



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE INTRUSIÓN SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS: Sector Costa Quebrada Los Choros, IV REGIÓN

INFORME FINAL

S.I.T. N° 109

DICIEMBRE, 2005

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Sr. Jaime Estévez Valencia**

**Director General de Aguas
Ing. Sr. Humberto Peña Torrealba**

**Jefe Departamento de Estudios y Planificación
Ing. Sr. Carlos Salazar Méndez**

Inspector Fiscal

Ing. Sr. Luis Rojas Badilla

Contraparte Técnica

Ing. Sra. Ana María Gangas P.

UNIVERSIDAD DE CHILE

**Jefe de Proyecto
Ing Sr. Carlos Espinoza**

**Profesionales
Ing. (e) Srta. María Eugenia Molina**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos	10
1.3. Metodología	10
1.4. Contenido del Informe	11
2. ANTECEDENTES SOBRE EL PROBLEMA DE INTRUSIÓN SALINA	13
2.1. Problema de Intrusión Salina.....	13
2.1.1. Antecedentes Generales.	13
2.1.2. Interfaz Abrupta.....	14
2.1.3. Interfaz Difusa.	19
2.1.4. Explotación de Acuíferos Costeros.....	22
2.2. Revisión de Antecedentes Previos	23
2.2.1. Situación Nacional	23
2.2.2. Situación Internacional.....	30
2.3. Métodos Directos de Prevención y Control del la Intrusión Salina	39
2.3.1. Disminución del Bombeo.	39
2.3.2. Reubicación de los puntos de bombeo.....	40
2.3.3. Recarga Artificial.	40
2.3.4. Establecimiento de Barreras Físicas.	41
2.3.5. Barrera Hidráulica de Inyección.....	42
2.3.6. Depresión de Bombeo.	44
3. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA DE INTRUSIÓN SALINA MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES.....	46
3.1. Antecedentes Generales	46
3.2. Técnicas Convencionales	47
3.2.1. Métodos Físicos.....	47

3.2.2.	Métodos Hidrogeoquímicos.....	47
3.3.	Técnicas No Convencionales.....	52
3.3.1.	Técnicas Geofísicas.....	53
3.3.2.	Métodos Isotópicos.....	54
4.	ZONA DE ESTUDIO	57
4.1.	Ubicación y Accesos	57
4.2.	Geomorfología, Clima y Red de Drenaje.....	59
4.2.1.	Geomorfología.....	59
4.2.2.	Clima y Vegetación.....	63
4.2.3.	Red de Drenaje.....	63
4.3.	Hidrología.....	64
4.3.1.	Precipitaciones.....	64
4.3.2.	Escorrentía.....	71
4.4.	Geología	73
4.4.1.	Marco Geológico Regional.....	73
4.4.2.	Litología.....	76
4.4.3.	Geología Local.....	85
4.5.	Hidrogeología	87
4.5.1.	Catastro de Captaciones.....	87
4.5.2.	Unidades Hidrogeológicas.....	89
4.5.3.	Acuíferos Reconocidos.....	91
4.5.4.	Parámetros Elásticos.....	96
4.5.5.	Recarga y Descarga.....	101
4.5.6.	Niveles de Agua Subterránea.....	102
4.5.7.	Calidad Físico Química del Agua Subterránea.....	107
4.6.	Situación actual de los recursos hídricos.....	111
5.	ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA	115
5.1.	Generalidades.....	115
5.2.	Análisis Hidrogeoquímico del Agua Subterránea en la Zona.....	115
5.2.1.	Actividades de Terreno.....	115

5.2.2.	Evaluación Hidrogeoquímica de la Primera Campaña.....	116
5.2.3.	Evaluación Hidrogeoquímica de la Segunda Campaña.....	123
5.3.	Identificación del problema de Intrusión Salina en la zona.....	132
5.3.1.	Generalidades.....	132
5.3.2.	Contenido natural del agua subterránea en la zona.....	133
5.3.3.	Mecanismos de Recarga.....	135
5.3.4.	Aplicación de índices hidrogeoquímicos.....	144
5.4.	Resumen.....	151
6.	DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO.....	154
6.1.	Generalidades.....	154
6.2.	Red de Monitoreo propuesta zona baja Quebrada Los Choros.....	155
6.2.1.	Aspectos Generales.....	155
6.2.2.	Puntos seleccionados.....	156
6.2.3.	Parámetros Relevantes.....	159
6.2.4.	Frecuencia de Medición.....	162
6.2.5.	Procedimiento de toma de muestras.....	163
6.2.6.	Seguimiento del problema de Intrusión Salina.....	165
6.3.	Resumen.....	166
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	168
7.1.	Conclusiones.....	168
7.2.	Recomendaciones.....	171
8.	REFERENCIAS.....	174
ANEXOS.....	177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Caudales factibles a explotar, Quebrada Los Choros.	26
Tabla 2.2. Derechos de aprovechamiento factibles de otorgar.	27
Tabla 4.1. Estaciones pluviométricas Quebrada Los Choros.	66
Tabla 4.2. Registro pluviométrico Estación El Trapiche.....	69
Tabla 4.3. Precipitación promedio en períodos seco y húmedo en cuenca Los Choros.....	71
Tabla 4.4. Catastro de Captaciones Zona Costera Quebrada Los Choros.....	88
Tabla 4.5. Valores de T promedio por sector según pruebas de bombeo.....	97
Tabla 4.6. Valores de K promedio por sector según pruebas de bombeo.	98
Tabla 4.7. Espesor saturado estimado del acuífero por sectores.....	98
Tabla 4.8. Red de Observación BNA.	103
Tabla 4.9. Estaciones de control de interés.	104
Tabla 4.10. Análisis comparativo de calidad de agua subterránea entre 1995 y 2005.	109
Tabla 4.11. Resumen explotación de aguas subterráneas en cuenca Los Choros (Riego y usos domésticos).....	113
Tabla 4.12. Caudales factibles a explotar en el futuro.	113
Tabla 4.13. Derechos de aprovechamiento factibles de otorgar.	114
Tabla 5.1. Análisis químico de las muestras. Datos Campaña 1.....	117
Tabla 5.2. Análisis químico de las muestras. Datos Campaña 2.....	125
Tabla 5.3. Incrementos típicos en la concentración de minerales debido a los usos domésticos del agua	129
Tabla 5.4. Contenido natural agua subterránea zona alta Quebrada Los Choros.	133
Tabla 5.5. Composición media de la corteza terrestre y de algunos tipos de rocas y del agua natural....	134
Tabla 5.6. Línea de Pozos Perfil A - A´.....	141
Tabla 5.7. Línea de Pozos Perfil B - B´.....	142
Tabla 5.8. Relación Cloruro - Bicarbonatos.	147
Tabla 5.9. Relación Magnesio - Calcio según su distribución en la zona en estudio.	149
Tabla 5.10. Resumen análisis químico zona costera Los Choros.....	152
Tabla 6.1. Red de Monitoreo.....	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Corte Vertical en un acuífero costero.	15
Figura 2.2. Esquema del problema de intrusión salina en un acuífero costero.	18
Figura 2.3 Determinación zona de mezcla, caso fluidos miscibles.....	20
Figura 2.4. Sectorización de la Quebrada Los Choros.	25
Figura 2.5. Uso de pozos de inyección en el control del problema de intrusión salina.	44
Figura 3.1. Estrategia básica de diagnóstico, identificación, caracterización y remediación de la intrusión salina.	56
Figura 4.1. Ubicación Zona de Estudio.	58
Figura 4.2. Zona Baja Quebrada Los Choros.	59
Figura 4.3. Modelo digital cuenca Quebrada Los Choros.....	62
Figura 4.4. Aporte de neblinas costeras en la zona.....	65
Figura 4.5. Estaciones pluviométricas en cuenca quebrada Los Choros.....	66
Figura 4.6. Precipitación media anual en función de la altura.	68
Figura 4.7. Registro histórico de precipitaciones mensuales Estación El Trapiche.	70
Figura 4.8. Precipitación media mensual Estación El Trapiche.....	70
Figura 4.9. Puntos de aforo en afloramientos quebrada Los Choros.	73
Figura 4.10. Carta Geológica 1982, Quebrada Los Choros.	75
Figura 4.11.Catastro de captaciones zona costera Quebrada Los Choros.....	87
Figura 4.12. Ubicación en planta del perfil estratigráfico.	94
Figura 4.13. Perfil estratigráfico zona baja Quebrada Los Choros.....	95
Figura 4.14. Ubicación de sectores.....	99
Figura 4.15. Estaciones de control BNA.	104
Figura 4.16. Registro histórico de niveles piezométricos.....	105
Figura 4.17. Análisis comparativo calidad de aguas. ENAMI (1995) v/s Estudio Actual.....	110
Figura 4.18. Caudales concedidos según su uso.	112
Figura 5.1. Distribución de Pozos Zona Estudio. Datos Campaña 1.....	117
Figura 5.2. Diagrama de Piper. Datos Campaña 1.....	118
Figura 5.3. Diagrama de Schoeller. Datos Campaña 1.	120
Figura 5.4. Distribución Química Zona de Estudio. Datos Campaña 1.	122
Figura 5.5. Distribución de Pozos Zona de Estudio. Campaña 2.	124
Figura 5.6. Diagrama de Piper. Datos Campaña 2.	126
Figura 5.7. Diagrama de Schoeller. Datos Campaña 2.	127
Figura 5.8. Distribución Química Zona de Estudio. Datos Campaña 2.	130
Figura 5.9. Profundidades de muestreo en terreno.	131
Figura 5.10. Curvas de Isopropundidad.....	136
Figura 5.11. Diagrama Scatter: Correlación entre Cl- y Conductividad Eléctrica.....	137

Figura 5.12. Análisis de los mecanismos de recarga en la zona en función de la distribución de Conductividad Eléctrica.	139
Figura 5.13. Ubicación de Perfiles, Zona de Estudio.	140
Figura 5.14. Diagrama de Collins para Perfil A - A´.	142
Figura 5.15. Diagrama de Collins para Perfil B - B´.	144
Figura 5.16. Mapa Conductividad Eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$].	145
Figura 5.17. Distribución índice Cloruro - Bicarbonato.	148
Figura 5.18. Distribución índice Magnesio - Calcio.	150
Figura 5.19. Líneas de igual contenido de cloruros. Zona baja de quebrada Los Choros [mg/l].	151
Figura 5.20. Grado de afección a la calidad de las aguas según distribución espacial.	153
Figura 6.1. Red de Monitoreo.	158
Figura 6.2. Muestreador utilizado en terreno.	164

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Los acuíferos costeros requieren una adecuada gestión de sus recursos debido a que presentan un mayor grado de afección a la calidad de sus aguas, como consecuencia de una demanda más intensa al constituir la principal fuente de recurso hídrico en zonas con precipitaciones escasas y de poca importancia. Debido a la explotación que se produce en estas zonas, principalmente para satisfacer requerimientos agrícolas y relacionados al desarrollo urbano y turístico, se intensifica el fenómeno de salinización que se da en forma natural en la zona de contacto con el mar, induciendo la penetración de la cuña salina tierra adentro a una tasa mayor de la esperada en condiciones de ausencia de explotación. Cuando los niveles de extracción superan a la capacidad de recarga de dichos acuíferos, se está frente a un escenario de sobreexplotación del recurso hídrico, dando origen al problema de contaminación de aguas subterráneas conocido como *Intrusión Salina*.

El problema de intrusión salina se produce en zonas costeras con altas densidades de población en relación a la disponibilidad del recurso subterráneo, es decir, donde la extracción supera la capacidad de recarga del acuífero. La creciente salinización de las aguas comienza a manifestarse una vez que se ha sobrepasado la capacidad de recarga del acuífero y por lo tanto la penetración de la cuña salina se transforma en un proceso inevitable y difícil de remediar.

Esta situación tiene especial importancia en un país como Chile, ya que dispone de una extensa longitud costera a lo largo de su territorio, la cual se caracteriza por presentar una gran cantidad de asentamientos poblacionales que a lo largo del tiempo se han transformado en zonas urbanas de importancia, donde la demanda por el recurso hídrico se ha incrementado en forma continua debido a las nuevas exigencias de abastecimiento de la población.

Debido a la importancia a nivel mundial que ha ido adquiriendo el fenómeno de intrusión salina en los últimos años, se ha impulsado el desarrollo de metodologías de análisis y modelos para la interpretación del fenómeno, en conjunto con la necesaria tecnología de observación, control y prevención del problema. Dichos aspectos han sido objeto de estudio principalmente en países como México y España, debido a la existencia del problema de intrusión salina en gran parte de las zonas costeras.

En relación a la situación del problema de intrusión salina en España, es importante mencionar que es un país que cuenta con más de 6000 Km. de costa, sometidos a una fuerte y creciente demanda de agua, en especial en las costas oriental, meridional e insular. Para hacer frente a este problema, el Instituto Geológico y Minero de España en conjunto con la Universidad Politécnica de Madrid desarrollaron un encuentro de especialistas y usuarios del agua que permitió poner al día los conocimientos y modos de gestión de acuíferos costeros. El congreso convocado en el año 2003, conocido como “Técnicas de la Intrusión Salina en Acuíferos Costeros, TIAC”, refleja el gran avance y desarrollo que España posee en el tema de intrusión salina, por lo que dichas publicaciones serán tomadas como una de las principales fuentes de información para el desarrollo de un programa de monitoreo en un acuífero costero en nuestro país.

Actualmente en Chile, este problema de contaminación no representa una amenaza considerable a las reservas de aguas subterráneas con que se cuentan. Sin embargo, desde una perspectiva del problema a futuro se visualiza un riesgo potencial de intrusión salina por efecto de la continua extracción de agua dulce para satisfacer los requerimientos sociales e industriales de las zonas involucradas.

Un problema concreto de intrusión salina en nuestras costas, lo constituye la zona costera de la V Región, correspondiente a las localidades de Papudo, Cachagua y Catapilco. Debido al aumento de población en los últimos años, la demanda por el recurso hídrico ha aumentado considerablemente, y la fuente original de agua potable para estas zonas, proveniente de La Ligua, no permite satisfacer los requerimientos para dicho consumo. Debido a que se han comenzado a explotar los acuíferos de las zonas costeras antes mencionadas, el problema de intrusión salina comienza a

manifestarse crecientemente, por lo que se prevé a futuro que este tipo de contaminación constituya una gran limitante en la satisfacción de la demanda del recurso para esta zona. Un problema similar ha sido identificado en otras localidades de la IV y VIII Región.

Por lo tanto, debido a la situación de incipiente intrusión salina en numerosos acuíferos costeros de nuestro país, por medio de un convenio suscrito entre la DGA y la Universidad de Chile, se impulsa el desarrollo de un estudio de la afección a la calidad de las aguas en un acuífero de la zona norte, específicamente en el acuífero de Quebrada Los Choros, ubicado en el extremo norte de la IV Región de Coquimbo. La importancia del estudio del fenómeno de intrusión salina en este lugar reside en un alto crecimiento poblacional que se ha experimentado en los últimos años y que se espera incremente en el futuro. Actualmente, en una extensa porción de la zona, se presenta un estado latente de salinización, viéndose comprometido el uso integral de los recursos hídricos. El desarrollo de un programa de monitoreo y de control preventivo de intrusión salina que ayude a minimizar el riesgo potencial de intrusión salina en la zona de quebrada Los Choros, por lo tanto, considerará la experiencia en el manejo y control de los acuíferos contaminados de los países con mayor experiencia en el manejo de este problema.

En consecuencia, y debido a la importancia que representa este fenómeno, es necesario desarrollar un conocimiento más completo del comportamiento y evolución de los sistemas de aguas subterráneas, ya sea tanto en la calidad y cantidad del recurso disponible, para así poder planificar acciones a futuro que permitan un uso del recurso más racionalizado y en el que socialmente se demuestre conciencia frente al problema.

De esta forma, la evaluación de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos, debe realizarse con rigurosidad, incluyendo una total comprensión acerca del uso y del desarrollo de ambos recursos, vistos como un conjunto interactivo e interdependiente.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este estudio es la definición de un programa de monitoreo y control preventivo de un acuífero costero para minimizar el riesgo potencial de intrusión salina.

Asimismo, los objetivos específicos se indican a continuación:

- Selección del sitio a estudiar.
- Caracterización detallada del sitio de estudio.
- Estudio de aplicación de técnicas hidrogeológicas convencionales y no convencionales en el sitio seleccionado.
- Diseño de un sistema de monitoreo óptimo para desarrollar una metodología que permita un seguimiento del problema.
- Desarrollo de una metodología de reconocimiento de peligro potencial de contaminación por intrusión salina aplicable para el estudio de sitios futuros.

1.3. Metodología

La metodología adoptada en el estudio consiste en una serie de etapas que se detallan a continuación:

1. Recopilación y análisis de antecedentes de tipo geológico, hidrológico e hidrogeológico del sitio seleccionado.
2. Reconocimiento del terreno, con el objeto de obtener antecedentes adicionales para la caracterización de la zona de estudio.
3. Realización de pruebas en terreno y laboratorio para determinar las concentraciones de los parámetros relevantes en el problema, con el objetivo de caracterizar químicamente el acuífero y determinar si existe intrusión salina en él,

dependiendo de la relación entre las concentraciones naturales de estos parámetros dadas por la condición geológica del sitio y los valores asociados a una posible contaminación. El proceso de toma de datos se realizará mediante el uso de instrumental específico que permita efectuar las mediciones de los parámetros de interés, como cloruros, bicarbonatos y contenidos de sales disueltas, entre otros, a nivel subterráneo. Para determinar la variabilidad del contenido de cloruros y sales disueltas se ha estimado una frecuencia de muestreo bimestral. El análisis químico de las muestras de agua, tomada en captaciones a diferentes profundidades, contempla la determinación de los principales elementos. Por otra parte, cada muestra deberá ser lo más representativa posible del nivel o cota que se muestrea.

El análisis isotópico de las muestras de agua, constituye además una herramienta efectiva en la caracterización química de un acuífero, la que posiblemente será considerada para la evaluación del riesgo de intrusión salina en el acuífero en estudio.

4. En forma posterior, el diagnóstico de la situación actual de los recursos hídricos subterráneos ante el problema de intrusión salina en Quebrada Los Choros, se realizará mediante la información proporcionada del análisis químico de los parámetros relevantes en el fenómeno, información a partir de la cual se diseñará la red de monitoreo que permita evaluar espacial y temporalmente el avance del problema.

1.4. Contenido del Informe

En el Capítulo 2, se presentan los antecedentes sobre el problema de intrusión salina. Se exponen aquellos documentos que permitan tener un conocimiento más claro del problema, en cuanto a los parámetros relevantes para su identificación y posterior monitoreo. En conjunto, se presentan los aspectos teóricos que rigen dicho fenómeno.

En el Capítulo 3 se describen las técnicas convencionales y no convencionales utilizadas para detectar, definir y conocer la evolución de la intrusión salina en acuíferos costeros. El objetivo de este capítulo es determinar aquellas metodologías que son factibles de ser aplicadas para el diagnóstico y posterior monitoreo de la zona en estudio.

En el Capítulo 4 se realiza la caracterización detallada de la zona de Quebrada Los Choros en relación al escenario hidrológico, geológico e hidrogeológico que condiciona el comportamiento del acuífero en la zona baja de la cuenca. Dicha caracterización se desarrolla a partir de la información bibliográfica obtenida en estudios anteriores realizados en universidades u organismos públicos y privados del país.

El Capítulo 5 presenta el análisis hidrogeoquímico del agua subterránea que conforma el acuífero de la zona baja de quebrada Los Choros, con el fin de evaluar la presencia e intensidad del problema de intrusión salina.

El Capítulo 6 contempla el diseño de la red de monitoreo que permita desarrollar un seguimiento temporal y espacial de la evolución del problema de intrusión salina en el acuífero costero en estudio. Se exponen las características que debe presentar la red de control con el objetivo de mejorar la gestión de los recursos hídricos.

Por último, en el Capítulo 7 se plantean las conclusiones y recomendaciones de este informe.

2. ANTECEDENTES SOBRE EL PROBLEMA DE INTRUSIÓN SALINA

2.1. Problema de Intrusión Salina

2.1.1. Antecedentes Generales.

Los acuíferos costeros entran en contacto con el océano en las cercanías de la línea de costa y bajo condiciones naturales, el agua dulce es descargada en el mar, estableciéndose la condición de equilibrio que sólo sufre modificaciones naturales a muy largo plazo, debidas a cambios climáticos o movimientos relativos entre la tierra y el mar.

Sin embargo, al existir actividad de carácter antrópica, esta condición natural entre el agua dulce y agua salada, se ve modificada con una intensidad muy superior a la normal, dando origen a un problema de gran complejidad, puesto que además del problema del movimiento del agua subterránea, se suma la existencia de un agua de densidad diferente y miscible, presentándose además pequeñas diferencias de viscosidad y a veces de temperatura.

En países como Chile, que disponen de una franja costera extensa, gran parte de su desarrollo económico como también poblacional se asienta en estas zonas, incrementando la demanda por el recurso hídrico subterráneo y por tanto, originando que el flujo de agua dulce que naturalmente es descargado hacia el mar disminuya paulatinamente debido a la acción antrópica y por ende causando la incorporación de agua salada a los acuíferos, dando origen al fenómeno de *Intrusión Salina*.

En términos generales, se llama intrusión salina al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando u ocupando el volumen correspondiente al agua dulce. El agua captada en un acuífero costero se contamina por efecto de la salinización cuando la zona activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de ambos fluidos o por la propia agua salada. Sin embargo, no es este el único proceso de salinización, puesto que si la captación se establece en una masa de agua

subterránea dulce por sobre el agua salada, puede producirse una ascensión de agua salada formando un domo o cono salino en la zona de la extracción del recurso hídrico. Otras veces esta contaminación puede provenir de infiltración de agua de otros acuíferos salinizados, que comúnmente se producen por deficiencias en la construcción y operación del pozo de extracción.

2.1.2. Interfaz Abrupta.

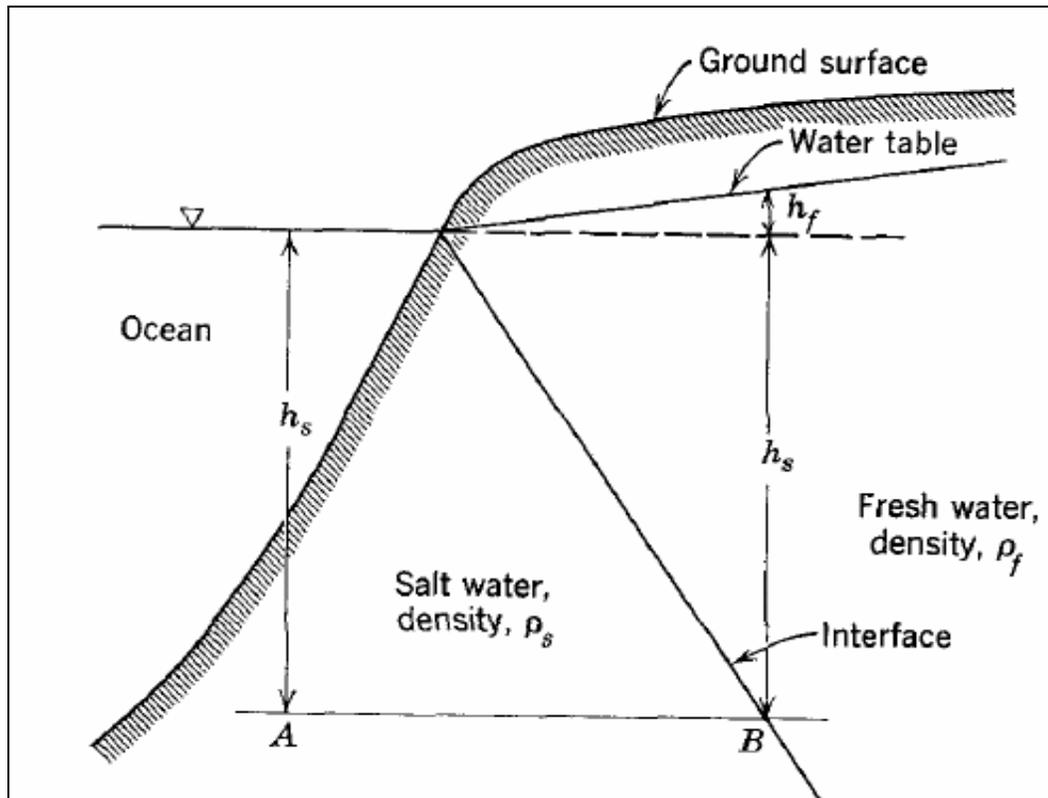
En relación al estudio teórico que se ha desarrollado en el tema de intrusión salina, en 1889, Badon Ghyben estableció la primera forma cuantitativa de estudio, pero hasta después de 1955 no se habían elaborado teorías que tuvieran en cuenta el movimiento del agua dulce y el agua salada, así como también la existencia de una zona de mezcla o dispersión entre ambas y que permitieran determinar el movimiento de esa interfase en distintos escenarios de recarga, bombeo y variación del nivel del mar.

El fundamento de la teoría desarrollada en este punto considera la idealización del problema real de intrusión salina, definiendo la existencia de una interfaz teórica entre ambos fluidos que se sitúa dentro de la zona de mezcla o de transición agua dulce - agua salada.

Para caracterizar en forma cuantitativa la magnitud del problema de intrusión de la cuña salina en la napa de agua dulce, se tiene la relación dada por Ghyben-Herzberg a comienzos del siglo XX, la cual se basa en el equilibrio estático de columnas de agua de diferente densidad. Ambos investigadores encontraron que en las zonas costeras el agua salada se encontraba bajo el suelo no a nivel del mar, sino que a una profundidad cercana a 40 veces la altura del agua dulce sobre el nivel del mar. Esta distribución fue atribuida al equilibrio hidrostático que existe entre los dos fluidos (agua dulce y de mar) de distintas densidades.

Considerando un corte vertical de un acuífero no confinado o libre como se muestra en la Figura 2.1, se tiene:

Figura 2.1.
Corte Vertical en un acuífero costero.



Fuente: Todd, *Groundwater Hidrology*, (1963).

La presión hidrostática total en el punto A es igual a:

$$p_A = \rho_s \cdot g \cdot h_s \quad (2.1)$$

Donde ρ_s es la densidad del agua salada, g es la aceleración de gravedad, y h_s corresponde a la altura del agua salada en un punto determinado. En forma similar, la presión total en el punto B, localizado en la misma posición vertical que A, pero en la zona de agua dulce se tiene:

$$p_B = \rho_f \cdot g \cdot h_f + \rho_f \cdot g \cdot h_s \quad (2.2)$$

Donde ρ_f es la densidad del agua dulce y h_f es la altura indicada en la figura. Para que en la interfase se tenga una situación de equilibrio, la presión en A y B debe ser igual, lo que da origen a la expresión de Ghyben-Herzberg:

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot h_f = \beta \cdot h_f \quad (2.3)$$

Tomando valores característicos para las densidades del agua dulce y salada se tiene:

$$\rho_f = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_s = 1025 \text{ Kg/m}^3$$

Con lo anterior:

$$h_s = 40 \cdot h_f \quad (2.4)$$

El parámetro $1/\beta$ varía en el rango 50 y 33, siendo el valor más frecuente 40. Esto, debido a que la densidad del agua marina es mayor, y varía entre 1020 y 1030 según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual de 1025 Kg/m^3 .

Esto quiere decir que la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota de agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto, es decir, por cada metro de agua dulce sobre el nivel del mar en un determinado punto, la interfase se sitúa a una profundidad de 40 metros.

De la relación obtenida por el modelo de Ghyben-Herzberg, se concluye que la cuña salina posee cerca de 40 veces más la energía que presenta la cuña de agua dulce, por lo que es de esperar que al intensificar el problema de intrusión salina que se da de forma natural, producto de la actividad de bombeo, al deprimir un metro la napa de agua dulce, el ascenso que experimenta la napa de agua salada es 40 metros aproximadamente.

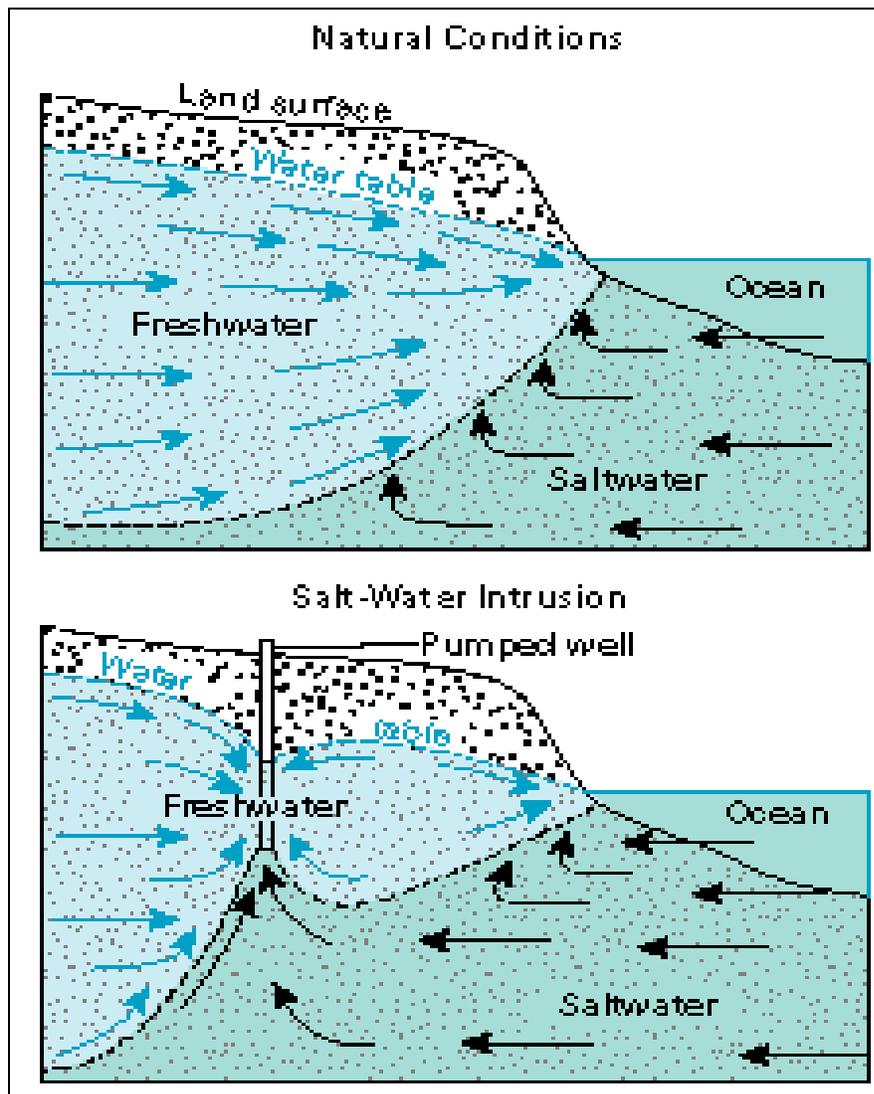
Las hipótesis adoptadas para el establecimiento de la relación de Ghyben-Herzberg, determinan ciertas idealizaciones del problema, las que han permitido identificar las limitaciones y simplificaciones de dicha teoría. Dentro de estos aspectos se tiene:

- Existencia de un equilibrio hidrostático implica que no existe flujo, lo que en general no es cierto.
- La intrusión salina está limitada por la longitud del acuífero y la elevación del nivel freático.
- La superficie de separación entre el agua dulce y salada es plana.
- No existen pérdidas de carga del agua de mar en su avance tierra adentro.
- Se considera que en la interfase los dos fluidos son inmiscibles, es decir, no existe una zona de mezcla entre ambos.

En la Figura 2.2 se presenta a modo esquemático el problema de intrusión salina. Se tiene en una primera etapa la condición de intrusión salina de carácter pasivo, que corresponde al estado de equilibrio natural entre la cuña de agua dulce y la salada. Una vez que se comienza a extraer agua mediante la actividad de bombeo, se observa que la depresión en la napa de agua dulce es menor en relación al ascenso que experimenta la napa de agua salada, como se explicó anteriormente a través de la relación de Ghyben-Herzberg.

Figura 2.2.

Esquema del problema de intrusión salina en un acuífero costero.



Fuente: Imagen Internet.

2.1.3. Interfaz Difusa.

Dado que se trata de la interacción de dos líquidos miscibles, como el agua dulce y agua salina, no existe una interfaz brusca que defina el límite entre ambas fases, si no que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla, denominada también zona de difusión o de transición. Esta zona, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales, y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio como también de las características del flujo desarrollado. Por lo tanto, representa una zona dinámica en la cual el agua se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidad, sino también a consecuencia de cambios en el nivel piezométrico en ambos líquidos.

La determinación de la zona de mezcla en el caso de la existencia de un flujo con densidad variable se realiza considerando la teoría expuesta por Lusczynski (1961).

Esta teoría considera tres tipos de niveles en un punto h_s , h_d y h_a , como se muestra en la Figura 2.3, siendo:

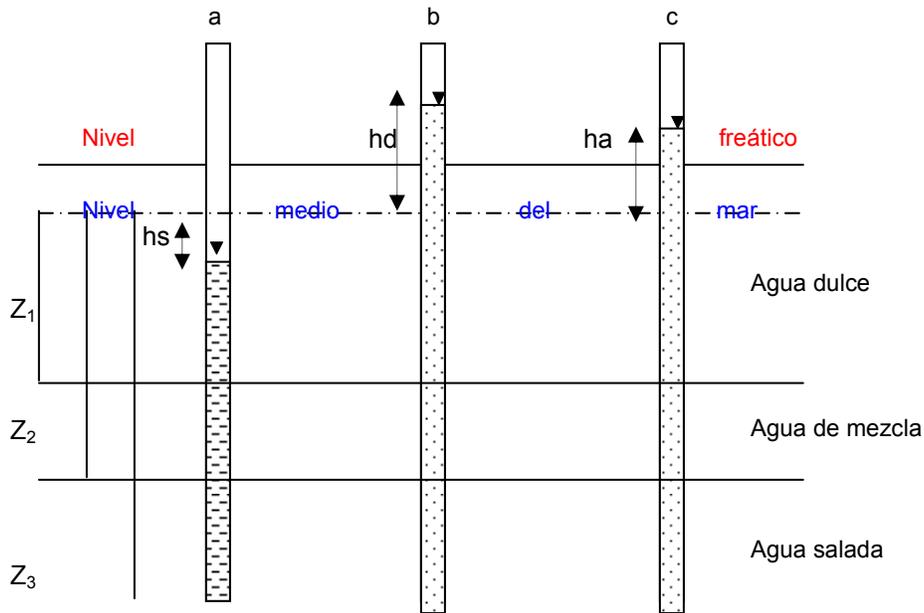
- h_d : Nivel de agua en un piezómetro ranurado en su parte inferior y relleno de agua dulce (nivel de agua dulce).
- h_s : Nivel de agua en el mismo piezómetro, pero relleno del agua existente a nivel de la ranura (nivel del agua puntual).
- h_a : Nivel del agua en el mismo piezómetro, relleno de agua con una distribución de la salinidad similar a la del terreno (nivel de agua ambiental).

Se debe tener en cuenta que el nivel de agua ambiental no tiene por qué coincidir con el nivel freático, pudiendo ser algo superior o inferior. Sólo se igualarán en un sistema de flujo totalmente horizontal.

El nivel z_1 representa la profundidad a la cual se sitúa la zona de mezcla, y por lo tanto, constituye la incógnita que se quiere determinar en el caso de fluidos miscibles.

Figura 2.3.

Determinación zona de mezcla, caso fluidos miscibles.



Fuente: Custodio y Llamas, 1996.

De la Figura 2.3, se tiene que la zona de difusión se extiende entre las profundidades z_1 y z_2 , siendo agua salada sin mezcla la que se extiende entre z_2 y z_3 , y agua dulce, por encima de z_1 .

Realizando un balance de presiones del agua salada de potencial h_s respecto al nivel del mar en z_3 , se establece que si h_a es el potencial ambiental, puede deducirse h_s de la siguiente forma:

$$(h_s + z_3) \cdot \gamma_s = (h_a + z_1) \cdot \gamma_d + \int_{z_1}^{z_2} \gamma(l) dl + (z_3 - z_2) \cdot \gamma_s \quad (2.5)$$

En que $\gamma(l)$ es el peso específico del agua de mezcla a profundidad l y es función de z .

En términos generales, si z_1' es un punto dentro del agua dulce (entre h_a y z_1) y h_s es el potencial puntual a profundidad z , entonces:

$$(h_s + z) \cdot \gamma_s = (h_a + z_1') \cdot \gamma_d + \int_{z_1'}^z \gamma(l) dl \quad (2.6)$$

El nivel del agua ambiental no puede ser medido directamente y debe ser calculado. Se debe tener en cuenta la influencia de la temperatura sobre la densidad, a fin de efectuar el cálculo correctamente. Los valores de $\gamma(l)$ en función de l se pueden determinar a partir de un muestreo cuidadoso, o indirectamente a partir de mediciones de conductividad del agua y de la temperatura.

Mediante un promedio estadístico, es posible calcular un valor medio del peso específico ponderado según la profundidad:

$$\gamma_a' = \frac{1}{z - z_1'} \int_{z_1'}^z \gamma(l) dl \quad (2.7)$$

Si se conocen h_s y γ_a' , correspondientes a la profundidad z , queda determinado el valor de h_a de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\gamma_d \cdot h_a = \gamma_s \cdot h_s + (\gamma_s - \gamma_a') \cdot z + (\gamma_a' - \gamma_d) \cdot z_1' \quad (2.8)$$

Una vez calculada la profundidad h_a , puede también escribirse en términos de z_1 :

$$\gamma_d \cdot h_a = \gamma_s \cdot h_s + (\gamma_s - \gamma_a) \cdot z + (\gamma_a - \gamma_d) \cdot z_1 \quad (2.9)$$

Donde:

$$\gamma_a = \frac{1}{z - z_1} \int_{z_1}^z \gamma(l) dl \quad (2.10)$$

En este sistema de ecuaciones la única incógnita es z_1 , puesto que γ_a depende también de z_1 . Por lo tanto, es posible determinar z_1 por iteración.

Si se conoce la distribución $\gamma(l)$, el proceso para determinar la posición de la interfase podría hacerse directamente, sin la necesidad de afectar el cálculo. No obstante, si se conoce γ solamente en dos o tres puntos, es posible establecer una cierta distribución $\gamma(l)$ y con ella calcular z_1 .

2.1.4. Explotación de Acuíferos Costeros.

El equilibrio entre el agua dulce y agua salada en los acuíferos costeros es función del caudal de agua dulce vertido al mar.

En un acuífero costero sin explotación, el agua dulce se vierte al mar, ya sea través de descargas superficiales o subterráneas. La cantidad de agua vertida al mar mantiene en una cierta posición la interfaz agua dulce - agua salada, pero se pierde sin obtener ninguna utilidad de ella. De esta forma, para mantener limitada la intrusión salina hacia tierra adentro, debe existir un cierto flujo de descarga hacia el mar, que corresponde a lo que debe sacrificarse para mantener controlado el problema. Adicionalmente, el flujo de descarga de agua dulce al mar permite mantener un equilibrio en el balance de sales del acuífero, por lo que cobra una importancia mayor en las características de salinidad del sistema.

Cuando este caudal mínimo que debiese existir para mantener limitado el problema no se cumple, debido a extracciones del recurso subterráneo, se origina una intrusión, que puede permitirse hasta cierto punto dependiendo del efecto admisible en las captaciones, principalmente producto del ascenso de sal en forma de conos. Si las extracciones superan a la recarga del acuífero, no es posible que se produzca una condición de equilibrio, por lo que se produce un lento pero continuo avance de la cuña salina hasta alcanzar las captaciones existentes.

De esta forma, una alternativa de gestión de los recursos hídricos consiste en establecer captaciones poco profundas, captando agua de la parte superior del acuífero que en parte corresponde al caudal de descarga al mar, permitiendo así una intrusión

menos intensa y de menor profundidad. Sin embargo, debido al alto costo que involucra modificar el sistema de captaciones y conducciones en una región determinada, no se considera como una alternativa económicamente viable en la mayoría de los casos.

2.2. Revisión de Antecedentes Previos

En relación a este capítulo se han revisado documentos que permitan tener un conocimiento más claro del problema, principalmente en cuanto a los parámetros relevantes para su identificación y posterior monitoreo.

La siguiente revisión se ha desarrollado considerando antecedentes de tipo nacional e internacional. Dentro de los estudios de carácter nacional, se han recopilado memorias de título en universidades y en especial estudios realizados por organismos públicos y privados del país, específicamente en la zona de Quebrada Los Choros, IV Región de Coquimbo. En el ámbito internacional, se han revisado antecedentes generados por el Instituto Minero y Geológico de España, IGME, en donde se desarrolla extensamente el problema de intrusión salina y la experiencia de diversos países en relación al problema. Específicamente, el congreso convocado y que ha sido objeto de análisis y estudio como parte del presente informe corresponde a “Tecnologías de Intrusión de Agua de Mar en Acuíferos Costeros, TIAC”, llevado a cabo en 1988 y en Marzo del año 2003. En dichos congresos se ha estudiado la situación de países mediterráneos, en relación a la metodología de diagnóstico, control y prevención en acuíferos costeros, por lo que la experiencia internacional frente al problema de intrusión salina adquiere gran importancia en las posibles alternativas para adoptar en Chile.

2.2.1. Situación Nacional

Respecto al material e información disponibles para la zona de estudio, se han revisado los informes realizados por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos y el Departamento de Estudios y Planificación de los Recursos Hídricos, ambos

pertencientes a la DGA, y el estudio desarrollado por ENAMI, 1995. Dichos informes tienen directa relación con la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos de tipo subterráneo en la Quebrada Los Choros.

En aquellos informes se incluyen además antecedentes de tipo hidrológico, hidrogeológico y geológico de la zona, como parte del trabajo realizado por el Área de Modelación perteneciente al Departamento de Estudios y Planificación, por medio del estudio “Modelación Hidrogeológica en Quebrada Los Choros, Comuna La Higuera, IV Región”, S.I.T. N°106, desarrollado como parte del convenio suscrito entre la DGA y la Universidad de Concepción. Dichos antecedentes de la zona en estudio, han sido de gran utilidad para caracterizar el sector de la cuenca en el que el fenómeno de intrusión salina cobra mayor importancia, siendo éste aquel más cercano a la costa y en el cual se centrará el desarrollo del presente informe.

- ***“Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IV Región de Coquimbo.” S.I.T. N°96. DEP - DGA. Septiembre, 2004.***

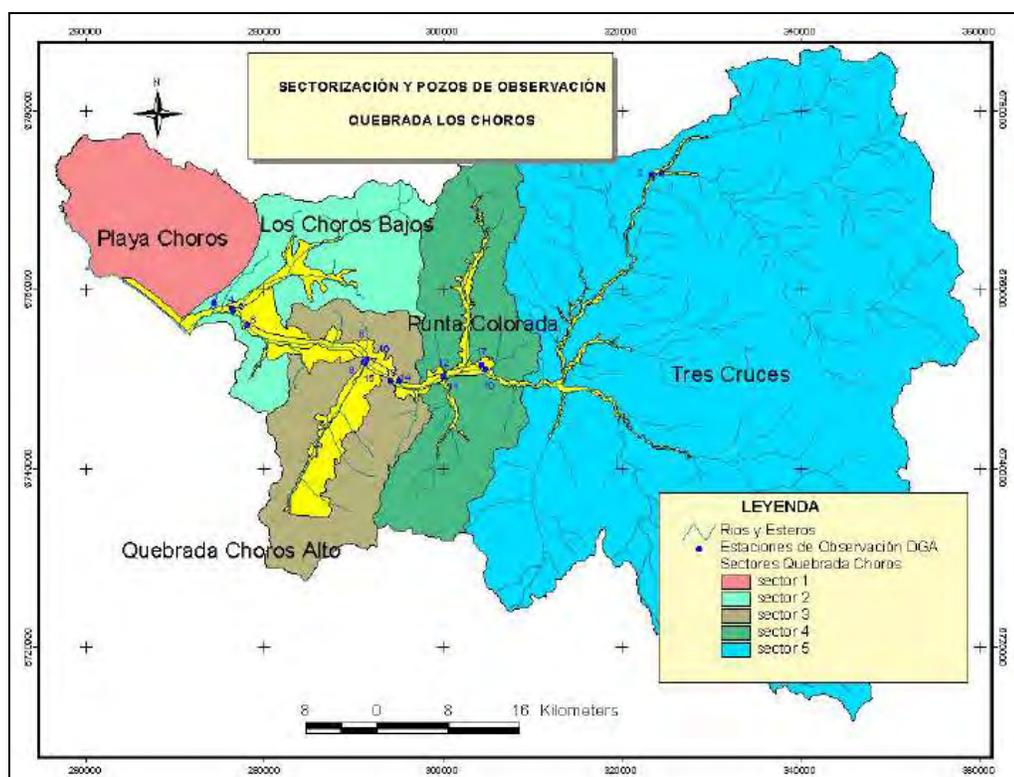
Este informe técnico tiene como objetivo principal, evaluar el recurso hídrico subterráneo analizando escenarios futuros de explotación utilizando un modelo de generación de caudales de escorrentía de la zona desarrollado por GCF Ingenieros Consultores Ltda.

Dado que la Quebrada Los Choros tiene su límite oriental en cadenas montañosas de menor altura que la Cordillera de Los Andes, como la Cordillera de La Punilla, el aporte por derretimiento nival es insignificante, por lo que se considera que la alimentación principal al acuífero se produce por infiltraciones de las precipitaciones ocurridas. En este sentido, el aporte pluvial de la cuenca se traduce en un parámetro importante a determinar, por lo que se adopta un modelo de simulación pluvial, que para este estudio corresponde al modelo MPL, aplicable para cuencas no controladas y desarrollado por el Ingeniero Pablo Isensee.

Para evaluar el recurso hídrico subterráneo, se considera como fuente de recarga del acuífero la escorrentía superficial generada en los eventos de precipitación y que ha sido determinada considerando la estación pluviométrica Junta del Carmen como estación base, de la III región, con una precipitación media anual de 55.4 mm/año. El modelo utilizado es de balance y sectoriza la cuenca en 5 sectores, cada uno de los cuales se modela considerando caudales de entrada, caudales de salida, propiedades hidráulicas y caudales de recarga y descarga asociado a cada uno de ellos.

Los sectores adoptados, en función de sus propiedades hidrogeológicas, se muestran en la Figura 2.4.

Figura 2.4.
Sectorización de la Quebrada Los Choros.



Fuente: Informe S.I.T. N°96. DEP-DGA (2004).

Este informe incluye los resultados del balance hídrico de la cuenca por sectores, para lo cual se simuló 3 escenarios:

- Evaluación del efecto de la explotación del acuífero de los derechos de agua constituidos hasta Agosto 2002 por la DGA en toda la cuenca de Quebrada Los Choros.
- Evaluación del efecto del bombeo de la explotación del acuífero con los derechos otorgados más los solicitados o en trámite hasta el 2003.
- Determinación del caudal sustentable máximo admisible por el acuífero de la Quebrada Los Choros.

Para los 2 primeros escenarios, se concluye que el caudal de explotación es aceptable considerando la recuperación y estabilización de los niveles de agua subterránea en cada uno de los sectores analizados.

En la determinación de la explotación máxima sustentable a futuro, los caudales factibles a explotar por sectores son:

Tabla 2.1.
Caudales factibles a explotar, Quebrada Los Choros.

Sector	Bombeo Factible [l/s]
Tres Cruces	1000
Punta Colorada	700
Qda. Choros Alto	1160
Los Choros Bajo	200
Playa Los Choros	500
Total	3560

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°96. DEP-DGA (2004).

Este último escenario se considera sustentable en términos de los niveles del acuífero, pues éstos logran recuperarse en el tiempo.

De la información obtenida, se observa que para la zona sensible al problema de intrusión salina, el caudal máximo a extraer en el tiempo corresponde a 700 [l/s], de los cuales 500 [l/s] están asociados al sector de Playa Los Choros y 200 [l/s] para el sector de Los Choros Bajos, los cuales determinarán la factibilidad de otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento a futuro.

- **“Determinación de la disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada Los Choros, IV Región de Coquimbo.”**
S.D.T. N°184. DARH - DGA. Noviembre, 2004 y actualizado en Marzo del 2005.

El objetivo principal de este informe es determinar la factibilidad de constituir nuevos derechos de aprovechamiento en la Quebrada Los Choros, sin producir perjuicios a los derechos de terceros. Se adopta como información base la obtenida por medio del informe técnico S.I.T. N° 96.

En la determinación de la posibilidad de constituir nuevos derechos de aprovechamiento en el sector correspondiente a Playa Los Choros y Los Choros Bajos, se consideró la demanda vigente al 31 de Diciembre del 2004, la cual se presenta en la Tabla 2.2. Se incluye también la demanda para cada uno de los sectores de la cuenca.

Tabla 2.2.

Derechos de aprovechamiento factibles de otorgar.

Sector	Demanda Vigente Q [l/s]	N° Pozos
Tres Cruces	1000	47
Punta Colorada	700	16
Qda. Choros Alto	1160	24
Los Choros Bajo	1.2	1
Playa Los Choros	7.5	2
Total	2868.7	90

Fuente: Informe Técnico S.D.T. N° 184. DARH - DGA (2005).

De acuerdo a la Tabla 2.2., y considerando el caudal factible de explotar en cada uno de los sectores de la cuenca, presentado en la Tabla 2.1, se han podido establecer los derechos susceptibles de constituir en carácter de permanente y definitivo de aguas subterráneas, en los sectores acuíferos en la cuenca de la Quebrada Los Choros, determinándose que:

- En el **Sector acuífero de Playa Los Choros** es posible avanzar el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo para aquellas solicitudes presentadas hasta el 31 de diciembre de 2004.

- En el **Sector acuífero de Los Choros Bajos**, es posible avanzar el otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas permanente y definitivo hasta el 31 de diciembre de 2004.
- En el **Sector acuífero de Los Choros Altos**, las recargas de dicho sector, en relación a la explotación prevista de los derechos en él, sólo son suficientes para constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el 30 de junio de 2004.
- En el **Sector acuífero de Punta Colorada**, las recargas de dicho sector, en relación a la explotación prevista de los derechos en él, sólo son suficientes para constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el 31 de diciembre de 2004.
- En el **Sector acuífero de Tres Cruces**, las recargas de dicho sector, en relación a la explotación prevista de los derechos en él, sólo son suficientes para constituir derechos de aprovechamiento de solicitudes presentadas hasta el 31 de julio de 2004.
- ***“Hidrogeología Preliminar Comuna de la Higuera”***. ENAMI, 1995.

Este estudio tiene como objetivo determinar en forma preliminar, las potencialidades hidrogeológicas de las cuencas de quebrada Los Choros y Honda, ubicadas en zonas cercanas aunque con total independencia en las características hidrogeológicas una de otra. Comprende el análisis individual de cada una de las subcuencas de Quebrada Los Choros, entre las que se encuentran: Quebrada Los Choros Altos, Quebrada Agua Grande, Quebrada Pajonales, Quebrada Grande y Quebrada Pelicano.

Este informe, consiste básicamente en la recopilación de antecedentes de carácter cartográfico, geológico, hidrológico e hidrogeológico de la hoya hidrográfica, con la finalidad de realizar un análisis crítico de la información existente y determinar la

necesidad de estudios futuros que resulten imprescindibles para acotar y definir en forma completa dichas potencialidades hidrogeológicas.

A partir de tales antecedentes, se estructuraron mapas hidrogeológicos preliminares de las áreas estudiadas, determinando aquellas unidades hidrogeológicas de relevancia y definiendo areal e hidráulicamente los acuíferos de interés que existen en la zona. A partir de la información de fluctuación de niveles y precipitaciones, se determinaron los mecanismos y montos aproximados de la recarga y descarga de los sistemas subterráneos.

Si bien la zona costera del acuífero Los Choros no se considera en este estudio, los antecedentes aportados en tal informe son de gran utilidad en la caracterización más general de la zona en la que se enmarca el estudio del problema de intrusión salina. En un contexto más amplio, dentro de los resultados obtenidos en este estudio, aquellos que presentan un mayor interés en relación al problema específico de contaminación por intrusión salina son:

- El reconocimiento de un acuífero freático de gran continuidad en la quebrada Los Choros, que presenta su mejor desarrollo en el sector medio de la cuenca, comprendido entre Punta Colorada hasta unos dos kilómetros aguas abajo de la confluencia con quebrada Los Choros Altos.
- Los factores que controlan las anomalías de la calidad del agua subterránea son, básicamente, la mineralización y alteración que afecta a las rocas del área, el origen marino de los sedimentos que conforman el sector de desembocadura de quebrada Los Choros, el tiempo de permanencia del agua con el sustrato y la proximidad entre las obras captantes y los pozos negros.

- ***“Aplicación de una metodología simple para el análisis de Intrusión Marina en acuíferos costeros”***. Guillermo Cabrera Fajardo. 2° Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Santiago, Chile. 1994.

En este documento se ha aplicado una metodología simple para el análisis del problema de intrusión salina, basada en la suposición de un frente abrupto agua dulce-agua salada, al caso de las captaciones de agua potable para la localidad costera de Tongoy. Los resultados han permitido establecer los caudales límite que es posible extraer sin que se contaminen las captaciones con agua salada. La metodología adoptada en dicho estudio se basa en el conocimiento hidrogeoquímico del agua subterránea, determinando la existencia de intrusión salina a partir de la utilización de índices hidroquímicos.

2.2.2. Situación Internacional.

En relación a la situación de los acuíferos costeros sometidos al fenómeno de intrusión salina, se han revisado antecedentes de diversos países, principalmente los del Mar Mediterráneo, con el objeto de tener una mayor claridad en la metodología de control y seguimiento del problema de intrusión salina.

Del congreso denominado Tecnología de la Intrusión de Mar en Acuíferos Costeros, TIAC, realizado en Marzo del año 2003 y convocado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), se ha recopilado información de gran importancia referente a la metodología adoptada en la detección y control de la evolución del fenómeno de intrusión salina.

Principalmente, aquellos documentos que han sido estudiados y que permiten comprender ámbitos de relevancia en el problema que se estudia son:

- ***“Delimitación de Perímetros de Protección de Captaciones de Agua Subterránea para Abastecimiento de Poblaciones en los Acuíferos Costeros. Aspectos Legales y Metodológicos”***. Carlos Martínez N., Álvaro García G. TIAC 2003.

En relación a la delimitación de perímetros de protección de captaciones de agua subterránea para abastecimiento de poblaciones en los acuíferos costeros, el aspecto legal para definir ciertas áreas de protección cobra gran importancia, dificultando la agilización en la toma de decisiones de este tipo. En los países estudiados en este documento (España, Portugal, Alemania, Francia, Reino Unido, Irlanda, Bélgica, Holanda, Italia, Dinamarca, Suiza, Estados Unidos, Canadá y Australia), se han propuesto alternativas de protección ante la degradación de la calidad del agua empleada para abastecimiento por efecto de la intrusión salina, aunque en la gran mayoría sin éxito debido a la dificultad para implantar realmente dicha área de protección. Solamente en el caso de la legislación Portuguesa (Ministério do Ambiente, 1999), se contempla el establecimiento dentro del perímetro de protección de las captaciones, una “zona de protección especial con objeto de prevenir el avance de la intrusión marina”. Esta legislación contempla que esta zona de protección, se establecerá en las zonas costeras donde exista o pueda existir intrusión salina, definiéndose mediante la realización de estudios hidrogeológicos específicos. En ella se pueden limitar los caudales de explotación de las captaciones existentes, prohibir la construcción o explotación de nuevas captaciones de agua subterránea o condicionar su régimen de explotación.

Por el contrario a la situación adoptada por Portugal en relación a la protección de zonas potencialmente vulnerables al problema de intrusión salina, las legislaciones relativas a perímetros de protección de Alemania, Francia, Reino Unido, Irlanda, Bélgica, Holanda, Italia, Dinamarca, Suiza, Estados Unidos, Canadá y Australia no contemplan en los perímetros de protección ninguna zona específica frente al riesgo de intrusión salina.

En España, la normativa hídrica existente para la protección de los acuíferos costeros con problemas de intrusión salina, considera específicamente la dependencia que se produce entre sobreexplotación y salinización de las aguas. Las medidas de control adoptadas cuando se identifica la sobreexplotación o riesgo de intrusión salina en una zona determinada, conlleva la creación forzosa de la comunidad de usuarios y la revisión del plan hidrológico en el acuífero afectado, lo cual ha sido aplicado en una diversidad de acuíferos españoles; la consideración de un acuífero con riesgo de salinización con la consiguiente limitación en los Planes Hidrológicos de las explotaciones de los acuíferos y la redistribución espacial de las captaciones para proteger las aguas subterráneas frente a la intrusión de agua salina; establecimiento de reservas de agua; la aplicación de medidas excepcionales para la superación de dichas situaciones en relación a la utilización del dominio público del recurso; revisión de las concesiones para adaptarse a los Planes Hidrológicos; definición de afección y la regulación de las posibles indemnizaciones por cambios en el régimen de explotación de los acuíferos.

Si bien la legislación hídrica española considera medidas para enfrentar el problema de salinización de las aguas, debido al alto contenido técnico en este tema y por tratarse cada zona costera en específico en función de sus características hidrogeológicas, la implementación de medidas para combatir el problema de intrusión salina conforme a lo que se presenta en la legislación vigente, hace muy difícil el desarrollo de un plan de manejo de acuíferos a un nivel más globalizado, por lo que hacia el año 2003, fecha en que se convocó a este congreso, las prácticas de control propuestas se encontraban en la etapa de evaluación de viabilidad, sin obtener resultados definitivos hasta ese momento.

En resumen, en relación a los aspectos legales que rigen el manejo de los acuíferos costeros en países como España, la situación más factible de aplicar establece la promulgación de una normativa parcial para otorgamiento de autorizaciones y concesiones en el acuífero captado para abastecimiento, que contemplaría regulaciones a las extracciones en un área en el entorno de la captación para proteger el recurso hídrico en cantidad y ante el avance de la intrusión salina, aplicando una

metodología de carácter secuencial para la regulación de las actividades de mayor relevancia en el desarrollo del fenómeno de intrusión salina.

- ***“Diseño Eficiente de Redes de Control de la Intrusión Salina en los Acuíferos Costeros a partir de Información Hidrogeoquímica y Geofísica”***. Albert Casas P., Mahjoub Himi, Josefina-Carlota Tapias P., Gian Piero Deidda, Gaetano Ranieri, Lluís Rivero M. TIAC 2003.

El diseño de una red de monitoreo que controla el avance tierra adentro de la intrusión salina, contempla tanto el diseño de las redes de vigilancia como la aplicación de estrategias de muestreo, utilizando métodos directos como indirectos.

Este estudio considera el diseño de la red de monitoreo a partir de un método estadístico basado en la reducción de la varianza combinando datos hidrogeoquímicos y geofísicos. Dicha metodología ha sido aplicada satisfactoriamente en el acuífero costero de Oued Laou (Noreste de Marruecos) afectado por una incipiente intrusión salina.

El diseño de redes de control utilizando métodos estadísticos se basa en el análisis de la varianza y de cómo ésta disminuye al añadir nuevos puntos de control a la red existente. Su diseño puede formularse usando una aproximación geostatística que permite calcular las varianzas de estimación a partir de la interpolación por *Kriging*, considerada como la estimación lineal de mayor precisión, y que optimiza la ubicación de los nuevos puntos a considerar en la red. La varianza de estimación es sólo función de la geometría de la distribución de los puntos de control y de la estructura del fenómeno estudiado, expresada por el variograma.

Por lo tanto, este proceso tiene como objetivo la determinación de los puntos en donde debiera reforzarse la red de control con nuevos pozos o piezómetros con el fin de sensibilizar la capacidad de detección del problema de intrusión salina.

Como comentario a la metodología adoptada en este caso, el hecho de disponer de un método de optimización para la ubicación de los puntos que conforman una malla de control, no reúne los criterios de carácter físico que rigen el problema, sino que se basa principalmente en la idealización matemática para el control de la intrusión salina, aún cuando considera información de tipo hidrogeoquímica y geofísica. El control que ejercen en la extensión o intensidad de la cuña salina, la presencia de condiciones particulares existentes en la zona, como bien pueden ser geológicos o hidrogeológicos, entre otros, no son apreciados de acuerdo a esta metodología, por lo que puede ocasionarse una interpretación errónea en la caracterización del problema de intrusión salina.

En la práctica, la metodología utilizada ampliamente para la implantación de redes de control, se basa en un criterio cualitativo, en el cual la opinión del hidrogeólogo determina la distribución de los puntos de muestreo para el control de la intrusión salina.

- ***“Explotación Sostenible de un Acuífero Aluvial muy Vulnerable a la Contaminación Marina (Marbella, España)”***. María Jaén Peral, Alvaro Islán G., Eduardo Lupiani M., Salvador Riera M. TIAC 2003.

En este documento se expone una síntesis del modelo de explotación que la empresa Aquagest SUR S.A, ha desarrollado en las captaciones del acuífero de Río Verde destinadas al abastecimiento del correspondiente municipio.

Constituye un factor de gran interés el análisis de la gestión de los recursos hídricos aplicado en esta localidad, de tal forma de mantener controlado el problema de intrusión salina y a la vez satisfacer los requerimientos que se desarrollan en la zona.

El modelo de explotación adoptado en el acuífero aluvial de Marbella, establece criterios de explotación que permiten que la extracción y satisfacción de la demanda sea sustentable en el mediano y largo plazo, considerando que este acuífero presenta una alta vulnerabilidad al desarrollo de un problema de intrusión salina.

La metodología expuesta en este documento considera la explotación de los recursos hídricos de acuerdo al escenario hidrogeológico que domina el acuífero en las distintas épocas anuales, llegando incluso a incrementar el volumen de recursos extraídos sin consecuencias sobre la calidad del acuífero y con independencia del régimen de precipitaciones. La regulación continua y controlada de los caudales diarios de extracción, con la reducción o incremento del caudal de bombeo de acuerdo a las condiciones hidráulicas del acuífero, ha permitido disponer de un volumen adicional de hasta un 50% más de los recursos, manteniendo controladas simultáneamente la intrusión salina y la calidad del agua que conforma la red de abastecimiento por debajo de los umbrales determinados.

Los criterios de extracción se basan en mantener un grado de explotación que asegure un gradiente hidráulico positivo hacia el mar, lo cual se produce siempre y cuando los niveles piezométricos no desciendan bajo el nivel medio de éste, de tal forma de evitar la entrada de la fase salina tierra adentro. La metodología aplicada considera que una vez que cesa la recarga, a medida que el acuífero se agota y los niveles inician el descenso, se procede de forma inmediata a reducir el caudal de bombeo. Este momento está determinado por el inicio de una tendencia al aumento en la evolución de la conductividad eléctrica, cuando los niveles piezométricos se encuentran en descenso. Como seguridad, alcanzada la cota +1 m.s.n.m, se procede a extremar el control de niveles y de las variaciones en la composición química, y se procede a una reducción progresiva y creciente del volumen de extracción hasta que se produzcan nuevos aportes de agua dulce.

El volumen de agua bombeada ha presentado variaciones a lo largo de los años, pasando de un escenario de explotación, a la demanda de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas del acuífero. En el primer caso, con un volumen bombeado de unos 2 - 3 hm³/año de agua y detectándose salinidades elevadas, y en el segundo caso, una vez en operación la etapa de control de la intrusión salina, con conductividades eléctricas estabilizadas en valores aceptables y volúmenes captados de hasta 3 o 4 hm³/año de agua de buena calidad para el abastecimiento.

En particular, la respuesta que ha presentado el acuífero a la disminución de los bombeos y a la entrada de nuevos aportes de agua dulce, se ha desarrollado en forma rápida, recuperándose incluso la calidad del agua antes que los niveles piezométricos inicien la recuperación.

Por lo tanto, de la experiencia en el manejo del acuífero aluvial de Río Verde, se puede concluir que el mantener siempre un gradiente hidráulico hacia el mar y ajustando en todo momento el caudal de extracción a la situación del acuífero, determina una forma efectiva de lucha contra la intrusión salina, en tanto no se desarrollen medidas de carácter estructural como la creación de barreras impermeables o hidráulicas entre las captaciones de abastecimiento y el mar.

La regulación constante de los caudales de bombeo en función de las posibilidades del acuífero, por lo tanto, se convierte en una herramienta de gestión que ha dado resultados satisfactorios y efectivos en el control de la intrusión salina, garantizando de tal forma la sustentabilidad de la explotación a medio y largo plazo.

- ***“Principales Aspectos para la Implantación de Redes de Control de Intrusión Marina”***. Domingo A. Martín S., Jesús María Díaz C., Ultano Kindelán B., Alejandro Rozycki B. TIAC 2003.

