



# RECURSOS HÍDRICOS REGIÓN DE TARAPACÁ

Diagnóstico y Sistematización de la Información





Imagen de portada: *Fertilidad para el pueblo* de Andrea Tirado (INTI), artista visual de la comuna de Camiña. La rana, símbolo de fertilidad y abundancia del agua en la cultura aymara, lleva a su vez una *chakana* o cruz andina en representación del pueblo.

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de alguna parte esta obra, incluyendo el diseño de la cubierta, sin contar con la autorización de los autores. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Ley N° 17.336).

© UNAP - Universidad Arturo Prat, 2013.

ISBN: 978 956 302 081 - 6

**CIDERH, Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos**

Calle Vívar 493, 3er Piso

Edificio Don Alfredo

Iquique, CHILE

Fono: (56)(57) 2 530800

email: [contacto@ciderh.cl](mailto:contacto@ciderh.cl)

[www.ciderh.cl](http://www.ciderh.cl)

Impreso en Chile.

# RECURSOS HÍDRICOS REGIÓN DE TARAPACÁ

Diagnóstico y Sistematización de la Información



## Autores

Elisabeth Lictevout

*Hidrogeóloga – Gestión Integrada de Recursos Hídricos  
Dirección Científica*

Constanza Maass

*Geógrafa*

Damián Córdoba

*Ing. Geólogo – Hidrogeólogo*

Venecia Herrera

*Dra. en Ciencias, mención Química*

Reynaldo Payano

*Ing. Civil – Dr. (c) en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos*

## Asistentes

Jazna Rodríguez

*Ing. Civil Ambiental, Analista SIG*

José Aguilera

*Ing. Civil Ambiental egresado*

Priscila Beltrán

*Analista Química*





Luz Ebensperger Orrego,  
Intendente Región de Tarapacá.

# Prólogo

La Región de Tarapacá está ubicada en pleno Desierto de Atacama, una de las zonas más áridas del planeta, por lo que el agua, además de ser un recurso no renovable, es un recurso de extremo valor para nuestra región. Y es por ello que como Gobierno Regional de Tarapacá consideramos que la creación del Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos, CIDERH, fue considerado un elemento primordial para enfrentar con claridad los desafíos en esta materia.

El Presidente Sebastián Piñera nos ha mandado para generar el desarrollo y el progreso en nuestras regiones, pero un desarrollo que vaya de la mano con el medio ambiente, con nuestros recursos, que son diferentes en cada zona de Chile. Nos entregó las facultades para, desde Tarapacá, encontrar las políticas públicas regionales que nos entreguen la información necesaria respecto del recurso hídrico y que, al mismo tiempo, nos permita protegerlo, sobretodo en esta zona en que resulta tan escaso.

Durante los últimos tres años no hemos estado ajenos a los problemas generados por la explotación ilegal de los pozos de agua subterránea y que, en este libro, se destaca como el principal aportador permanente de este recurso. Como autoridades, hemos fiscalizado constantemente esta situación a través de los servicios correspondientes, teniendo como norte la protección de nuestro patrimonio hídrico. Radica también en esto la importancia de contar con los datos que establezcan la clara existencia del recurso hídrico en la región.

Nuestra geografía es muy diversa y hemos sabido convivir con ella y aprovechar sus bondades. Y para continuar en esta senda, queremos tener un diagnóstico completo sobre los recursos hídricos de Tarapacá y este importante documento estará a disposición de todos los ciudadanos, como una manera de usar responsablemente el agua; y nosotros seremos los primeros en cumplir con ese compromiso que estableció este gobierno: un desarrollo sustentable en Tarapacá y en todo Chile.

Agradezco la colaboración de cada una de las personas que permitieron editar este trabajo investigativo, pero especialmente, de los tarapaqueños que aman esta tierra, y respetan y defienden el legado de esta región; una de las más áridas de este lado del planeta, pero que camina de forma pionera, a pasos agigantados hacia el ansiado desarrollo de Tarapacá y de nuestro querido país.

# Abreviaciones y Símbolos

ARM	Media Residual Absoluta
BNA	Banco Nacional de Aguas
CE	Conductividad Eléctrica
CEAZA	Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas
CENIMA	Centro de Investigación en Medio Ambiente
CIPEP	Curso Interamericano de Preparación y Evaluación de Proyectos
CIDERH	Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos
CMCC	Compañía Minera Cerro Colorado
CMDC	Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi
CMQB	Compañía Minera Quebrada Blanca
CONICYT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
COSAYACH	Compañía de Salitre y Yodo de Chile
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
DAD-UNAP	Departamento Agricultura del Desierto - Universidad Arturo Prat
DEM	Modelos de Elevación Digital
DGA	Dirección General de Aguas
DGF	Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DICTUC	Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile
DICUC	Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
DR	Dirección de Riego
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EIDAP-UC	Estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache de la Pontificia Universidad Católica de Chile
ENAP	Empresa Nacional del Petróleo
GDB	Geodatabase
GGE	GeoGlobal Energy
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HMC	Haldeman Mining Company
ID_CDOC	Identificador del Centro de Documentación
IGM	Instituto Geográfico Militar
INN	Instituto Nacional de Normalización
IRH	Ingeniería y Recursos Hidráulicos
JICA	Japan International Cooperation Agency

