

NOV 1988

REPUBLICA DE CHILE
INTENDENCIA REGIONAL DE ATACAMA

EL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL PROYECTO
DE DESARROLLO AGRICOLA MEDIANTE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA
EN LA REGION DE ATACAMA

ANEXOS

NOVIEMBRE 1988

AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON

AFT
88-54-3/3

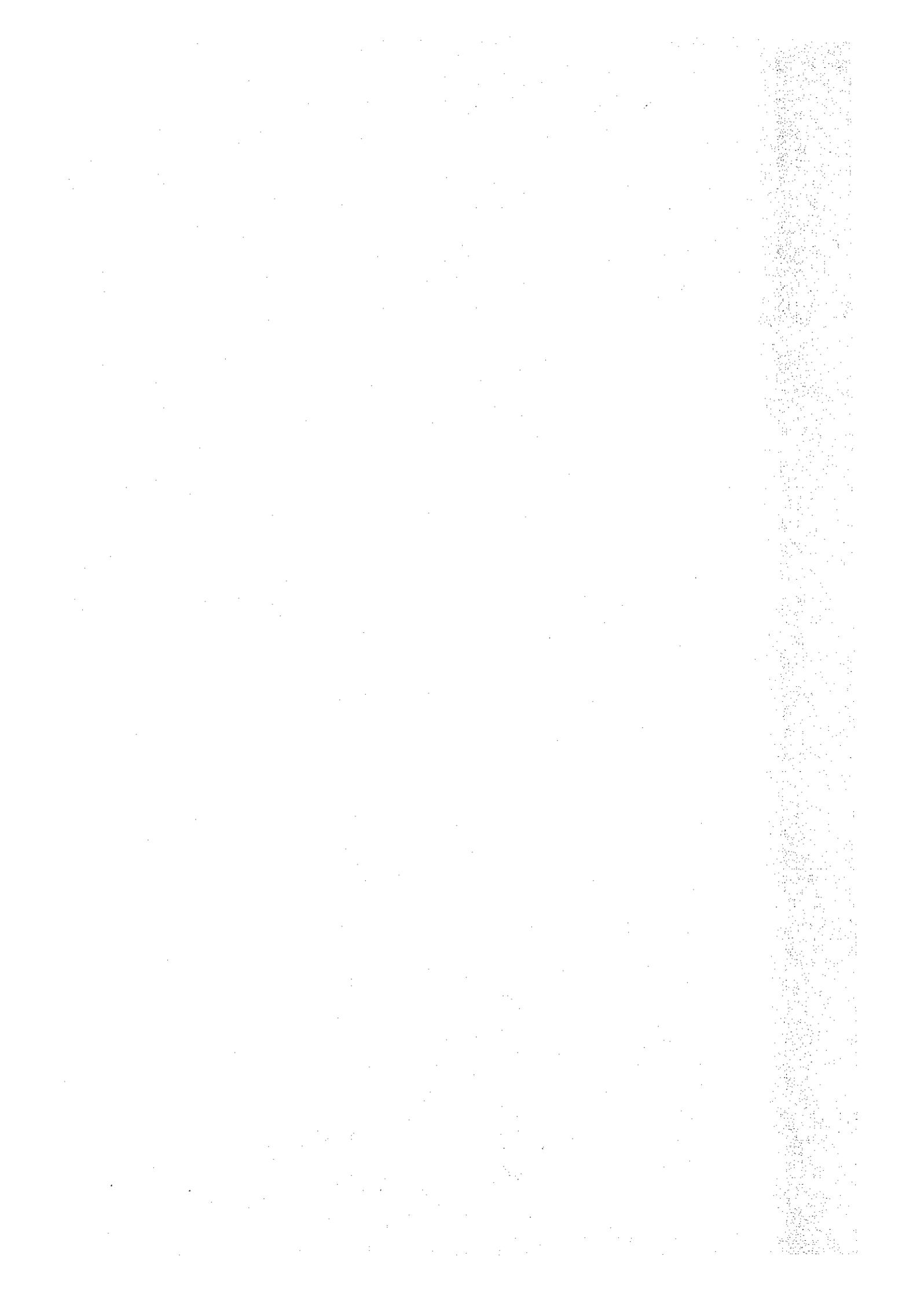


EL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL PROYECTO DE DESARROLLO AGRICOLA
MEDIANTE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA
EN LA REGION DE ATACAMA

ANEXOS

NOVIEMBRE 1988

704
83.3
AFT



REPUBLICA DE CHILE
INTENDENCIA REGIONAL DE ATACAMA

EL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL PROYECTO
DE DESARROLLO AGRICOLA MEDIANTE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA
EN LA REGION DE ATACAMA

ANEXOS

NOVIEMBRE 1988

AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON



国際協力事業団

18520

REPUBLICA DE CHILE
EL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD SOBRE EL PROYECTO
DE DESARROLLO AGRICOLA MEDIANTE APROVECHAMIENTO
DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA
EN LA REGION DE ATACAMA

EL INFORME FINAL

ANEXOS

I N D I C E

- ANEXO I. ESTUDIO SOBRE EL CLIMA, LA HIDROGEOLOGIA Y LOS
RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA
- ANEXO II. ESTUDIO DE SUELOS
- ANEXO III. CONDICION ACTUAL DE LA SOCIO-ECONOMIA Y LA AGRICULTURA
- ANEXO IV. PLAN DE EXPLOTACION Y GESTION AGRICOLA
- ANEXO V. PLAN DE RIEGO Y DRENAJE, Y DISEÑO DEL SISTEMA
- ANEXO VI. PLAN DE CONSTRUCCION Y LOS COSTOS
- ANEXO VII. EVALUACION DEL PROYECTO

ANEXO - I

**ESTUDIO SOBRE EL CLIMA, LA HIDROGEOLOGIA Y
LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA**

ANEXO I. ESTUDIO SOBRE EL CLIMA, LA HIDROGEOLOGIA Y
LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA

I N D I C E

	<u>Página</u>
CAPITULO 1. CLIMA	I-1
1.1 Generalidades	I-1
1.2 Precipitación	I-1
1.3 Temperatura	I-2
1.4 Humedad Relativa	I-3
1.5 Evaporación	I-3
1.6 Velocidad de los Vientos	I-3
 CAPITULO 2. HIDROGEOLOGIA	 I-6
2.1 Topografía y Geología	I-6
2.1.1 Topografía	I-6
2.1.2 Geología general	I-6
2.1.3 Formación de los estratos	I-7
2.2 Uso de Agua Subterránea	I-9
2.2.1 Inventario y agua subterránea	I-9
2.3 Prospección Eléctrica	I-10
2.3.1 Objetivo de la investigación	I-10
2.3.2 Resultado de medición	I-10
2.3.3 Resultado de análisis	I-11
2.4 Perforación de Pozos de Prueba y Pozo de Observación	 I-13
2.4.1 Trabajos de perforación	I-13
2.4.2 Registro de pozo	I-15
2.4.3 Revestimiento y rejilla	I-16
2.4.4 Relleno de grava	I-16
2.4.5 Desarrollo de pozos	I-17
2.5 Prueba de Bombeo	I-17
2.5.1 Generalidades	I-17
2.5.2 Prueba de caudales escalonados	I-18
2.5.3 La prueba de bombeo continuo y observación de recuperación	 I-18
2.5.4 Pérdida de pozo	I-18
2.6 Estructura Hidrogeológica	I-19
2.6.1 Estratigrafía hidrogeológica	I-19
2.6.2 Perfiles hidrogeológicos	I-21
2.6.3 Acuífero	I-22
2.7 Constante Hidráulica	I-23
2.7.1 Transmisividad y coeficiente de permeabilidad	 I-23
2.7.2 Rendimientos específicos	I-24
2.8 Nivel del Agua Subterránea	I-24
2.8.1 Nivel del agua subterránea en pozos existentes	 I-24
2.8.2 Fluctuación del nivel de agua subterránea	I-24
2.9 Carga y Descarga	I-25
2.9.1 Carga	I-25
2.9.2 Descarga	I-27
2.9.3 Balance	I-28

2.10	Fecha	I-28
2.10.1	Concentración de tritio	I-29
2.10.2	Fecha por carbono radioactivo	I-29
2.11	Calidad del Agua	I-29
2.11.1	Medición en terreno de conductividad eléctrica (CE) y pH	I-30
2.11.2	Análisis químico	I-30
2.11.3	Clasificación	I-31
CAPITULO 3. EVALUACION DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA		I-33
3.1	Zonas de Aguas Subterráneas	I-33
3.1.1	Zona de la Quebrada Tamarico (La Zona A)	I-33
3.1.2	Zona de Quebrada de los Porotillos (La Zona B)	I-33
3.1.3	Zona de Agua de Lazo. (La Zona C)	I-34
3.1.4	Zona de Quebrada Boquerón. (La Zona D)	I-34
3.1.5	Zona de Zanjón. (La Zona E)	I-34
3.1.6	Zona del Llano de la Jaula. (La Zona F)	I-35
3.1.7	Zona de Estación Algarrobal. (La Zona G)	I-35
3.2	Rendimiento Potencial de Explotación	I-35
3.2.1	Conceptos generales	I-35
3.2.2	Rendimiento potencial	I-36
3.2.3	Nivel de agua crítico	I-36
3.2.4	Rendimiento potencial de explotación	I-37
3.3	Evaluación Según las Normas de calidad del Agua de USDA y FAO	I-38
3.3.1	Evaluación según las normas de USDA	I-38
3.3.2	Evaluación según las normas de FAO	I-39
3.4	Area Propuesta para Explotación de Agua Subterránea	I-39
CAPITULO 4. PLAN DE EXPLOTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS		I-41
4.1	Estandarización de Pozos de Producción y Determinación del Intervalo entre Ellos	I-41
4.2	Selección del Lugar de los Pozos y Area de Explotación	I-43
4.3	Plan de Explotación y Plazo	I-44
4.4	Gestión de Aguas Subterráneas	I-45
CAPITULO 5. LISTA DE LOS EQUIPOS DE PROSPECCION SUMINISTRADOS Y UTILIZADOS EN EL ESTUDIO		I-46

LISTA DE CUADROS

		<u>Página</u>
Cuadro I-1	PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL EN EL ALREDEDOR DEL AREA DE ESTUDIO (1971-1986)	I-47
Cuadro I-2	PRECIPITACIONES ANUAL Y MAXIMA DIARIA (1979-1986)	I-47
Cuadro I-3	COMPARACION DE PRECIPITACION MAXIMA DIARIA	I-47
Cuadro I-4	INVENTARIO DE POZOS ENTUBADOS EXISTENTES	I-48
Cuadro I-5	INVENTARIO DE NORIAS EXISTENTES	I-49
Cuadro I-6	INVENTARIO DE MANANTIALES	I-50
Cuadro I-7	COMPARACION DEL NIVEL DE AGUA SUBTERRANEA Y RESULTADO DE ANALISIS EN SONDEO ELECTRICO	I-51
Cuadro I-8	RESULTADO DE ANALISIS SOBRE ROCA Basal	I-52
Cuadro I-9	DIAGRAMA DE PROGRESO DE PERFORACION	I-53
Cuadro I-10	TIEMPO DE OPERACIONES DE PERFORACIONES	I-54
Cuadro I-11	REGISTRO DE VELOCIDAD DEL CAUDAL	I-55
Cuadro I-12	RESULTADOS DE PRUEBA DE BOMBEO	I-56
Cuadro I-13	PERDIDAS ESTIMADAS DE POZO Y ACUIFERO	I-57
Cuadro I-14	RESULTADOS DE ANALISIS DE DATOS DE PRUEBA DE BOMBEO ...	I-58
Cuadro I-15	RESULTADOS DE ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA (1/3 a 3/3)	I-59
Cuadro I-16	CLASIFICACION DE SALINIDAD DE AGUAS PARA REGADIO SEGUN USDA (AGUAS EXENTAS DE SULFATOS)	I-62
Cuadro I-17	CLASIFICACION DE SODICIDAD DE AGUAS PARA REGADIO SEGUN USDA (AGUAS EXENTAS DE SULFATOS)	I-63
Cuadro I-18	DIRECTRICES DE LA FAO PARA EVALUACION DE LA CALIDAD DE AGUAS PARA REGADIO	I-64

LISTA DE FIGURAS

		<u>Página</u>
Fig. I-1	Ubicación de las Estaciones Meteorológicas y las Curvas de Isoprecipitación	I-65
Fig. I-2	Distribución Mensual de Direcciones de los Vientos en Boquerón Chañar	I-66
Fig. I-3	Direcciones de los Vientos	I-67
Fig. I-4	Mapa Geológico del Area de Estudio	I-68
Fig. I-5	Cortes en Profundidad de Pozos Existentes	I-69
Fig. I-6	Mapa de Localización de Pozos, Norias y Manantiales Existentes	I-70
Fig. I-7	Mapa de Ubicación sobre Puntos de Medición y Resultado de Análisis de Resistividad	I-71
Fig. I-8	Curvas de Sondeo Vertical Eléctrico (1/18 - 18/18)	I-72
Fig. I-9	Mapa de Distribución sobre Valor de Resistividad Más Baja entre 0 y 50 mts.	I-90
Fig. I-10	Mapa de Distribución sobre Roca Basal	I-91
Fig. I-11	Plano del Pozo de Prueba W-1	I-92
Fig. I-12	Plano del Pozo de Prueba W-2	I-93
Fig. I-13	Plano del Pozo de Prueba W-3	I-94
Fig. I-14	Plano del Pozo de Prueba W-4	I-95

Fig. I-15	Plano del Pozo de Prueba W-6	I-96
Fig. I-16	Plano del Pozo de Prueba W-9	I-97
Fig. I-17	Plano del Pozo de Observación H-1	I-98
Fig. I-18	Mapa de Ubicación de los Pozos de Prueba, el Pozo de Observación, y Línea de Perfil Hidrogeológico	I-99
Fig. I-19	Relación de S/Q a Q	I-100
Fig. I-20	Esquema del Perfil Hidrogeológico (1/3 - 3/3)	I-101
Fig. I-21	Curvas del Fondo del Acuífero	I-104
Fig. I-22	Curvas de Isoespesor del Acuífero	I-105
Fig. I-23	Curvas de Isopropundidad del Fondo del Acuífero	I-106
Fig. I-24	Análisis de Rendimientos Específicos por Método Semilogarítmico de Neuman	I-107
Fig. I-25	Curvas del Nivel de Agua Subterránea (Septiembre 1987)	I-108
Fig. I-26	Curvas del Nivel de Agua Subterránea (Febrero 1988)	I-109
Fig. I-27	Fluctuación del Nivel de Agua de los Pozos de Observación y Precipitación en Canto del Agua (Mar.1987 - Feb. 1988)	I-110
Fig. I-28	Fluctuación del Nivel de Agua de los Pozos de Prueba y Observación (Oct.1987 - Feb.1988)	I-111
Fig. I-29	Mapa de Flujo del Agua Subterránea	I-112
Fig. I-30	Curvas de Conductividad Eléctrica del Agua Subterránea (Marzo 1987)	I-113
Fig. I-31	Curvas de Conductividad Eléctrica del Agua Subterránea (Agosto 1987)	I-114
Fig. I-32	Curvas de Conductividad Eléctrica del Agua Subterránea (Febrero 1988)	I-115
Fig. I-33	Mapa de los Lugares de Muestreos de Aguas	I-116
Fig. I-34	Clasificación de la Calidad del Agua por Diagrama Trilinear	I-117
Fig. I-35	Diagrama para la Clasificación de Aguas para Regadío ..	I-118
Fig. I-36	Mapa de Zona del Agua Subterránea	I-119
Fig. I-37	Capacidad del Acuífero y Rendimiento Potencial	I-120
Fig. I-38	Diseño de Pozo Estándar de Producción	I-121
Fig. I-39	Disposición de Pozos Posibles de Producción en las Zonas A y B	I-122
Fig. I-40	Gráfica de Tiempo-Abatimiento Estimado	I-123
Fig. I-41	Mapa de Disposición de Pozos de Producción	I-124

CAPITULO 1. CLIMA

1.1 Generalidades

El área de estudio se caracteriza por la condición semidesértica.

Los datos climáticos fueron reunidos desde 9 estaciones meteorológicas. De ellas, 7 estaciones están ubicadas fuera del área de estudio y 2 estaciones dentro del área. Sus nombres y datos reunidos son de la siguiente manera.

7 estaciones

- a. Huasco (precipitación)
- b. Vallenar (precipitación)
- c. Conay (precipitación)
- d. Copiapó (temperatura, evaporación y precipitación)
- e. Loa Loros (precipitación)
- f. Embalse Lautaro (precipitación)
- g. Manflas (precipitación)

2 estaciones

- a. Boquerón Chañar (temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento)
- b. Canto del Agua (precipitación, humedad y evaporación)

La ubicación de estas estaciones se muestra en la Fig. I-1.

1.2 Precipitación

Las precipitaciones mensuales se proporcionan en el Cuadro I-1.

No hay estaciones pluviométricas dentro del área de estudio, de manera que la distribución pluviométrica anual se calculó mediante los datos obtenidos en la Estación de Vallenar, siendo esta la más cercana a dicha área.

Las precipitaciones promedio mensuales observadas en Vallenar durante el período de 1971 a 1986 se exponen a continuación.

Precipitación promedio mensual
(1971-1986)

(unidad: mm)

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	Total
Vallenar	0,0	0,0	1,2	2,2	5,4	4,6	16,3	6,8	0,9	1,0	0,0	0,0	38,4

Esta tabla indica que la precipitación es nula entre noviembre y febrero, pero entre marzo y octubre se registran escasas lluvias. Durante los meses de junio a agosto se concentra más del 70% de la precipitación anual.

En la Fig. I-1 se muestra la isoyeta que se estimó a base de los datos reunidos.

La precipitación promedio anual esta registrada en menos de 30 mm. en el área de estudio, y se eleva a más de 60 mm. en la precordillera.

En el Cuadro I-2 se muestra la precipitación diaria máxima que se observó desde 1979 a 1986. La estación de Vallenar que es la más cercana al área de estudio registró 54,5 mm. Durante el periodo de estudio, precipitaciones más fuertes que esta se observaron el 26/27 de julio de 1987. Esta fuerte precipitación registrada en cada estación se proporciona en el Cuadro I-3. La estación de Vallenar registró 77 mm por dos días, y la estación de Canto del Agua instalada durante el periodo de estudio registró 61 mm. Esta excepcional lluvia provocó el aflujo de las quebradas existentes, dejando muchas marcas de inundación en las orillas del río. Estos datos fueron utilizados para el estudio del drenaje.

1.3 Temperatura

La estación meteorológica de Boquerón Chañar ha estado registrando la temperatura del área de estudio desde 1970. La tabla siguiente muestra los valores observados.

Temperatura promedio mensual
(abril 1970-julio 1987)

(Unidad: °C)

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	promedio anual
Máx.	29,7	29,1	26,7	23,9	21,7	19,8	19,7	20,3	22,2	24,7	25,5	27,7	24,3
Min.	14,0	13,6	11,6	9,1	6,6	4,7	4,5	5,3	6,5	8,5	10,1	12,0	8,9
Med.	21,9	21,3	19,3	16,6	14,2	12,3	12,2	12,9	14,4	16,7	17,9	20,0	16,6

Temperatura promedio anual es de 16,5°C en Boquerón Chañar. La temperatura promedio máxima de 19,7°C, se registra en enero y la temperatura promedio mínima de 4,5°C en julio. Hay un periodo de ocho meses sin heladas, a contar de Noviembre.

Se estimó la temperatura acumulada necesaria para el crecimiento de los cultivos con las siguientes premisas:

- (a) la temporada de crecimiento de cultivos fue de septiembre a marzo.

(b) la temperatura de referencia fue de 10°C.

El resultado estimado fue aproximadamente de 1.600°C.

1.4 Humedad Relativa

Como se muestra más abajo, la humedad relativa promedio mensual es de un 70%, permaneciendo casi constante durante todo el año, pero la humedad relativa diaria fluctúa desde más de 90% a las 8 horas en la mañana, a menos de 50% a las 5 de la tarde. El valor promedio anual es de 71%.