Esta publicación destaca los principales aspectos que se deben considerar para la implantación de una red de control de intrusión salina en acuíferos costeros, teniendo por objetivo hacer una revisión de todos los aspectos científico-técnicos que hay que tener en cuenta para construir una red de control que prevenga el avance tierra adentro de la fase salina.

En primer lugar, entre los estudios que deben realizarse previamente al diseño de la red, se contempla la caracterización de la geografía física, geología e hidrogeología del sitio en estudio, en conjunto con otros aspectos como geomorfología, vegetación y parámetros climatológicos. Una vez que se tiene el conocimiento detallado de cada uno

de los factores que condicionan la zona en estudio, es posible prever una correcta interpretación de los resultados obtenidos una vez que se ha implantado una red de monitoreo.

Entre los aspectos geológicos necesarios de estudiar se encuentran factores como la edafología, estratigrafía y tectónica de la zona, para lo cual deben elaborarse mapas en detalle que permitan un estudio globalizado del acuífero.

Desde el punto de vista hidrogeológico, además del grado de libertad o de confinamiento del acuífero, el conocimiento de parámetros hidráulicos como la porosidad eficaz, conductividad hidráulica y transmisividad, son relevantes en la caracterización y mayor comprensión del comportamiento del recurso subterráneo.

Parámetros hidrológicos como el régimen de precipitaciones, recursos totales con que cuenta la cuenca, infiltración de las aguas superficiales, retornos de riegos y descarga subterránea al mar, son también parámetros relevantes para una interpretación posterior adecuada del problema de intrusión salina.

Adicionalmente, la hidrogeoquímica del agua subterránea presenta gran importancia en la caracterización del problema de intrusión salina, puesto que permite realizar una correcta interpretación frente al desarrollo de la intrusión.

Una vez caracterizado el acuífero, el diseño de un programa de monitoreo consiste en el establecimiento de una red de puntos de control apropiada que permita realizar una interpretación conjunta global.

La distribución espacial de dicha red debe diseñarse en función de la distribución en profundidad de los niveles geológicos presentes, junto con datos exactos de los espesores de estos niveles a lo largo de la zona en estudio. Actualmente, la técnica de prospección que proporciona mayor detalle es la tomografía geoeléctrica de superficie, realizada conjuntamente con sondeos eléctricos verticales.

De acuerdo a este documento, dado que la interfase de agua salina se adentra en el interior adoptando una forma aproximadamente cóncava, se considera que la mejor forma de analizar este proceso dinámico sería colocando las sondas siguiendo una distribución espacial equidistante en dirección perpendicular a la costa formando una red de anchura superior a $1/5$ de la longitud en esa dirección. Además, se considera que los puntos de control deben estar situados tanto en la proximidad de sondeos explotados como junto a otros no activos.

Después de realizar un detallado inventario de posibles puntos de estudio en el que deben incluirse, el nivel freático, los accesos a la zona y solicitarse los permisos de actuación entre otras consideraciones, se seleccionan al menos un total de 15 puntos de los cuales se hará la instalación del equipo que permita obtener los datos relevantes en al menos 10 de ellos. Esto, contemplando que algunos de dichos puntos de control presenten algún tipo de deterioro.

En cuanto a la profundidad de los sensores se debe tener en cuenta la fluctuación de los niveles freáticos en el estiaje, para lo cual se recomienda colocar la mayoría de los sensores por debajo del nivel mínimo de estiaje, procurando que todos queden al mismo nivel. Otro factor a tener en cuenta es la posible existencia de niveles permeables continuos en la zona (detectado por métodos geofísicos). En el caso de encontrar la presencia de varios niveles y constatando hidrogeológicamente que forman acuíferos diferentes se debe colocar sensores en cada uno de ellos y estudiar la posible interferencia entre los acuíferos presentes.

La campaña de medidas debe realizarse durante años completos, para así poder reflejar la evolución de los parámetros. Idealmente, la periodicidad para el registro de los valores es su ejecución en tiempo real, aunque conlleva un gran presupuesto.

De acuerdo a la experiencia de los expositores del presente documento, se concluye que dentro de los factores más críticos en la implementación de una red de control del problema de intrusión salina se tienen:

- Diseño de una red de control representativa de la zona de estudio, con puntos de medición en diferentes tipos de sondeos.
- Selección de instrumentación con características adecuadas que permitan establecer una comunicación óptima con cada uno de los sensores.
- Establecimiento de un modelo geológico que permita conocer detalladamente la geología del acuífero y su comportamiento hidrogeológico.
- Determinación de un modelo matemático que facilite la interpretación y predicción de la intrusión.

2.3. Métodos Directos de Prevención y Control del la Intrusión Salina

Una vez que se ha identificado el problema de intrusión salina en un acuífero costero, es posible aplicar varios métodos para prevenir o controlar el problema, cada uno de ellos con sus características funcionales dependiendo de las circunstancias determinadas.

A continuación se describen algunas de ellas:

2.3.1. Disminución del Bombeo.

En el caso en que la explotación es superior a la recarga o bien, aunque no lo sea, produce una penetración indeseable de la cuña salina, se puede proceder a reducir el bombeo hasta que la posición de equilibrio sea la deseada. Sin embargo, se producen los siguientes inconvenientes:

- a) Se pierde al mar agua dulce para mantener la posición deseada de la interfaz. Puede recuperarse parte de esa agua por medio de colectores costeros, aunque no con efectividad en todos los casos y conllevando un alto costo económico.
- b) Si la interfaz ha sobrepasado por un excesivo bombeo el límite máximo de penetración admisible, el retroceso de la cuña es tan lento como su avance,

aunque se puede forzar con una reducción de las extracciones, con recarga artificial o estableciendo un bombeo de agua salada.

- c) La reducción de bombeo trae como consecuencia la determinación de un nuevo abastecimiento de agua a un costo accesible.
- d) Falta de herramientas legales para controlar y reducir los bombeos.

2.3.2. Reubicación de los puntos de bombeo.

Si la intrusión es debida a una excesiva concentración de pozos de bombeo en unos pocos lugares próximos a la costa o a la explotación de pozos sobre la cuña salina, sin que la penetración sea muy importante, se puede proceder a reubicar las captaciones o redistribuirlas de una mejor forma. Sin embargo los inconvenientes de este método son:

- a) La detención de algunas captaciones para construir y operar otras nuevas es caro.
- b) La reubicación puede suponer el establecimiento de nuevas conducciones.
- c) Se requiere de herramientas legales para poder reubicar los puntos de extracción.
- d) No se consigue reducir el caudal de agua dulce vertido al mar.
- e) El permitir una mayor penetración de la interfaz agua dulce – agua salada y pozos más al interior supone disponer de una menor capacidad de embalse utilizable para regulación.

2.3.3. Recarga Artificial.

Suponiendo que existe una adecuada distribución de las captaciones, se puede compensar el exceso de bombeo mediante recarga artificial en los lugares apropiados. Sin embargo, los inconvenientes de este proceso son:

- a) La obtención del agua para recarga debe ser obtenida a un bajo costo, privilegiando la obtención del recurso a inyectar en las cercanías de la zona que presente deficiencias en su calidad.
- b) El establecimiento de la recarga es caro y no siempre es posible realizarla de la manera deseada.
- c) No se consigue reducir el flujo de agua dulce vertido al mar.
- d) Al tener mayores niveles de agua, puede reducirse la capacidad de almacenamiento del acuífero en relación a aguas lluvias, ya que éstas pueden ser rechazadas o descargadas rápidamente a cauces superficiales.

Si se dispone de agua de recarga, y ésta es de calidad adecuada y se recibe a un caudal regular, en general es más fácil distribuirla directamente a los usuarios y por lo tanto reducir el bombeo. Sólo cuando el agua disponible debe ser tratada, y este tratamiento se puede efectuar por infiltración en el terreno, o cuando el agua disponible debe ser regulada y esta regulación se puede conseguir económicamente por almacenamiento en el terreno, es viable el control de la intrusión salina por recarga.

2.3.4. Establecimiento de Barreras Físicas.

Si en la costa se establece una barrera impermeable, que afecte a los acuíferos, se aíslan éstos del mar y por lo tanto no se produce la intrusión salina, pudiéndose utilizar al máximo los recursos hídricos.

Estas barreras pueden consistir en el establecimiento de tablestacas, relleno de zanjas con arcilla, cemento o asfalto, o inyecciones a presión de cemento, bentonita, sustancias bituminosas u otras sustancias químicas (gel de sílice, acrilato cálcico) a través de sondeos colocados muy apretados a lo largo de la costa (Todd, 1959). Otra forma de establecimiento de barreras físicas lo constituye la inyección de aire a presión. El aire inyectado en el terreno a lo largo de una línea de pozos reduce la permeabilidad del medio para la circulación del agua. El aire puede tomarse "in situ" eliminándose así la necesidad de conducciones, y su manejo es barato. La técnica es conocida a través

de los trabajos de explotación petrolífera y almacenamiento de gas en el terreno, pero la aplicación para controlar la intrusión salina ha sido ensayada de forma experimental solamente (Roberts, 1967). El aire inyectado se difunde y ayuda a mantener la continuidad de la barrera.

El establecimiento de una barrera física permite una intensa utilización del acuífero como embalse subterráneo.

Los inconvenientes principales de esta técnica son:

- a) Los costos de construcción son muy elevados.
- b) Es difícil que sean totalmente efectivas.
- c) Su mantenimiento en general es barato, pero puede encarecerse en zonas en que se producen movimientos del terreno. La subsidencia ocasionada por la explotación del agua subterránea o el progresivo incremento de la presión del mar al descender los niveles de agua dulce, pueden también afectar la barrera.
- d) Sólo pueden establecerse en acuíferos de escasa profundidad y escasa potencia.

2.3.5. Barrera Hidráulica de Inyección.

Si a lo largo de la costa se establece una recarga tal que en cualquier punto se tenga una elevación piezométrica superior al potencial de agua dulce preciso para que no se produzca flujo de agua salada hacia el interior, se tiene un efectivo control de la intrusión.

Como el potencial de agua dulce en agua salada crece con la profundidad, cuanto más profundo sea el acuífero, mayor tendrá que ser la elevación piezométrica que deberá crearse.

En acuíferos libres, la barrera puede crearse mediante un canal, zanja o campos de recarga paralelos, o bien mediante una línea de pozos próximos. En acuíferos confinados cuyo techo sea profundo, esta barrera debe establecerse mediante una línea de pozos próximos. La separación entre pozos se determina dependiendo de la relación entre los costos de construcción y de mantenimiento y el mayor consumo de agua necesaria para recarga de tal forma de mantener un nivel piezométrico adecuado entre pozos. Es frecuente que el nivel del agua en los pozos sea superior al del terreno, en cuyo caso se requiere realizar una buena cementación exterior a fin de que el agua fluya al exterior. Si tales fugas llegaran a producirse, no sólo no sería efectiva la barrera, sino que se pueden producir daños a estructuras o edificios por anegación de terrenos.

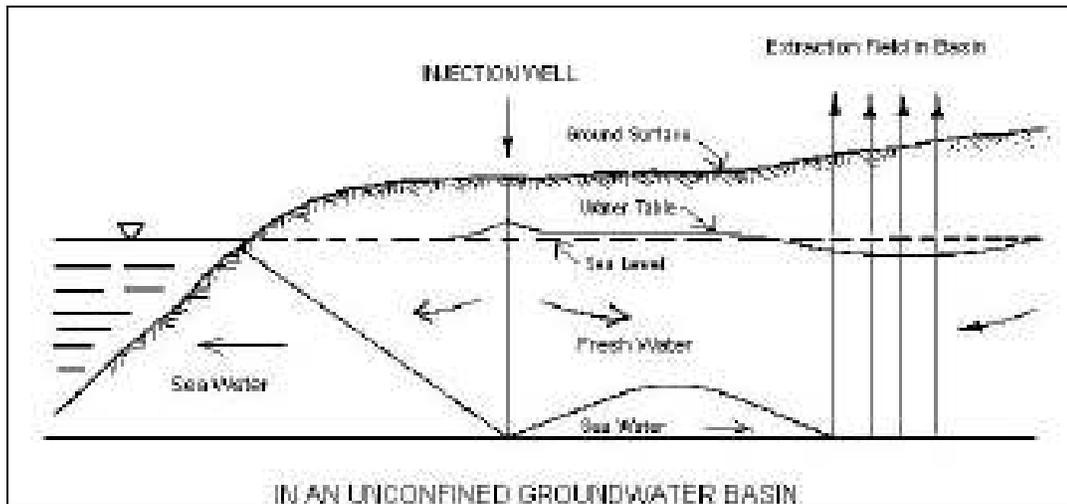
Dentro de los principales inconvenientes de este método se tienen:

- a) Si la barrera se establece mediante la construcción de pozos, implica un alto costo económico.
- b) El agua de inyección es cara, en especial si la recarga se realiza a través de pozos.
- c) El mantenimiento de los pozos es caro y complicado. El problema es menor cuando se construyen zanjas o canales.
- d) Puede ser muy difícil o imposible establecer campos de extensión o canales en zonas pobladas, debido a que no se dispone de espacio o por razones de estética. En este caso, el uso de pozos se adopta como una solución más efectiva, sin embargo, se presentan problemas en las labores de limpieza de los pozos de inyección, que permiten mantener una capacidad óptima de recarga.
- e) El costo de conducciones, en caso de inyección con pozos, es por lo general muy elevado.

La barrera hidráulica, presentada esquemáticamente en la Figura 2.5, tiene como ventajas el no precisar de una limitación del bombeo y se puede utilizar la máxima capacidad de almacenamiento del acuífero en el caso de ocurrencia de precipitaciones. El flujo de agua dulce al mar es nulo, excepto una pequeña porción del agua inyectada que descarga al mar.

Figura 2.5.

Uso de pozos de inyección en el control del problema de intrusión salina.



Fuente: The class V underground injection Control Study, EPA.

2.3.6. Depresión de Bombeo.

La limitación de la penetración de la cuña salina también puede lograrse estableciendo una línea de bombeo dentro de la misma cuña a lo largo de la costa, de tal forma de interceptar todo el flujo de agua salada hacia el interior.

Se requiere en este caso, que la depresión producida en cualquier punto este por debajo de los niveles piezométricos del agua dulce. La penetración masiva del agua salada queda limitada a la línea de pozos de bombeo, pero detrás de ella aún existe una cuña de agua salada cuya penetración tiene que ser limitada permitiendo un cierto flujo de agua dulce hacia el cono de depresión.

Los inconvenientes principales de esta tecnología son:

- a) La barrera presenta un alto costo de construcción y de mantenimiento, principalmente por la energía de bombeo requerida.
- b) El agua salada bombeada debe enviarse al mar sin que se produzcan contaminaciones.
- c) Se pierde agua dulce al mar a través de los pozos de bombeo.

- d) Al tener que estar los pozos de bombeo de agua salada a cierta distancia de la costa, se pierde volumen útil del acuífero al ser grande la porción del mismo invadida por el agua salada, en especial en zonas de baja pendiente.
- e) Se requiere reducir las extracciones si se quiere mantener estable la cuña salina situada detrás de la barrera; a lo menos la extracción de agua dulce debe ser inferior a la recarga.

La instalación de depresiones de bombeo puede estar justificada en casos en que se pretenda reducir una intrusión salina ya existente, pero pasado cierto tiempo debe emplearse otro método de control. También puede estar justificado su uso cuando sea necesario mantener un flujo de agua dulce al mar para mantener el balance de sales en el agua dulce.

3. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA DE INTRUSIÓN SALINA MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES Y NO CONVENCIONALES

3.1. Antecedentes Generales

Las técnicas Convencionales y No Convencionales corresponden a herramientas de diagnóstico y control del problema de intrusión salina. Las primeras, se caracterizan por ser utilizadas frecuentemente en el estudio del agua subterránea, y corresponden a métodos físicos e hidroquímicos. Las técnicas no convencionales, en cambio, presentan un mayor desarrollo tecnológico que las técnicas convencionales, contribuyendo de manera eficaz en el estudio de la salinización de acuíferos en casos en que no se cuenta con captaciones o puntos de control construidos. Dichas técnicas corresponden a métodos de prospección geofísica y análisis isotópico.

La aplicación de dichas técnicas constituye además, una herramienta muy importante en la planificación y gestión de los acuíferos, ya que permiten, además del diagnóstico preliminar de la existencia del problema de intrusión salina, mantener un control posterior de la evolución tanto espacial como temporal del fenómeno de intrusión salina.

Las metodologías utilizadas para detectar, definir y conocer la evolución de la intrusión salina en acuíferos costeros, se dividen en dos áreas principales:

- i. Detección de fenómenos de invasión de agua salina en los acuíferos costeros, y
- ii. Definición de la situación de la interfase salina en sus tres dimensiones: profundidad, longitud y ancho.

Por lo general, la tecnología empleada en el proceso de detección del fenómeno de intrusión salina involucra principalmente la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas y geofísicas. El análisis isotópico de las muestras de agua es también utilizado, aunque en menor grado que los anteriores debido a que su uso es más restrictivo producto de los altos costos económicos que implica.

3.2. Técnicas Convencionales

Dentro de las técnicas convencionales adoptadas para el diagnóstico y posterior control del problema de intrusión salina, se analizarán aquellos métodos de carácter físico e hidroquímico que permiten tener un mayor conocimiento del estado y evolución de la calidad del agua subterránea ante el aumento de salinización.

3.2.1. Métodos Físicos.

Dentro de los métodos físicos utilizados para diagnosticar el problema de intrusión salina, se encuentra el análisis piezométrico del agua subterránea que conforma el acuífero.

El completo conocimiento de la piezometría de un acuífero posibilita la determinación de las líneas equipotenciales de flujo, es decir, la identificación de aquellos puntos que presentan una igual cota piezométrica, posibilitando la caracterización de las líneas de flujo que condicionan el comportamiento del escurrimiento subterráneo. De tal forma, se tiene una idea del sentido en que se desarrolla el flujo y por ende, los mecanismos de recarga que se producen en el acuífero. Una vez determinado lo anterior, es posible conocer, dependiendo del sentido positivo o negativo del gradiente hidráulico en dirección al mar, si el problema de salinización se encuentra controlado o se intensifica tierra adentro, respectivamente. La determinación de los niveles debe realizarse considerando el nivel medio del mar, ya que así es posible diagnosticar el estado de vulnerabilidad que manifiesta el acuífero en relación a la entrada de la cuña salina.

3.2.2. Métodos Hidrogeoquímicos.

Cuando el problema de intrusión salina se manifiesta en los acuíferos costeros, se producen modificaciones físico - químicas en el agua subterránea que principalmente se manifiestan en la zona de mezcla entre el agua dulce y agua salada. Estas reacciones corresponden básicamente al intercambio iónico que se da entre ambas

facies en busca del equilibrio químico, donde los parámetros que cobran importancia en los fenómenos modificadores destacan, entre los aniones, el contenido en cloruros, sulfato, bicarbonato y nitrato, y entre los cationes, sodio, calcio, magnesio y potasio, por lo que el análisis hidrogeoquímico del agua subterránea en el estudio de la intrusión salina, deberá contemplar fundamentalmente dichos elementos y las relaciones que se produzcan entre ellos.

El conjunto de reacciones que se producen en un acuífero, está fuertemente influenciado por las características litológicas e hidrogeológicas de la zona en estudio, ya que condicionan el comportamiento que presenta el acuífero al estar sometido al contacto con el frente de agua salada.

Se debe considerar que el análisis químico de las muestras de agua tomadas en los diversos tipos de captaciones existentes (sondajes, pozos, norias o piezómetros) y a las profundidades que sean representativas del nivel o cota a la cual se muestrea, debe contemplar la determinación de los parámetros relevantes al problema que se analiza.

Aquellos índices y parámetros hidrogeoquímicos que son más representativos y confiables en la identificación del fenómeno de intrusión salina en la Quebrada Los Choros se presentan a continuación.

Nota: En lo que sigue, los valores se referirán a la unidad de miliequivalentes por litro, meq/l, tal como indica el signo r. (Custodio y Llamas, 1996)

3.2.2.1. Contenido de ión Cloruro.

El ión cloruro es el que posee mayor estabilidad química, debido a que no está sujeto a procesos de disolución o precipitación, y además, es el elemento de mayor abundancia en el agua salina. Estas características lo convierten en el ión más fiable y que mejor información proporciona en la identificación de contaminación marina. Sin embargo, para desarrollar un diagnóstico completo del problema, debe considerarse en conjunto a

otros parámetros de interés para evitar posibles deducciones erróneas del origen de la salinización.

Los perfiles verticales realizados en pozos habilitados para tal fin, pueden dar una idea de la estratificación hidrogeoquímica. Sin embargo, dicha aplicación tiene como inconveniente el requerir de un elevado número de muestras tomadas a diferentes profundidades. En forma alternativa, comúnmente se adopta el registro de conductividad eléctrica mediante una sonda sumergible, dado el alto valor de correlación entre ambos parámetros.

3.2.2.2. Contenido de Sales Disueltas.

No se recomienda considerar exclusivamente este parámetro en la identificación del problema de intrusión salina, ya que los contenidos de sales disueltas en el agua subterránea pueden deberse a procesos diferentes, como lo son la infiltración desde la superficie por efectos de riego o precipitación, sales que son aportadas por los diferentes tipos de rocas dependiendo de su composición, condiciones climáticas, composición del agua de recarga, tiempo de contacto, longitud de recorrido, y permeabilidad, entre otros, influyen de forma importante y a veces dominante en las características de salinidad del acuífero.

3.2.2.3. Relación Cloruro-Bicarbonatos.

Es el índice de mayor uso. Su rápido aumento es un excelente indicador de la intrusión salina, dado que el cloruro es el ión que predomina en el agua del océano y normalmente se encuentra en pequeñas cantidades en el agua subterránea. En cambio, el bicarbonato es por lo general el anión más abundante en el agua subterránea y sólo se encuentra en pequeñas cantidades en el agua de mar, debido a que en este ambiente se consume rápidamente y se deposita en el fondo marino en forma de calcio.

Lo que más delata el comienzo o establecimiento de un estado de intrusión salina es una rápida elevación en el contenido del ión cloruro, ya que aguas muy cloruradas por contaminación humana o por riegos insistentes son también muy carbonatadas. A modo de ejemplo, si el incremento de cloruros es debido a concentración de sales en zonas de regadío, la relación crece mucho menos para igual incremento de cloruros que cuando se produce el problema de intrusión salina.

La relación cloruro–bicarbonatos, $\frac{r Cl^-}{r CO_3H^-}$, presenta normalmente en agua continentales valores entre 0.1 y 5 y en el agua de mar varía entre 20 y 50 (Custodio y Llamas, 1996).

3.2.2.4. Contenido de Bromuro.

Según Custodio y Llamas (1996) se encuentra menos de 0.01 ppm de Br⁻ en aguas dulces y el agua de mar tiene 65 ppm. De acuerdo a Snoeyink y Jenkins (1987) la concentración de bromuro de la mayoría de las aguas naturales dulces es menor a 1 mg/l y en agua de mar alrededor de 70 mg/l. De esta forma, al presentarse concentraciones por sobre el rango natural de Br⁻ en las aguas subterráneas, se está frente a un problema de intrusión salina.

3.2.2.5. Relación Cloruro-Bromuro.

Puede ser también una relación interesante para detectar el problema de intrusión salina, pero el agua debe estar con un alto grado de salinización para que el contenido de bromuro sea medible con la adecuada precisión, por lo que no se considera una relación adecuada en la etapa de detección del fenómeno.

3.2.2.6. Relación Magnesio-Calcio.

El alto valor de la relación $\frac{r \text{ Mg}^{+2}}{r \text{ Ca}^{+2}}$ cuando se presenta el problema de intrusión salina constituye un índice para determinar la existencia del problema, ya que esta proporción se presenta en valores bajos, normalmente entre 0.2 y 1 en aguas continentales y en agua de mar presenta valores cercanos a 5. Por lo tanto, una rápida elevación de este índice se considera como indicativa de contaminación, en especial cuando se acompaña del aumento de los cloruros y de la relación $\frac{r \text{ Cl}^-}{r \text{ CO}_3\text{H}^-}$. A veces esta relación puede verse afectada por fenómenos de reducción de sulfatos (Custodio y Llamas, 1996).

3.2.2.7. Otras Relaciones y Métodos Gráficos de Análisis.

Una relación que refleja el intercambio iónico que se da entre la fase de agua salina y la de agua dulce, y que está asociada al equilibrio entre los iones alcalinos y alcalinotérreos, corresponde a la relación $\frac{r (\text{Na} + \text{K})}{r (\text{Ca} + \text{Mg})}$, respectivamente. Al producirse intrusión salina en un acuífero, el agua salina encuentra sedimentos en equilibrio con un agua de relación $\frac{r (\text{Na} + \text{K})}{r (\text{Ca} + \text{Mg})}$ en general menor; el agua salina cede iones alcalinos al terreno y acepta iones alcalinotérreos para tender a acercarse a la relación del agua dulce (Custodio y Llamas, 1996).

En forma adicional al análisis de los parámetros expuestos anteriormente, es de gran utilidad, principalmente cuando se maneja una gran cantidad de datos, el uso de representaciones gráficas que permitan visualizar con mayor rapidez y comodidad la distribución espacial o temporal de los datos obtenidos en terreno. Dichos diagramas, permiten también caracterizar la composición química que presentan los diversos sectores que conforman el área de estudio.

Comúnmente, se utilizan diagramas de Piper, Schoeller, Scatter y Stiff, cuyos fundamentos e interpretaciones son relativamente directos para quien los analiza. En forma particular, en los estudios de acuíferos costeros, el diagrama de Piper se muestra de gran utilidad ya que permite conocer la evolución hidrogeoquímica en el proceso de mezclas de aguas de diferente naturaleza.

Los mapas de isocontenido también son una herramienta básica no sólo porque permiten determinar una distribución espacial del parámetro que se analiza, sino también porque el estudio comparativo de dos o más mapas confeccionados en distintas fechas puede ser de ayuda en el conocimiento de la evolución temporal del problema de intrusión salina. Es importante considerar para una correcta interpretación de los mapas hidrogeoquímicos que la procedencia de los datos sea la misma, ya que muestras tomadas a diferentes profundidades, por ejemplo, no permiten establecer comparaciones en la evolución temporal de la intrusión salina.

El diagrama de Collins (1923) corresponde a otro método gráfico para analizar el impacto de la intrusión salina en acuíferos costeros, y fue adoptado por el USGS. (Todd, 2005) Representa el análisis químico del agua por barras de tamaño proporcional a los miligramos equivalentes de radicales que forman parte en el equilibrio del sistema. La ventaja del método está en el orden de la disposición y en el uso de ciertas combinaciones de colores.

3.3. Técnicas No Convencionales

Dentro de las técnicas no convencionales adoptadas para el diagnóstico y posterior control del problema de intrusión salina, se analizarán aquellos métodos de carácter geofísico e isotópico que permiten tener un mayor conocimiento del estado y evolución de la calidad del agua subterránea ante el aumento de salinización.

3.3.1. Técnicas Geofísicas.

La exploración geofísica es la prospección de estructuras geológicas y de depósitos minerales realizada por medio de la medición de ciertas cantidades físicas, verificadas en la superficie del terreno como fenómenos que pueden ser interpretados por las leyes fundamentales de la física y el empleo de instrumentos adecuados.

Dentro de los métodos aplicables en la detección de la intrusión salina, los de resistividad eléctrica y electromagnéticos en superficie constituyen la principal herramienta de este tipo para la exploración del agua subterránea en la zona costera, por su capacidad inherente para detectar cambios en la conductividad eléctrica del agua contenida en los poros (Morales Montaña, 2000). En estas metodologías de diagnóstico se involucra el efecto de todos los constituyentes del suelo, como el basamento rocoso, la porosidad, la naturaleza y salinidad de la disolución que ocupa los espacios vacíos, entre otros, por lo que el efecto que producen estas variables introduce un nivel de incertidumbre en las mediciones y posterior interpretación de la información.

De todas formas, el fenómeno que afecta a la mayoría de los métodos eléctricos aplicados a la prospección hidrogeológica, es la conducción iónica que se realiza principalmente a través de la disolución que satura a las rocas y a través del agua que las constituyen.

La clasificación de los métodos geofísicos aplicados al estudio de la intrusión salina puede hacerse básicamente en función de la profundidad a investigar. Así, aquellos métodos que presentan buena respuesta frente a pequeñas variaciones de la conductividad del subsuelo y cuyo rango de penetración se limita a los primeros 50 – 60 m. corresponde a los métodos electromagnéticos operando en el dominio de frecuencias. Los Sondeos Eléctricos Verticales, SEV, o perfiles de resistividad eléctrica, si bien pueden alcanzar centenares de metros en profundidad, su limitada focalización a profundidades mayores determina su uso para pequeñas distancias.

Cuando las intrusiones son profundas, las técnicas más utilizadas se centran en los Sondeos Electromagnéticos de Dominio de Tiempo (SEDT) que junto a su capacidad de penetración aportan una gran focalización de la respuesta.

Todas estas técnicas mencionadas anteriormente se caracterizan por determinar parámetros como avance longitudinal, anchura y espesor de la lengua salina, posibilitando el conocimiento espacial del avance de la cuña de salinización. Dentro de las técnicas puntuales, se encuentran aquellos métodos que suministran datos solamente en profundidad, como lo son las testificaciones geofísicas realizadas en sondeos.

3.3.2. Métodos Isotópicos.

En relación a las técnicas isotópicas, los isótopos estables proporcionan una variable independiente que permite identificar el mecanismo por el cual se produce el proceso de salinización, sobretodo en aquellos casos en los que existe duda sobre si la salinización se debe a procesos de intrusión salina, a la existencia de aguas saladas congénitas o infiltración y transporte desde la superficie en zonas de riego. Tal ventaja en la identificación del problema de contaminación marina, se debe a la diferente composición que presenta el agua dulce y el agua de mar.

La ventaja de los isótopos estables presentes en el agua es que por lo general no están sujetos a fenómenos modificadores en el flujo de agua subterránea, por lo que su composición química no varía y posibilitan una detección más directa del origen de la salinización del agua.

Los valores de oxígeno -18 y deuterio, en conjunto o en forma individual al análisis del contenido del ión cloruro, corresponden a parámetros que están linealmente correlacionados en lo que se refiere a la identificación del origen de la salinización en la zona de mezcla entre agua dulce y agua salada. Se debe tener en cuenta, que dicha correlación se da en aguas relativamente salobres. A modo de ejemplo, en una agua

dulce que presenta una contribución cercana al 5% de agua de mar, equivalente a un contenido de cloruro de 950 mg/l, no se producirán cambios significativos en el valor del oxígeno -18 (López Geta - Mena Inglés, 1988).

De todas formas, pese a constituir este método una herramienta eficaz en la detección de la intrusión salina, el estudio isotópico debe ir acompañado de un estudio hidrogeoquímico general, puesto que éste último es el que permitirá una completa interpretación de los resultados obtenidos.

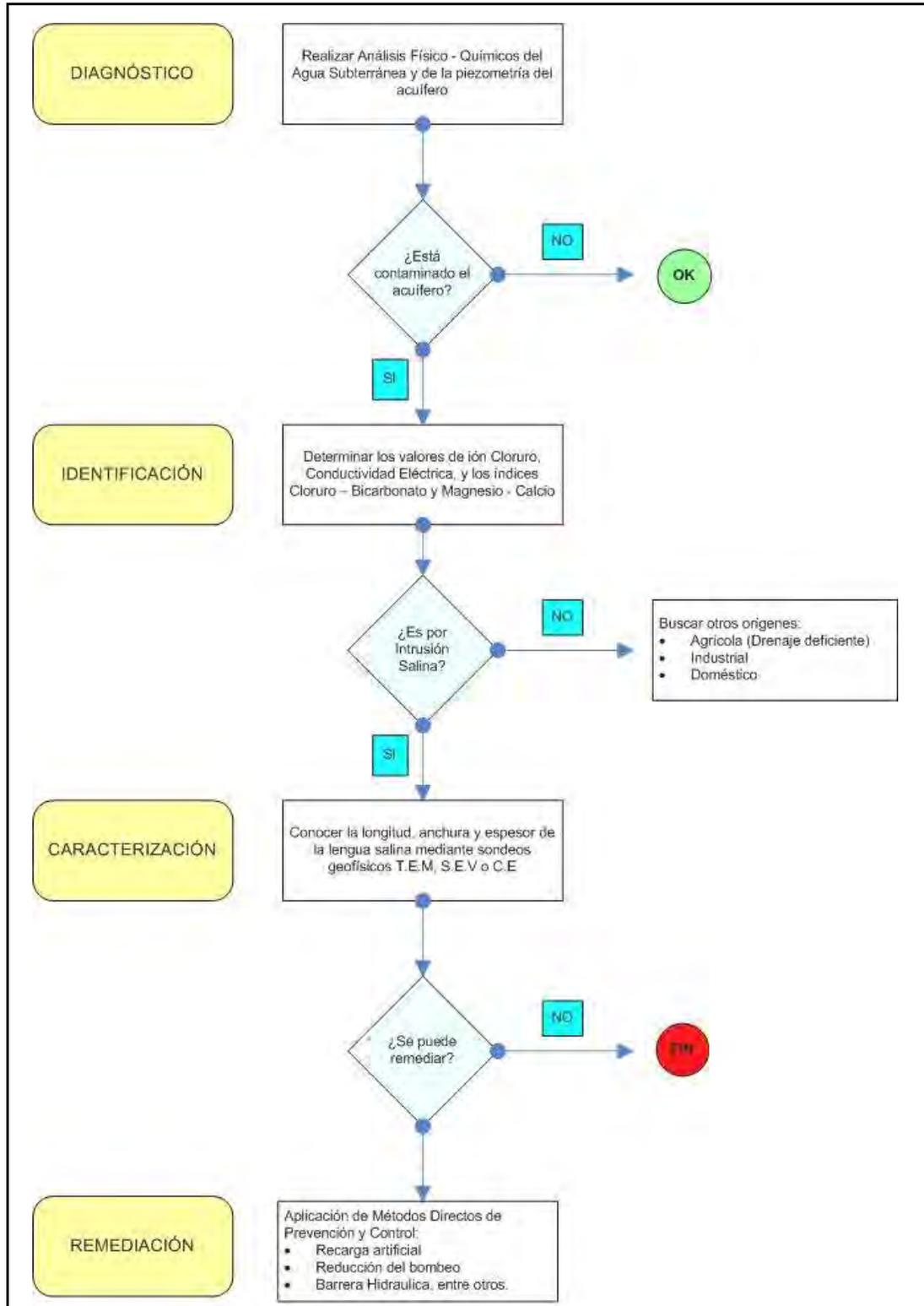
Pese a constituir una herramienta eficaz en la detección del origen de la salinización en un acuífero determinado, el análisis isotópico de las aguas subterráneas no es ampliamente utilizado en comparación a las otras técnicas mencionadas en este informe, principalmente porque presenta un uso restrictivo debido al alto costo económico de su aplicación.

En resumen, la metodología de diagnóstico del problema de intrusión salina, considerando la aplicación de las principales técnicas enunciadas en este informe, se expone en la Figura 3.1.

Si bien en el siguiente esquema se considera la aplicación de la totalidad de las herramientas existentes para gestionar de forma adecuada los recursos hídricos subterráneos, las técnicas adoptadas en la implementación de una red de monitoreo en Quebrada Los Choros se basan en el uso de las técnicas de carácter físico (control de los niveles piezométricos) e hidrogeoquímico, pues representan una alternativa eficiente y de menor costo económico en relación a las demás técnicas existentes.

Figura 3.1.

Estrategia básica de diagnóstico, identificación, caracterización y remediación de la intrusión salina.



Fuente: Adaptado de Bedient (1994).

4. ZONA DE ESTUDIO

Este capítulo se basa principalmente en el trabajo realizado por el Área de Modelación del Departamento de Estudios y Planificación, DGA, “Modelación Hidrogeológica en Quebrada Los Choros, Comuna La Higuera, IV Región”, S.I.T. N°106. En forma complementaria, se presenta información obtenida de otras fuentes como parte del desarrollo del presente estudio y que se presenta como una actualización a la revisada en el informe base S.I.T. N° 106.

4.1. Ubicación y Accesos

La zona a estudiar, corresponde a la cuenca de Quebrada Los Choros, Comuna de La Higuera, ubicada en el extremo norte de la provincia del Elqui, IV región de Coquimbo, y zona sur de la provincia del Huasco, III Región de Atacama. Se extiende entre las coordenadas geográficas 29°02'–29°43' latitud sur y 70°27'–71°28' latitud oeste. La ubicación de la cuenca en términos de coordenadas UTM es: UTM Norte 6.720.000 y 6.780.000; y UTM Este 360.000 y 270.000, Datum PSAD 56, Huso 19. Es la más importante de las cuencas costeras comprendidas entre el río Huasco y el Elqui.

El acceso a la zona se realiza por la Carretera Panamericana (Ruta 5 Norte), de la cual se inicia un camino ripiado en buen estado 70 Km. al norte de la ciudad de La Serena, por el cual se accede a la localidad de Los Choros, ubicado unos 20 Km. al poniente de dicho ramal. La zona cuenta además con el aeropuerto civil de la ciudad de La Serena.

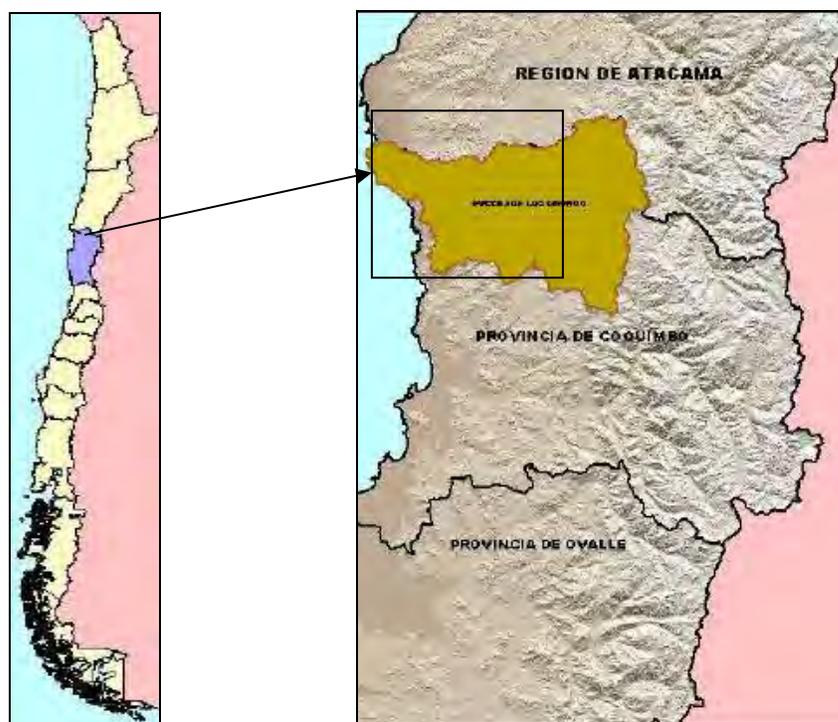
Los principales centros urbanos lo componen los poblados de Punta Colorada, El Trapiche, Choros Bajos y la Higuera, siendo éste último el mayor de ellos con una población de aproximadamente de 1100 habitantes (*Fuente*, Censo 1992). El resto de los poblados son cercanos a los 200 habitantes.

La principal actividad económica de la cuenca corresponde a la pequeña minería y al riego. Si bien los grandes yacimientos que alguna vez dieron alta rentabilidad

económica al sector de Quebrada Choros ya no existen, aún permanecen, pero en menor escala, siendo el más importante de éstos el mineral El Tofo.

La Figura 4.1 muestra la ubicación espacial de la cuenca en estudio y la Figura 4.2, corresponde a una fotografía aérea de la zona baja de Quebrada Los Choros, sitio específico donde se estudiará el problema de intrusión salina.

Figura 4.1.
Ubicación Zona de Estudio.



Fuente: Informe Técnico S.D.T. N°184, DARH-DGA (2005).

Figura 4.2.
Zona Baja Quebrada Los Choros.



Fuente: Google Earth.

4.2. Geomorfología, Clima y Red de Drenaje

4.2.1. Geomorfología.

La Quebrada Los Choros se encuentra inserta en un área en la que se destacan tres entidades morfológicas principales: Planicies Costeras, Cordillera de la Costa y Cordones Transversales.

Las Planicies Costeras se desarrollan hacia el norponiente de la desembocadura de la Quebrada Los Choros y se caracterizan por constituir varios niveles de terrazas

marinas. Se presentan casi planas, alcanzando un gran desarrollo hacia el interior. Hacia el norte de la desembocadura, en el Llano Los Choros, alcanzan un ancho de 16 Km. aproximadamente. Las terrazas más altas poseen entre 40 a 50 m sobre el lecho actual de la quebrada (Niemeyer, 1971).

La Cordillera de la Costa la conforman los altos topográficos de Sierra del Pleito y Cordón del Sarco, al norte y sur de la desembocadura respectivamente, en sentido N-S, y las cimas varían entre 500 y 1440 msnm (Börgel, 1983).

Los Cordones Transversales quedan caracterizados por la cadena de cerros dispuestos hacia el este de Quebradas de la Higuera y Pajonales, hasta los valles de los ríos Carmen y Turbio, en donde destacan los cordones del Rosario y de las Perdices cuyas alturas varían entre los 400 y 2000 msnm. El sector más oriental de Quebrada Los Choros, en donde destacan la Cordillera La Puntilla, Altos de Peralta y Sierra Cóndor, tienen alturas que alcanzan los 4.000 msnm denominados como sector de media montaña (Paskoff, 1993).

La Quebrada Los Choros no tiene su cabecera en la Cordillera de Los Andes, sino que en la Cordillera de la Puntilla, donde las cumbres más altas no superan los 4000 msnm, lo que limita el aporte de aguas producto del derretimiento de nieves. Debido a lo anterior, la Quebrada Los Choros no posee un régimen de escurrimientos continuo a lo largo del año, y las precipitaciones normales infiltran rápidamente en el relleno sedimentario, generalmente en el curso superior y medio de la quebrada. Raras son las ocasiones en que existe escurrimiento superficial hasta llegar al mar, lo cual ocurre cuando las lluvias presentan características de catástrofe.

La Quebrada Los Choros limita por el sur con tributarios del río Elqui y con la pequeña cuenca de la quebrada Honda de la que queda separada por el cordón de cerros Buenos Aires, que presenta cumbres cerca de los 2000 msnm. Por el norte tiene por vecinas las cuencas costeras de las quebradas Carrizalillo y Chañar de Aceitunas, separada de ellas por los cordones Cristales y Pajonales (2000 msnm), y a algunos tributarios del sur del río Huasco, de los cuales la separan las sierras Cóndor y Altos de

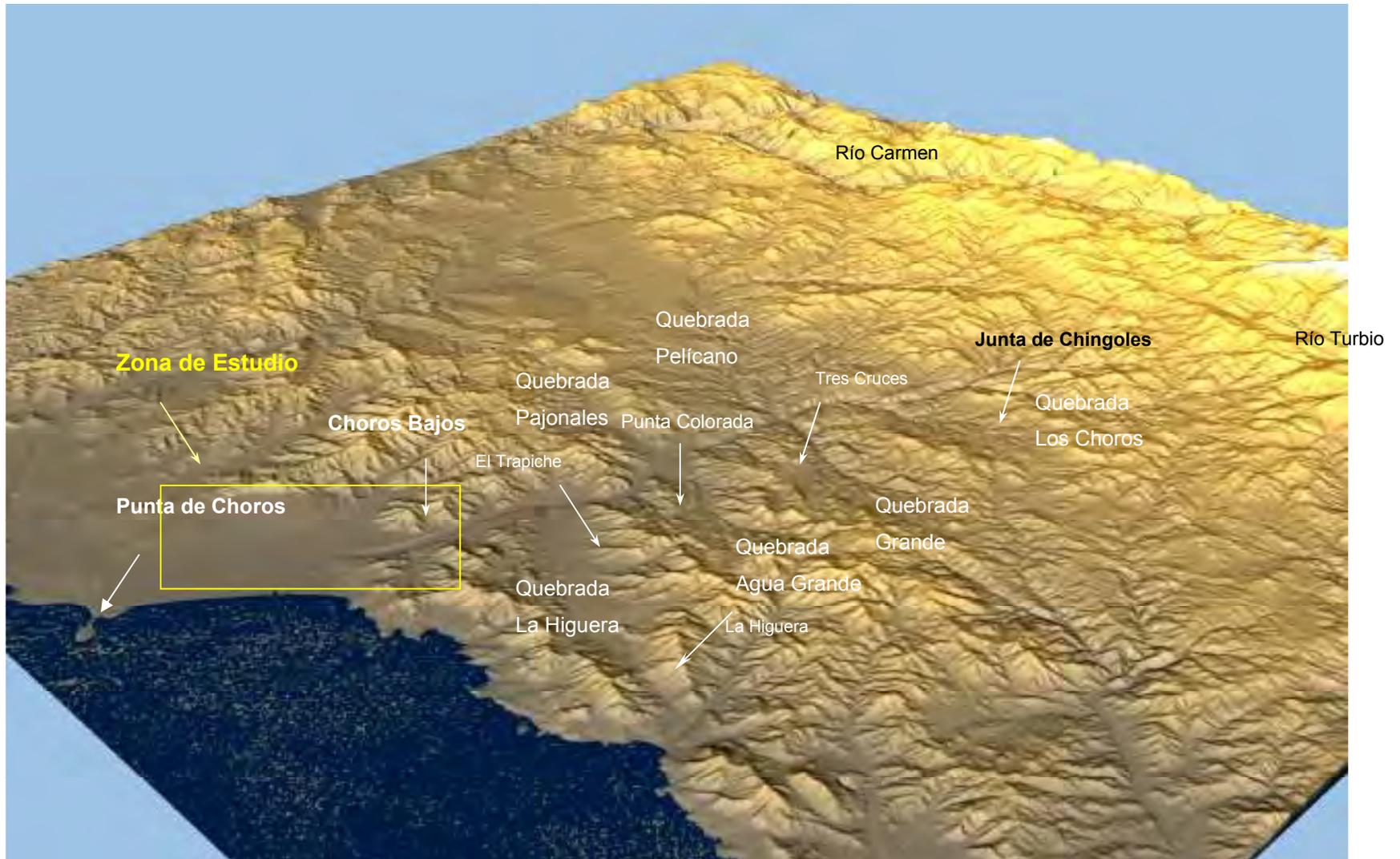
Peralta. Por el oriente, nace en los contrafuertes de la precordillera de La Puntilla (4000 msnm), no teniendo por lo tanto alimentación de alta cordillera.

La quebrada se desarrolla en dirección aproximada E-O en una longitud cercana a los 90 Km. desde su extremo oriental a occidental. El ancho de la quebrada es variable en su recorrido. Desde Chingoles al mar, este varía entre 200 y 1200 m., alcanzando sólo entre 70 y 90 m. en el sector llamado Angostura, a unos 8 Km. de la desembocadura.

Para efectos del análisis del fenómeno de intrusión salina, el estudio se concentra en la zona baja de la cuenca, denominada Franja Costera, la que incluye relieves menores a 600 m y se caracteriza por amplias terrazas marinas asociadas en su parte oriental a conos aluviales, escombros de pie de laderas y conos de deyección inactivos y de reducido tamaño.

En la Figura 4.3 se presenta un modelo digital de la cuenca, elaborado por el Departamento de Estudios y Planificación (DEP) de la DGA, mediante el informe técnico S.I.T. N° 106.

Figura 4.3.
Modelo digital cuenca Quebrada Los Choros.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

4.2.2. Clima y Vegetación.

Según Antonioletti (1972), la cuenca de Quebrada Los Choros presenta 3 tipos de clima: uno desértico costero con nubosidad abundante; desértico transicional y desértico frío de montaña, siendo dominantes en la zona los dos primeros.

El litoral de la cuenca está influenciado por el clima desértico costero, caracterizado por cubrir la zona durante la noche y replegarse hacia el mar durante el día; tiene gran estabilidad térmica, con promedios que oscilan alrededor de los 15°C. Las precipitaciones más probables varían entre 50 a 100 mm/año. Más al oriente de la cuenca, la zona está influenciada por un clima desértico transicional, caracterizado por temperaturas extremas que superan los 30°C y precipitaciones cercanas a los 100 mm/año. Finalmente, en la parte alta de la cuenca predomina el clima desértico frío de montaña, caracterizado por presentar precipitación de tipo nival.

La vegetación de la zona es del tipo xeromórfica, en la que predomina una flora arbustiva adaptada a vivir en escasez de agua.

4.2.3. Red de Drenaje.

En relación a la Red de Drenaje de la cuenca, Peralta (1971) describe la hoya hidrográfica de la Quebrada de Los Choros, indicando que tiene una superficie de 4058 Km², y que corresponde a la hoya N° 213 del grupo de Hoyas Preandinas cuya continuidad hasta la cordillera principal queda interrumpida por el desarrollo de cuencas andinas, o bien, de cuencas cerradas.

Los principales afluentes nacen en la Sierra del Cóndor, Altos de Peralta y Cordillera de la Puntilla. Estos son las quebradas de La Junta y de Las Chacras. Hacia aguas abajo, recibe los aportes de las siguientes quebradas: Totorá, La Laja, Pelicana, Chañar, Pajonales y Choros Altos (La Higuera), además de una serie de quebradas menores.

En los dos tributarios principales antes mencionados, hay arroyos perennes alimentados por el escurrimiento superficial de las lluvias invernales, vertientes y el escaso derretimiento de nieves durante la estación estival. Aguas abajo de Chingoles, la Quebrada Los Choros en su mayor parte es un arroyo efímero que tiene escurrimiento superficial sólo en aquellas ocasiones en que las lluvias invernales son muy grandes, y que revisten carácter catastrófico.

En la parte baja de la quebrada, hacia 1947 había arroyos perennes alimentados por vertientes permanentes, con flujos superficiales que alcanzaban las decenas de litros por segundo. Debido a descensos de los niveles estáticos, estas vertientes no existen en la actualidad (ENAMI, 1995).

4.3. Hidrología

La caracterización hidrológica realizada se basa principalmente en el estudio de antecedentes disponibles de precipitación por parte de la estación de control pluviométrico vigente en la actualidad, El Trapiche, y de información disponible de estaciones de control anteriores de la DGA.

4.3.1. Precipitaciones.

La principal fuente de alimentación del recurso hídrico en la zona baja de la cuenca corresponde a neblinas costeras que ingresan al interior a través de valles y quebradas, como se aprecia en la Figura 4.4, así como de la ocurrencia ocasional de lluvias de escaso monto y de derretimientos menores de nieve en primavera, que se infiltran rápidamente en el relleno sedimentario, aportando al volumen de agua subterráneo. Ocasionalmente, y sólo en las grandes crecidas la escorrentía superficial alcanza al mar.

Figura 4.4.
Aporte de neblinas costeras en la zona.



Fuente: Elaboración Propia.

En cuanto a las estaciones de control pluviométrico en la zona, han existido cuatro registros pluviométricos disponibles en la cuenca, correspondientes a las estaciones Tres Cruces, Incahuasi, El Tofo y El Trapiche mostradas en la Figura 4.5, de las cuales las 3 primeras fueron administradas por particulares y sus registros se obtuvieron de los estudios hechos por CORFO (1971) y CNR (1987), encontrándose activas sólo durante un período de tiempo determinado. La ubicación de las estaciones pluviométricas existentes en la zona, y el período de vigencia de cada una de ellas se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.

Estaciones pluviométricas Quebrada Los Choros.

Nombre	Ubicación		Período de Vigencia	
	UTM Norte	UTM Este	Inicial	Final
Tres Cruces	s/i	s/i	Ene - 1940	Jun - 1942
Incahuasi	s/i	s/i	Ene - 1966	Dic - 1970
El Tofo	s/i	s/i	Ene - 1919	Dic - 1948
			Ene - 1964	Dic - 1970
El Trapiche	6747692	297804	Ene - 1979	Jul - 2003
s/i: Sin Información				

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA (2005).

Figura 4.5.

Estaciones pluviométricas en cuenca quebrada Los Choros.



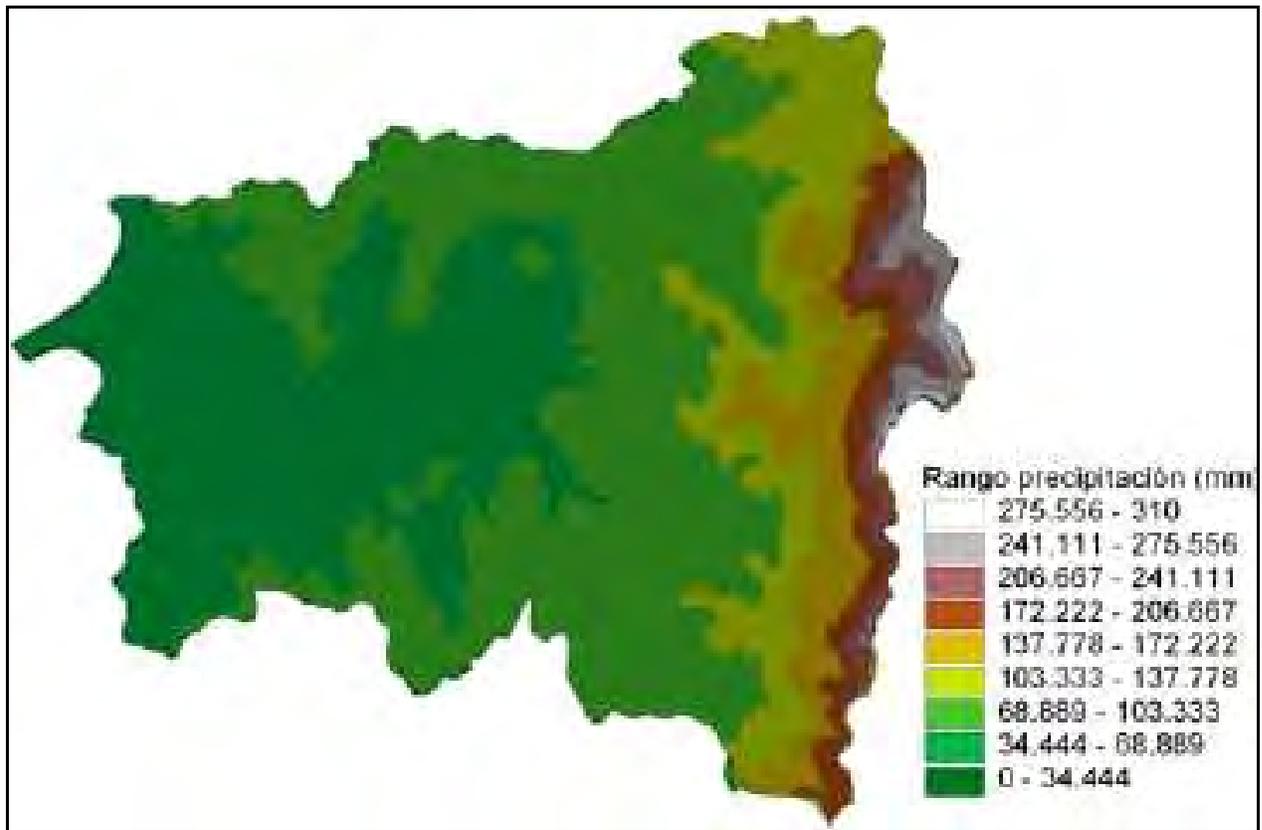
Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

A partir del análisis de los datos de estaciones pluviométricas que han existido en la zona, exceptuando la estación Tres Cruces, en el Informe Técnico S.I.T. N°106, se confeccionó un modelo digital que representa la variación espacial de las precipitaciones en función de la altitud en la cuenca de Quebrada Los Choros, Figura 4.6.

Es importante mencionar que la zona correspondiente a la estación El Tofo tiene un régimen local, con precipitaciones que son mayores al resto de la cuenca y esto se debe al microclima que existe debido a la morfología del sector. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que la estación el Tofo no es representativa de la cuenca Los Choros en la estimación de la precipitación media de la región en estudio.

Las estaciones Incahuasi y Trapiche, presentan precipitaciones medias anuales menores a los 50 mm/año, con variaciones temporales en años secos y húmedos que tienen un rango de 0 hasta más de 100 mm/año.

Figura 4.6.
Precipitación media anual en función de la altura.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

Actualmente, la única estación pluviométrica existente en la cuenca corresponde a El Trapiche, controlada por la Dirección General de Aguas. Se ubica en el sector medio bajo de la cuenca, al costado sur del cauce principal, a una altitud de 460 msnm. Sus registros se extienden desde enero 1979 a julio 2003. La precipitación media anual es de 47.9 mm., distribuidos principalmente entre mayo y septiembre. La máxima precipitación anual fue de 178.5 mm. en el año 1997, siendo éste un año en el que el fenómeno del Niño afectó claramente nuestro territorio.

El registro de precipitaciones mensuales de la estación El Trapiche se presenta en la Figura 4.7, correspondiente al período entre Enero 1979 hasta Julio de 2003. A partir de ésta, se ha confeccionado la estadística de precipitaciones medias mensuales en la zona de la estación en cuestión.

La información pluviométrica extendida se presenta en la Tabla 4.2.

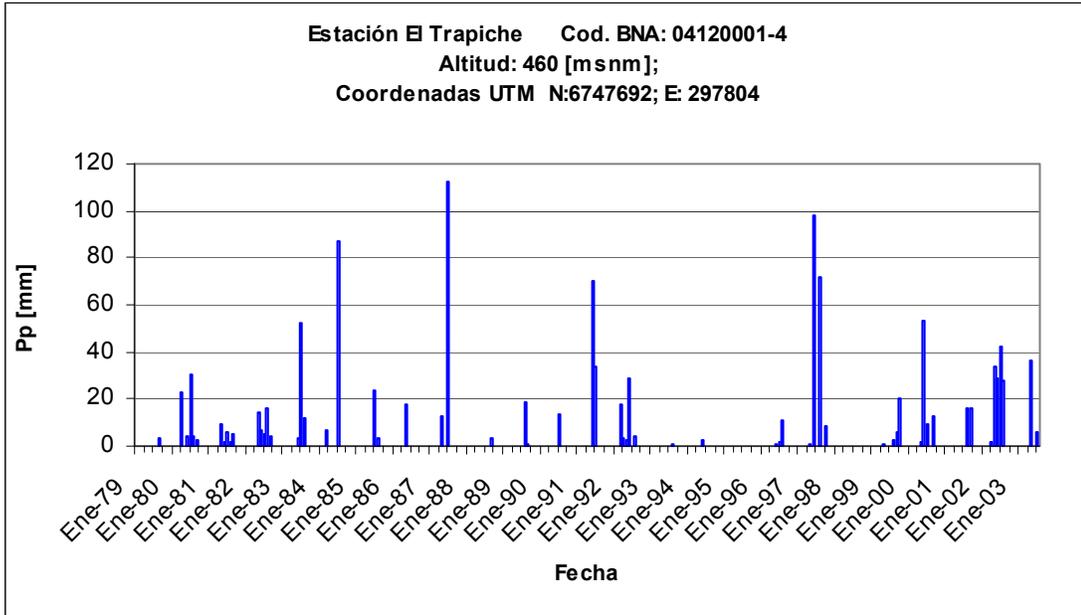
Tabla 4.2.
Registro pluviométrico Estación El Trapiche.

Estación :	EL TRAPICHE													
Código BNA :	04120001-4									UTM Norte :	6747692	mts		
Altitud :	460	msnm										UTM Este :	297804	mts
Cuenca :	RIO LOS CHOROS				SubCuenca :	Qda. Los Choros entre Qda.del Pelicano y Desembocadura								
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
1979	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0		
1980	0	0	0	23	0	4	30.5	4.5	2.5	0	0	0		
1981	0	0	0	0	9.5	2	5.5	2	5	0	0	0		
1982	0	0	0	0	14	7.1	5	16	4	0	0	0		
1983	0	0	0	0	0	3.1	52.2	12	0	0	0	0		
1984	0	0	6.4	0	0	0	86.7	0	0	0	0	0		
1985	0	0	0	0	0	0	24	3	0	0	0	0		
1986	0	0	0	0	17.5	0	0	-	-	-	0	0		
1987	0	0	0	0	18	0	112.5	0	0	0	0	0		
1988	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0		
1989	0	0	0	0	0	0	0	19	0.5	0	0	0		
1990	0	0	0	0	0	0	13.5	0	0	0	0	0		
1991	0	0	0	0	0	70.5	33.5	0	0	0	0	0		
1992	0	0	18	3	2.5	29	0	4	0	0	0	0		
1993	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0		
1994	0	0	0	0	0	2.5	0	0	0	0	0	0		
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1996	0	0	0	0	0	1	2	11	0	0	0	0		
1997	0	0	0	0	0.5	98	0	71.5	0	8.5	0	0		
1998	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0		
1999	0	0	0	0	0.5	0	0	2.5	5.5	20.5	0	0		
2000	0	0	0	0	1.5	5.3	9	0	12.6	0	0	0		
2001	0	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0	0		
2002	0	0	0	1.5	3.4	28.5	4.2	27.5	0	0	0	0		
2003	0	0	0	0	3.6	0	6	-	-	-	-	-		
MEDIA	0.0	0.0	1.0	1.1	5.2	11.9	16.9	8.2	2.4	1.3	0.0	0.0		
DESV. EST.	0.0	0.0	3.8	4.6	10.3	25.5	29.2	15.8	4.3	4.6	0.0	0.0		
MAXIMA	0	0	18	23	36	98	112.5	71.5	16	20.5	0	0		
MINIMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Fuente: Centro de Información de Recursos Hídricos, DGA.

Figura 4.7.

Registro histórico de precipitaciones mensuales Estación El Trapiche.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8.

Precipitación media mensual Estación El Trapiche.



Fuente: Elaboración propia.

En general, las precipitaciones en la cuenca se distribuyen entre los meses de mayo a septiembre, siendo los meses más lluviosos junio y julio. En este período se alcanza en promedio, un 93% del total de las precipitaciones ocurridas anualmente. En el período de octubre a abril se tiene ausencia casi total de lluvias, llegando sólo al 7% de las precipitaciones promedio. Las magnitudes estacionales promedio registradas en la estación El Trapiche, se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3.

Precipitación promedio en períodos seco y húmedo en cuenca Los Choros.

Precipitación Estación El Trapiche [mm]	Aporte al total [%]	
Período Húmedo (Mayo - Septiembre)	44.6	93%
Período Seco (Octubre - Abril)	3.3	7%

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estudios anteriores en la zona (ENAMI, 1995), se ha podido concluir que el régimen de precipitaciones presenta un comportamiento propio de climas desérticos, donde se producen precipitaciones inferiores a 100 mm/año, y que se caracterizan al presentarse años particularmente lluviosos, que el agua precipitada se concentra en intervalos de tiempo muy reducidos.

4.3.2. Escorrentía.

No existe escurrimiento superficial permanente en la cuenca quebrada Los Choros. Sólo durante la ocurrencia de precipitaciones intensas y concentradas en el tiempo se verifican escurrimientos que llegan al mar y que se mantienen por algunos días. De acuerdo a versiones obtenidas de distintos pobladores, la última y gran lluvia ocurrida durante el año 1997, ocasionó escurrimientos superficiales que se mantuvieron por cerca de 2 semanas.

Pese a la ausencia de escorrentía continua en la zona, en el sector alto de la quebrada Los Choros se producen afloramientos del agua subterránea en 2 sectores puntuales, aunque en muy baja magnitud. El primero de estos se produce aproximadamente 13 Km. aguas arriba de Tres Cruces, y se mantiene por cerca de 4 Km. de longitud. El

segundo tramo de afloramientos se produce desde el sector Junta de Chingoles, ubicado unos 21 Km. al oriente de Tres Cruces, y que se extiende unos 2 km. aguas arriba de dicho sector (ENAMI 1995).

