 C-10	4.8	17.0	08/74-10/86	
2710 - 7020 C-12				Relleno
2710 - 7020 D- 1	13.4	16.2	02/61-06/65	
2710 - 7020 D- 2	13.3	15.3	06/70-07/74	
2710 - 7020 D- 3	14.7	19.8	07/64-02/66	
2710 - 7020 D- 8	10.5	22.9	07/74-10/86	
2710 - 7020 D- 7	24.0	25.3	01/79-09/80	
2710 - 7020 D-18				Relleno
2710 - 7020 D- 4	20.9	34.1	10/66-10/86	
2720 - 7020 B-23				Relleno
2720 - 7020 B- 6	30.1	34.0	08/74-06/83	
2720 - 7020 B- 8	26.8	37.9	09/74-06/85	
2720 - 7020 B- 2	26.8	29.1	10/70-01/75	
2720 - 7020 B- 4	22.6	24.0	01/86-09/86	Red D.G.A.

- 267 -

RED PIEZOMETRICA PROPUESTASECTOR 6 (16)Piedra Colgada - Angostura

COORDENADAS	N.E. Máx.	N.E. Mín.	Long. Reg.	Observaciones
2720 - 7040 A- 2	0.15	3.13	07/64-03/75	Pozo Red D.G.A.
2720 - 7040 A- 5				Piezómetro A y P (1)
2720 - 7040 A- 3				Piezómetro A y P (3)
2720 - 7040 A- 4				Piezómetro A y P (4)
2720 - 7040 B- 7				Piezómetro A y P (2)
2720 - 7040 B- 6				Piezómetro A y P (5)
2720 - 7040 B- 5				Piezómetro A y P (6)
2720 - 7030 A- 8				Piezómetro A y P (8)
2720 - 7030 A- 7				Piezómetro A y P (7)
2720 - 7030 A- 1	2.69	5.09	11/66-10/86	Red D.G.A.
2720 - 7030 A- 6				Piezómetro A y P (9)
2720 - 7030 A- 5				Piezómetro A y P (10)
2710 - 7030 D- 5	3.9	5.6	06/65-06/73	
2710 - 7030 D- 7	3.1	9.7	01/67-10/86	
2710 - 7030 D-17				Piezómetro A y P (11)
2710 - 7030 D- 8	2.28	7.99	11/66-10/86	Red D.G.A.
2710 - 7030 D- 3	2.7	4.1	02/61-02/70	
2710 - 7030 D- 4	5.2	6.6	01/63-04/72	