Humedad relativa promedio mensual
(Marzo 1974-Febrero 1976)

(Unidad: %)

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	promedio anual
8:00	91	93	95	96	94	94	93	95	93	95	94	89	94
17:00	44	43	48	51	58	59	53	51	48	45	46	44	49
Medio	68	68	72	74	71	72	73	73	71	70	70	67	71

1.5 Evaporación

La evaporación no se había medido en el área de estudio ni a su alrededor antes de 1987. A principios de 1987, la Dirección de Agua instaló una bandeja de tipo A en Canto del Agua, considerando la importancia de la evaporación para calcular la demanda de agua por los cultivos. Los valores medidos se muestran más adelante:

Evaporación mensual
(abril 1987-febrero 1988)

(Unidad: mm)

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Evaporación	239	217	-	136	110	73	68	94	141	197	227	233

Se observa la evaporación mínima diaria de cerca de 2 mm. en julio y la máxima diaria de 7,7 mm en enero.

1.6 Velocidad de los Vientos

La velocidad de los vientos se registró en la Estación Meteorológica de Boquerón Chañar durante un período de 7 años. Se expone resumidamente en la tabla siguiente:

Velocidad de los vientos
(junio 1970-enero 1977)

(Unidad: m/s)

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	promedio anual
Velocidad	3,2	3,3	2,2	2,2	1,6	1,6	1,5	1,9	2,4	2,6	2,8	3,1	2,5

El promedio anual es de 2,5 m/s. El valor máximo de la velocidad es de 3,2 m/s, observado en enero y el valor mínimo es de 1,5 m/s registrado en julio.

La velocidad promedio anual se calculó en 2,5 m/s, que se estimó moderada según la clasificación establecida por FAO. Sin embargo, durante la investigación efectuada en el área de estudio, se observó un grave daño sobre cultivos, especialmente en la higuera.

En la Fig. 1-2 se muestra la fluctuación mensual en las velocidades y dirección del viento.

En general, los árboles frutales corren peligro de dañarse por el viento, que tiene una velocidad de más de 4 m/s. El viento de más de 6 m/s puede arrancar una gran cantidad de hojas desde las ramas del árbol frutal con hoja perenne.

Se expone más adelante la distribución mensual relativa al viento con una velocidad promedio de más de 16,3 km/h., que es igual a 4,5 m/s.

Distribución mensual de la velocidad
viento en el área del estudio

Mes	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.
Promedio (m/s)	5,3	5,1	4,8	4,8	4,8	4,7	4,7	4,8	5,1	5,2	5,1	5,1
Horas diarias(h)	13	13	8	7	4	4	4	2	6	7	11	12

Este cuadro muestra que la mayor velocidad del viento se registra en Enero. Además este viento se observa durante 13 horas por día. Se concluyó que se requiere un dispositivo que proteja los cultivos contra el viento.

La dirección del viento en Boquerón Chañar se expone en la Fig. 1-2, según la cual la dirección norte o noroeste es predominante todo el año. La Fig. 1-3 muestra la dirección del viento promedio medida en el área del estudio. Cerca del terreno a regar, el viento sopla en dirección noroeste. Lo que determina la dirección del viento es la existencia de

grandes quebradas; una de ellas se formó por la corriente de la Quebrada Boquerón y otra se hizo por la Quebrada Carrizal, pasando la localidad de Canto del Agua. El aire que sopla desde el mar atraviesa estos dos valles y cambia de dirección a lo largo de ellos, entrando en el área de estudio. Tomando en cuenta la disposición topográfica, es preciso instalar el dispositivo de protección contra el viento noroeste.

CAPITULO 2. HIDROGEOLOGIA

2.1 Topografía y Geología

2.1.1 Topografía

La Región de Atacama puede dividirse en tres áreas topográficas, a saber: la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia, y la Cordillera de Los Andes. Varios ríos tienen su origen en la Cordillera de Los Andes y atraviesan la Depresión Intermedia y la Cordillera de la Costa antes de verter al Océano. Agua perenne en la superficie existe sólo en los ríos Copiapó y Huasco que nacen en la línea de nieve de la Cordillera de Los Andes. Estos dos ríos alcanzan generalmente un caudal elevado cuando la tasa de fusión de la nieve en la Cordillera de Los Andes es máxima. En el área del estudio, empero, no existe agua superficial perenne, porque su cuenca no llega a la línea de nieve de la Cordillera de Los Andes (Ver Fig. I-1).

El área de estudio es desaguada por la Quebrada Carrizal y Boquerón Chañar y sus afluentes, que fluyen en sentido general de este a oeste. Estas quebradas son lavadas sólo con agua embarrada y arenosa en años ocasionales de grandes lluvias.

El área de estudio, situada en la Depresión Intermedia entre los ríos Huasco y Copiapó, tiene varias terrazas y el valle aluvial en abanico está tachonado de colinas llamadas 'insebergs'. Existe un gran número de dunas al este de Zanjón en la parte sur del área de estudio. Varios manantiales y marjales estacionales (vegas) existen en Zanjón y su entorno. La superficie del área de estudio desciende suavemente al oeste desde una cota de unos 500 m al este hasta unos 280 m en el oeste. La pendiente media de la superficie en el centro del área de estudio es de aproximadamente 1%.

2.1.2 Geología general

La carta geológica Fig. I-4 se elaboró tomando como referencia los perfiles geológicos existentes (Fig. I-5) y las exploraciones de los estratos superficiales realizadas, los cuales se basaron en la carta geológica disponible del área de estudio. (Norte de Vallenar - La Serena. Escala 1:250.000).

El área de estudio se ubica en la depresión central y está formado en gran parte por un espeso depósito sedimentario del período Cenozoico que descansa sobre la roca basal. La roca basal está formada por rocas estratificadas del Cretácico Inferior y las rocas intrusivas de diorita del período Mesozoico. Afloramiento de estas rocas se observan en la parte este de la Cordillera de la Costa y en los cerros con un ancho de más de 10 km. al este del área de estudio (Cerro

Jaula y otros) y además en los cerros de rocas intrusivas (inserberg) que se encuentran dispersos dentro del área de estudio. Todas estas rocas se encuentran bajo todas las etapas del proceso de erosión.

La parte oeste de la Cordillera de la Costa que se encuentra al lado del Océano Pacífico, está formado por rocas metamórficas del período Paleozoico. Por otro lado, la Cordillera de Los Andes que se encuentra río arriba de la Quebrada Algarrobal, está formada por granodioritas del período Paleozoico y rocas volcánicas del período Plioceno. Como características del área de estudio, se observan algunas fallas que supuestamente se han producido en el período medio de la era Terciaria. Las fallas desarrolladas en dirección norte - sur se encuentran a lo largo de la carretera en el lado este de la Depresión Intermedia, como si atravesaran las rocas estratificadas de formación marina. También se encuentran más de dos grupos de fallas a lo largo del lado este de la Cordillera de la Costa. El área de estudio sufrió el hundimiento provocado por los movimientos de estas fallas y se fue cubriendo con arena, grava, limo, arcilla, etc. provenientes de la cordillera.

2.1.3 Formación de los estratos

La formación de los estratos del área de estudio es la siguiente (ver Fig. I-4).

Rocas estratificadas	Período Cenozoico	Cuaternario	Sedimentos de río recientes. Depósitos eólicos Depósitos aluviales
		Terciario Plioceno	Gravas de Atacama de terraza baja Gravas de Atacama de terraza alta
Rocas intrusivas	Período Mesozoico	Cretácico superior	Grupo Chañarcillo Grupo Bandurrias
		Cretácico inferior	Triásico superior Diorita, granodiorita Tonalita, Andesita intrusiva

A continuación se explicarán los respectivos estratos por orden de edad.

(1) Grupo bandurrias

Pertenece al período Cretácico. Está formado por rocas de derrumbes piroclásticos formados por brecha, andesita intrusiva, y toba con la parte superior que está en contacto

con el grupo chañarcillo. Están distribuidos en dirección norte-sur en los cerros al este de la carretera.

(2) Grupo chañarcillo

Pertenece al periodo Cretácico, está formado por rocas sedimentarias de formación marina bien solidificadas y compuesto principalmente por caliza y margas que va acompañado con roca calcárea con inclusiones de arenisca y conglomerados. Está distribuido en dirección norte-sur en ancho de aproximadamente 5-10 km. al este de la carretera. Los estratos tienen una dirección norte-sur, con inclinación hacia el este formando cerros de aproximadamente 1.000 mts. de altura sobre el nivel del mar.

(3) Gravas de atacama

Van desde el periodo Plioceno de la era Terciaria a la era Cuaternaria Inferior. Están distribuidas principalmente a lo largo de los cerros del este del área de estudio y forman terrazas en ambas riberas de la Quebrada Algarrobal. Existen también en el lado poniente de la depresión central y cerca de la cordillera de la costa. Estas gravas de Atacama están formadas por gravas y arena moderadamente solidificadas y se supone que en el pasado cubrían gran parte de las faldas de las montañas y los depósitos aluviales. Las gravas de Atacama se clasifican en terrazas altas y bajas. Se considera que las terrazas altas están formadas por bolones con inclusión de gravas. En cambio, se supone que las bajas están formadas por gravas y bolones con inclusión de arena algo solidificada.

(4) Estrato aluvial

Este depósito sedimentario tiene su origen en antiguas inundaciones acaecidas en la cordillera de los Andes y cubre la mayor parte del valle central. Los depósitos sedimentarios superiores son una mezcla de arcilla, limo, arena fina, arena, grava y bolones, y según los datos del sondaje (Fig. I-5), están formados por materiales de textura gruesa tales como grava y otros que van desde la superficie de la tierra hasta 40 ó 50 mts. de profundidad. Luego, el estrato inferior se compone de materiales finos tales como limo arenoso, arcilla y otros. El espesor de los sedimentos, sobrepasa los 200 mts. en la parte central.

(5) Depósitos sedimentarios en el lecho de los ríos recientes

Son re-sedimentaciones de materiales provenientes de los lechos del actual sistema de agua, producidas por aluviones ocasionales y contienen grava, arena, bolones, limo y arcilla que no se encuentran solidificadas.

(6) Depósitos eólicos

Son re-sedimentaciones de arenas eólicas que fueron transportadas por el viento sur-oeste y redepositadas en el área sur del estudio dando origen a las grandes dunas y Nebkas. También se encuentran depósitos de arenas eólicas en el lado sur-oeste de las laderas de los cerros, esto es, en la misma área sur.

(7) Rocas intrusivas

Pertenecen al período Cretácico Inferior-Triásico Superior. La mayor parte de la Cordillera de la Costa en el lado oeste del área de estudio y también en los cerros del lado sur de la misma área está formada por estas rocas. Asimismo se observan estas intrusiones en la llanura aluvial de las proximidades de la Cordillera de la Costa. Están formadas principalmente por granodiorita, tonalita y granito, etc., de las cuales la granodiorita es la más ampliamente distribuida. Presenta un aspecto granuloso de color gris formado por plagioclasa, cuarzo y biotita, y los afloramientos de roca presentan en todos los casos fuertes erosiones.

2.2 Uso de Agua Subterránea

2.2.1 Inventario y agua subterránea

En el área de estudio el agua subterránea se utiliza para el consumo doméstico, riego y en la minería, por medio de pozos excavados, vertientes y pozos entubados (Ver Cuadros I-5 a I-7).

(1) Pozos entubados

En el área de estudio existen catorce (14) pozos entubados incluyendo 8 pozos abandonados según se indica en la Fig. I-6. Actualmente sólo dos pozos de producción están en servicio para riego y uso doméstico en Boquerón Chañar. La cantidad de descarga varía de 1 l/s a 3 l/s en los pozos N°. P-2 y P-4 respectivamente y sus transmisividades son de 1,8 a 5,5 m²/día respectivamente. Estos valores demuestran que la permeabilidad es pequeña. El rendimiento total de producción de los pozos se estimó de 100 a 200 m³/día. La profundidad de los pozos entubados varía entre 35 m y 90 m, y el nivel de agua estática varía entre 22 m y 33 m en el área de estudio.

(2) Norias

Treinta y cuatro (34) norias se encuentran ubicadas principalmente en la parte sur del área de estudio y cerca de la Estación Algarrobal, según se indica en la Fig. I-6. El nivel de agua estática está a alrededor de 2 a 5 m bajo la superficie en la parte suroeste; sin embargo, en otros lugares es más profunda. El nivel estático más profundo es de 36,85 m; además se encontraron muchas norias secas. La noria

más profunda tiene 57 m de profundidad, en la parte sureste y llega hasta la roca basal.

La descarga de las norias es escasa. La fluctuación del rendimiento de producción de todas las norias es de 3 a 57 m³/día, y el máximo total probable de rendimiento de producción se estima en aproximadamente 200 m³/día. Casi todas estas norias se secan después de 1 a 2 horas desde el inicio del bombeo. Además la recuperación del nivel de agua no es rápida.

(3) Manantiales

Hay doce (12) manantiales alrededor del área del Zanjón y Canto del Agua, según se indica en la Fig. I-6. El agua de estos manantiales emerge, como el tipo de filtración, desde estratos de limo arenoso o vegas. El potencial de descarga de estas manantiales fluctúa de escaso a muy escaso. Estos manantiales no pueden usarse continuamente, ya que generalmente no pueden recuperarse antes de 4 a 10 días después de una descarga total.

2.3 Prospección Eléctrica

2.3.1 Objetivo de la investigación

Se llevó a cabo una prospección eléctrica en toda el área de Tololo Pampa para averiguar la estructura hidrogeológica, y para decidir la ubicación y profundidad de pozos de prueba. La prospección eléctrica puede resumirse como sigue:

- Puntos de medición: 35 puntos (ver Fig. I-7),
- Profundidad de medición: 200 m,
- Método de medición: de prospección eléctrica vertical por Disposición de Wenner,
- Equipo utilizado:
Receptor: ES-G2 No. 2113, OYO S.A.
Registrador de plumilla EPR 100 A, TOA Denpa S.A.
Transmisor ES-G2 No. 2112, OYO S.A.

El método Wenner es el que va ampliando sucesivamente la distancia, manteniendo siempre intervalos de igual tamaño para la distancia entre el electrodo receptor y el electrodo transmisor. Con la ejecución del diagrama en el papel cuadriculado se obtiene la curva del sondeo vertical (curva VES). Se analiza la estructura del subsuelo con el método comparativo de la curva de referencia, teniendo como origen la curva de sondeo vertical.

2.3.2 Resultado de medición

Los resultados de las mediciones son como se indican en los conjuntos de curvas VES (Sondeo Vertical Eléctrico) (Fig.

I-8). Las descripciones de tipo curva VES se resumen en las siguientes.

Modelo A: En las proximidades de superficie, la Resistividad Aparente " ρ_a " (" ρ_a " en adelante) es alta, mientras que disminuye el valor de " ρ_a " a medida que se incrementa la profundidad de la medición "a" (en adelante "a").

Modelo B: Al incrementar "a", desciende " ρ_a ", pero luego vuelve a subir.

Modelo C: En la proximidad de la superficie indica " ρ_a " baja, pero va aumentando al incrementar "a".

Modelo D: Salvo las variaciones en las proximidades de superficie, " ρ_a " se mantiene estable.

Las curvas de VES manifiestan los valores de resistividad en el subsuelo, que permiten interpretar su significado como sigue:

Modelo A: " ρ_a " es alta, debido a la sequedad del estrato próximo a la superficie, pero " ρ_a " baja por la humedad en la profundidad. No se detecta el nivel de roca basal, ya que se encuentra muy profunda.

Modelo B: Existe roca basal a una profundidad menor que la profundidad máxima de medición.

Modelo C: Debido a la poca profundidad del nivel de la napa subterránea, " ρ_a " en la proximidad de la superficie es baja, pero si incrementa "a" aumenta " ρ_a " por causa de la poca profundidad de la roca basal.

Modelo D: Excluyendo las variaciones en la proximidad de la superficie, existe desarrollo del mismo tipo de estrato. Escasa posibilidad de existencia de agua subterránea.

2.3.3 Resultado de análisis

Los resultados de los Análisis de Resistividad Estructural en cada punto de medición son los indicados en las Figs. I-7 y I-8.

Los resultados de la prospección eléctrica se compararon con los registros geológicos existentes y niveles de aguas subterráneas. A partir de los resultados de los valores de resistividad y tipos de curva VES, se identificaron en el área de estudio los siguientes tipos de estructura subterránea: (1) una formación de grava arenosa seca y de alta resistividad situada sobre el nivel del agua subterránea; (2) una formación de grava arenosa de poca resistividad con agua y una formación

de arcilla de muy baja resistividad; y (3) una formación de resistividad prácticamente equivalente a roca basal.

(1) El estrato de la grava superior del nivel de agua subterránea

El estrato de la grava presenta gran porosidad, la cual varía la resistividad según el contenido de agua y su calidad. También los estratos arenosos, limosos y arcillosos están en estado húmedo, por lo que inducen una resistividad bajísima. Por lo tanto, en el estrato de la grava, el valor de resistividad varía ampliamente y no presenta valor fijo.

Según el Cuadro I-7 la resistividad del estrato de la grava varía entre 26-26.000 Ω .m. lo que se considera muy alto. Esto se debe a las razones antes citadas. Es decir, en caso de escasez de agua en la cercanía de la superficie, se obtienen resistividades de más de centenares de Ω .m. En caso de estrato en estado húmedo próximo al acuífero se obtienen resistividades entre 40 y 300 Ω .m. También existe estrato de baja resistividad, en la cercanía de la superficie como se indica en el punto de medición No.3, esta se debe a la existencia de los estratos arcillosos.

(2) Formación de grava arenosa con agua subterránea y formación de arcilla

Según el Cuadro I-7. Excepto el punto de medición No. 31, coinciden la profundidad analizada y el nivel de agua subterránea ubicado entre profundidades de 20 - 40 mts., ya que se determinó baja resistividad del estrato, de 9 - 38 Ω .m.

También en el caso de nivel de agua subterránea entre 0-10 mts., se determinó la resistividad del primer estrato en menos de 10 Ω .m. Se estima que la resistividad del acuífero del área es entre 1 - 50 Ω .m.

El valor de resistividad de la formación de grava arenosa es de más de 20 Ω .m. La formación de muy bajo valor de resistividad consta de arena fina, limo o arcilla con resistividad inferior a 10 Ω .m. La formación de resistividad entre 10 y 20 Ω .m consta de arcilla o limo con grava arenosa. La Fig. I-8 muestra la distribución de la formación de baja resistividad a profundidades de 0 - 50 m e indica por tanto la distribución de la formación acuífera. Los valores de resistividad por debajo del nivel de agua subterránea son generalmente bajos debido a la elevada conductividad eléctrica del agua subterránea (1.000-3.000 μ S/cm).

(3) Roca basal

En el Cuadro I-8 y Fig. I-10, se indica la existencia de roca basal determinada en el estudio, y la curva VES permite deducir este hecho. La ubicación de estos puntos de medición son generalmente cercanías de algún cerro y/o al pie del monte, donde geológicamente puede suponerse la existencia de

roca basal. Por otro lado, la curva VES en lugares lejanos a las zonas antes citadas no presenta indicaciones de existencia de roca basal. En los puntos de medición No. 4, 5, y 35, no se puede determinar con seguridad la existencia de roca basal cerca de "a"=200 mts., aunque se demuestra leve levantamiento de la curva de VES. Estos hechos aclaran que la profundidad de la roca basal en el centro del área de estudio sea muy grande.

Con el propósito de conocer la resistividad de la roca basal, se efectuó la medición sobre la roca aflorada. Los lugares son Lomas Auritas, Lomas Angostura y en el sur de la Quebrada El Peñón. Los resultados dan resistividades de entre 70-200 Ω .m. para el estrato de roca superficial, entre los 10-40 mts. de profundidad, la cual se encuentra en estado descompuesto, mientras que la roca basal sana que se encuentra en el estrato inferior, indicó valores de 200-800 Ω .m. Estos hechos permiten suponer que el estrato descompuesto sobre roca basal comienza en un punto de menor profundidad que la de roca basal sana, cuya profundidad está detectada por el análisis.