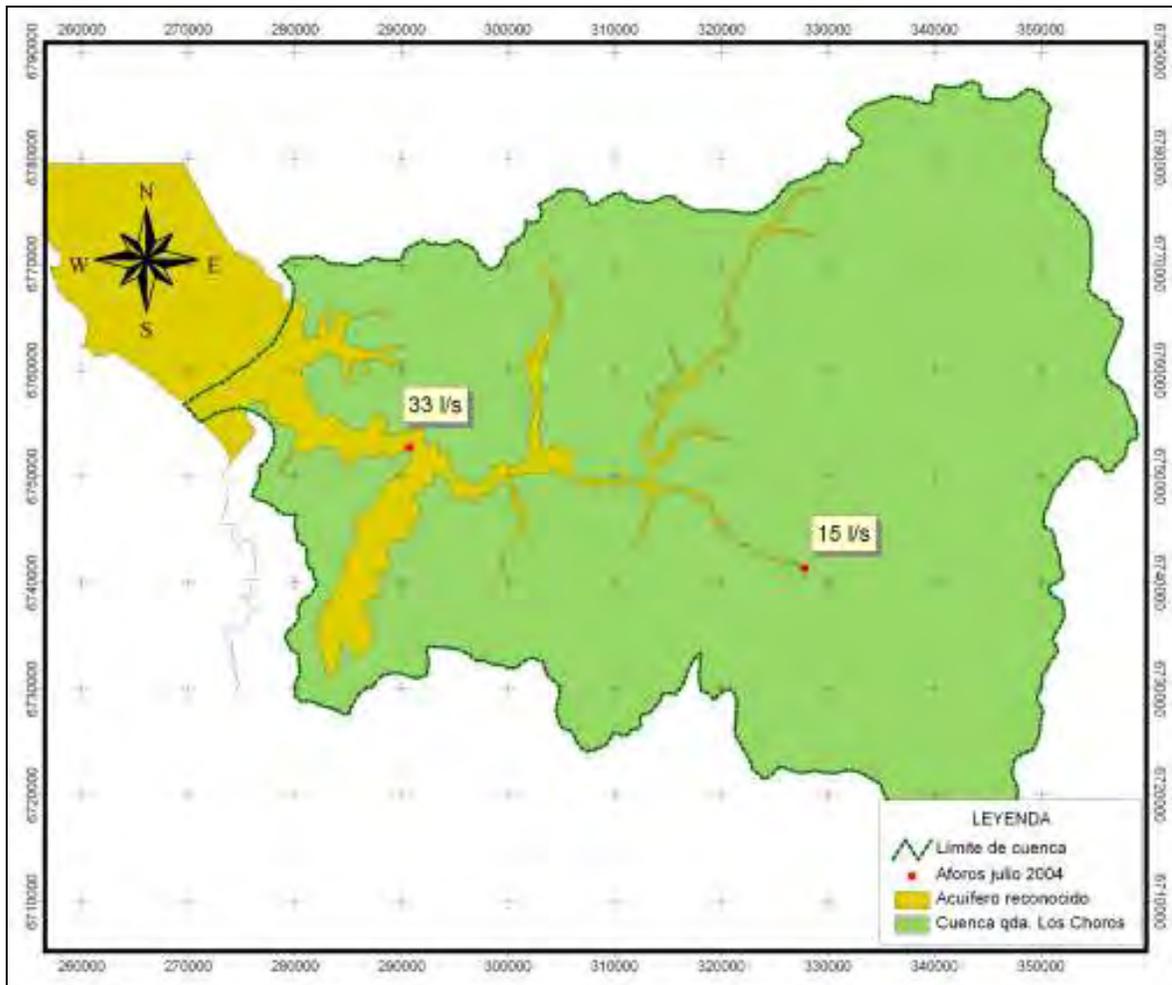
En estos casos, el afloramiento del agua subterránea está controlado por el estrechamiento de la quebrada, el que a su vez condiciona la geometría de los sedimentos permeables que rellenan su fondo. Por otra parte, el grado de fracturamiento de la roca basal de los rellenos controla su ancho y espesor. En los sectores de menor fracturamiento, la roca ofrece mayor resistencia a la erosión y en consecuencia la quebrada tiende a ser estrecha y presumiblemente la roca esté poco profunda. En contraposición, en las áreas de fuerte diaclasamiento la quebrada se muestra mas ancha y con espesores sedimentarios más elevados (ENAMI, 1995).

Es en los tramos estrechos y de probable poco espesor sedimentario donde se originan las zonas de afloramientos con abundante vegetación freatófita. En estos sectores se mantiene un escurrimiento superficial de poca importancia pero continuo. Sin duda, el grado de fracturamiento de la roca basal de los rellenos, unido al fuerte gradiente del fondo de la quebrada, son los factores que controlan el afloramiento del agua subterránea. La roca en los tramos menos fracturados presenta una permeabilidad menor de forma que facilita el ascenso respecto del fondo de la quebrada, de la superficie equipotencial y el menor espesor sedimentario ayuda a que el flujo subsuperficial aflore (ENAMI, 1995).

Por parte de la DGA, los únicos registros fluviométricos que existen corresponden a aforos aislados realizados en julio del 2004 con caudales que varían entre los 15 y 33 l/s, en los sectores de afloramiento correspondientes a Junta de Chingoles y en la confluencia de las quebradas La Higuera y Los Choros, respectivamente. La ubicación de los puntos de aforo se presenta en la Figura 4.9.

Figura 4.9.

Puntos de aforo en afloramientos quebrada Los Choros.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

4.4. Geología

4.4.1. Marco Geológico Regional.

Como se mencionó anteriormente, la Quebrada Los Choros se caracteriza por presentar las siguientes unidades fisiográficas: una región montañosa interna cortada transversalmente por un valle de erosión, y otra costera, formada por planicies de abrasión marina que remontan gradualmente hacia el interior. Según Borgèl (1983) las cumbres orientadas en sentido N-S, que se disponen al poniente del área, corresponden a la Cordillera de La Costa propiamente tal y las cadenas de cerros

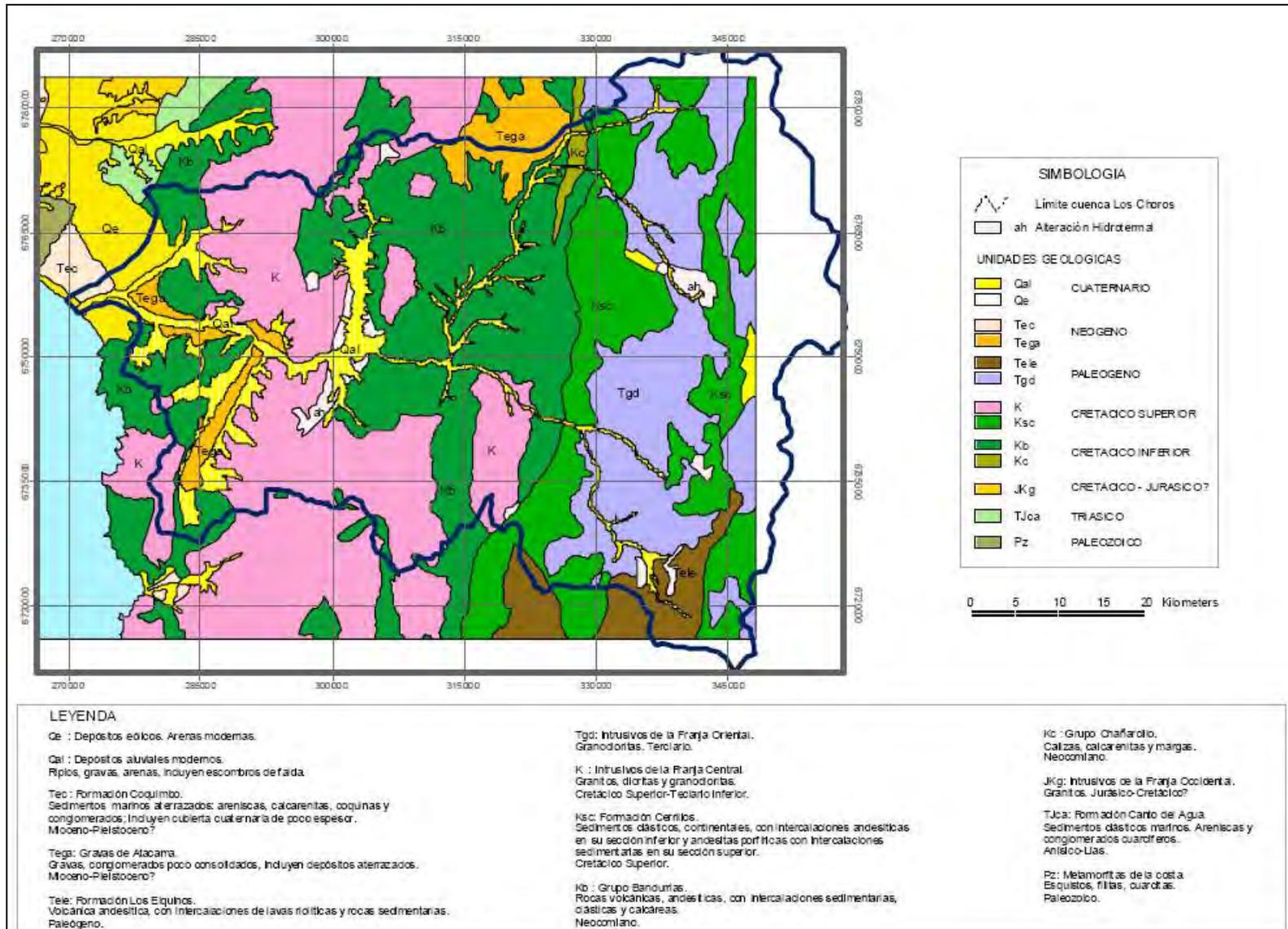
existentes al oriente de la quebrada Los Choros Altos, se definen como Cordones Transversales del Macizo Costero.

Precisamente a esta unidad pertenecen las mayores alturas del área, que localmente forman la Cordillera de la Puntilla, que sobrepasa los 4000 msnm de altura y que constituye la divisoria de aguas del extremo oriental de la hoya hidrográfica de la Quebrada Los Choros. Además se reconocen en esta unidad, la Sierra del Cóndor y los Altos de Peralta, cuyas alturas máximas alcanzan 3200 y 3500 msnm respectivamente.

Las estructuras geomorfológicas de mayor relevancia corresponden a terrazas aluviales, abanicos aluviales, conos de deyección, escombreras y planicies costeras. Excepto la última, todas las estructuras se reconocen a lo largo de la quebrada de Los Choros. Las planicies costeras se disponen en el sector litoral y corresponden a terrazas de abrasión marina que suelen presentarse como superficies de escasa pendiente y constituidas por depósitos marinos de la Formación Coquimbo.

A partir de la Carta Geológica de Chile, elaborada en 1982, y digitalizada últimamente por parte del DEP, Figura 4.10, se han podido identificar las formaciones existentes en la Quebrada Los Choros, determinando aquellas que revisten importancia de carácter hidrogeológico para fines del estudio intrusión salina en el sector bajo del acuífero.

Figura 4.10.
Carta Geológica 1982, Quebrada Los Choros.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA (2005).

4.4.2. Litología.

La caracterización litológica de Quebrada Los Choros presentada en este informe corresponde a una actualización de la presentada en el Informe Técnico S.I.T. N°106.

En la hoya hidrográfica de la Quebrada Los Choros se reconocen principalmente, rocas volcánicas estratificadas, que cubren mas del 40% del área y cuyos rangos de tiempo abarcan del Jurásico al Neógeno, es decir, desde hace unos 200 millones de años (m.a.) hasta el presente.

Las rocas intrusivas, que incluyen desde granitos a gabros, se distribuyen en franjas longitudinales y sus edades decrecen hacia el este, variando desde el Jurásico Superior al Terciario Inferior (desde hace 150 m.a. hasta 24 m.a.).

Los sedimentos no consolidados modernos corresponden a gravas, arenas, rípios aluviales y arenas eólicas.

4.4.2.1. Rocas Estratificadas.

Metamorfitas de la Costa (Unidad Paleozoica, Pz).

Con este nombre se individualiza un conjunto de rocas de mediano a bajo grado metamórfico (esquistos, filitas y cuarcitas) intensamente deformadas, que afloran en el flanco occidental de la Cordillera de Costa. Las Metamorfitas de la Costa subyacen en discordancia angular y de erosión a la Formación Canto del Agua.

En las islas Choros y Damas y en Punta de Choros son de color gris a gris verdoso y presentan esquistocidad bien desarrollada, con abundantes venillas rellenas con cuarzo, las que, en algunos sectores, atraviesan los planos de esquistocidad y, en otros, ocupan estos espacios.

En base a los antecedentes disponibles, a las metamorfitas sólo se puede asignar una edad pre-triásica media.

Formación Canto del Agua (Unidad del Triásico al Terciario Inferior en la Cordillera de la Costa, TJca).

Conjunto de sedimentitas marinas, areniscas y conglomerados cuarcíferos, lutitas, calizas brechosas y calcarenitas, portadoras de fauna fósil, que afloran en la parte norte del área de estudio. La Formación Canto del Agua sobreyace en discordancia angular y de erosión a las Metamorfitas de la Costa, e infrayace en discordancia angular al Grupo Bandurrias.

En la zona de estudio los conglomerados presentan un color pardo-amarillento, las areniscas son de grano fino a grueso, de colores pardo-amarillentos, y las lutitas son de color oscuro a gris verdoso, observándose bandeamiento de granos.

En base a la fauna recolectada, se pudo asignar a esta formación una edad Triásico Medio (Anísico)-Lías.

Grupo Bandurrias (Unidad del Triásico al Terciario Inferior en la Cordillera de la Costa, Kb).

Conjunto de rocas predominantemente volcánicas, con intercalaciones sedimentarias, clásticas y calcáreas marinas, que presentan una relación de engrane lateral de facies con calizas del Grupo Chañarillo. Sobreyace en discordancia angular a la Formación Canto del Agua e infrayace en discordancia angular y de erosión a la Formación Cerrillos y a las Gravas de Atacama. El Grupo Bandurrias se dispone como dos franjas norte-sur que atraviesan el área de estudio, separadas por los plutones de la franja central.

Una característica importante de este grupo son los rápidos cambios de facies laterales. Los niveles estratigráficamente más bajos se encuentran hacia la costa. En Punta Mar Brava, aflora una secuencia de andesitas porfíricas (ocoíticas), brechas andesíticas, brechas sedimentarias, calizas rojizas y calcarenitas lenticulares fosilíferas, areniscas y lutitas.

La fauna recolectada en las diferentes intercalaciones clásticas permite asignar al grupo una edad principalmente neocomiana.

Grupo Chañarcillo (Unidad del Triásico al Terciario Inferior en la Cordillera de la Costa, Kc).

Secuencia de rocas sedimentarias marinas, constituidas principalmente por calizas fosilíferas, calcarenitas y niveles margosos. Las rocas calcáreas del Grupo Chañarcillo engranan, hacia el oeste, con las rocas volcánicas del Grupo Bandurrias, y hacia el sur en Quebrada Pelicano. El Grupo Chañarcillo infrayace, en discordancia angular y de erosión, a la Formación Cerrillos. Su base no se observa en el área.

En este sector, la secuencia del Grupo Chañarcillo está constituida por tres secciones más o menos definidas: una sección inferior constituida por calizas grises y oscuras y calizas arenosas, de estratificación fina; una sección media constituida por calizas oscuras, margas, lutitas calcáreas y calizas margosas, negras; y una sección superior constituida por calizas arenosas y calcarenitas con niveles de chert negros, en bancos gruesos.

La fauna encontrada permite establecer que, en esta zona, la edad del Grupo Chañarcillo tiene un rango comprendido entre el Hauteriviano-Barremiano y, probablemente, el Aptiano.

Formación Cerrillos (Unidad del Cretácico Superior al Terciario, Ksc).

Se ha encontrado un conjunto de rocas, predominantemente epiclásticas en su parte inferior y volcano-epi-piroclásticas en su parte superior, las cuales, en base a características litoestratigráficas, han sido reconocidas como Formación Cerrillos. La Formación Cerrillos sobreyace con discordancia angular y de erosión a los grupos Chañarcillo y Bandurrias. Su techo lo constituye, hacia el sur, la Formación Los Elquinos, que la sobreyace discordantemente.

Al sur del río Huasco, la potencia de la formación aumenta considerablemente. Frente a Domeyko alcanza una potencia de 3.000-4.000 m. En la zona de estudio, la sección esta constituida por una sección inferior de conglomerados epiclásticos con areniscas volcanolíticas, con intercalaciones de lutita y andesita subordinada; una sección intermedia, predominantemente volcánica andesítica, con intercalaciones de conglomerados subordinados, andesitas porfíricas silicificadas, con intercalaciones de brechas volcánicas, lavas dacíticas y riolíticas; y una superior volcánica constituida por conglomerados piroclásticos (con bombas volcánicas), brechas volcánicas (en parte tobáceas) y andesitas porfíricas brechosas, con intercalaciones de lutitas, calcilutitas, areniscas rojas, conglomerados gruesos, lavas andesíticas, riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de areniscas rojas y estratificación cruzada.

Según relaciones estratigráficas y antecedentes paleontológicos se le puede asignar a la Formación Cerrillos una edad cretácica superior.

Formación Los Elquinos (Unidad del Cretácico Superior al Terciario, Tele).

Fue definida originalmente como una secuencia de origen continental, constituida por lavas, tobas y brechas, de composición basáltica a riolítica. En el Cuadrángulo Quebrada Marquesa se dispone concordantemente sobre la Formación Viñitas (Fm. Cerrillos), sin embargo, hacia el este y hacia el sur reconocieron una relación

discordante entre ambas formaciones. El techo de la formación los constituye la superficie de erosión actual.

En la zona estudiada, se encuentra en la parte alta de la Quebrada Las Chacras, donde aflora una secuencia de 2.500 m, constituida por una sección inferior clástica, volcánica, que incluye brechas volcánicas verdes y andesitas porfíricas, con intercalaciones de tobas riolíticas, lavas dacíticas, niveles de conglomerados, areniscas conglomerádicas y limonitas rojas; una sección intermedia constituida por brechas volcánicas, andesíticas y andesitas porfíricas, fluidales, gris-verdosas a violáceas; y una sección superiorrojiza, constituida por conglomerados y brechas volcánicas, lavas dacíticas brechosas, riolitas fluidales e ignimbritas.

Por relaciones de contacto, se asigna a la Formación Los Elquinos una edad paleógena baja.

Gravas de Atacama (Unidad del Cretácico Superior al Terciario, Tega).

Bajo esta denominación informal se agrupa a un conjunto de sedimentos poco a medianamente consolidados, de origen aluvial, que incluye conglomerados de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones limosnas, acumulado sobre rocas preexistentes en la zona, y disectado por las quebradas modernas. En el interior se dispone como una carpeta que sella las estructuras y unidades más antiguas, y hacia la costa, engrana con los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo.

Dataciones radiométricas y relaciones de corte permiten asignarle a las Gravas de Atacama una edad miocena media a pliocena-pleistocena.

Formación Coquimbo (Unidad del Cretácico Superior al Terciario, Tec).

Conjunto de sedimentos marinos que en su sección inferior incluye areniscas amarillas, de grano medio a grueso, en parte limosa, con niveles de coquinas; y en su parte superior, areniscas amarillentas y conglomerados (localmente bolones), con niveles carbonatados y fosilíferos. Estos sedimentos están dispuestos horizontalmente sobre unidades preexistentes, y están cubiertos por arenales modernos y depósitos aluviales cuaternarios.

Antecedentes paleontológicos permiten asignar a la Formación Coquimbo una edad principalmente neógena.

4.4.2.2. Depósitos modernos no consolidados.

Depósitos Aluviales (Qal).

Están constituidos por gravas y arenas, con estratificación y selección pobres, las que se depositan a partir de las esporádicas escorrentías superficiales que se generan en las quebradas durante breves e intensos períodos de precipitación. En la actualidad, estos períodos de precipitación intensa se han distanciado en el tiempo. Se distribuye en toda el área de estudio en forma de llanuras y abanicos aluviales, rellenando el fondo de las quebradas de mayor desarrollo.

En el sector alto de la quebrada Los Choros la fracción clástica mayor (40%) puede presentar clastos de hasta 80 cm. de diámetro, con valores de redondeamiento y esfericidad cercanos a 0,7. Su composición petrográfica corresponde a rocas volcánicas andesíticas e intrusivos dioríticos y granodioríticos en una matriz francamente arenosa (60%) con fracciones de sedimentos finos muy escasos.

En el tramo medio de ambas quebradas, los sedimentos muestran una granulometría donde la fracción mayor (20%) alcanza en promedio unos 40 cm en una matriz arenosa

abundante (80%), con fracciones subordinadas de arenas finas y muy finas y con muy escaso limo y arcillas.

En la zona distal, la pendiente del talweg decrece considerablemente. Esto último controla la capacidad de transporte de material y genera un depósito donde los clastos mayores (<10%) no superan los 10 cm. y presentan valores de esfericidad y redondeamiento de 0,9 y 0,8, respectivamente. La matriz es muy abundante (90% o más) y está constituida por arena fina con fracciones subordinadas de arenas medias y muy finas.

Depósitos Coluviales (Qal).

Acumulaciones de materiales originados al pie de farellones rocosos y en zonas de fuertes pendientes, formando conos de deyección cuyos extremos apicales presentan pendientes cercanas a 36°.

Estos depósitos son activos, ya que el material se encuentra en continua y lenta reptación, constantemente alimentado por desprendimiento de bloques y escombros de faldas. Están constituidos principalmente por material grueso (bloques angulosos, ripios y gravas) en una matriz que varía de arenosa gruesa a media, con escaso contenido de finos.

Los coeficientes de redondeamiento y esfericidad no sobrepasan los valores de 0,5 y 0,6, respectivamente. Los materiales presentan una distribución caótica y su composición litológica consiste, principalmente en rocas volcánicas andesíticas y rocas intrusivas de composición diorítica, granodiorítica y granítica.

Depósitos Eólicos (Qe).

Arenales y campos de dunas, ampliamente distribuidos en la zona costera y también en algunos sectores de las pampas centrales. El tamaño de las partículas se encuentra en el rango 1/2 a 1/16 mm. Se disponen generalmente sobre los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo.

4.4.2.3. Rocas Intrusivas.

Franja Occidental o Costera (JKg).

Está formada por extensos plutones discontinuos, de composición principalmente tonalíticos, granodioríticos, graníticos y dioríticos, y algunos cuerpos gábricos. Intruyen preferentemente a las Metamorfitas de la Costa y a la Formación Canto del Agua. Está cubierta por la Formación Coquimbo y por arenales modernos.

En base a relaciones estratigráficas, y considerando edades atribuidas a estas rocas más hacia el norte, se sugiere para estas rocas una edad post-Lias a pre-Cretácico Superior.

Franja Central (K).

Está formada por extensos plutones, de forma alargada en dirección NS a NNE, que incluyen desde granitos hasta gabros. Intruye a la Formación Canto del Agua, y a los grupos Bandurrias y Chañarcillo, y está cubierta en algunos lugares por sedimentos mio-pleistocenos.

En base a relaciones de corte y algunas dataciones, se puede afirmar que la mayor parte de los intrusivos de esta franja son de edad cretácica superior.

Franja Oriental (Tgd).

Constituida por numerosos plutones, principalmente granodioríticos y dioríticos, y en forma subordinada cuerpos tonalíticos, monzodioríticos y dioríticos. Intruye a las formaciones Cerrillos y Los Elquinos.

En base a relaciones de corte y algunas dataciones radiométricas, se asigna a estas rocas una edad principalmente paleocena-eocena.

4.4.2.4. Estructuras.

Las Metamorfitas de la Costa presentan una intensa deformación polifásica, presentando foliaciones del plano axial, bandeamientos litológicos y pliegues ptigmáticos.

Las rocas del Grupo Bandurrias se encuentran plegadas en anticlinales y sinclinales, cuyos ejes presentan una dirección general NNE. Al sur de los 29° de Latitud Sur, las rocas del Grupo Bandurrias presentan una estructura monoclinal, inclinada hacia el este.

La Falla Mollaca-La Leña presenta una actitud N25° E/75-80° W. En la zona de estudio, afecta a areniscas y lutitas de la Formación Canto del Agua. La roca a ambos lados de la falla presentan bandeamientos mineralógicos y foliaciones paralelas a ella, y las rocas volcánicas muestran grietas, producto de fuerzas de cizalle.

En la zona estudiada se encuentran dos discordancias. La primera discordancia, entre las Metamorfitas de la Costa y la Formación Canto del Agua, es una discordancia angular y de erosión que se encuentra en la quebrada Chañaral; y la segunda, entre la Formación Coquimbo y las formaciones más antiguas, corresponde a una discordancia angular que se puede reconocer en todo el ámbito costero, especialmente en las grandes quebradas.

4.4.3. Geología Local.

El estudio geológico en la zona baja de Quebrada Los Choros, para fines del análisis del problema de intrusión salina en el relleno sedimentario que conforma el acuífero principal, contempla principalmente aquellas formaciones sedimentarias de interés hidrogeológico, dentro de las cuales se encuentran los *Depósitos Aluviales Modernos (Qal)*, compuestos por ripios, gravas, arenas y escombros de falda que conforman el acuífero principal de la Quebrada Los Choros. Estos depósitos se distribuyen en toda el área de estudio como relleno de los principales valles. Se originaron, en parte, en épocas pretéritas durante las cuales existió escorrentía superficial por la quebrada. Últimamente, se encuentran condicionados a crecidas ocasionales que se generan durante precipitaciones intensas y concentradas en el tiempo.

En menor escala y hacia el sector de la costa, se ubican los depósitos eólicos (*Qe*) también recientes, compuestos básicamente por arenales y campos de dunas, ampliamente distribuidos en la zona costera. Se disponen generalmente sobre los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo.

También adquieren importancia hidrogeológica, el conjunto de sedimentos, medianamente consolidados, de origen fluvio-aluvial Gravas de Atacama (*Tega*), las cuales incluyen conglomerados de bolones, gravas, arenas y ripios, con intercalaciones limosas, acumulados sobre unidades de roca preexistentes que entregan menores capacidades de transmisividad que los menos consolidados. Las Gravas de Atacama corresponden a depósitos que se acumulan en valles y depresiones, como resultados de los procesos de agradación y sedimentación, asociados al último solevantamiento de Los Andes.

Dentro de aquellas formaciones que se presentan en la zona costera de la Quebrada Los Choros, pero que no revisten importancia de carácter hidrogeológico, se encuentran los depósitos correspondientes a la Formación Coquimbo (*Tec*), constituidos por sedimentos marinos aterrazados del tipo areniscas, calcarenitas, coquinas y conglomerados. Estos sedimentos se disponen horizontalmente sobre las rocas de la

Formación Bandurrias y se encuentran cubiertos por depósitos aluviales y eólicos actuales.

En relación a la Formación Bandurrias, se encuentra constituida predominantemente por rocas volcánicas, con intercalaciones sedimentarias, clásticas, y calcáreas marinas, que afloran entre los 28° y 30° de Latitud Sur. Los tipos litológicos mas frecuentes son andesitas porfíricas, brechas andesititas, brechas sedimentarias; calizas rojas y calcarenitas lenticulares y fosilíferas; areniscas y lutitas.

Por último, en el sector norte de la zona costera en estudio, se observa la Formación asociada a las Metamorfitas de la Costa, correspondientes a esquistos, filitas y cuarcitas, que afloran en el flanco occidental de la Cordillera de Costa. Las Metamorfitas de la Costa subyacen en discordancia angular y de erosión a la Formación Canto del Agua.

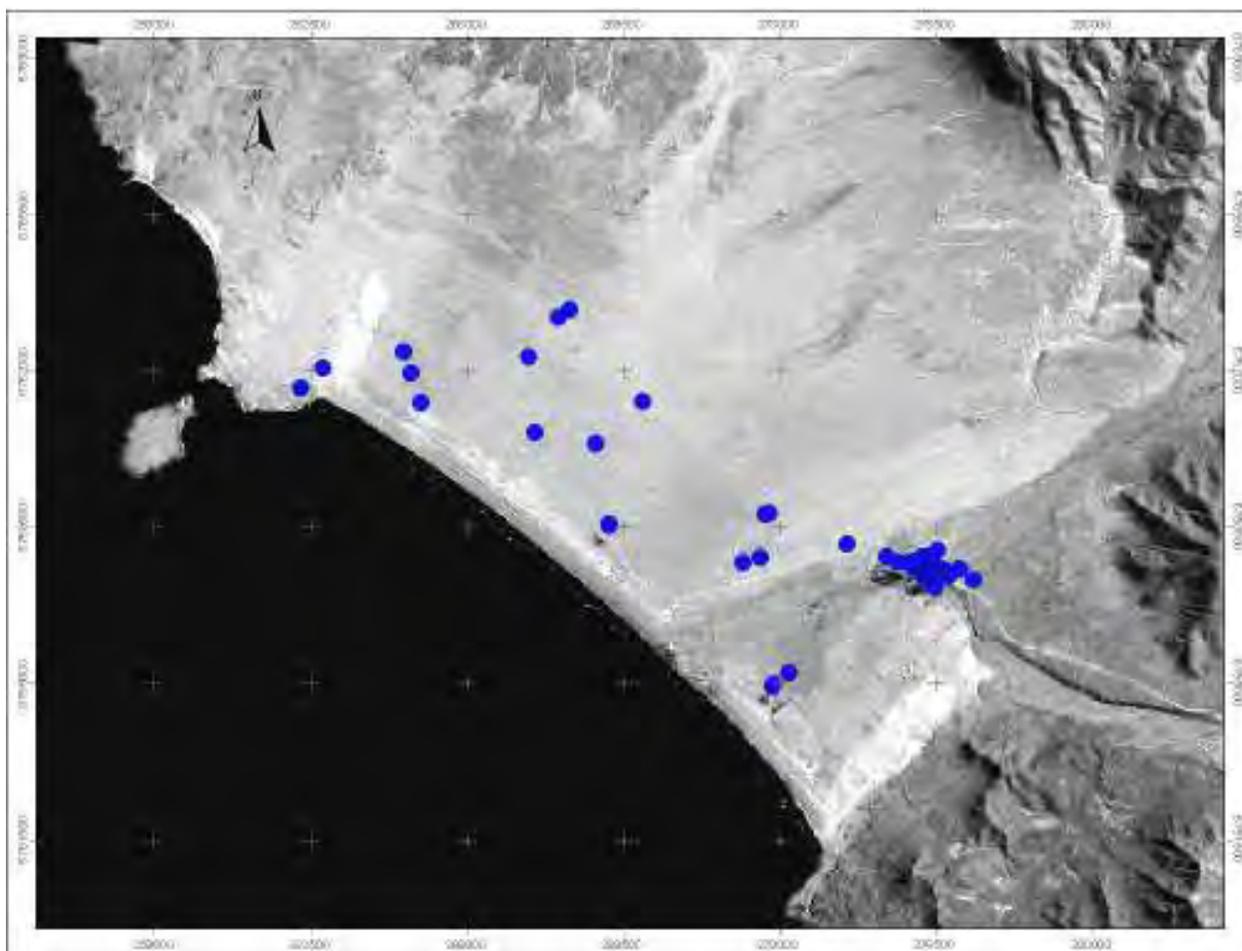
En relación a la Geofísica desarrollada en la zona de interés, seis son las fuentes que existen con información geofísica que indican la profundidad donde se ubica el basamento rocoso y por lo tanto, ayudan a estimar rangos de delimitación del espesor del acuífero propiamente tal. Estos estudios corresponden a: Universidad Católica (1968), Geodatos (2003), Geodatos (2004), Serplac (1995), DOH-AC (1998) y SERNAGEOMIN-Cazalac-DGA (2004). De éstos, se ha podido concluir que el relleno principal del acuífero en el sector occidental de la Quebrada, comprendido entre Choros Altos y la Costa, presenta potencias que varían entre los 70 y los 180 metros.

4.5. Hidrogeología

4.5.1. Catastro de Captaciones.

La revisión en terreno de las captaciones existentes, en conjunto con los antecedentes proporcionados por el Departamento de Estudios y Planificación, DGA, han permitido realizar el catastro de pozos y norias existentes en la zona baja del acuífero, presentado en la Tabla 4.4. El mapa de las captaciones identificadas en la zona costera del acuífero de quebrada Los Choros se presenta en la Figura 4.11.

Figura 4.11.
Catastro de captaciones zona costera Quebrada Los Choros.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4.
Catastro de Captaciones Zona Costera Quebrada Los Choros.

Tipo	SECTOR	PROPIETARIO	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (msnm)	Profundidad (m)	Diametro Pozo (m)	N. E. (m)	N. D. (m)	Q (l/s)*	Uso	Estado
Noria	Entre Choros Bajos y la Costa	Joain Santos	273214	6755222	25	3.1	1.5	2.6	-	0.3	D	u
Noria	Entre Choros Bajos y la Costa	Mateo Ossandon	272860	6754926	25	5.5	8	4.3	-	1.6	R	u
Noria	Entre Choros Bajos y la Costa	Mateo Ossandon	272899	6754985	25	6.3	-	6.25	-	-	R	s/u
Noria	Choros Bajos	Julio Ossandón	276717	6757531	75	-	0.35	6.95	-	2	R	u
Pozo	Choros Bajos		276811	6757395	75.32	-	-	10.5	-	0.4	R	u
Pozo	Choros Bajos		276523	6757610	75	-	-	6.14	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276475	6757595	75	-	-	6.18	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276466	6757658	75	-	-	-	-	-	R	s/u
Pozo	Choros Bajos		276616	6757552	75	-	-	9.8	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276534	6757489	75	-	-	6.3	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276513	6757384	75.48	-	-	6.15	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276501	6757140	81.59	-	-	12.17	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Manuel Aguirre	276500	6757329	76.84	-	2x1.5	7	-	0.5	R	u
Noria	Choros Bajos	Manuel Aguirre	276385	6757324	75.94	-	-	6.4	-	2	R	u
Noria	Choros Bajos	Hector Tapia	276405	6757430	74.63	-	1	-	6.8	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Manuel Aguirre	276241	6757357	73.25	-	1.5	4.97	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Hector Tapia	276265	6757478	73.01	6.5	1.5x1	-	4.5	1	R	u
Noria	Choros Bajos		276205	6757466	72.28	-	3	2.95	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos		276173	6757567	72.22	-	2x2	-	3.09	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Julia Morales	275654	6757697	57.54	15	1.5	-	10.8	0.3	R	u
Noria	Choros Bajos		276100	6757581	71.51	-	1x1.5	4.45	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos		276076	6757578	70.96	-	5	5	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos		276001	6757585	68.1	-	2	9.9	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos		276008	6757597	68.45	-	3x3	7.3	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos		275867	6757693	64.3	-	3	9	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	U. Bahamondes	276220	6757694	73.06	13	1.5	-	9.75	6.9	R	u
Noria	Choros Bajos		276129	6757637	72.02	-	2	5.6	-	-	R	s/u
Noria	Choros Bajos		276104	6757678	71.94	-	-	5.91	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Teresa Zamorano	276095	6757742	72.13	10	1.5	-	8.51	0.1	R	u
Noria	Choros Bajos		276048	6757729	70.74	-	2	8.53	-	1.3	R	u
Noria	Choros Bajos	Bda. Barraza	276223	6757853	73.21	15	1.5	10.19	-	1.3	D	u
Noria	Choros Bajos	Celinda Aguirre	275405	6757854	51.27	-	-	10.2	-	0.3	D	u
Noria	Choros Bajos	Vilma Aguirre	276355	6757845	74.32	-	-	10.2	-	0.3	D	u
Noria	Choros Bajos		276537	6757967	75	-	2	16.5	-	1.3	R	u
Pozo	Choros Bajos	SENDOS	276425	6757843	74.91	-	-	-	-	1.2	AP	u
Noria	Choros Bajos	Samuel Aguirre	277049	6757573	75	12	1.5	10.59	-	0.1	R	u
Noria	Choros Bajos		277367	6757323	80.03	-	1	6.85	-	0.3	R	u
Noria	Llano Los Choros	José Ramón	269207	6758553	25	8.38	1.4x2.2	6.38	-	1.3	R	u
Noria	Llano Los Choros		268892	6760367	25	14	1	8.62	-	0.1	R	u
Pozo	Llano Los Choros		274521	6758110	41.31	-	0.2	-	-	1.3	R	u
Noria	Llano Los Choros	Sergio Cuellar	272203	6757699	-	-	-	-	-	-	R	u
Pozo	Llano Los Choros	Sergio Cuellar	272594	6757814	-	-	-	-	10	-	Otro	u
Pozo	Llano Los Choros		272708	6758781	-	14.76	-	12.46	-	-	R	s/u
Noria	Llano Los Choros		272776	6758808	-	16	-	13.66	-	-	R	s/u
Pozo	Llano Los Choros		264989	6761294	-	3.8	-	3.35	-	-	Otro	s/u
Noria	Llano Los Choros		267541	6760604	-	17.53	-	7.78	-	-	R	s/u
Noria	Llano Los Choros		268884	6760360	-	14.02	-	8.83	-	-	R	u
Pozo	Llano Los Choros	El Oasis	269204	6758543	-	5.62	-	-	4.34	-	R	u
Pozo	Llano Los Choros		269954	6761319	-	39.3	-	10.43	-	-	R	s/u
Pozo	Llano Los Choros		267398	6762303	-	15.33	-	10.56	-	-	R	s/u
Noria	Llano Los Choros		268051	6763190	-	38	-	18.35	-	-	R	s/u
Noria	Llano Los Choros		268323	6763367	-	13.75	-	13.33	-	-	R	s/u
Noria	Llano Los Choros		264580	6762430	-	21.28	-	9.96	-	-	Otro	s/u
Pozo	Llano Los Choros		264755	6761950	-	-	-	7.25	-	-	R	s/u
Pozo	Punta de Choros	Antonio Soler	262304	6761624	-	43.7	-	9.17	-	-	R	u
Noria	Punta de Choros		262783	6762060	-	5.9	-	4.07	-	-	R	s/u

Uso	Estado
D: Doméstico	u: uso
R: Riego	s/u: sin uso
AP: Agua Potable	

Fuente: Catastro DGA (2004) e inspección en terreno.

4.5.2. Unidades Hidrogeológicas.

De las formaciones geológicas presentadas en el punto anterior, aquellas relevantes en términos hidrogeológicos corresponden principalmente a los rellenos sedimentarios del Terciario, Gravas de Atacama, y Cuaternario, Depósitos Modernos no Consolidados. Las demás formaciones mencionadas corresponden a la roca fundamental y se consideran formaciones impermeables. No se consideran los posibles acuíferos en roca fracturada que pudiesen existir en la formación Bandurrias o en rocas ígneas de la Franja Central y Oriental, por no existir información suficiente a la fecha.

En relación a la evaluación de las potencialidades hidrogeológicas de la cuenca de Quebrada Los Choros, realizado por ENAMI (1995), se ha reconocido la existencia de un acuífero freático de gran continuidad, que presenta su mejor desarrollo en el tramo comprendido entre Punta Colorada y unos dos kilómetros aguas abajo de la quebrada Los Choros Altos. De acuerdo a dicho estudio, se definen 3 sectores a lo largo de Quebrada Los Choros, identificándose 5 unidades hidrogeológicas en la cuenca.

El sector alto corresponde a aquel comprendido desde las nacientes hasta unos dos Km. aguas abajo de la confluencia de la quebrada Espinuda a la Quebrada Los Choros; el sector medio se extiende según este estudio, aguas abajo de la quebrada Espinuda hasta el área de tributación de la quebrada los Choros Altos; y por último el sector que se extiende desde el área de confluencia mencionado y la desembocadura de la quebrada Los Choros en el litoral.

La primera unidad de relevancia hidrogeológica corresponde al basamento rocoso de los rellenos cuaternarios, considerada como una superficie impermeable.

Se han agrupado en una segunda unidad, los depósitos de los conos de deyección, escombreras y materiales coluviales en general, como una unidad impermeable pero de escaso interés hidrogeológico, debido a su escasa capacidad de almacenamiento de agua. La importancia de estos sedimentos radica en su gran capacidad para permitir la

infiltración de las aguas lluvias y, por consiguiente, para operar como vías de transporte del agua subterránea hacia sectores del relleno aluvial del acuífero con menores cotas.

En el tramo terminal y hasta unos 6 Km. aguas arriba de la localidad de El Trapiche, se reconoce en la Quebrada Los Choros la formación sedimentaria definida como Gravas de Atacama. Estos sedimentos se emplazan hacia los bordes de la quebrada y suelen presentarse bastante erosionados en sus tramos distales. Se caracterizan por presentar un grado de compactación bastante elevado, llegando en algunos sectores a exhibir una cementación incipiente.

En el sector costero existen depósitos eólicos dispuestos sobre la Formación Coquimbo, que no presentan mucho interés del punto de vista hidrogeológico, pero su gran capacidad para infiltrar y transportar las aguas lluvias hacia estratos más profundos, le confieren importancia en la recarga del acuífero.

Por último, se ha reconocido una unidad sedimentaria permeable relevante en términos hidrogeológicos, correspondiente a los rellenos aluviales de la quebrada principal. Estos se disponen en el lecho, y constituyen el material permeable de mayor capacidad de transporte y almacenamiento del recurso hídrico. Su extensión, espesor y permeabilidad le permiten almacenar y transmitir cantidades importantes de agua. Su espesor y cobertura son variables en toda el área que abarca. La permeabilidad va disminuyendo a medida que se acerca al océano debido a la disminución de la pendiente del lecho y la consecuente sedimentación de los materiales más finos.

El espesor y cobertura de los rellenos aluviales a lo largo de la quebrada son muy variables. Las potencias mayores se registran en el tramo medio y terminal, desde donde van disminuyendo gradualmente hacia aguas arriba, hasta llegar a valores que posiblemente no excedan algunas decenas de metros en el sector alto de la estructura. Esto se ve muy marcado desde 13 Km. aguas arriba de Tres Cruces hacia el oriente.

4.5.3. Acuíferos Reconocidos.

La unidad sedimentaria de mayor importancia hidrogeológica corresponde a los depósitos aluviales dispuestos a lo largo de toda la cuenca, sobre todo en el cauce principal. Se reconoce en esta unidad la existencia de un importante nivel permeable superior que constituye un acuífero de carácter freático, que se presenta continuo a lo largo y ancho de esta estructura.

En el sector alto de la quebrada, desde Tres Cruces hacia el este, el ancho medio de esta unidad hidrogeológica alcanza aproximadamente 300 metros; en el sector medio, es decir, entre quebrada Espinuda y el área de tributación de la Quebrada Los Choros Altos, éste es de aproximadamente 500 metros; y en el tramo terminal, que comprende desde la confluencia con la Quebrada Los Choros Altos hasta la desembocadura en el mar, el ancho de esta formación sedimentaria presenta alrededor de 680 metros.

En relación al espesor del acuífero en el sector alto de la Quebrada Los Choros, se ha determinado a partir del estudio geofísico realizado por Geodatos, que el relleno cuaternario presenta una potencia media de 60 m. La interpretación de los sondeos mediante transiente electromagnético indicaría un modelo de tres capas o estratos. El superior, con espesor variable entre 53 y 138 mts. con una media de 60 mts., fue correlacionado con gravas, ripios y arenas que corresponden a un acuífero que en su extremo superior se encuentra drenado. El segundo estrato presenta un espesor que varía entre 23 m y 48 m, identificado como roca basal alterada, que también podría corresponder a un acuífero. El estrato más profundo se identifica como el basamento rocoso sano.

Aguas abajo de Tres Cruces, específicamente en el sector de Punta Colorada, el acuífero presenta rellenos de mayor volumen que el anterior. En este sector, el valle se amplía hasta tener un ancho medio de 1500 m. De acuerdo con el estudio geofísico realizado por la DOH en 1998, el basamento rocoso se encontraría a una profundidad máxima de 280 m hacia el eje del cauce. Sin embargo, desde el punto de vista estratigráfico, se verifica la presencia de capas con diversos contenidos de arcilla. De

acuerdo con el estudio geofísico realizado por el SERNAGEOMIN en marzo del 2004, el basamento rocoso estaría ubicado a los 70 m de profundidad, en la parte más oriental del sector.

El sector medio de la hoya hidrográfica, correspondiente a Quebrada Choros Altos, abarca tanto la parte principal del valle, como un sector transversal formado principalmente por las Gravas de Atacama. El sector del valle principal, entre El Trapiche y Angostura, presenta características similares a las existentes entre Tres Cruces y Punta Colorada, rellenos constituidos por sedimentos cuaternarios gruesos. La estratigrafía del acuífero principal de Quebrada Los Choros, en la zona más cercana a Angostura, se ha determinado a partir del estudio geofísico realizado por SERNAGEOMIN. Mediante la aplicación de dos Sondajes Eléctricos Verticales, se ha identificado una capa de estratos secos, de 3 a 4 m de espesor, seguido de una capa de sedimentos húmedos con materiales finos o arcillosos, de 4 a 10 m de espesor. Bajo éstas, se encuentra un posible acuífero de espesor entre 85 a 100 m, compuesto por sedimentos y roca fracturada saturados. La roca se alcanza entre 100 y 108 m de profundidad.

Finalmente, el sector terminal de la quebrada, desde Choros Bajos hacia desembocadura, presenta espesores del relleno acuífero que fluctúan entre los 10 y los 200 m de profundidad, separados internamente por estratos impermeables constituidos principalmente por limo.

Precisamente, es este último sector el que concentra mayor importancia para los efectos del estudio de intrusión salina en el acuífero, ya que presenta una vulnerabilidad de contaminación mucho mayor que los sectores más altos de la cuenca.

La distribución estratigráfica en la zona costera de Quebrada Los Choros, desde el Pueblo Los Choros Bajos hacia Punta de Choros, donde se analiza el problema de salinización de las aguas, se ha realizado considerando la información proporcionada por los planos de construcción de los pozos CORFO N° 627 y N° 660, ubicados en el Pueblo Los Choros Bajos. Se identifica la presencia de un estrato superficial formado

por sedimentos gruesos, en los que predomina arena con bajo contenido de finos, de 8 a 10 m de espesor, seguido de un estrato prácticamente impermeable, formado por limos y arcillas principalmente, de aproximadamente 10 m de espesor. Al acercarse a la costa, en el pozo CORFO 627, se observa la presencia de un solo estrato en el cual se mezclan arcillas, limos, arenas y gravas.

El pozo CORFO 660, detecta roca del grupo geológico Bandurrias, correspondiente a rocas volcánicas, andesíticas y porfíricas con intercalaciones sedimentarias en su sección superior, a los 18 m de profundidad, identificando la disminución en el relleno sedimentario debido al afloramiento rocoso en esta zona.

Probablemente, la diferencia en la profundidad a la cual se detecta el basamento rocoso en ambos pozos responde a la presencia de una falla que atraviese entre dichos puntos, lo que representaría una particularidad geológica de relevancia en los factores que condicionan el escurrimiento subterráneo que se presenta en el acuífero.

El perfil estratigráfico de la zona costera del acuífero se presenta en la Figura 4.13. La ubicación en planta del perfil se observa en la Figura 4.12.

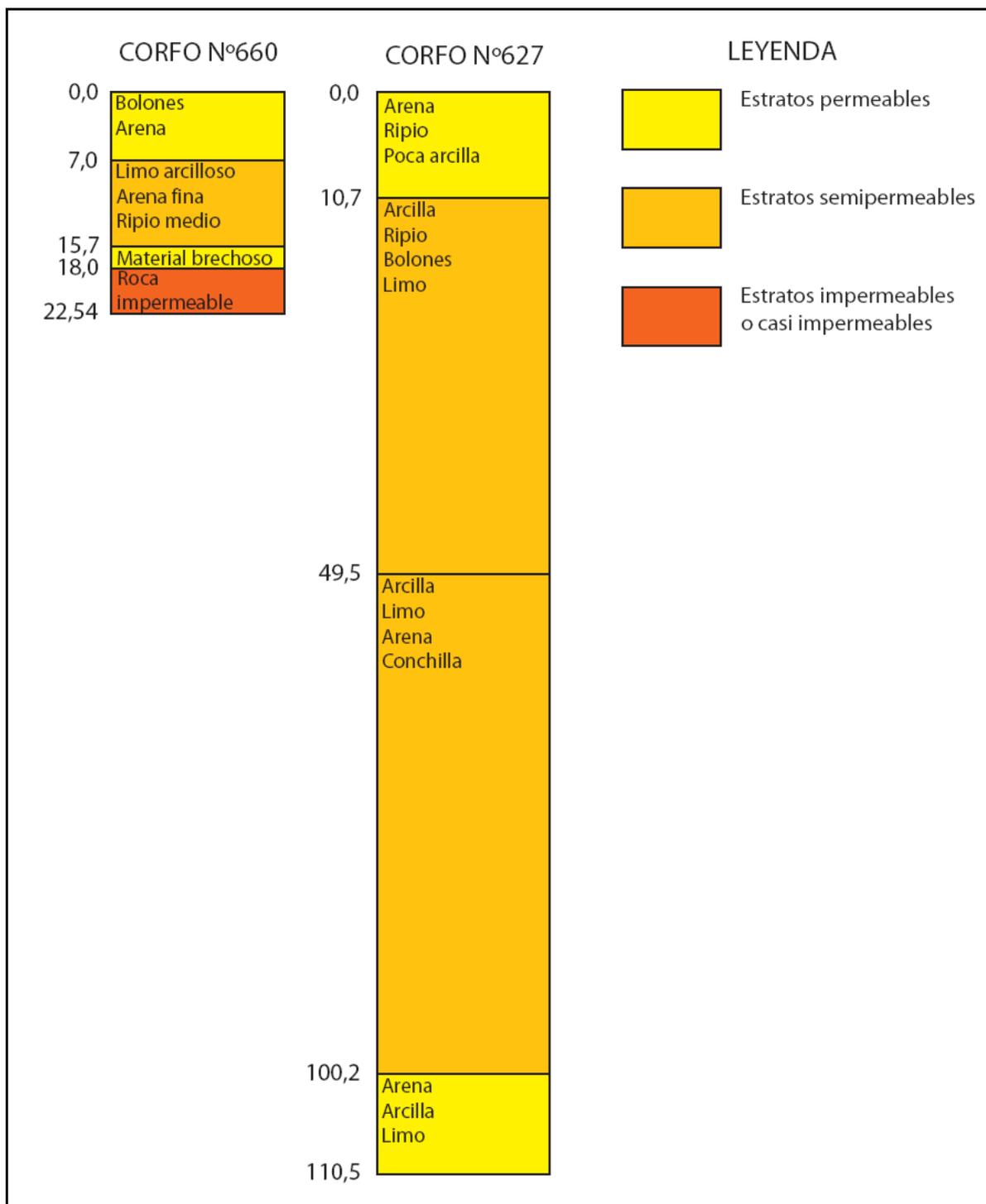
Figura 4.12.
Ubicación en planta del perfil estratigráfico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.13.

Perfil estratigráfico zona baja Quebrada Los Choros.



Fuente: Elaboración propia

4.5.4. Parámetros Elásticos.

En este punto se considera la información relacionada a parámetros como transmisividad, conductividad hidráulica y capacidad de almacenamiento de la zona costera del acuífero de Quebrada Los Choros.

4.5.4.1. *Transmisividad (T).*

El estudio realizado por ENAMI (1995), estima que de acuerdo a las características sedimentológicas del acuífero freático y a los espesores medios saturados, la transmisividad de esta unidad sería aproximadamente la siguiente para los distintos tramos: 650 m²/día en el sector alto; 1100 m²/día en el sector medio; y no mayor a 130 m²/día en el sector terminal. Dichos valores resultan coincidentes con los estimados en el estudio realizado por CORFO (1971).

De acuerdo al Informe Técnico S.I.T N° 106 desarrollado por el DEP - DGA, se estima una variación del coeficiente de transmisividad en el relleno acuífero de la quebrada Los Choros que comprende entre 100 y 400 m²/día. Sin embargo, se observan valores significativamente más altos en Tres Cruces (1660 m²/día). En el sector de Choros Bajos se observa el mínimo valor calculado (44 m²/día), con un promedio del sector en torno a 100 m²/día.

Según pruebas de bombeo realizadas en forma independiente por particulares, DGA y DOH (1998), se ha determinado la transmisividad representativa del acuífero según se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5.

Valores de T promedio por sector según pruebas de bombeo.

Sector	T [m ² /día]
Tres Cruces	644.9
Punta Colorada Norte	467.5
Punta Colorada Sur	141.0
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	396.3
Quebrada Agua Grande	202.8
El Trapiche	235.5
Parte baja Quebrada La Higuera	289.3
Entre Qda. La Higuera y Angostura	97.3
Entre Angostura y la costa	85.0

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP- DGA (2005).

4.5.4.2. Conductividad Hidráulica (K).

Del estudio realizado por CORFO (1971), se estima que la permeabilidad horizontal sería de 10^{-6} m/s en los sedimentos pliocénicos (Gravas de Atacama) y de 10^{-4} m/s en los depósitos pleistocénicos y recientes.

De acuerdo al estudio de ENAMI (1995), se estima que la permeabilidad horizontal en las Gravas de Atacama (observadas desde El Trapiche hasta la costa) sería del orden de 1 m/día (10^{-5} m/s). En el relleno aluvial K sería muy variable, fluctuando entre 100 y 10 m/día (10^{-3} - 10^{-4} m/s) en los sectores medio alto de la cuenca; y entre 10 y 0.1 m/día (10^{-4} - 10^{-6} m/s) en el extremo final.

Según pruebas de bombeo realizadas en forma independiente por particulares, DGA y DOH (1998), se ha determinado la permeabilidad representativa del acuífero según se muestra en la Tabla 4.6. Dichos valores, permiten concluir que el espesor saturado del acuífero en cada uno de los sectores de la cuenca, corresponden a aquellos presentados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.6.**Valores de K promedio por sector según pruebas de bombeo.**

Sector	K [m/s]
Tres Cruces	2.6E-04
Punta Colorada Norte	3.2E-04
Punta Colorada Sur	3.8E-05
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	8.6E-05
Quebrada Agua Grande	4.0E-05
El Trapiche	3.8E-04
Parte baja Quebrada La Higuera	1.4E-04
Entre Qda. La Higuera y Angostura	2.3E-05
Entre Angostura y la costa	1.6E-05

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP- DGA (2005).

En términos generales, la permeabilidad de los estratos importantes desde el punto de vista de capacidad de conducción del agua subterránea, debiese fluctuar entre 10^{-3} y 10^{-6} m/s. La aparición de estratos limosos y arcillosos se hace más frecuente a medida que se avanza hacia la costa; también se acentúa en las zonas en que las quebradas laterales entregan sus aportes a la quebrada principal (quebradas Pajonales y La Higuera).

La permeabilidad va disminuyendo a medida que se acerca al océano debido a la disminución de la pendiente del lecho y la consecuente sedimentación de los materiales más finos.

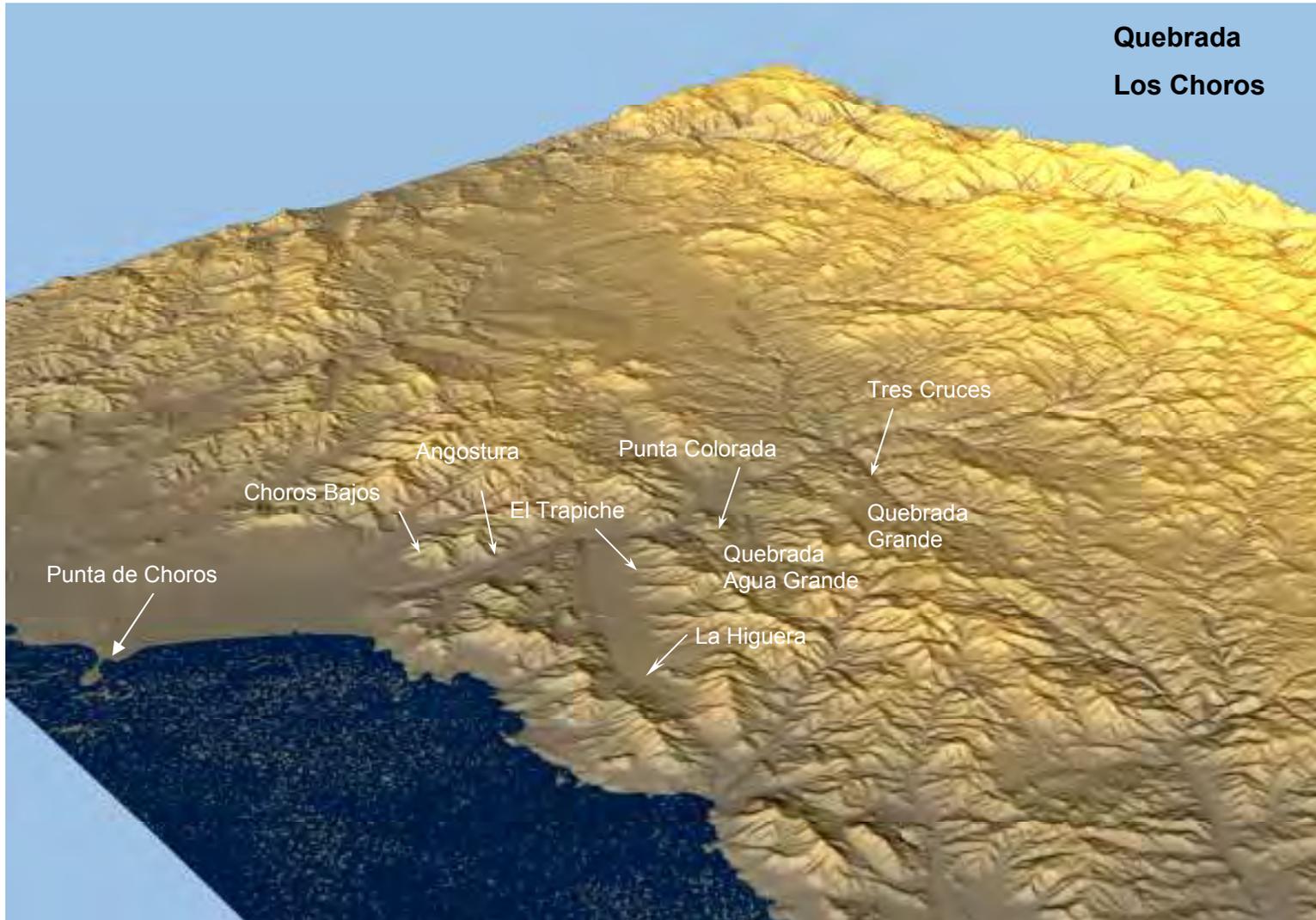
Tabla 4.7.**Espesor saturado estimado del acuífero por sectores.**

Sector	b [m]
Tres Cruces	28.8
Punta Colorada Norte	16.8
Punta Colorada Sur	42.7
Entre Punta Colorada y Qda. Agua Grande	53.4
Quebrada Agua Grande	58.5
El Trapiche	7.1
Parte baja Quebrada La Higuera	24.3
Entre Qda. La Higuera y Angostura	48.7
Entre Angostura y la costa	61.5

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA (2005).

La Figura 4.14 muestra la ubicación de los sitios en los cuales se desarrollaron estimaciones de parámetros hidrogeológicos.

Figura 4.14.
Ubicación de sectores.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA (2005).

Una prueba de Slug - Test desarrollada en terreno (Agosto, 2005), específicamente en la zona del Llano Los Choros, determina valores de conductividad hidráulica en la zona baja de la quebrada, en la cual no se contaba con antecedentes de parámetros elásticos. De acuerdo a la metodología adoptada para el cálculo del coeficiente de conductividad en zonas de alta permeabilidad, y considerando un comportamiento libre del acuífero, el valor estimado para K es de $2.5 E-03 [m/s]$. Considerando la clasificación de terrenos según su permeabilidad, Custodio y Llamas (1996), dicho valor está asociado a terrenos arenosos, lo que es coherente con la formación geológica de la zona del Llano Los Choros, que como se mencionó anteriormente, corresponde principalmente a depósitos eólicos.

La metodología de cálculo adoptada en la determinación de dicho coeficiente, se presenta en forma completa en el Anexo 5.3.

4.5.4.3. Coeficiente de almacenamiento (S).

Las pruebas de bombeo realizadas en estudios anteriores no permiten el cálculo de este parámetro, por lo cual el valor se estima en base a lo determinado por el estudio de CORFO (1971) y ENAMI (1995).

El estudio de CORFO (1971), considera un valor de S promedio, para toda el área de interés, del 10 %.

El estudio realizado por ENAMI (1995), estima valores de S de 20, 15 y 5 % en los sectores alto, medio y terminal respectivamente.

4.5.5. Recarga y Descarga.

La recarga que alimenta el acuífero en la quebrada de Los Choros proviene de dos fuentes principales, que serían la infiltración directa de las aguas lluvias y la infiltración de una parte de la escorrentía superficial que se produce ocasionalmente.

Debido al predominio de formaciones impermeables en gran parte de la cuenca, en especial en el sector alto de ella donde se producen las mayores precipitaciones y las pendientes son más fuertes, el agua precipitada escurre superficialmente hasta alcanzar el relleno sedimentario donde, una vez saturada la superficie, se produce escurrimiento superficial que más tarde puede infiltrar hacia aguas abajo e inclusive, en las grandes tormentas, puede alcanzar superficialmente el mar (Informe Técnico S.I.T N°106. DEP-DGA)

La descarga del sistema subterráneo de Quebrada Los Choros se verifica mediante tres mecanismos, que corresponden a la descarga hacia el mar por el extremo terminal; la explotación artificial a la que se somete actualmente el sistema; y la evaporación y evapotranspiración que se verifica en las zonas de afloramiento de agua.

La cuantificación de los caudales de recarga y descarga del sistema, ha sido determinada por medio de modelos de simulación hidrogeológicos en la cuenca de Quebrada Los Choros, y se estima en 390 l/s, según el estudio desarrollado por CORFO (1971).

4.5.6. Niveles de Agua Subterránea.

La Dirección General de Aguas controla periódicamente los niveles de agua subterránea en 18 estaciones piezométricas ubicadas dentro de la Quebrada Los Choros, las cuales abarcan discontinuadamente el período entre los años 1976 al 2002. La frecuencia de medición del nivel estático en dichos puntos de observación es variable, presentándose mayoritariamente estaciones cuyo intervalo de control oscila entre 1 a 3 meses.

La información geográfica de los puntos que conforman la red de monitoreo se ha actualizado a partir de las últimas campañas en terreno realizadas por el Departamento de Estudios y Planificación (DEP), durante el año 2004; mediante información obtenida en la oficina regional de la DGA y por las campañas realizadas en terreno con objeto del desarrollo del presente estudio, llevadas a cabo en Mayo y Agosto del año 2005.

Las estaciones que conforman la red de monitoreo de la DGA en la cuenca, se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8.
Red de Observación BNA.

COD BNA	NOMBRE ESTACION	Coordenadas UTM [m]		VIGENCIA
		ESTE	NORTE	
04120009-K	LOS CHOROS C-1 N° 2	274423	6758402	V
04120008-1	PUEBLO LOS CHOROS C-4	276421	6757843	V
04120006-5	LOS CHOROS N1	276518	6757615	V
04120010-3	QUEBRADALOS CHOROS.Angostura C-5	277919	6755719	V
04120007-3	EL TOFO N° 5 A-1	291506	6752187	V
04120004-9	EI Tofo 6	291571	6752222	V
04120016-2	EL TOFO N° 4 AN-5	291409	6751969	V
04120015-4	EL TOFO N°3 AN-4	291363	6751884	V
04120014-6	EI Tofo 2	291319	6751792	V
04120013-8	SANTA FE AN-2	294243	6749719	V
04120012-K	GUILLERMO CORTES A N - 1	295158	6749686	V
04120005-7	LOS CHOROS N° 4 B-2	300247	6746811	S
04120003-0	LOS CHOROS 3	302278	6746385	V
04120002-2	PUNTA COLORADA B-5	304757	6751201	V
04120017-0	Los Choros 4B	304212	6751500	V
04120011-1	PUNTA COLORADA	305831	6751528	S
04100002-3	OBSERVATORIO LA SILLA C-5	324916	6773670	V
04100001-5	OBSERVATORIO LA SILLA C-4	324383	6773138	S

V: Vigente; S: Suspendida

Fuente: Dirección General de Aguas.

Dado que la zona de interés para fines del presente estudio se concentra en la zona baja de la cuenca de Quebrada Los Choros, las estaciones de control que fueron monitoreadas y analizadas en las campañas en terreno realizadas, corresponden a aquellas presentadas en la Tabla 4.9. Es importante mencionar que la red de estaciones de control establecida actualmente por la Dirección General de Aguas en la cuenca, no contempla la existencia de puntos de observación que permitan reflejar en forma óptima la evolución del problema de intrusión salina en la zona, lo que constituye una gran deficiencia en la gestión actual de los recursos hídricos subterráneos frente al aumento de salinización de las zonas costeras.

Tabla 4.9.
Estaciones de control de interés.