Kh	Conductividad hidráulica horizontal
Kv	Conductividad hidráulica vertical
MOP	Ministerio de Obras Públicas
ND	Derecho de aprovechamiento.
NR	Derechos de aprovechamiento regularizados.
NRMS	Error cuadrático medio normalizado
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer
PEST	Parameter Estimation
PUC	Pontificia Universidad Católica de Chile
PSA	Plan de Seguimiento Ambiental
$r^2$	Coefficiente de Determinación
RMS	Error cuadrático medio
SCM	Sociedad Contractual Minera
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SENDOS	Servicio Nacional de Obras Sanitarias
SGA	Soluciones en Gestión Ambiental
SIG	Sistema de Información Geográfica
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios
SQM	Sociedad Química y Minera de Chile
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SERPLAC	Secretaría Regional de Planificación
SMA	Soil Moisture Accounting
s.n.m.	Sobre el nivel del mar
Ss	Almacenamiento específico
STD	Solidos Totales Disueltos
Sy	Rendimiento específico
UA	Usuario Antiguo (dicho de: Derecho de Aprovechamiento de Aguas).
UNAP	Universidad Arturo Prat
UCN	Universidad Católica del Norte
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USGS	United States Geological Survey
UTM	Proyección Universal Transversal de Mercator
WGS	World Geodetic System
$\bar{x}$	Media aritmética
$\sigma$	Desviación estándar



## Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de los actores públicos, privados y académicos que generan información sobre los recursos hídricos en la Región de Tarapacá.

Nuestro profundo reconocimiento está dirigido al equipo regional de la Dirección General de Aguas, especialmente a Javier Vidal como Director Regional, y a Pedro Carril, Juan Salas y Waldo Solar por su total disposición en entregar, no solamente, la información disponible sino también su conocimiento de la región.

Queremos destacar la muy buena disposición de todos los servicios públicos contactados en facilitar información: la Corporación Nacional de Fomento a la Producción (CORFO), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI), la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).

Nuestro agradecimiento a las empresas que respondieron a nuestras insistentes solicitudes y dedicaron tiempo en buscar y revisar minuciosamente la información disponible: Aguas del Altiplano, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Cerro Colorado, Compañía Minera Quebrada Blanca, Compañía Minera SQM, Compañía Minera HMC, Compañía Minera Bullmine y las consultoras Servicios de Ingeniería SITAC y Geohidrología.

En la parte académica, agradecemos a la Universidad Arturo Prat, en especial a Emma Torres, Directora del Núcleo Central de Información Regional, por entregar su valioso conocimiento para la realización del Centro de Documentación y a Jorge Arenas, Académico de la Facultad de Recursos Naturales Renovables; a la Universidad de Chile, la Pontificia Universidad Católica de Chile, la Universidad Católica del Norte, la Estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache y el Centro de Estudios de Humedales.

Finalmente, no podemos dejar de agradecer a todos quienes de una u otra manera apoyaron incondicionalmente a los autores durante las distintas etapas de este trabajo

# Índice General

	Pág.		Pág.
Prólogo .....	5	4.1. Derechos de Aprovechamiento de Aguas subterránea.....	42
Símbolos y Abreviaciones .....	6	4.2. Derechos de Aprovechamiento de Aguas superficiales .....	42
Agradecimientos .....	9	4.3. Demanda comprometida .....	43
Índice General .....	10	<b>Capítulo III. Análisis por zona</b>	
Índice de Figuras .....	12	1. Zona Altiplánica .....	47
Índice de Tablas .....	14	1.1. Introducción.....	47
Resumen Ejecutivo .....	16	1.1.1. Estudios .....	47
<b>Capítulo I. Introducción</b>		1.1.2. Datos.....	48
1. Presentación CIDERH.....	23	1.1.3. Análisis de la información .....	50
2. Presentación del proyecto .....	24	1.2. Hidrografía.....	51
3. Metodología.....	24	1.3. Hidrología e Hidrogeología .....	52
3.1. Etapa I. Recopilación de la información.....	24	1.3.1. Hidrogeología .....	52
3.2. Etapa II. Revisión de la información .....	25	1.3.2. Hidrología .....	55
3.3. Etapa III. Sistematización de la información .....	26	1.4. Calidad del Agua .....	61
3.4. Etapa IV. Análisis crítico.....	26	1.5. Conclusión.....	66
3.5. Etapa V. Difusión y transferencia.....	26	2. Zona Pampa del Tamarugal .....	67
3.6. Etapa VI: Actualización .....	27	2.1. Introducción .....	67
4. Región de Tarapacá: ubicación y descripción demográfica .....	27	2.1.1. Estudios.....	67
<b>Capítulo II. Análisis regional</b>		2.1.2. Datos.....	67
1. Geología y geomorfología .....	29	2.1.3. Análisis de la información .....	68
1.1. Aspectos generales .....	29	2.2. Hidrografía.....	75
1.2. Evolución geológica .....	29	2.3. Hidrología e Hidrogeología .....	76
1.3. Tectónica y vulcanismo.....	32	2.3.1. Subcuencas de Aroma y Soga.....	76
1.4. Descripción de las principales unidades estratigráficas .....	32	2.3.2. Subcuenca de Tarapacá.....	76
1.5. Depósitos de interés económico.....	33	2.3.3. Subcuenca de Quipisca y Juan Morales .....	77
1.6. Cartografía geológica .....	34	2.3.4. Subcuenca de Quisma .....	77
1.7. La Pampa del Tamarugal.....	34	2.3.5. Subcuenca de Chacarilla .....	80
2. Hidrología e Hidrogeología.....	35	2.3.6. Subcuenca Ramada y Chipana.....	80
3. Calidad del agua .....	38	2.3.7. Acuífero Pampa del Tamarugal.....	80
4. Demanda y uso del agua .....	40	2.3.8. Cuenca Pampa del Tamarugal.....	83
		2.4. Calidad del agua.....	89
		2.5. Conclusión.....	92