2.4 Perforación de Pozos de Prueba y Pozo de Observación

2.4.1 Trabajos de perforación

El trabajo de perforación de pozos fue programado con un total de profundidad de 690 metros para 6 pozos de prueba y un pozo de observación para investigar el potencial de explotación de agua subterránea para la regadío del área contemplada en el proyecto.

Los trabajos de perforación en el área de estudio comenzaron el 1° de julio de 1987, y concluyeron según lo previsto a finales de septiembre, realizados por un contratista chileno, según el Cuadro I-9.

Las siguientes pruebas se efectuaron en los pozos de prueba y el pozo de observación.

- pozo de prueba
 - a. Muestreo de formaciones
 - b. Análisis de criba
 - c. Registro eléctrico (Resistividad)
 - d. Prueba de caudales escalonados
 - e. Prueba de tiempo de abatimiento y observación de recuperación
 - f. Registro de velocidad del caudal
 - g. Registro de CE y temperatura
 - h. Análisis químico de agua subterránea

- pozo de observación
 - a. Muestreo de formación
 - b. Registro eléctrico (Resistividad y PE)
 - c. Prueba de tiempo de abatimiento y observación de recuperación

d. Registro de CE y temperatura

Los resultados de los pozos de prueba y el pozo de observación se muestran en las Figs. I-11 a I-17.

(1) Ubicación y cantidad

La ubicación de los pozos se muestran en Fig. I-18. Las coordenadas de pozos y el período de ejecución es el siguiente:

Pozo No.	Coordenadas	Principio Ejecución	Periodo Completado
W-1	6.889,90 331,09	12 Julio '87	06 Sept. '87
W-2	6.888,09 336,69	02 Julio '87	24 Sept. '87
W-3	6.888,04 322,17	05 Julio '87	30 Agosto '87
W-4	6.884,84 326,62	08 Julio '87	24 Sept. '87
W-6	6.883,47 343,15	02 Julio '87	27 Sept. '87
W-9	6.881,00 323,99	20 Julio '87	29 Sept. '87
H-1	6.884,83 326,64	11 Julio '87	29 Agosto '87

La profundidad de perforación, profundidad de revestimiento y la elevación de los puntos del pozo son los siguientes:

Pozo No.	Elevación de Terreno (m)	Profundid. Perforac. (m)	Diámetro Revestim. (pulgadas)	Profund. Revest. (m)	Ubicac. Rejilla (m)
W-1	366,72	100	8	63,0	36,0-42,0 54,0-57,0
W-2	415,39	110	12	82,5	71,0-77,0
W-3	305,76	50	8	50,0	20,73-28,23
W-4	327,39	84	12	84,0	35,84-84,00
W-6	499,14	106	12	61,72	44,77-56,67
W-9	311,20	120	8	71,0	37,0-67,0
H-1	327,53	120	3	87,55	34,00-52,85 76,14-82,17
Totales		690		499,77	

(2) Método y procedimiento

Las operaciones de perforación fueron ejecutadas con 6 equipos de arrastre montados de percusión (Bucyrus Erie 60-L) para pozos de prueba y un equipo rotatorio montado sobre camión (Mayhew 1500) para pozo de observación.

El progreso de la operación de perforación se muestra en los Cuadros I-9 y I-10. La perforación de los pozos de prueba en general había progresado bien, aunque W-6 tuvo problemas por casi un mes debido a derrumbes, y además en W-2 no hubo

actividades durante largo tiempo debido a dificultades mecánicas en el equipo. La perforación del pozo de observación había progresado bien.

2.4.2 Registro de pozo

El propósito del registro de pozo es observar las condiciones litológicas y también determinar con exactitud la profundidad del acuífero. Los registros de pozo, incluyendo la resistividad, potencial espontáneo (PE), velocidad de caudal (registro de caudal) y conductividad de caudal (registro CE) se efectuaron en los pozos de pruebas y en el pozo de observación.

El registro eléctrico (resistividad y PE) se efectuó mediante la registradora automática (OYO - Geologger 300); sin embargo, no obtuvieron registros en algunas de las perforaciones, debido a tuberías de revestimiento provisorio.

En base a los resultados del registro eléctrico, se diferenciaron las formaciones por sus respectivos valores de resistividad, como sigue:

- a. De muy baja resistividad: 5 - 10 Ω -m
La acuiclusa consta de arcilla arenosa y limo arenoso
- b. De baja resistividad: 10 - 20 Ω -m
La acuiclusa consta de arcilla arenosa y limo arenoso
- c. De resistividad media: 20 - 30 Ω -m
Este acuífero de permeabilidad media consta de arena y grava con algo de arcilla y limo, principalmente
- d. De alta resistividad: 30 - 45 Ω -m
Este acuífero en buen estado, de alta permeabilidad, consta de arena y grava sin limo ni arcilla
- e. De muy alta resistividad: 45 - 120 Ω -m
Esta formación seca consta de arena, grava y bolones situada sobre el nivel de agua subterránea

Los resultados del registro eléctrico indicaron el nivel inferior del acuífero y el superior de la acuiclusa.

En los pozos de prueba que producen mayor cantidad de agua de W-3, W-4 y W-9, se efectuó el registro de velocidad de caudal con un medidor de velocidad de pozo TOHO CM-3S, para obtener el espesor real de la formación de soporte de agua.

No existe ingreso de agua subterránea a través de las partes inferiores de las rejillas W-3 y W-4 como se indica en el Cuadro I-11. La mayor parte del rendimiento de estos pozos (más del 50%) penetra por las partes superiores de las rejillas.

Los registros de conductividad de caudal se hicieron con medidor eléctrico TOHO EST-3 en todos los pozos perforados, para estudiar la distribución de calidad de agua.

Los resultados de medición del registro CE no indicaron gran diferencia en la distribución vertical de la calidad en rejilla de los pozos.

2.4.3 Revestimiento y rejilla

Para el revestimiento de los pozos de prueba, se utilizaron tubos de acero de 8 a 12 pulgadas. Para el pozo de observación también se utilizaron tubos de acero de 3 pulgadas de diámetro. Como rejilla para los pozos de prueba, se instalaron tubos de acero ranurado de 8 a 12 pulgadas en la parte del acuífero. El tubo de acero ranurado de 3 pulgadas de diámetro fue instalado en la parte acuífera del pozo de observación.

El tamaño de malla de la rejilla es de 2 - 3 mm x 150 mm y la relación de apertura es de 3 a 4 %.

Se colocaron rejillas en la parte del acuífero cuya profundidad fue determinada mediante litología y registro eléctrico.

El montaje de los tubos de revestimiento y rejillas fue ajustado por medio de soldadura eléctrica y el pozo de observación fue hecho con acoplamiento apernado. Los tubos y rejillas de los pozos de pruebas y del de observación fueron utilizados por un centralizador. Los materiales de los tubos de revestimiento y rejilla se indican a continuación:

Tubos de Revestimiento	Largo de Unidad (m)	Diámetro Externo (mm)	Espesor (mm)	Instalado (m)
Tubo de acero				
N.D. 12"	6	330	12,7	124,33
N.D. 8"	6	222	9,5	133,10
N.D. 3"	6	86	5	57,27
Rejilla (Tubo ranurado)				
N.D.12"	6	330	12,7	104,39
N.D.8"	6	222	9,5	50,90
N.D.3"	6	86	5	30,28

2.4.4 Relleno de grava

Se usó grava natural como relleno del espacio anular alrededor de los tubos de revestimiento y rejilla de los Pozos de prueba y de observación. La grava redonda silicosa se recolectó localmente a 10 km. al suroeste de Caldera. Después de cernerla a diámetro de 3 a 10 mm. y/o de 2 a 8 mm., fue

puesta en el espacio anular por medio de un balde de 25 l. En la parte superior del relleno de grava en el espacio anular se rellenó con mortero y/o arcilla hasta el nivel de la superficie.

El volumen de relleno de grava de cada lote de perforación es el siguiente:

Pozo No.	Diámetro del revestimiento (pulgadas)	Volumen de grava (m3)	Profund. total relleno grava (m)	Promedio Vol./metro (m3/m)
W-1	8	21,5	43,0	0,50
W-2	12	28,2	57,5	0,48
W-3	8	11,5	47,0	0,24
W-4	12	18,5	69,0	0,27
W-6	12	27,7	37,72	0,73
W-9	8	24,8	56,0	0,44
H-1	3	2,48	67,55	0,04

Volumen total de grava: 157,0

2.4.5 Desarrollo de pozos

Dos etapas de desarrollo se ejecutaron en cada pozo de prueba. El desarrollo del pozo preliminar se realizó con el método de émbolo y cuchara. El tiempo de la operación de este método se regula a razón de 2 horas para cada metro de rejilla hasta que nada o muy poca arena pueda ser introducida al pozo.

El desarrollo final de los pozos de prueba fue ejecutado con bomba de trabajo en continuo hasta que el agua salía limpia. Pero en W-2 y W-6 fue imposible obtener agua completamente limpia, debido a la poca capacidad de descarga de agua. El pozo de observación fue explotado con un compresor de aire. El total de las horas de aire elevadas fue de 27.

2.5 Prueba de Bombeo

2.5.1 Generalidades

El propósito de la prueba de bombeo es determinar las características del sistema acuifero y también el rendimiento del pozo. Se efectuaron las pruebas de caudales escalonados, prueba de bombeo continuo, y prueba de recuperación correspondientes en 6 pozos de prueba ocupando bomba sumergible y/o un taladro con bomba de turbina de pozo. El pozo de observación H-1 fue perforado a alrededor de 15 m. de distancia del pozo W-4 con el objeto de observar el abatimiento del acuifero.

Durante la prueba de caudales escalonados y la prueba de bombeo continuo, la medición de cantidad de descarga fue hecha con muesca -V. Los resultados de las pruebas de bomba se muestran en el Cuadro I-12. La cantidad máxima de descarga se encuentra en W-9 con 20,19 l/s, mientras que la mínima está en W-6 con cantidad de descarga de 0,055 l/s. Por esta razón, el pozo de mayor capacidad se encontraría en el centro y parte sur del área de estudio, y el de poca capacidad se encontraría a lo largo de las Quebradas Boquerón, Chañar y Algarrobal.

2.5.2 Prueba de caudales escalonados

Las pruebas de caudales escalonados fueron ejecutadas a fin de determinar el comportamiento del acuífero en una distinta cantidad de descarga y para estimar las pérdidas de los pozos en W-3, W-4 y W-9. Un escalón de la prueba es continuado normalmente por 2 horas y había cuatro escalones para cada prueba.

Durante la prueba de caudales escalonados, el nivel del agua alcanza el equilibrio al fin de cada escalón. Las capacidades específicas de los pozos de prueba están calculadas por los antecedentes de la prueba de caudales escalonados para estimar las características de cada pozo (Cuadro I-12). Los valores de las características específicas del pozo W-9 son mayores relativamente en el rango de 5,09 a 5,71 l/s/m, mientras W-3 y W-4 son inferiores de 0,93 a 2,19 l/s/m.

2.5.3 La prueba de bombeo continuo y observación de recuperación

Las pruebas de bombeo continuo durante 72 horas fueron realizadas en W-3, W-4 y W-9 para determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Sin embargo, en otros pozos las pruebas se limitaron de 5 a 24 horas, debido a su muy bajo rendimiento de agua. Los resultados de las pruebas de bombeo continuo y observación de recuperación se muestran en las Figs. I-11 a I-17 y en el Cuadro I-12.

Como regla general, la observación de recuperación prosigue durante 24 horas, aunque en algunos pozos se limita a 12 horas cuando el tiempo de bombeo ha sido breve. En W-3 y W-9, la recuperación fue muy rápida y tardó menos de 10 minutos en recuperar un 90 % de la captación. La captación de otros pozos, salvo W-6, se recuperó en más de un 90 % en 8-24 horas después del término del bombeo.

2.5.4 Pérdida de pozo

Esta describe una evaluación general de los pozos de prueba. Se comprende generalmente que el abatimiento de nivel de agua al bombear incluye los 2 factores. Es decir,

abatimiento por pérdida acuífera de acuerdo a la ley de Darcy y abatimiento por una pérdida de pozo causada por el flujo a través de la rejilla del pozo y el flujo interior del pozo hacia la boca de la bomba. La pérdida del Pozo se asocia con un flujo turbulento y se expresa como sigue:

$$Sw = BQ + CQ^2 \quad \text{o} \quad Sw/Q = B + CQ$$

Donde Sw = Abatimiento

Q = Cantidad de descarga

B = $\ln (r_o/r_w)/2 \pi T$ (constante de pérdida acuífera)

C = Constante gobernada por el radio, condición y construcción del pozo.

Por lo tanto, el total del abatimiento Sw consiste en la pérdida acuífera BQ y la pérdida del pozo de CQ^2 . La constante B y C puede ser obtenida planteando Sw/Q contra Q y ajustando una línea recta a través de los puntos.

La relación entre Sw/Q y Q derivada de los datos de captación durante el prueba de captación escalonada aparece en la Fig. I-19. Las constantes B y C se calculan a partir de la Fig. I-19. Por consiguiente, la captación (Sw) de los tres pozos de ensayo se estimó como sigue:

$$W-3 : Sw = 0,2970 Q + 0,03929 Q^2$$

$$W-4 : Sw = 0,7124 Q + 0,04240 Q^2$$

$$W-9 : Sw = 0,1633 Q + 0,00236 Q^2$$

Siendo Q = Caudal de bombeo (l/s)

La pérdida de acuífero y de pozo por cada pozo de prueba se calcularon con la fórmula citada y se tabularon en el Cuadro I-13, que incluye también la relación entre pérdida de pozo y captación total. De ello se desprende que los pozos de ensayo W-4 y W-9 son relativamente eficientes debido a la pequeña proporción de pérdida de pozo a captación total, mientras que W-3 muestra una elevada relación de pérdida de pozo.

2.6 Estructura Hidrogeológica

2.6.1 Estratigrafía hidrogeológica

La estratigrafía hidrogeológica del área de estudio se ha clasificado según los resultados de la prospección eléctrica, los registros eléctricos, los pozos de prueba y tomando como referencia los datos hidrogeológicos existentes (ver Fig. I-20).

Capa A (Estrato permeable no acuífero): Estrato de grava permeable que no está saturada de agua.

- Capa B (Acuífero): Estrato de grava permeable saturada con agua y estratos que en ciertos lugares contienen arcilla.
- Capa C (Estrato de baja permeabilidad): Estrato de arcilla arenosa semipermeable o de baja permeabilidad, o estrato de arcilla y limo de muy baja permeabilidad.
- Capa D (Estrato Eólico): Estrato eólico de limo arenoso impermeable.
- Capa E (Roca basal): Roca basal impermeable.

La capa A, aunque es considerada de alta permeabilidad ya que se trata de un estrato de grava floja, no constituye el acuífero debido a que se encuentra sobre el nivel del agua subterránea. El valor de la resistividad según la prospección eléctrica es alto y se encuentra dentro de los límites de 70-25.500 Ωm . Asimismo, el valor de resistividad del registro eléctrico del pozo de observación H-1 acusa también un valor alto que se encuentra entre 45-120 Ωm . El espesor de la capa es semejante al nivel del agua subterránea y es de 20-30 mts.

La capa B es el acuífero que presenta la mejor capa permeable de la zona de estudio, formada básicamente por grava que en algunos lugares contiene limo arcilloso. Esta capa tiene como límite superior el nivel del agua subterránea y la base hace contacto con el límite superior de la capa C de baja permeabilidad. El valor de la resistividad según las prospecciones eléctricas está dentro de los límites de 25-50 Ωm . El valor de la resistividad según el registro eléctrico ha sido mediano (20-30 Ωm) en los pozos W-3 y W-4, mientras que el pozo W-9 indicaba una resistividad alta (30-45 Ωm). La distribución está circunscrita a la parte central del estudio, cuyo espesor del estrato llega a 40-60 mts. La permeabilidad tiene mejores características en la parte sur del centro del área de estudio donde se encuentra el pozo W-9.

La capa C es una capa de baja permeabilidad que tiene como límite superior el acuífero de la capa B. Esta capa se divide en una capa de baja permeabilidad con difícil extracción del agua subterránea, ya que está formada por limo arenoso y arcilla arenosa con un valor de resistividad baja de 10-20 Ωm ., según las prospecciones eléctricas y los registros eléctricos, y en un estrato de baja permeabilidad que prácticamente no le permite la extracción del agua subterránea, ya que está formada por arcilla y limo con un valor de resistividad baja de 5-10 Ωm ., según las prospecciones eléctricas y los registros eléctricos.

La distribución de la primera se observa principalmente en la parte sur del área de estudio y la segunda se observa principalmente desde la parte central hacia la parte norte del área de estudio. El espesor de la capa C se estima que tiene entre 100 mts. y 200 mts. según el análisis de prospección

eléctrica. El límite inferior de esta capa hace contacto con el límite superior de la roca basal.

La capa D se piensa que corresponde a la capa eólica de la roca basal transformada en arcilla arenosa. Aunque el valor de la resistividad según la prospección eléctrica se encuentra entre 20-50 Ωm , sin embargo se trata de una capa de baja permeabilidad con un valor de resistividad del registro eléctrico bajo 5-10 Ωm . La distribución se limita a la Quebrada Algarrobal.

La capa E corresponde a la roca basal impermeable y se distribuye en los alrededores del área de estudio. El valor de resistividad según la prospección eléctrica se encuentra entre 24-300 Ωm , sin embargo no ha sido posible confirmar estos datos en los pozos de prueba.

2.6.2 Perfiles hidrogeológicos

Se han elaborado 5 perfiles hidrogeológicos sobre la base de los resultados de las prospecciones eléctricas, pozos de prueba y sus registros eléctricos, cuyos perfiles se detallan en las Figs. I-20 (1/3 a 3/3) y plano de ubicación en la Fig. I-18. Las características de los perfiles se explican a continuación.

Perfil A-B (ver Fig. I-20 (1/3))

Este perfil une el pozo W-3 de la parte noroeste del área de estudio (Agua de Lazo) y Quebrada Boquerón. En el pozo W-3 está el límite superior del estrato de baja permeabilidad (capa C) a 35 cm, pero el nivel del agua es poco profundo con 5 m y forma el acuífero. Aunque en W-1 existe la misma profundidad hasta el estrato de baja permeabilidad, el nivel del agua subterránea es profundo (35 m), por cuya razón forma un acuífero fino que desaparece hacia el este de este punto.

Perfil C-D (ver Fig. I-20 (1/3))

Este perfil se extiende en el centro del área de estudio desde Canto del Agua hacia el este. La roca basal (capa E) de la parte occidental tiene poca profundidad y sobre ella hay un gran depósito (más de 100 m) de estrato de baja permeabilidad (capa C). Sobre el estrato de baja permeabilidad existe un depósito de estrato pedregoso (capa B). El espesor de este estrato se va engrosando hacia el este. Especialmente en la posición del pozo H-1 alcanza una profundidad de 80 m. El nivel del agua subterránea tiene menor profundidad hacia la cordillera de la costa y desde el sondeo geoelectrónico N° 12 y N° 14 está entre 1 y 2 m de la superficie de la tierra. Desde la parte central hacia el este, se va profundizando de manera que desde el sondeo geoelectrónico N° 17 al N° 18 se estima que desaparece el acuífero.

Perfil E-F (ver Fig. I-20 (2/3))

Este perfil atraviesa en dirección este y oeste por la parte sur del área de estudio en forma paralela con el perfil C-D. En ambos extremos del perfil, se ha comprobado la roca basal (capa E) por la prospección eléctrica. En la parte central del perfil existe un grueso depósito (más de 100 m.) del estrato de baja permeabilidad (capa C) de arcilla arenosa o limosa cuyo límite superior se profundiza súbitamente en el pozo W-9. En esta depresión se ha depositado el estrato pedregoso para formar un potente acuífero (capa B).