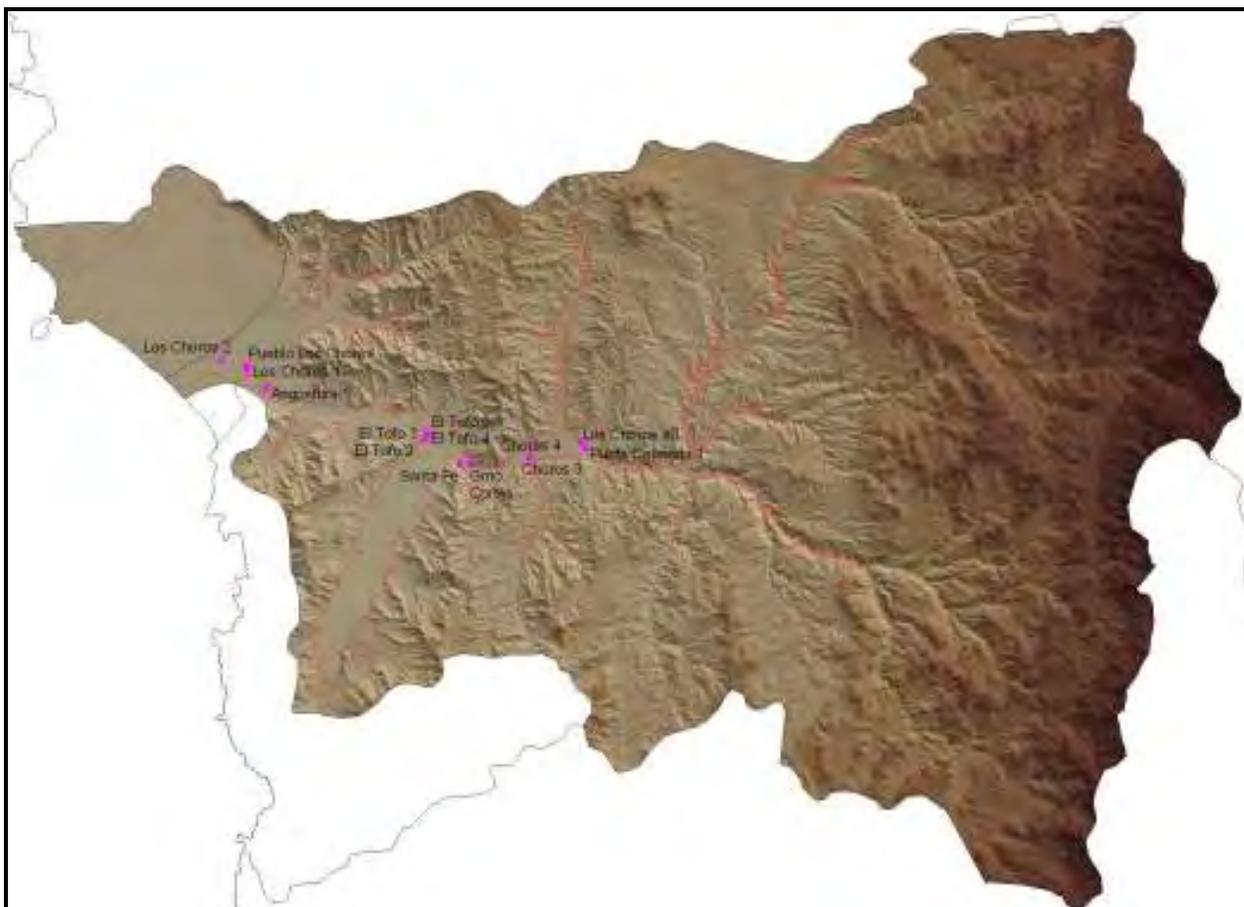
COD BNA	NOMBRE ESTACION	Coordenadas UTM [m]		VIGENCIA
		ESTE	NORTE	
04120009-K	LOS CHOROS C-1 N° 2	274423	6758402	V
04120008-1	PUEBLO LOS CHOROS C-4	276421	6757843	V
04120006-5	LOS CHOROS N1	276518	6757615	V
04120010-3	QUEBRADALOS CHOROS.Angostura C-5	277919	6755719	V
04120007-3	EL TOFO N° 5 A-1	291506	6752187	V

V: Vigente

Fuente: Dirección General de Aguas.

La ubicación en plano de las estaciones de control se presenta en la Figura 4.15.

Figura 4.15.
Estaciones de control BNA.

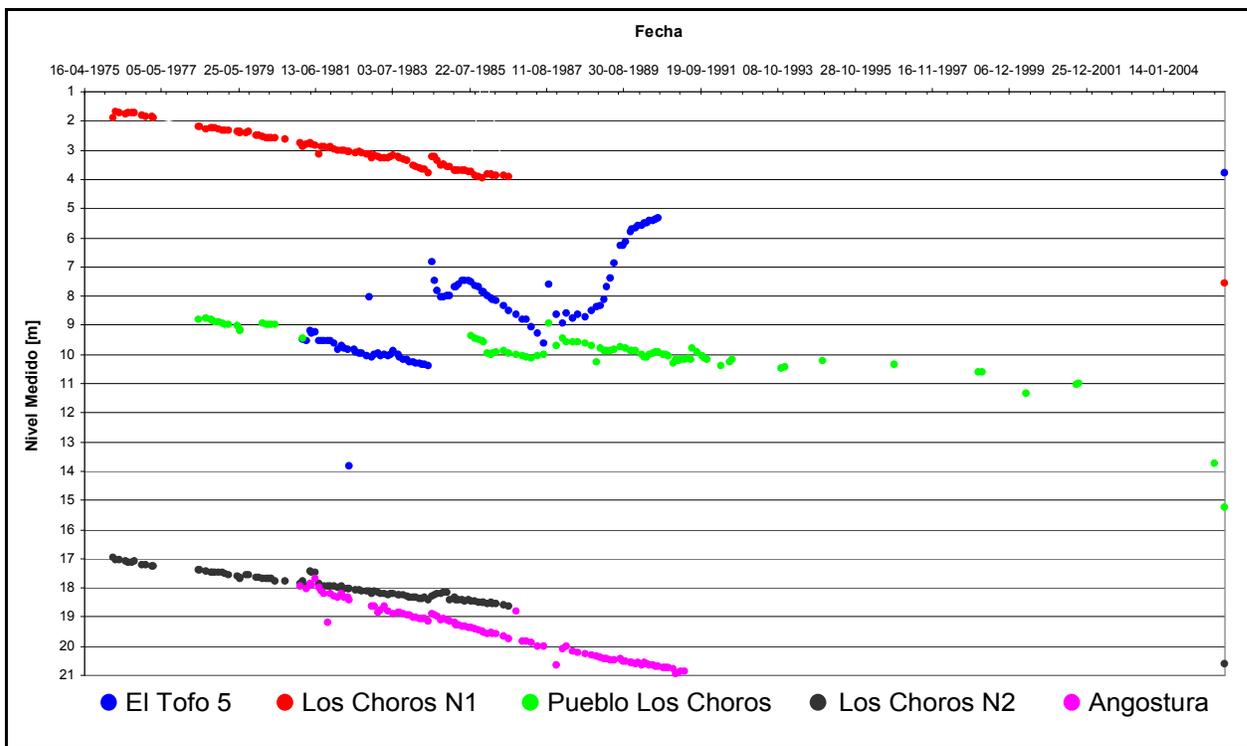


Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA (2005).

La Figura 4.16 presenta el registro histórico de niveles piezométricos de las estaciones de control consideradas en este estudio. Los últimos puntos de dichos registros corresponden a los tomados durante las campañas en terreno realizadas en Mayo y Agosto (2005).

El registro histórico de los niveles piezométricos de cada una de las estaciones, se presenta en el Anexo 4.1.

Figura 4.16.
Registro histórico de niveles piezométricos.



Fuente: Elaboración propia.

A partir de los registros históricos de niveles piezométricos en las estaciones de control, se observa que éstos no tienen la continuidad deseada para determinar totalmente la evolución de los niveles de agua subterránea, pero sí permiten tener una idea de la variación de éstos en el tiempo.

La estación El Tofo 5, ubicada aguas arriba del Pueblo Los Choros, no presenta vulnerabilidad frente al problema de intrusión salina, por lo que ha sido adoptada como

una estación base en la determinación de la calidad del agua del sector costero del acuífero de Quebrada Los Choros. Se observa que esta estación presenta cierto grado de independencia con los niveles de agua registrados aguas abajo, ya que durante el período de registro (1981-1990), se observa una mayor correlación entre el nivel freático del acuífero y los eventos de precipitación producidos en la zona. A diferencia de lo observado aguas abajo, los niveles estáticos en la estación el Tofo 5 oscilan en el tiempo, obedeciendo con mayor fuerza al régimen pluviométrico de la zona. De acuerdo a estudios anteriores en la zona, en Julio del año 1987 se produjeron intensas lluvias que sobrepasaron los 100 mm de agua caída. Con menor intensidad, en el año 1984 también se produjo un evento de precipitación intensa en la zona, sobrepasando los niveles de lluvia normales. El efecto de dichos eventos en la recarga del acuífero se identifican fácilmente en el registro histórico de la estación, produciéndose un aumento sostenido en los niveles del acuífero en el período correspondiente. Dicho fenómeno de ascenso en los niveles se corrobora con la última campaña en terreno, en la cual se observó que el nivel estático se presenta a 3.8 m., bastante más superficial que el registrado hacia el año 1990, a 5.3 m, posiblemente por la ocurrencia de precipitaciones en las fechas cercanas a la que fue desarrollada la campaña.

La estación Angostura Quebrada Los Choros, presenta una tasa de descenso de aproximadamente 0.3 m/año, durante el período de registro comprendido entre 1981-1991, alcanzando en este último año un nivel estático cercano a los 21 metros.

La estación Los Choros N1, presenta un registro que comprende el período 1976 -1986. Se observa que el nivel estático en esta zona se encuentra más superficial que la estación Angostura, detectándose a 4 metros en el año 1986. El último valor registrado, en Agosto del 2005, indica una profundidad del nivel estático de 7.5 metros, por lo que se observa que la tasa de descenso aproximada que se ha mantenido en dicho sector es de aproximadamente 0.2 m/año.

La estación Pueblo Los Choros N1, presenta un registro discontinuo que abarca desde el año 1978- 2001, y en el cual se observa una disminución del nivel estático por sobre los 2 m. Los últimos registros obtenidos, se alejan de la tendencia histórica observada,

posiblemente debido a que las mediciones se realizaron con el pozo en operación. Dichos valores indicarían que el nivel freático se encuentra actualmente alrededor de los 14 m de profundidad. Descartando estos últimos registros, debido a falta de información respecto de los datos tomados con anterioridad, se observa que la tasa de descenso en el nivel estático de dicho pozo es de aproximadamente 0.1 m/año.

Finalmente dentro del área en estudio, la estación de control Pueblo Los Choros N2, presenta un registro continuo que comprende desde 1976- 1986, en el cual se observa un descenso de los niveles entre 17 m, en el año 1976, y 18.6 m, en el año 1986. El último registro del nivel estático, realizado en Agosto de 2005, indica una profundidad de 20.6 m. de la napa freática en dicho sector, manteniendo la tendencia histórica observada en la tasa de descenso, y que corresponde aproximadamente a 0.12 m/año.

En conclusión, se puede decir que la zona correspondiente al sector bajo del acuífero de Quebrada Los Choros presenta un grado de independencia con los sectores existentes aguas arriba. Esto se verifica al observar el registro histórico de niveles piezométricos, que en comparación con estaciones más lejanas como El Tofo 5, mantienen un comportamiento continuo en el tiempo y marcado por un descenso sostenido del nivel freático, independiente del régimen pluviométrico del sector más alto de la cuenca.

4.5.7. Calidad Físico Química del Agua Subterránea.

Los antecedentes de calidad química provienen del estudio realizado por ENAMI (1995), por medio del análisis de las muestras extraídas en los sondajes perforados por CORFO.

De los análisis químicos existentes se advierte un aumento en la concentración de sólidos disueltos a medida que se avanza al extremo distal de la quebrada Los Choros, llegando a superar los 1000 ppm. La fuerte ganancia de soluto hacia aguas abajo se explica por una parte, porque las aguas subterráneas que se encuentran en el sector

terminal del acuífero tienen un tiempo de permanencia en contacto con el sustrato mucho mayor en relación a aquellas que se disponen hacia el oriente. Por otra parte, el acuífero aumenta su contenido de material fino hacia la desembocadura, de forma que la superficie de contacto entre el agua y el sustrato se incrementa y la velocidad de escurrimiento disminuye (menor gradiente hidráulico). Estos dos factores facilitan aún más el aumento de los sólidos disueltos totales en el agua subterránea.

Además, el sector terminal de la quebrada Los Choros se forma sobre los sedimentos marinos de la Formación Coquimbo, los que se caracterizan por contener proporciones importantes de sales solubles, las que en contacto con el agua se incorporan como soluto, representando una severa limitación para el uso del agua subterránea en dichos lugares.

Se ha realizado una comparación entre los resultados de calidad de agua subterránea de los parámetros proporcionados por el estudio de ENAMI, 1995, y los obtenidos en el estudio actual en relación al problema de intrusión salina. Los puntos de control que son de interés para ambos estudios son: estación APR Pueblo Los Choros, código BNA: 04120008-1 y la estación Los Choros N°2, código BNA: 04120009-K. En la Tabla 4.10 se presentan los niveles detectados de los principales parámetros de análisis.

Tabla 4.10.**Análisis comparativo de calidad de agua subterránea entre 1995 y 2005.**

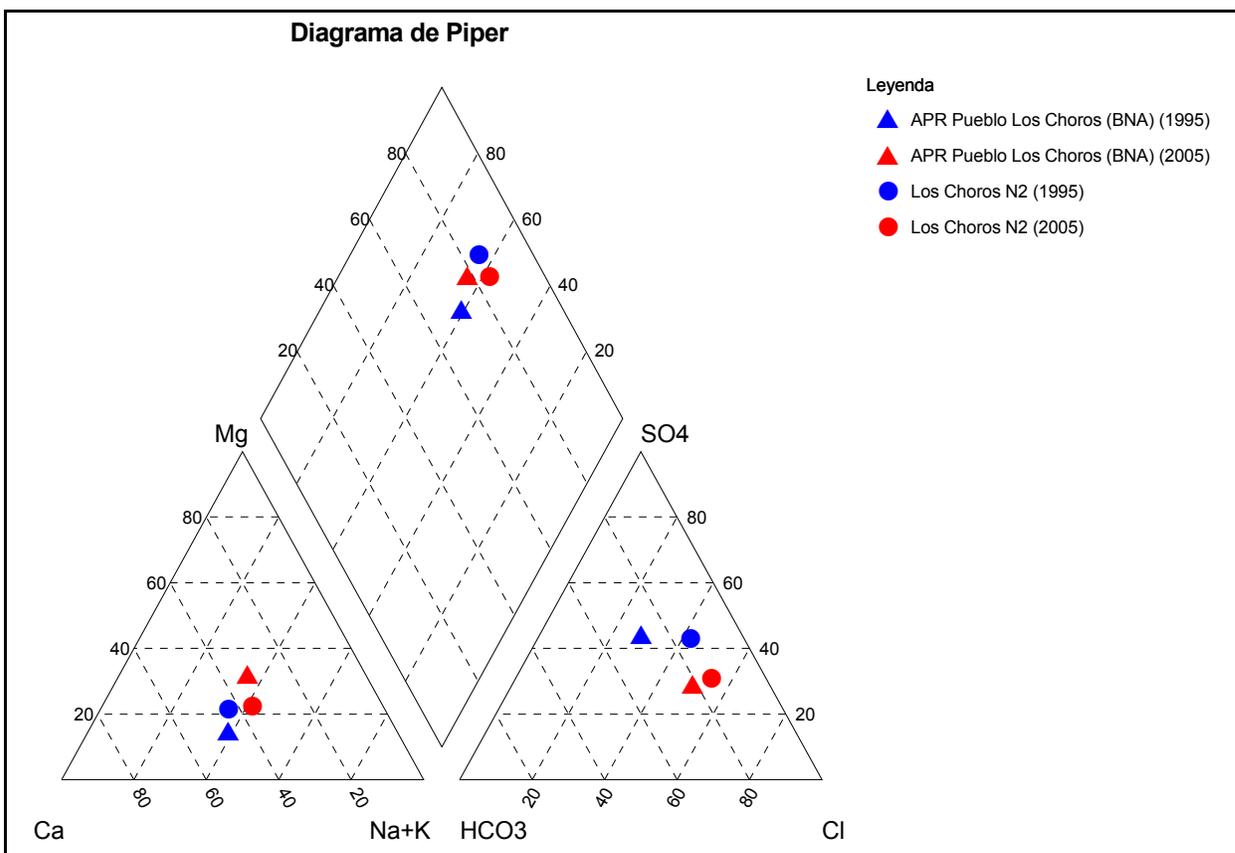
Análisis Químico zona baja Qda. Los Choros.				
Parámetros [mg/l]	Fuente: ENAMI, 1995		Fuente: Estudio actual, 2005	
	Los Choros N°2	APR Pueblo Los Choros	Los Choros N°2	APR Pueblo Los Choros
T.D.S.	1356	760	1964	1660
Ca	186	110	134.8	99.7
Mg	56.0	21.0	50.2	59.0
Na	162.0	102.0	169.7	120.5
K	18.0	3.7	9.7	4.2
HCO ₃	195.0	199.0	181.4	191.6
SO ₄	433.0	246.0	285.5	206.9
Cl	313.0	115.0	369.4	258.9
NO ₃	16.0	11.0	4.2	11.0
Dureza Total	693.0	361.0	542.9	491.5
pH	7.8	7.4	7.8	7.4

Fuente: Elaboración propia.

El diagrama de Piper realizado, Figura 4.17, permite determinar las variaciones temporales en la calidad química del agua en los puntos de control considerados.

Figura 4.17.

Análisis comparativo calidad de aguas. ENAMI (1995) v/s Estudio Actual.



Fuente: Elaboración propia.

Aunque se trata de muy poca información existente, un diagnóstico preliminar de la evolución de la calidad físico química en la localidad de Los Choros Bajos indicaría un aumento en las concentraciones de sólidos disueltos totales, obedeciendo a una mayor incorporación de sales en el agua y que es coherente con una mayor concentración de cloruros. En términos generales, las muestras analizadas corresponden a aguas con características muy similares, del tipo sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica, como se deduce del diagrama de Piper realizado para ambas fechas de estudio.

Otro aspecto importante de señalar, es que las aguas subterráneas de la quebrada Los Choros son extremadamente duras, es decir, mayor a 300 [mg/l] de CaCO₃. Esta característica del agua hace que adquiera una gran capacidad para cortar los jabones y producir muy poca espuma y para generar residuos e incrustaciones al ebullición. La

duresa del agua está controlada por elementos como el calcio y el magnesio y, secundariamente, por sales de hierro y manganeso.

En términos generales, los recursos subterráneos de la quebrada Los Choros y sus tributarios no presentan restricciones para el uso humano y agrícola. Sólo el sector terminal de la quebrada y las áreas asociadas con mineralizaciones y alteraciones hidrotermales, representan zonas poco aptas para concentrar una explotación orientada a satisfacer requerimientos humanos y agrícolas.

Por último, en vista de los escasos datos de calidad físico química existentes en la zona, es necesario desarrollar un análisis exhaustivo de la calidad físico química en la cuenca. El desarrollo de campañas de muestreos que presenten cierta frecuencia en el tiempo, permite conocer la situación a lo largo de la quebrada e identificar las variaciones composicionales y potenciales controles geológicos existentes en la zona.

4.6. Situación actual de los recursos hídricos.

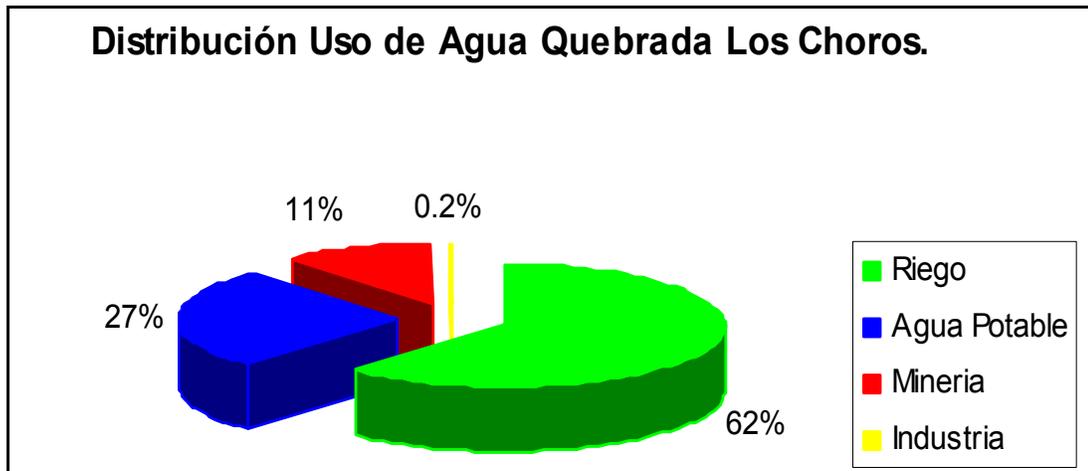
Las extracciones del recurso hídrico en la cuenca de la quebrada Los Choros, con fines de satisfacer las necesidades de alguna actividad económica en particular, ocurren únicamente como explotación de aguas subterráneas mediante pozos o norias.

Según el estudio de CORFO (1971), se estima la recarga de la cuenca en 390 l/s, escorrentía que se ha considerado como límite para los caudales concedidos a través de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

La actividad económica que se ha adjudicado un mayor porcentaje del caudal de explotación concedido, es el riego, con un 62%; le siguen el agua potable, la minería y la industria. La distribución de los caudales efectivos concedidos según el uso, se muestran en la Figura 4.18.

Figura 4.18.

Caudales concedidos según su uso.



Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

La explotación efectuada para satisfacer las necesidades de riego, agua potable, minería e industria, para cada uno de los sectores que conforman la Quebrada Los Choros, se ha podido estimar por medio del catastro de pozos y norias llevado a cabo por la DGA en Marzo del año 2004. En él se verifica la existencia de 120 pozos o norias construidos entre la costa (Llano Los Choros) y Tres Cruces, además del sector del cerro La Silla, en la parte alta de quebrada El Pelicano. De ellos, sólo 64 se encuentran actualmente en uso, ocupados para riego, agua potable y usos domésticos. No se verificó la explotación para usos mineros que existen en la quebrada de La Higuera, en el sector del pueblo El Trapiche y algunas de las quebradas aportantes a la quebrada principal (Informe Técnico S.I.T. N°106. DEP-DGA).

Tabla 4.11.**Resumen explotación de aguas subterráneas en cuenca Los Choros (Riego y usos domésticos).**

Sector	Q	Q
	(m ³ /día)	(l/s)
Llano Los Choros (sector costero hacia el norte de Choros Bajos)	233.3	2.7
Entre Choros Bajos y la costa	164.2	1.9
Choros Bajos	3361.0	38.9
Confluencia quebradas La Higuera y Los Choros	25.9	0.3
Parte baja quebrada La Higuera	112.3	1.3
La Higuera y El Zarco (parte alta quebrada La Higuera)	155.5	1.8
El Trapiche	898.6	10.4
Punta Colorada	224.6	2.6
Tres Cruces	121.0	1.4
TOTAL	5296.4	61.3

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N° 106. DEP-DGA (2005).

Del informe técnico S.I.T. N° 96 elaborado por el DEP-DGA, se ha determinado la explotación máxima sustentable a futuro del acuífero de quebrada Los Choros, Tabla 4.12, la que se presenta para cada sector de la cuenca. Se considera sustentable en términos de los niveles del acuífero, pues de acuerdo a los resultados obtenidos en dicho estudio, éstos logran recuperarse en el tiempo.

Tabla 4.12.**Caudales factibles a explotar en el futuro.**

Sector	Bombeo Factible [l/s]
Tres Cruces	1000
Punta Colorada	700
Qda. Choros Alto	1160
Los Choros Bajo	200
Playa Los Choros	500
Total	3560

Fuente: Informe Técnico S.I.T. N°96. DEP-DGA (2005).

De la información obtenida, se observa que para la zona sensible al problema de intrusión salina, el caudal máximo a extraer en el tiempo corresponde a 700 [l/s], de los cuales 500 [l/s] están asociados al sector de Playa Los Choros y 200 [l/s] para el sector de Los Choros Bajos. Dichos caudales determinarán la factibilidad de otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento a futuro.

En el informe técnico S.D.T. N° 184, elaborado por el DARH, DGA, se ha evaluado la situación de explotación de los recursos subterráneos de la cuenca bajo distintos niveles de extracción, considerando las solicitudes vigentes con el fin de determinar aquel escenario sustentable para el sistema. Del mencionado estudio, se ha determinado la posibilidad de constituir nuevos derechos de aprovechamiento en el sector correspondiente a Playa Los Choros y Los Choros Bajos, considerando en este caso la demanda vigente al 31 de Diciembre del 2004, la cual se presenta en la Tabla 4.13. Se incluye también la demanda para cada uno de los sectores de la cuenca.

Tabla 4.13.

Derechos de aprovechamiento factibles de otorgar.

Sector	Demanda Vigente Q [l/s]	N° Pozos
Tres Cruces	1000	47
Punta Colorada	700	16
Qda. Choros Alto	1160	24
Los Choros Bajo	1.2	1
Playa Los Choros	7.5	2
Total	2868.7	90

Fuente: Informe técnico S.D.T. N° 184. DARH-DGA (2005).

En resumen, considerando el caudal factible a extraer y las demandas vigentes a la fecha en quebrada Los Choros, se observa que las únicas zonas en que se pueden constituir nuevos derechos de aprovechamiento corresponden al sector de Los Choros Bajos y Playa Los Choros.

5. ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO DE LA ZONA

5.1. Generalidades

Para fines del presente estudio, la evaluación de la calidad del agua subterránea ante el riesgo de intrusión salina en la zona costera de Quebrada Los Choros considera la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas, debido a que constituyen actualmente una herramienta de diagnóstico directa que refleja con mayor sensibilidad el grado de afección de los acuíferos costeros ante el aumento de salinización.

El manejo de la información obtenida en terreno se realizó principalmente a través del programa AquaChem 4.0, que permite procesar datos de calidad de aguas, sean superficiales o subterráneas. Adicionalmente, se consideró la aplicación de diversos diagramas que permitiesen una mejor interpretación del problema de salinización en la zona, los cuales se detallan en el transcurso del presente capítulo.

5.2. Análisis Hidrogeoquímico del Agua Subterránea en la Zona

5.2.1. Actividades de Terreno.

La realización de dos campañas en la zona, llevadas a cabo en los meses de Mayo y Agosto de 2005, han permitido evaluar en terreno la situación de los recursos subterráneos en relación al problema de intrusión salina, además de establecer los requerimientos básicos que deben satisfacerse para implementar con éxito el programa de monitoreo en la zona.

Las campañas realizadas contemplan la revisión de las captaciones existentes en la zona, sean éstas pertenecientes a la red de control que la DGA monitorea periódicamente como también aquellas cuya construcción es propiedad exclusiva de particulares.

Entre los parámetros que se controlaron en terreno se tienen pH, temperatura y conductividad eléctrica de las captaciones identificadas. Adicionalmente, se tomaron muestras que posteriormente fueron enviadas al laboratorio de la DGA, donde se efectuó el análisis físico químico de los parámetros relevantes en el problema.

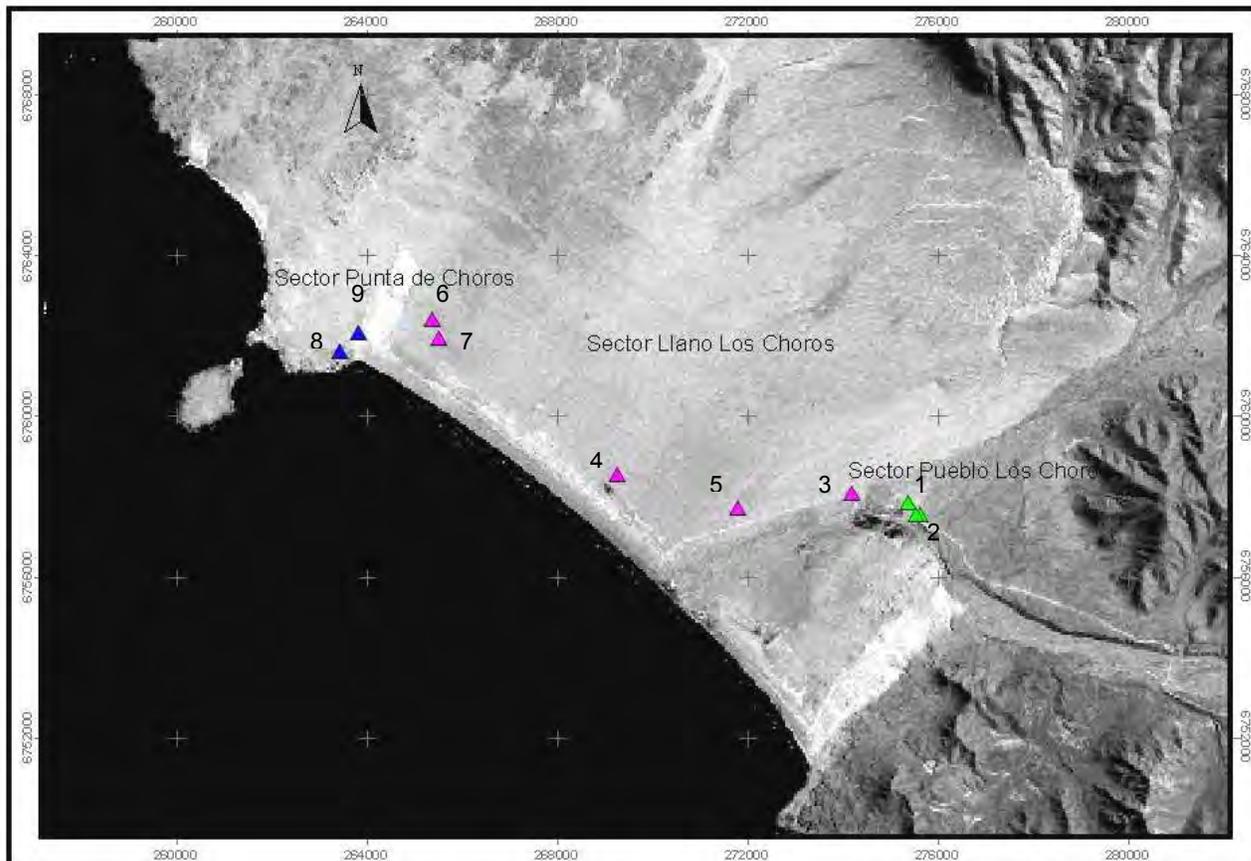
La descripción extensa de ambas campañas realizadas y los resultados obtenidos en cada una de ellas se presentan en el Anexo 5.1 y Anexo 5.2.

5.2.2. Evaluación Hidrogeoquímica de la Primera Campaña.

Para una mayor comprensión en la lectura de los gráficos, se ha sectorizado la zona en estudio, de tal forma de identificar las características que presenta el agua extraída de las captaciones en función de su ubicación.

La Figura 5.1 y la Tabla 5.1 presentan la ubicación de las captaciones identificadas en una primera oportunidad y los resultados del análisis físico químico realizado respectivamente.

Figura 5.1.
Distribución de Pozos Zona Estudio. Datos Campaña 1.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.1.
Análisis químico de las muestras. Datos Campaña 1.

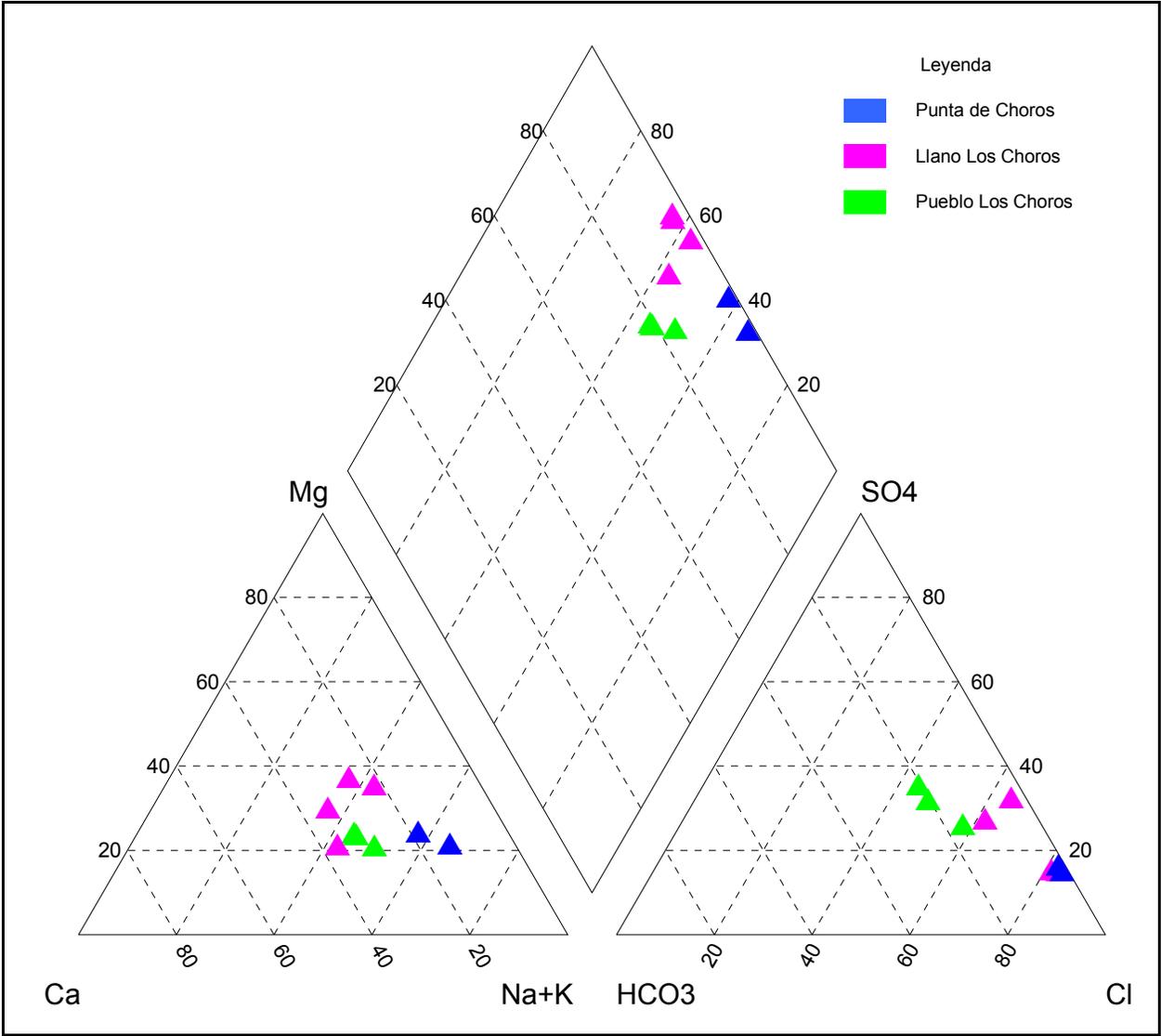
Nº	Punto de Muestreo	Sector	Datos en Tereno		Datos en Laboratorio										
			pH	Conduct.	pH	Conduct.	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	N(NO ₃)
			u. pH	uS/cm	u. pH	uS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1	APR Los Choros	Pueblo Los Choros	8.01	1760	7.76	1528	0.0	182.1	249.3	226.7	94.1	43.3	4.2	152.4	1.890
2	Noria comité de Riego	Pueblo Los Choros	7.84	2080	8.04	1495	0.0	186.4	232.9	256.5	92.0	42.8	4.6	145.6	2.008
3	APR Punta Choros	Pueblo Los Choros	7.78	1885	7.81	1926	0.0	179.7	376.0	230.2	104.3	45.9	5.2	204.2	2.479
4	Noria Camping El Oasis	Llano Los Choros	7.23	6580	7.71	6770	0.0	131.0	1660.5	1136.5	475.4	256.6	33.7	558.2	0.138
5	Pozo-Caseta-Azul	Llano Los Choros	7.18	2620	7.91	2660	0.0	180.9	595.3	359.2	197.2	70.7	7.0	259.7	0.386
6	Pozo Camino Pta Choros1	Llano Los Choros	7.63	6000	7.90	6110	0.0	81.2	1834.6	454.2	259.6	259.4	25.5	570.5	0.439
7	Pozo Camino Pta Choros2	Llano Los Choros	7.43	4930	7.70	5000	0.0	101.6	1409.9	361.3	246.3	215.2	19.5	386.6	0.106
8	Pozo Antonio Soler	Punta de Choros	7.26	18220	7.73	19910	0.0	153.3	5921.5	1451.0	509.0	506.0	100.6	2827.8	0.059
9	Noria Las Cabras	Punta de Choros	7.25	14640	7.83	15120	0.0	127.4	4640.4	1272.6	591.2	476.0	92.9	2062.8	1.548

Fuente: Laboratorio DGA.

La caracterización preliminar de la calidad del agua subterránea se ha desarrollado a partir del primer conjunto de datos en terreno, generados en mayo del 2005.

El tipo de agua que se presenta en la zona en estudio se deduce del diagrama de Piper correspondiente a la primera visita a terreno, Figura 5.2, a partir del cual se concluye que el agua existente es mayoritariamente del tipo clorurada y/o sulfatada sódica y en forma secundaria, del tipo sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica. Aquellos puntos muestreados que presentan un mayor contenido de cloruros, corresponden a las zonas más cercanas a la costa (80% de contenido de este anión en comparación con los otros aniones), reflejando así la mayor vulnerabilidad al problema de intrusión salina.

Figura 5.2.
Diagrama de Piper. Datos Campaña 1.

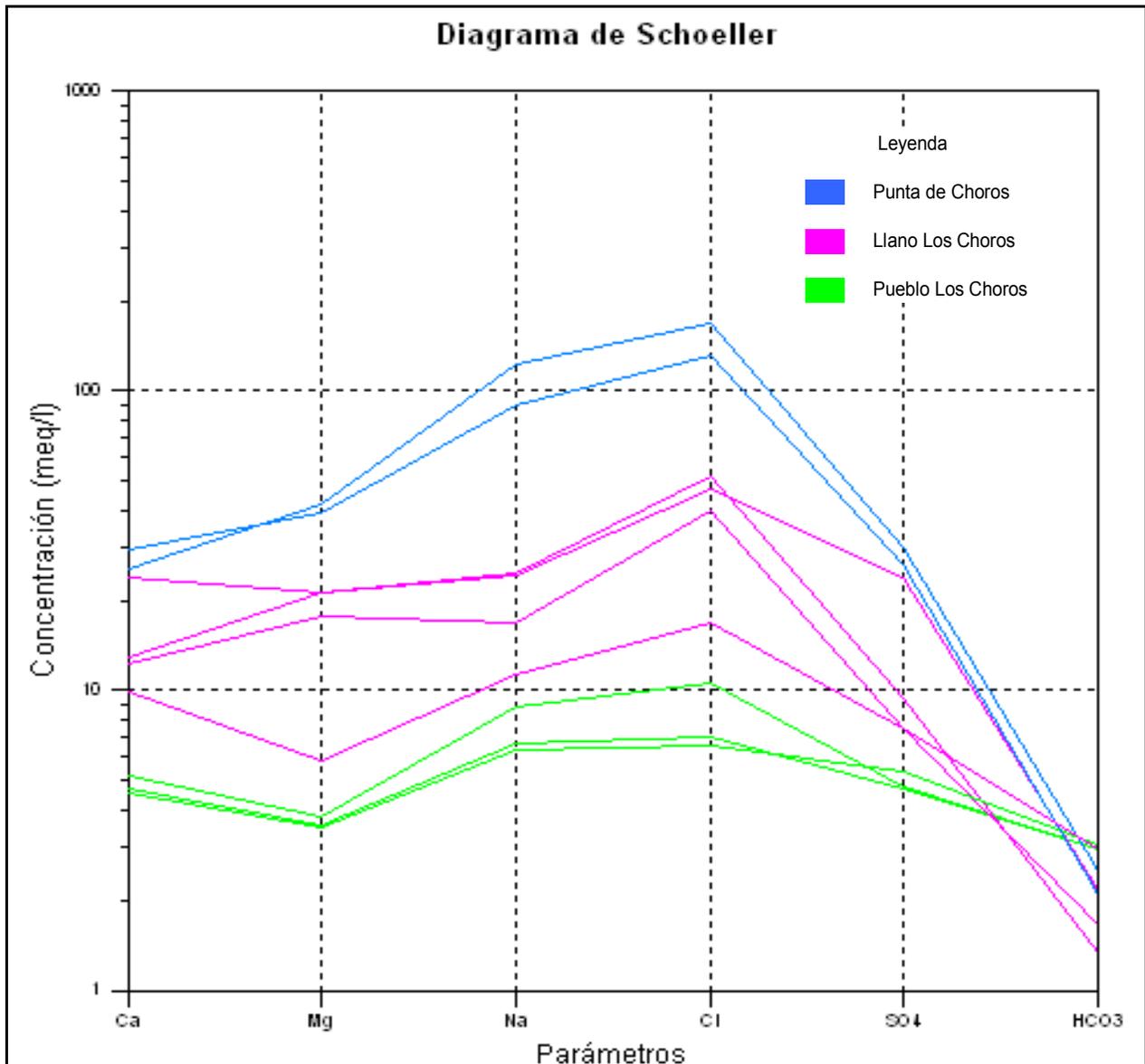


Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que la información proporcionada por este diagrama permite clasificar las aguas de acuerdo al porcentaje de cada uno de los iones analizados, es decir, no cuantifica la concentración existente en cada una de las muestras. Para reflejar el contenido de cada uno de los iones analizados, en miliequivalentes por litro, el diagrama de Schoeller, presentado en la Figura 5.3, es bastante útil.

Del diagrama de Schoeller, se deduce que la calidad del agua en la zona más alejada de la costa, correspondiente al sector de Pueblo Los Choros, presenta un contenido más homogéneo de los iones que conforman dichas muestras, por lo que representa una zona menos vulnerable al problema de intrusión salina y por lo tanto al intercambio iónico que se produce al estar en contacto la fase salina con la de agua dulce. A medida que se avanza hacia la costa, en el sector del Llano Los Choros, las muestras adquieren un mayor contenido en las concentraciones de los elementos analizados, a excepción del ión bicarbonato que se mantiene relativamente constante en toda la zona. Se observa un mayor predominio de Cl^- seguido del aumento de Na^+ , abundantes en el agua de mar, y que se ve intensificado de manera notable al acercarse a la línea de costa, en la localidad de Punta de Choros.

Figura 5.3.
Diagrama de Schoeller. Datos Campaña 1.



Fuente: Elaboración propia.

Otro gráfico que es de bastante utilidad y que permite una mayor comprensión en la forma en que se distribuyen y caracterizan las aguas según su ubicación, es el mapa de distribución química de la zona de estudio. En este mapa, se puede apreciar claramente el efecto que presenta el agua subterránea al acercarse al mar. El aumento paulatino en los iones cloruro y sodio es respuesta a la mayor penetración de la cuña salina en las zonas más cercanas a la costa y por lo tanto, delatan el comienzo o establecimiento de un estado de intrusión marina. La variación en las concentraciones de los elementos

analizados se aprecia claramente en los diagramas circulares que identifican a cada punto muestreado y que se presentan en el mapa hidrogeoquímico de la zona en estudio.

La Figura 5.4 presenta la distribución química de las captaciones de acuerdo a la ubicación en la zona de estudio, de la cual se observa una mayor ganancia de iones del tipo cloruro y sodio a medida que se presenta una mayor cercanía a la zona de costa. El tamaño de los diagramas circulares es proporcional a la conductividad eléctrica, por lo que es posible definir aquellas zonas en que se presenta una mayor salinidad.

En general, se observa que la dinámica que se presenta en la composición química de las muestras según su ubicación espacial responde a la interacción normal que se espera al estar en contacto ambas fases. El intercambio iónico principal que se produce en la interfase, corresponde a una ganancia de alcalinos y pérdida de alcalinotérreos para el agua dulce. Dicho intercambio se explica mediante la utilización de la relación $\frac{r(Na + K)}{r(Ca + Mg)}$, la cual es utilizada habitualmente en la caracterización del fenómeno de intrusión salina. A partir de la información proporcionada por este índice, se puede concluir que las aguas sometidas a un aumento de salinización responden a un aumento en la relación, dada una mayor incorporación de iones del tipo Na y K.

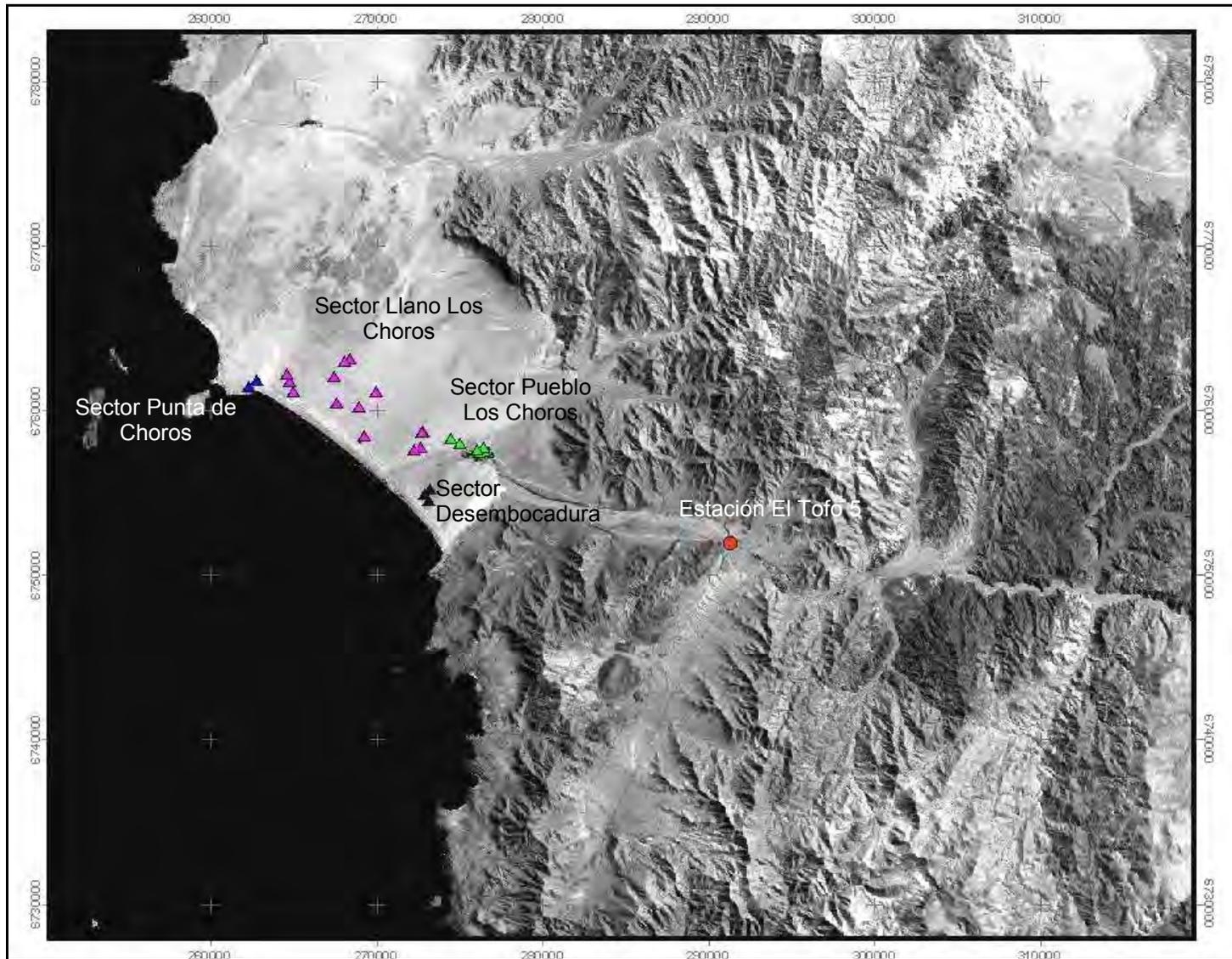
5.2.3. Evaluación Hidrogeoquímica de la Segunda Campaña.

La segunda campaña realizada en la zona de estudio, llevada a cabo en Agosto del 2005, abarca una mayor cantidad de puntos muestreados, por lo que la caracterización de las aguas que conforman el acuífero se desarrolla en forma más completa. Aquellos puntos muestreados en la primera salida a terreno también han sido visitados en una segunda oportunidad, verificando que las variaciones en la composición química no difieren en forma apreciable en ambas campañas.

De igual forma que el análisis de la información recopilada durante la primera campaña, se ha sectorizado la zona en estudio de acuerdo a las características hidrogeológicas e hidrogeoquímicas que se presentan a medida que se acerca a la costa.

La Figura 5.5 y la Tabla 5.2 presentan la ubicación de las captaciones identificadas en una segunda oportunidad y los resultados del análisis físico químico realizado respectivamente.

Figura 5.5.
Distribución de Pozos Zona de Estudio. Campaña 2.



Fuente: Elaboración propia.

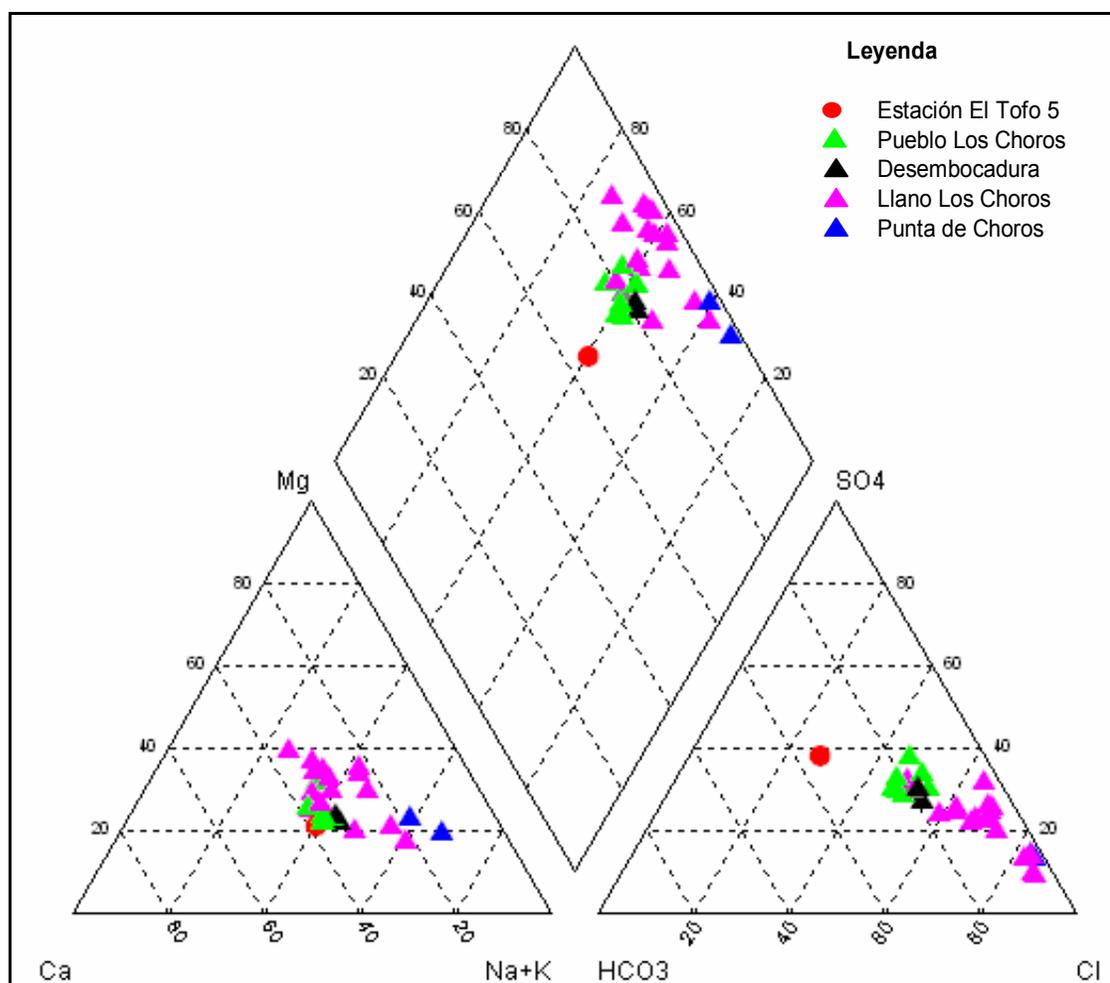
Tabla 5.2.
Análisis químico de las muestras. Datos Campaña 2.

N°	Punto de Muestreo	Sector	Terreno		Análisis en Laboratorio														
			pH u. pH	Conduct uS/cm	pH u. pH	Conduct uS/cm	TDS mg/l	CO ₃ ²⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	RAS	N(NO ₃) mg/l	N(NH ₃)	P(PO ₄) mg/l
1	El Tofo 5 (BNA)	El Trapiche	7.08	1120	8.11	1147	1298	0.0	243.7	114.0	210.4	86.8	28.1	2.8	102.3	2.442	1.852	0.01	0.010
2	APR Pueblo Los Choros (BNA)	Pueblo Los Choros	7.44	1588	8.06	1512	1660	0.0	191.6	258.9	206.9	99.7	59.0	4.2	120.5	2.365	2.479	0.03	0.009
3	Pozo Comité de Regantes	Pueblo Los Choros	7.84	1705	8.29	1483	1472	0.0	189.7	246.0	240.2	101.9	42.1	4.2	131.7	2.771	1.924	0.02	0.011
4	El Molino	Pueblo Los Choros	7.52	2210	8.10	2060	1732	0.0	241.7	361.7	328.7	153.6	64.0	5.0	172.1	2.943	3.501	0.04	0.017
5	Comité de Riego	Pueblo Los Choros	7.64	1880	8.17	1448	1354	0.0	195.1	229.3	206.9	97.6	39.5	3.9	127.6	2.754	1.842	< 0.01	0.012
6	Noria Comité de Riego	Pueblo Los Choros	7.83	2110	8.30	1530	1316	0.0	202.8	253.7	219.6	96.9	41.4	4.6	137.8	2.952	2.455	0.14	0.017
7	Noria Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	7.31	3530	7.76	3470	2758	0.0	346.3	680.9	619.3	250.3	104.3	8.1	342.7	4.591	4.122	0.08	0.025
8	Noria Riego Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	7.15	2440	7.82	2240	2034	0.0	220.3	376.4	423.7	164.4	70.5	5.7	182.3	2.996	4.061	0.04	0.014
9	APR Pta de Choros	Pueblo Los Choros	7.55	1985	8.14	1892	1520	0.0	180.9	383.3	213.2	108.0	43.4	5.2	197.9	4.066	2.968	< 0.01	0.019
10	Los Choros N2 (Galpon) (BNA)	Pueblo Los Choros	7.82	1997	8.42	1952	1964	4.8	181.4	369.4	285.5	134.8	50.2	9.7	169.7	3.168	0.949	0.05	0.033
11	Desembocadura Qda los Choros	Des. Qda. Los Choros	7.98	2000	8.33	1881	1507	0.0	206.2	362.4	247.2	117.1	48.4	5.5	180.4	3.540	1.761	< 0.01	0.046
12	Parcela Mateo Ossandon	Des. Qda. Los Choros	7.96	2060	8.05	1970	2029	0.0	206.7	352.0	286.2	124.5	54.7	8.9	182.8	3.435	0.757	0.14	0.009
13	Desembocadura Qda los Choros 2	Des. Qda. Los Choros	7.85	2050	8.28	1982	1634	0.0	228.6	355.4	289.1	137.4	53.1	8.2	166.9	3.063	0.189	< 0.01	0.059
14	Caseta Azul	Llano Los Choros	7.72	2620	8.03	2600	2308	0.0	193.6	565.9	310.3	175.8	72.4	12.8	220.6	3.535	0.602	0.10	0.018
15	Sergio Cuellar	Llano Los Choros	7.74	2800	8.18	2630	2586	0.0	188.2	582.0	325.9	178.7	86.1	11.6	225.8	3.471	0.527	< 0.01	0.023
16	Casa con Molino	Llano Los Choros	7.8	4610	8.03	4420	2474	0.0	135.2	1083.8	562.5	191.1	111.0	14.5	534.6	7.608	0.743	< 0.01	0.078
17	Noria Casa cercana al Molino	Llano Los Choros	8.05	4430	8.02	4320	3286	0.0	119.7	1111.6	559.7	198.3	100.6	14.5	650.9	9.389	0.507	< 0.01	0.072
18	Caseta Malla Rachel Negra	Llano Los Choros	7.82	4230	7.99	4020	3266	0.0	147.9	975.7	425.0	176.8	142.2	16.3	404.2	5.487	0.102	< 0.01	0.030
19	Pozo Llano Los Choros	Llano Los Choros	7.44	3690	7.87	3490	3080	0.0	206.2	871.2	412.3	242.7	170.8	22.8	194.7	2.340	1.447	0.04	0.065
20	Casa Llano Los Choros	Llano Los Choros	7.63	4970	7.82	4850	4070	0.0	156.1	1247.5	599.4	300.0	177.3	32.1	420.8	4.760	1.547	< 0.01	0.030
21	Camping El Oasis	Llano Los Choros	7.34	6780	8.04	6760	5668	0.0	138.6	1724.9	1150.7	493.5	256.6	43.2	561.4	5.105	0.324	0.11	0.028
22	Pozo Llano Los Choros 2	Llano Los Choros	7.23	3900	7.76	3850	3573	0.0	257.3	947.8	430.7	244.1	179.9	23.7	270.1	3.197	1.580	0.03	0.042
23	Camino a casa blanca	Llano Los Choros	7.37	4520	7.95	4430	3480	0.0	171.2	1198.7	454.8	267.1	181.2	18.2	376.1	4.353	0.104	< 0.01	0.020
24	Pozo 4 Cabañas en construccion	Llano Los Choros	7.49	5200	7.80	5090	4460	0.0	119.7	1526.3	240.8	321.5	212.4	16.3	378.7	4.022	0.069	0.01	0.015
25	Noria Cabañas en construccion	Llano Los Choros	7.83	5310	7.90	5250	4798	0.0	107.0	1575.1	242.2	301.5	217.6	18.5	397.8	4.262	0.177	0.05	0.037
26	Pozo Camino a Pta. de Choros	Llano Los Choros	7.77	6010	7.95	6080	4764	0.0	86.6	1805.1	415.1	253.2	252.5	26.6	541.0	5.755	0.529	0.02	0.014
27	Pozo Camino a Pta. de Choros 2	Llano Los Choros	7.72	5140	7.86	4940	4138	0.0	106.0	1463.6	331.5	238.4	217.6	21.9	502.6	5.662	0.230	< 0.01	0.012
28	Pozo Antonio Soler	Punta de Choros	7.3	18140	8.14	18230	13321	0.0	162.0	5976.3	1326.3	484.3	484.9	107.0	3017.9	23.188	0.446	0.58	0.014
29	Noria Las Cabras	Punta de Choros	7.71	15510	8.08	15410	12024	0.0	170.2	4923.9	1193.1	584.7	467.0	116.3	2170.2	16.233	0.814	0.11	0.217

Fuente: Laboratorio DGA.

A partir de la confección del diagrama de Piper, Figura 5.6, y considerando la sectorización de la zona de acuerdo a la cercanía a la costa, se concluye que, a excepción de las muestras correspondientes a un alto contenido en los iones cloruro y sodio, como es el caso de Punta de Choros, el agua existente es mayoritariamente del tipo sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica. A medida que se aproxima a la línea costera, el agua es predominantemente clorurada y/o sulfatada sódica. La muestra aislada destacada con color rojo, corresponde a la Estación El Tofo, ubicada aguas arriba de la zona en estudio. Pese a que presenta características similares en el tipo de agua en comparación a las muestras correspondientes al Pueblo Los Choros, es decir, del tipo sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica, la composición de dicha muestra difiere en forma apreciable a las analizadas aguas abajo.

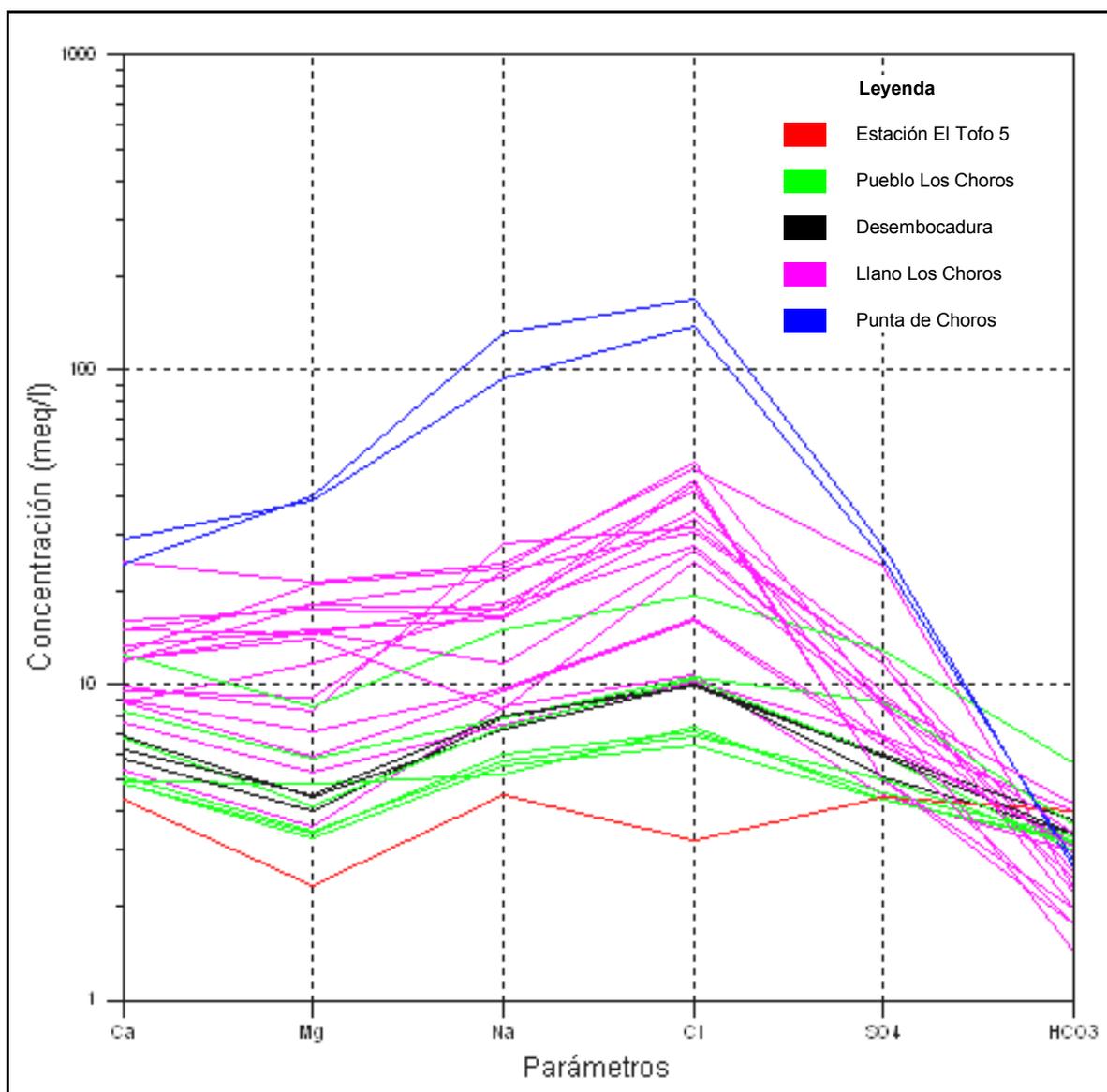
Figura 5.6.
Diagrama de Piper. Datos Campaña 2.



Fuente: Elaboración propia.

La comparación de las muestras, de acuerdo a la concentración de cada uno de los iones analizados, se presenta en el diagrama de Schoeller, Figura 5.7. A medida que se acerca a la línea de costa, se observa que la composición físico química de las muestras presenta un menor grado de homogeneidad y una mayor concentración de los parámetros característicos al problema de salinización.

Figura 5.7.
Diagrama de Schoeller. Datos Campaña 2.



Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, la variabilidad de las muestras de acuerdo a su ubicación responde a un aumento paulatino en la concentración de los iones y que es producto del intercambio iónico que se da a medida que se intensifica la zona de mezcla agua dulce - agua salada.

Llama la atención una muestra correspondiente a la zona del Pueblo Los Choros (color verde), que presenta una composición físico química similar a la zona del Llano Los Choros. Dicha muestra corresponde a una captación del tipo noria, y la profundidad a la cual fue muestreada es de aproximadamente 10 metros. Es posible que tal variación en relación a las demás muestras del Pueblo Los Choros se deba a la presencia de pozos sépticos construidos en las inmediaciones de tal captación y que por tanto producen un empeoramiento de la calidad del agua subterránea. El incremento esperado en tal caso, para cada uno de los iones que componen el agua subterránea se presenta en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3.

Incrementos típicos en la concentración de minerales debido a los usos domésticos del agua.