	Pág.		Pág.
3. Zona Salar de Llamara - Río Loa .....	93	2.1. Estaciones de monitoreo .....	113
3.1. Introducción .....	93	2.1.1. Estación meteorológica .....	113
3.1.1. Estudios .....	93	2.1.2. Estación fluviométrica .....	113
3.1.2. Datos .....	94	2.1.3. Estación piezométrica .....	114
3.2. Hidrografía .....	96	2.1.4. Estación de calidad de agua .....	115
3.3. Hidrología e hidrogeología .....	98	2.1.5. Estación de agua de niebla .....	116
3.3.1. Subcuencas de Guatacondo, Maní, Mal Paso y otras ....	98	2.2. Delimitaciones Hidrográficas .....	116
3.3.2. Acuífero Salar de Llamara .....	98	2.2.1. Cuencas hidrográficas .....	116
3.3.3. Cuenca de Llamara .....	99	2.2.2. Acuíferos .....	117
3.4. Calidad del agua .....	102	2.2.3. Glaciares .....	117
3.5. Conclusión .....	103	2.3. Elementos con componente legal .....	118
4. Zona Camiña-Camarones .....	104	2.3.1. Pozos de extracción .....	118
4.1. Introducción .....	104	2.3.2. Peticiones de derechos de agua subterránea y derechos de agua superficial .....	118
4.1.1. Estudios .....	104	2.3.3. Evaluación de impacto ambiental .....	119
4.1.2. Datos .....	104	2.4. Coberturas cartográficas .....	119
4.2. Hidrografía .....	106	2.4.1. Cartas geológicas .....	119
4.3. Hidrología e hidrogeología .....	106	2.4.2. Cartas geomorfológicas .....	119
4.3.1. Hidrogeología .....	106		
4.3.2. Hidrología .....	106	<b>Capítulo V. Conclusión y Recomendaciones</b>	
4.4. Calidad del agua .....	107	Conclusión y Recomendaciones .....	147
4.5. Conclusión .....	107	Anexos .....	151
5. Zona Costera .....	108	Anexo 1: Fichas Síntesis por Zonas Hidrográficas .....	151
5.1. Introducción .....	108	Zona Altiplánica .....	151
5.1.1. Estudios .....	108	Zona Pampa del Tamarugal .....	165
5.1.2. Datos .....	109	Zona Llamara - Río Loa .....	185
5.2. Hidrografía .....	109	Zona Camiña - Camarones .....	193
5.3. Hidrología e hidrogeología .....	109	Zona Costera .....	199
5.4. Calidad del agua .....	110	Anexo 2: Bibliografía .....	206
5.5. Conclusión .....	110	Anexo 3: Glosario .....	216
		<b>Capítulo IV. Observatorio del agua</b>	
1. Centro de Documentación .....	111		
2. Sistema de Información Geográfica web .....	112		

# Índice de Figuras

N° de la Figura	Pág.	N° de la Figura	Pág.
1. Etapas metodológicas. ....	24	23. Mapa con valores medios anuales de caudal superficial (l/s) por estación según PUC (2009) y GSF Ing. (2010). ....	57
2. Documentación recopilada según tipo de institución. ....	25	24. Serie cronológica de caudales registrados en las estaciones de Piga en Collacagua (A) y Collacagua en Peñablanca (B). ....	58
3. Documentos recopilados por década. ....	25	25. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Isluga (A), río Cariquima (B) y río Cancosa (C). ....	62
4. Proporción de expedientes sistematizados según estado de aprobación. ....	25	26. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica en aguas del río Collacagua en Peñablanca (A) y río Piga (B). ....	62
5. División política y administrativa de la Región de Tarapacá. ....	27	27. Delimitación de sectores Altiplano Norte y Altiplano Sur. ....	64
6. Corte geológico - Región de Tarapacá. ....	30	28. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector norte del Altiplano. ....	64
7. Principales unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá. ....	31	29. Diagrama de Piper para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales en el sector sur del Altiplano (ríos (A), lagunas (B)). ....	64
8. Red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA. ....	37	30. Concentración de sílice y litio en vertientes termales de Tarapacá. ....	66
9. Repartición de los DAA subterráneos por zona hidrográfica. ....	41	31. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona de la pampa del Tamarugal según DGA (2000). ....	67
10. Repartición del caudal total otorgado a DAA subterráneos por zona hidrográfica. ....	41	32. Zona hidrográfica de la Pampa del Tamarugal clasificadas según la cantidad de estudios existentes. ....	68
11. Repartición de los DAA superficiales por zona hidrográfica. ....	41	33. Mapa de estaciones de monitoreo vigentes públicas, privadas y académicas en la zona Pampa del Tamarugal. ....	69
12. Caudal otorgado a los usuarios con DAA subterráneo mayor a 20l/s en la región de Tarapacá. ....	42	34. Mapa de cuencas y subcuencas hidrográficas de la Pampa del Tamarugal delimitadas según distintas fuentes. ....	75
13. Número de pozos y caudal otorgado por categoría de pequeños y grandes usuarios. ....	43	35. Serie cronológica de caudales registrados en las vertientes Resbaladero (A), Miraflores (B) y Concova (C). ....	79
14. Zonas hidrográficas. ....	45	36. Ubicación de los pozos de monitoreo de la DGA en el acuífero Pampa del Tamarugal y variación del nivel estático en el periodo de registro. ....	82
15. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona altiplánica según DGA (2000). ....	47	37. Serie cronológica de la variación del nivel estático en el pozo JICA 3. ....	83
16. Unidades hidrográficas altiplánicas clasificadas según la cantidad de estudios existentes. ....	48	38. Serie cronológica de la variación del nivel estático en los pozos de Chacarilla (A) y La Calera 3 (B). ....	83
17. Mapa de estaciones de monitoreo vigentes, de carácter público, privado y académico en la zona altiplánica. ....	49	39. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en estaciones de monitoreo DGA. ....	84
18. Mapa de unidades hidrográficas de la zona altiplánica delimitadas según distintas fuentes. ....	52		
19. Mapa de conexiones probadas y no probadas (con flechas). ....	53		
20. Mapa con valores medios anuales de precipitación (mm/año) y evaporación (mm/año) por estación según PUC (2009) y GSF (2010). ....	54		
21.A. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Collacagua. ....	55		
21.B. Serie cronológica de los registros de precipitación media anual en las estaciones de Enquelga (B). ....	56		
22. Serie cronológica de evaporación mensual registrada en la estación de Collacagua. ....	56		