Perfil G-H (ver Fig. I-20 (2/3))

Este perfil atraviesa la parte central del área de estudio en dirección norte a sur desde Sierra del Nicho hasta Boquerón Chañar. En este perfil, se supone la existencia de la roca basal (capa E) a una profundidad mayor de 140 m en el extremo sur. En la parte superior existe un estrato pedregoso (capa A) hasta el nivel del agua subterránea de 20 a 30 m de espesor. Este es un acuífero formado por arena, ripio y bolones, que va desde el nivel del agua subterránea hasta el estrato de baja permeabilidad. Este espesor del estrato tiene aproximadamente 50 m en las proximidades del pozo W-4 y W-9 de la parte sur, al norte del W-1 se reduce súbitamente quedando a menos de 10 m. en W-1. Con excepción de la parte de extremo sur, el espesor de la acuíclusa se estima entre 100 a 200 m. Asimismo se estima que la permeabilidad de los acuíferos mejora cuanto más al sur se desplace, según el valor de la resistividad obtenida por las prospecciones eléctricas y los registros eléctricos.

Perfil H-I (ver Fig. I-20 (3/3))

Este perfil se extiende desde Boquerón Chañar hasta Quebrada Algarrobal a lo largo de la Quebrada Boquerón. En este perfil, se ha observado el estrato eólico (capa D) que se ha transformado en arcilla arenosa en el extremo inferior de las proximidades del pozo W-6. Aunque el estrato pedregoso del extremo superior tiene un espesor de 20 a 30 m, no se pudo comprobar la existencia de un acuífero grueso debido a que el nivel del agua subterránea se encuentra profundo. Sin embargo, según la prospección eléctrica del No 19, se estima la existencia de un acuífero de baja permeabilidad de forma lenticular. El límite inferior de estos acuíferos muy delgados, se encuentra en contacto con la acuíclusa (capa C) de 50 a 200 m de espesor.

2.6.3 Acuífero

Se ha elaborado las curvas del fondo del acuífero de la Fig. I-21 basándose en el límite inferior de la capa B de los perfiles indicados anteriormente como fondo del acuífero. Según la Fig. I-21, la estructura del acuífero tiene la forma de un valle largo angosto y cerrado en dirección noreste a sudoeste que unen los pozos W-4 y W-9. El fondo del valle más profundo tiene una altura de aproximadamente 240 m. Otro valle de menor profundidad se extiende desde Agua de Lazo hacia

Zanjon a lo largo de la cordillera de la costa. En el lado este de la Estación Algarrobal, la estratificación de la base se agudiza.

De acuerdo con el horizonte y el nivel del agua subterránea, el acuífero del área en estudio se considera freático o se trata de un acuífero semipresionado o sin presión. Por esta razón se ha elaborado las curvas de isoespesor del acuífero de la Fig. I-22 tomando como espesor del acuífero desde la superficie del agua subterránea hasta el límite inferior de la capa B. Según estos datos, el estrato más grueso está a 4 km hacia el norte del pozo W-4 que tiene un espesor de unos 60 m. En torno a este punto se extiende la cota de aproximadamente 40 m en dirección al pozo W-9. Asimismo, en los alrededores de la Estación Algarrobal existe una cota muy angosta de 40 m. Por fuera de la cota de 40 m, corre paralela la cota de 20 m, la cual se expande ampliamente hacia Agua de Lazo.

La parte de un espesor inferior a 20 m, tiene un acuífero excesivamente delgado que queda fuera del objeto de desarrollo. El mejor coeficiente de transmisividad equivalente (T) del acuífero corresponde al pozo W-9 que se encuentra entre 450 y 3.192 m²/día. Asimismo, en el pozo W-3, el valor de T es de 119 a 515 m²/día y en el pozo W-4 de 82 a 243 m²/día. Según estos datos, puede apreciarse que la permeabilidad del acuífero difiere considerablemente según el lugar, aun dentro de la capa B. Para obtener el límite de profundidad de desarrollo de las aguas subterráneas, se ha elaborado la Fig. I-23 que indica las curvas de isoprofundidad del fondo del acuífero. Según la Fig. I-23, la parte más profunda se encuentra a aproximadamente 100 m y en los lugares de menos profundidad, a 20 m, respectivamente desde la superficie del suelo.

2.7 Constante Hidráulica

Los resultados de los datos de bombeo de prueba (ver Cuadro I-12) obtenidos por medio de los seis pozos de prueba que fueron analizados se indican en el Cuadro I-14.

2.7.1 Transmisividad y coeficiente de permeabilidad

La transmisividad del acuífero en la formación de grava arenosa indica valores que varían de medianos a muy altos (T = 82 - 319 m²/día) para los pozos de prueba N^os W-3, W-4 y W-9. La fluctuación del coeficiente de permeabilidad es desde 3,25 x 10⁻³ a 7,69 x 10⁻² cm/seg. El acuífero del pozo W-9 indica la mayor permeabilidad en el área de estudio.

Por otra parte, la transmisividad de la formación de limo arenoso de los pozos de prueba N^os W-1, W-2 y W-6 está dentro de un rango de 1,4 a 11,5 m²/día. Los rangos del coeficiente de permeabilidad van desde 1,07 x 10⁻⁴ a 1,48 x 10⁻³ cm/seg.

2.7.2 Rendimientos específicos

El acuífero del área de estudio es un acuífero no confinado de acuerdo a las características de la formación geológica y del nivel del agua subterránea. El coeficiente de almacenamiento en un acuífero no confinado es igual al rendimiento específico.

El rendimiento específico de W-4 se calculó a partir de los datos de abatimiento en H-1. El valor obtenido fue analizado usando el método semi-logarítmico de Neuman (ver Fig. I-24) Esta cifra es de 0,032. Los rendimientos específicos de W-3 y W-9 se estimaron mediante la capacidad específica, valor de resistividad y tamaño del grano. Sus valores probables son de 0,04 y 0,142, respectivamente.

2.8 Nivel del Agua Subterránea

2.8.1 Nivel del agua subterránea en pozos existentes

La profundidad del nivel de agua subterránea en el área de estudio varió desde menos de 1 a 37 metros bajo la superficie, en Febrero, 1988. El descenso del nivel del agua en los pozos entubados ha sido de alrededor de 10 m. durante los últimos 18 años en Boquerón Chañar. Este descenso también ha sido observado por los habitantes del área.

De acuerdo al informe de Taylor (1947)¹, en esa época (40 años atrás), había vertientes aún en Milla Nueve, Tabalí y Agua del Lazo. El nivel de aguas subterráneas también ha disminuído en cuatro metros en el pozo N^o. 30, en la Estación Algarrobal, durante estos últimos 40 años.

2.8.2 Fluctuación del nivel de agua subterránea

Las mediciones de niveles de agua subterránea han sido realizadas por la Dirección Regional de Aguas en los cuatro pozos excavados seleccionados y un pozo entubado, cada 7 o 10 días, desde Marzo, 1987, y en los seis pozos de prueba y un pozo de observación construído por el equipo de estudio en 1987. Dos registradores de niveles de agua automáticos fueron instalados en los pozos de prueba N^o W-3 y W-4. Estas ubicaciones se ilustran en Fig. I-25.

Los perfiles de los niveles de agua subterránea se obtuvieron de los pozos y vertientes existentes en toda el área de estudio en Septiembre de 1987 y Enero de 1988, los que se observan en las Figs. I-25 y I-26. De acuerdo a estos mapas, el nivel de agua en verano es más bajo que en invierno,

¹. George C Taylor: 1947 Ground Water Studies, province of Atacama, Chile (CORFO)

y la fluctuación anual del nivel de agua subterránea es del orden de 10 cm. en los pozos poco profundos excavados cerca de las montañas costeras.

Las variaciones en los registros de los niveles de agua y de las precipitaciones en 12 pozos de observación desde Marzo de 1987 a Febrero de 1988 se muestran en las Figs. I-27 y I-28. En general, no hay fluctuación anual notable en el nivel de agua durante estos períodos con excepción del Pozo N° N-22 en Canto del Agua.

El nivel de agua de N-22 subió gradualmente después de las fuertes lluvias ocurridas a fines de Julio, 1987, y la diferencia en el nivel de agua entre antes y después de dichas lluvias fue de 2,58 m. El nivel del agua fue constante y luego empezó a disminuir gradualmente a principios de Nov. 1987. Datos interferidos fueron registrados en los marcadores automáticos en el pozo W-3, debido a cortos períodos de bombeo en pozos excavados ubicados a 100 m. del pozo W-3. La interferencia es de 5 cm. en abatimientos mayores. Generalmente se demora 4 a 10 días en recuperar el nivel de agua original.

A continuación se muestra un inventario de las observaciones del nivel de agua en los pozos.

(Unidad: m)

Nº	ELEVACION	DIAMETRO	PROFUN- DEIDAD	NEA*1 28 de agosto 1987	NEA*1 6 de octubre 1987	NEA*1 7 de enero 1988
P-3*2	360,33	0,3	-	23,50	23,50	23,50
N-3*3	323,96	1,2	8,5	6,00	5,85	5,95
N-22*3	229,21	1,0	12,10	8,05	8,09	9,35
N-23*3	332,82	2,0	37,45	36,77	36,88	36,90
N-31*3	437,82	0,2	25,56	22,15	22,11	22,06
W-1*4	366,60	0,2	63,00	-	31,66	31,72
W-2*4	415,39	0,3	82,50	-	34,28	34,26
W-3*4	305,63	0,2	50,00	-	4,57	4,52
W-4*4	327,39	0,3	84,00	-	25,45	25,42
W-6*4	499,14	0,3	61,72	-	29,35	29,22
W-9*4	311,20	0,2	71,00	-	18,75	18,73
H-1*5	327,37	0,08	87,55	-	25,55	25,60

Nota: *1 Nivel de agua estática; *2 Pozo entubado existente;
 *3 Pozo excavado existente; *4 Pozo de prueba;
 *5 Pozo de observación;

2.9 Carga y Descarga

2.9.1 Carga

El flujo del agua subterránea en el área de estudio tiene dos direcciones. Una fluye hacia el Oeste en dirección a Canto

del Agua desde la Quebrada Algarrobal a través del Llano Algarrobal, y la otra fluye hacia Boquerón Chañar a través de la Quebrada Boquerón (ver Fig. I-29). La gradiente promedio del flujo del agua subterránea es de cerca de 1:250 en el centro del área de estudio, y un poco más pendiente al Este y al Oeste que en el centro. La carga del acuífero en el área de estudio ocurre principalmente por el flujo lateral proveniente de la Quebrada Algarrobal de acuerdo con la estructura hidrogeológica y contorno de agua subterránea.

La infiltración de precipitación en el acuífero del área de estudio es efectivamente cero, a causa de la muy escasa precipitación (20 - 30 mm/año) y elevada evapotranspiración (1.400 mm/año). No existe agua superficial perenne en la cuenca de la Quebrada Algarrobal (2.453 km²), área de captación del área del estudio, porque esta cuenca no incluye aportes de la línea de nieve de la Cordillera de Los Andes.

Generalmente, pequeñas cifras de lluvias (30-50 mm./año) caen intensamente en un corto período en el área de captación en la cuenca de la Quebrada de Algarrobal, que está formada por roca base impermeable (ver Fig. I-1). Por lo tanto, la precipitación del área de captación raramente se infiltra a la roca base del área montañosa, escurre hacia la Quebrada Algarrobal y generalmente desaparece mediante evapotranspiración después de un almacenamiento temporal en la superficie o a poca profundidad del subsuelo.

Sin embargo, en pocas ocasiones en varios años, se han producido infiltraciones subterráneas en el estrato permeable de los cursos superiores y medios de la Quebrada Algarrobal, debido a inundaciones en invierno y al derretimiento de la nieve en primavera. El nivel de agua subterránea del pozo subió un metro después de las fuertes lluvias de Julio de 1987, en el Donkey, que se ubica en Quebrada Algarrobal, a 25 km. aguas arriba de la Estación Algarrobal.

La corriente (arroyo) producida por el derretimiento de nieve llegó al Donkey a fines de Septiembre. A mediados de Enero de 1988, la corriente subió, y también el nivel de agua subterránea, en alrededor de 6,85 m. Sin embargo, el arroyo aún no ha llegado al área de estudio, y el nivel del agua subterránea de todos los pozos de esta área no ha subido en forma notable.

Debido al muro subterráneo impermeable de la acuíclusa aguas abajo de la Quebrada Algarrobal, el flujo lateral de agua subterránea hacia el área de estudio es restringido. Más aún, las edades de las aguas subterráneas son de 2.000 a 4.500 años, y no tienen ningún contenido de agua de lluvias recientes (20-30 años atrás). Se considera que el agua subterránea almacenada en el área de estudio fluyó a través de las arenas superiores y de las formaciones de grava cuando el nivel del agua era mayor que el actual.

La carga del agua subterránea se estima por medio de la Ley de Darcy en el cruce de Quebrada Algarrobal y la Carretera Panamericana, según se indica a continuación (ver Fig. I-29).

$$Q = T \times B \times i$$

Siendo:

Q = Carga

T = Transmisividad (1,9 m²/día)

B = Ancho del sector (3.000 m. en Algarrobal)

i = Gradiente hidráulico (12/1.000)

Por lo tanto:

$$Q = 1,9 \text{ m}^2/\text{día} \times 3.000 \times 12/1.000 = 68,4 \text{ m}^2/\text{día}$$

El volumen total anual de precipitaciones en el área de captación se estimó, usando Fig. I-1, según se indica.

PRECIPITACION (mm/año)	AREA DE CAPTACION (km ²)	VOLUMEN TOTAL DE PRECIPITACION (m ³ /año)
60	385	23,1 x 10 ⁶
55	728	40,1 x 10 ⁶
45	620	27,9 x 10 ⁶
35	496	17,4 x 10 ⁶
25	224	5,6 x 10 ⁶
Total	2.453	114,1 x 10⁶

El volumen estimado de carga es equivalente a sólo un 0,02% del volumen total de precipitación anual.

2.9.2 Descarga

A juzgar por los contornos de agua subterránea, el agua subterránea del área de estudio se descarga en las afueras del área de estudio mediante flujo lateral, principalmente desde Canto del Agua y parcialmente por el de Boquerón Chañar. Por otro lado, el agua subterránea es descargada por manantiales, evapotranspiración directa de los manantiales, los pozos poco profundos excavados y evapotranspiración en áreas pantanosas.

El volumen de descarga del flujo lateral de agua subterránea se calcula haciendo uso de la Ley de Darcy en la línea establecida que se indica a continuación. (Ver Fig. I-29).

$$Q = T \times B \times i$$

Siendo:

- Q = Descarga ($m^3/día$)
- T = Transmisividad ($m^2/día$)
- B = Ancho del sector (3.000 m en Algarrobal)
- i = Gradiente Hidráulico (12/1.000).

Usando esta ecuación se realizan estimaciones para cada sección como sigue.

UBICACION	T	B	i	Q
Canto del Agua	2	2.500	8/1.000	40 $m^3/día$
Boquerón Chañar	2	4.000	10/1.000	80 $m^3/día$

De acuerdo al potencial de evapotranspiración estimado por el método de Blaney-Criddle, el uso consuntivo de las totoras que crecen en el área de vegas se estima en un 3,3 mm./día en el área de estudio. La superficie del área se estima en 3,3 km^2 , de acuerdo con la interpretación por medio de topografía aérea. En consecuencia, se espera que el volumen potencial total de evapotranspiración sea cerca de 10.900 $m^3/día$.

Este volumen de evapotranspiración es considerablemente alto en comparación con el flujo de descarga lateral del agua subterránea. La evapotranspiración muestra notables variaciones estacionales lo que ocasiona variaciones del nivel de agua subterránea en el área de Zanjón.

Además, el volumen total de descarga anual de los pozos entubados, pozos excavados y manantiales existentes se estima en alrededor de 300 $m^3/día$. Por lo tanto, el volumen total potencial de descarga en el área de estudio se estima en 11.320 $m^3/día$.

2.9.3 Balance

Comparado con el volumen de carga estimado en Algarrobal, el volumen de descarga total estimado, es superior, lo que indica que el agua subterránea almacenada disminuye en 11.250 $m^3/día$. Por lo tanto, el balance de agua del agua subterránea muestra una tendencia de disminución del agua subterránea almacenada debido al exceso de descarga, lo que se confirma por los largos períodos de disminución de éstas en el área de estudio (ver acápite 2.8.1).

2.10 Fechado

Se llevó a cabo fechado por tritio (3H) en muestras de agua de los pozos de prueba W-3, W-4 y W-9, y de carbono radioactivo en muestras de agua de los pozos de prueba W-3 y

W-9, para investigar el tiempo de retención de agua subterránea en el área de estudio. Los análisis fueron efectuados por el laboratorio de la facultad de Ciencias de la Universidad de Gakushuin en Japón. He aquí los resultados:

2.10.1 Concentración de tritio

N° de Muestra	Concentración de Tritio
W-3	0,3 ± 0,2 T.U.
W-4	0,0 ± 0,2 T.U.
W-9	0,1 ± 0,2 T.U.

(1T.U. = $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$)

Los valores T.U. indican que estas muestras no han incluido ninguna precipitación reciente (desde el decenio de 1960). Estos valores también sustentan la idea de que W-4 y W-9 se componen de precipitación bastante más antigua que W-3.

2.10.2 Fechado por carbono radioactivo

N° código	N° muestra	Edad B.P. (desde 1950)
GAK-13548	W-3	2.170 ± 130 220 B.C. ($\delta^{14}\text{C} = -23,6 \pm 1,2\%$) (muestra $^{14}\text{C}/^{14}\text{C}$ Estandar moderno) = 0,763 ± 0,012
GAK-13549	W-9	4.780 ± 160 2.830 B.C. ($\delta^{14}\text{C} = -44,9 \pm 1,1\%$) (muestra $^{14}\text{C}/^{14}\text{C}$ Estandar moderno) = 0,551 ± 0,011

Teniendo en cuenta todos estos factores, la edad del agua subterránea de W-3 se estima en más de 2.000 años, y la de W-9 en más de 4.500 años. Según el fechado de tritio, el agua de W-4 de W-9 podrían parecer de la misma antigüedad. Se ha establecido así que el agua subterránea en el área de estudio es agua fósil no renovable. La diferencia de edad entre W-3 y W-9 indica que la velocidad de circulación del agua en W-3 es mayor que en W-9.

2.11 Calidad del Agua

El estudio de la calidad del agua se realizó para conocer la dirección del flujo, el origen de las aguas subterráneas, la fuente de recarga y su aptitud como agua para uso agrícola. Con este fin, se realizó la medición de la conductividad

eléctrica (CE) y pH en terreno y el análisis químico sobre 20 ítems para 20 muestras.

2.11.1 Medición en terreno de conductividad eléctrica (CE) y pH

Se realizaron mediciones de CE y pH en terreno en los pozos entubados, norias y manantiales existentes utilizando el medidor de CE y medidor de pH portátil. Asimismo, se describe en las Fig. I-30 a I-32 la cota de CE elaborada sobre la base de estos resultados, juntamente con la ubicación de los puntos de medición.

Los valores de CE de marzo de 1987 son de 850 a 7.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por lo general el valor de CE es bajo en la parte oriental del área de estudio y se eleva gradualmente en dirección al sudoeste. Al oeste de Zanjón, la conductividad eléctrica de los manantiales y las norias de poca profundidad es mejor que en las norias profundas. No se han observado grandes variaciones en comparación con los resultados de la medición de julio de 1987.

El valor CE se elevó considerablemente entre Zanjón y Canto del Agua después de las fuertes precipitaciones de finales de julio, registrándose el valor máximo de 17.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el pozo de Canto del Agua. La investigación de enero de 1988 nos indica que el valor de CE en la noria N-22 disminuyó hasta 9.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, no se observó prácticamente disminución del valor CE en las norias y manantiales que registraron un fuerte incremento de CE. En cambio, en los pozos a lo largo de la Quebrada Boquerón no se alteró el valor de CE, aún después de las fuertes precipitaciones de Julio. El valor normal del pH fluctúa entre 7,0 y 8,3.