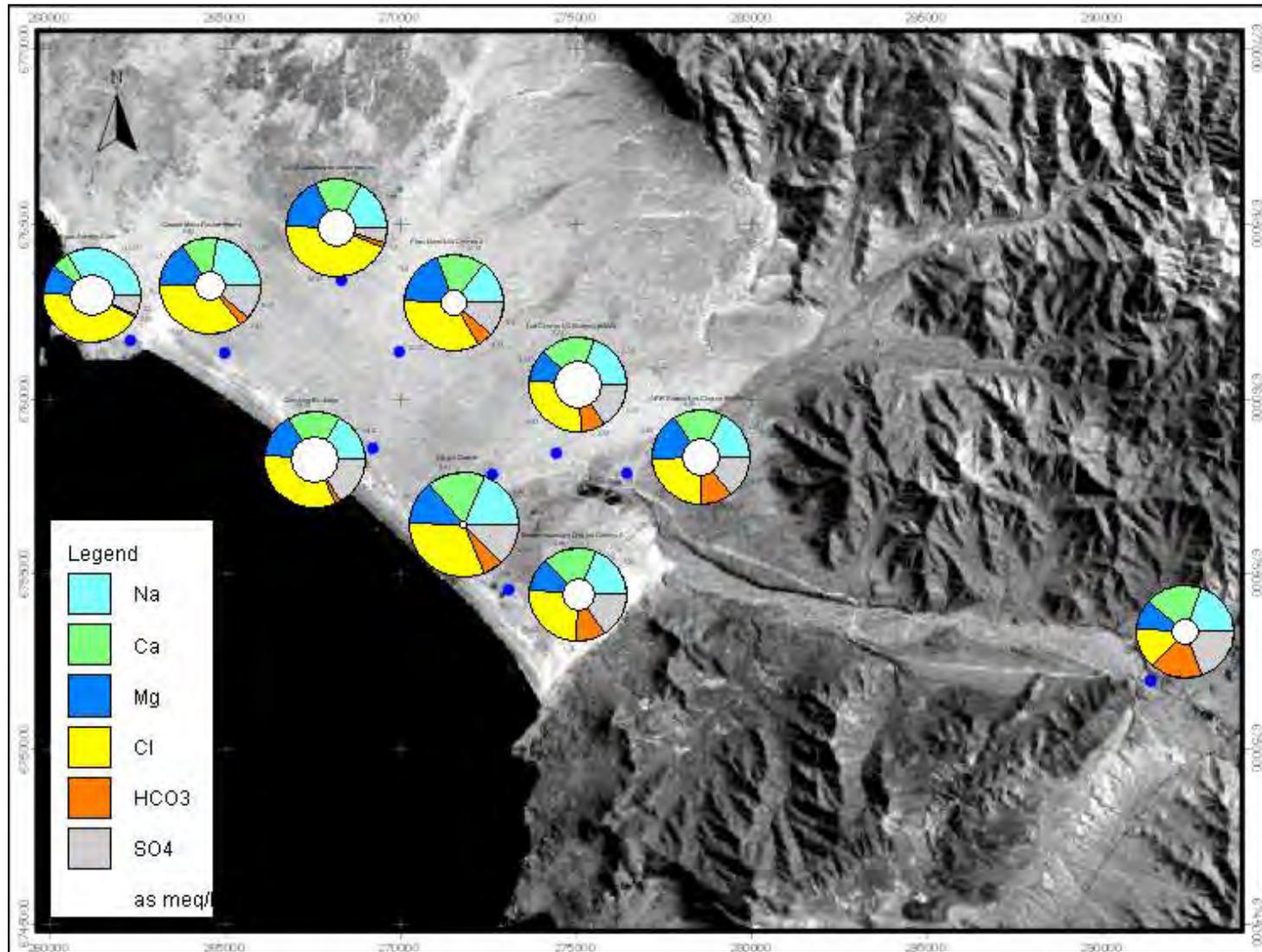
Parámetro	Incremento [mg/l]
Aniones	
Bicarbonato (HCO ₃)	50 - 100
Carbonato (CO ₃)	0 - 10
Cloruro (Cl)	25 - 50
Nitrato (NO ₃)	20 - 40
Fosfato (PO ₄)	5 - 15
Sulfato (SO ₄)	15 - 30
Cationes	
Calcio (Ca)	6 - 16
Magnesio (Mg)	4 - 10
Potasio (K)	7 - 15
Sodio (Na)	40 - 70
Otros Componentes	
Silice (SiO ₂)	2 - 10
Alcalinidad Total (CaCO ₃)	60 - 120
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	150 - 380
Aluminio (Al)	0.1 - 0.2
Boro (B)	0.1 - 0.4
Fierro (Fe)	0.2 - 0.4
Manganeso (Mn)	0.2 - 0.4

Fuente: Metcalf & Eddy, 1990.

De acuerdo a los incrementos reales observados en dicha captación, la posibilidad de que la variación en su composición se deba a la presencia de pozos sépticos se descarta, pues los aumentos superan en gran magnitud a los presentados en la Tabla 5.3. Por lo tanto, el motivo de tal afección a la calidad de sus aguas probablemente se deba a un fenómeno de contaminación local que deberá ser motivo de futuros análisis del agua que compone dicha zona.

Un análisis comparativo de las muestras analizadas en la segunda campaña, según su ubicación, se observa en la Figura 5.8. El tamaño de los diagramas circulares es proporcional a la conductividad eléctrica, por lo que es posible definir aquellas zonas en que se presenta una mayor salinidad. Debido a la densidad de puntos muestreados en la segunda campaña en terreno y para permitir una mayor comprensión en la lectura del mapa de distribución química, se han escogido ciertos puntos en la confección de dicho gráfico, considerando los puntos que caracterizan a las diferentes zonas, desde la estación de control El Tofo 5, hasta las captaciones existentes en Punta de Choros.

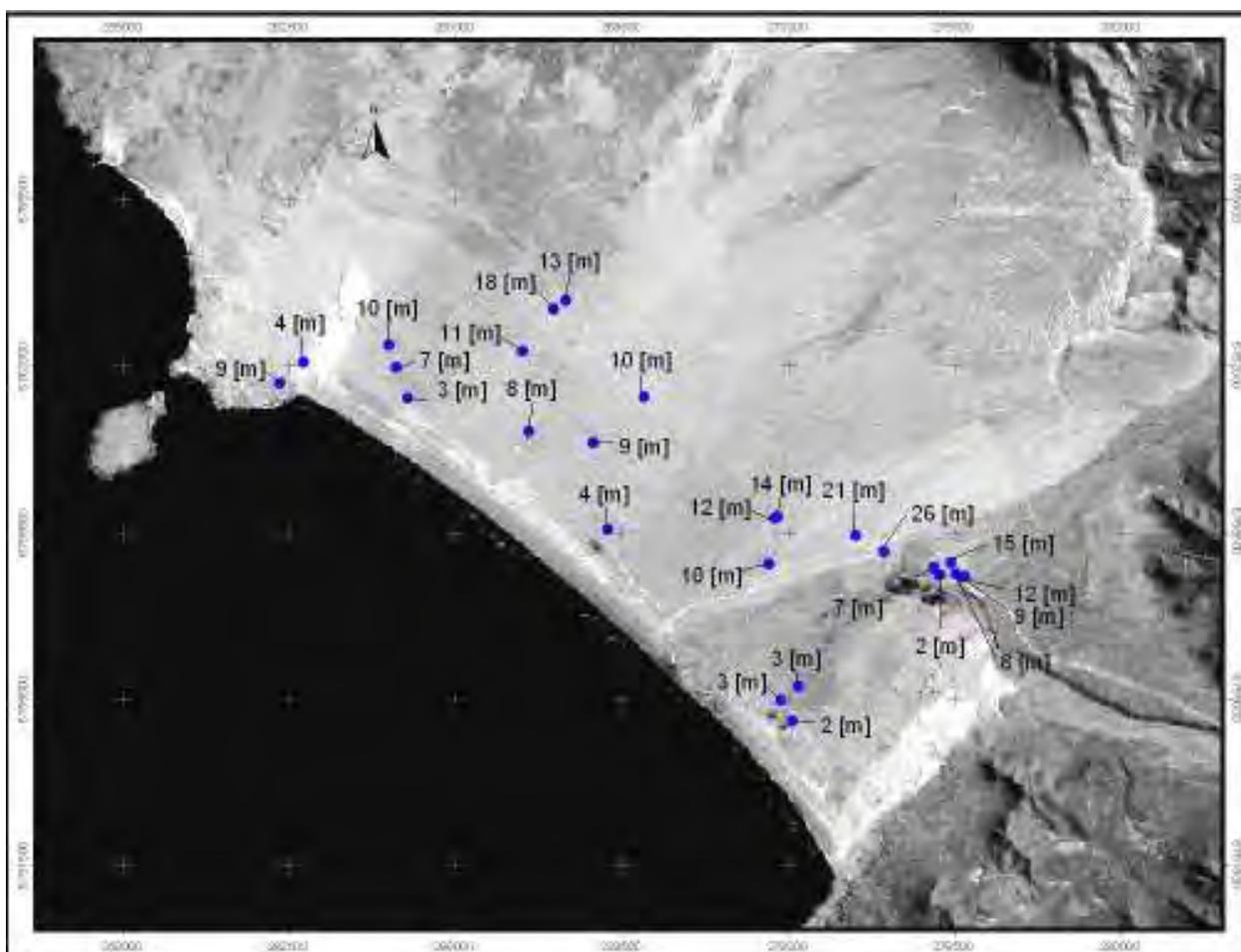
Figura 5.8.
Distribución Química Zona de Estudio. Datos Campaña 2.



Fuente: Elaboración propia.

En general, en la interpretación de la calidad de las aguas, es de importancia considerar, entre otros factores, la profundidad a la cual se muestrea. Al tratarse de una muestra más superficial el contenido salino es menor en comparación a una muestra más profunda, debido a la morfología que presenta la interfase agua dulce – agua salina, por lo que es una variable de mucha importancia a considerar en la clasificación de las aguas. En la zona en estudio, la profundidad a la cual fueron muestreadas las captaciones identificadas se presentan en la Figura 5.9. La gran diferencia en la profundidad de muestreo entre los puntos analizados, probablemente determine una interpretación de la situación de los recursos subterráneos que obedezcan a un factor físico más que a las reacciones químicas que se producen en la zona de mezcla.

Figura 5.9.
Profundidades de muestreo en terreno.



Fuente: Elaboración propia.

Queda de manifiesto entonces, la necesidad de desarrollo de la infraestructura que permita realizar una comparación acorde a lo requerido en la interpretación óptima del problema de intrusión salina.

La frecuencia en el uso de las captaciones constituye otro factor de importancia en la caracterización de las aguas. Al encontrarse una captación sin uso, el tiempo de contacto entre el agua y el suelo es mayor, y por lo tanto la incorporación de sales provenientes desde el suelo aumenta debido a la interacción entre ambos compartimentos ambientales. Una captación con uso constante, en cambio, presenta una renovación más continua de las aguas, por lo que el tiempo de contacto agua-suelo es menor y por lo tanto la muestra es más representativa del problema que se estudia.

En relación al error de cierre de balance de iones de las muestras analizadas, se debe mencionar que la totalidad de éstas presenta un error de cierre menor al 5%, valor que se considera aceptable para dichos análisis.

5.3. Identificación del problema de Intrusión Salina en la zona

5.3.1. Generalidades.

La existencia del fenómeno de intrusión salina en un acuífero costero puede ser detectada mediante diversas técnicas, fundamentalmente hidrogeoquímicas y geofísicas.

En el presente estudio, el análisis de la incipiente intrusión salina que se ha desarrollado en la zona baja del acuífero de quebrada Los Choros, ha sido objeto de un diagnóstico basado en la utilización de índices hidrogeoquímicos.

Debido a la ocurrencia de reacciones químicas entre la fase de agua dulce y salina, es necesario caracterizar en forma detallada y precisa la geología e hidrogeología del acuífero en estudio, con el fin de detectar los fenómenos físico - químicos que modifican

las concentraciones de los principales elementos. Una vez caracterizado químicamente el acuífero, se pretende realizar un análisis exhaustivo de aquellos índices hidrogeoquímicos que sean más representativos y confiables en la identificación del fenómeno de intrusión salina en la Quebrada Los Choros.

5.3.2. Contenido natural del agua subterránea en la zona.

El contenido natural de los compuestos presentes en el agua que conforma el acuífero Los Choros, ha sido determinado a partir de las características de las estaciones de control El Tofo 5 y Pozo Los Choros N°4 B-2, zona en la que el problema de intrusión salina no presenta un riesgo. De esta manera se identifican los rangos de concentración natural existente en la zona baja de la quebrada.

Tabla 5.4.

Contenido natural agua subterránea zona alta Quebrada Los Choros.

		Punto de Muestreo	
		El Tofo 5	Pozo Los Choros N°4 B-2
<i>Sector</i>		El Trapiche	El Trapiche
<i>Coordenadas UTM [m]</i>	Norte	6751882	6750351
	Este	291358	300131
<i>Información en terreno</i>	pH [u.pH]	7.08	-
	C.E [uS/cm]	1120	-
<i>Análisis en Laboratorio</i>	pH [u.pH]	8.11	8.2
	C.E [uS/cm]	1147	622
	TDS [mg/l]	1298	-
	CO ₃ -2 [mg/l]	0.0	0
	HCO ₃ - [mg/l]	243.7	131.65
	Cl- [mg/l]	114.0	115.23
	SO ₄ -2 [mg/l]	210.4	1.58
	Ca+2 [mg/l]	86.8	9.44
	Mg+2 [mg/l]	28.1	5.6
	K+ [mg/l]	2.8	6.69
	Na+ [mg/l]	102.3	100.96
	RAS [mg/l]	2.442	6.43
	NO ₃ - [mg/l]	8.203	3.11
	N(NH ₃) [mg/l]	0.01	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	0.010	0.02	

Fuente: DEP-DGA e Información obtenida en terreno.

La calidad de la estación Pueblo Los Choros N°4 B-2 corresponde a los datos de monitoreo periódicos de la DGA, por lo que los métodos adoptados en el cálculo de ciertos parámetros probablemente difieran a los utilizados en el presente estudio, pudiendo ser el origen de variaciones amplias en las concentraciones de algunos iones. Sin embargo, pese a estas diferencias puntuales, se observa que el contenido de cloruros corresponde en ambos casos a un agua dulce sin la intervención de fenómenos de salinización, por lo que para el problema que se estudia, dichas muestras representan el contenido natural del recurso hídrico que conforma el acuífero.

De igual forma, el conocimiento de la composición media del agua de mar permite observar los valores referenciales de concentraciones que se pueden encontrar en el agua salada. Dichos valores se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5.

Composición media de la corteza terrestre y de algunos tipos de rocas y del agua natural.

Elemento	Composición en ppm						
	Corteza Terrestre	Rocas Ígneas	Rocas Sedimentarias			Agua Natural	
			Resistitas	Hidrolizitas	Precipititas	Marina	Dulce
O	491300	474000	518000	500000	496000	890000	890000
Si	260000	277200	367500	272800	24200	1	8
Al	74500	81300	25300	81900	4300	0,01	0,04
Fe	42000	50000	9900	47300	4000	0,01	0,07
Ca	32500	36300	39500	22300	304500	400	45
Na	24000	28300	3300	9700	370	10556	35
K	23500	25900	11000	27000	2700	380	2,5
Mg	23500	20900	7100	14800	47700	1350	11
H	10000					110000	110000
Ti		4400	960	4300		0,001	0,001
P		1180	350	740	175	0,07	0,03
Mn		1000	trazas	620	385	0,002	0,02
Fe		600		510	250	1,3	0,2
Si		400	2800	2600	1100	885	14
C		320	13800	15300	113500	28	40
Cl		314	trazas		200	19000	16
Rb		310	273	300	0		
Sr		300	226	170	500		
Ba		250	170	460	120		
Cr		200	100	500	2		
Zn		132	220	500	50		

Fuente: Custodio y Llamas, 1996.

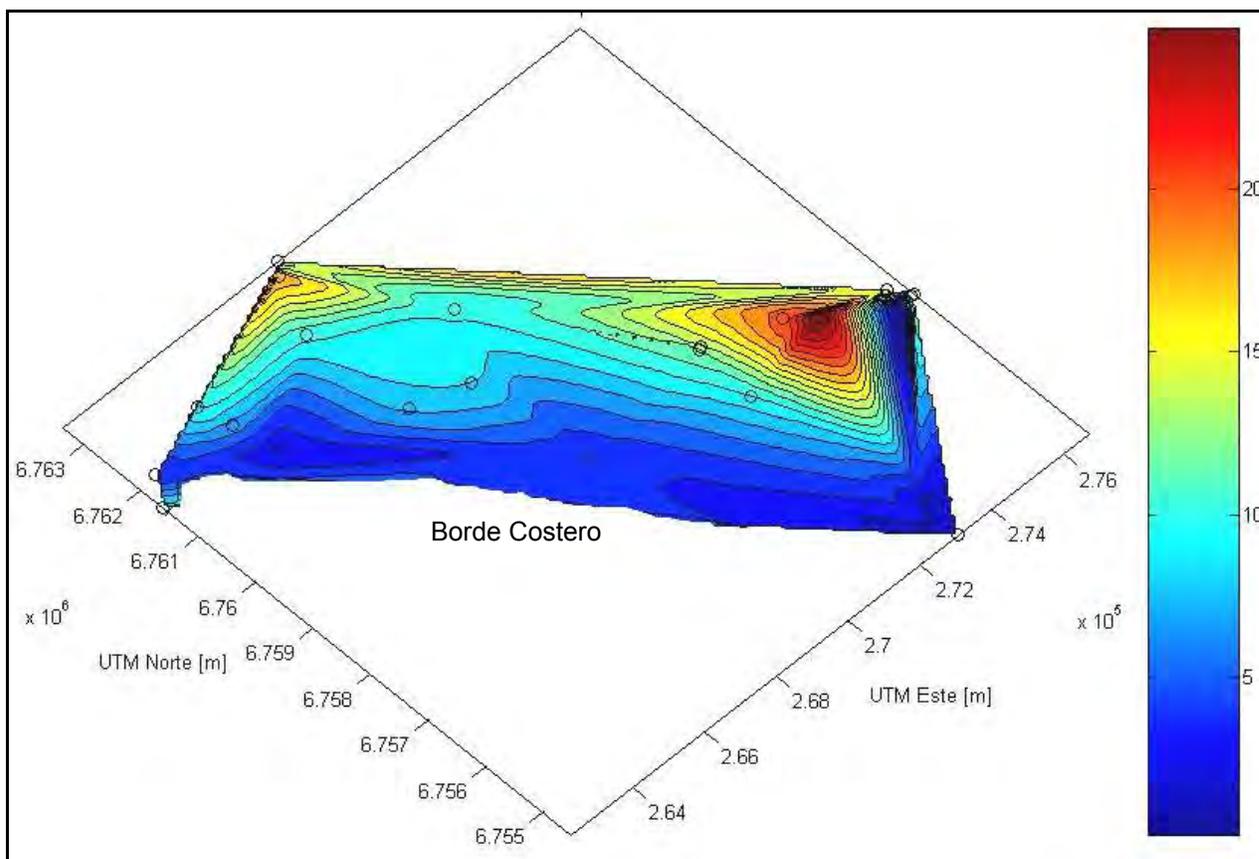
5.3.3. Mecanismos de Recarga

Un factor determinante en la evolución del problema de aumento de salinidad está dado por las líneas de flujo que se dan en la zona, puesto que condicionan la posible entrada de la lengua salina.

La dinámica bajo la cual se desarrolla el proceso de intrusión es de relevancia en la identificación de las zonas que presentan mayor vulnerabilidad a este fenómeno. Por esta razón, es que a partir de métodos gráficos se ha podido interpretar la forma en que el acuífero está siendo contaminado.

En la identificación de los mecanismos de recarga del acuífero es necesario determinar en base a información de terreno, las líneas de flujo que se dan en el escurrimiento subterráneo. Para esto, debiera contarse con las líneas equipotenciales que permitan dar una idea de la forma en que se desarrolla el flujo. Sin embargo, debido a falta de información referente a las mediciones de elevación sobre el nivel del mar de los puntos muestreados, la definición de las líneas equipotenciales no fue posible, y por lo tanto no se puede concluir en forma precisa sobre el escurrimiento subterráneo que se produce con la información disponible a la fecha. En forma alternativa, y dado que sólo se cuenta con los datos de niveles estáticos, se confeccionó el mapa de isoprofundidad, Figura 5.10, que permite observar aquellos puntos en que el nivel de agua subterránea se encuentra más profundo. La zona del Pueblo Los Choros, producto de una explotación más intensa del recurso hídrico, presenta una depresión mayor en relación a las otras localidades. Aunque no es posible realizar conclusiones determinantes con la información disponible a la fecha, respecto a las líneas de flujo inducidas en la zona, sí es posible concluir a partir de dicho gráfico que a medida que se acerca a la línea de costa los niveles estáticos son más superficiales, producto de un mayor contacto con el mar.

Figura 5.10.
Curvas de Isoprofundidad.

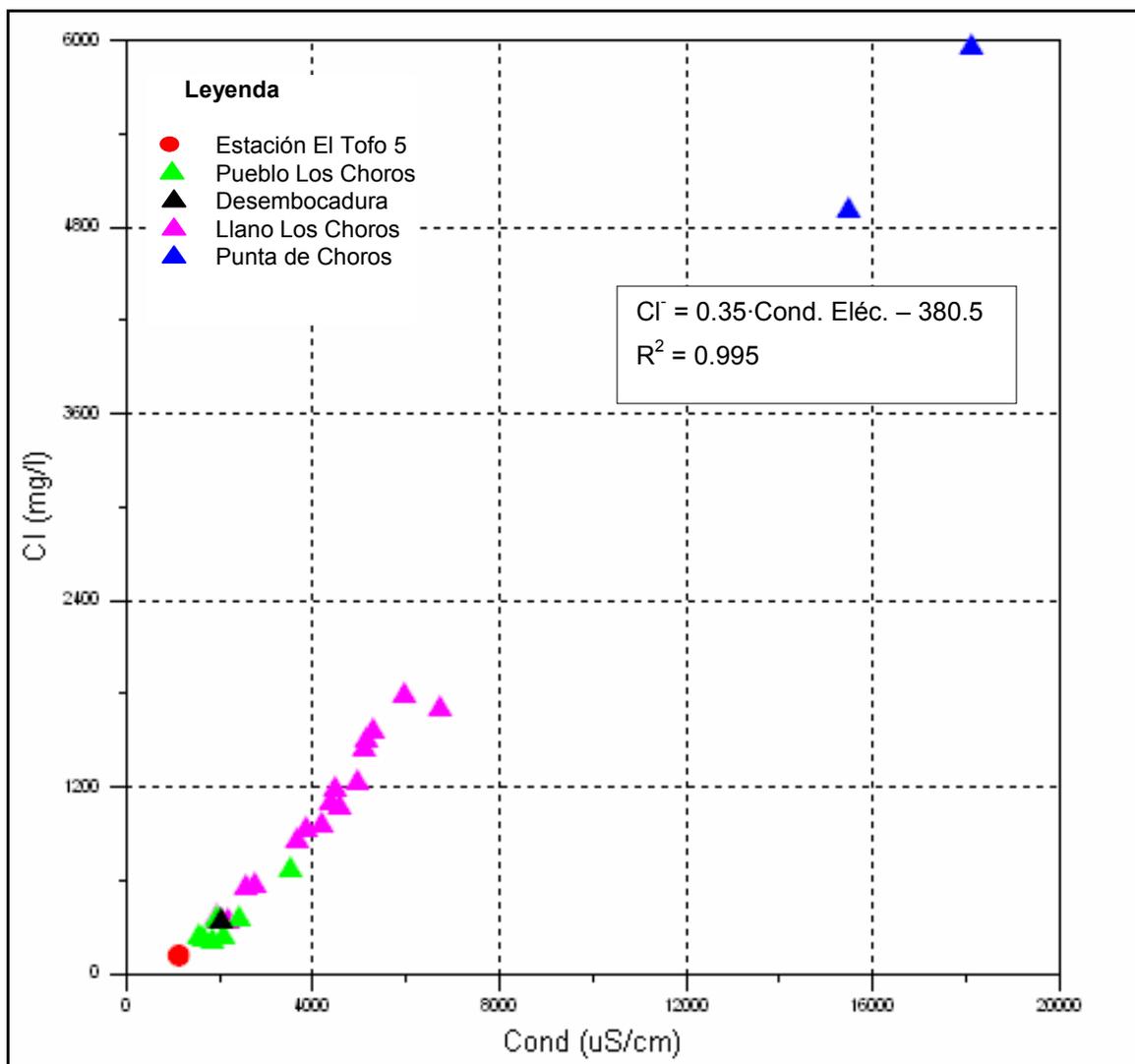


Fuente: Elaboración propia.

Bajo el contexto de un análisis hidrogeoquímico, la fuente de recarga que alimenta cada zona característica del sitio en estudio puede ser interpretada de acuerdo a la ubicación espacial de las muestras analizadas en conjunto con la composición química de cada una de ellas. El diagrama de Scatter, Figura 5.11, presenta la correlación entre el contenido de cloruros y la conductividad eléctrica en la zona. A partir de dicha información, se puede concluir que existen distintas composiciones en el agua dependiendo de su ubicación, determinando la existencia de diversas fuentes de recarga.

Figura 5.11.

Diagrama Scatter: Correlación entre Cl⁻ y Conductividad Eléctrica.



Fuente: Elaboración propia.

De esta forma, para la estación El Tofo y Pueblo Los Choros, es de esperar que la fuente de recarga provenga de la zona alta del acuífero, principalmente del agua superficial que se infiltra y conforma el relleno principal y que constituye una fuente libre de contaminación; la recarga en la zona de desembocadura probablemente no tiene relación con el fenómeno de intrusión salina, pues la composición química de esta agua, si bien se encuentra muy cercana a la línea de costa, no presenta indicios de aumentos de salinidad. Probablemente al tratarse de captaciones someras, la presencia de la zona de mezcla no es detectable; la zona oriental del Llano Los Choros, comienza a delatar la presencia de un mayor contenido de sales, intensificándose a medida que

se acerca al sector de Punta de Choros. Tomando en cuenta lo anterior, es posible definir las líneas de flujo que predominan en la zona en estudio y que condicionan la intensidad del fenómeno difusivo en la zona de mezcla.

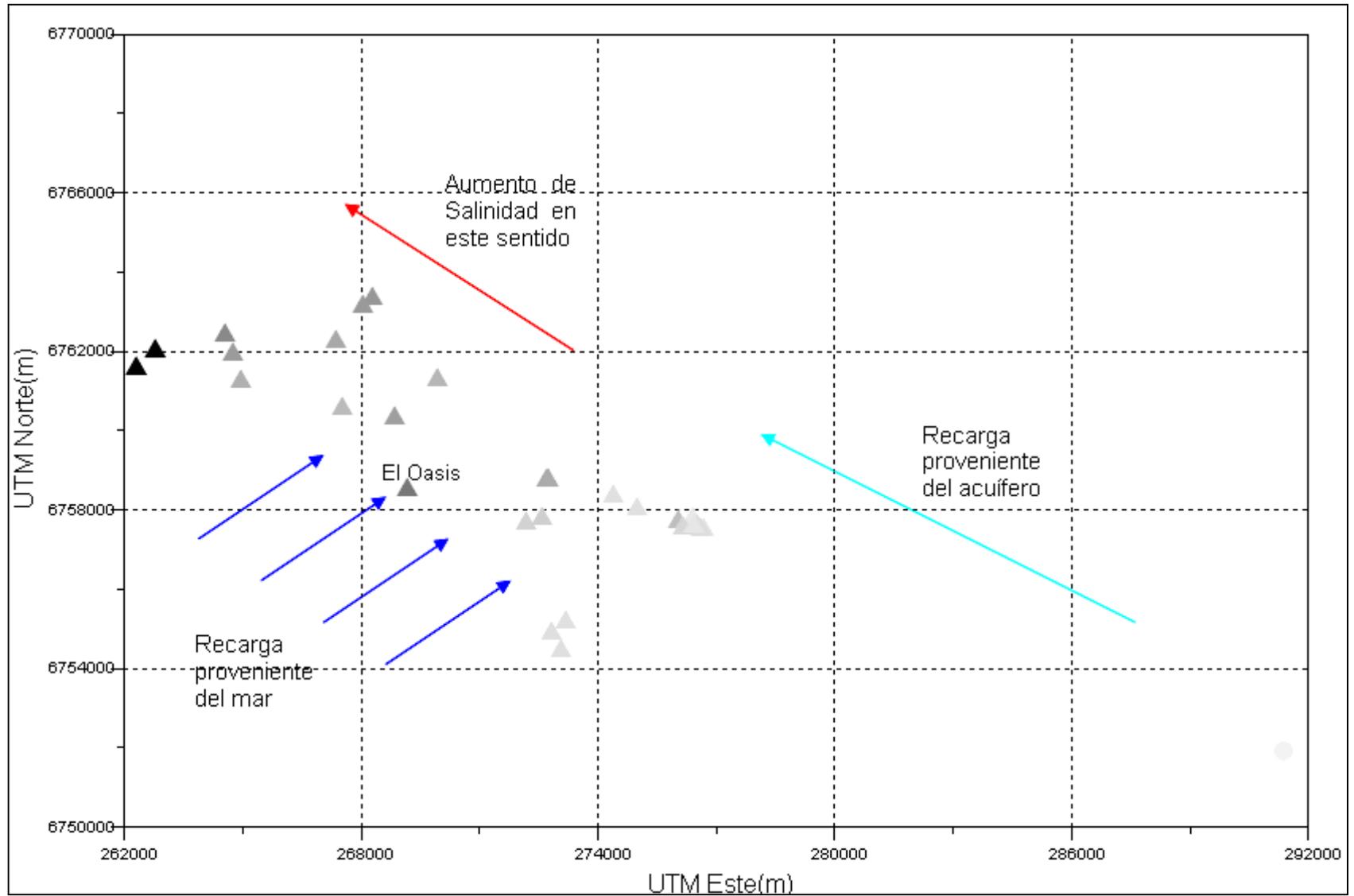
Como comentario adicional, una ventaja del diagrama de Scatter presentado, es que permite correlacionar de muy buena forma (coeficiente de correlación $R^2= 0.995$), la relación que se da entre los parámetros cloruro y conductividad eléctrica. Así, se posibilita el diagnóstico del problema de intrusión salina con mayor rapidez, teniendo en consideración que el análisis in situ del valor de conductividad es desarrollado con facilidad en terreno y por lo tanto permite estimar con gran precisión y mayor frecuencia el contenido de cloruros, parámetro de gran importancia en la caracterización del estado de intrusión salina, mediante la ecuación determinada que se presenta en dicho diagrama.

La Figura 5.12, presenta la variación de conductividad eléctrica de acuerdo a la ubicación de las captaciones muestreadas. Si bien no se presenta en este gráfico una cuantificación de la conductividad eléctrica medida, se puede intuir que la forma en que se produce el flujo de agua subterránea en el acuífero no necesariamente sigue la misma forma que el relleno aluvial que conforma el acuífero principal, cuya salida está dada en la zona de desembocadura, sino que posiblemente se produce un flujo natural hacia el sector del Llano Los Choros, constituyendo una fuente importante de recarga para esta zona.

El aumento de salinidad comienza a manifestarse claramente desde el sector más occidental del Llano hacia el sector de Punta de Choros, lo que tendría una explicación si se considera que a medida que el flujo pierde energía, y por tanto velocidad de escurrimiento, el fenómeno difusivo cobra mayor importancia traduciéndose en una intensificación de la zona de mezcla agua dulce - agua salada a medida que se acerca a la costa. Efectos locales de contaminación, como se observa en la captación Camping El Oasis, son probablemente inducidos debido a una extracción continua del recurso, originando gradientes hidráulicos que involucran la entrada de la fase salina proveniente del mar.

Figura 5.12.

Análisis de los mecanismos de recarga en la zona en función de la distribución de Conductividad Eléctrica.

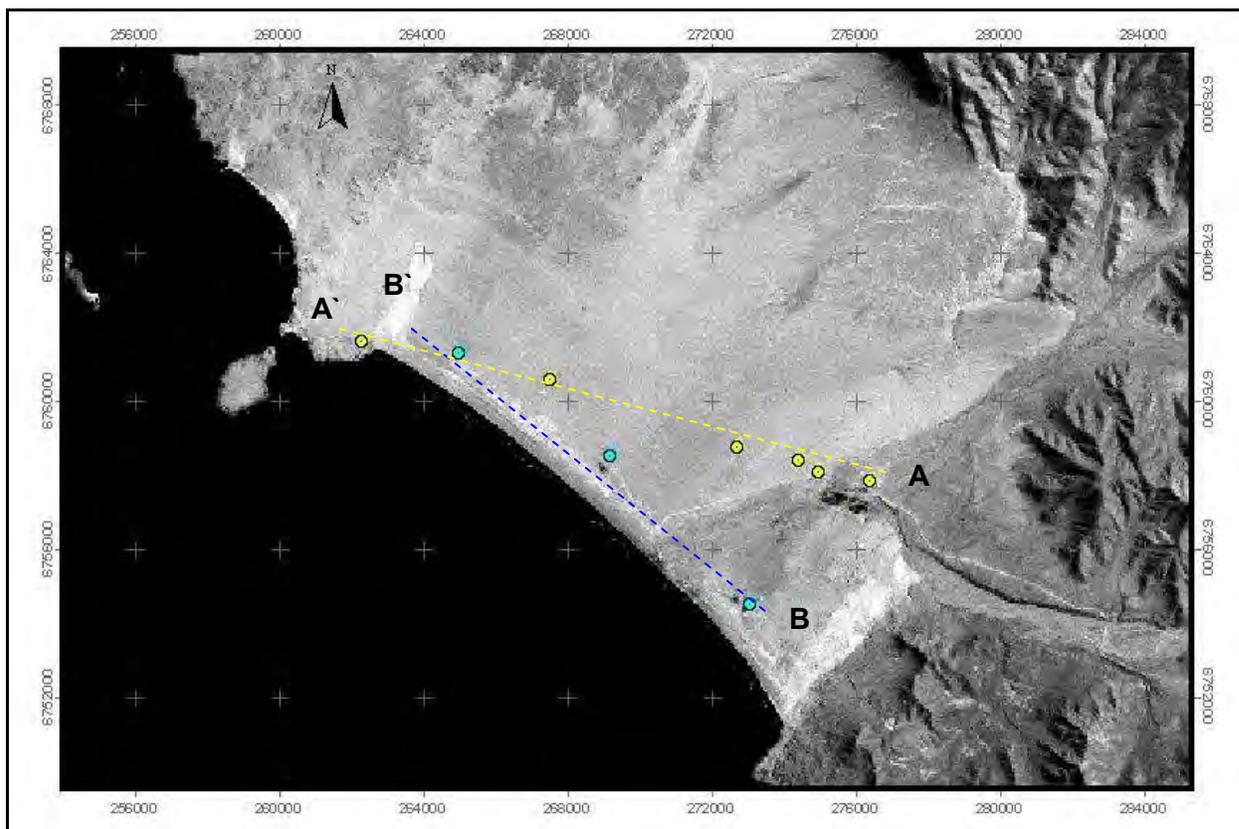


Fuente: Elaboración propia.

Otra herramienta útil que permite observar la variabilidad en la composición química de las aguas corresponde a los diagramas de Collins, presentando un perfil de la hidrogeoquímica en aquellos puntos de interés.

Se realizaron 2 perfiles en la zona de estudio, cuya ubicación en planta se muestra en la Figura 5.13.

Figura 5.13.
Ubicación de Perfiles, Zona de Estudio.



Fuente: Elaboración propia.

El perfil A - A' confeccionado corresponde al análisis químico de una línea de pozos de la zona baja de la quebrada Los Choros, extendida desde el Pueblo Los Choros hasta la línea de costa, en la localidad de Punta de Choros, según se presenta en la Tabla 5.6.

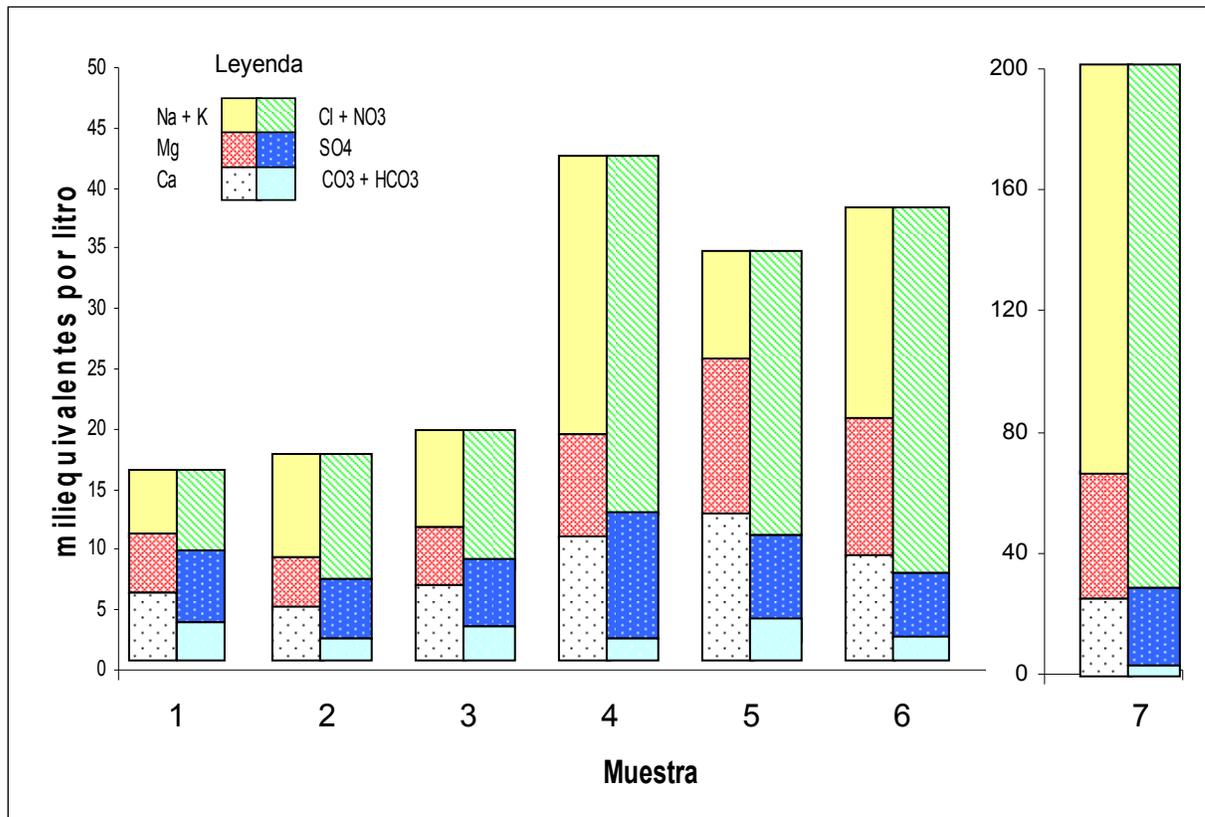
Tabla 5.6.**Línea de Pozos Perfil A - A´.**

Perfil A-A´		Miliequivalentes por litro					
Nº	Estacion	Na+K	Mg	Ca	Cl+NO3	SO4	CO3+HCO3
1	APR Pueblo Los Choros	5.35	4.85	4.98	7.44	4.31	3.14
2	APR Punta de Choros	8.74	3.57	5.39	10.98	4.44	2.96
3	Los Choros N2	7.63	4.13	6.73	10.47	5.95	3.13
4	Casa Con Molino	23.62	9.13	9.54	30.61	11.72	2.22
5	Pozo Llano Los Choros	9.05	14.05	12.11	24.65	8.59	3.38
6	Caseta Malla Rachel	18	11.7	8.82	27.53	8.85	2.42
7	Antonio Soler	134.01	39.9	24.17	168.6	27.63	2.65

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a literatura revisada, se puede concluir que la calidad de las aguas en el Pueblo Los Choros presenta un grado de contaminación por intrusión salina de ligero a moderado (muestras 1 a 3); el sector de Llano Los Choros (muestras 4 a 6) presenta una afección a la calidad de sus aguas que se incrementa hacia el occidente, a excepción del área asociada a la muestra 4, que presenta una composición particular dentro de la zona de estudio y que le confiere un alto grado de contaminación; finalmente en el sector costero, se observa que la muestra analizada (muestra 7), corresponde básicamente a agua de mar. Gráficamente esto se presenta en la Figura 5.14.

Figura 5.14.
Diagrama de Collins para Perfil A - A´.



Fuente: Elaboración propia.

La situación que se da en los puntos que presentan una distancia similar a la línea de costa, en relación a la posible identificación de algún mecanismo de salinización predominante que se da en este sentido, se puede inferir a partir del perfil B - B', que considera una línea de pozos desde el sector de desembocadura a la parte occidental del sector del Llano.

Tabla 5.7.
Línea de Pozos Perfil B - B´.

Perfil B - B´		Miliequivalentes por litro					
Nº	Estacion	Na+K	Mg	Ca	Cl+NO3	SO4	CO3+HCO3
1	Desembocadura Qda. Los Choros 2	7.47	4.37	6.86	10.03	6.02	3.75
2	Camping El Oasis	25.52	21.12	24.63	48.67	23.97	2.27
3	Caseta Malla Rachel Negra	18	11.7	8.82	27.53	8.85	2.42

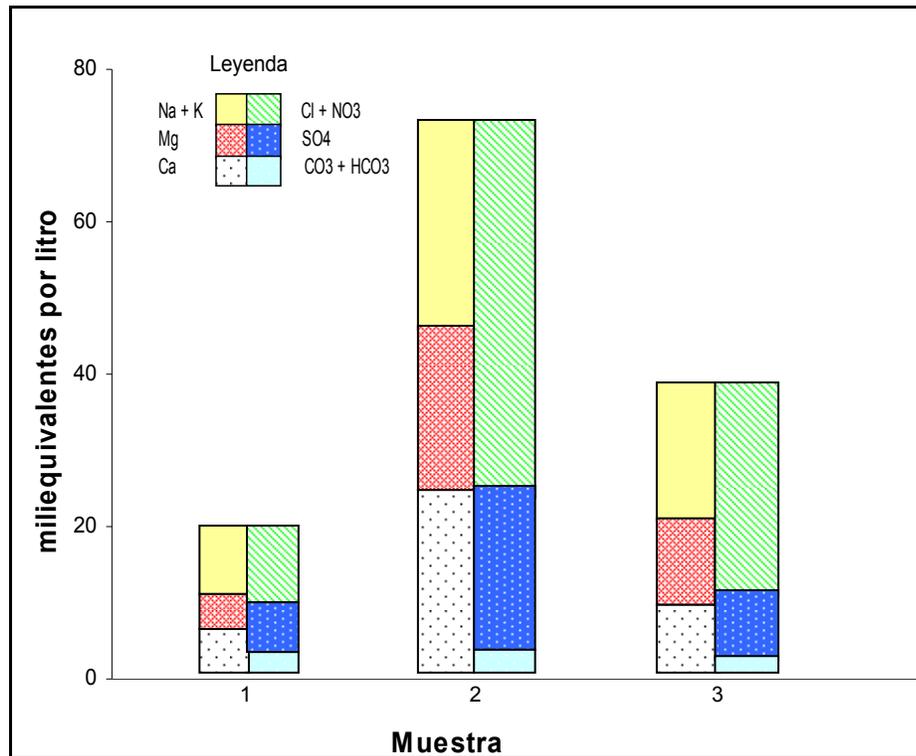
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al perfil realizado, Figura 5.15, se reafirma la posibilidad de que en la zona de desembocadura el mecanismo de recarga de agua subterránea no tenga relación con intrusión salina, pues comparativamente a las otras muestras que presentan una distancia similar a la línea de costa, la calidad del agua presenta un grado de contaminación bastante menor. Sin embargo, se debe considerar que las captaciones en esta zona son bastante superficiales, por lo que es posible que a dicha profundidad no se detecte la zona de mezcla; la captación existente en Camping El Oasis presenta un nivel de salinización mucho mayor, probablemente asociado a una contaminación local producto de un uso intenso del recurso hídrico; por último, la muestra 3, ubicada en el sector occidental del Llano presenta un alto grado de contaminación por intrusión salina.

Para realizar una evaluación completa de la intensidad del fenómeno de intrusión salina en las zonas cercanas a la costa, sería ideal contar con muestras obtenidas a la misma profundidad y en las mismas condiciones de operación de las respectivas captaciones, de tal forma que el análisis se desarrolle bajo un mismo escenario en dichos puntos. Esto, debido a que la zona de mezcla pudiese no ser detectada en ciertas zonas, como se mencionó anteriormente. Se debe tener en cuenta en este caso que las muestras fueron obtenidas a diversas profundidades: desembocadura, 2.5 [m]; Camping El Oasis a 4.5 [m]; y muestra en noria zona occidental del Llano a 3.5 [m].

Figura 5.15.

Diagrama de Collins para Perfil B - B'.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4. Aplicación de Índices Hidrogeoquímicos

Como se mencionó en el capítulo 3, entre los principales iones mayoritarios que pueden ser aportados por el agua de mar, destacan cloruros, sulfatos, sodio, magnesio, en proporciones variables según sea la composición del agua marina local. En consecuencia, los índices hidrogeoquímicos que se adoptarán en el diagnóstico del problema de intrusión salina contemplan las concentraciones que presenten cada uno de estos iones mayoritarios

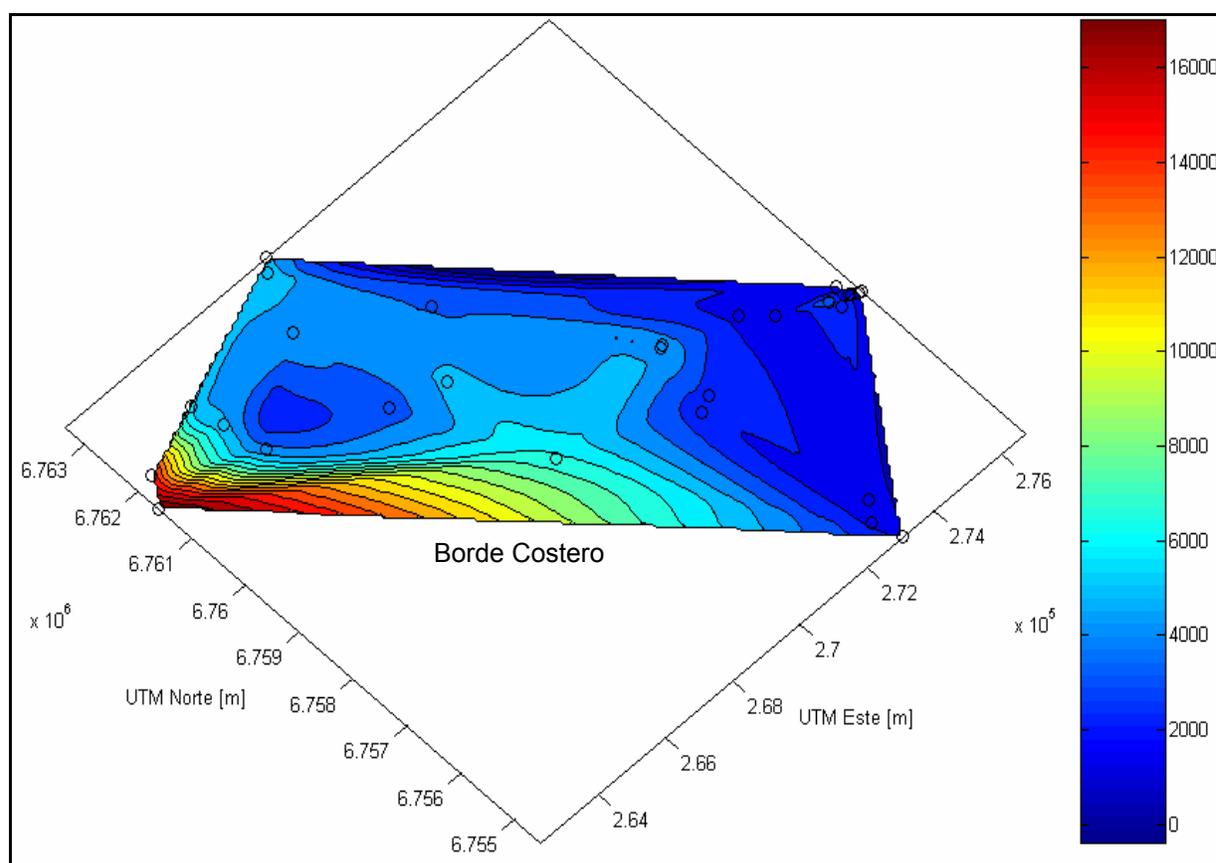
De esta forma, los índices que han sido adoptados y que reflejan la intensidad y variabilidad espacial de la penetración de la cuña salina en la zona costera de Quebrada Los Choros son:

5.3.4.1. Contenido de Sales Disueltas.

Asociado directamente al contenido de Conductividad Eléctrica, no se recomienda considerar exclusivamente este parámetro en la identificación del problema de intrusión salina, ya que los contenidos de sales disueltas en el agua subterránea pueden deberse a procesos diferentes de salinización, como se explicó en el capítulo 3.

Sin embargo, de la Figura 5.16 se deduce que el contenido de sales disueltas es predominante en la zona cercana a la costa, por lo que es de esperar que el principal mecanismo de salinización lo constituya la mayor interacción entre el acuífero y el mar.

Figura 5.16.
Mapa Conductividad Eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$].



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4.2. Relación Cloruro-Bicarbonatos.

La distribución de este índice en la zona de estudio permite identificar aquellas zonas en que se manifiesta el problema de intrusión salina. En conjunto con el mapa de conductividad eléctrica, es posible concluir que principalmente desde la zona occidental del Llano Los Choros a la costa, el problema de salinización cobra mayor importancia.

El valor de este índice permite clasificar las diversas zonas estudiadas de acuerdo a su afección a la incorporación de sales provenientes del mar. Como se muestra en la Tabla 5.8., aquellas muestras de la zona más alta, resaltadas con color amarillo, reflejan un nivel normal de contenido salino en las aguas continentales. Hacia la línea de costa, el aumento del índice manifiesta la presencia de una zona de mezcla agua dulce - agua salada, alcanzando valores entre 5 y 20 del índice cloruro - bicarbonato. Por último, los valores superiores a 20 corresponden a un contenido salino elevado, característico del agua de mar.

Tabla 5.8.
Relación Cloruro - Bicarbonatos.

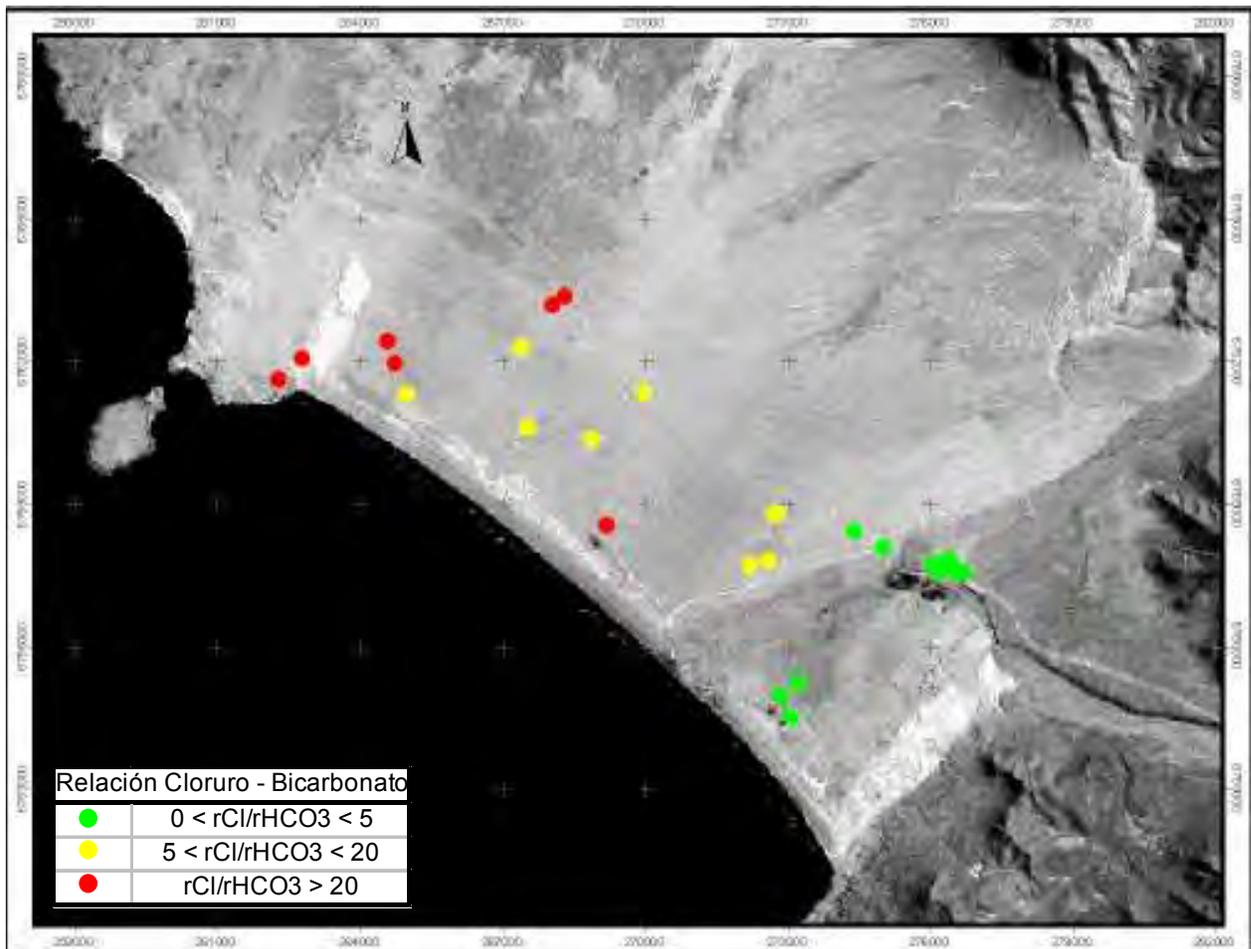
N°	Punto de Muestreo	Sector	rCl meq/l	rHCO ₃ meq/l	rCl/rHCO ₃
1	El Tofo 5 (BNA)	El Trapiche	3.21	3.99	0.80
2	APR Pueblo Los Choros (BNA)	Pueblo Los Choros	7.30	3.14	2.33
3	Pozo Comité de Regantes	Pueblo Los Choros	6.94	3.11	2.23
4	El Molino	Pueblo Los Choros	10.20	3.96	2.58
5	Comité de Riego	Pueblo Los Choros	6.47	3.20	2.02
6	Noria Comité de Riego	Pueblo Los Choros	7.16	3.32	2.15
7	Noria Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	19.21	5.68	3.38
8	Noria Riego Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	10.62	3.61	2.94
9	APR Pta de Choros	Pueblo Los Choros	10.81	2.97	3.65
10	Los Choros N2 (Galpon) (BNA)	Pueblo Los Choros	10.42	2.97	3.50
11	Desembocadura Qda los Choros	Des. Qda. Los Choros	10.22	3.38	3.02
12	Parcela Mateo Ossandon	Des. Qda. Los Choros	9.93	3.39	2.93
13	Desembocadura Qda los Choros 2	Des. Qda. Los Choros	10.03	3.75	2.68
14	Caseta Azul	Llano Los Choros	15.96	3.17	5.03
15	Sergio Cuellar	Llano Los Choros	16.41	3.09	5.32
16	Casa con Molino	Llano Los Choros	30.57	2.22	13.79
17	Noria Casa cercana al Molino	Llano Los Choros	31.36	1.96	15.99
18	Caseta Malla Rachel Negra	Llano Los Choros	27.52	2.42	11.36
19	Pozo Llano Los Choros	Llano Los Choros	24.57	3.38	7.27
20	Casa Llano Los Choros	Llano Los Choros	35.19	2.56	13.75
21	Camping El Oasis	Llano Los Choros	48.65	2.27	21.42
22	Pozo Llano Los Choros 2	Llano Los Choros	26.74	4.22	6.34
23	Camino a casa blanca	Llano Los Choros	33.81	2.81	12.05
24	Pozo 4 Cabañas en construccion	Llano Los Choros	43.05	1.96	21.95
25	Noria Cabañas en construccion	Llano Los Choros	44.43	1.75	25.33
26	Pozo Camino a Pta. de Choros 1	Llano Los Choros	50.92	1.42	35.88
27	Pozo Camino a Pta. de Choros 2	Llano Los Choros	41.28	1.74	23.76
28	Pozo Antonio Soler	Punta de Choros	168.57	2.65	63.50
29	Noria Las Cabras	Punta de Choros	138.89	2.79	49.78

Leyenda	
	0 < rCl/rHCO ₃ < 5
	5 < rCl/rHCO ₃ < 20
	rCl/rHCO ₃ > 20

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.17. presenta la distribución espacial del índice cloruro – bicarbonatos. De esta forma es posible apreciar con mayor claridad las zonas en que el problema de salinización cobra mayor importancia.

Figura 5.17.
Distribución índice Cloruro - Bicarbonato.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4.3. Relación Magnesio-Calcio.

El aumento de este índice en conjunto a una elevación en el contenido de cloruros y de la relación $\frac{r Cl^-}{r CO_3H^-}$ constituye un buen indicio de contaminación por intrusión salina.

Dado que en aguas continentales este índice se presenta valores entre 0.2 y 1, un valor mayor de esta relación constituye un índice para determinar la existencia del problema de intrusión salina.

En forma conjunta, se analiza la relación entre las zonas en que el índice $\frac{rMg^{+2}}{rCa^{+2}}$

adquiere valores mayores y la distribución del contenido de cloruros en el área de estudio, mostrados en la Figura 5.18 y Figura 5.19, respectivamente. De los datos presentados, se concluye que aquellos puntos ubicados cerca de la costa presentan un aumento de este índice, Tabla 5.9, por lo que en conjunto a los demás indicadores de intrusión salina se concluye que el problema cobra importancia en aquellas zonas del sector del Llano occidental y zona costera.

Tabla 5.9.

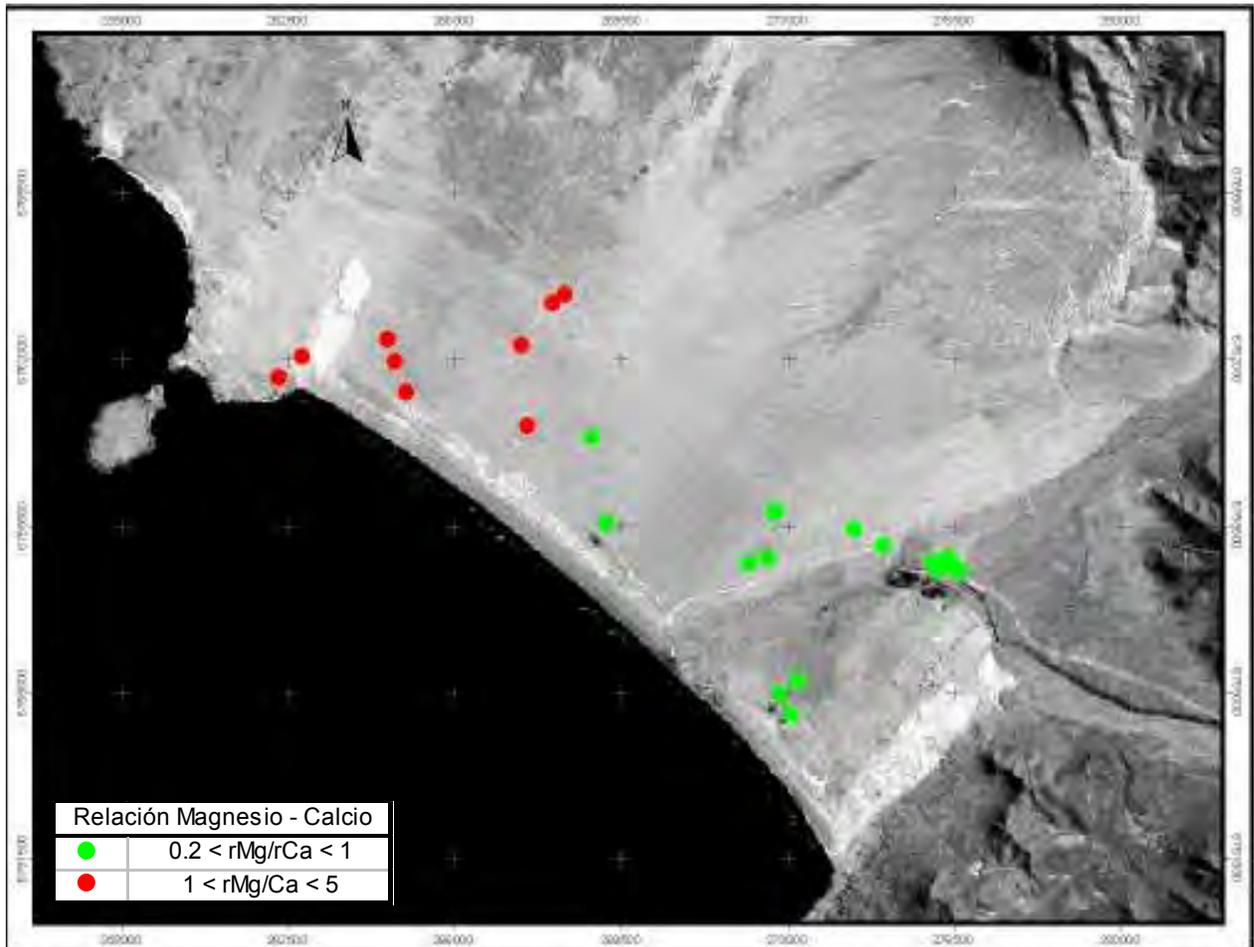
Relación Magnesio - Calcio según su distribución en la zona en estudio.

N°	Punto de Muestreo	Sector	rMg meq/l	rCa meq/l	rMg/rCa
1	El Tofo 5 (BNA)	El Trapiche	2.31	4.33	0.53
2	APR Pueblo Los Choros (BNA)	Pueblo Los Choros	4.85	4.98	0.97
3	Pozo Comité de Regantes	Pueblo Los Choros	3.46	5.08	0.68
4	El Molino	Pueblo Los Choros	5.26	7.67	0.69
5	Comité de Riego	Pueblo Los Choros	3.25	4.87	0.67
6	Noria Comité de Riego	Pueblo Los Choros	3.41	4.83	0.70
7	Noria Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	8.58	12.49	0.69
8	Noria Riego Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	5.80	8.20	0.71
9	APR Pta de Choros	Pueblo Los Choros	3.57	5.39	0.66
10	Los Choros N2 (Galpon) (BNA)	Pueblo Los Choros	4.13	6.73	0.61
11	Desembocadura Qda los Choros	Des. Qda. Los Choros	3.98	5.84	0.68
12	Parcela Mateo Ossandon	Des. Qda. Los Choros	4.50	6.21	0.73
13	Desembocadura Qda los Choros 2	Des. Qda. Los Choros	4.37	6.85	0.64
14	Caseta Azul	Llano Los Choros	5.96	8.77	0.68
15	Sergio Cuellar	Llano Los Choros	7.08	8.92	0.79
16	Casa con Molino	Llano Los Choros	9.14	9.54	0.96
17	Noria Casa cercana al Molino	Llano Los Choros	8.28	9.89	0.84
18	Caseta Malla Rachel Negra	Llano Los Choros	11.70	8.82	1.33
19	Pozo Llano Los Choros	Llano Los Choros	14.06	12.11	1.16
20	Casa Llano Los Choros	Llano Los Choros	14.59	14.97	0.97
21	Camping El Oasis	Llano Los Choros	21.12	24.63	0.86
22	Pozo Llano Los Choros 2	Llano Los Choros	14.80	12.18	1.22
23	Camino a casa blanca	Llano Los Choros	14.91	13.33	1.12
24	Pozo 4 Cabañas en construccion	Llano Los Choros	17.48	16.05	1.09
25	Noria Cabañas en construccion	Llano Los Choros	17.91	15.04	1.19
26	Pozo Camino a Pta. de Choros 1	Llano Los Choros	20.78	12.64	1.64
27	Pozo Camino a Pta. de Choros 2	Llano Los Choros	17.91	11.90	1.51
28	Pozo Antonio Soler	Punta de Choros	39.90	24.17	1.65
29	Noria Las Cabras	Punta de Choros	38.43	29.18	1.32

Leyenda	
	0.2 < rMg/rCa < 1
	1 < rMg/rCa < 5

Fuente: Elaboración propia.