N° de la Figura	Pág.	N° de la Figura	Pág.
40. Serie cronológica de caudales registrados en la estación Tarapacá en Sibaya. ....	84	57. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudal superficial (l/s) en la zona Camiña - Camarones. ....	105
41. Caudales de recarga de las subcuenca al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente). ....	85	58. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Camiña. ....	106
42. Evolución de la demanda en el acuífero Pampa del Tamarugal. ....	88	59. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas del río Camiña. ....	107
43. Repartición por usos de los DAA en el acuífero Pampa del Tamarugal. ....	88	60. Delimitación de unidades hidrográficas de zona costeras según DGA (2000). ....	108
44. Evolución de la demanda en el acuífero de Pica. ....	89	61. Zona hidrográfica costeras clasificadas según la cantidad de estudios existentes. ....	109
45. Contenido iónico en función del tiempo, expresado por valores de conductividad eléctrica, en aguas de la quebrada Aroma (A), río Coscaya en Saitoco (B) y quebrada Tarapacá en Laonsana (C).....	89	62. Mapa de estaciones de monitoreo con sus respectivos valores medios anuales de precipitación (mm/año) en la zona costeras. ....	110
46. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de las quebradas y las aguas termales de la Pampa del Tamarugal. ....	91	63. Centro de documentación. ....	111
47. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes para aguas de algunos pozos de la Pampa del Tamarugal (A) y algunos pozos JICA (B). ....	92	64. Tipos de documentos del Centro de Documentación. ....	111
48. Delimitación de unidades hidrográficas de Llamara – Río Loa según DGA (2000). ....	93	65. Catálogo en línea del Centro de Documentación. ....	112
49. Zona hidrográfica Llamara - Río Loa clasificadas según la cantidad de estudios existentes. ....	94	66. Despliegue de ventana informativa. ....	112
50. Mapa de estaciones de monitoreo y valores medios anuales de precipitación en la zona Llamara – Río Loa. ....	94	67. Mapa de las estaciones meteorológicas. ....	120
51. Mapa de valores medios anuales de precipitación (mm/año) y caudales superficiales (l/s) en la zona Llamara – Río Loa. ....	99	68. Mapa de las estaciones fluviométricas.....	122
52. Serie cronológica de los caudales registrados en la estación fluviométrica de Guatacondo en Copaquire. ....	100	69. Mapa de las estaciones piezométricas. ....	124
53. Caudales de recarga de las subcuenca al acuífero Salar de Llamara (por fuente). ....	100	70. Mapa de estaciones de calidad de aguas. ....	126
54. Diagrama triangular para la clasificación geoquímica por iones dominantes de aguas superficiales de la cuenca del Salar de Llamara. ....	102	71. Mapa de estaciones de monitoreo de agua de niebla. ....	128
55. Delimitación de unidades hidrográficas de la zona Camiña - Camarones según la DGA (2000). ....	104	72. Mapa delimitaciones de unidades hidrográficas. ....	130
56. Zona hidrográfica Camiña - Camarones clasificadas según la cantidad de estudios existentes. ....	105	73. Mapa de límites de acuíferos. ....	132
		74. Mapa de Glaciares. ....	134
		75. Mapa de pozos de extracción.....	136
		76. Mapa de peticiones y derechos de aguas. ....	138
		77. Mapa de evaluaciones de impacto ambiental.....	140
		78. Mapa de cartas geológicas. ....	142
		79. Mapa de cartas geomorfológicas.....	144

# Índice de Tablas

N° de la Tabla	Pág.	N° de la Tabla	Pág.
1. Población total de la región de Tarapacá por comunas. ....	28	17. Características del modelo hidrogeológico desarrollado por DICUC (1988). ....	70
2. Estratigrafía característica de la Pampa del Tamarugal. ....	33	18. Características del modelo hidrogeológico realizado por JICA (1995). ....	70
3. Estudios hidroquímicos por zona hidrográfica. ....	38	19. Características del modelo hidrogeológico realizado por DSM Minera S.A. (2002). ....	71
4. Evolución de las temáticas en los estudios analizados en función del tiempo. ....	39	20. Características del modelo hidrogeológico realizado por Rojas (2005). ....	72
5. Resumen de los DAA de naturaleza subterránea y superficial aprobados con el caudal otorgado en la región de Tarapacá por zona hidrográfica. ....	42	21. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2007b). ....	73
6. Lista de las unidades hidrográficas que integran cada zona según DGA (2000). ....	46	22. Características del modelo realizado por Rojas et al, 2010. ....	74
7. Características del modelo hidrológico probabilístico (estocástico) desarrollado en las cuencas altiplánicas. ....	50	23. Características del modelo hidrogeológico en el acuífero de Sur Viejo realizado por DICTUC (2008). ....	74
8. Características del modelo hidrogeológico del salar de Coposa. ....	51	24. Balance hídrico de la subcuenca de Aroma (por fuente). ....	76
9. Balance hídrico por sub - subcuencas de la DGA. ....	59	25. Balance hídrico de la subcuenca Tarapacá (por fuente). ....	77
10. Balance hídrico de la cuenca Salar del Huasco (por fuente). ....	60	26. Parámetros hidrológicos de la subcuenca Quipisca y Juan Morales (por fuente). ....	77
11. Balance hídrico del Salar de Coposa (por fuente). ....	60	27. Balance hídrico de la subcuenca de Quisma (por fuente). ....	79
12. Balance hídrico del Salar de Michincha (por fuente). ....	61	28. Balance hídrico de la subcuenca Chacarilla (por fuente). ....	80
13. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en ríos del Altiplano. ....	61	29. Balance hídrico de la subcuenca Ramada y Chipana (por fuente). ....	80
14. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos en estaciones de monitoreo de calidad de agua de la DGA en ríos andinos. ....	63	30. Recarga al acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente). ....	85
15. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de As y B en las vertientes y los salares del Altiplano. ....	65	31. Comparación de la evaporación desde los salares de la Pampa del Tamarugal y del Salar de Llamara (por fuente). ....	87
16. Valores de temperatura, salinidad, acidez, clasificación geoquímica y concentraciones de As y B en aguas termales del Altiplano. ....	65	32. Evolución de la tasa de evapotranspiración de los Tamarugos (según fuente). ....	87
		33. Descarga del acuífero Pampa del Tamarugal (por fuente). ....	89
		34. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en	