La temperatura del agua se encuentra entre 17 y 24°C en los pozos profundos, entre 13 y 24°C en los pozos de poca profundidad y entre 15 y 24°C en los manantiales. Existe una diferencia de temperatura de 5 a 10°C entre el invierno y el verano. Especialmente en los pozos poco profundos, la temperatura del agua esta influenciada por la temperatura atmosférica, y existe una diferencia de aproximadamente 5°C entre un día nublado y uno despejado en una misma estación.

2.11.2 Análisis químico

En el Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM) de Santiago se realizaron los análisis químicos de 20 muestras extraídas desde los pozos de prueba, pozos de estación, manantiales, Río Copiapó y Río Huasco. Los puntos de muestreo se indican en la Fig. I-33 y los resultados de los análisis se detallan en los Cuadros I-29 (1/3 a 3/3).

Los valores CE en los 6 pozos de prueba oscilan entre 990 y 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y se considera que en general son mejores que los de los pozos existentes. La temperatura del agua en los pozos W-1, W-2 y W-6 son altas, entre 28 y 29°C, pero ello se debe a que la bomba de extracción fue operada durante muchas horas con el caudal mínimo, ya que según los resultados obtenidos durante el cómputo de temperatura realizado en el momento del registro de CE, éste había sido de 22 - 24°C. Asimismo, los valores de pH de los pozos de prueba están entre 7,76 y 8,50, indicando una débil alcalinidad.

La dureza del agua de muestreo de los pozos de prueba está dentro del rango de 253 a 623 mg/l de dureza total, acusando una dureza alta. La dureza de carbonato está dentro del rango de 60 a 100 mg/l e indica que la dureza (dureza permanente), por el Ca y Mg de deposición por hervido, es menor que la dureza por la sal de calcio y sal de magnesio que no se deposita.

El valor del ion cloro (Cl) es muy irregular, encontrándose entre 79 y 4.610 mg/l. Dentro de ellos, los valores del pozo N-22 y Peralito tienen valores muy altos, con 2.431 mg/l y 4.610 mg/l respectivamente, lo que los ubica fuera del límite de uso como agua de riego agrícola. Los valores de medición de los pozos de prueba son altos en el pozo W-3 con 310 mg/l y el resto está bajo entre 79 y 170 mg/l.

El boro, salvo en Peralito y algunos otros pozos, está por debajo de 1,0 mg/l. Asimismo, el valor de sustancias disueltas totales (STD) es alto en general incluso el valor mínimo que es de 605 mg/l para el N° 2 (N-31). Con respecto a los pozos de prueba, es algo alto en el pozo W-3 que tiene 1.007 mg/l pero es bajo comparando con los otros pozos existentes.

2.11.3 Clasificación

De acuerdo con los resultados de la clasificación de la calidad del agua por trilinear gramo (Fig. I-34), la mayoría de las muestras se han clasificado como tipo de agua dura sin carbonato (CaSO_4 o CaCl_2) que generalmente se observa en las minas y zonas volcánicas. Estas características corresponden al tipo de agua retenida. Las muestras de agua del N° 1, 8, 9, 10, y 14, y W-6 señalan un tipo de agua alcalina no carbonatada similar al agua del mar. La muestra de agua del N° 2 pertenece al tipo de agua dura con carbonato ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) y este tipo de agua contiene pocas sales y sodio.

En la Fig. I-35 se describe el cuadro de clasificación de la calidad del agua según el Instituto de Sales de Estados Unidos sobre la base de la razón ajustada de la adsorción de sodio (RAS ajustado) y el valor CE. Según esta clasificación, salvo el agua del pozo de prueba W-6 que pertenece al grupo de alta salinidad con mediano sodio (C3-S2), los demás, en

general, pertenecen al grupo de salinidad con bajo sodio (C3-S1). En cambio, la muestra No.8 (A-7) de la zona Zanjón, en Canto del Agua, pertenece al grupo de alta salinidad y alto sodio (C3-S3) y la N°9 (N-19) pertenece al grupo de extrema salinidad de sodio (C4-S3). La N° 10 (N-22) y la N° 14 pueden agregarse a la figura debido a la conductividad eléctrica extremadamente alta (9.194 y 16.959 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente). El Río Huasco (la muestra N°12) pertenece al grupo de mediana salinidad y bajo sodio (C2-S1).

CAPITULO 3. EVALUACION DE LOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRANEA

3.1 Zonas de Aguas Subterráneas

El área de estudio se ha dividido en 7 zonas de aguas subterráneas según la estructura hidrogeológica, permeabilidad y calidad del agua, como se describe en la Fig. I-36. A continuación se explicarán las características de las respectivas zonas de aguas subterráneas.

3.1.1 Zona de la Quebrada Tamarico (La Zona A)

En esta zona, se observa la existencia de un grueso depósito acuífero de excelente permeabilidad, formado principalmente de arena y grava en torno al pozo W-9, ubicado en el Llano del Lagarto, en la ribera derecha de la Quebrada Tamarico, en la parte sur del área de estudio.

El espesor de este estrato es de aproximadamente 50 m. en W-9. El límite inferior tiene una profundidad de 60 m. y el nivel estático es de alrededor de 20 m. El coeficiente de transmisividad (T) de W-9 se encuentra entre 450 y 3.000 m²/día. Esta zona se puede dividir entre la parte A que es gruesa y la parte A' que es delgada; de las cuales, la parte A es la que tiene la mayor potencialidad dentro del área de estudio. Según el resultado de las pruebas de bombeo, se considera excelente haber obtenido una capacidad específica de 4 a 5 l/s/m.

En consecuencia, si no se considerara la interferencia de otros pozos sería posible la extracción de 15 a 20 l/s de cada pozo con una abatimiento del nivel de 3 a 5 m. El valor de pH está en 8,14, indicando débil alcalinidad. La conductividad eléctrica del agua es 990 μ S/cm, lo que es bueno, con una buena 153 mg/l de cloruro. Sin embargo, se trata de agua subterránea estancada por un dique natural en la zona de Zanjón. En cuanto a la edad de las aguas subterráneas, se ha estimado en aproximadamente 4.500 años por los resultados de la medición de datación.

3.1.2 Zona de Quebrada de los Porotillos (La Zona B)

Esta zona corresponde a la parte B y B' que se indica en la Fig. I-36 y es la zona que linda con el norte de Quebrada Tamarico en torno al pozo W-4. La zona B se ha distinguido de la zona A por el coeficiente de transmisividad y por el valor de resistividad de la prospección eléctrica. El valor T que representa al pozo W-4 esta entre 82 y 243 m²/día. Esta zona B tiene mayor grosor del acuífero que la zona A, sin embargo, la potencialidad de extracción es menor debido a la menor capacidad específica. Este sector tiene un potencial de desarrollo que le sigue al de la zona A, estimándose una potencialidad de extracción de 4 a 5 l/s por pozo, ya que la

capacidad específica es menor a 1 l/s/m. La profundidad de desarrollo está dentro de 80 m. y el nivel estático del agua se encuentra en alrededor de 25 m. El valor de pH está en 8,50, indicando una alcalinidad. La conductividad eléctrica del agua es 990 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el agua que contiene de 79 mg/l de cloruro de lo que es bueno.

3.1.3 Zona de Agua de Lazo (La Zona C)

Esta zona está representada por el pozo W-3. Tiene un nivel de agua subterránea alta y se ubica en las partes angostas entre los cerros erosionados y las terrazas. El coeficiente de transmisividad es superior al pozo W-4 con un valor de 119 a 515 $\text{m}^2/\text{día}$. La potencialidad de extracción por pozo es de alrededor de 4 a 8 l/s/m, estimándose una capacidad específica de 1 l/s. El valor de pH está en 8,50. Sin embargo, la calidad del agua es inferior comparada con A y B ya que la conductividad eléctrica de 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con el cloruro de 310 mg/l. Según el resultado de la medición de la datación, las aguas subterráneas de esta zona son 2.000 años más jóvenes que la zona A y B. Esto se debe a que el flujo de las aguas subterráneas es mejor que en la zona de Quebrada Tamarico al observar la cota de la aguas subterráneas.

3.1.4 Zona de Quebrada Boquerón (La Zona D)

Esta zona tiene un acuífero muy delgado, debido al profundo nivel de las aguas subterráneas, y prácticamente carece de potencial de desarrollo. Tal como se evidencia por el coeficiente de transmisividad del pozo W-2 entre 1,1 y 1,4 $\text{m}^2/\text{día}$, el valor de T del pozo existente en Boquerón Chañar es de 1 a 5 $\text{m}^2/\text{día}$. El caudal específico de W-2 es de 0,1 l/s/m. Los valores de pH de los pozos de prueba de la zona están entre 7,90 y 8,50. La calidad del agua están entre 1200 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica, con los valores de cloruro de pozos de prueba están entre 106 y 170 mg/l.

3.1.5 Zona de Zanjón (La Zona E)

El nivel del agua subterránea de esta zona es alto y existen numerosas vegas, manantiales y norias. Por esta razón, la evaporación es acelerada, la calidad del agua es mala con entre 3.000 y 7.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica con los valores de cloruro de pozos y manantiales entre 339 y 2.431 mg/l. y no se presta para la explotación de las aguas subterráneas. Los valores de pH de los pozos y manantiales de la zona están entre 7,6 y 7,8. Según los resultados de las prospecciones eléctricas, existe un depósito grueso de la capa de baja permeabilidad, la roca basal tiene poca profundidad y se construye como del tranque subterráneo hacia la zona de la Quebrada Tamarico.

3.1.6 Zona del Llano de la Jaula (La Zona F)

La roca basal de esta zona se encuentra a poca profundidad y existen algunas rocas intrusivas. El nivel del agua subterránea es profunda y no existen acuíferos. En consecuencia, no existe ningún potencial para el explotación.

3.1.7 Zona de Estación Algarrobal (La Zona G)

Esta zona se ubica en el fondo del valle de la Quebrada Boquerón y existen varias norias. El nivel del agua tiene poca profundidad con 20 m a 25 m y la calidad del agua es buena, con aproximadamente 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad eléctrica. El valor de pH está en 7,6, indicando una alcalinidad. La conductividad eléctrica del agua es 990 y 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el agua que contiene de 89,6 ppm de cloruro de lo que es bueno. Según los resultados de las prospecciones eléctricas, se ha confirmado que existen acuíferos en un área limitada y se considera que la potencialidad de desarrollo es pequeña.

3.2 Rendimiento Potencial de Explotación

3.2.1 Conceptos generales

Si se considera el agua subterránea como recurso de agua natural renovable, para lograr mantener este recurso indefinidamente, el rendimiento puede ser limitado a un caudal inferior al monto neto del agua suministrada a la cuenca, lo cual se denomina rendimiento sostenido.

Sin embargo, el concepto de rendimiento sostenido no es aplicable en el área de estudio, porque no se espera que el acuífero del área de estudio tenga una recarga adecuada y relleno forzado debido a su estructura hidrogeológica. Además, la edad del agua subterránea se fijó en 2.000 a 4.500 años. Por lo tanto, el almacenamiento de agua subterránea en el área de estudio se considera como una fuente natural no renovable.

Entonces el rendimiento potencial de agua subterránea en el área de estudio se define como rendimiento minero debido a su analogía con lo que ocurre con los metales, por consiguiente el agua bombeada debe provenir de almacenamientos dentro del acuífero.

El rendimiento potencial de desarrollo es determinado para mantener un rendimiento constante y la buena calidad del agua del acuífero, en el área potencial de explotación de aguas subterráneas. El concepto de rendimiento potencial de explotación es una cierta cantidad de agua, que se puede extraer de un acuífero dentro de niveles de agua críticos.

3.2.2 Rendimiento potencial

Los acuíferos principales de esta área son de condiciones no confinadas. El rendimiento potencial de los acuíferos no confinados es el monto total de agua que es liberada por la fuerza de gravedad desde las porosidades de formaciones portadoras de agua. La cantidad de agua que una unidad de volumen del material acuífero entrega luego de ser drenado por la gravedad es llamada "rendimiento específico".

Según lo expuesto en el acápite 3.1.1, existe la posibilidad de explotación de agua subterránea en cuatro zonas de entre las siete, a saber, zonas A, B, C y G, y no existen posibilidades de explotación en las demás.

Por lo tanto, el rendimiento potencial se obtiene multiplicando la capacidad del acuífero por el rendimiento específico en cada zona de explotación potencial de agua subterránea, de la siguiente manera.

Zona de agua Subterránea	Grosor del Acuífero (m)	Capacidad del Acuífero (m ³)	Rendimiento del Acuífero (-)	Rendimiento Potencial (m ³)
A	10	376 x 10 ⁶	0,14	52,6 x 10 ⁶
	20	666 x 10 ⁶	0,14	93,2 x 10 ⁶
	40	1.056 x 10 ⁶	0,14	148,0 x 10 ⁶
B	10	462 x 10 ⁶	0,032	14,8 x 10 ⁶
	20	837 x 10 ⁶	0,032	26,8 x 10 ⁶
	40	1.137 x 10 ⁶	0,032	36,4 x 10 ⁶
	60	1.207 x 10 ⁶	0,032	38,6 x 10 ⁶
C	10	102 x 10 ⁶	0,04	4,1 x 10 ⁶
	20	185 x 10 ⁶	0,04	7,4 x 10 ⁶
G	10	71 x 10 ⁶	0,03	0,5 x 10 ⁶
	20	126 x 10 ⁶	0,03	3,8 x 10 ⁶
	40	157 x 10 ⁶	0,03	4,7 x 10 ⁶

3.2.3 Nivel de agua crítico

Es necesario definir el nivel de agua crítico para mantener un rendimiento constante y buena calidad en la producción de los pozos, debido a que el grosor del acuífero libre se disminuye mediante el descenso del nivel freático. De acuerdo con los resultados de los registros de rendimiento eléctrico de los pozos de prueba, la permeabilidad del acuífero indica un valor más alto en la parte superior del acuífero. En consecuencia, el agua de bombeo de esta área podría mantenerse por el agua subterránea almacenada en la parte superior del acuífero, por lo que el nivel del agua de

bombeo debe mantenerse en o casi sobre la parte superior de la rejilla.

Además es importante proteger los acuíferos de explotación potencial contra la intrusión de agua salada, ya que la parte oeste del área de estudio contiene el agua de mayor salinidad (CE = 3.000 - 8.000 μ S/cm). Si el agua salina se traslada a otros puntos del área de estudio, el acuífero se contaminará con más sal. Por lo tanto, el nivel del agua subterránea debe mantenerse sobre los 280 m. sobre el nivel del mar, nivel observado en las cercanías de Zanjón.

En consecuencia, el nivel del agua crítico es restringido por el nivel del agua subterránea de Zanjón, 280 m. sobre el nivel del mar, y/o la profundidad de la parte superior de la rejilla, lo que se indica a continuación.

Zona de Agua Subterránea	A	B	C	G
Nivel de agua estática (m)	19	26	5	23
Nivel del agua a 280 m. sobre el nivel del mar (m)	31	47	25	134
Límite superior del filtro(m)	37	36	20	30
Nivel crítico del agua (m)	31	36	20	30
Abatimiento crítico* (m)	12	10	15	7

Nota: * El abatimiento crítico es la distancia entre el nivel estático y el nivel crítico del agua.

3.2.4 Rendimiento potencial de explotación

El volumen total de rendimiento potencial es la cantidad de agua suministrada al bajar totalmente el nivel del agua del acuífero. Es un hecho que el rendimiento potencial está restringido por un abatimiento crítico, según se menciona en el párrafo 3 de este capítulo. La relación del rendimiento potencial y el abatimiento crítico se da en Fig. I-37.

Este rendimiento potencial es la cantidad de agua aparente, porque la estimación del rendimiento potencial de explotación puede existir sobre la hipótesis de que el nivel del agua en el acuífero disminuye igualmente al bombear en toda el área involucrada, sin reabastecimiento. Pero cualquier pozo al ser bombeado, es rodeado por un cono de depresión de superficie del agua subterránea. Debido a que el abatimiento dentro del pozo bombeado es menor que en cualquier otro lugar del acuífero, el abatimiento es menor a mayor distancia desde el pozo.

Además, para poder mantener el desarrollo del rendimiento potencial seguro, durante ciertos periodos, generalmente se consideran dos factores: fluctuaciones del nivel de agua subterránea y uso consuntivo.

Fluctuaciones del nivel del agua subterránea

De acuerdo al monitoreo del nivel de agua, desde Septiembre de 1987 hasta Febrero de 1988, los niveles de agua en los pozos de prueba eran casi estables, con la excepción del W-3, el que es interferido por pozos excavados poco profundos. Sin embargo, el nivel del agua de algunos pozos y vertientes existentes es más bajo que hace 18 ó 40 años. La disminución del nivel del agua de algunos pozos fluctúa entre 4 - 10 m. según se menciona en la sección 2.8.

Uso consuntivo

De acuerdo al estudio de descarga, la sección 2.9, se estimaron altos usos consuntivos, de 10.900 m³/día, en el área de vegas que se encuentra en la zona del Zanjón (Zona E).

En consideración a los temas y factores mencionados, el rendimiento potencial de explotación puede limitarse a una cantidad menor al rendimiento potencial, en proporción al abatimiento crítico. Entonces, el rendimiento potencial de desarrollo se estima en 60% del rendimiento potencial, el que se estima por abatimiento crítico. El rendimiento de cada zona se señala como sigue.

Zona de aguas Subterráneas	Rendimiento Potencial	Rendimiento Potencial en abatimiento crítico	Rendimiento Potencial de Explotación
A	148,0 x 10 ⁶ m ³	60 x 10 ⁶ m ³	36 x 10 ⁶ m ³
B	38,6 x 10 ⁶ m ³	15 x 10 ⁶ m ³	9 x 10 ⁶ m ³
C	7,4 x 10 ⁶ m ³	6 x 10 ⁶ m ³	3,6 x 10 ⁶ m ³
G	4,7 x 10 ⁶ m ³	1 x 10 ⁶ m ³	0,6 x 10 ⁶ m ³

3.3 Evaluación Según las Normas de Calidad del Agua de USDA y FAO

3.3.1 Evaluación según las normas de USDA

A continuación, se tratará de tipificar las muestras de los pozos de prueba (ver Cuadros I-15 (1/3 a 3/3) en base a las normas de agua de riego, en relación a la medición de las sales y sodio, de USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) (ver Cuadros I-16 y I-17). Todas ellas tienen los valores de CE entre 990 y 1.709 µS/cm, SDT entre 720 y 1.007 mg/l, y Cl entre 79 y 310 mg/l. El W-3 pertenece completamente al grupo de aguas de alta salinidad. En cuanto a los pozos restantes sólo por el Cl pertenecen al grupo de mediana salinidad.

En consecuencia, en el caso de utilizarse el agua subterránea del área de estudio, debe procurarse un drenaje eficaz prestando siempre atención al control de la sal. En

cuanto al sodio, los 6 pozos están en el grupo de agua de bajo sodio, ya que se encuentra baja el valor 10 según la indicación ajustada RAS y puede utilizarse en todo tipo de suelos sin llegar a un nivel dañino por intercambio del sodio.

3.3.2 Evaluación según normas de FAO

Al evaluar el agua del área de estudio (ver Cuadros I-15 (1/3 a 3/3)) según las normas de FAO para el agua de riego (ver Cuadro I-18) no hay mayores impedimentos en el uso de agua, salvo en el pozo W-6, que tiene un índice sobre 9, que es el límite de los cultivos sensibles, según RAS ajustado. En lo que respecta al boro (B), no existen problemas y el pH está en general dentro de los límites normales.