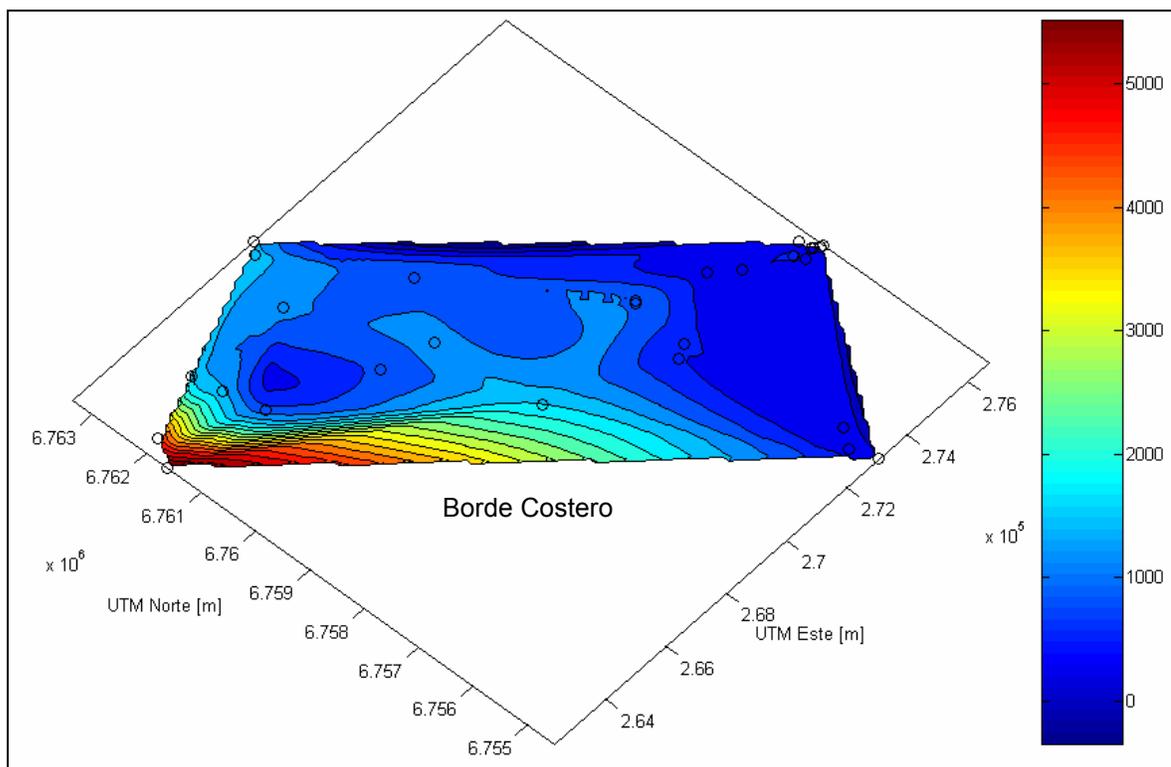
Figura 5.18.
Distribución índice Magnesio - Calcio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.19.

Líneas de igual contenido de cloruros. Zona baja de quebrada Los Choros [mg/l].



Fuente: Elaboración propia.

5.4. Resumen

El diagnóstico del problema de intrusión salina en la zona, considerando la dependencia entre los parámetros y relaciones químicas analizadas en forma particular, permite concluir la existencia de una creciente salinización en el sector occidental del Llano Los Choros, tal como se puede ver en la Tabla 5.10. Aquellos puntos de muestreo destacados en color negro, corresponden a zonas afectas a la salinización, y que por lo tanto presentan limitaciones a los usos del agua presente en dichas zonas.

Tabla 5.10.

Resumen análisis químico zona costera Los Choros.

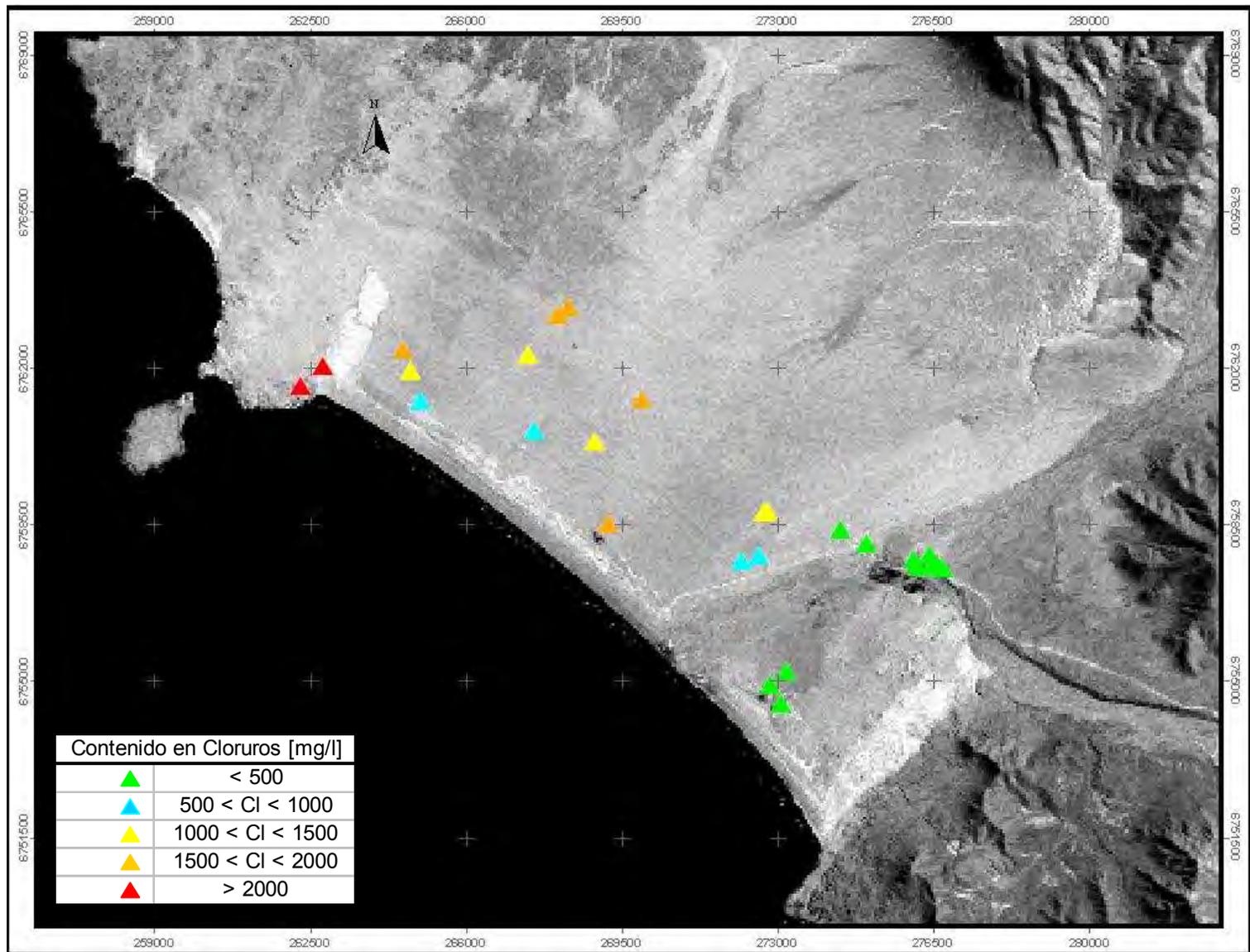
Nº	Punto de Muestreo	Sector	rCl/rHCO3	rMg/rCa	Cl ⁻ mg/l	Cond. Elec uS/cm
1	El Tofo 5 (BNA)	El Trapiche	0.80	0.53	114.0	1120
2	APR Pueblo Los Choros (BNA)	Pueblo Los Choros	2.33	0.97	258.9	1588
3	Pozo Comité de Regantes	Pueblo Los Choros	2.23	0.68	246.0	1705
4	El Molino	Pueblo Los Choros	2.58	0.69	361.7	2210
5	Comité de Riego	Pueblo Los Choros	2.02	0.67	229.3	1880
6	Noria Comité de Riego	Pueblo Los Choros	2.15	0.70	253.7	2110
7	Noria Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	3.38	0.69	680.9	3530
8	Noria Riego Pueblo Los Choros	Pueblo Los Choros	2.94	0.71	376.4	2440
9	APR Pta de Choros	Pueblo Los Choros	3.65	0.66	383.3	1985
10	Los Choros N2 (Galpon) (BNA)	Pueblo Los Choros	3.50	0.61	369.4	1997
11	Desembocadura Qda los Choros	Des. Qda. Los Choros	3.02	0.68	362.4	2000
12	Parcela Mateo Ossandon	Des. Qda. Los Choros	2.93	0.73	352.0	2060
13	Desembocadura Qda los Choros 2	Des. Qda. Los Choros	2.68	0.64	355.4	2050
14	Caseta Azul	Llano Los Choros	5.03	0.68	565.9	2620
15	Sergio Cuellar	Llano Los Choros	5.32	0.79	582.0	2800
16	Casa con Molino	Llano Los Choros	13.79	0.96	1083.8	4610
17	Noria Casa cercana al Molino	Llano Los Choros	15.99	0.84	1111.6	4430
18	Caseta Malla Rachel Negra	Llano Los Choros	11.36	1.33	975.7	4230
19	Pozo Llano Los Choros	Llano Los Choros	7.27	1.16	871.2	3690
20	Casa Llano Los Choros	Llano Los Choros	13.75	0.97	1247.5	4970
21	Camping El Oasis	Llano Los Choros	21.42	0.86	1724.9	6780
22	Pozo Llano Los Choros 2	Llano Los Choros	6.34	1.22	947.8	3900
23	Camino a casa blanca	Llano Los Choros	12.05	1.12	1198.7	4520
24	Pozo 4 Cabañas en construccion	Llano Los Choros	21.95	1.09	1526.3	5200
25	Noria Cabañas en construccion	Llano Los Choros	25.33	1.19	1575.1	5310
26	Pozo Camino a Pta. de Choros 1	Llano Los Choros	35.88	1.64	1805.1	6010
27	Pozo Camino a Pta. de Choros 2	Llano Los Choros	23.76	1.51	1463.6	5140
28	Pozo Antonio Soler	Punta de Choros	63.50	1.65	5976.3	18140
29	Noria Las Cabras	Punta de Choros	49.78	1.32	4923.9	15510

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 5.20 permite observar el grado de afección al problema de intrusión salina, en términos del contenido de cloruro, que se presenta en la zona de estudio.

Figura 5.20.

Grado de afección a la calidad de las aguas según distribución espacial.



Fuente: Elaboración propia.

6. DISEÑO DE LA RED DE MONITOREO

6.1. Generalidades

El seguimiento temporal y espacial de la evolución del problema de intrusión salina en un acuífero costero, una vez que éste ha sido identificado, cobra gran importancia ya que permite conocer el avance tierra adentro de la lengua salina. De esta forma, el control de la dinámica del problema constituye una herramienta de gran utilidad en la determinación de las medidas necesarias para una mejor gestión de los acuíferos contaminados.

En general, para que la definición de un programa de monitoreo cumpla con los objetivos propuestos, y permita controlar en forma óptima la evolución de la cuña salina, deben determinarse los siguientes aspectos:

- Tipos de técnicas existentes.
- Puntos de extracción que deben ser monitoreados en la zona.
- Parámetros relevantes a analizar.
- Equipamiento disponible y principales elementos químicos a analizar en la toma de muestras.
- Frecuencia y tipo de muestreo.
- Manejo de la información.

Dentro de las posibles técnicas de ser adoptadas en el seguimiento del problema de intrusión salina destacan las de control piezométrico, hidrogeoquímicas, isotópicas y geofísicas. Sin embargo, desde el punto de vista costo - eficiencia, las redes de control piezométricas e hidrogeoquímicas presentan mayor interés.

6.2. Red de Monitoreo propuesta zona baja Quebrada Los Choros

6.2.1. Aspectos Generales.

En conjunto con las redes piezométricas, utilizadas para conocer las evoluciones temporales de los potenciales del agua, el análisis hidrogeoquímico de los puntos que conforman la red constituye una herramienta de control que permite tener una idea más global del avance, o retroceso, del problema de intrusión salina. El uso conjunto de ambas técnicas, en comparación a las técnicas de control geofísicas e isotópicas principalmente, refleja con mayor rapidez y es más sensible a los cambios químicos producidos por el contacto con el mar. Dado que ambas técnicas (control piezométrico e hidrogeoquímicas) constituyen el método de control más eficiente y de menor costo de implementación, se adoptarán para el diseño de la red de monitoreo en la zona costera del acuífero de quebrada Los Choros.

Se debe considerar que, idealmente, la distribución espacial de la red de monitoreo debe diseñarse en función de la distribución en profundidad de los niveles geológicos, junto con información de los espesores de estos niveles a lo largo de la zona que se quiere controlar. Debido a falta de información relativa a la composición geológica de la zona en estudio, el diseño de la red de monitoreo propuesta no contempla en forma exhaustiva dicho aspecto, por lo que se recomienda desarrollar a futuro, estudios que permitan tener un conocimiento más completo de la zona de interés. Las técnicas que permiten obtener este tipo de información corresponden principalmente a geofísicas, que para el caso del acuífero en estudio las que más se adecuan son las prospecciones eléctricas en corriente continua. Actualmente, el método que proporciona mayor detalle es la tomografía geoelectrica de superficie, realizada conjuntamente con sondeos eléctricos verticales.

6.2.2. Puntos seleccionados.

El diseño de la red de control de intrusión salina en la zona de estudio se ha desarrollado principalmente a partir de la información hidrogeoquímica obtenida en los puntos monitoreados durante las campañas en terreno. El criterio de elección de las captaciones que conforman dicha red contempla la presencia de puntos característicos, tanto activos como no activos, de cada una de las zonas identificadas de acuerdo a la geología e hidrogeología dominante. En el contexto anterior, puntos activos corresponden a aquellos en los cuales se observa un uso más continuo del recurso hídrico. Ejemplos de estos pozos son el pozo APR Pueblo Los Choros, pozo APR Punta de Choros, Camping El Oasis, entre otros. Aquellos pozos no activos corresponden a los identificados en sitios abandonados o aquellos que en forma posterior a su construcción no han sido utilizados. Es importante mencionar también, que la red propuesta no considera aspectos demográficos ni espaciales - geográficos de la zona, sino que ha sido determinada considerando básicamente una distribución geométrica lo más homogénea y extensa posible.

Si bien la infraestructura actual de la zona en relación a las características de construcción de los pozos existentes no permite desarrollar en forma óptima el seguimiento del proceso de salinización, la red propuesta utilizará los pozos ya existentes en el sector, identificados durante las campañas en terreno. Queda de manifiesto si, la necesidad de mejorar a futuro las condiciones de construcción de dichas captaciones, para de esta forma realizar el procedimiento de control adecuado en el problema de intrusión salina. La construcción de nuevos puntos de observación no se pretende analizar como parte de este estudio, debido a falta de información relativa a la geología e hidrogeología del sector del Llano Los Choros.

La determinación de los puntos contempla una distribución que abarque la zona en toda su extensión, procurando definir una densidad de puntos lo más homogénea posible en términos espaciales. La experiencia en la implantación de redes de control en países como España aconseja considerar en acuíferos detríticos poco explotados, como es el caso del acuífero de quebrada Los Choros, una densidad de puntos de observación

cercana a un punto por cada 5 - 10 Km² (Congreso TIAC: Países Mediterráneos 2003, IGME. España). En vista de que el área en estudio supera los 50 Km², una malla conformada por 11 puntos en la zona en estudio permite evaluar adecuadamente, bajo las condiciones actuales de explotación del acuífero, el avance del problema de intrusión salina. Adicionalmente, la distribución geométrica de los puntos de observación presenta una cobertura adecuada de las zonas que requieren de un control temporal y espacial del fenómeno de salinización.

Las estaciones de control adoptadas en el sector bajo del acuífero se presentan en la Tabla 6.1. La red de monitoreo propuesta en la zona de estudio, se presenta en la Figura 6.1.

Tabla 6.1.
Red de Monitoreo.

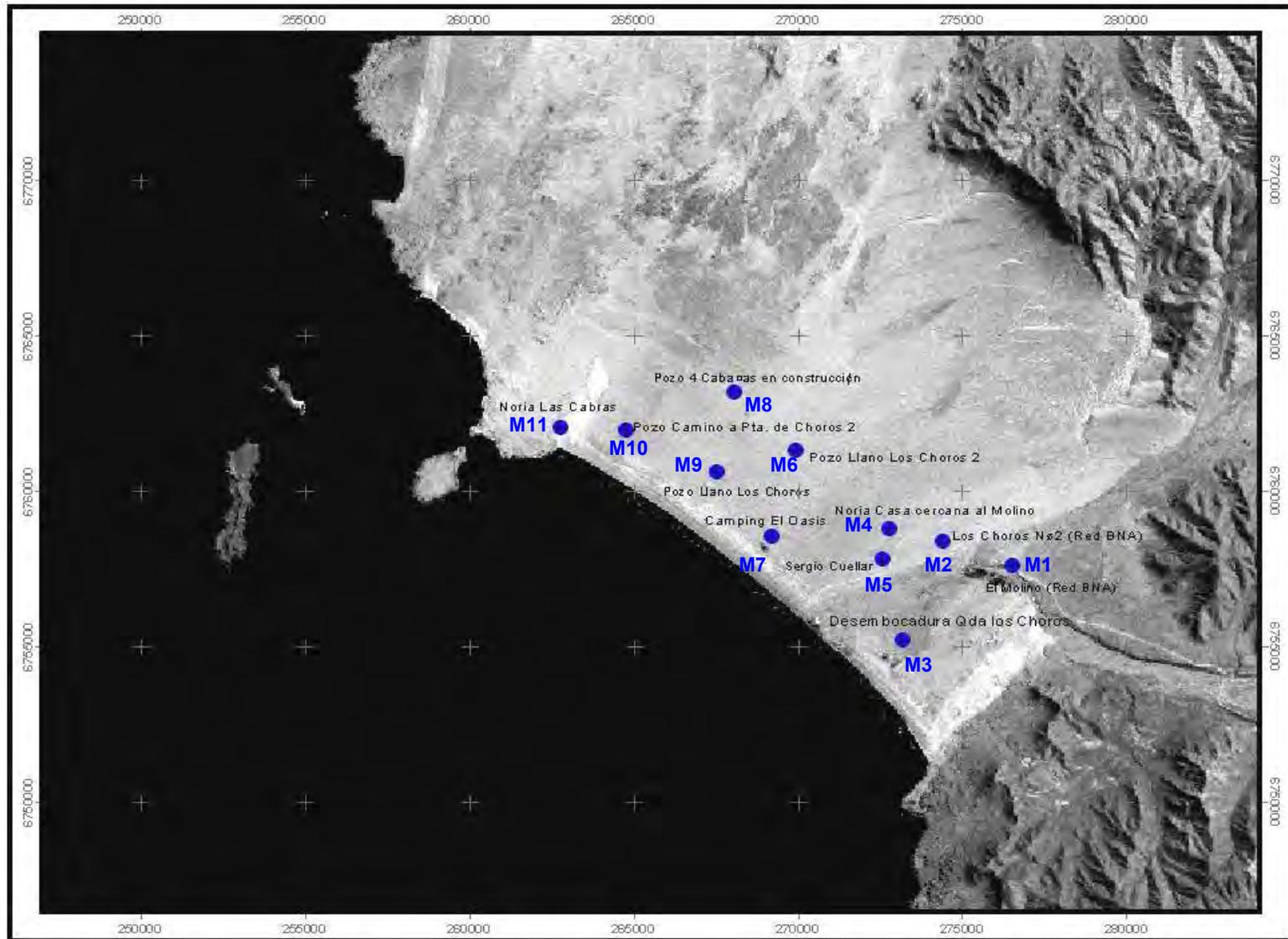
Pozo	Punto de Observación	Sector	Coordenada UTM	
			Este [m]	Norte [m]
M1	El Molino (Red BNA)	Pueblo Los Choros	276518	6757615
M2	Los Choros N°2 (Red BNA)	Pueblo Los Choros	274423	6758402
M3	Desembocadura Qda los Choros	Des. Qda. Los Choros	273206	6755221
M4	Noria Casa cercana al Molino	Llano Los Choros	272776	6758808
M5	Sergio Cuellar	Llano Los Choros	272594	6757814
M6	Pozo Llano Los Choros 2	Llano Los Choros	269954	6761319
M7	Camping El Oasis	Llano Los Choros	269204	6758543
M8	Pozo 4 Cabañas en construcción	Llano Los Choros	268051	6763190
M9	Pozo Llano Los Choros	Llano Los Choros	267541	6760604
M10	Pozo Camino a Pta. de Choros 2	Llano Los Choros	264755	6761950
M11	Noria Las Cabras	Punta de Choros	262783	6762060

Fuente: Elaboración propia.

En la localidad de Pueblo Los Choros, los puntos escogidos son también parte de la red de observación que la DGA controla periódicamente en la zona. Dichas estaciones presentan la siguiente identificación:

- Estación El Molino. Código BNA: 04120006-5
- Estación Los Choros C-1 N°2. Código BNA: 04120009-K

Figura 6.1.
Red de Monitoreo.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el criterio de elección de las captaciones que conforman la red propuesta contempla en primer lugar la presencia de puntos característicos, tanto activos como no activos identificados en terreno y en segundo lugar, la determinación de una red cuya distribución permitiera abarcar en forma extensa la evolución del aumento de salinización en la zona.

6.2.3. Parámetros Relevantes.

Dado que las técnicas adoptadas para determinar la evolución de la interfase agua dulce - agua salada consideran el control del nivel piezométrico y análisis hidrogeoquímico, los parámetros de los cuales se deberán realizar mediciones periódicas son:

6.2.3.1. *Parámetros Hidrogeológicos.*

El control piezométrico, utilizado para conocer las evoluciones temporales de los potenciales del agua, debe presentar las siguientes características en los puntos que conforman la red:

- Densidad de puntos de control asociadas al nivel de explotación y características hidrogeológicas del acuífero. Es decir, un punto de observación por cada 5-10 Km² cuando el nivel de explotación es bajo, y un punto por cada Km² cuando el acuífero está siendo fuertemente explotado (Congreso TIAC: Países Mediterráneos 2003, IGME. España).
- Los puntos de observación deben estar perfectamente nivelados con una precisión centimétrica, teniendo en cuenta el nivel medio del mar en la zona de estudio. De esta forma, se asegura una medición representativa de la profundidad a la que se muestrea.

- En cuanto a la profundidad de los sensores se debe tener en cuenta la fluctuación de los niveles freáticos en el estiaje, para lo cual se recomienda colocar la mayoría de los sensores por debajo del nivel mínimo de estiaje, correspondiente a 20 metros de profundidad (2 msnm), según las últimas mediciones efectuadas en terreno, procurando que todos queden al mismo nivel. Otro factor a tener en cuenta es la posible existencia de niveles permeables continuos en la zona (detectado por métodos geofísicos). En el caso de encontrar la presencia de varios niveles y constatando hidrogeológicamente que forman acuíferos diferentes se deben colocar sensores en cada uno de ellos y estudiar la posible interferencia entre los acuíferos presentes. Respecto a este último punto, de acuerdo a los estudios geológicos e hidrogeológicos desarrollados en la zona de quebrada Los Choros, se ha constatado la presencia de un sólo acuífero.

6.2.3.2. Parámetros Hidrogeoquímicos.

La red de de monitoreo de calidad del recurso debe cumplir con condiciones similares a las expuestas en el caso de las requeridas en el control del nivel piezométrico. Las características físicas que los puntos de observación deben cumplir para desarrollar en forma adecuada el análisis químico, contemplan la existencia de captaciones profundas y que adicionalmente presenten cribas en los niveles estratigráficos que tengan una mayor capacidad de transmisividad del acuífero, de tal forma de posibilitar la realización de procesos de muestreos en la vertical.

Los parámetros químicos relevantes a ser controlados se exponen a continuación.

- i. Conductividad Eléctrica. Este parámetro permite tener una idea directa de la evolución del problema de intrusión salina, ya que está ligado al contenido de sales disueltas presentes en el agua. La realización de perfiles verticales de conductividad eléctrica, considerando un máximo de 5 metros entre cada una de las muestras analizadas, permite identificar y definir la interfase agua dulce -

agua salada, lo cual posibilita el control evolutivo de la penetración tierra adentro de la lengua salina.

Dado el intercambio iónico que se produce en la interfase, los parámetros que presentan mayor importancia de ser controlados periódicamente son:

- ii. Cloruros. Constituye el mejor indicador de la contaminación por intrusión salina, puesto que no sufre alteraciones por la circulación en terreno. No obstante, se debe asegurar que su presencia no procede del terreno o de fugas de acuíferos con aguas salinas antiguas.
- iii. Bicarbonatos. Dado que se presenta en bajas concentraciones en el agua de mar, permite identificar si el mecanismo de salinización proviene de otra fuente o de contaminación marina propiamente tal.
- iv. Sodio. Constituye el ión dominante en acuíferos costeros salinizados, por lo que es necesario tener una medida cuantitativa de la concentración de este parámetro. El principal proceso físico químico en el que se encuentra implicado es el intercambio iónico con el calcio.
- v. Calcio. La interacción que presenta con el ión sodio determina su importancia en el seguimiento del proceso de salinización en acuíferos costeros.
- vi. Magnesio. Pese a no estar involucrado en procesos de intercambio significativos en el fenómeno de salinización, la relación entre el ión calcio y magnesio constituye un índice ampliamente utilizado en el diagnóstico de intrusión salina.
- vii. Temperatura. En casos particulares, los cambios verticales de temperatura en la interfase agua dulce - agua salada reflejan la mayor o menor interacción entre el acuífero y el mar. Debido a la existencia de una anomalía geotermal en la interfase, las aguas menos salinas presentan temperaturas más elevadas, que no se ven afectadas por una influencia marina directa.

Se requiere en estos casos que los puntos de observación sean representativos de las modificaciones que se producen. Captaciones con cribas a lo largo de éstas son adecuadas para reflejar en forma óptima la composición química a la cual se muestrea. El análisis hidrogeoquímico de la zona Los Choros, por lo tanto, debe contemplar la

toma de muestras de agua a diferentes profundidades, verificando que éstas sean lo más representativas del nivel al cual se muestrea. Sin embargo, dada la falta de información respecto a los planos de construcción de las captaciones identificadas, y considerando que el proceso de construcción de éstos es básicamente artesanal, no se puede determinar en forma específica aquellas profundidades relevantes a ser analizadas en cada uno de los puntos de control propuestos. Se cuenta si, con la información de los niveles freáticos de cada uno de los puntos de observación que conforman la red de monitoreo propuesta, presentados en el Anexo 5.2.

6.2.4. Frecuencia de Medición.

En el estudio de acuíferos costeros es difícil fijar en una primera instancia la periodicidad de las mediciones, aunque se debe tener en cuenta que la frecuencia de control es relativa al nivel de explotación del acuífero. Mientras se desarrolle una mayor explotación de los recursos hídricos en el acuífero se hace necesario aumentar la frecuencia de control. Como recomendación, el desarrollo de las campañas en la zona costera de Los Choros, considerando el nivel actual de explotación del acuífero, deberá realizarse, al menos, cada 3 meses.

De acuerdo al nivel de explotación actual que presenta la zona baja del acuífero Los Choros, se deben realizar campañas de mediciones que reflejen las variaciones durante años completos, para así poder determinar la evolución de los parámetros de importancia en el problema de salinización. Las campañas de medición de niveles piezométricos en los puntos que no presenten explotación continua del recurso deberán desarrollarse cada 3 meses; en estaciones en que debido a una explotación más intensa se producen variaciones importantes en el nivel freático, como es el caso de la captación existente en Camping El Oasis y pozo APR del Pueblo Los Choros, se recomienda realizar mediciones de los niveles freáticos semanales. En relación al estudio químico de las muestras extraídas se recomienda realizar 2 análisis completos anualmente, aunque para el caso de cloruros o conductividad eléctrica la frecuencia de

medición deberá ser mayor, contemplando mediciones mensuales de dichos parámetros.

6.2.5. Procedimiento de toma de muestras.

Idealmente, se debiera disponer de piezómetros o pozos con cribas a diferentes profundidades. Si se cuenta con cribas extensas en las captaciones, es preciso comprobar que no existan corrientes verticales que alteren la estratificación de salinidad si el pozo está en reposo. Si la muestra se toma por bombeo, se debe considerar que se representa una mezcla de agua de diferentes profundidades.

La toma de muestras se puede efectuar con un muestreador o bien por bombeo de corta duración en pozos de rejilla corta. Si es factible, este último procedimiento es el más recomendable ya que la muestra representa la porción del acuífero requerida a analizar.

Los muestreadores más frecuentes corresponden a aquellos que bajan abiertos y se cierran a la profundidad deseada mediante un mensajero, Figura 6.2. En el caso de toma de muestras a diferentes profundidades, éstas se deben tomar a profundidades crecientes ya que el instrumento altera la estratificación de la zona por la que ha circulado. El descenso del muestreador se debe realizar lentamente, para evitar el arrastre de aguas de tramos superiores y así tener una muestra representativa de la profundidad deseada.

En forma alternativa a la toma de muestras con este instrumento, si es que se dispone de una mayor tecnología, se pueden realizar registros verticales de salinidad mediante la aplicación de una célula conductivimétrica sumergible calibrada.

Figura 6.2.
Muestreador utilizado en terreno.



Fuente: Elaboración propia.

Como se pudo comprobar en terreno, la mayoría de los pozos revisados presentan construcciones en las que sólo es posible captar agua en el extremo inferior, por lo que la realización de perfiles verticales no es representativa del fenómeno que se estudia. En el caso de las captaciones de tipo noria revisadas, se verificó que la mayoría de éstas no se encontraban habilitadas con tubos o materiales que permitiesen una extracción más tecnificada del recurso, sino que simplemente correspondían a excavaciones en las que la altura de la columna de agua era bastante baja y en consecuencia la realización de perfiles verticales era infactible. En definitiva, no es posible con la infraestructura con que se cuenta actualmente, definir con mayor precisión la morfología de la interfase agua dulce - agua salada y por lo tanto mantener un control completo de la evolución temporal y espacial del problema de intrusión salina.

Pese a la limitación en el procedimiento de toma de muestras, la metodología de muestreo aplicada en terreno consistió en extraer un volumen de agua de 500 c.c. aproximadamente, que permitiese el análisis de los parámetros de interés, teniendo en cuenta que la estratificación de las aguas contenidas en los pozos no era representativa del estado en profundidad del fenómeno en estudio, pero sí permitía el análisis de la evolución local del problema en un plano superficial. De esta forma, el procedimiento realizado en terreno en relación al análisis de muestras de agua subterránea tomadas en diferentes zonas de la lengua salina, permite reconocer la presencia e intensidad del problema en el acuífero.

6.2.6. Seguimiento del problema de Intrusión Salina.

Para adoptar una visión general del problema de intrusión salina y desarrollar las bases que permitan prever la evolución del fenómeno a futuro, es importante contar con los datos asociados a las redes de control piezométrico, de calidad química y de intrusión salina, a lo menos en un período de 5 años.

De esta forma, se impulsa el desarrollo de una metodología que permita monitorear las variaciones de los niveles de salinidad en un acuífero y desarrollar bases de datos que permitan realizar un análisis completo de la evolución de los parámetros relevantes y entregar la información necesaria para enfrentar preventivamente el problema y de esta forma minimizar el riesgo potencial de intrusión salina.

En la etapa de monitoreo de la evolución de la cuña salina, se utilizan las mismas técnicas que en la definición de la morfología de interfase, hidrogeoquímicas, isotópicas, geofísicas y modelos matemáticos, aunque por lo general, las técnicas geofísicas e isotópicas no se utilizan con frecuencia, por su mayor costo económico y a veces, una mayor indeterminación en reflejar con sensibilidad el problema de intrusión salina.

Entre los métodos considerados para caracterizar la composición química de las aguas subterráneas, se encuentran las curvas de isocloruros e isoconductividades, las que constituyen una herramienta eficaz para la comprensión del problema de intrusión salina; los diagramas de Piper también representan un método de caracterización completo ya que permiten identificar las facies hidroquímicas y las principales relaciones iónicas que se dan dentro del sistema subterráneo en estudio. De esta forma, es posible identificar la existencia del problema de intrusión salina y desarrollar un programa inicial de monitoreo en pozos de observación representativos de la zona de interés.

Por último, el empleo de modelos matemáticos es de gran utilidad en el seguimiento de los procesos de intrusión, permitiendo conocer a priori la evolución de los procesos de contaminación marina bajo los diversos escenarios de extracción que posiblemente se presenten en el acuífero. Para una correcta interpretación de los modelos matemáticos, es necesario un completo conocimiento y caracterización de la hidrología, geología e hidrogeología que condicionan el comportamiento del recurso subterráneo.

6.3. Resumen

Una vez diagnosticada la existencia del problema de intrusión salina en la zona costera de Quebrada Los Choros, mediante el análisis químico de los parámetros relevantes involucrados en el fenómeno, y que ha sido presentado en el Capítulo 5 de este informe, se puede concluir la necesidad de implementar un sistema de gestión adecuada de los recursos hídricos, basado en la definición de una red de control que permita monitorear la evolución de los parámetros hidrogeológicos y químicos, de tal forma de interpretar de manera conjunta, el estado de calidad de los recursos hídricos subterráneos con que cuenta la zona baja del acuífero de Quebrada Los Choros.

Pese a las limitaciones que se presentan actualmente para controlar en forma óptima el problema de intrusión salina en Quebrada Los Choros, de igual forma se impulsa el desarrollo de una metodología que permita monitorear las variaciones de los niveles de

salinidad en el acuífero, y de esta forma desarrollar las bases de datos que permitan realizar el análisis de la evolución de los parámetros relevantes para enfrentar preventivamente el problema de intrusión salina.

Se debe tener en cuenta, entonces, que la definición precisa de la morfología de la interfase agua dulce - agua salada que se desarrolla en la zona costera del acuífero no es posible, y por lo tanto el control completo de la evolución temporal y espacial del problema de intrusión salina presenta muchas deficiencias hasta la fecha. Dada la falta de información referente a la geología, hidrogeología y en otro aspecto, los planes de crecimiento demográfico que condicionan el escenario de la zona costera de Quebrada Los Choros, la definición de la red de monitoreo propuesta contempla en primer lugar, la presencia de puntos característicos de la zona, tanto activos como no activos identificados en terreno, y en segundo lugar, la determinación de una red cuya distribución geométrica permitiera abarcar en forma extensa la evolución del aumento de salinización en la zona.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Mediante la revisión de las captaciones en la zona en estudio, se ha podido constatar la existencia de un aumento lento, pero sostenido de las construcciones principalmente en el sector del Llano Los Choros. Por este motivo, el desarrollo turístico y urbano que ha experimentado la zona costera de quebrada Los Choros en los últimos años, y que se espera se intensifique de manera notable en el mediano y largo plazo, conlleva inevitablemente una mayor demanda del recurso hídrico subterráneo, por lo que cobra gran importancia el establecimiento de una gestión adecuada a las explotaciones del acuífero costero, principalmente a causa del riesgo de intrusión salina que se produce en estas zonas.

Pese a presentarse un escenario en el que la extracción de los recursos aún es baja, el establecimiento de un estado de intrusión salina en gran parte del sector costero, determina un alto riesgo potencial ante el aumento de salinización de las aguas, lo que motiva el desarrollo de un estudio que permita evaluar globalmente la vulnerabilidad al problema de salinización, para a futuro desarrollar una explotación que sea sustentable en el tiempo y que asegure en cantidad y calidad el recurso hídrico con que cuenta dicho sector.

El diagnóstico del problema de intrusión salina mediante la utilización de índices hidrogeoquímicos, ha permitido concluir la existencia de un estado de incipiente salinización que se acentúa en mayor grado en el sector occidental del Llano los Choros, zona en la que actualmente no se produce una explotación fuerte de los recursos, pero que en términos preventivos debiese mantenerse bajo control debido a que presenta un mayor grado de riesgo al aumento de salinización de las aguas subterráneas. Mediante el estudio de los fenómenos físico químicos que modifican la calidad del agua, y de las relaciones que se dan entre los parámetros de relevancia en el estudio del aumento de salinización, se ha podido concluir que el origen de la fuente de contaminación de las aguas en la zona costera de Quebrada Los Choros lo

constituye la penetración tierra adentro de la cuña salina, y en bastante menor grado pudiese desarrollarse producto de la infiltración de las aguas utilizadas para riego u otros fenómenos.

Queda de manifiesto entonces, la importancia de la aplicación de técnicas hidrogeoquímicas en el estudio de intrusión salina, pues permite determinar el origen de la salinización y además proporciona las herramientas necesarias para realizar una correcta interpretación frente al desarrollo de la intrusión, por medio del establecimiento de un plan de control y monitoreo respecto de la evolución temporal y espacial del problema.

La evaluación de la situación actual de los recursos hídricos subterráneos en relación a la normativa vigente para usos de agua potable y riego, permite concluir que una gran porción de la zona costera del acuífero de Quebrada Los Choros presenta limitaciones para dichos usos. Por lo tanto, la implementación de una red de monitoreo que permita controlar el problema se traduce en una necesidad de mantener estándares óptimos en la calidad de los recursos subterráneos con que se cuenta.

Debido a la vulnerabilidad al problema de intrusión salina en la zona costera de quebrada Los Choros, el desarrollo e implementación de una red de monitoreo que permita evaluar el estado de avance de la interfase agua dulce - agua salada, se plantea como la solución óptima en este caso.

De esta forma, a partir de los datos suministrados por las redes de control piezométrico y de calidad química que se propone instalar en la zona costera de quebrada Los Choros, se pretende analizar el progreso temporal del estado de intrusión salina, obteniendo una visión general sobre la evolución y desarrollo reciente del proceso, así como también una estimación sobre su previsible comportamiento futuro, mediante la comparación de la situación actual versus la situación previsible dado los niveles de explotación que se presenten en el acuífero.

El objetivo de la implementación de un sistema de monitoreo consiste en procurar que el nivel de explotación del acuífero no provoque la inversión de los gradientes hidráulicos y por lo tanto la entrada de la interfase salina en el acuífero, principalmente cuando la extracción del recurso se realiza en condiciones de niveles piezométricos bajos y el grado de afección a la calidad del agua aumenta considerablemente.

Se plantea que para el éxito en el programa de monitoreo se deben realizar mediciones que representen el avance del fenómeno en un período no menor a 5 años, para poder determinar en el tiempo la mejor alternativa de aplicación dependiendo del acuífero que se presente a controlar.

Posteriormente, en la etapa de gestión de los recursos hídricos, la determinación de modelos matemáticos que faciliten la interpretación y predicción de la intrusión adquiere gran importancia, de tal forma que permitan reflejar con mayor claridad el problema de intrusión salina.

Actualmente, se han desarrollado softwares que permiten modelar el problema de intrusión salina bajo un esquema de resolución de densidad variable y mediante el método de aproximación numérica basada en diferencias finitas en el espacio tridimensional. Dentro de dichas técnicas computacionales que se han implementado para prever la evolución del problema bajo diversas condiciones de explotación de los acuíferos, se cuenta actualmente con programas que permiten resolver el modelo numéricamente, considerando un problema de flujo de aguas subterráneas en conjunto con otro de transporte de contaminantes. El objetivo de la modelación es representar el efecto que tiene la explotación de pozos profundos y norias sobre la cuña de intrusión salina, y la elaboración de planes de manejo que eviten o reduzcan los problemas de intrusión salina en el futuro. Existen numerosos softwares comerciales capaces de resolver dicho problema, aunque en forma independiente, lo que conlleva a la obtención de soluciones poco adecuadas para el problema, ya que al tratarse de un problema de densidad variable, el contenido de cloruros afecta a la densidad del agua salada.

Uno de los softwares que permite modelar el problema de intrusión salina es SEAWAT, basado en el método de diferencias finitas en el espacio tridimensional del flujo de agua subterránea con densidad variable. Este programa se basa en MODFLOW-88 y una versión antigua de MT3DMS. Pese a no ser una herramienta potente en la resolución del problema, el hecho de presentar una interfaz similar a MODFLOW la hace más familiar al usuario.

En resumen, dentro de la gestión y planificación de los acuíferos contaminados, destacan los estudios de control y seguimiento del problema, cuyo objetivo principal es establecer una red de monitoreo que permita mantener un control del problema en base a muestreos periódicos, basándose en la implementación de técnicas de interpretación de datos adecuados y que sean representativos de las características del fenómeno de intrusión salina.

7.2. Recomendaciones

En relación a los estudios asociados al área de geofísica, geología, hidrología e hidrogeología en la zona costera de quebrada Los Choros, se puede mencionar que existe un gran vacío en cuanto a la información generada que permita caracterizar en forma completa la zona en estudio.

Entre los aspectos geológicos necesarios de estudiar se encuentra principalmente la estratigrafía de la zona, para lo cual se recomienda la realización de sondajes eléctricos verticales que posibiliten la elaboración de mapas en detalle y posteriormente permitan un estudio globalizado del acuífero.

En relación a la hidrología de la zona, se recomienda intensificar los estudios en esta área, principalmente en lo referido a una mayor cuantificación y control del régimen pluviométrico, pues este factor condiciona en gran parte el aporte de agua dulce al acuífero y por lo tanto la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo. Adicionalmente, la cuantificación de las aguas superficiales que se infiltran y conforman el relleno

principal del acuífero, los retornos de riego y descarga subterránea al mar, son también parámetros relevantes para una interpretación posterior adecuada del problema de intrusión salina.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el conocimiento de parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica, transmisividad y capacidad de almacenamiento son relevantes en la caracterización y mayor comprensión del comportamiento del recurso subterráneo.

Así, una vez conocidas con suficiente precisión las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero costero en estudio, será posible la identificación y seguimiento del problema de intrusión salina, basados en el diseño de un programa de monitoreo que permita realizar una interpretación conjunta global.

Se pone de manifiesto la necesidad de un estudio hidrogeoquímico más completo que permita llegar a conclusiones definitivas respecto al origen de la salinización que se manifiesta en el sector costero de quebrada Los Choros.

Como comentario a la situación que se presenta en terreno, se puede determinar que existe una gran carencia en la infraestructura posible de adoptar para monitorear el problema en forma óptima. Esto, principalmente debido a deficiencias en el proceso de construcción de las captaciones existentes, constituyendo una limitante en la realización de mediciones acordes a lo requerido. Actualmente, la gran mayoría de las captaciones identificadas correspondientes a pozos, sólo pueden extraer agua del extremo inferior, y en el caso de las captaciones de tipo noria, éstas son muy bajas, por lo que la realización de procedimientos de gran importancia como lo son la ejecución de perfiles verticales o muestras a profundidades específicas no es posible. Como se mencionó en el capítulo 6, el diseño de la red de control debe desarrollarse considerando un conjunto de pozos de observación que presenten características similares, es decir, que se encuentren habilitadas para tomar muestras a la misma profundidad de tal forma de reflejar el problema en forma adecuada y a la profundidad requerida. Por lo tanto, en vista de la gran insuficiencia que se presenta en este aspecto, y que es de gran

relevancia en el establecimiento de una red de monitoreo, se propone la realización de un mayor desarrollo futuro en este aspecto, de tal forma de reflejar en forma consistente la evolución del problema.

En vista de que se presentan altos contenidos salinos en la zona alta del Llano los Choros, se propone ampliar la zona de monitoreo propuesta, con el fin de evaluar el problema en una zona de mayor extensión. Sin embargo, la necesidad de construir puntos de observación adecuados para monitorear en forma óptima la evolución del problema de intrusión salina se encuentra limitado producto de los altos costos económicos que implica la creación de captaciones en zonas que presentan mayor aislamiento y un menor desarrollo urbano. El uso de punteras se descarta en esta zona puesto que el nivel freático se encuentra a una profundidad mayor a la que estas instalaciones pueden alcanzar, correspondiente a los 10 metros de profundidad.

Otro punto importante a destacar lo constituye la falta de información que permite caracterizar en forma concreta el mecanismo de flujo subterráneo que se desarrolla en la zona baja del acuífero, esto es, contar con los datos de niveles piezométricos en cada una de las captaciones escogidas como punto de observación, que posibiliten la realización de mapas de flujo equipotencial de tal forma de poder caracterizar el mecanismo de flujo y por lo tanto la forma en que la recarga se produce en el acuífero. Pese a contar con un altímetro en terreno, la alta sensibilidad a variaciones en la presión atmosférica de dicho equipo, le otorgan muy poca precisión cuando se presentan inestabilidades climáticas, como pudo corroborarse durante la campaña realizada en septiembre, y período en el cual se produjeron precipitaciones en la zona. Por esta razón, en forma alternativa a la utilización de un altímetro, el uso de un equipo con tecnología GPS diferencial, caracterizado por presentar una mayor precisión y estabilidad en sus resultados, otorga una mayor confiabilidad en la obtención de dichos resultados.

8. REFERENCIAS

- **ARAVENA FERNANDEZ, S.** Hidrogeología y Evaluación del Riesgo de Intrusión Salina en las Cuencas del Sector de Tongoy. Memoria de Título. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 1997.
- **BENAVENTE, J., CALAVACHE, A., FERNÁNDEZ-RUBIO, R., PULIDO, A.** Calidad de las Aguas Subterráneas en los Acuíferos Costeros de la Provincia de Granada. Jornada de Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas en España. Barcelona, 1981.
- **BUTLER, J., GARNETT, E.** Simple Procedures for Analysis of Slug Tests in Formations of High Hydraulic Conductivity using Spreadsheet and Scientific Graphics Software. Kansas Geological Survey Open-File Rep. 2000-40. 2000.
- **BUTLER, J., GARNETT, E., HEALEY, J.** Analysis of Slug Tests in Formations of High Hydraulic Conductivity. Ground Water 41, N° 5. p.620-630. 2003.
- **CASTILLO PÉREZ, E., MORELL EVANGELISTA, I.** La Hidroquímica en los Estudios de Intrusión Marina en los Acuíferos Españoles. TIAC'88. TECNOLOGIA DE LA INTRUSION EN ACUIFEROS COSTEROS. Almuñécar (Granada, España). 1988.
- **CONAMA.** Norma Chilena Oficial 409/1. Of. 1984. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Agua Potable. Parte 1: Requisitos.
- **CONAMA.** Norma Chilena Oficial 1333. Of. 1978. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos. Requisitos de Agua para Riego.
- **CUSTODIO, E.** Evaluación y Causas de la Contaminación por Invasión Marina en los Acuíferos de la Costa Peninsular y en sus Áreas Insulares. Jornada de Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas en España. Barcelona, 1981.
- **CUSTODIO, E., LLAMAS, MANUEL R.** Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Segunda Edición Corregida. Barcelona, 1996.

- **DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.** Evaluación de los Recursos Subterráneos de las Cuencas Costeras de la V Región, Informe Técnico. Gobierno de Chile.
- **DEPARTAMENTO DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.** Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada Los Choros, IV Región, S.D.T. N°184. 2004.
- **DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.** Modelo de Simulación Quebrada Los Choros. Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IV Región de Coquimbo, S.I.T. N°96. 2004.
- **DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS.** Modelación Hidrogeológica en Quebrada Los Choros, Comuna La Higuera, IV Región, S.I.T. N°106. 2005.
- **ENAMI, IV Región.** Hidrogeología Preliminar Comuna La Higuera. Marzo 1995.
- **ESPINOZA, C.** Apuntes Curso “Hidráulica de Aguas Subterráneas y su Aprovechamiento”. Departamento de Ingeniería Civil, División Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile.
- **INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS.** Estudio Geoeléctrico en la zona Los Choros, Región de Coquimbo. Junio 1968.
- **LLOYD, J. W., TELLAM, J. H.** Caracterización Hidroquímica de las Aguas Subterráneas en Áreas Costeras. TIAC'88. TECNOLOGIA DE LA INTRUSION EN ACUIFEROS COSTEROS. Almuñécar (Granada, España). 1988.
- **LÓPEZ GETA, J., DE LA ORDEN, J., GÓMEZ, J., RAMOS, G., MEJÍAS, M., RODRÍGUEZ, L.** Tecnología de la Intrusión de Mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos. Tomo 1. Alicante, España. Marzo 2003.
- **LÓPEZ, J. A.; MENA, J. M.** Aspectos metodológicos en el estudio de la intrusión salina. Tecnología de la Intrusión de Mar en acuíferos costeros: Países Mediterráneos. Tomo 1. Alicante, España. 1998.

- **MORALES MONTAÑO, M., CASTILLO GURROLA, J.** Generalidades de los Métodos Geofísicos Aplicados a la Geohidrología. Quinto Seminario de Acuíferos Costeros de Sonora. Hermosillo, Sonora. México. 2000.

- **MOSCOSO, R., NASI, C., SALINAS, P.** Hoja Vallenar y parte norte de La Serena. SERNAGEOMIN. Escala 1:250.000. 100 p. 1 mapa. 1982.

- **PERALTA, F., DIAZ, G., WOOD, G.** Hidrogeología de la Quebrada de Los Choros: Informe Preliminar. CORFO. 1971.

- **SAENZ, M.** Hidrogeología sector medio Quebrada Los Choros y su tributario Quebrada Los Choros altos, Comuna de La Higuera, IV Región. Memoria de Título, Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2004.

- **SANCHA, ANA M., CASTILLO, G., ESPINOZA, C., MENA, M. PÍA.** Criterios de Calidad de Aguas o Efluentes Tratados para Usos en Riego. SAG – Universidad de Chile. 2005.

- **TODD, D., and L. MAYS.** Groundwater Hydrology. Wiley. 2005.

- **VARGAS PAYSSEN, J.,** Análisis y Modelación Numérica del Problema de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros. Memoria de Título. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 1992.

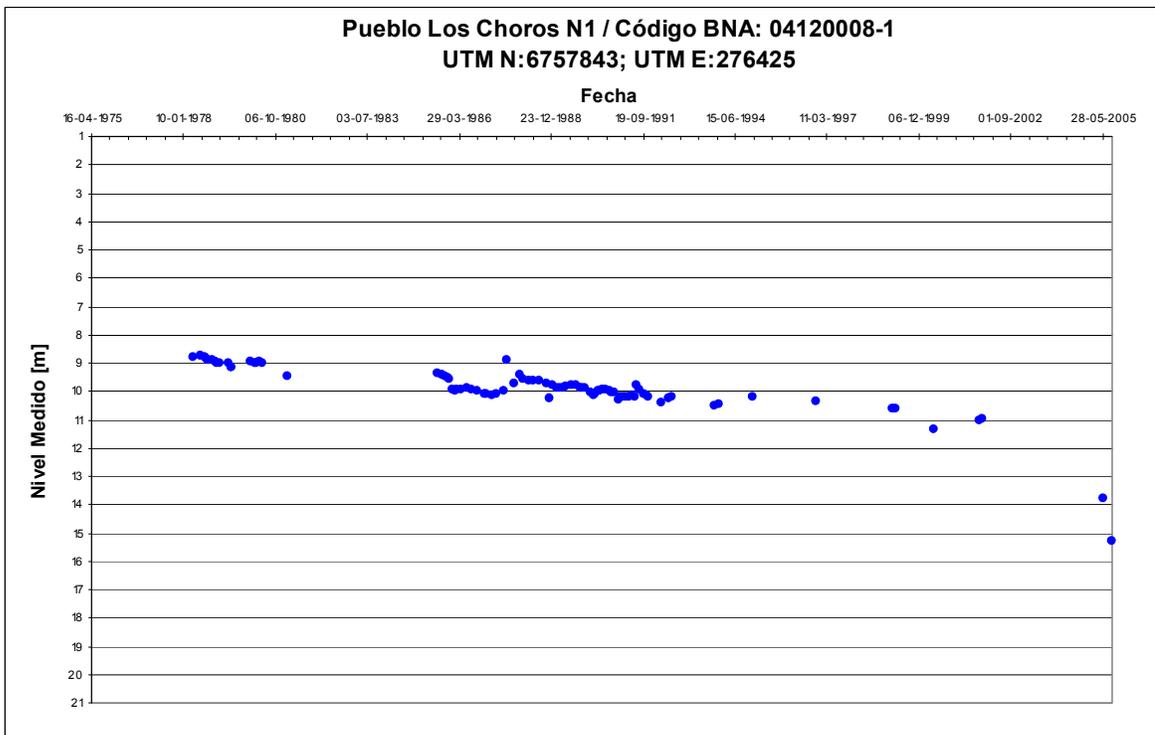
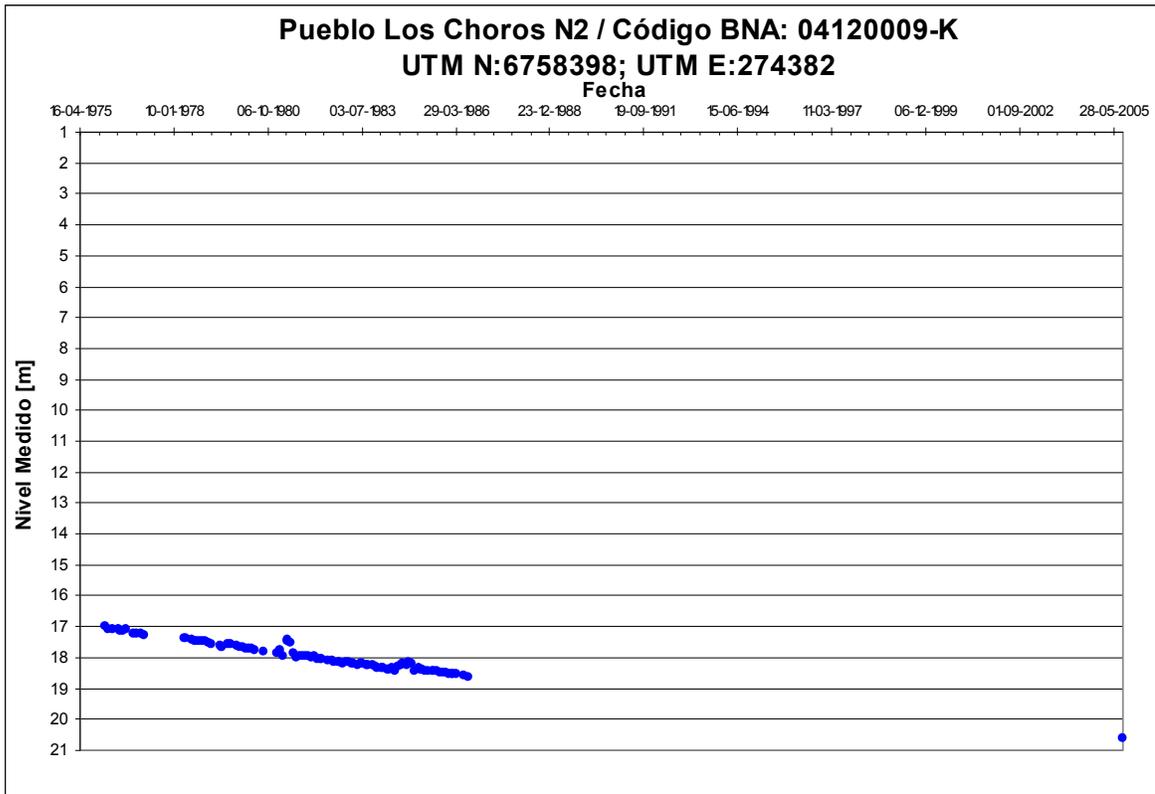
- **ZURBUCHEN, B., ZLOTNIK, V., BUTLER, J.** 2002. Dynamic interpretation of slug tests in highly permeable aquifers. Water Research Resources 38, N° 3: 10.1029/2001WR000354.

ANEXOS

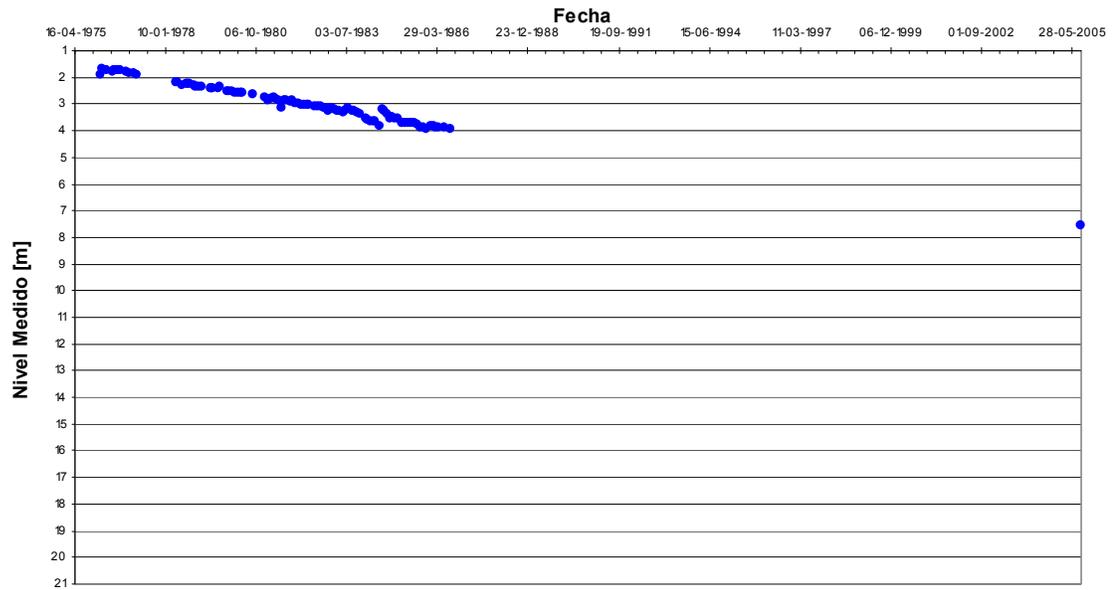
ANEXO 4.1

NIVELES DE AGUA SUBTERRÁNEA EN CAPTACIONES DEL SECTOR COSTA ACUÍFERO QUEBRADA LOS CHOROS.

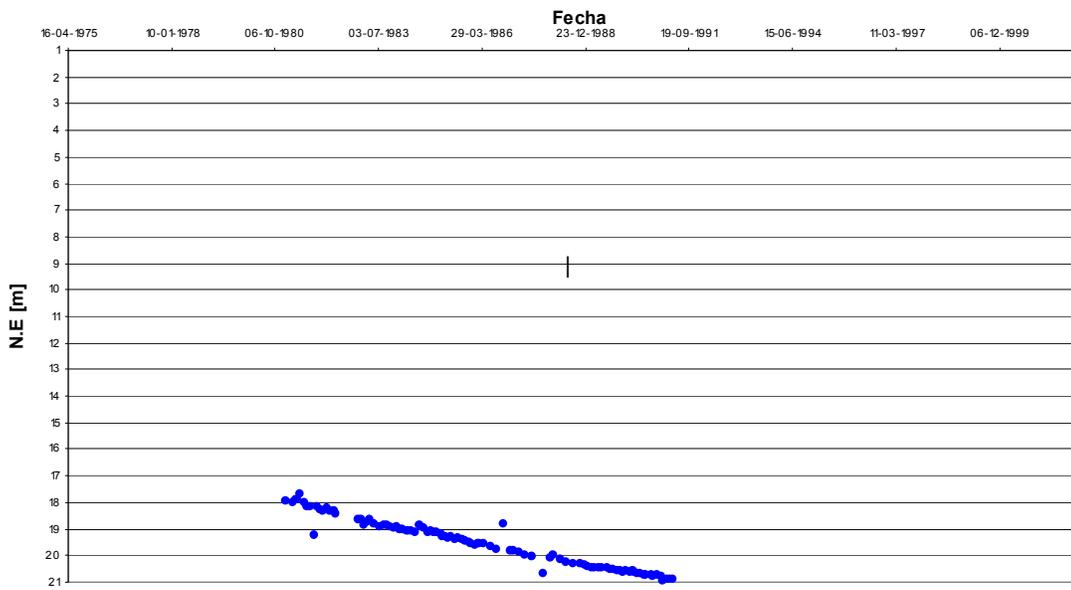
A.4.1. Niveles Estáticos Red de Observación BNA, DGA.



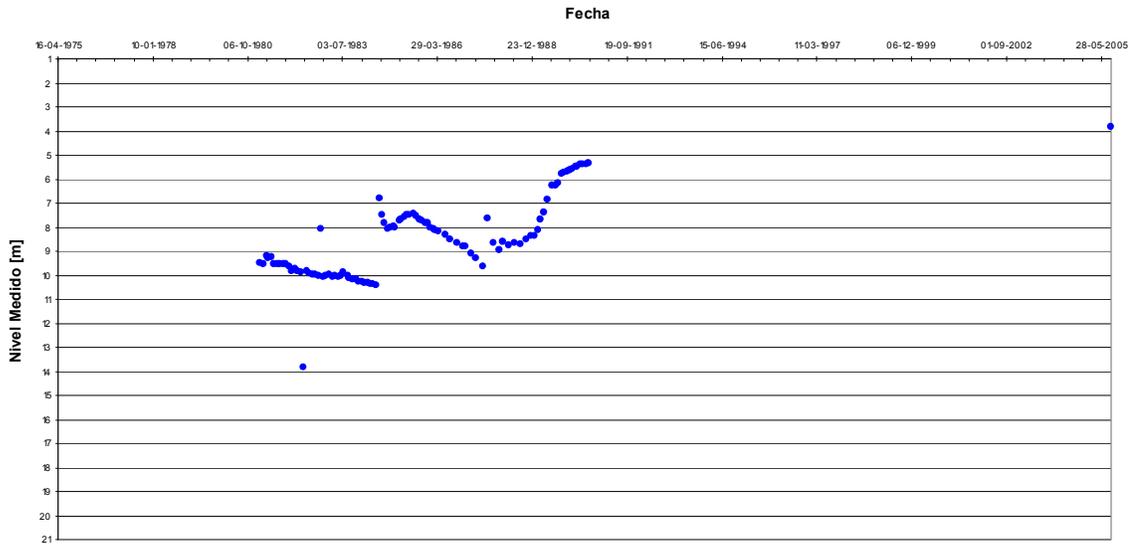
Los Choros N1 / Código BNA: 04120006-5
UTM N:6757610; UTM E:276523



Ang. Qda. Los Choros N2 / Código BNA: 04120010-3
UTM N:6756015; UTM E:278102



El Tofo 5/ Código BNA: 04120007-3
UTM N: 6751882; UTM E: 291358



ANEXO 5.1

DESCRIPCIÓN Y DETALLE DE LA CAMPAÑA DE TERRENO Nº 1.

A.5.1. CAMPAÑA DE TERRENO 1

El presente informe anexo resume el trabajo realizado durante la primera campaña de terreno asociada al presente estudio, en relación al desarrollo de un Programa de Estudio de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros, el cual se ha llevado a cabo durante los días 24 al 26 de Mayo de 2005, en las localidades de Los Choros Bajos y Punta de Choros, IV Región de Coquimbo.

Esta primera campaña de reconocimiento de la zona de estudio, busca establecer un marco general para el desarrollo del trabajo, identificando las características tanto geográficas, geológicas e hidrogeológicas de la zona, en conjunto con un reconocimiento de las captaciones existentes.

A.5.1.1. Objetivos

- Revisión de pozos y norias existentes en la zona, su ubicación y estado.
- Toma de muestras para realizar un análisis químico de los parámetros relevantes en la determinación de la existencia de intrusión salina.
- Revisión y recopilación de antecedentes en la zona, dentro de los que se cuentan estudios anteriores y pruebas de carácter hidrogeológico a fin de caracterizar el acuífero en estudio. Paratal efecto, se cuenta adicionalmente a la obtenida en Santiago, la información disponible en la oficina regional de la Dirección General de Aguas, con sede en la ciudad de La Serena.

A.5.1.2. Metodología

- Recopilación y revisión de material existente: cartografía (IGM), mapa geológico, fotografías aéreas, catastro de pozos (DGA Santiago y La Serena) y material existente en organismos públicos (DGA) o Universidades.
- Revisión en terreno de los pozos y norias. Determinar la factibilidad de realizar pruebas hidrogeológicas a futuro que permitan conocer algunas propiedades del acuífero en aquellas zonas donde no se cuenta con información.

A.5.1.3. Información Existente

- Cartografía: El Instituto Geográfico Militar dispone de cartografía de la zona a escala 1:50.000 o mayor. Las cuadrículas que comprenden el área de estudio son Carrizalillo, Cruz Grande, Incahuasi y El Tofo.
- Mapa Geológico: La geología de la zona es descrita en la hoja Vallenar y parte norte de La Serena: Regiones de Atacama y Coquimbo, escala 1:250.000, Moscoso D., Ramón; Nasi P., Carlo; Salinas Z., Patricia, realizada por el Instituto de Investigaciones Geológicas, 1982.
- Catastro de pozos: La información relativa a pozos existentes y a las pruebas desarrolladas con anterioridad en la zona deben ser analizadas en una etapa anterior a la visita a terreno, con el fin de evaluar la confiabilidad en los datos proporcionados por otros organismos. Dicha información es proporcionada principalmente por la DGA (Santiago y La Serena).