N° de la Tabla	Pág.	N° de la Tabla	Pág.
		estaciones de monitoreo DGA en quebradas y aguas termales en la Cuenca Pampa del Tamarugal. ....	90
35. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en aguas termales de la cuenca de la Pampa del Tamarugal [162]. ....	91	48. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la Quebrada de Camiña. ....	107
36. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en la cuenca Pampa del Tamarugal (aguas de las quebradas y ríos). ....	91	49. Estaciones meteorológicas. ....	114
37. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y las concentraciones de arsénico y boro en la "Pampa del Tamarugal-Subcuencas-Aguas Pozos. ....	92	50. Estaciones fluviométricas. ....	115
38. Balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal, (por fuente). ....	92	51. Estaciones piezométricas. ....	115
39. Características del modelo hidrogeológico del acuífero de Llamara, realizado por DICTUC (2007c). ....	95	52. Estaciones de calidad de agua. ....	116
40. Características del modelo hidrogeológico realizado por DICTUC (2004). ....	96	53: Superficie glaciar Sillajhuay según autor. ....	118
41. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006b) en la cuenca del Salar de Llamara. ....	97	54. Catálogo de atributos de la capa de estaciones meteorológicas. ....	121
42. Características del modelo hidrológico realizado por DICTUC (2006a) en el río Loa. ....	97	55. Catálogo de atributos de la capa de estaciones fluviométricas. ....	123
43. Caudales de recarga de las diferentes subcuencas al acuífero Salar de Llamara en l/s (por fuente). ....	100	56. Catálogo de atributos de la capa de estaciones piezométricas. ....	125
44. Valores estadísticos de parámetros fisicoquímicos registrados en estaciones de monitoreo DGA en la quebrada Guatacondo. ....	102	57. Catálogo de atributos de la capa de estaciones de calidad de aguas. ....	127
45. Valores de salinidad, acidez, clasificación geoquímica por iones dominantes y concentraciones de As y B en el "Salar de Llamara y desembocadura del río Loa". ....	103	58. Catálogo de atributos de las estaciones de monitoreo de agua de niebla. ....	129
46. Balance hídrico del acuífero Salar de Llamara. ....	103	59. Catálogo de atributos las capas de unidades hidrográficas. ....	131
47. Parámetros hidrológicos de recarga y descarga según fuente en la		60. Catálogo de atributos de las capas de límites de acuíferos. ....	133
		61. Catálogo de atributos de la capa de glaciares. ....	135
		62. Catálogo de atributos de la capa de pozos de extracción. ....	137
		63. Catálogo de atributos de la capa de peticiones de DAA subterránea y de la capa de DAA superficial. ....	139
		64. Catálogo de atributos de la capa de evaluaciones de impacto ambiental. ....	141
		65. Catálogo de atributos de la capa de cartas geológicas. ....	143
		66. Catálogo de atributos de la capa de cartas geomorfológicas. ....	145

## Resumen Ejecutivo

La presente publicación corresponde al informe final del proyecto *“Diagnóstico y sistematización de la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá”*, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) durante el año 2012. El objetivo fue generar un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y de la información existente sobre los recursos hídricos de la región con el fin de identificar las brechas de conocimiento para orientar el trabajo futuro de investigación y transferir este conocimiento a todos los usuarios públicos, privados y académicos.

Con este proyecto se han generado dos productos destacados: un análisis crítico de la cantidad y calidad de la información disponible a nivel regional y por zona hidrográfica y una herramienta de gestión y transferencia de la información, el *“Observatorio del agua”*. Este último está integrado por dos elementos: un Centro de Documentación especializado en los recursos hídricos de la región con un catálogo en línea y un *SIG web (Sistema de Información Geográfica web)* el cual presenta espacialmente la información referida a estaciones de monitoreo hídrico, unidades hidrográficas, coberturas cartográficas, elementos hidrológicos e hidrogeológicos, pozos de extracción y derechos de aprovechamiento de agua (DAA).

La metodología consistió en una recopilación exhaustiva de estudios, datos y cartografías, su revisión y sistematización en un sistema de información geográfica y fichas técnicas, el análisis de la información existente a nivel regional y por zona hidrográfica, tanto de la calidad como de la cantidad de información. A continuación, se exponen los principales resultados del proyecto:

1. Se recopilaron 306 documentos, desde 1893 hasta 2012, procedentes de fuentes públicas, privadas y académicas. La etapa de revisión consistió en la realización de 211 fichas priorizando los documentos más importantes y en la trazabilidad de la información (fuente de información, fechas y metodologías, disponibilidad y accesibilidad).
2. La Región de Tarapacá se caracteriza por sus cuencas cerradas o endorreicas, tanto en el Altiplano (cuencas altiplánicas) como en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal), limitadas al norte y al sur por cuencas exorreicas que desembocan al mar (Camiña y Río Loa). Esta característica, añadida a la condición de clima árido, en el cual la evaporación supera ampliamente la precipitación, ha condicionado y condiciona un funcionamiento hidrológico e hidrogeológico único en el cual dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas con recarga lateral que conforman el único recurso permanente. Las condiciones meteorológicas, geomorfológicas y geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas condicionan ecosistemas vulnerables ya que el equilibrio hidrológico que resulta de un sistema en estado natural (las entradas al sistema igualan las salidas a largo plazo) se rompe significativamente al cambiar una variable como el aumento de las descargas.
3. La Región de Tarapacá está constituida por cuatro grupos de cuencas, consideradas en este trabajo como zonas hidrográficas: las cuencas altiplánicas endorreicas (algunas compartidas con Bolivia), la cuenca endorreica de la Pampa del Tamarugal (constituida por ocho subcuencas), las cuencas exorreicas que definen el límite norte y sur de la región (cuenca de Camiña, cuenca del río Loa y subcuenca del Salar de Llamara) y las cuencas costeras arreicas. Por otro lado, la región se caracteriza por cinco elementos geomorfológicos: Litoral y Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Altiplano y Cordillera de los Andes.
4. Se puede considerar que existe un buen nivel de conocimiento de la geología y geomorfología a nivel regional, en particular la geología del Cenozoico, período en el cual la región adquiere su aspecto actual y empieza a formarse la Pampa del Tamarugal. Aun así, la región no cuenta con el 100% de su superficie con cartografía geológica y geomorfológica a escala superior a 1:100.000.

5. La Región de Tarapacá es, en su mayor parte, una zona árida con precipitaciones casi nulas en el Litoral, en la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, que aumentan gradualmente con la altura en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano un promedio anual alrededor de 150 – 180 mm. Por otro lado, la evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico ya que supera ampliamente las precipitaciones al alcanzar un promedio entre 2.000 y 3.000 mm/año en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, y entre 1.000 y 2.000 mm/año en el Altiplano.
6. **El agua superficial en forma de precipitaciones y escurrimientos superficiales, sólo se materializa en el Altiplano y en la Precordillera;** alcanza la Depresión Central de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos. El conocimiento de los recursos hídricos superficiales se basa en (y se limita) al análisis estadístico de los datos generados por las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA). Si bien existen estaciones de monitoreo instaladas por compañías mineras, más algunas estaciones de instituciones académicas, escasamente han sido analizadas en conjunto. **Esta información se considera parcial, tanto espacial como temporalmente** ya que existen cuencas y subcuencas sin monitoreo y pocas estaciones con registro continuo. Por otra parte, no se logran medir los caudales generados durante los eventos extremos ni se ha estudiado la relación entre compartimentos hidrológicos (aguas superficiales-subterráneas). **La evaporación, la evapotranspiración y la escorrentía constituyen variables hidrológicas poco conocidas** a la fecha, lo que afecta directamente la estimación de la recarga (escorrentía) y del balance hídrico (evaporación, evapotranspiración) en general.
7. **El agua subterránea constituye el principal recurso hídrico permanente,** característico de muchas zonas áridas del mundo. La DGA monitorea mediante 39 pozos los acuíferos Pampa del Tamarugal y Salar del Huasco. Las Compañías Mineras, en el marco de sus compromisos ambientales y mediante programas de monitoreo, generan datos hidrogeológicos de los acuíferos en los cuales extraen agua para sus faenas. No obstante, excepto el acuífero Pampa del Tamarugal y los acuíferos de las cuencas altiplánicas Lagunilla, Coposa y Minchincha, existe un vacío de información hidrogeológica en la mayoría de las cuencas y subcuencas, respecto a los límites de los acuíferos, los flujos subterráneos y la evolución de los niveles piezométricos. No se ha dado suficiente importancia al conocimiento de la geología de los acuíferos de la región (Pampa del Tamarugal, Pica, Salar de Llamara y los acuíferos aluviales de las quebradas). Los estudios hidrogeológicos se focalizaron en definir la recarga y, en menor medida, los volúmenes disponibles con un grado de incertidumbre alto debido a la ausencia de datos. Todos los acuíferos con extracciones en la región muestran un balance negativo (las descargas superan la recarga), si bien tal afirmación no se puede cuantificar ya que no se dispone de información actualizada, y existen incertidumbres en la estimación de la recarga y descargas. Esta situación se materializa con un descenso continuo y paulatino de los niveles de los acuíferos, sin embargo no existe una visión clara de la evolución de dichos niveles ni una predicción de la evolución a corto, medio y largo plazo. El descenso de los niveles del agua subterránea, de manera general, se caracteriza también por el desmejoramiento de la calidad del agua aunque esta consideración no ha sido estudiada en la región. Por otro lado, se ha estimado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos de la región se generaron durante una fase húmeda comprendida entre los 17.000 y 11.000 años y/o de crecidas durante el Holoceno (últimos 11.000 años), por lo que en la región de Tarapacá se está haciendo uso de recursos no renovables de agua.
8. La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la DGA, muestra un alto grado de incertidumbre debido a que la información se encuentra incompleta y desactualizada. Dicha incertidumbre afecta la estimación de la descarga, y por ende, el balance hídrico de las cuencas y cuerpos de agua. Esto restringe considerablemente una gestión eficiente de los recursos hídricos. En la Región de Tarapacá, en el 2012, existen **2.298 solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) subterráneas, de las cuales 766 (33%) han sido aprobados a la fecha, los cuales corresponden a un total de 928 puntos de captación con un caudal total otorgado de 7.503 l/s. Por otro lado, existen 425 solicitudes de DAA superficiales que corresponden a un total de 776 puntos de captación.** Asimismo, se desconoce el uso asignado a cada DAA en muchos casos (no especificado en el proceso de solicitud de un DAA), desconociéndose a su vez las transacciones de DAA que ocurren después del otorgamiento (propietario actual del DAA). En la Región de Tarapacá, el usuario con el caudal otorgado más alto es la empresa sanitaria, seguido por las Compañías Mineras Doña Inés de Collahuasi, Sociedad Química y Minera de Chile S.A. (SQM), Quebrada Blanca y Cerro Colorado, siendo por lo tanto el rubro Minero el primer usuario de la región.
9. **Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Región de Tarapacá presentan un amplio intervalo de valores de salinidad natural, así como elementos tóxicos y/o nocivos para la salud.** Los valores de salinidad encontrados varían entre 50 a 350.000 mg/l (contenido de Sólidos Totales Disueltos - STD). Las elevadas concentraciones de Arsénico (As) registradas en los puntos de la red de monitoreo de la DGA, sobrepasan el máximo establecido permitido por la normativa vigente. En la región, se identifican áreas con elevadas concentraciones de As, B y Mn, principalmente en