3.4 Area Propuesta para Explotación de Agua Subterránea

Basados en los estudios antes mencionados el potencial de explotación de cada zona de agua subterránea según se indica en la Fig. I-36 se evalúa de la siguiente forma:

Zona de agua Subterránea	Rendimiento Potencial de Explotación (m ³)	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	Disponibilidad de agua subterránea
A. Zona de Quebrada Tamarico	36 x 10 ⁶	1.000-1.100	moderada a alta
B. Zona de Quebrada de Los Porotillos	9 x 10 ⁶	900-980	moderada
C. Zona Agua de Lazo	3,6 x 10 ⁶	1.500-2.000	moderada
D. Zona Quebrada Boquerón	-	1.000-2.000	nula o baja
E. Zona Zanjón	-	3.000-7.000	nula
F. Zona Llano de la Jaula	-	-	nula
G. Zona Estación Algarrobal	0,6 x 10 ⁶	980-1.000	baja

La disponibilidad de agua subterránea se define de la siguiente manera:

- Moderada a alta: Es posible extraer de un pozo un caudal de descarga de 15 l/s más o menos con abatimiento del nivel del agua permisible.
- Moderado: Es posible extraer de un pozo un caudal inferior a 5 l/s, dentro de un margen de abatimiento de los niveles freáticos permisible.
- Bajo: Es posible la extracción desde un pozo de un caudal inferior a 0,1 l/s bajo los límites de abatimiento de los niveles freáticos permisibles.

- Nula: Cuando una extracción desde un pozo es menos de 0,1 l/s dentro de un muy corto periodo de bombeo más allá del abatimiento permisible del nivel freático o cuando no hay agua.

Como resultado de la evaluación de cada zona de agua subterránea, el área más prometedora para la explotación de agua subterránea es la Zona A (Zona Quebrada Tamarico). La Zona B también es recomendable para su explotación, pero las otras zonas no son recomendables pues tienen acuíferos de poca o ninguna capacidad de rendimiento potencial.

El área la explotación de agua subterránea para el desarrollo agrícola se ha elegido entre las dos zonas A y B. Estas dos zonas están divididas a su vez en dos distritos por una línea de isoespesor del acuífero de 40 m. según se indica en la Fig. I-22.

Por lo tanto, el grosor del acuífero en los distritos exteriores es menor de 40 m., lo cual es muy delgado para perforar pozos de producción para explotación sistemática de aguas subterráneas. En consecuencia, el distrito A' y el B' deben ser excluidos del área de explotación potencial de aguas subterráneas.

CAPITULO 4. PLAN DE EXPLOTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

Según los resultados de la evaluación de recursos de aguas subterráneas, el plan de explotación de aguas subterráneas puede decidirse por las siguientes etapas:

- 1) estandarización del pozo de producción,
- 2) determinación de intervalos entre pozos,
- 3) selección de su ubicación,
- 4) determinación de su número,
- 5) predicción de niveles de agua,
- 6) selección de área de explotación,
- 7) plan de explotación y período, y
- 8) sugerencias de gestión de aguas subterránea.

4.1 Estandarización de Pozos de Producción y Determinación del Intervalo entre Ellos

El diseño del pozo de producción ha sido estandarizado en dos tipos según resultados de los pozos de prueba W-9 y W-4 que representan las dos situaciones predominantes de permeabilidad, como sigue:

Tipo de Pozo	Lugar	Caudal (l/s)	Diámetro (mm)	Profundidad (m)	Long. de Rejilla (m)
A	Zona A	15	300	70	30
B	Zona B	5	200	70	30

El diseño estándar de pozo de producción aparece en la Fig. I-38. El tamaño de la perforación debe ser al menos 150 mm mayor que el calibre de la tubería de revestimiento. Su profundidad debe ser de 70 m. La rejilla de pozo debe ser de tipo rejilla de ranura continua de igual tamaño que el tubo de revestimiento. El material de la rejilla debe ser acero galvanizado de bajo contenido en carbono. La rejilla de pozo de ranura continua proporciona una mayor área de captación en su superficie que cualquier otro tipo.

La velocidad de entrada a través del área de entrada mayor es baja, reduciéndose así la pérdida del pozo y evitándose así el ingreso de arena al mismo. A su vez, esto prolonga las vidas útiles de pozo, bomba e instalaciones de riego.

En el caso de sistemas de riego por goteo, es de especial importancia que el agua no contenga arena, porque estos sistemas son fácilmente perjudicados por ella.

Usualmente, la relación de apertura de la rejilla normal ranurado es de aproximadamente 2-3%, pero uno ranurado en

continuo presenta una relación de apertura de aproximadamente 20% con anchura de ranura de 1,5 mm.

La caudal de bombeo recomendable es de 15 l/s para pozos tipo A en zona A y 5 l/s para tipo B en zona B. Los resultados de las pruebas de bombeo indican que el nivel de agua en los pozos W-9 y W-4 tiende a estabilizarse a partir del cuarto día del comienzo del bombeo. Sin embargo, el cono de extracción aumentaría y se profundizaría a un ritmo decreciente con el tiempo, porque no existe suficiente recarga lateral del área colindante para mantener el caudal de bombeo.

Por ello, es importante espaciar los pozos individuales para reducir uniformemente la superficie de agua subterránea en toda el área del proyecto. El espaciado del pozo se obtiene del radio de influencia de un pozo estándar que se calcula a partir de las constantes hidráulicas de los pozos de prueba.

El radio de influencia se obtiene de la fórmula modificada no equivalente como sigue:

$$W(u) = 4\pi T/Q \times 0,001$$

Siendo: $W(u)$ una función del pozo, T la transmisividad, Q la descarga del pozo, 0,001 el valor de captación a radios de influencia en m.

El argumento u se obtiene mediante:

$$u = R^2 S / 4tT = b^2$$

Por consiguiente:

$$R = 2b / \sqrt{TxtS}$$

Siendo:

S el coeficiente de almacenamiento y t el tiempo.

Con los datos de pruebas de bombeo, el radio de influencia se calcula por las anteriores ecuaciones, así:

Tipo de Pozo	Lugar	Q (l/s)	T (m ² /d)	S (-)	t (día)	R (m)
A	Zona A	15	450	0,14	6	547
					8	631
					10	706
B	Zona B	5	82	0,032	6	519
					8	599
					10	669

El valor de transmisividad (T) se calcula por el método de Thiem. Este método es aplicable a este caso porque el nivel de agua ha permanecido casi estable desde el término del prueba de bombeo. El tiempo de bombeo es la media de diversos

casos. Según estos resultados anteriores, se propone que el intervalo entre pozos sea de entre 1.100 y 1.400 m.

El programa de bombeo semanal comprenderá 6 días de bombeo y uno de reposo. El radio de influencia será de unos 550 m, a razón de 6 días/semana de bombeo. Por ello, el intervalo entre pozos debe ser igual o superior a 1.100 m. Como sólo se descansa un día a la semana, debería haber un margen ulterior de 100 m para el radio de influencia. Por ello, el intervalo entre pozos debe ser de 1.300 m o superior.

4.2 Selección del Lugar de los Pozos y Area de Explotación

Los lugares de construcción de los pozos deben seleccionarse para óptima utilización del agua. Las condiciones de su selección deben ser las siguientes:

- Distancia entre pozos mínima de 1.300 m.
- Situados donde el espesor del acuífero exceda los 40 m.
- Donde el nivel de agua subterránea esté a poca profundidad.
- El curso de quebradas y terrenos de propiedad privada se excluyen del plan de selección de lugares de construcción de pozos.

Se proponen seis pozos de producción tipo A en la zona A y uno de tipo B en la zona B. Reducirán uniformemente el nivel de agua en las zonas A y B. Los resultados se ilustran en la Fig. I-39.

Los seis pozos tipo A deben suministrar $7,800 \text{ m}^3$ día desde la zona A donde el rendimiento potencial total de explotación ha de ser de $36 \times 10^6 \text{ m}^3$ según el acápite 3.2.4. Así, estos seis pozos tipo A podrían suministrar 7.800 m^3 al día en operación continua las 24 horas, durante 4.615 días, casi 13 años.

La caída en el nivel de agua subterránea en los pozos propuestos tipo A de la zona A, debido a la interferencia entre pozos, después de 13 años de bombear, se ha estimado con la fórmula inequivalente entre 7,9 y 8,5 m, según la Fig. I-40.

La capacidad del pozo tipo B, sin embargo, es demasiado pequeña para que su explotación resulte económica, porque el pozo tipo B tiene una ínfima capacidad específica en comparación con el tipo A. También, la duración de la explotación del agua, estimada por el nivel crítico del agua, debido a interferencias entre los pozos de la zona A, suponiendo un rendimiento de pozos de aproximadamente 430 m^3 al día en continuo, será de sólo 5,5 años desde el comienzo de los bombeos. Sobre la base de los anteriores resultados, el pozo tipo B en la zona B no es recomendable para el plan de regadío.

Como resultado de estas consideraciones, se han seleccionado los lugares de perforación propuestos según la Fig. I-41.

Lugar propuesto No.1: Extremo suroeste de la zona A, a 1 km al suroeste del pozo de prueba W-9.

Lugar propuesto No.2: A 1,0 km al noreste del pozo de prueba W-9.

Lugar propuesto No.3: A 2 km al norte del W-9 y en la ribera derecha de la Quebrada Lagarto.

Lugar propuesto No.4: A 0,5 km al sureste del W-9 por el camino existente.

Lugar propuesto No.5: Entre el lugar propuesto No. 4 y el No. 6, a 1,5 km al noreste del pozo W-9.

Lugar propuesto No.6: Entre pozos de prueba W-4 y W-9, a 1,5 km al este del lugar propuesto No.5.

4.3 Plan de Explotación y Plazo

Como se explica anteriormente, la explotación debe realizarse mediante seis pozos tipo A (Fig. I-38, caudal de bombeo 15 l/s, diámetro 300 mm, profundidad 70 m, longitud de rejilla 30 m) en la zona A, según la Fig. I-41. El rendimiento potencial de la zona A es de $36 \times 10^6 \text{ m}^3$. La duración del proyecto se calcula dividiendo el rendimiento potencial de explotación por la tasa de consumo anual de agua (véase Anexo V).

Cultivo	Caudal máx. día (m^3)	Caudal medio-día (m^3)	Consumo anual de agua (m^3)	Pozos (No.)	Duración del proyecto (año)
uva	880	362	132.200	6	45,4
kiwi	796	328	119.820	6	50,1
durazno	776	343	125.320	6	47,9
tuna	1.320	800	292.050	6	20,5
kiwi + tuna	- kiwi		119.820	5	40,1
	- tuna		292.050	1	40,1
uva + tuna	- uva		132.200	5	37,8
	- tuna		292.050	1	37,8

De los anteriores cálculos se desprende que la duración del periodo sería mínima en el caso de la tuna (20 años), mientras que las otras tres cosechas y sus combinaciones, que requieren menos agua de regadío, podrían durar entre 37 y 50 años.

4.4 Gestión del agua Subterránea

Son precisas una explotación y gestión óptima para utilizar el agua subterránea. Es necesario evitar la sobreexplotación, para mantener la calidad y cantidad del agua subterránea durante toda la vida del proyecto, a la vista de la deficiente recarga y su casi nula renovabilidad. La explotación del agua subterránea en el área del proyecto es en efecto sólo justificable si la localización de los pozos y su explotación se basan en su uso planificado como se propone en este proyecto. Por ello, la gestión del agua subterránea debe llevarse a cabo con el debido respeto a los rendimientos potenciales de explotación y al nivel freático crítico.

Es necesario calibrar las condiciones del agua subterránea del campo antes y después del comienzo de su explotación para consolidar la relación entre el caudal y los niveles de agua, y para confirmar las estimaciones base de este proyecto. La medición de caudales y la observación de los niveles de aguas subterráneas en el área del proyecto deben practicarse constantemente para cada pozo de producción. Los seis pozos de prueba y uno de observación construido por el equipo de estudio JICA deben utilizarse como pozos de observación a largo plazo del nivel del agua para observar la fluctuación del nivel de agua subterránea en el área del estudio. Estos datos debe registrarlos y administrarlos la Dirección Regional de Aguas, que debe establecer y vigilar las normas de explotación de aguas freáticas.

El entendimiento y la cooperación entre agencias interesadas y el usuario son indispensables para la explotación de las aguas subterráneas. Si es preciso, habrá que designar una organización supervisora.

CAPITULO 5. LISTA DE LOS EQUIPOS DE PROSPECCION
SUMINISTRADOS Y UTILIZADOS EN EL ESTUDIO

Se suministró y fue utilizado por el equipo del estudio el siguiente equipo.

LISTA DE EQUIPO DE PROSPECCION

Equipo de registro eléctrica (OYO Corporation)
- Geologger 300 Modelo 3115 y pila de almacenamiento
- Geologger Handwinch Modelo 3993
- Batímetro Modelo 3835

Medidor de calidad del agua (conductividad eléctrica)
(TOHO Dentan Co., LTD.)
- Modelo EST-3 con bobina

Medidor de taladrados-corriente (TOHO Dentan Co., LTD.)
- Modelo CM-30S con bobina

Tomador de muestras de agua (Yoshino Keiki) x 2 conjuntos
- Modelo Y-561

Medidor portátil de nivel de agua (Kasuga Denki Inc.)
x 2 conjuntos
- Modelo NP-10

Registrador de nivel de agua (Nakaasa Instruments)
x 2 conjuntos
- Modelo W-731

Carcasa para registrador de nivel de agua
(Nakaasa Instruments) x 2 conjuntos
- Modelo KD-80

CUADROS

Cuadro I-1 PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL EN EL ALREDEDOR DEL AREA DE ESTUDIO (1971-1986)

(Unidad: mm)

Mes Estación	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	Año
COPIAPO	0,0	0,0	0,7	0,2	0,8	2,4	6,2	2,0	0,4	0,0	0,0	0,0	12,7
VALLENAR	0,0	0,0	1,2	2,2	5,4	4,6	16,3	6,8	0,9	1,0	0,0	0,0	38,4
HUASCO	0,0	0,0	0,6	2,8	1,4	2,5	21,7	4,5	0,4	0,3	0,0	0,0	34,2
LOS LOROS	0,0	0,0	1,1	2,2	2,3	3,7	14,2	7,8	1,1	0,3	0,0	0,0	32,7
CONAY	0,8	0,2	0,9	10,7	14,2	19,2	33,6	10,4	1,7	1,2	0,1	0,0	93,0
E. LAUTARO	0,5	0,4	0,9	2,7	3,8	6,5	11,1	6,3	1,9	1,1	0,2	0,0	35,4
MANFLAS	0,6	0,1	1,4	4,3	4,1	9,3	15,3	5,7	2,8	0,8	0,0	0,0	44,4

Cuadro I-2 PRECIPITACIONES ANUAL Y MAXIMA DIARIA (1979 - 1986)

Estación	Prec.Prom.	Prec.Max.	Prec.Min.	Prec.Max.
	Anual (mm)	Anual (mm)	Anual (mm)	Diaria (mm)
COPIAPO	18,7	45,0	0,5	29,0
VALLENAR	49,8	114,6	3,0	54,5
HUASCO	44,0	116,5	0	62,0
LOS LOROS	44,1	117,5	3,9	57,0
CONAY	105,8	245,4	7,0	118,7
E. LAUTARO	45,0	127,5	4,5	51,5
MANFLAS	53,7	127,0	0	47,0

Cuadro I-3 COMPARACION DE PRECIPITACION MAXIMA DIARIA

(Unidad: mm)

Estación	P e r í o d o	
	25-26 julio, 1987	1979 - 1986
COPIAPO	36,0	29,0
VALLENAR	77,0	54,5
HUASCO	54,0	62,0
LOS LOROS	73,5	57,0
CONAY	84,6	118,7
E. LAUTARO	69,5	51,5
MANFLAS	64,0	47,0

Cuadro I-4 INVENTARIO DE POZOS ENTUBADOS EXISTENTES

No.	Nombre	Ubicación m	Diámetro m	Profund. m	NEA	Nota
P- 1	CF-423	B. Chañar	-	-	-	Abandonado
P- 2	CF-433	B. Chañar(25-A)	0,3	30	-	En uso
P- 3	35-A	B. Chañar	0,3	-	22,61	En condic.
P- 4	35-A	B. Chañar	0,3	-	29,79	En uso
P- 5	Pit	B. Chañar	6,6	-	22,37	Minero
P- 6	No.45	B. Chañar	0,088	-	25,04	Abandonado
P- 7	CF 683	B. Chañar(S6)	0,088	35	29,49	Abandonado
P- 8	No. 44	B. Chañar	0,088	-	24,03	Abandonado
P- 9	CF 644	Hac. Y.Buenas	0,25	-	-	Abandonado
P-10	Pozo-2	--	0,3	80	29,8	En condic.
P-11	Pozo-1	--	0,3	80	28,8	En condic.
P-12	S 14	--	-	-	-	Abandonado
P-13	CF 667	B. Chañar(S5)	0,3	50	33,65	Abandonado
P-14	CF 706	B. Chañar (S7)	-	-	-	Abandonado

NOTA: P-1, P-9, P-12 y P-14 fueron rellenados con materiales extraños. Se adjuntan los registros de los pozos P-4, P-7, P-9, P-13 y P-14 respectivamente (Fig.2101).

Cuadro I-5 INVENTARIO DE NORIAS EXISTENTES

No.	Nombre	Ubicación	Diámetro	Prof. Noria	NSA	Prof. Agua
			m	m	m	m
N- 1	--	M. Doce	1,2	13,4	-	Seco
N- 2	--	M. Doce	1,2	12,8	12,2	0,60
N- 3	Vergara	M. Nueve	1,1	8,5	5,9	2,60
N- 4	Trujillo	M. Nueve	1,2	7,02	6,41	0,61
N- 5	Araya	M. Nueve	2,1	7,52	5,72	1,80
N- 6	Araya	M. Nueve	1,5	9,60	-	Seco
N- 7	--	Tabalí	1,8	6,1	-	Seco
N- 8	--	Hac. Y. Buenas	2,3	17,14	16,30	0,84
N- 9	--	--	1,6	5,90	5,65	0,25
N-10	Leyles	Los Molles	1,2	2,13	1,83	0,30
N-11	Castilla	Agua de Lazo	L2,2;B2,2	3,55	2,11	1,44
N-12	Castilla	Agua de Lazo	L5;B3,5	3,3	1,2	2,10
N-13	--	Aguadita	1,0	1,89	1,21	0,78
N-14	Salvadore	Ma. de la Paz	1,5	4,40	2,75	1,65
N-15	Torres	Zanjón	L2,2;B2,2	5,50	0,92	4,58
N-16	Velasquez	Tamarugo	2,1	5,08	3,89	1,19
N-17	Velasquez	Tamarugo	2,0	3,69	2,49	1,20
N-18	Olivares	Sas Mai	1,1	1,58	1,08	0,5
N-19	Perez	San Juan	1,5	2,90	1,50	1,40
N-20	--	Canto del Agua	1,2	2,90	1,50	1,40
N-21	--	Canto del Agua	1,5	5,26	4,67	0,59
N-22	--	Canto del Agua	1,0	12,1	9,64	2,46
N-23	--	--	2,0	37,45	36,85	0,60
N-24	--	--	1,9	57,01	-	Seco
N-25	--	--	1,7	34,66	-	Seco
N-26	--	Que. Chañar	2,0	40,70	-	Seco
N-27	--	Algarrobal	1,5	36,60	-	Seco
N-28	--	Algarrobal	1,0	18,61	-	Seco
N-29	--	Algarrobal	1,0	19,22	-	Seco
N-30	--	Est. Algarrobal	1,0	25,32	24,50	0,82
N-31	--	Est. Algarrobal	1,2	25,26	22,20	2,24
N-32	--	Est. Algarrobal	1,2	22,12	-	Seco
N-33	--	Algarrobal	1,2	25,20	-	2,50
N-34	CMP	M. Quince	1,2	28,55	-	Seco

Cuadro I-6 INVENTARIO DE MANANTIALES

No.	Nombre	Ubicación	Tipo	Potencia de descarga
A- 1	--	Yerbas Buenas	Manantial	Pobre
A- 2	--	Aguadita	Pantano	Muy pobre
A- 3	Salvadore	Ma.de la Paz	Manantial	Muy pobre
A- 4	--	Peralito	Manantial	Muy pobre
A- 5	--	Romerito	Pantano	Muy pobre
A- 6	Rivera	Casa de Tabla	Manantial	Pobre
A- 7	Rivera	Casa de Tabla	Manantial	Poco
A- 8	Olivares	Sas Mai	Manantial	Pobre
A- 9	--	T. Chorrillo	Manantial	Poco
A-10	--	M. Flores	Manantial	Pobre
A-11	Perez	El Cori	Manantial	Muy pobre
A-12	GMSMDA	Agua Amarga	Pantano	Poco

Cuadro I-7 COMPARACION DEL NIVEL DE AGUA SUBTERRANEA Y RESULTA DO DE ANALISIS EN SONDEO ELECTRICO.