Otros Trabajos: Entre los estudios anteriores hechos en la zona se encuentran:

- Departamento de Estudios y Planificación, D.G.A. Septiembre 2004. Modelo de Simulación Quebrada Los Choros. “Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IV Región de Coquimbo” *S.I.T. N°96*.
- Departamento de Administración de Recursos Hídricos, D.G.A. Noviembre 2004. “Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Quebrada Los Choros, IV Región”. *S.D.T. N°184*.
- Departamento de Estudios y Planificación, DGA. “Modelación Hidrogeológica en Quebrada Los Choros, Comuna La Higuera, IV Región”, S.I.T. N°106,
- ENAMI, IV Región. Marzo 1995. “Hidrogeología Preliminar Comuna La Higuera”.
- Instituto de Investigaciones Geológicas. Junio 1968. “Estudio Geoeléctrico en la zona Los Choros”, Región de Coquimbo.

A.5.1.4. Revisión en Terreno de Pozos y Norias

En esta primera campaña de revisión, se encontró un total de 8 pozos y 3 norias, de las cuales se determinó su estado y ubicación, características de la captación y niveles de agua subterránea. De aquellas captaciones habilitadas para poder extraer muestras de agua, se extrajeron muestras para ser enviadas a un posterior análisis físico químico. Por medio de conversaciones con lugareños, se obtuvo información de numerosas captaciones existentes en la zona y que serán motivo de una inspección posterior.

Entre los datos que no se midieron en terreno en esta ocasión, se encuentra la cota de los pozos, debido a que no había un instrumento que permitiera medir este parámetro con suficiente precisión. Por lo tanto, se identifica el uso de un altímetro para la salida a terreno siguiente.

En tres de los pozos o norias revisados se podría hacer pruebas de tipo Slug-Test, esto sin contar los lugares en que se podría ocupar la misma bomba que poseen los mismos pozos. Pese a que no se cuenta con la información estratigráfica de los pozos construidos, se observa la posibilidad de realizar perfiles de conductividad eléctrica en

la vertical y que pudieran caracterizar el fenómeno de intrusión salina a profundidades mayores.

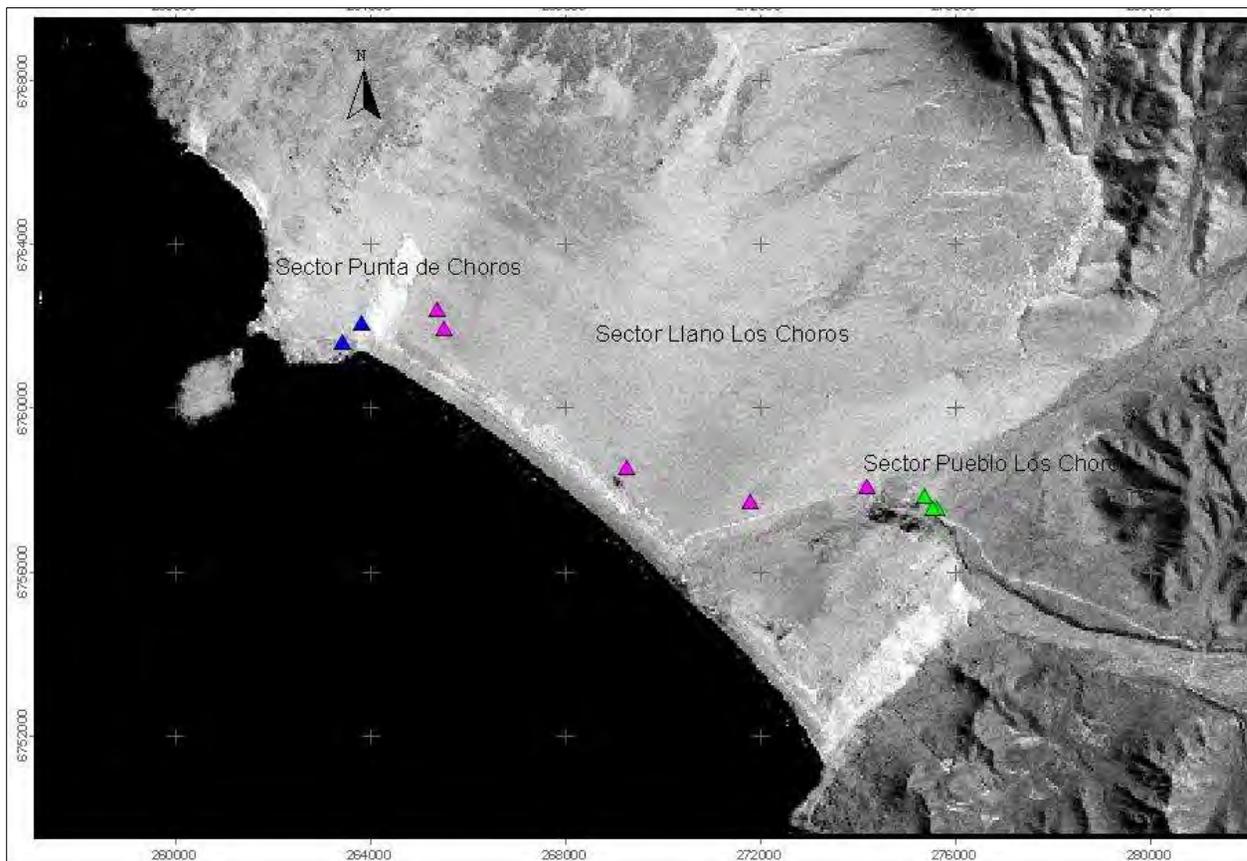
Los pozos y norias muestreados en esta visita a terreno, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla A.5.1.1. Puntos muestreados en terreno.

N°	Nombre	Coordenadas [UTM]		N.E.	N.D.	Profundidad
		E	N	[m]	[m]	[m]
1	APR Los Choros	276418	6757843	-	13.76	
2	Pozo Comité de Riego	276712	6757544	4.68		
3	Noria Comité de Riego	276624	6757560	5.91		
4	APR Punta Choros 1	275019	6758081	-	26.08	
5	APR Punta Choros 2	269704	6757570	-		
6	Pozo Camino a Punta Choros	264586	6762430	9.96		21.70
7	Pozo Antonio Soler	262311	6761623	9.02		
8	Noria Las Cabras	262782	6762065	4.02		4.27
9	Pozo Camino a Punta Choros 2	264762	6761952	7.24		33.30
10	Noria Camping El Oasis	269203	6758547	5.57		7.60
11	Pozo Caseta Azul	272203	6757705	-		
12	Pozo Munizaga(*)	260757	6765003	-		

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen siguiente se presenta un mapa simplificado de la zona, identificando los puntos muestreados y los resultados del análisis físico químico realizado in situ. Dentro de los parámetros analizados en terreno, se tienen pH, conductividad eléctrica y temperatura, medidos con un equipo multiparámetro modelo Multi 340i, de la empresa WTW, cuyo representante en Chile es Merck S.A.



Nombre	Coordenadas [UTM]		N.E.	N.D.	Profundidad [m]
	E	N	[m]	[m]	
APR Los Choros	276418	6757843	-	13.76	
Pozo Comité de Riego	276712	6757544	4.68		
Noria Comité de Riego	276624	6757560	5.91		
APR Punta Choros 1	275019	6758081	-	26.08	
APR Punta Choros 2	269704	6757570	-		
Pozo Camino a Punta Choros	264586	6762430	9.96		21.70
Pozo Antonio Soler	262311	6761623	9.02		
Noria Las Cabras	262782	6762065	4.02		4.27
Pozo Camino a Punta Choros 2	264762	6761952	7.24		33.30
Noria Camping El Oasis	269203	6758547	5.57		7.60
Pozo Caseta Azul	272203	6757705	-		
Pozo Munizaga(*)	260757	6765003	-		

Figura A.5.1.1. Distribución de Pozos identificados en terreno.

A.5.1.5. Caracterización de los puntos visitados.

Dentro de los puntos muestreados en la visita a terreno, se encuentran aquellos que fueron posibles de identificar en una primera oportunidad de estadía en la zona de estudio.

Como comentario a la toma de datos con el GPS utilizado en terreno, es importante mencionar que las mediciones fueron realizadas considerando el Datum WGS 84, el cual difiere del mayoritariamente usado en Chile, PSAD 56. Para modificar estos valores se realiza la siguiente conversión:

$$\text{UTM [E] PSAD 56} = \text{UTM [E] WGS 84} + 200$$

$$\text{UTM [N] PSAD 56} = \text{UTM [N] WGS 84} + 334$$

La siguiente figura muestra la identificación de los pozos y norias vistos en terreno. Luego se presentan las características de cada una de las captaciones.

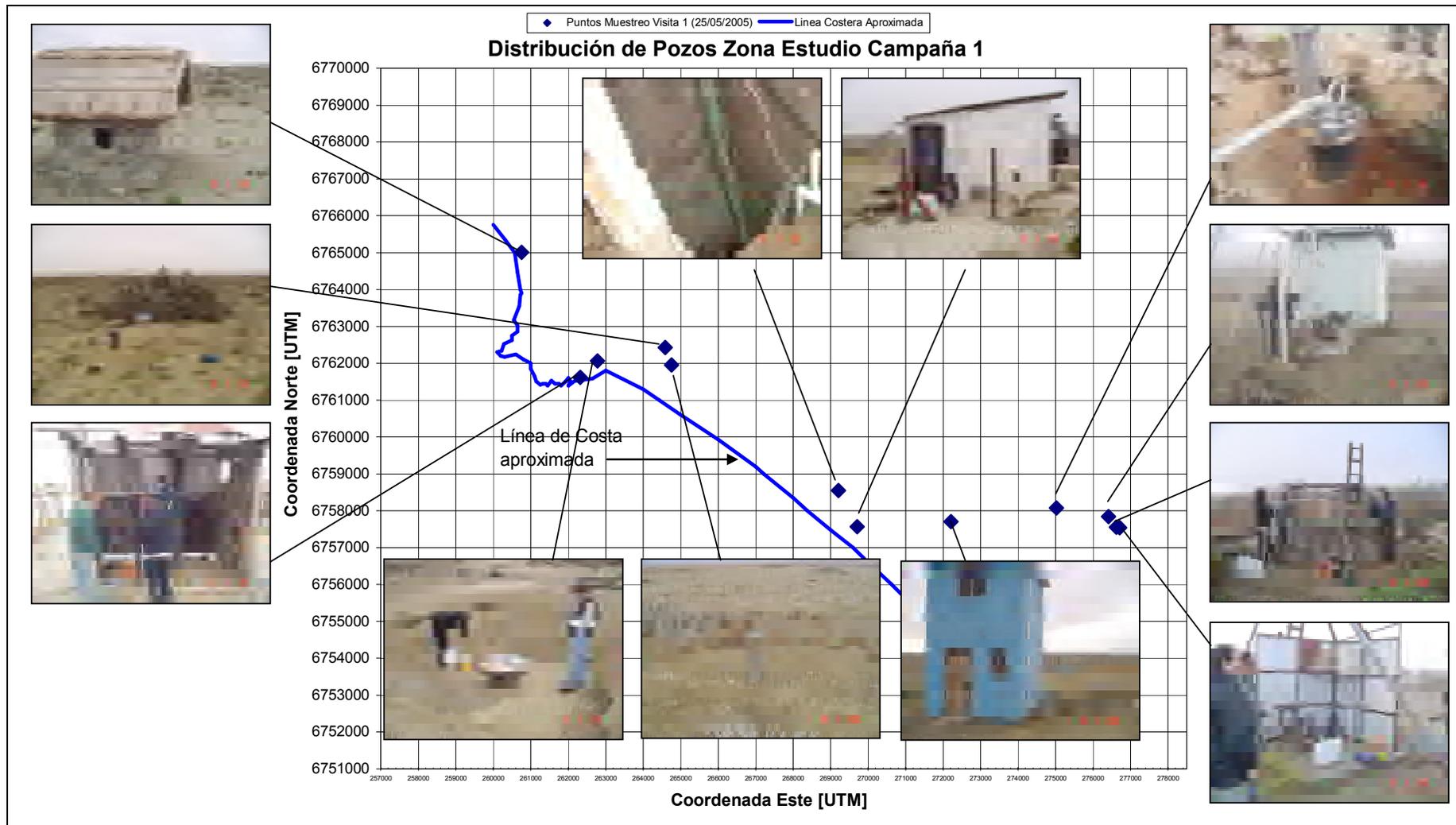


Figura A.5.1.2. Identificación de Pozos campaña 1.



Pozo APR Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6757843; E: 276418

N.D: 13.76 [m] ; Qext: 2[l/s]

pH: 8.01

T[°C]: 19.5

Cond. Elec: 1.76 [mS/cm]

25 - 5 - 2005

Figura A.5.1.3. Pozo APR, Los Choros Bajos.



Pozo Comité Riego #1

- Coordenadas UTM:

N: 6757544; E: 276712

N.E: 4.68 [m]

Tope Pozo: 20.7 [m]

25 - 5 - 2005

Figura A.5.1.4. Pozo Comité Riego Los Choros #1.



Figura A.5.1.5. Noria Comité Riego Los Choros #2.



Figura A.5.1.6. Pozo APR Punta de Choros #1.



Figura A.5.1.7. Pozo APR Punta de Choros #2.

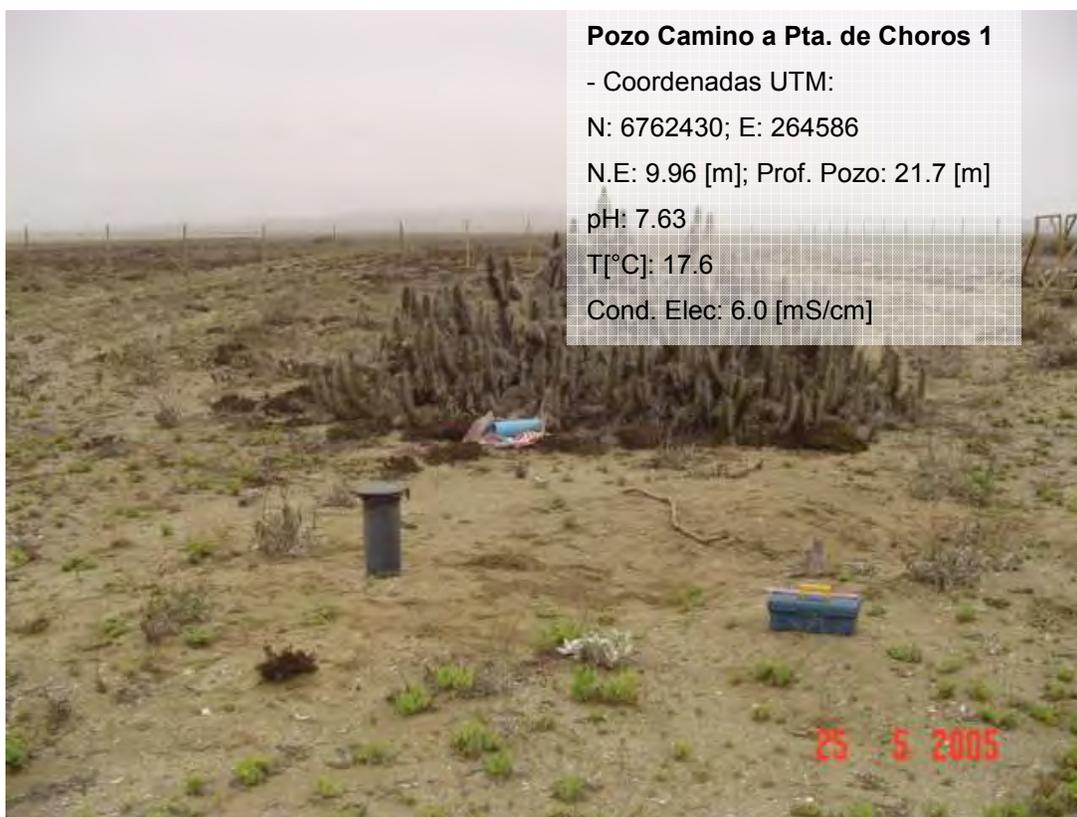


Figura A.5.1.8. Pozo Camino a Punta de Choros.



Figura A.5.1.9. Pozo Camino a Punta de Choros.



Figura A.5.1.10. Noria Las Cabras.

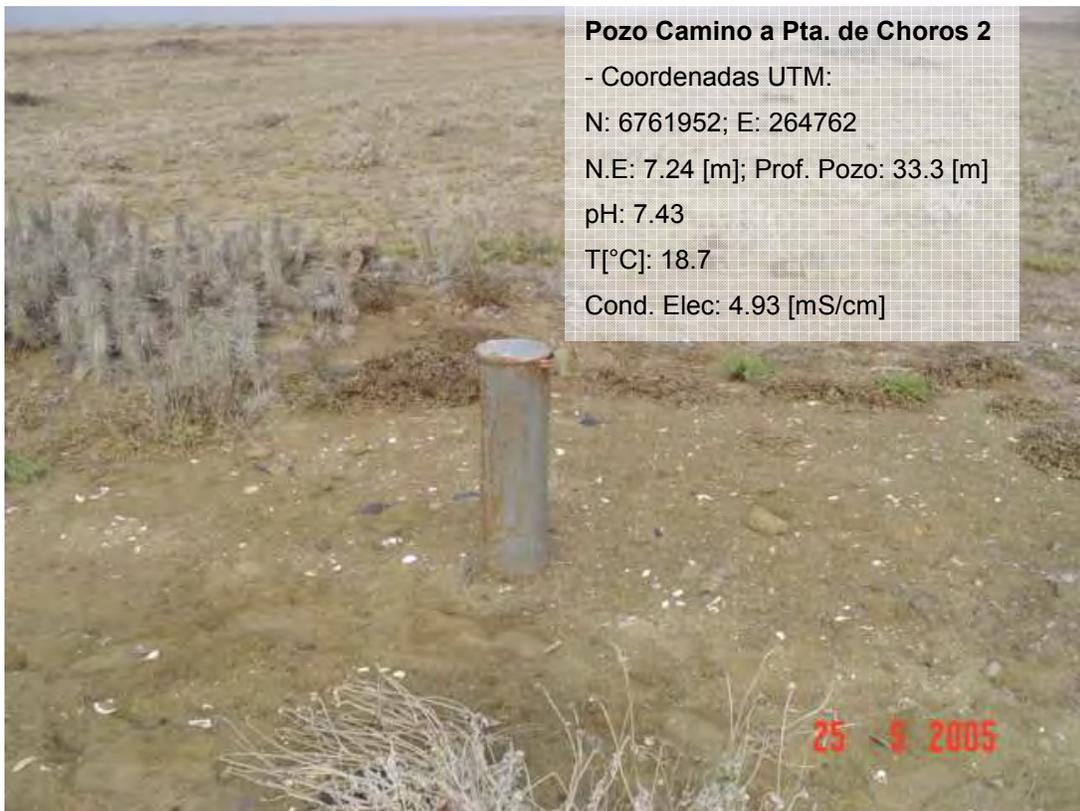


Figura A.5.1.11. Pozo Camino a Punta de Choros.

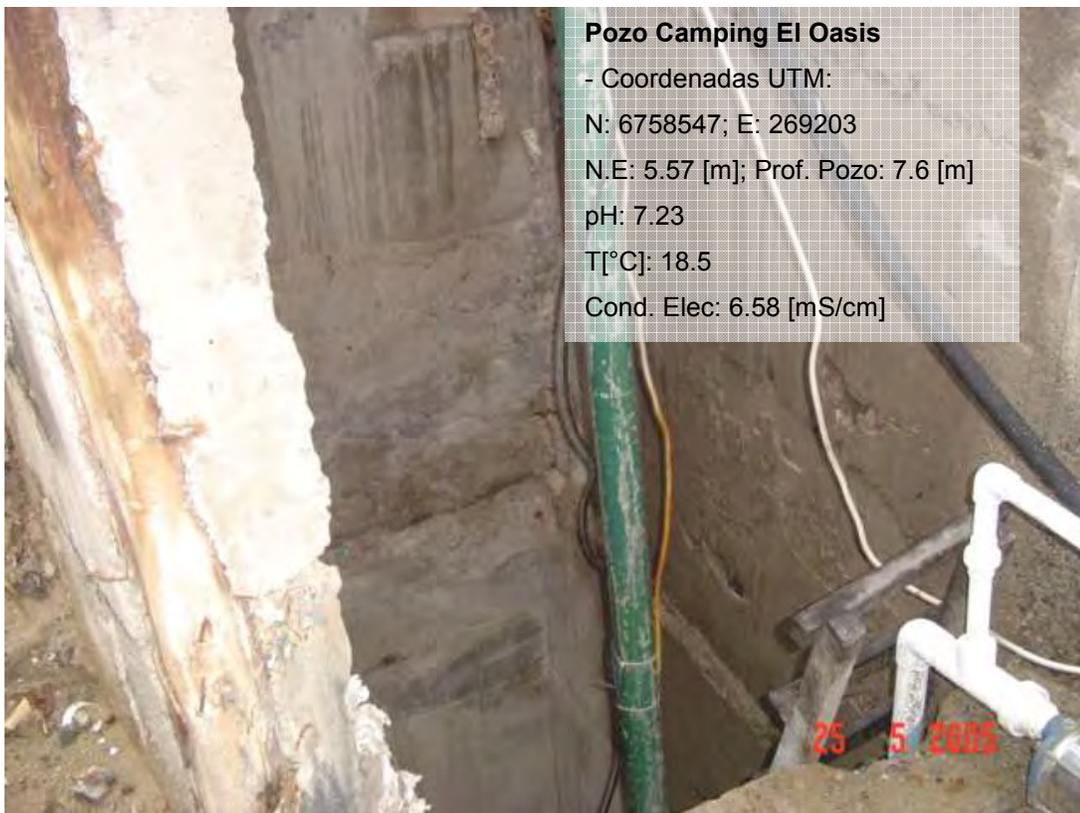


Figura A.5.1.12. Pozo Camping El Oasis.



Figura A.5.1.13. Pozo Caseta Azul.



Figura A.5.1.14. Pozo Casa Familia Munizaga.

A.5.1.6. Comentarios y Recomendaciones

El pozo APR Punta de Choros #2, cuyas coordenadas geográficas son UTM Norte: 6757570 y UTM Este: 269704, no representa un punto de extracción sino que corresponde a un punto de impulsión del agua potable que alimenta a dicho lugar, por lo que se descarta de estudios posteriores.

El último pozo especificado en este informe anexo, Pozo Familia Munizaga, no se considera para efectos del estudio de la red de monitoreo, puesto que se encuentra distante de la zona de estudio de interés y porque posiblemente tenga como fuente de extracción otro acuífero al que se estudia en este caso.

ANEXO 5.2

DESCRIPCIÓN Y DETALLE DE LA CAMPAÑA DE TERRENO Nº 2.

A.5.2. CAMPAÑA DE TERRENO 2

El presente informe anexo resume el trabajo realizado durante la segunda campaña de terreno asociada al presente estudio, en relación al desarrollo de un Programa de Estudio de Intrusión Salina en Acuíferos Costeros, el cual se ha llevado a cabo durante los días 29 de Agosto al 02 de Septiembre del 2005, en las localidades de Los Choros Bajos y Punta de Choros, IV Región de Coquimbo.

La zona de estudio, se ha considerado por simplicidad como un cuadrilátero que comprende desde el Pueblo Los Choros hacia la Costa, aunque dista de presentar dicha forma geométrica realmente. La zona está delimitada por las siguientes coordenadas, referidas al Datum PSAD 56, Huso 19:

Norte [UTM]: 6753000 – 6770000.

Este [UTM]: 257000 – 278000.

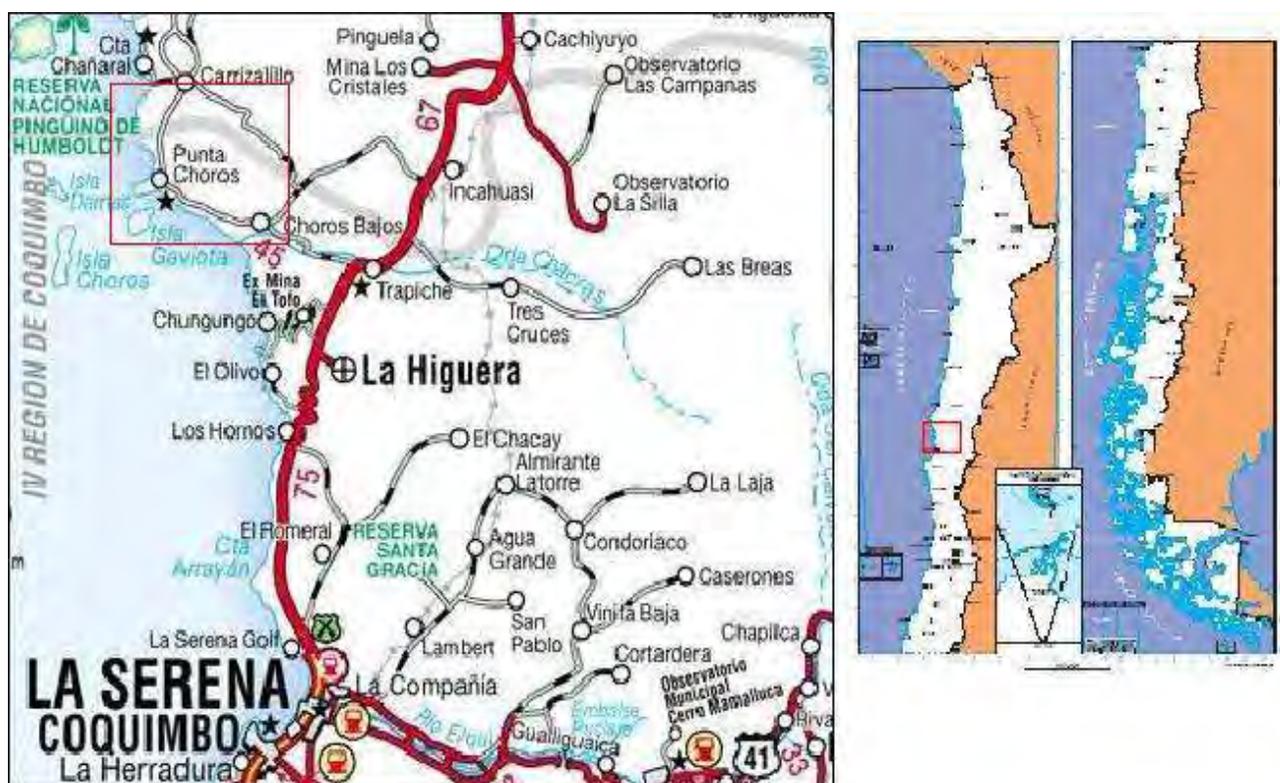


Figura A.5.2.1. Delimitación Zona de estudio.

Una vez identificada en forma preliminar la zona baja de Quebrada Los Choros durante la visita hecha en Mayo, y habiendo revisado material existente en relación a las características hidrogeológicas y la situación de los recursos hídricos en el sector, la segunda campaña tiene como objetivo principal identificar en forma extensa las captaciones existentes en la zona, de tal forma de determinar aquellos puntos de control que conformarán la red de monitoreo que se propone para evitar el avance del problema de intrusión salina.

La finalidad de contar con la totalidad de la información de pozos o norias existentes, es determinar la red de monitoreo del problema de intrusión salina, definiendo la necesidad de ampliar la red existente mediante la ubicación de punteras que posibiliten el monitoreo exhaustivo de la evolución del fenómeno intrusivo.

A.5.2.1. Objetivos

- Revisión extensa de pozos y norias existentes en la zona, su ubicación y estado.
- Toma de muestras para realizar un análisis químico de los parámetros relevantes en la determinación de la existencia de intrusión salina.
- Realización de pruebas tipo Slug-Test en aquellos puntos en que no se cuenta con información de tipo hidrogeológica, con el fin de caracterizar la zona del acuífero más vulnerable a desarrollar una intrusión salina.

A.5.2.2. Metodología

- En base a la información recopilada en forma anterior, se han identificado las captaciones que revisten de importancia para ser visitadas, lo cual permite un reconocimiento más ordenado de aquellos puntos de interés.
- Revisión en terreno de pozos y norias. En conjunto con el reconocimiento de los puntos en terreno, se desarrolla el proceso de toma de muestras y análisis de parámetros físico químico in situ.
- Realización de pruebas hidrogeológicas que permitan conocer propiedades elásticas del acuífero en aquellas zonas donde no se cuenta con información de este tipo.

A.5.2.3. Información Existente

Adicionalmente a la información con que se cuenta en etapas anteriores de este estudio, entre los que se cuenta cartografía, mapa geológico de la zona, catastro de pozos en la zona y estudios desarrollados por organismos públicos y privados del país, se cuenta con información de sondajes realizados como parte de estudios anteriores. Luego de un reconocimiento en terreno, en función de la calidad de los datos y su disponibilidad como puntos de control, se determinará su aplicabilidad en la red de monitoreo.

Tabla A.5.2.1. Pozos adicionales zona de estudio.

Nro.	Expediente	Nombre del Pozo	UTM E	UTM N
1	-	CORFO 627	274400	6758350
2	-	CORFO 660	275200	6757850
3	ND-0401-394	Pozo N°2 Los Choros	275800	6757550

Tabla A.5.2.2. Sondajes adicionales zona de estudio.

Nro.	Fuente	Sondaje	UTM E	UTM N
1	Sernageomin	S1	271459	6755775
2	Sernageomin	S2	272870	6757250
3	Sernageomin	S3	274610	6757740
4	Sernageomin	S4	277006	6757266

Por último, se cuenta con información proporcionada por la DGA, referente a la red de medición que posee este organismo en la zona de estudio, la cual debe ser definida con exactitud en términos de coordenadas geográficas, altitud, calidad físico química, y nivel estático de la napa.

Tabla A.5.2.3. Red de Control DGA, zona baja Quebrada Los Choros.

CODBNA	NOMBRE ESTACION	SUBCUENCA	Coordenadas UTM [m]		VIGENCIA
			ESTE	NORTE	
04120009-K	LOS CHOROS C-1 N° 2	Entre Quebrada del Pelicano y Desembocadura	274423	6758402	VIGENTE
04120008-1	PUEBLO LOS CHOROS C-4	Entre Quebrada del Pelicano y Desembocadura	276421	6757843	VIGENTE
04120006-5	LOS CHOROS N1	Entre Quebrada del Pelicano y Desembocadura	276518	6757615	VIGENTE
04120010-3	QUEBRADA LOS CHOROS.Angostura C-5	Entre Quebrada del Pelicano y Desembocadura	277919	6755719	VIGENTE
04120007-3	EL TOFO N° 5 A-1	Entre Quebrada del Pelicano y Desembocadura	291506	6752187	VIGENTE

A.5.2.4. Revisión en Terreno de Pozos y Norias

En esta campaña, se han reconocido 29 captaciones, considerando aquellas que fueron identificadas en la primera visita a la zona. De dichos puntos, se ha determinado su estado y ubicación, características de la captación y niveles de agua subterránea. El análisis físico químico del agua subterránea, se ha realizado a partir de aquellas captaciones habilitadas para poder extraer muestras de agua.

A diferencia del terreno anterior, se contó con un altímetro que permitiese medir la altura de las captaciones tomando como datum el nivel del mar. Debido a la inestabilidad del tiempo en el período en que se realizó el terreno, las variaciones en la presión atmosférica afectaron los resultados entregados por dicho instrumento, por lo que la confiabilidad en las mediciones se reduce notablemente.

Se realizó una prueba del tipo Slug – Test en uno de los pozos ubicados en el Llano Los Choros, con el fin de determinar la conductividad hidráulica en la zona baja del acuífero.

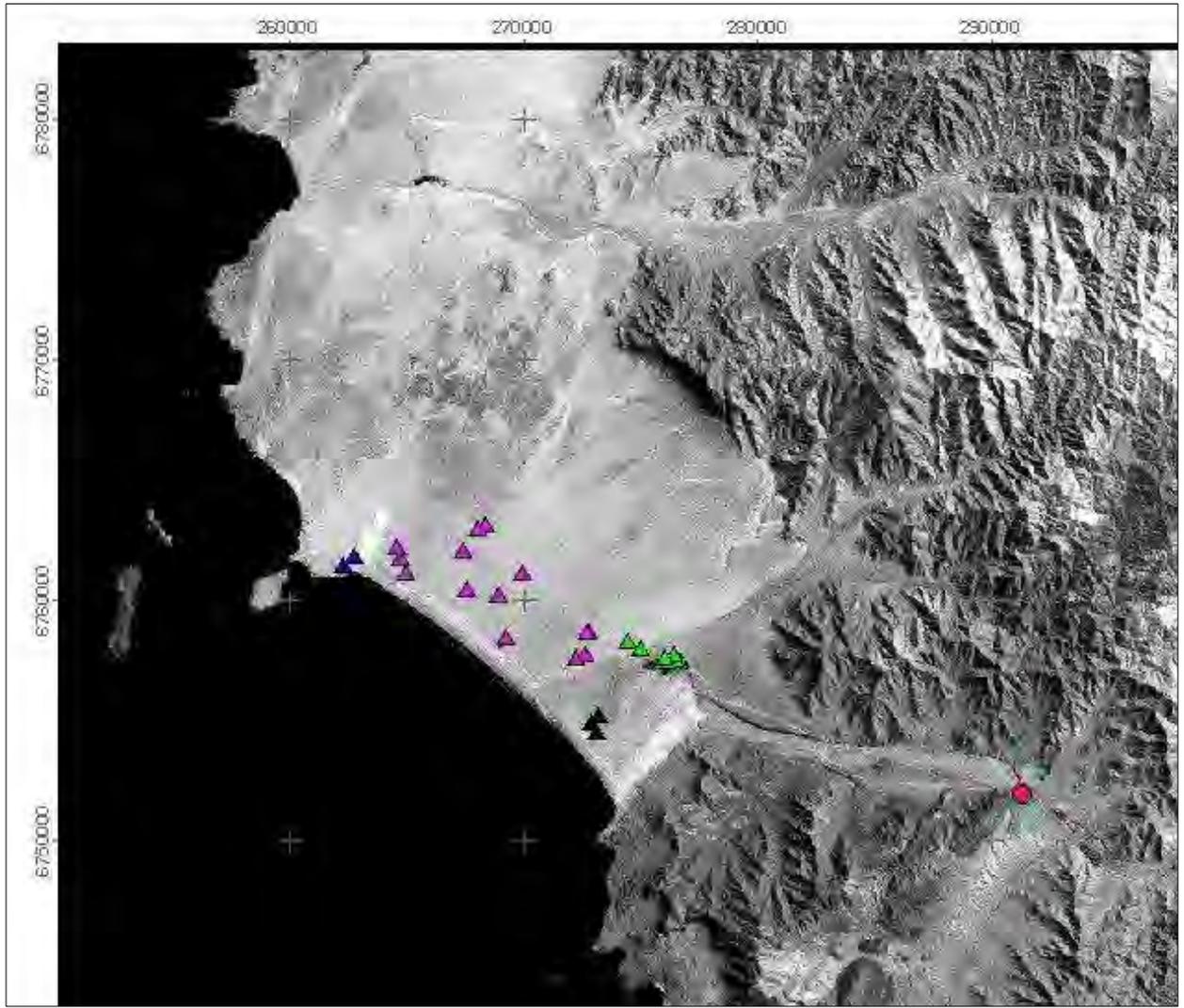
En 3 pozos se realizaron perfiles de conductividad eléctrica en la vertical, aunque sin obtener resultados representativos del problema de intrusión salina. Esto, debido a que no se contaba con información de construcción del pozo que permitiese identificar la ubicación de las cribas y así analizar a diferentes profundidades. La mayoría de éstos presenta construcciones habilitadas para captar en el inferior del pozo, por lo que un perfil de conductividad eléctrica no es posible en estos casos.

Los pozos y norias muestreados en esta visita a terreno, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla A.5.2.4. Puntos muestreados en terreno.

Nombre	Coordenadas UTM Datum PSAD 56		N.E	N.D	Profundidad Actual
	Este [m]	Norte [m]			
El Tofo 5 (BNA)	291358	6751882	3.81		18.1
APR Pueblo Los Choros (BNA)	276421	6757843		15.26	70 aprox.
Pozo Comité de Regantes	276463	6757631			
El Molino	276518	6757615	7.56		7.8
Comité de Riego	276712	6757542		11.91	
Noria Comité de Riego	276630	6757559	8.9		12.38
Noria Pueblo Los Choros	276050	6757725	7.41		10.89
Noria Riego Pueblo Los Choros	276173	6757569		2.36	5.1
Caseta Azul	272203	6757699			
Sergio Cuellar	272594	6757814		10	
Casa con Molino	272708	6758781	12.46		14.76
Noria Casa cercana al Molino	272776	6758808	13.66		16
Pozo Antonio Soler	262304	6761624	9.17		43.7
Noria Las Cabras	262783	6762060	4.07		5.9
Pozo Camino a Pta. de Choros	264580	6762430	9.96		21.28
Pozo Camino a Pta. de Choros 2	264755	6761950	7.25		
Caseta Malla Rachel Negra	264989	6761294	3.35		3.8
Pozo Llano Los Choros	267541	6760604	7.78		17.53
Casa Llano Los Choros	268884	6760360	8.83		14.02
Camping El Oasis	269204	6758543		4.34	5.62
Pozo Llano Los Choros 2	269954	6761319	10.43		39.3
APR Pta de Choros	275001	6758082		26.03	
Los Choros N2 (Galpon) (BNA)	274423	6758402	20.63		
Desembocadura Qda los Choros	273206	6755221	2.81		3.08
Parcela Mateo Ossandon	272840	6754939	2.8		Variable
Desembocadura Qda los Choros 2	273078	6754506	2.2		2.85
Camino a casa blanca	267398	6762303	10.56		15.33
Pozo 4 Cabañas en construccion	268051	6763190	18.35		38
Noria Cabañas en construccion	268323	6763367	13.33		13.75
Pozo Munizaga(*)	260757	6765003			

En la imagen siguiente se presenta un mapa simplificado de la zona, identificando los puntos muestreados y los resultados de análisis físico químico realizados in situ. Dentro de los parámetros analizados en terreno, se tienen pH, conductividad eléctrica y temperatura, medidos con un equipo multiparámetro modelo Multi 340i, de la empresa WTW, cuyo representante en Chile es Merck S.A.



Nombre	Fecha	Coordenada X (Easting)	Coordenada Y (Northing)	Altitud (m)	Profundidad (m)	Diámetro (cm)	Material	Observaciones
W1	2000	265000	6755000	1500	10	10	Plástico	
W2	2000	268000	6758000	1200	15	15	Plástico	
W3	2000	270000	6760000	1000	20	20	Plástico	
W4	2000	272000	6762000	800	25	25	Plástico	
W5	2000	275000	6765000	600	30	30	Plástico	
W6	2000	278000	6768000	400	35	35	Plástico	
W7	2000	280000	6770000	300	40	40	Plástico	
W8	2000	282000	6772000	200	45	45	Plástico	
W9	2000	285000	6775000	100	50	50	Plástico	
W10	2000	288000	6778000	50	55	55	Plástico	
W11	2000	290000	6780000	0	60	60	Plástico	
W12	2000	265000	6755000	1500	10	10	Plástico	
W13	2000	268000	6758000	1200	15	15	Plástico	
W14	2000	270000	6760000	1000	20	20	Plástico	
W15	2000	272000	6762000	800	25	25	Plástico	
W16	2000	275000	6765000	600	30	30	Plástico	
W17	2000	278000	6768000	400	35	35	Plástico	
W18	2000	280000	6770000	300	40	40	Plástico	
W19	2000	282000	6772000	200	45	45	Plástico	
W20	2000	285000	6775000	100	50	50	Plástico	
W21	2000	288000	6778000	50	55	55	Plástico	
W22	2000	290000	6780000	0	60	60	Plástico	

Figura A.5.2.2. Distribución de Pozos identificados en terreno.

A.5.2.5. Caracterización de Puntos Visitados

- *Estación El Tofo 5.*

No se dispone de imagen para dicha captación. Las características de este punto son:

Tipo de Captación: Noria

Coordenadas UTM. N: 6751882; E: 291358

N.E: 3.81 [m]; Profundidad Actual: 18.1 [m]

pH: 7.08

T [°C]: 18.1

Conductividad Eléctrica: 1120 [μ S/cm]

Dado que este punto se encuentra alejado de la zona vulnerable al problema de intrusión salina, se considera como información base en relación a la calidad físico química, la obtenida en este lugar. El bajo valor en la conductividad eléctrica, permite asumir que el efecto en la penetración tierra adentro de la cuña salina no es perceptible en el sector más alto de la Quebrada.



Figura A.5.2.3. APR Pueblo Los Choros, Red BNA.



Figura A.5.2.4. Pozo Comité de Regantes.

Noria El Molino

- Coordenadas UTM:

N: 6757615; E: 276518

N.E: 7.56 [m]; Prof Actual: 7.8[m]

pH: 7.52

T[°C]: 19.2

Cond. Elec: 2.21 [mS/cm]

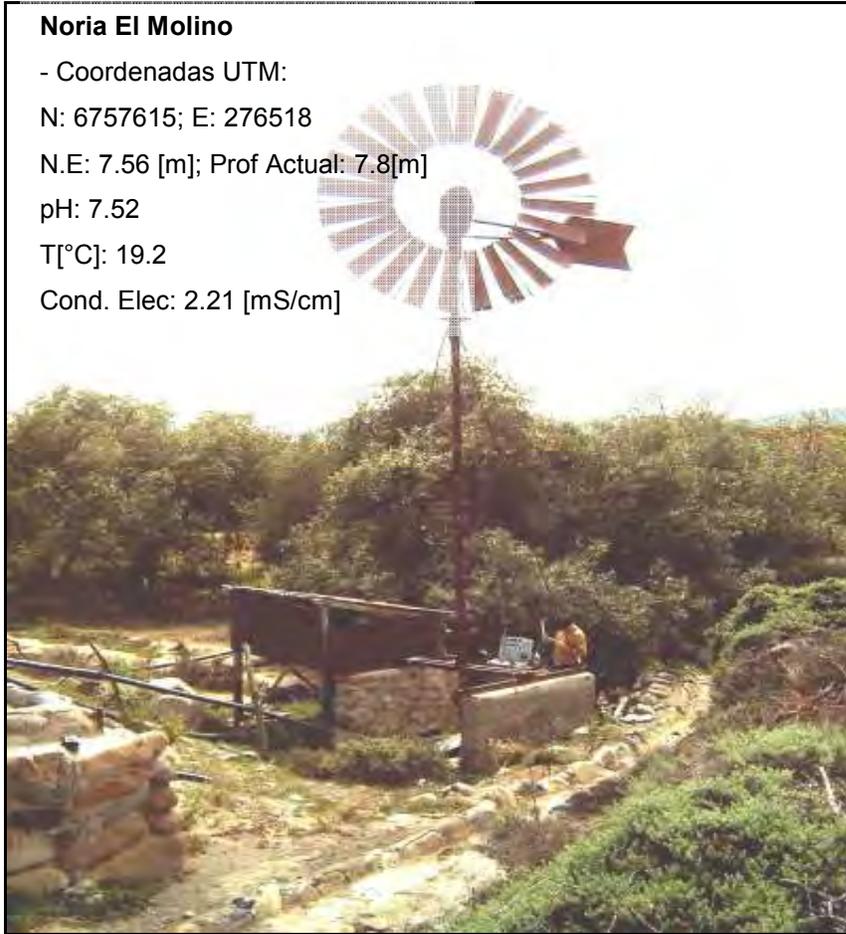


Figura A.5.2.5. Noria El Molino.

Pozo Comité de Riego

- Coordenadas UTM:

N: 6757542; E: 276712

N.D: 11.91 [m]; Qext: 2[l/s]

pH: 7.64

T[°C]: 19.4

Cond. Elec: 1.88 [mS/cm]

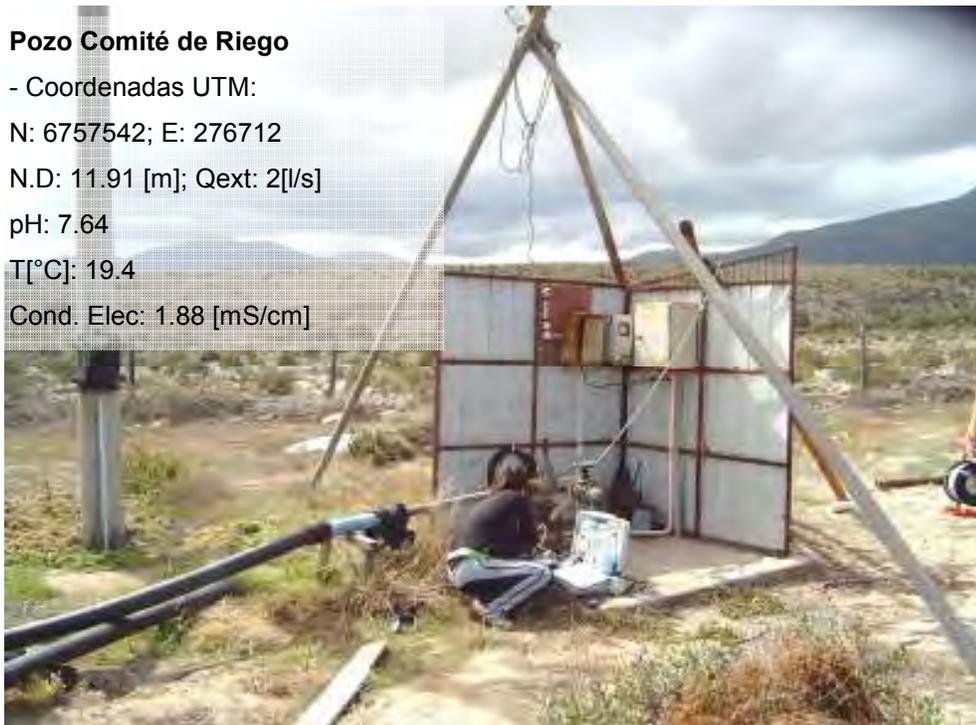


Figura A.5.2.6. Pozo Comité de Riego.



Figura A.5.2.7. Noria Comité de Riego.

- *Noria Pueblo Los Choros.*

No se dispone de imagen para dicha captación. Las características de este punto son:

Tipo de Captación: Noria

Coordenadas UTM. N: 6757725; E: 276050

N.E: 7.41 [m]; Profundidad Actual: 10.89 [m]

pH: 7.31

T [°C]: 17.5

Conductividad Eléctrica: 3.53 [mS/cm]

Noria Riego Pueblo Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6757569; E: 276173

N.D: 2.36 [m]; Prof. Actual: 5.1[m]

pH: 7.15

T[°C]: 18.4

Cond. Elec: 2.44 [mS/cm]



Figura A.5.2.8. Noria Pueblo Los Choros #2.

Pozo Caseta Azul. Llano Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6757699; E: 272203

pH: 7.72

T[°C]: 16

Cond. Elec: 2.62 [mS/cm]



Figura A.5.2.9. Pozo Caseta Azul. (Propiedad de Sergio Cuellar)

Pozo Sergio Cuellar

- Coordenadas UTM:

N: 6757814; E: 272594

N.D: 10 [m]

pH: 7.74

T[°C]: 14.4

Cond. Elec: 2.8 [mS/cm]

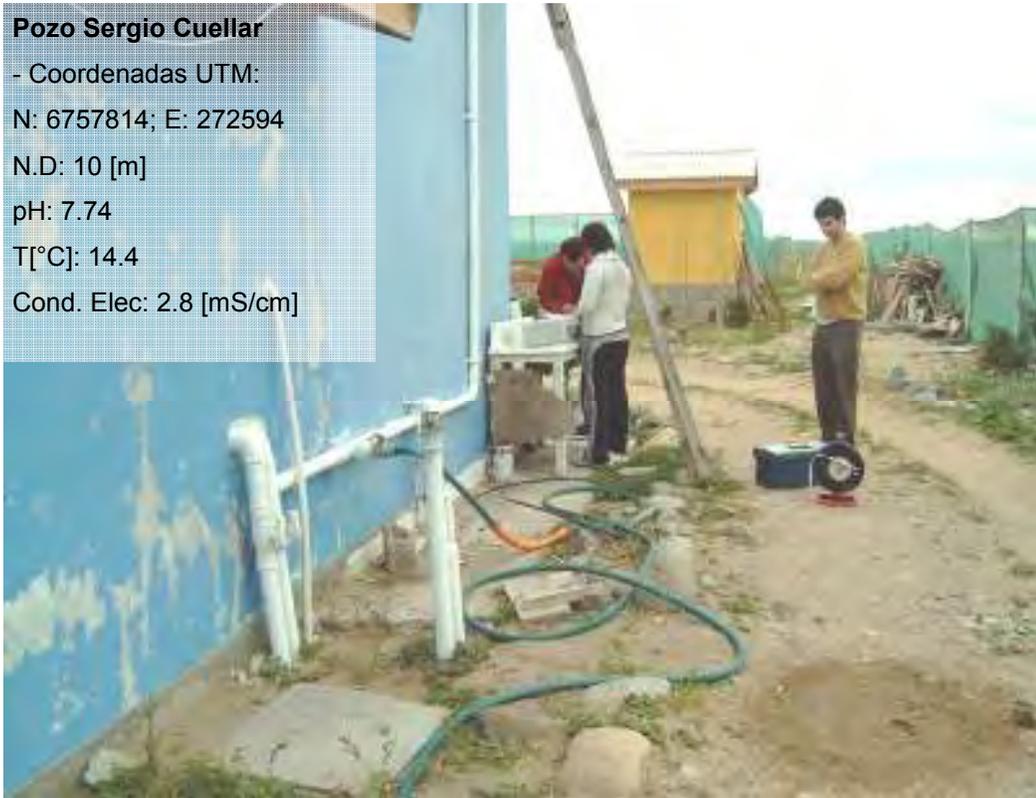


Figura A.5.2.10. Pozo Propiedad de Sergio Cuellar.

Noria Casa Con Molino

- Coordenadas UTM:

N: 6758781; E: 272708

N.E: 12.46 [m]; Prof. Actual: 14.76[m]

pH: 7.8

T[°C]: 16.2

Cond. Elec: 4.61 [mS/cm]

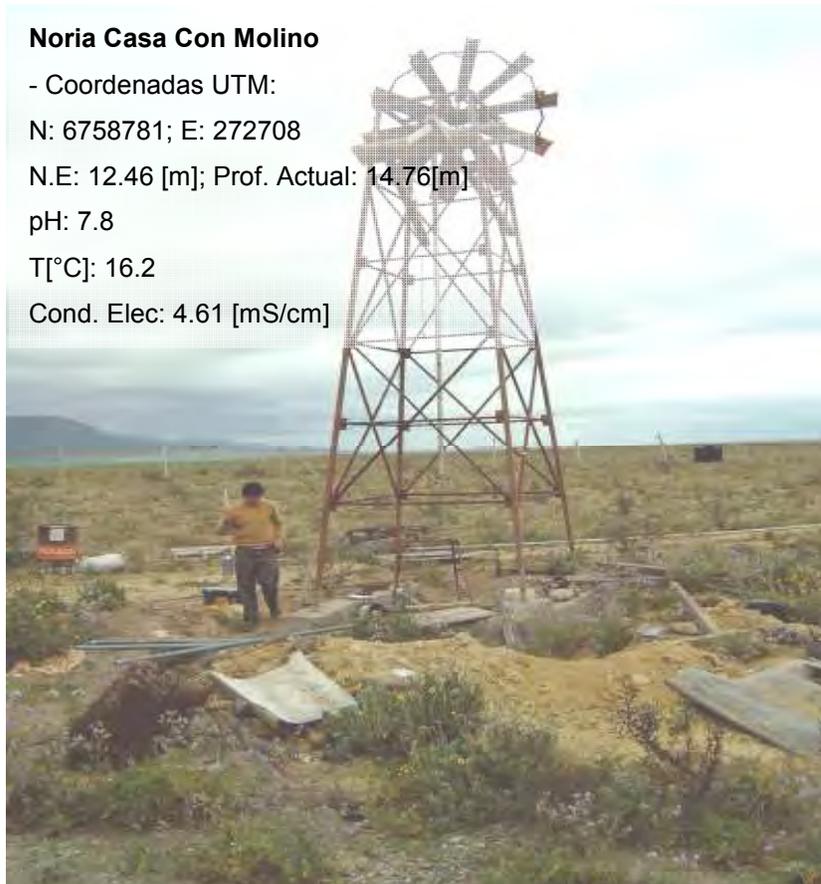


Figura A.5.2.11. Noria Casa con Molino. Llano Los Choros.

Noria Llano Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6758808; E: 272776

N.E: 13.66 [m]; Prof. Actual: 16[m]

pH: 8.05

T[°C]: 16.4

Cond. Elec: 4.43 [mS/cm]

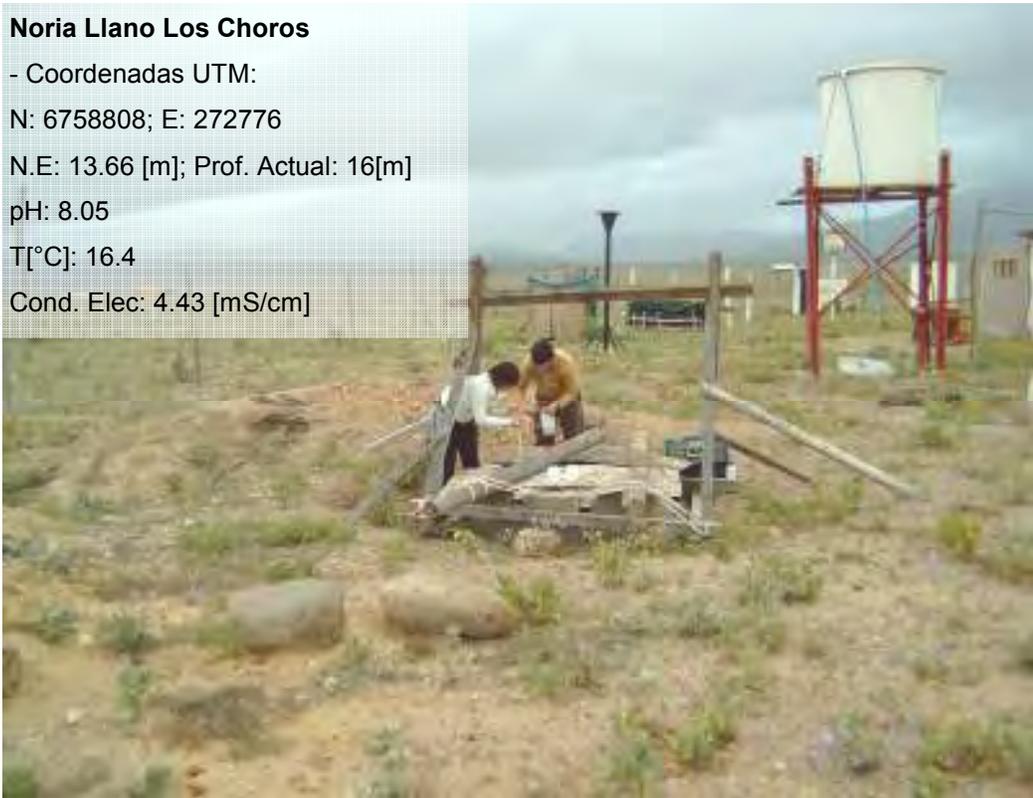
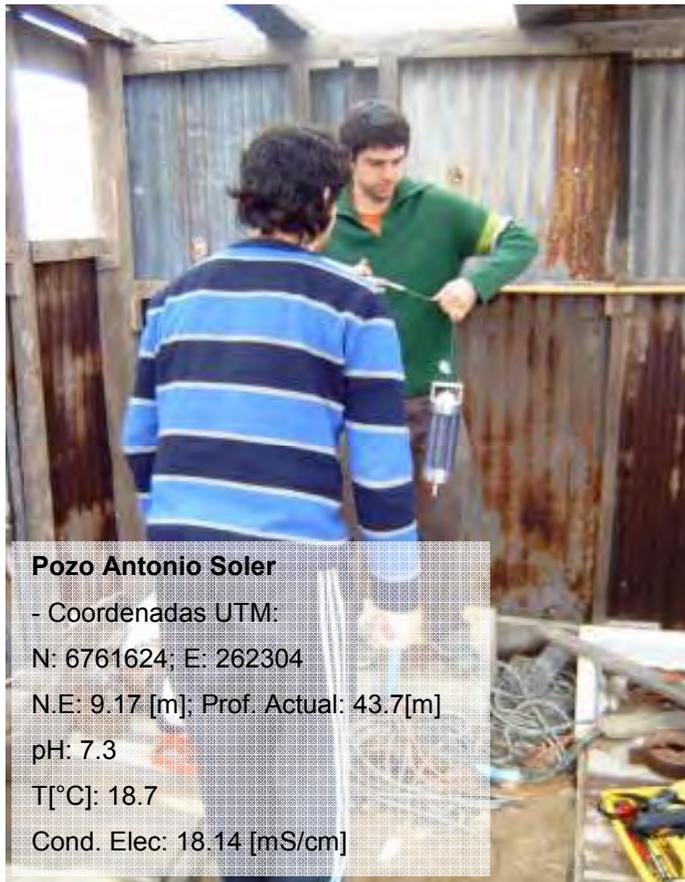


Figura A.5.2.12. Noria Llano Los Choros (cercana a casa con Molino).



Pozo Antonio Soler

- Coordenadas UTM:

N: 6761624; E: 262304

N.E: 9.17 [m]; Prof. Actual: 43.7[m]

pH: 7.3

T[°C]: 18.7

Cond. Elec: 18.14 [mS/cm]

Figura A.5.2.13. Pozo Antonio Soler.

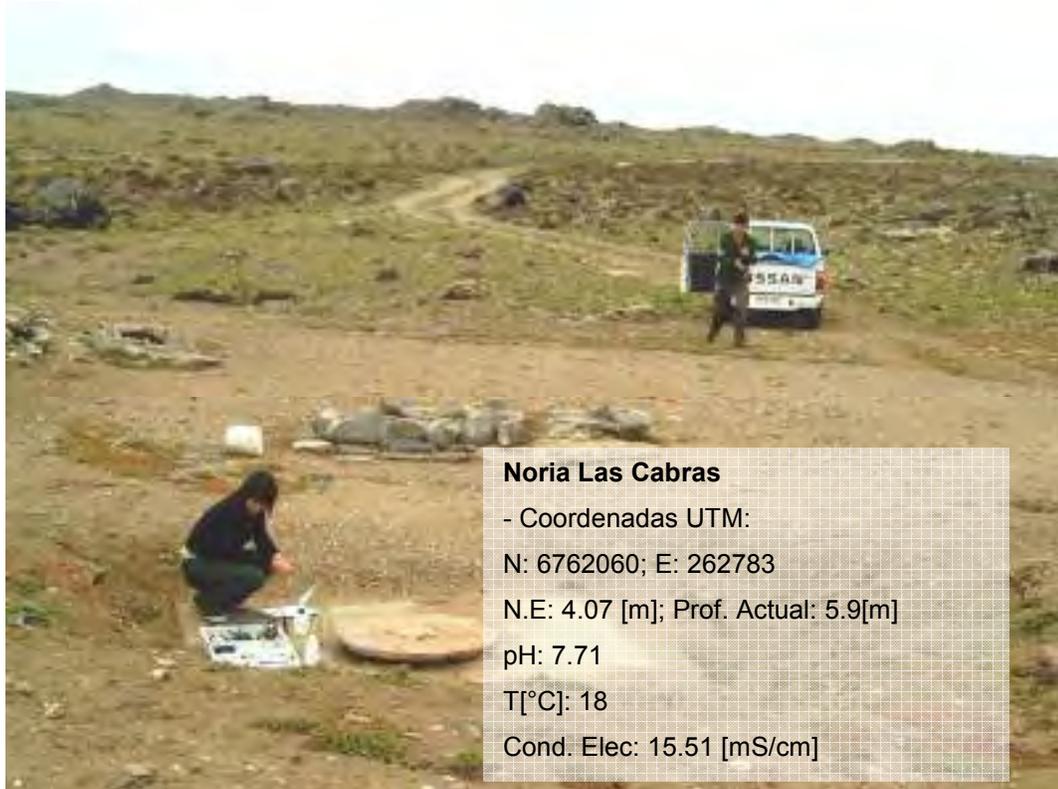


Figura A.5.2.14. Noria Las Cabras.

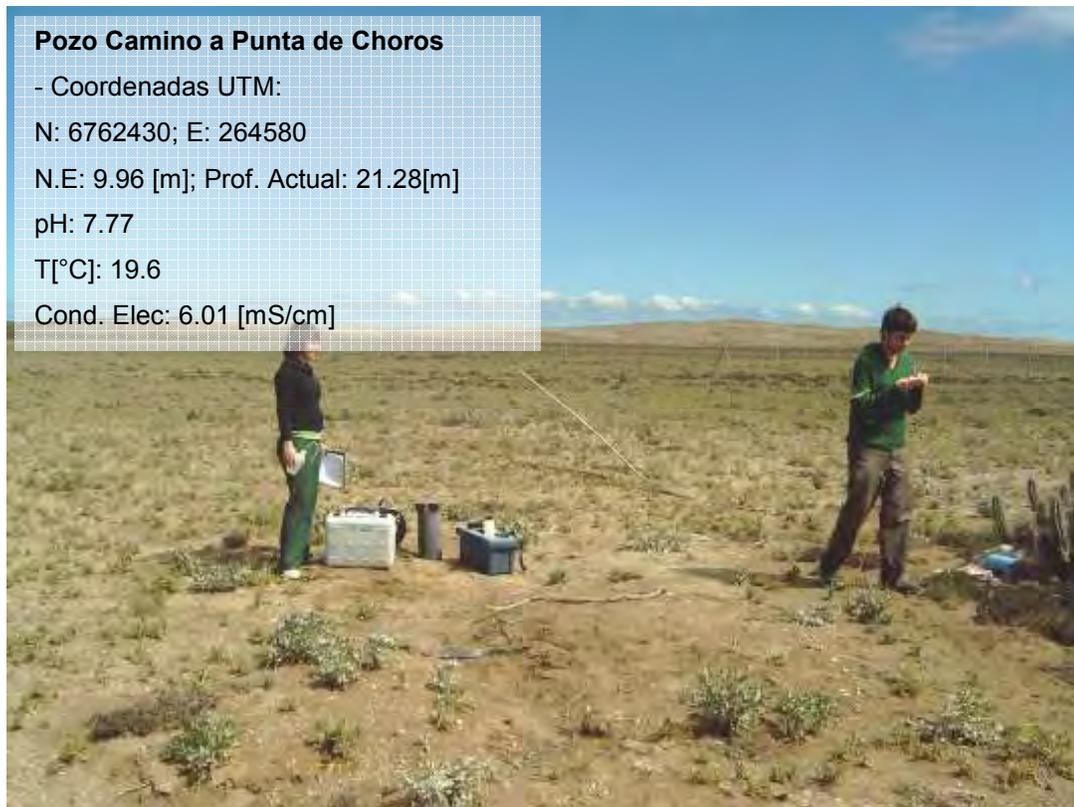


Figura A.5.2.15. Pozo Camino a Punta de Choros 1.



Figura A.5.2.16. Pozo camino a Punta de Choros 2.



Figura A.5.2.17. Noria Caseta Malla Rachel Negra. Sector Lengua de Duna.