todas las aguas del Altiplano y en las quebradas de Camiña, Aroma, Chacarilla y Guatacondo particularmente en el pozo de la Colonia de Pintados. Asimismo, la región se caracteriza por sus aguas sulfatadas. Por otro lado, en el sector de Pica y Matilla, las aguas han sido clasificadas de excelente calidad de acuerdo a la legislación vigente. En los reportes de calidad de las aguas termales de la región, se señalan concentraciones importantes de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y Litio (Li) como elementos asociados a la actividad termal. La distribución de estos elementos de origen natural (volcanismo de la cordillera de los Andes) es altamente heterogénea, con ríos o cuerpos de agua de muy buena calidad (zona de Pica y Canchones) además de ciertos ríos altiplánicos (río Llacho o Charvinto).

### Zona Altiplánica

10. **Las cuencas altiplánicas tienen recursos superficiales y subterráneos ambos fuertemente vinculados a un ecosistema vulnerable** (bofedales, humedales y salares) con un alto valor socioeconómico, cultural y paisajístico. En sus estados naturales, presentan un equilibrio entre los diferentes compartimentos hidrológicos (superficial – subterráneo) y los ecosistemas (fauna – vegetación). Esta característica tiene consecuencias directas sobre las posibilidades de aprovechamiento de los recursos hídricos de las cuencas altiplánicas, ya que un aumento de la descarga afectará directamente el equilibrio natural del sistema. Su uso está restringido al mínimo para asegurar la conservación del ecosistema.
11. De un total de diez cuencas altiplánicas, sólo cuatro cuentan con estudios (Lagunilla, Salar del Huasco, Salar de Coposa y Salar de Minchincha) correspondientes a la mitad sur del Altiplano, y donde los tres grandes proyectos de extracción de cobre extraen el agua necesaria para los respectivos procesos mineros. Casi todas las cuencas poseen estaciones meteorológicas de la DGA (salvo la cuenca “Entre salares Huasco y Coposa”), aunque no todas cuentan con estaciones fluviométricas de la DGA vigentes (Río Cariquima, Salar de Coposa, Salar de Minchincha, Entre salares Huasco y Coposa) y solo una cuenca tiene estaciones piezométricas de la DGA (Salar del Huasco). Muchos estudios se dedicaron a analizar estadísticamente las variables hidrológicas (meteorológicas y fluviométricas) registradas en las estaciones de la DGA. Existen estimaciones del balance hídrico y modelos hidrogeológicos en Lagunilla, Salar del Huasco, Salar de Coposa y Salar de Minchincha.
12. Las conexiones hidrogeológicas (subterráneas) entre cuencas han sido objeto de estudios; si bien las conexiones entre las cuencas altiplánicas (entre las cuencas Lagunilla y Salar del Huasco, entre las cuencas Salar de Minchincha y Salar de Coposa y entre las cuencas Salar de Coposa y Empexa)

han sido bastante bien definidas, la conexión entre el Salar de Huasco y la zona de Pica y del acuífero Pampa del Tamarugal nunca ha sido probada, más bien se estima muy poco probable. La conexión hidrogeológica entre el Salar de Coposa y la Depresión Central ha sido descartada. Aun así, la complejidad de los flujos profundos en el contexto geológico de la región, añadida a la complejidad de evidenciar tales flujos, hace necesario la realización de estudios con el uso de tecnologías más costosas (geofísica, análisis isotópicos) para comprobar tales conexiones.

13. Las cuencas de Lagunilla, Salar de Coposa y Salar de Minchincha tienen un balance hídrico negativo, dado que la descarga por extracciones de agua para el uso minero supera la recarga natural. La cuenca Salar del Huasco presenta un balance hídrico positivo que se interpreta como un caudal potencialmente saliente hacia otras cuencas. Las cuencas al norte de Lagunilla se consideran en estado natural (equilibrio entre descargas y recarga). Es necesario tomar en cuenta que subsisten incertidumbres en la estimación de las variables hidrológicas particularmente de la evaporación y la escorrentía, lo que influye en el cálculo del Balance Hídrico.
14. Las aguas se caracterizan por presentar mayor proporción de Sodio ( $\text{Na}^+$ ) y Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), particularmente en los sectores de los volcanes de Isluga al norte e Irrupuntucu al sur. En el río Collacagua y en las vertientes Norte y Ermitaño del acuífero Salar del Huasco predominan altos contenidos de Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Las aguas termales presentan salinidad y pH variables y altos contenidos de Arsénico (As) y Boro (Br).
15. La zona altiplánica presenta 2,5% del total de DAA subterráneos aprobados de la región (19 DAA) exclusivamente dedicados a uso minero (2.289 l/s otorgado). Por otra parte, en esta zona se localizan el 18% de los DAA superficiales de la región (71 DAA).