No. de Punto	Resistividad sobre Napa Freática (Ω .m.)	Nivel de Agua Subterránea Determinada (m.)	Resultado de Análisis en Sondeo Eléctrico	
			Profundidad (m.)	Valor de Resistividad Determinada (Ω .m.)
2	510/ 25.500/340	22,6	21	= 7
3	105/ 26/ 116	30	36	= 9
6	110/ 165/ 100	5 - 9	15	= 25
11		2	1 = 11	
12		6 - 9	1 = 6,6	
13		0	1 = 1,4	
14		0	1 = 8,6	
19	3.800/ 270/ 110/ 300	22	22	= 25
23	210/ 84	36,8	34	= 14
31	210/ 105	29,8	12 - 72	= 38,9
32	190/ 475/ 76	28,8	29	= 24

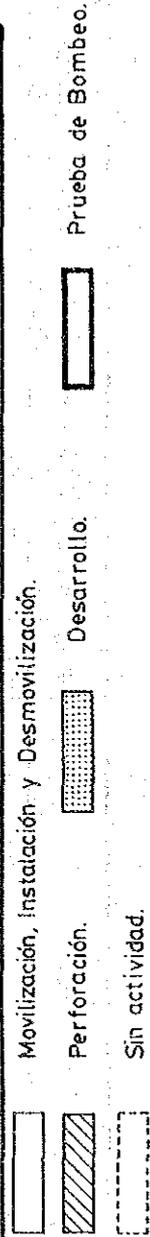
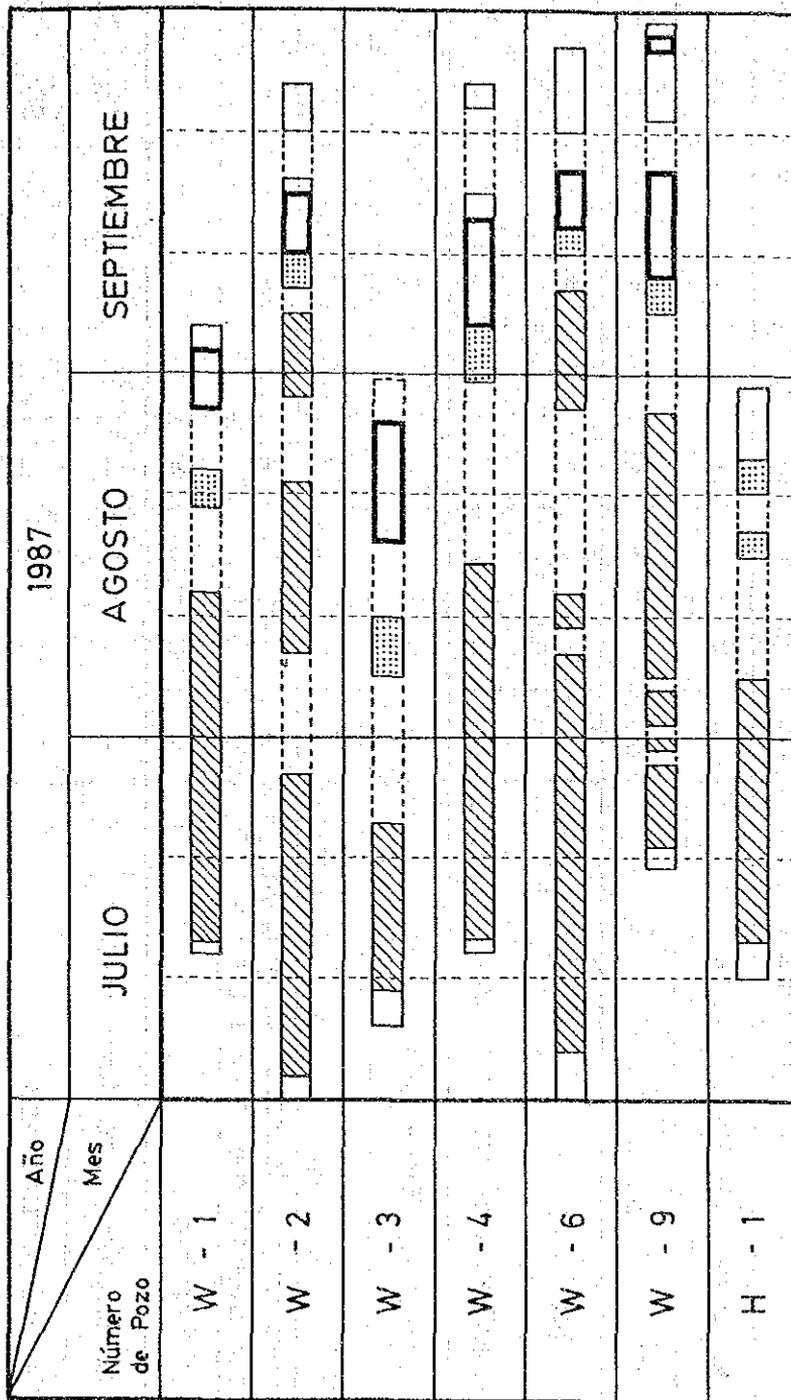
No. de Punto	Ubicación de Punto
2	Boquerón Chañar
3	Boquerón Chañar
6	Milla Nueve
11	Agua de Lazo
12	Canto del Agua
13	Miraflores
14	Yerbas Buenas
19	Estación Algarrobal
23	
31	Pozo No. 1 en Hac. Yerbas Buenas
32	Pozo No. 2 en Hac. Yerbas Buenas

Cuadro I-8 RESULTADO DE ANALISIS SOBRE ROCA BASAL

No. de Punto	Tipo de VES	Profundidad determinada de Roca Basal	Resistividad Determinada de Roca Basal
4	CB	88	29
6	B	76/ 200	30/2.000
11	CB	110 - 130	39 - 180
12	C	7 / 100	130 > 300
13	C	130 - 140	24 - 120
14	CB	120 - 140	32 - 150
20	C	140	46
25	B	14/ 60	140/ 260
27	B	150 - 170	1.600*
28	B	28/ 140	80/ > 500
29	B	130 - 140	70 - 140
30	B	110 - 130	90 - 180
33	C	15/ 70	42/ 60
35	B	80 - 94	20 - 50

Nota: *;Hay variación en los Datos.

Cuadro I-9 DIAGRAMA DE PROGRESO DE PERFORACION



Cuadro I-10 TIEMPO DE OPERACIONES DE PERFORACIONES

Pozo de Prueba (W) y Observación (H)	Nº Profundidad (m.)	W-1	W-2	W-3	W-4	W-6	W-9	H-1	Total	
		Días	%							
Preparación del Sitio, Transporte y Montaje.		2	5	3	1	4	4	3	22	4,5
Trabajo de Perforación.		27	47	15	32	46	31	22	220	45,5
Registro Geofísico.		1	1	1	1	1	1	1	7	1,4
Instalación de Revestimiento Permanente y Rejilla.		2	2	2	2	3	2	2	15	3,1
Empaque con Grava, Cementado y Sello.		3	2	3	2	2	2	6	20	4,1
Desarrollo.		2	3	5	5	2	3	5	25	5,2
Extracción de Tubería, Colocación de Losa de Hormigón y Desmontaje de Máquina.		5	3	1	3	5	11	1	29	6,0
Prueba de Bombeo.		7	5	10	9	5	11	-	47	9,7
Trabajos de Recuperación por Accidentes.		-	-	-	-	15	-	-	15	3,1
Problemas Administrativos.		7	13	16	12	3	3	6	60	12,4
Sin Movimiento, Varios.		1	4	-	7	3	4	5	24	5,0
Total Días.		57	85	56	74	89	72	51	484	100

Cuadro I-11 REGISTRO DE VELOCIDAD DEL CAUDAL

NO. POZO	PROFUNDIDAD N. S. (m)	ESPEJOR (m)	RENDIMIENTO (l/s)	RAZON (%)
W-3	20,33-22,00	1,77	5,8	72,5
	22,00-31,00	19,00	2,2	27,5
	31,00-38,12	7,12	0,0	0
		(27,89)	(8,0)	(100,0)
W-4	35,84-40,00	4,16	2,6	56,6
	40,00-65,00	25,00	2,0	43,4
	65,00-83,00	18,00	0,0	0
		(47,16)	(4,6)	(100,0)
W-9	37,00-39,00	2,00	7,0	50,0
	39,00-55,00	16,00	2,0	14,0
	55,00-67,00	12,00	5,0	36,0
		(48,00)	(14,0)	(100,0)

CUADRO I-12 RESULTADOS DE PRUEBA DE BOMBEO

NO. POZO	PRUEBA	NIVEL DE AGUA ESTÁTICO (m)	RAZÓN DE DESCARGA (l/s)	ABATIMIENTO (m)	CAPACIDAD ESPECÍFICA (l/s/m)	S/Q (m/l/s)
W-1	C	31,93	0,5	3,35	0,15	6,666
W-2	C	43,65	0,32	22,40	0,01	100,0
W-3	S-1	4,77	4,07	1,86	2,19	0,4566
	S-2		6,10	3,57	1,88	0,5319
	S-3		7,52	4,48	1,68	0,5952
	S-4		9,66	6,53	1,48	0,6757
	C	4,78	8,15	6,9	1,18	0,8475
W-4	S-1	25,96	3,01	2,68	1,12	0,8904
	S-2		4,07	3,54	1,15	0,8698
	S-3		5,08	4,54	1,12	0,8937
	S-4		6,10	5,80	1,05	0,9508
	C	25,86	4,62	4,95	0,93	1,0714
W-6	C	37,27	0,055	6,75	0,008	122,73
W-9	S-1	18,88	5,08	0,89	5,71	0,1751
	S-2		8,15	1,52	5,36	0,1866
	S-3		11,13	1,86	5,98	0,1672
	S-4		14,01	2,75	5,09	0,1965
	C	18,81	20,19	4,72	4,28	0,2336

NOTA: S: la prueba de caudal escalonado.
C: la prueba de bombeo continuo.

Cuadro I-13 PERDIDAS ESTIMADAS DE POZO Y ACUIFERO

NO. DE POZO	CANTIDAD DE DESCARGA (l/s)	PERDIDA DE ACUIFERO (m)	PERDIDA DE POZO (m)	TOTAL ABATIMIENTO (m)	RAZON DE PERDIDA DE POZO (%)
W-3	4	1,19	0,63	1,82	34,6
	6	1,78	1,41	3,19	44,2
	8	2,38	2,51	4,89	51,3
	10	2,97	3,92	6,89	56,9
W-4	3	2,14	0,38	2,52	15,1
	4	2,85	0,68	3,53	19,3
	5	3,56	1,06	4,62	22,9
	6	4,27	1,53	5,80	26,4
W-9	10	1,63	0,24	1,87	12,8
	15	2,45	0,53	2,98	17,8
	20	3,27	0,94	4,21	22,3

Cuadro I-14 RESULTADO DE ANALISIS DE DATOS DE PRUEBAS DE BOMBEO

NO. DE POZO	W-1	W-2	W-3	W-4	W-6	W-9	H-1
ESPESOR DEL AGUIFERO (m)	9,00	6,07	20,77	29,16	11,90	48,00	29,16
1) TRANSMISIVIDAD Y PERMEABILIDAD							
-JACOB							
BOMBEO							
T (m/d)	4,9	1,4	258	243	1,9	1.064	340
K (10^{-4} cm/s)	6,3	2,67	143,7	96,4	1,84	265,5	134,9
RECUPERACION							
T (m/d)	3,0	1,3	515	162	1,1	3.192	356
K (10^{-4} cm/s)	3,86	2,48	286,9	64,3	1,07	769,4	141,3
-THIEM							
BOMBEO							
T (m/d)	11,5	1,1	119	82	-	450	326
K (10^{-4} cm/s)	14,8	2,1	66,3	32,5	-	108,5	129,3
-NEUMAN (Semilogaritmico Método)							
BOMBEO							
T (m/d)	-	-	-	-	-	-	143
K (10^{-4} cm/s)	-	-	-	-	-	-	56,7
2) RENDIMIENTO ESPECIFICO (Sy)							
-NEUMAN (Semilogaritmico Método)							
BOMBEO	-	-	-	-	-	-	0,032

Cuadro I-15 RESULTADOS DE ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA (1/3)
(POZOS Y MANANTIALES EXISTENTES)

NO. DE POZO NO. DE MUESTRA	N-23 1	N-31 2	P-3 3	P-2 4	N-5 5	N-12 6	A-1 7
pH*	8,31	7,58	8,05	8,32	7,50	8,25	7,86
RpH*	8,41	7,80	8,32	8,56	7,88	8,53	8,17
TEMPERATURA (°C)*	19	19	24	23	21,5	17	19
CE a 25°C (micro S/cm)	1.583	945	1.124	1.532	1.200	1.405	1.916
TURBIDEZ NTU	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
COLOR PT-CO	5	30	5	5	5	5	5
TSD (mg/l)	1.068	605	781	921	847	984	1.418
TSS (mg/l)	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
DUREZA TOTAL(mg/l)	339	292	306	371	345	411	535
DUREZA DE CARBONATOS (mg/l)	65	290	85	75	90	90	90
TOTAL (mg/l)	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
N-NO ₂ (mg/l)	0,012	0,016	0,014	0,017	0,026	0,023	0,019
N-NO ₃ (mg/l)	5,2	<0,2	4,5	4,7	2,2	1,9	0,5
Cl (mg/l)	269	89,6	128	202	139	196	339
SO ₄ (mg/l)	307	95,5	287	269	315	342	444
SiO ₂ (mg/l)	25,3	16,9	24,8	22,5	20,3	25,3	25,7
CO ₂ (mg/l)	<5,0	39	<5,0	8,7	8,7	8,7	8,7
CO ₃ (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F (mg/l)	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5
PO ₄ (mg/l)	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2
B TOTAL(mg/l)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Ca (mg/l)	110	92	101	125	110	125	165
Mn (mg/l)	<0,05	1,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Mg (mg/l)	15,6	15,1	13,1	14,4	16,9	24,0	30,0
Fe TOTAL (mg/l)	0,14	0,33	1,09	0,18	<0,10	0,16	<0,10
Na (mg/l)	170	100	110	115	105	120	185
K (mg/l)	5,7	4,6	3,0	3,8	3,9	5,9	12,7
HCO ₃ (mg/l)	79,3	354	104	91,5	110	110	110
RAS.	4,01	2,54	2,73	2,59	2,46	2,57	2,47
RAS.ajus.	7,62	6,86	5,46	4,92	4,92	5,40	5,18

NOTA: La fecha de muestreo:

N-23 : 13 julio 1987.

N- 3 : 12 julio 1987.

P- 3 : 13 julio 1987.

P- 2 : 13 julio 1987.

N- 5 : 13 julio 1987.

N-12 : 13 julio 1987.

A- 1 : 13 julio 1987.

* : Datos medidos en terreno.

Cuadro I-15 RESULTADOS DE ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA (2/3)
(POZOS, MANANTIALES EXISTENTES Y RIOS)

NO. DE POZO NO. DE MUESTRA	A-7 8	N-19 9	N-22 10	COPIAPO 11	HUASCO 12	DONKEY 13	PERALITO 14
pH*	8,30	7,63	7,74	8,04	8,82	7,84	8,58
RpH*	8,50	8,03	8,18	8,08	8,84	8,26	8,58
TEMPERATURA (°C)*	19	18	20	18	17	24	18
CE A 25°C	1.813	3.001	9.194	1.609	587	1.035	16.959
(micro S/cm)	1.600*	2.600*	7.300*	1.200*	520*	1.000*	>10.000*
TURBIDEZ NTU	1,2	<0,3	<0,3	1,4	<0,3	<0,3	<0,3
COLOR PT-CO	5	5	5	10	5	10	100
TSD (mg/l)	1.214	2.220	7.020	1.244	447	706	12.590
TSS (mg/l)	<20	<20	<20	35	<20	<20	300
DUREZA TOTAL(mg/l)	355	750	2.039	613	272	336	3.820
DUREZA DE CARBONATOS (mg/l)	110	120	115	225	120	110	305
N-TOTAL	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
N-NO2 (mg/l)	0,015	0,019	0,018	0,023	0,016	0,004	0,004
N-NO3 (mg/l)	<0,2	<0,2	0,7	0,8	0,4	8,0	<0,2
Cl (mg/l)	303	608	2.431	66	12,6	75	4.610
SO4 (mg/l)	368	614	1.577	556	178	792	2.760
SiO2 (mg/l)	32,3	33,6	44,0	26,3	15,2	32,1	51,4
CO2 (mg/l)	8,7	13	17	22	<5,0	8,4	27,0
CO3 (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0
F (mg/l)	0,5	0,5	0,8	0,5	0,4	0,3	0,7
PO4 (mg/l)	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2
B TOTAL (mg/l)	<0,5	0,6	1,2	1,3	<0,5	0,5	1,8
Ca (mg/l)	110	210	520	170	86	104	1.020
Mn (mg/l)	<0,05	<0,05	<0,05	0,11	<0,05	<0,05	1,22
Mg (mg/l)	19,5	55,0	180	46	13,8	18,5	310
Fe (TOTAL) (mg/l)	<0,10	0,30	<0,10	0,78	0,26	0,31	0,36
Na (mg/l)	230	350	1.360	105	24	81,0	2.350
K (mg/l)	8,7	13,7	44,0	5,3	1,9	4,3	72,0
HCO3 (mg/l)	134	134	140	275	146	134	372
RAS.	5,31	5,55	13,10	1,84	0,62	1,92	16,52
RAS.ajus.	10,62	12,21	35,37	4,60	1,24	4,03	-

NOTA : La fecha de muestreo:

A- 7 : 13 julio 1987.
 N-19 : 13 julio 1987.
 N-22 : 13 julio 1987.
 Copiapo : 13 julio 1987.
 Huasco : 12 julio 1987.
 Donque : 27 agosto 1987.
 Peralito : 27 agosto 1987.

* : Datos medidos en terreno.

Cuadro I-15 RESULTADOS DE ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA (3/3)
(POZOS DE PRUEBAS)

NO. DE POZO	W-1	W-2	W-3	W-4	W-6	W-9
pH*	8,50	8,00	7,76	8,50	7,90	8,14
RpH*	8,52	8,07	8,21	8,52	8,08	8,19
TEMPERATURA (°C)*	21	21	21	24	28	23
CE A 25 °C	1.135	1.279	1.709	990	1.301	1.136
(micro S/cm)	1.200*	1.300*	1.600*	990*	1.500*	1.000*
TURBIDEZ NTU	<0,3	6	<0,3	<0,3	14	<0,3
COLOR PT-CO	10	5	10	5	10	5
TSD (mg/l)	736	918	1.007	720	886	793
TSS (mg/l)	20	<20	<20	<20	21	<20
DUREZA TOTAL (mg/l)	325	394	623	232	253	354
DUREZA DE CARBONATOS (mg/l)	92,5	60	95	100	90	70
N-TOTAL (mg/l)	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0
N-NO2 (mg/l)	0,039	0,018	0,005	0,007	0,150	0,007
N-NO3 (mg/l)	2,7	4,6	3,6	2,5	1,0	4,6
Cl (mg/l)	106	170	310	79	156	153
SO4 (mg/l)	311	365	425	300	360	300
SiO2 (mg/l)	23,5	17,1	32,1	21,8	8,3	24,6
CO2 (mg/l)	<5,0	<5,0	8,4	7,4	9,9	<5,0
CO3 (mg/l)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
F (mg/l)	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3
PO4 (mg/l)	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2
B TOTAL (mg/l)	0,5	0,5	<0,5	0,5	0,8	<0,5
Ca (mg/l)	102	126	195	93,0	82,0	116
Mn (mg/l)	0,1	0,23	<0,05	<0,05	0,38	<0,05
Mg (mg/l)	16,9	19,4	33,0	14,5	11,7	15,7
Fe (TOTAL) (mg/l)	0,46	1,98	<0,10	0,19	4,49	0,19
Na (mg/l)	110	109	132	100	174	100
K (mg/l)	5,3	5,0	6,1	3,2	8,9	4,1
HCO3 (mg/l)	113	73,2	116	122	110	85,4
RAS.	2,65	2,38	2,30	2,54	4,76	2,31
RAS.ajus.	5,30	4,28	4,83	4,83	9,04	4,39

NOTA : La fecha de muestreo:

W-1 : 1 septiembre 1987.