- *Pozo Llano Los Choros.*

No se dispone de imagen para dicha captación. Las características de este punto son:

Tipo de Captación: Pozo

Coordenadas UTM. N: 6760604; E: 267541

N.E: 7.78 [m]; Profundidad Actual: 17.53 [m]

pH: 7.44

T [°C]: 20.8

Conductividad Eléctrica: 3.69 [mS/cm]

- *Noria Llano Los Choros.*

No se dispone de imagen para dicha captación. Las características de este punto son:

Tipo de Captación: Noria

Coordenadas UTM. N: 6760360; E: 268884

N.E: 8.83 [m]; Profundidad Actual: 14.02 [m]

pH: 7.63

T [°C]: 18.7

Conductividad Eléctrica: 4.97 [mS/cm]

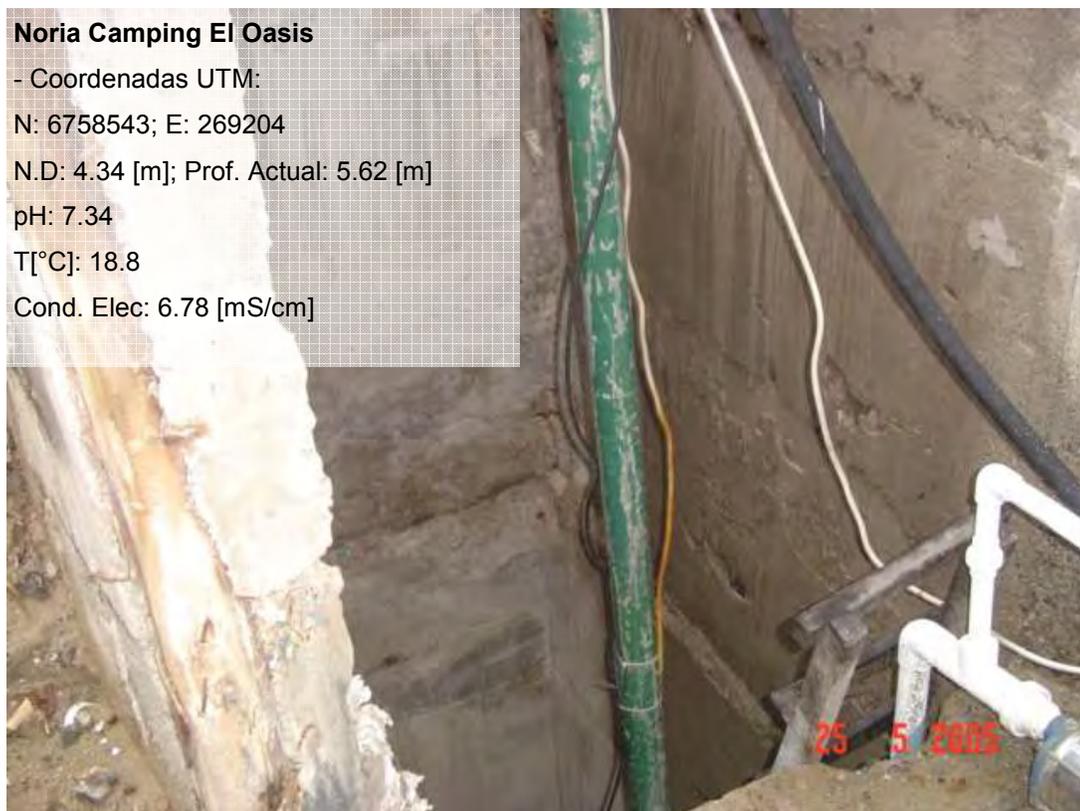


Figura A.5.2.18. Camping El Oasis.

- *Pozo Llano Los Choros 2.*

No se dispone de imagen para dicha captación. Las características de este punto son:

Tipo de Captación: Pozo

Coordenadas UTM. N: 6761319; E: 269954

N.E: 10.43 [m]; Profundidad Actual: 39.3 [m]

pH: 7.23

T [°C]: 17.6

Conductividad Eléctrica: 3.9 [mS/cm]



Figura A.5.2.19. Pozo APR Punta de Choros.

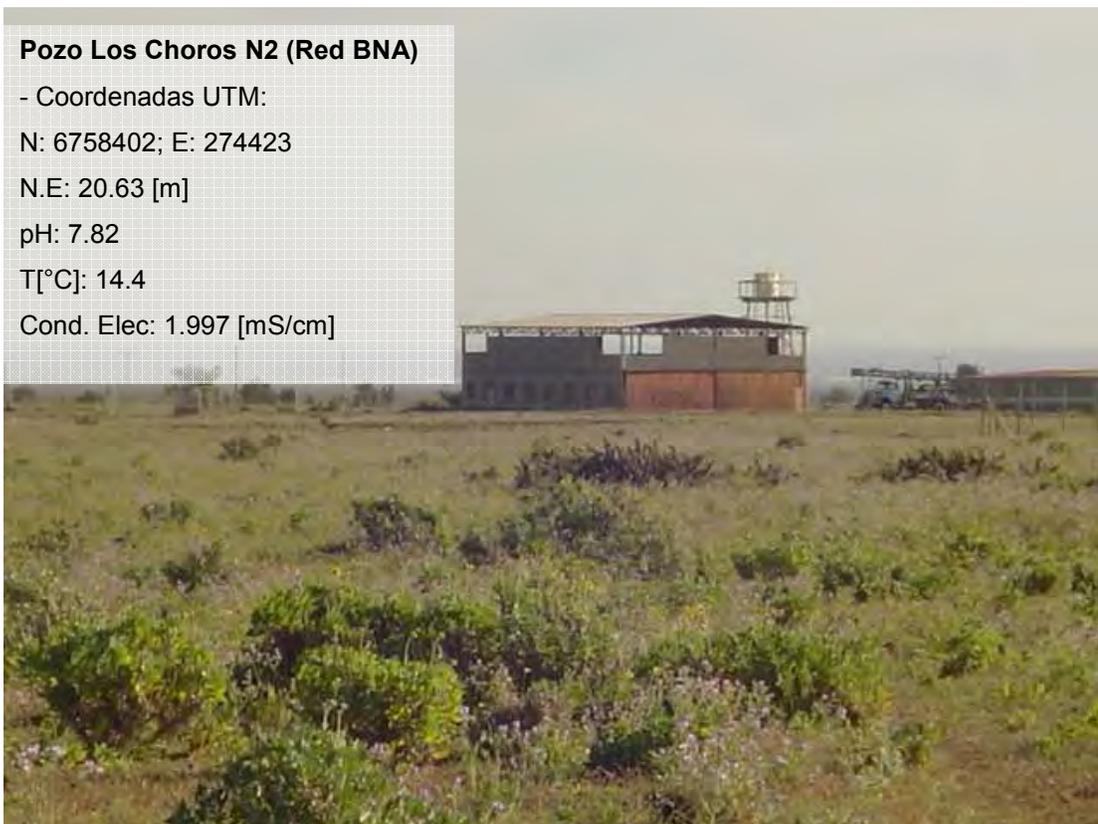


Figura A.5.2.20. Pozo Los Choros N2. (Galpón)



Figura A.5.2.21. Noria Sector Desembocadura Qda. Los Choros.



Figura A.5.2.22. Noria Parcela Mateo Ossandon. Desembocadura Qda. Los Choros



Noria Desembocadura Qda. Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6754506; E: 273078

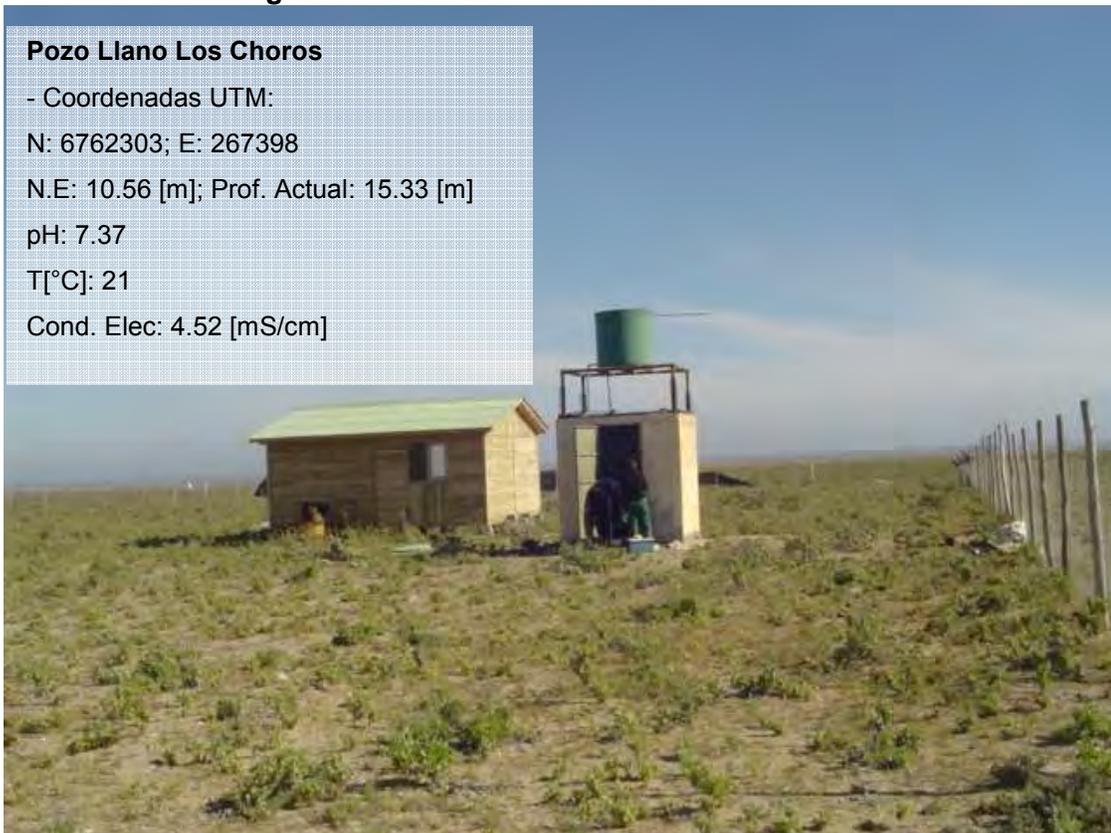
N.E: 2.2 [m]; Prof. Actual: 2.85 [m]

pH: 7.85

T[°C]: 17.7

Cond. Elec: 2.05 [mS/cm]

Figura A.5.2.23. Noria Sector Desembocadura.



Pozo Llano Los Choros

- Coordenadas UTM:

N: 6762303; E: 267398

N.E: 10.56 [m]; Prof. Actual: 15.33 [m]

pH: 7.37

T[°C]: 21

Cond. Elec: 4.52 [mS/cm]

Figura A.5.2.24. Pozo Sector Llano Los Choros.

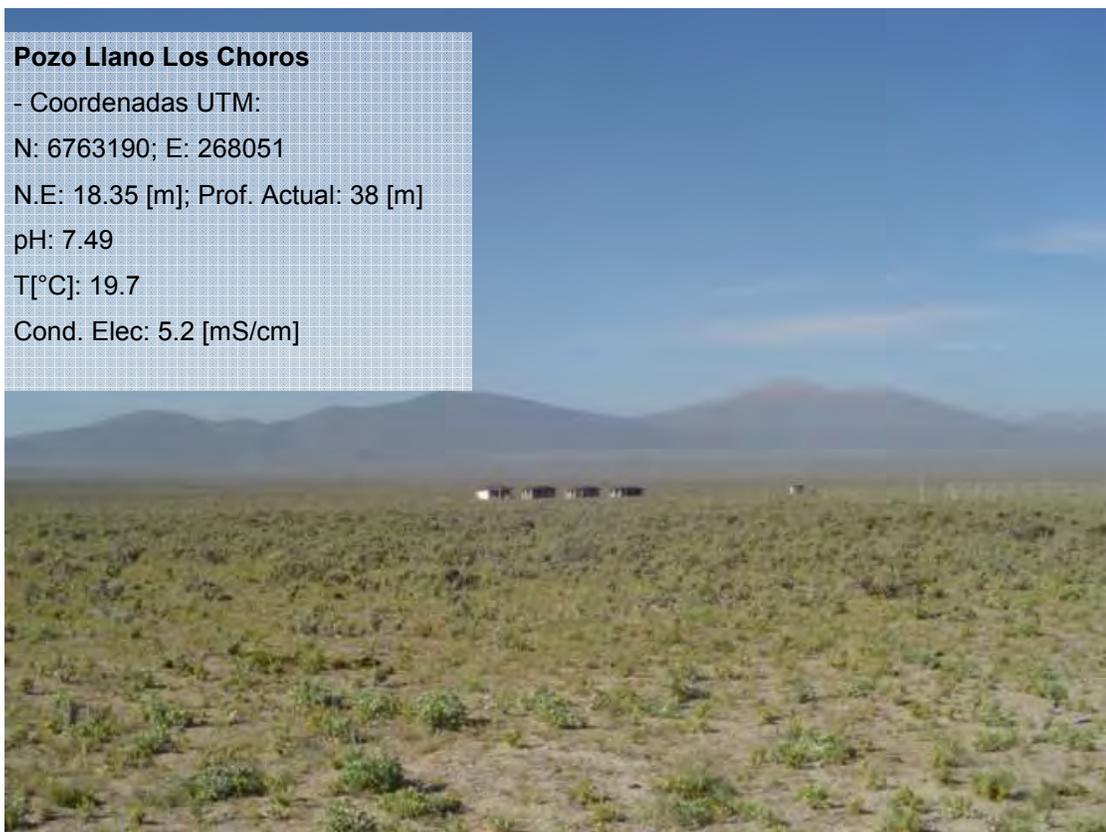


Figura A.5.2.25. Pozo Llano Los Choros (Cercano a Cabañas en construcción).



Figura A.5.2.26. Noria Sector Llano Los Choros.

A.5.2.6. Comentarios y Recomendaciones

En resumen, la necesidad de caracterizar en forma completa los pozos existentes en la zona baja de la Quebrada Los Choros, proporciona una mayor comprensión de la red existente y determina la necesidad de establecer puntos adicionales, como punteras, para desarrollar una red adecuada y óptima que permita el control adecuado sobre la evolución del problema en la zona en estudio.

ANEXO 5.3

PRUEBA DE SLUG-TEST REALIZADA EN TERRENO

A.5.3. PRUEBA DE SLUG-TEST REALIZADA EN TERRENO

A.5.3.1. Introducción.

Los Slug Tests son métodos de terreno para estimar el valor de la conductividad hidráulica, K , en una porción de suelo cercana al pozo donde éste se realiza (ZURBUCHEN, 2002). Consisten en provocar un cambio de presión en un pozo, el cual genera un flujo desde el pozo hacia el acuífero. Entre los modelos utilizados para generar el cambio de presión se encuentra el método neumático, en que el desequilibrio del sistema es provocado por la inyección de nitrógeno en el pozo, y el método del pistón, donde la diferencia de presión es provocada por un cilindro de mayor densidad que el agua sumergido en el pozo.

La aplicación de estos métodos en acuíferos de alta permeabilidad, ha permitido constatar que la respuesta del nivel del agua es muy rápida y oscilatoria, con velocidades y aceleraciones que pueden ser del orden de 1 m/s y 1 m/s^2 , respectivamente (ZURBUCHEN, 2002).

La metodología adoptada para fines del presente estudio, considera la aplicación del método del pistón en un acuífero de alta permeabilidad, en un pozo que atraviesa parcialmente un acuífero no confinado. Pese a no ser recomendado para usar en acuíferos de alta conductividad hidráulica, como es el caso del existente en la zona costera de Quebrada Los Choros, se ha escogido principalmente debido a que es un método que necesita un menor equipamiento (a diferencia del modelo neumático, no necesita un tanque de nitrógeno, que sólo se puede ocupar una vez). A partir de los resultados obtenidos, se adaptará el análisis de los resultados del método del pistón al método neumático.

A.5.3.2. Metodología.

Para la realización de los ensayos, se construyeron cilindros de hormigón de distinto largo y ancho, para poder hacer las pruebas en pozos de diferentes dimensiones. La prueba consiste en introducir un sensor de presión en el pozo y, posteriormente, sumergir uno de los cilindros en él, que debe ser elegido dependiendo de las dimensiones del pozo. A partir del momento en que se empieza a introducir el cilindro se registra la variación de la presión (como indicador de la altura de la columna de agua), hasta que se deja de registrar movimiento en el sensor.



Figura A.5.3.1. Procedimiento utilizado en terreno.

A.5.3.3. Resultados.

En forma previa al análisis de los resultados obtenidos, es importante señalar que el método usado para la realización de la prueba de Slug Test requiere que los pozos considerados presenten determinados tramos con cribas, lo cual difiere del pozo estudiado en esta oportunidad y que se caracteriza por presentar una abertura en el extremo inferior de éste. Dicha diferencia con los requisitos del método adoptado, podría generar algunos efectos, aunque menores, en el resultado.

En cuanto a los resultados obtenidos, en la Figura A.5.3.2 se muestra la variación de la altura obtenida en el ensayo, con los datos medidos en terreno, mientras que en la Figura A.5.3.3 se muestra la altura esperada para el método neumático (BUTLER y GARNETT, 2000). Estas dos figuras tienen en común una respuesta oscilatoria (dependiendo del valor del parámetro C_D), que converge al valor inicial de la altura, pero los datos obtenidos oscilan con un valor medio decreciente, que converge exponencialmente al valor inicial, mientras que el esperado oscila con un valor medio constante.

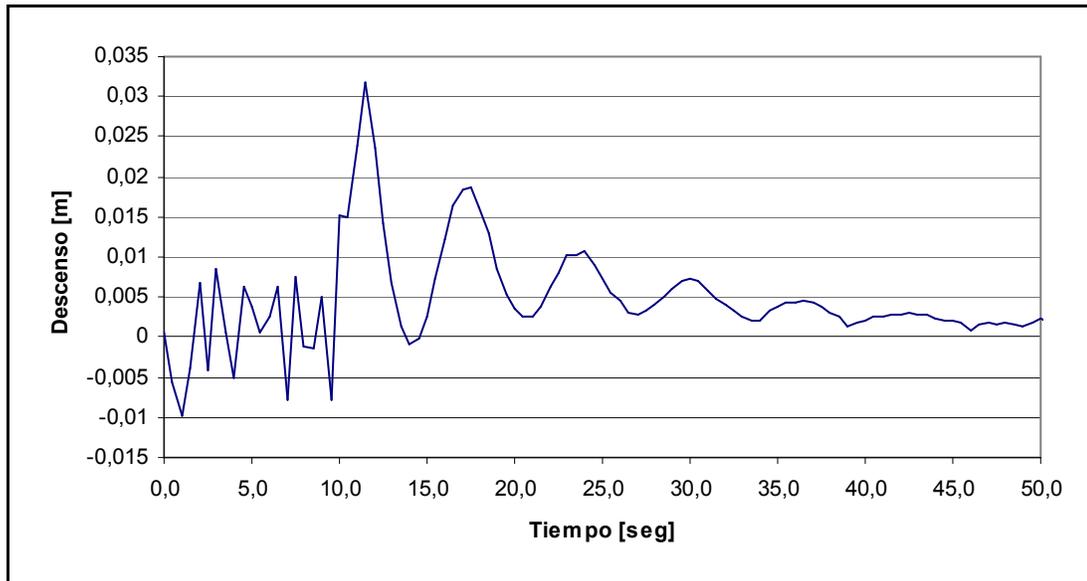


Figura A.5.3.2. Datos obtenidos en terreno.

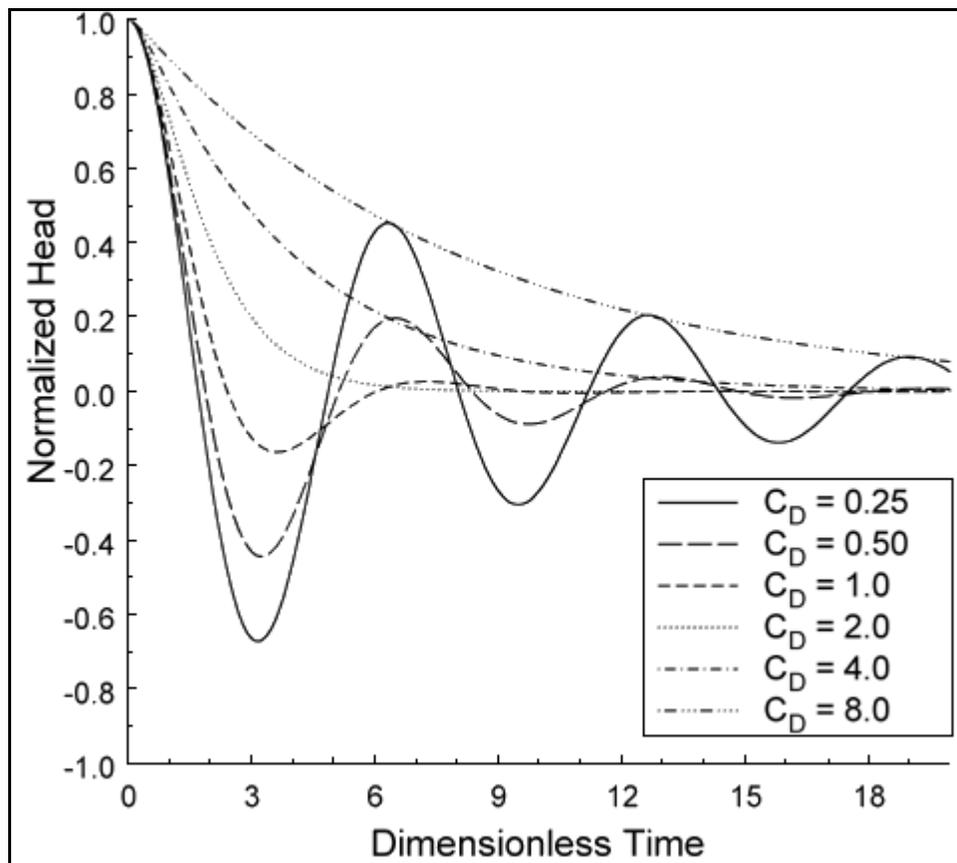


Figura A.5.3.3. Curvas tipo para distintos valores del parámetro adimensional C_D , obtenidas por BUTLER y GARNETT, 2000.

Si se corrige la altura de las oscilaciones, de manera que la altura media sea constante, se puede ajustar una curva tipo.

Un problema de método del pistón, que se acentúa en la medida que aumenta la conductividad del acuífero, es que el tiempo que se demora en introducir el pistón, que en la Figura A.5.3.2 corresponde al tiempo durante el cual hay mucho ruido (primeros 10 segundos), es comparable con el período de las oscilaciones del agua en el pozo, lo que puede generar un efecto difícil de predecir. El método neumático tiene relativamente solucionado este problema, porque el cambio de nivel inicial es más rápido.

La consecuencia de esto último sería que la señal que indica que el pistón empezó a entrar en el agua parte hacia el fondo del pozo, se refleja en el fondo, y se devuelve

hasta la superficie antes de que termine de entrar el pistón, generando un ascenso del nivel del agua que hace que el nivel de equilibrio aparentemente se desplace hacia arriba. Este efecto podría verse acentuado por la forma del pozo, que hace que el agua no cambie de medio a lo largo de una distancia relativamente larga, sino abruptamente al final del pozo, lo que hace que la reflexión producida por el cambio de medio sea mayor.

Finalmente, falta definir una relación entre los datos obtenidos en este trabajo y la conductividad hidráulica obtenida en el problema resuelto por BUTLER y GARNETT (2000). Este problema presenta la doble complejidad de representar el cambio de método usado en el slug test y las diferencias físicas entre los dos pozos. Para resolver el primero de estos dos problemas, se debe determinar si es válido hacer una corrección a los valores medidos, de manera que el valor en torno al cual oscila el nivel del agua en el pozo sea constante, como ocurre en el modelo de BUTLER y GARNETT (2000); para el segundo problema, es necesario establecer las modificaciones que se deben hacer a los parámetros que describen las características físicas del pozo para que el modelo represente correctamente al problema real.

A.5.3.4. Conclusiones.

La diferencia entre el comportamiento observado en cada pozo se explica por los métodos utilizados en la realización de los slug tests y, en menor medida, por la presencia de cribas en los pozos. Un método en que la perturbación es instantánea, o casi instantánea, como es el caso del método neumático, va a tener un frente de onda único, mientras que uno en que la perturbación se hace de manera progresiva, como ocurre con el método del pistón, va a tener distintos frentes de onda, moviéndose a una velocidad única, pero desfasados, lo que va a provocar choques de ondas y perturbaciones del sistema.

ANEXO 5.4

DETALLE DE LA HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA DE ESTUDIO, QUEBRADA LOS CHOROS.

A.5.4. HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El estudio del fenómeno de intrusión salina a través de la caracterización hidrogeoquímica es ampliamente conocido, ya que permite proporcionar información adecuada en la identificación del fenómeno.

En vista del desarrollo del presente estudio, en la zona baja de la Quebrada Los Choros, IV Región, se efectuaron dos campañas de terreno en la zona. La primera de estas se desarrolló entre los días 24 y 26 de Mayo, la cual comprendió una revisión preliminar de los pozos y norias existentes en la zona determinando su estado y ubicación, así como un posterior análisis químico de las muestras, considerando los parámetros relevantes en el estudio de intrusión salina. La segunda campaña, se llevó a cabo durante los días 29 de Agosto y 2 de Septiembre del presente año, y tuvo como objetivo realizar una identificación más extensa de las captaciones en la zona, en conjunto con pruebas en terreno y el posterior análisis químico de los parámetros relevantes. De esta forma, se puede desarrollar un diagnóstico más completo de la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas.

El presente anexo, realizado a partir de los datos obtenidos durante las campañas de terreno en la zona baja de quebrada Los Choros, entre el Pueblo Los Choros y Punta de Choros en la costa, tiene como objetivo principal evaluar la calidad físico química de las aguas subterráneas, determinando su aplicabilidad a diversos usos, como consumo de Agua Potable y Uso en Riego, considerando la normativa chilena vigente en ambos casos. Parámetros radiactivos como también bacteriológicos no han sido considerados puesto que no forman parte de los objetivos del presente estudio.

A.5.4.1. Normativa Chilena de Calidad de Agua Potable (NCh. 409 of. 84).

Esta Norma Chilena, declarada oficial por DS 11/ 1984 del Ministerio de Salud, establece "Calidades de agua para Uso Potable". Determina requerimientos físicos, químicos, radiactivos y bacteriológicos que debe cumplir el agua potable para consumo humano y para bebida de animales. La norma se aplica al agua potable proveniente de cualquier sistema de abastecimiento.

Si bien la NCh. 409 incluye numerosos parámetros, dados los objetivos de este estudio se han analizado los que son de interés común para agua potable y el problema de salinidad en las aguas subterráneas, que se describen en la Tabla A.5.4.1.

Tabla A.5.4.1. Extracto Norma Chilena 409.

PARAMETRO	LIMITE MAXIMO
<i>FÍSICOS</i>	
Turbiedad	5 UNT
Color verdadero	20 Unid. Pt-Co
Olor	Inodora
Sabor	Insípida
<i>QUÍMICOS</i>	
Amoníaco	0,25 mg/l
Cloruro (*)	250 mg/l
Magnesio	125 mg/l
Nitrato	10 mg/l
Nitrito	1,0 mg/l
pH	6 - 8,5
Residuo sólido filtrable	1000 mg/l
Sulfatos (*)	250 mg/l

(*): Actualmente, se ha conformado el Comité Técnico del 30.06.2005, que tiene por objetivo realizar una actualización de la Norma promulgada en el año 1984, estableciendo la NCh 409/1-2004, cuya versión se encuentra en trámite y esta pronta a ser aprobada, y que establece una mayor tolerancia a los parámetros Cloruros (Cl^-) y Sulfatos (SO_4^{-2}), permitiendo una concentración admisible de 400 [mg/l] y 500 [mg/l], respectivamente.

**A.5.4.2. Normativa Chilena de Calidad de Agua para uso en Riego
(NCh. 1333 /of. 78).**

La Norma Chilena Oficial NCh 1333 Of. 78, modificada en 1987, “Requisitos de Calidad del Agua para diferentes usos. Requisitos de Agua para Riego”, considera un conjunto de parámetros, los cuales presentan un valor máximo admisible en el agua utilizada para riego.

Si bien la NCh. 1333 incluye numerosos parámetros, dados los objetivos de este estudio sólo se presentan aquellos parámetros que han sido analizados como parte del proyecto de evaluación del problema de intrusión salina en la zona, y que se presentan en la Tabla A.5.4.2.

Tabla A.5.4.2. Extracto Norma Chilena 1333.

PARAMETRO	LIMITE MAXIMO
pH	-
Temperatura	-
Sólidos Suspendidos Totales	-
Cloruros	200 mg/l
Sulfatos	250 mg/l

Luego, teniendo en consideración los límites máximos establecidos para cada uno de los usos analizados, se establecerán comparaciones entre la normativa legal vigente en torno a los usos del recurso y la calidad determinada mediante análisis químico de las muestras recopiladas en las campañas en terreno, verificando su aplicabilidad como agua potable o para uso en riego.

A.5.4.3. Evaluación de Calidad Físico-Química de las aguas

Los parámetros que permiten evaluar un potencial problema de salinidad son la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos totales (SDT). La CE mide la concentración total de sales en solución en el agua. A mayor CE, mayor concentración de sales disueltas en el agua y por tanto mayores restricciones para su uso.

En términos de toxicidad del agua empleada para fines de riego, el sodio (Na), no se considera un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, pero sí es el catión más dañino del agua de riego.

La toxicidad por cloruro es muy común en agua de riego. El cloruro no es adsorbido por el suelo, por lo que se moviliza con la solución de suelo, es captado por plantas y se acumula en hojas. Si su concentración en las hojas excede la tolerancia del cultivo, se desarrollarán síntomas de daño hasta quemar la hoja, efecto que en algunos cultivos limita su comercialización. La toxicidad por cloruro puede ocurrir también por absorción directa por las hojas cuando se riega por aspersión.

A.5.4.4. Resultados

A continuación se presenta la comparación entre la normativa chilena vigente respecto a los requerimientos de calidad para consumo potable como para riego, y los resultados del análisis físico químico de las captaciones identificadas en terreno.

A.5.4.4.1. Estación El Tofo N°5.

Muestra 1. Estación El Tofo 5.			Legislación Vigente	
Muestra 1	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.08	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	1120	-	-
TDS [mg/l]	-	1298	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.0	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	243.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	114.0	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	210.4	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	86.8	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	28.1	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	2.8	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	102.3	-	-
RAS	-	2.442	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.852	10	-
N(NH ₃)	-	0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.01	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.2. Pozo APR Pueblo Los Choros Bajos.

Muestra 2. APR Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 2	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	8.01	7.44	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	1760	1588	-	-
TDS [mg/l]	-	1660	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	182.10	191.6	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	249.30	258.9	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	226.70	206.9	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	94.10	99.7	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	43.30	59.0	125	-
K ⁺ [mg/l]	4.20	4.20	-	-
Na ⁺ [mg/l]	152.40	120.5	-	-
RAS	-	2.365	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	1.89	2.479	10	-
N(NH ₃)	-	0.03	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.009	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

En relación al consumo potable de esta agua, se observa que todos los parámetros cumplen la normativa en relación a los parámetros analizados. Se concluye cierto riesgo para el parámetro cloruros, que dista muy poco de sobrepasar la norma, aunque bajo la versión actualizada de esta norma que está próxima a ser aprobada, se encuentra dentro de los límites permitidos.

En relación al consumo de esta agua para riego, se observa una excedencia en cerca de 50 mg/l en el contenido de cloruros, lo que podría ocasionar un problema de salinidad, afectando negativamente los cultivos, de tal forma de reducir la disponibilidad agua-suelo, disminuyendo el crecimiento y restringiendo el desarrollo de las raíces. En aguas de alta salinidad, la toxicidad del Na y Cl se hacen evidentes.

A.5.4.4.3. Pozo Comité de Regantes.

Muestra 3. Pozo Comité de Regantes.			Legislación Vigente	
Muestra 3	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.84	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	1705	-	-
TDS [mg/l]	-	1472	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.0	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	189.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	246.0	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	240.2	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	101.9	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	42.1	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	4.2	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	131.7	-	-
RAS	-	2.771	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.924	10	-
N(NH ₃)	-	0.02	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.011	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.4. Noria El Molino.

Muestra 4. Noria El Molino.			Legislación Vigente	
Muestra 4	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.52	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2210	-	-
TDS [mg/l]	-	1732	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.0	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	241.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	361.7	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	328.7	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	153.6	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	64.0	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	5.0	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	172.1	-	-
RAS	-	2.943	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	3.501	10	-
N(NH ₃)	-	0.04	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.017	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.5. Pozo Comité de Riego.

Muestra 5. Pozo Comité de Riego.			Legislación Vigente	
Muestra 5	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.64	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	1880	-	-
TDS [mg/l]	-	1354	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	195.1	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	229.3	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	206.9	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	97.6	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	39.5	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	3.9	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	127.6	-	-
RAS	-	2.754	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.842	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.012	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.6. Noria Comité de Riego.

Muestra 6. Noria Comité de Riego.			Legislación Vigente	
Muestra 6	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.84	7.83	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	2080	2110	-	-
TDS [mg/l]	-	1316	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	186.4	202.8	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	232.9	253.7	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	256.5	219.6	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	92.0	96.9	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	42.8	41.4	125	-
K ⁺ [mg/l]	4.6	4.6	-	-
Na ⁺ [mg/l]	145.6	137.8	-	-
RAS	-	2.952	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	2.008	2.455	10	-
N(NH ₃)	-	0.14	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.017	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

Teniendo en consideración que esta agua corresponde a agua de riego, se observa una concentración medianamente elevada en los parámetros de Cloruros y Sulfatos.

El ión sulfato no produce efectos específicos en suelos y plantas, sin embargo, contribuye a aumentar la salinidad de la solución en el suelo.

A.5.4.4.7. Noria Pueblo Los Choros.

Muestra 7. Noria Pueblo Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 7	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.31	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	3530	-	-
TDS [mg/l]	-	2758	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	346.3	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	680.9	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	619.3	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	250.3	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	104.3	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	8.1	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	342.7	-	-
RAS	-	4.591	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	4.122	10	-
N(NH ₃)	-	0.08	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.025	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.8. Noria Pueblo Los Choros.

Muestra 8. Noria Pueblo Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 8	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.15	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2440	-	-
TDS [mg/l]	-	2034	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	220.3	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	376.4	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	423.7	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	164.4	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	70.5	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	5.7	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	182.3	-	-
RAS	-	2.996	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	4.061	10	-
N(NH ₃)	-	0.04	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.014	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.9. Pozo Caseta Azul. Llano Los Choros.

Muestra 9. Pozo Caseta Azul.			Legislación Vigente	
Muestra 9	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.18	7.72	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	2620	2620	-	-
TDS [mg/l]	-	2308	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	180.9	193.6	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	595.3	565.9	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	359.2	310.3	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	197.2	175.8	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	70.7	72.4	125	-
K ⁺ [mg/l]	7.0	12.8	-	-
Na ⁺ [mg/l]	259.7	220.6	-	-
RAS	-	3.535	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	0.386	0.602	10	-
N(NH ₃)	-	0.1	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.018	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.10. Pozo Propiedad Sergio Cuellar. Llano Los Choros.

Muestra 10. Pozo Sergio Cuellar.			Legislación Vigente	
Muestra 10	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.74	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2800	-	-
TDS [mg/l]	-	2586	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	188.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	582.0	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	325.9	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	178.7	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	86.1	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	11.6	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	225.8	-	-
RAS	-	3.471	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.527	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.023	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.11. Noria Casa con Molino. Llano Los Choros.

Muestra 11. Noria Casa con molino.			Legislación Vigente	
Muestra 11	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.8	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	4610	-	-
TDS [mg/l]	-	2474	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	135.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1083.8	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	562.5	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	191.1	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	111.0	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	14.5	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	534.6	-	-
RAS	-	7.608	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.743	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.078	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.12. Noria Llano Los Choros.

Muestra 12. Noria Llano Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 12	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	8.05	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	4430	-	-
TDS [mg/l]	-	3286	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	119.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1111.6	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	559.7	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	198.3	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	100.6	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	14.5	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	650.9	-	-
RAS	-	9.389	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.507	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.072	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.13. Pozo Antonio Soler.

Muestra 13. Pozo Antonio Soler.			Legislación Vigente	
Muestra 13	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.26	7.3	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	18220	18140	-	-
TDS [mg/l]	-	13321	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	153.3	162.0	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	5921.5	5976.3	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	1451.0	1326.3	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	509.0	484.3	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	506.0	484.9	125	-
K ⁺ [mg/l]	100.6	107.0	-	-
Na ⁺ [mg/l]	2827.8	3017.9	-	-
RAS	-	23.188	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	0.059	0.446	10	-
N(NH ₃)	-	0.58	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.014	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

En relación a esta muestra, se observa un claro y excesivo aumento en los valores de parámetros relacionados con la presencia de agua salina. De esta forma se manifiesta un gran aumento en conductividad eléctrica, cloruros, sodio y sulfatos, cuyos altos valores se explican por la gran cercanía a la línea de costa.

El alto contenido salino de esta agua constituye un serio problema para uso en consumo de agua potable o para su uso en riego, debido a la alta sensibilidad de los cultivos a valores tan altos.

Como medida alternativa, el uso de esta agua puede presentar cierta aptitud para riego de árboles que no consideren consumo humano y que presenten una adaptación a ambientes costeros, como lo son eucaliptos, principalmente. Otra utilidad, debido a la gran limitación de su uso, es ocuparla para riego de caminos, de forma de reducir el polvo en suspensión y adicionalmente estabilizar los caminos evitando la formación de calaminas, y por lo tanto obteniendo una superficie de rodadura suave y más durable, con el consiguiente ahorro en mantenimiento.

A.5.4.4.14. Noria Las Cabras.

Muestra 14. Noria Las Cabras.			Legislación Vigente	
Muestra 14	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.25	7.71	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	14640	15510	-	-
TDS [mg/l]	-	12024	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	127.4	170.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	4640.4	4923.9	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	1272.6	1193.1	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	591.2	584.7	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	476.0	467.0	125	-
K ⁺ [mg/l]	92.9	116.3	-	-
Na ⁺ [mg/l]	2062.8	2170.2	-	-
RAS	-	16.233	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	1.548	0.814	10	-
N(NH ₃)	-	0.11	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.217	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

De igual forma que la muestra anterior analizada, se observa un claro y excesivo aumento en los valores de parámetros relacionados con la presencia de agua salina. De esta forma se manifiesta un gran aumento en conductividad eléctrica, cloruros, sodio y sulfatos, cuyos altos valores se explican por la gran cercanía a la línea de costa.

El alto contenido salino de esta agua constituye un serio problema para uso en consumo de agua potable o para su uso en riego, debido a la alta sensibilidad de los cultivos a valores tan altos. Como medida alternativa, el uso de esta agua puede presentar cierta aptitud para riego de árboles que no consideren consumo humano y que presenten una adaptación a ambientes costeros, como lo son eucaliptos, principalmente. Otra utilidad, debido a la gran limitación de su uso, es ocuparla para riego de caminos, de forma de reducir el polvo en suspensión y adicionalmente estabilizar los caminos evitando la formación de calaminas, y por lo tanto obteniendo una superficie de rodadura suave y más durable, con el consiguiente ahorro en mantenimiento.

A.5.4.4.15. Pozo Camino a Punta de Choros 1.

Muestra 15. Pozo camino a Pta. de Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 15	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.63	7.77	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	6000	6010	-	-
TDS [mg/l]	-	4764	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	81.2	86.6	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	1834.6	1805.1	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	454.2	415.1	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	259.6	253.2	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	259.4	252.2	125	-
K ⁺ [mg/l]	25.5	26.6	-	-
Na ⁺ [mg/l]	570.5	541.0	-	-
RAS	-	5.755	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	0.439	0.529	10	-
N(NH ₃)	-	0.02	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.014	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.16. Pozo Camino a Punta de Choros 2.

Muestra 16. Pozo camino a Pta. de Choros 2.			Legislación Vigente	
Muestra 16	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.43	7.72	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	4930	5140	-	-
TDS [mg/l]	-	4138	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	101.6	106.0	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	1409.9	1463.6	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	361.3	331.5	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	246.3	238.4	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	215.2	217.6	125	-
K ⁺ [mg/l]	19.5	21.9	-	-
Na ⁺ [mg/l]	386.6	502.6	-	-
RAS	-	5.662	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	0.106	0.230	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.012	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.17. Noria Caseta malla Rachel. Sector Lengua de duna.

Muestra 17. Noria Caseta Malla Rachel.			Legislación Vigente	
Muestra 17	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.82	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	4230	-	-
TDS [mg/l]	-	3266	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	147.9	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	975.7	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	425.0	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	176.8	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	142.2	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	16.3	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	404.2	-	-
RAS	-	5.487	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.102	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.03	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.18. Pozo Llano Los Choros.

Muestra 18. Pozo Llano Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 18	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.44	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	3690	-	-
TDS [mg/l]	-	3080	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	206.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	871.2	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	412.3	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	242.7	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	170.8	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	22.8	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	194.7	-	-
RAS	-	2.340	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.447	10	-
N(NH ₃)	-	0.04	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.065	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.19. Casa Llano Los Choros.

Muestra 19. Pozo Llano Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 19	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.63	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	4970	-	-
TDS [mg/l]	-	4070	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	156.1	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1247.5	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	599.4	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	300.0	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	177.3	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	32.1	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	420.8	-	-
RAS	-	4.760	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.547	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.030	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.20. Camping El Oasis.

Muestra 20. Camping El Oasis.			Legislación Vigente	
Muestra 20	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.23	7.34	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	6580	6780	-	-
TDS [mg/l]	-	5668	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	131.0	138.6	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	1660.5	1724.9	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	1136.5	1150.7	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	475.4	493.5	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	256.6	256.6	125	-
K ⁺ [mg/l]	33.7	43.2	-	-
Na ⁺ [mg/l]	558.2	561.4	-	-
RAS	-	5.105	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	0.138	0.324	10	-
N(NH ₃)	-	0.11	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.028	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

Debido a los altos contenidos en parámetros como cloruros, sulfatos, magnesio y sodio, principalmente, esta agua está imposibilitada para ser usada como consumo potable o para riego, al igual que la mayoría de las muestras consideradas. Por lo que se considera un uso alternativo de características similares a las recomendadas en las muestras con alto contenido salino.

A.5.4.4.21. Pozo Llano Los Choros 2.

Muestra 21. Pozo Llano Los Choros 2.			Legislación Vigente	
Muestra 21	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.23	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	3900	-	-
TDS [mg/l]	-	3573	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	257.3	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	947.8	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	430.7	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	244.1	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	179.9	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	23.7	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	270.1	-	-
RAS	-	3.197	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.580	10	-
N(NH ₃)	-	0.03	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.042	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.22. Pozo APR Punta de Choros.

Muestra 22. APR Punta de Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 22	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	7.78	7.55	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	1885	1985	-	-
TDS [mg/l]	-	1520	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	0.00	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	179.7	180.9	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	376.0	383.3	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	230.2	213.2	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	104.3	108.0	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	45.9	43.4	125	-
K ⁺ [mg/l]	5.2	5.2	-	-
Na ⁺ [mg/l]	204.2	197.9	-	-
RAS	-	4.066	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	2.479	2.968	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.019	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A medida que se acerca a la costa, el problema de salinidad se hace más intenso, lo cual se ve reflejado en el continuo aumento de parámetros como cloruros, sulfatos, y sodio, ligados a la mayor cercanía con el mar (Figura A.5.2.2).

El aumento mayor se produce en relación al contenido de cloruro, por lo que la salinidad en el agua comienza a intensificarse.

A.5.4.4.23. Pozo Los Choros N°2.

Muestra 23. Pozo Los Choros N°2.			Legislación Vigente	
Muestra 23	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.82	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	1997	-	-
TDS [mg/l]	-	1964	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	4.8	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	181.4	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	369.4	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	285.5	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	134.8	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	50.2	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	9.7	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	169.7	-	-
RAS	-	3.168	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.949	10	-
N(NH ₃)	-	0.05	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.033	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.24. Noria Desembocadura Qda. Los Choros.

Muestra 24. Desembocadura Los Choros.			Legislación Vigente	
Muestra 24	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.98	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2000	-	-
TDS [mg/l]	-	1507	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	206.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	362.4	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	247.2	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	117.1	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	48.4	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	5.5	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	180.4	-	-
RAS	-	3.540	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	1.761	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.046	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.25. Noria Parcela Mateo Ossandon.

Muestra 25. Parcela Mateo Ossandon.			Legislación Vigente	
Muestra 25	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.96	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2060	-	-
TDS [mg/l]	-	2029	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	206.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	352.0	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	286.2	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	124.5	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	54.7	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	8.9	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	182.8	-	-
RAS	-	3.435	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.757	10	-
N(NH ₃)	-	0.14	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.009	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.26. Noria Desembocadura Qda. Los Choros 2.

Muestra 26. Desembocadura Los Choros 2.			Legislación Vigente	
Muestra 26	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.85	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	2050	-	-
TDS [mg/l]	-	1634	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	228.6	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	355.4	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	289.1	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	137.4	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	53.1	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	8.2	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	166.9	-	-
RAS	-	3.063	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.189	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.059	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.27 Pozo Llano Los Choros 3

Muestra 27. Pozo Llano Los Choros 3.			Legislación Vigente	
Muestra 27	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.37	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	4520	-	-
TDS [mg/l]	-	3480	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	171.2	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1198.7	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	454.8	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	267.1	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	181.2	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	18.2	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	376.1	-	-
RAS	-	4.353	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.104	10	-
N(NH ₃)	-	< 0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.020	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.28. Pozo Llano Los Choros 4.

Muestra 28. Llano Los Choros 4.			Legislación Vigente	
Muestra 28	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.49	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	5200	-	-
TDS [mg/l]	-	4460	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	119.7	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1526.3	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	240.8	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	321.5	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	212.4	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	16.3	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	378.7	-	-
RAS	-	4.022	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.069	10	-
N(NH ₃)	-	0.01	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.015	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

A.5.4.4.29. Noria Llano Los Choros 5.

Muestra 29. Llano Los Choros 5.			Legislación Vigente	
Muestra 29	Campaña 1. Mayo 2005	Campaña 2. Ago-Sep 2005	NCh. 409	NCh. 1333
pH [u. pH]	-	7.83	6 - 8.5	-
C. Elect. [μ S/cm]	-	5310	-	-
TDS [mg/l]	-	4798	1000	-
CO ₃ ⁻² [mg/l]	-	0.00	-	-
HCO ₃ ⁻ [mg/l]	-	107.0	-	-
Cl ⁻ [mg/l]	-	1575.1	250(*)	200
SO ₄ ⁻² [mg/l]	-	242.2	250(**)	250
Ca ⁺² [mg/l]	-	301.5	-	-
Mg ⁺² [mg/l]	-	217.6	125	-
K ⁺ [mg/l]	-	18.5	-	-
Na ⁺ [mg/l]	-	397.8	-	-
RAS	-	4.262	-	-
N(NO ₃ ⁻) [mg/l]	-	0.177	10	-
N(NH ₃)	-	0.05	-	-
P(PO ₄ ⁻³) [mg/l]	-	0.037	-	-

(*): Mayor Tolerancia (400 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

(**): Mayor Tolerancia (500 [mg/l]) de acuerdo a la actualización de la NCh 409.

En la Figura A.5.4.1 se presenta el mapa de la zona en estudio, en el cual se identifican aquellos puntos que presentan limitaciones en cuanto a los usos del agua para fines de consumo de agua potable y uso en riego, de acuerdo a lo determinado en la legislación vigente respectiva.

Es importante mencionar que la totalidad de las muestras analizadas presentan contenidos de SDT mayores a los aceptables en la norma para consumo de agua potable, pero en términos de contenidos de cloruros y sulfatos, ligados en forma más directa al problema de intrusión salina, aquellos puntos que se exceden en los estándares de las normas actualmente vigentes son los que cobran mayor importancia en este estudio.

Otro punto a destacar corresponde la pronta actualización de la norma para consumo de agua potable en los parámetros cloruros y sulfato. En comparación a los requerimientos para uso en riego, se observa que esta norma presenta mayores restricciones para dicho uso en relación al uso de esta agua para consumo potable, por

lo tanto, aquellas muestras que superan la normativa para consumo de agua potable presentan también restricciones para el uso en riego.

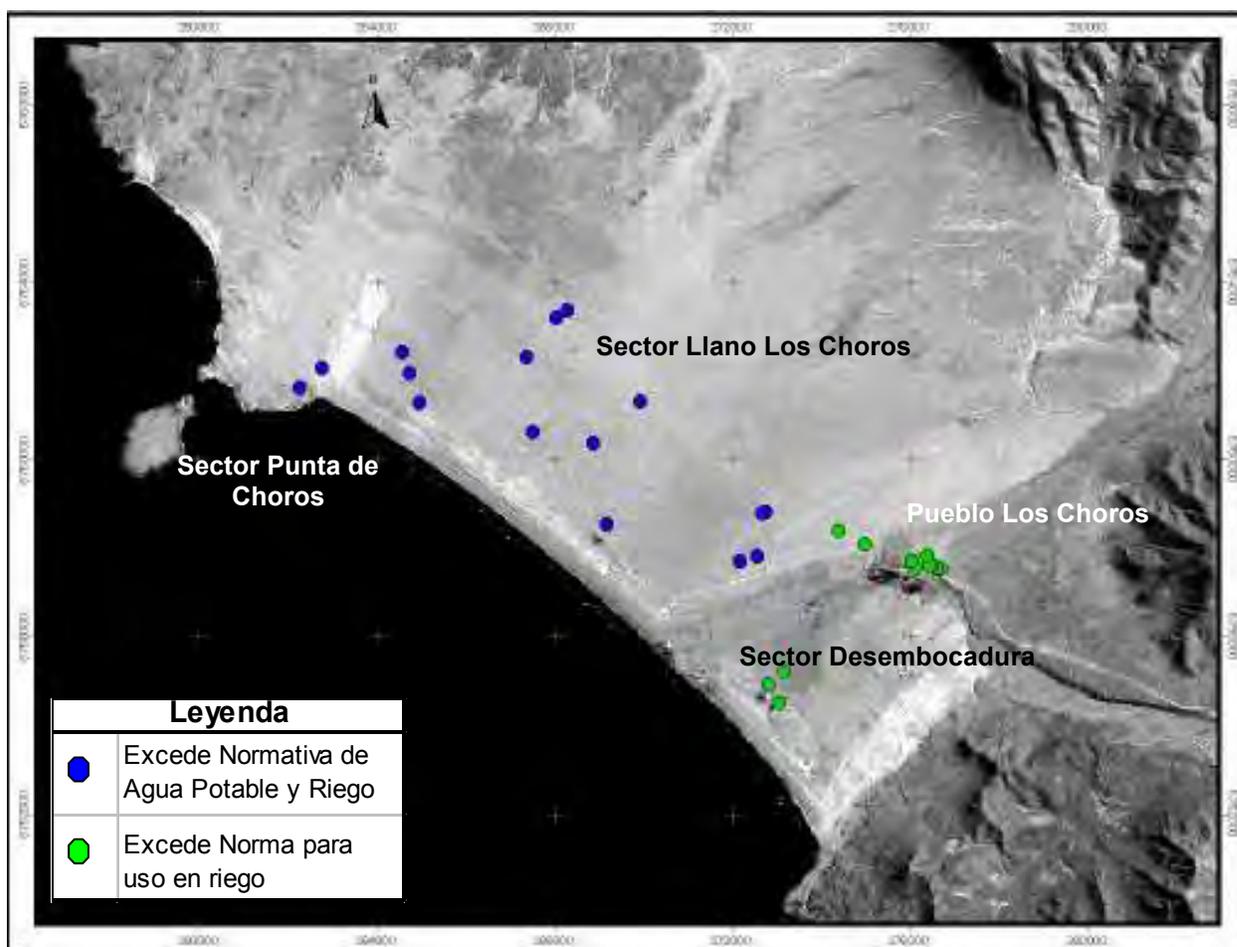


Figura A.5.4.1. Limitaciones en los usos del agua. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la totalidad de los puntos muestreados presenta limitaciones para su consumo, por lo que se concluye que los estándares de calidad del recurso hídrico subterráneo son deficientes para las actividades que se desarrollan en la zona.

ANEXO 5.5

EQUIPAMIENTO UTILIZADO EN TRABAJOS DE TERRENO.

A.5.5. EQUIPAMIENTO UTILIZADO EN TERRENO

En relación a los equipos utilizados en terreno, es importante mencionar que para el desarrollo del presente estudio, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile cuenta con un equipo de medición multiparámetros que proporciona una gran ventaja en el análisis de muestras in situ.

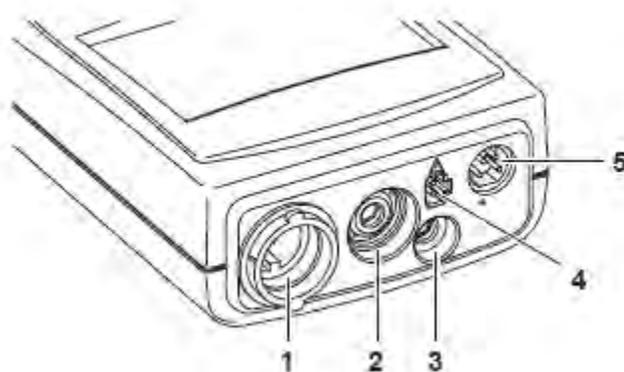
A.5.5.1. Equipo Multi 340i, WTW.

Este instrumento de medición permite obtener in situ, pH, Oxígeno Disuelto y Conductividad Eléctrica. En adición a la implementación original del equipo, se cuenta con un equipo de similares características, modelo pH/Ion 340i, que por medio de un electrodo de referencia permite medir concentración de amoníaco y nitratos. A continuación se da una guía de las instrucciones de operación y mantenimiento del equipo, que permitan facilitar el trabajo en actividades en terreno a futuro.

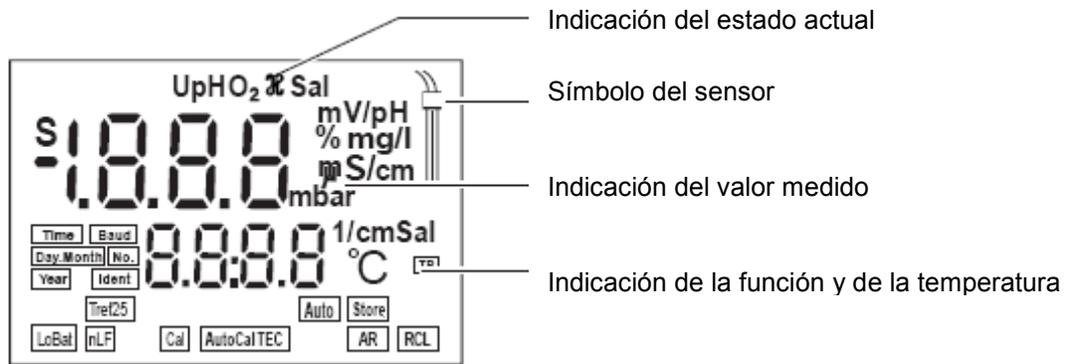
A.5.5.1.1. Display y bujes de conexión, Multi 340i.

Conexiones Varias

Al conectar sensores al instrumento debe verificarse que éstos no emitan tensiones o corrientes inadmisibles que pudieran deteriorar el equipo.



- 1 Sensor de oxígeno o célula conductímetra
- 2 Sonda de medición del pH
- 3 Sensor térmico pH
- 4 Transformador de alimentación para conexión a la red
- 5 Interfase serial RS232



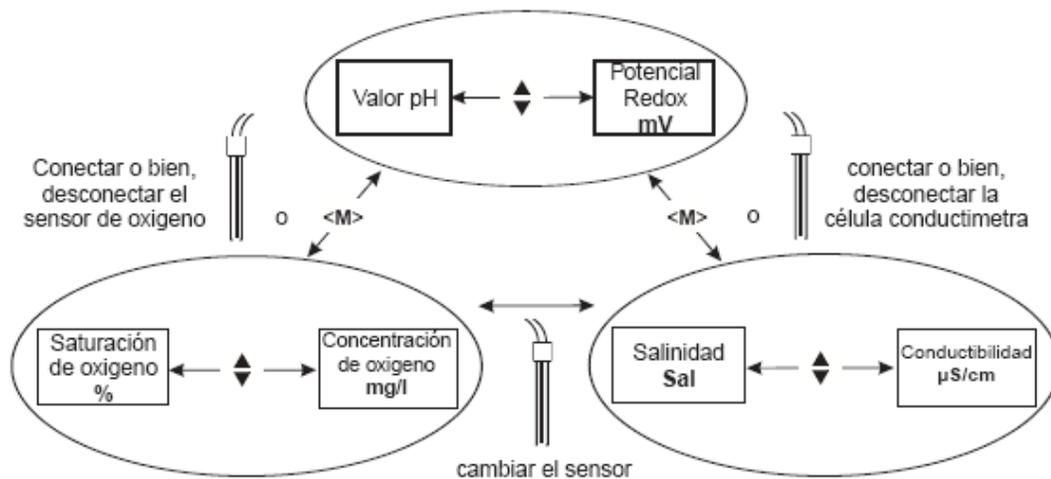
A.5.5.1.2. Conexión a la red.

El instrumento puede operar mediante conexión a la red eléctrica o bien, de forma independiente con el uso de pilas.

Al utilizar el equipo por medio de la red eléctrica, se debe emplear exclusivamente el transformador de alimentación original WTW, en un enchufe de la red que sea fácilmente accesible.

A.5.5.1.3. Medición.

En el siguiente esquema se resumen los modos de medición del equipo:



Dentro de las funciones especiales de medición del equipo se cuentan:

AutoRead (Control de deriva). La función AutoRead verifica la estabilidad de la señal de medición (excepto al medir el potencial Redox). Activar la función AutoRead con <AR>. Para iniciar la medición AutoRead, presionar <RUN/ENTER>. Durante la medición AutoRead la indicación *AR* parpadea intermitentemente, hasta que la señal medida se estabiliza. La medición con AutoRead puede ser interrumpida en todo momento mediante <RUN/ENTER>, siendo registrado el valor actual.

Medición de la temperatura durante mediciones del valor pH. Se pueden efectuar mediciones del valor pH con y sin sensor térmico, asimismo con el sensor térmico de un sensor de oxígeno o de una célula conductímetra. El instrumento reconoce el tipo del sensor empleado y conecta automáticamente al modo correcto para la medición de temperatura (indicación *TP*).

Ingreso manual de la temperatura: Manteniendo oprimida la tecla <RUN/ENTER>, ingresar el valor con <▲> <▼>.

Selección del rango de medición AutoRange. Para las mediciones del oxígeno y de la conductibilidad se dispone de varios rangos de medición. La función AutoRange hace que el instrumento cambie automáticamente al siguiente rango de medición en el momento de sobrepasar el rango de medición actual.

Corrección del contenido en sal al medir el O₂. Al efectuar mediciones de la concentración de oxígeno en soluciones con un contenido en sal de más de 1 g/l, es necesario corregir el contenido. Para ello presionar la tecla <CAL> repetidamente hasta que en el display aparezca Sal. Luego, con la tecla <▲> <▼> ingresar el contenido en sal. Manteniendo presionada la tecla <RUN/ENTER> y conectando <▲>, activar la función de corrección del contenido en sal (indicación *SAL*). Para desconectar la función, presionar <▼> manteniendo oprimida la tecla <RUN/ENTER>.

Temperatura de referencia de la conductividad. La temperatura de referencia puede ser conmutada entre 20 °C y 25 °C. En el display aparece el valor elegido *Tref20* o bien, *Tref25*. Usualmente los valores de conductividad están referidos a 25°C, por lo cual se adopta este valor.

Si bien el equipo utilizado permite medir numerosos parámetros, para fines del presente informe serán expuestas aquellas funciones que tienen aplicabilidad directa en el análisis del problema de intrusión salina en Quebrada Los Choros, como son la medición de conductividad eléctrica, pH y temperatura.

A.5.5.2. Medición de pH.

- **Calibración de pH.**

La calibración de la sonda de medición de pH se realiza debido al desgaste de los electrodos del pH, y al desgastarse, cambia la asimetría (punto cero) y la pendiente del electrodo de pH. En consecuencia, el instrumento indica un valor erróneo, inexacto. Con la calibración, los valores actuales de asimetría y de pendiente del electrodo son determinados nuevamente y archivados en memoria.

El sistema se debe calibrar a intervalos regulares y principalmente después de las siguientes acciones:

- Después de enchufar otro electrodo.
- Cuando parpadee el símbolo del sensor.
- Cuando ya ha transcurrido el intervalo de calibración.
- Si ha sido interrumpido el suministro eléctrico, por ejemplo, al cambiar las pilas.

Esta calibración es completamente automática y puede ser de un punto o de punto doble y se encuentra especialmente adaptada a las soluciones tamponadas técnicas de la WTW. El medidor reconoce automáticamente dichas soluciones. Dependiendo de la

configuración, el instrumento indica el valor tampón nominal correspondiente o la tensión actual del electrodo en mV. La calibración puede ser interrumpida / cancelada después de la primera solución tamponada. Esto corresponde a una calibración de un punto. El instrumento aplica la pendiente Nernst (-59,2 mV/pH a 25 °C) y determina la asimetría de la sonda de medición.

Una vez realizada la calibración de la sonda, se está en condiciones de realizar una medición adecuada.

A.5.5.3. Medición de Conductividad Eléctrica.

Las mediciones de la conductividad eléctrica pueden ser efectuadas con el Multi 340i únicamente con la célula de medición TetraCon325.

Antes de realizar la medición con la sonda, se deben ejecutar las siguientes actividades preparativas:

1. Conectar la célula conductímetro al instrumento. El instrumento cambia automáticamente a medición de conductividad (indicación del estado actual χ). Si la célula conductímetro ya está enchufada, presionar la tecla <M> repetidamente hasta que aparezca la indicación del estado actual χ o bien, *Sal*.
2. Calibrar el instrumento de medición con célula de medición o verificar la constante celular asignada.
3. Verificar la constante celular asignada o calibrar el instrumento con la célula de medición.
4. Con <▲> <▼> alternar entre los modos de medición “conductibilidad” (χ en $\mu\text{S}/\text{cm}$) o “salinidad” (SAL).

- **Verificar la constante celular.**

1. Presionar repetidamente la tecla <RCL> hasta que aparezca *CAL disp* en el display.



2. Presionar la tecla <RUN/ENTER> repetidas veces, hasta que aparezca la constante celular últimamente calibrada.



3. Volver al modo de medición: presionar la tecla <M> cuando en el display aparece la constante correcta.
4. Si se desea calibrar la constante celular, se debe revisar el siguiente punto de este informe.

- **Calibración célula de conductividad eléctrica.**

La calibración de la sonda de medición de conductividad eléctrica se realiza debido a que producto del envejecimiento, la constante celular cambia ligeramente. En consecuencia, el instrumento indica un valor erróneo, inexacto. Las características originales de la célula pueden ser recuperadas en la mayoría de los casos, con una buena limpieza. Por medio de la calibración es determinado el valor actual de la constante celular, que es registrado y archivado en la memoria del instrumento.

El sistema se debe calibrar a intervalos regulares.

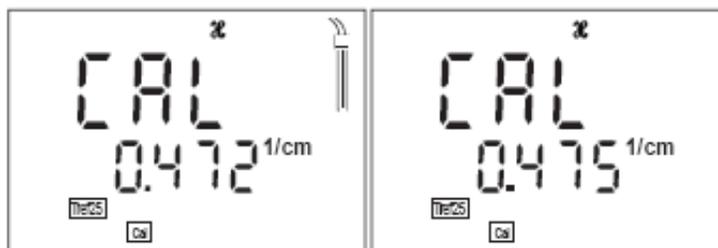
La evaluación de la calibración, se determina una vez realizado el proceso de calibración. El instrumento evalúa automáticamente el estado actual de calibración. El valor de cada evaluación es indicado en el display.

Indicación	Constante celular [cm^{-1}]
	0,450 ... 0,500 cm^{-1}
E3 Solucionar el problema de acuerdo al capítulo 8 DIAGNÓSTICO Y CORRECCION DE FALLAS	fuera del rango de 0,450 ... 0,500 cm^{-1}

- **Determinación de la constante celular.**

La constante celular puede ser determinada de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Presionar repetidamente la tecla <CAL> hasta que aparezca χ .
2. Presionar la tecla <RUN/ENTER>. Aparece la indicación CAL. Asimismo:
 - La constante celular actual calibrada o bien,
 - La constante celular fija 0.475 1/cm (con símbolo del sensor en el display). En este caso los parámetros de medición han sido inicializados.



3. Sumergir la célula conductímetra en la solución de control estándar 0.01 mol/l KCl.
4. Presionar la tecla <RUN/ENTER>. Comienza la medición AutoRead para determinar la constante celular. La indicación en el display AR parpadea, hasta que el instrumento reconoce un valor estable. La constante celular determinada

aparece en el display. El instrumento archiva automáticamente en memoria el valor de la constante celular.



5. Volver al modo de medición: Presionar la tecla <M>. La constante celular determinada es adoptada para la medición.

Una vez realizado este procedimiento, la sonda se encuentra en condiciones para realizar una medición óptima.

- **Funciones adicionales de la sonda de conductividad eléctrica.**

Sensor de temperatura. La célula de medición TetraCon 325 posee un sensor de temperatura integrado. Esto es indicado en el display con *TP*.

Compensación de la temperatura. La compensación no lineal de temperatura está ajustada de fijo y es indicada en el display con *nLF*.

Temperatura de referencia Tref. La temperatura de referencia (Tref) es conmutable entre 20 °C y 25 °C. En el display aparece el valor elegido *Tref20* o bien, *Tref25*.

Nota: Para mayor información al respecto y sobre accesorios adicionales, consultar el catálogo WTW o bien, en Internet. La empresa representante en Chile es Merck S.A., ubicada en calle Francisco de Paula Taforó # 1981. Santiago.