W-2 : 13 septiembre 1987.

W-3 : 19 julio 1987.

W-4 : 10 septiembre 1987.

W-6 : 17 septiembre 1987.

W-9 : 14 septiembre 1987.

* : Datos medidos en terreno.

Cuadro I-16 CLASIFICACION DE SALINIDAD DE AGUAS PARA REGADIO SEGUN USDA
(AGUAS EXENTAS DE SULFATOS)

Clase de salinidad y descripción	Gama CE Equivalente en concentración de sal			
	($\mu\text{S/cm}$)	(g/l)	(mg/l)	Cl (mg/l)
C1 Agua de poca salinidad. Puede emplearse para regadío en la mayor parte de los cultivos, en la mayor parte de los suelos, con pocas probabilidades de que surjan problemas de salinidad. Se requiere una cierta lixiviación, pero esto ocurre en condiciones normales de regadío salvo en suelos de permeabilidad extremadamente baja.	< 250	< 0,2	< 200	< 60
C2 Agua de salinidad media. Puede utilizarse si tiene lugar una cierta lixiviación. Pueden cultivarse plantas con tolerancia moderada a la sal en la mayoría de los casos sin prácticas especiales para el control de la salinidad.	250 - 750	0,2 - 0,5	200 - 500	60 - 200
C3 Agua de gran salinidad. No puede utilizarse en suelos con drenaje limitado. Incluso con drenaje adecuado, puede ser necesaria una gestión especial de control de la salinidad y deben seleccionarse cultivos con buena tolerancia a la sal.	750 - 2.25	0,5 - 1,5	500 - 1.500	200 - 600
C4 Agua de salinidad extrema. No es adecuada para regadío en condiciones normales, pero puede utilizarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado, el agua de regadío debe aplicarse en exceso para proporcionar lixiviación considerable, y los cultivos deben ser muy tolerantes a la sal.	> 2.250	1,5 - 3,0	> 1.500	> 600

Nota: 1/ SDT = sólidos disueltos totales.
Fuente: Adaptado de "Booker Tropical Soil Manual" (1984), pp.169;
advirtase que también se realizan otras divisiones basadas en RAS; véase Fig. I-35 y Cuadro I-17.

Cuadro I-17 CLASIFICACION DE SODICIDAD DE AGUAS PARA REGADIO SEGUN USDA
(AGUAS EXENTAS DE SULFATOS)

Clase de sodio y descripción	RAS
S1 <u>Agua con poco sodio</u> . Puede utilizarse para regadío en casi todos los suelos con poco peligro de generación de niveles deletéreos de sodio intercambiable. Sin embargo, los cultivos sensibles al sodio pueden acumular concentraciones lesivas de este elemento.	< 10
S2 <u>Agua de sodicidad media</u> . Presentará un riesgo apreciable de sodio en suelos de textura fina con capacidad de intercambio catiónico, especialmente en condiciones de poca lixiviación, salvo si existe yeso en el suelo. Este agua puede utilizarse en suelos de textura gruesa u orgánicos con buena permeabilidad.	10 - 18
S3 <u>Agua de gran sodicidad</u> . Puede producir niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos y requerirá una gestión especial del suelo, buen drenaje, y buenas adiciones de lixiviación y materia orgánica. Los suelos que contienen yeso quizá no desarrollen niveles peligrosos de sodio intercambiable a partir de estas aguas. Puede requerirse corrección química para sustituir el sodio intercambiable, pero las aguas de mucha salinidad pueden no responder a las correcciones.	18 - 26
S4 <u>Agua de sodicidad excepcional</u> . Generalmente no sirve para regadío, salvo quizá a salinidad baja y quizá media, en cuyos casos la disolución de calcio del suelo o el uso de yeso u otros correctivos puede posibilitar el uso de estas aguas.	> 26

Nota: El agua de regadío puede disolver a veces suficiente calcio a partir de suelos calcáreos como para reducir apreciablemente el riesgo de sodicidad, y esto debe tenerse en cuenta al utilizar aguas C1-S3 y C1-S4 (véase Fig. I-35). Para suelos calcáreos de pH alto o suelos no calcáreos, la categoría sódica de las aguas de las clases C1-S3, C1-S4 y C2-S4 puede mejorarse añadiendo yeso al agua. Igualmente, puede ser beneficioso añadir yeso al suelo periódicamente cuando se empleen aguas C2-S3 y C3-S2.

Fuente: Adaptado de "Booker Tropical Soil Manual" (1984), pp.170;
Véase también Fig. I-35 y Cuadro I-16.

Cuadro I-18 DIRECTRICES DE LA FAO PARA EVALUACION DE LA CALIDAD DE AGUAS PARA REGADIO

Propiedad del suelo afectada	Unidades	Directrices de calidad del agua		
		P r o b l e m a s		
		Ninguno	Creciente	Grave
Disponibilidad de agua de cultivo (efectos osmóticos)				
CE	mS/cm	< 0,7	0,7 - 3,0	> 3,0
Permeabilidad				
CE	mS/cm	> 0,5	0,5 - 0,2	< 0,2
adj RAS 1/ Montmorillonita - esmectitas (red cristalina 2:1)		< 6	6 - 9 2/	> 9
Illita - vermiculita (red cristalina 2:1)		< 8	8 - 16 2/	> 16
caolinita - sesquioxidos (red cristalina 1:1)		< 16	16 -24 2/	> 24
Toxicidad iónica específica (afecta a cultivos sensibles) 3/				
Sodio (Na)				
Regadío superficial	adj RAS 1/	< 3	3 - 9	> 9
Riego por aspersión	me/l	< 3	> 3	
Cloro (Cl)				
Regadío superficial	me/l	< 4	4 - 10	> 10
Riego por aspersión	me/l	< 3	> 3	
Boro (B)	me/l	< 0,7	0,7 - 2,0	> 2,0
Efectos varios (afectan a cultivos susceptibles)				
Nitrógeno (NO ₃ ó NH ₄)	me/l	< 5	5 - 30	> 30
Bicarbonato (HCO ₃) con aspersores	me/l	< 1,5	1,5 - 8,5	> 8,5
pH (puede causar desequilibrio en toma de nutrientes)			Gama normal: 6,5 a 8,4	

- Notas: 1/ La evaluación debe basarse en diversos factores, inclusive el tipo dominante de mineral arcilloso en el suelo (p. ej., Rhoades y Merrill, 1976). El efecto puede quedar compensado por sales solubles que evitan la defloculación.
- 2/ Utilizar la gama inferior si CE < 0,4 mS/cm; la gama intermedia si CE = 0,4-1,6 mS/cm; la superior si CE > 1,6 mS/cm.
- 3/ La mayor parte de cultivos arbóreos y otras plantas leñosas son sensibles al sodio y al cloro (utilizar los valores indicados). La mayor parte de cultivos anuales no son sensibles.

Fuente: "Booker Tropical Soil Manual" (1984), pp.171

FIGURAS

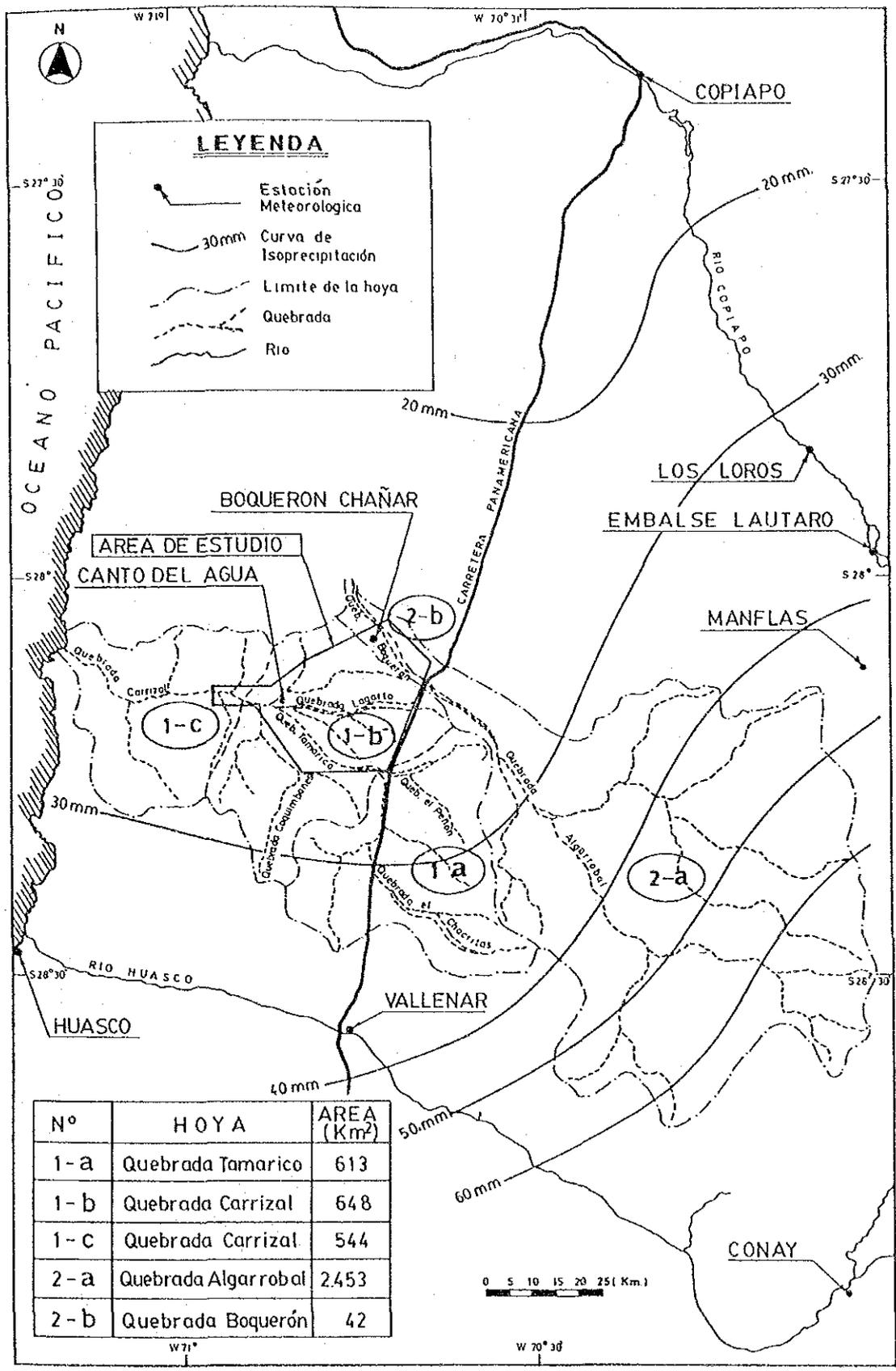
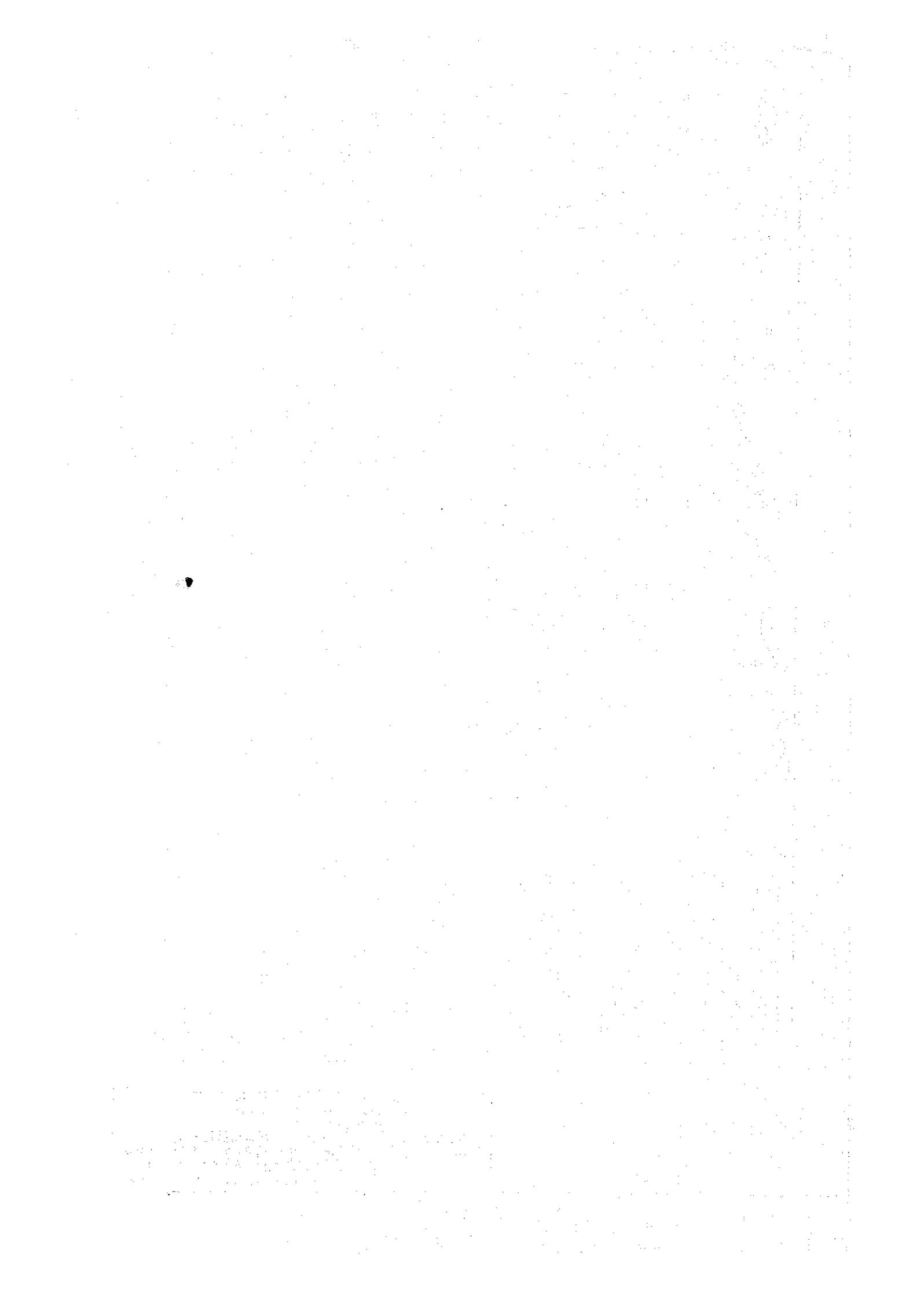
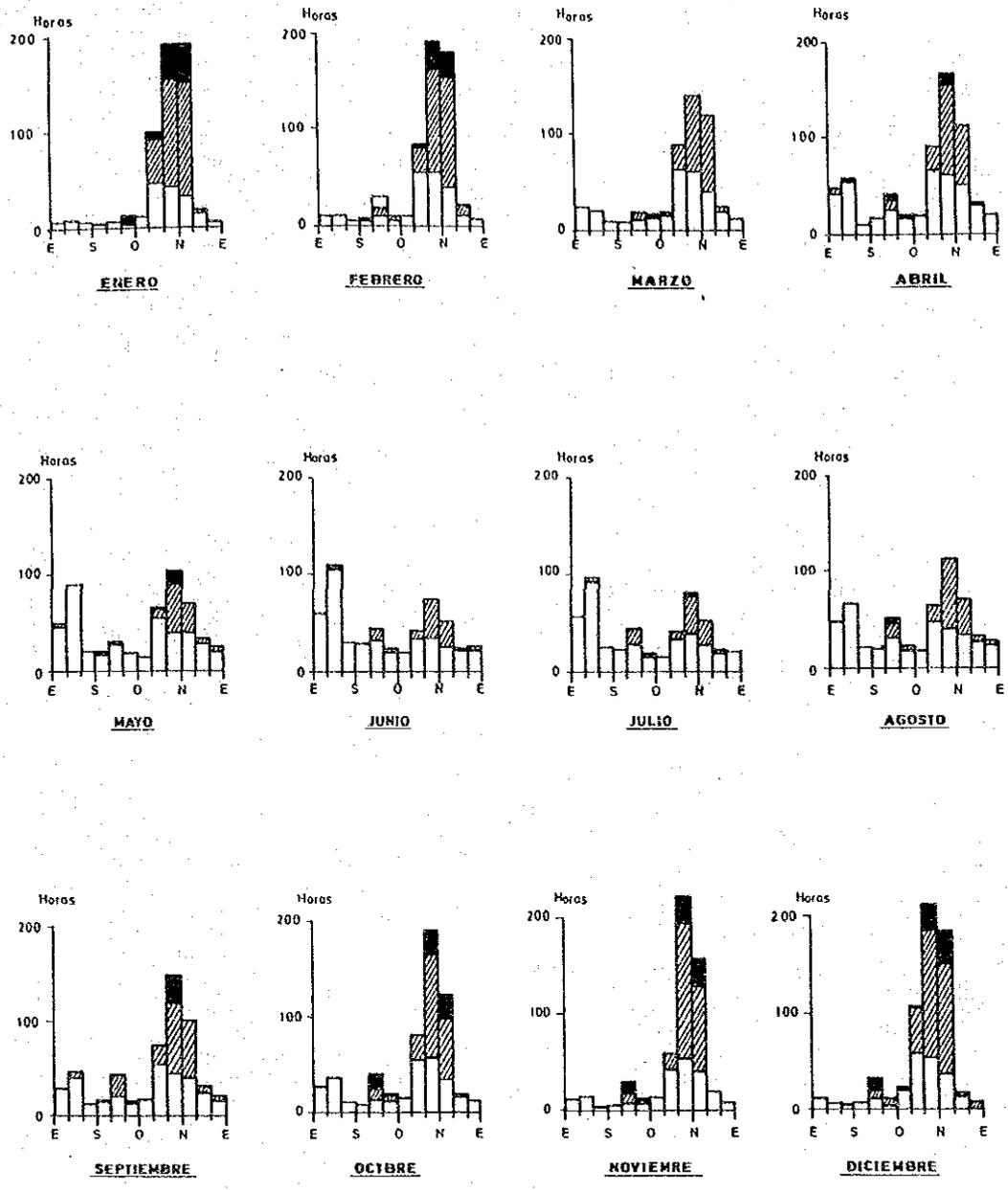


Fig. I-1 Ubicación de las Estaciones Meteorológicas y las Curvas de Isoprecipitación

REPUBLICA DE CHILE INTENDENCIA REGIONAL DE ATACAMA	EL PROYECTO DE DESARROLLO AGRICOLA MEDIANTE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA EN LA REGION DE ATACAMA AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON
---	---





LEYENDA

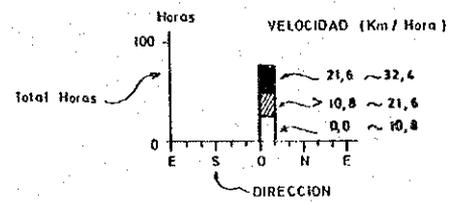


Fig. I-2 Distribución Mensual de Direcciones de los Vientos en Boquerón Chañar

REPUBLICA DE CHILE INTENDENCIA REGIONAL DE ATACAMA	EL PROYECTO DE DESARROLLO AGRICOLA MEDIANTE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRANEAS EN TOLOLO PAMPA EN LA REGION DE ATACAMA AGENCIA DE COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON
---	---