### Zona Pampa del Tamarugal

16. La información meteorológica, fluviométrica e hidrogeológica de la cuenca Pampa del Tamarugal es muy deficiente en cuanto a la cantidad de información y su repartición espacial: dos subcuencas de un total de ocho (Quebradas de Tarapacá y Quipisca-Juan Morales) registran datos meteorológicos desde más de una década (no obstante en la Quebrada de Aroma se registran datos desde Enero 2012). Sólo una subcuenca registra datos de caudal superficial (Quebrada de Tarapacá). Los estudios se han focalizado sobre el sector de Pica-Matilla y el sector de Puchuldiza (que pertenece a la subcuenca de Aroma) en donde se localiza un campo geotérmico de interés económico. La hidrogeología del acuífero Pampa del Tamarugal ha sido estudiada de una manera más integral por dos estudios JICA-DGA (1995) y DICTUC (2006).

17. La cuenca Pampa del Tamarugal contiene escasos recursos superficiales concentrados en las quebradas afluentes que sostienen una agricultura de subsistencia, y que alcanzan la Depresión Central después de eventos de precipitación en la Precordillera y el Altiplano. La cuantificación de estos caudales es problemática y sujeta a gran incertidumbre por la limitación tecnológica y/o localización de las estaciones fluviométricas. Por otro lado, existe incertidumbre sobre el porcentaje de las precipitaciones que se infiltra, escurre y evapora (la mayoría de los estudios admite un 20% de infiltración de manera general).
18. El acuífero Pampa del Tamarugal contiene recursos subterráneos importantes, los cuales sostienen gran parte del desarrollo socioeconómico de la región. Este acuífero se recarga lateralmente por flujos superficiales que provienen de las precipitaciones que ocurren en la Precordillera y el Altiplano y que circulan preferentemente por las quebradas; y por flujos subterráneos. El agua, una vez infiltrada, circula de manera subterránea por los abanicos aluviales. Los flujos subterráneos, de dirección preferencial este-oeste, se encuentran cortados en el límite oeste de la Pampa del Tamarugal por la barrera impermeable de la Cordillera de la Costa (rocas de edad primaria y secundaria) y cambian de dirección a norte-sur, aunque probablemente una parte de los flujos en la parte norte del acuífero se dirija hacia el norte. En el límite oeste y sur de la Pampa del Tamarugal, el nivel del agua se encuentra a poca profundidad (<10 metros). Este fenómeno da origen a los salares de la Pampa del Tamarugal (Salares de Zapiga, Pintados y Bellavista). En la literatura, se mencionan flujos subterráneos profundos provenientes de las cuencas cerradas altiplánicas aunque este fenómeno nunca fue probado. Elementos estructurales impermeables de dirección norte-sur cortan el flujo este-oeste de la Precordillera y generan vertientes termales (oasis de Pica, Mamiña y Chuzmisa) debido a la circulación del flujo a gran profundidad.
19. La recarga del acuífero Pampa del Tamarugal ha sido estimada por diferentes estudios entorno a los 1.000 l/s. Si bien este resultado genera un consenso general, todavía existen discrepancias en la estimación de los diferentes parámetros que controlan la recarga (debido principalmente a la insuficiencia de datos) y sobre el funcionamiento de la recarga en sí (flujos entrantes, flujo subterráneo profundo) debido a la escasez de estudios en las quebradas afluentes.
20. Se realizaron tres mapas piezométricos del acuífero (1960, 1993 y 2006) más una campaña de medición de niveles en 1982. La comparación de la información muestra un descenso generalizado en la parte norte y central de la Pampa (mayor en Huara y Canchones), más estable en el sur y con ciertos aumentos puntuales. La mayoría de los pozos de la red de monitoreo de la DGA muestran un descenso del nivel estático del acuífero. El descenso máximo medido es de - 4,71m en el pozo Salar de Pintados – Tirana, entre 1988 y 2011. A pesar de este descenso generalizado, se distinguen siete pozos cuyo nivel estático muestra un ascenso, con el máximo registrado en el pozo Chacarilla (+ 12,62 m entre 1992 y 2011). Casi todos los pozos que muestran un ascenso están ubicados en el sector sur y central, preferencialmente en el sector oriental del acuífero Pampa del Tamarugal, en donde efectivamente ocurre la recarga.
21. De acuerdo con las estimaciones, la Quebrada de Tarapacá aporta el mayor caudal al acuífero Pampa del Tamarugal (entorno a 300 l/s) seguido por la Quebrada de Aroma (entre 250 y 300 l/s) y la Quebrada de Chacarilla (en torno a 150 l/s). Las tres subcuencas aportarían alrededor del 80% del caudal de recarga a la Pampa del Tamarugal.
22. Se realizaron varios modelos numéricos del acuífero Pampa del Tamarugal los cuales han contemplado una discretización en capas y secciones diversas, obteniendo resultados de diferente índole respondiendo principalmente a las consideraciones de la modelización. Aun así, no se considera la geología como un factor determinante en las características hidrogeológicas del modelo.
23. Por otro lado, las aguas subterráneas de la Pampa del Tamarugal presentan una gran variabilidad espacial de la salinidad: en los sectores de La Huaica, La Tirana, Canchones y Colonia de Pintados, la salinidad es baja, mientras que en los sectores de Dolores, Negreiros y Cala-Cala la concentración en sales es alta, debido fundamentalmente a los procesos de evaporación de las aguas sulfatadas y cloradas-sódicas que allí se localizan. Asimismo, en el sector norte del salar de Bellavista se encuentran las aguas con la mayor salinidad registrada.
24. La descarga artificial fue estimada en 2.325 l/s en el 2008 (DICTUC) aunque en el 2012, existen 335 DAA subterráneos aprobados en el acuífero Pampa del Tamarugal con un caudal total otorgado de 3800 l/s. El uso principal del recurso es doméstico (empresa sanitaria). Es necesario tener en cuenta que existen altas incertidumbres en la estimación del consumo real.
25. Las descargas naturales del acuífero la constituyen la evaporación, que si bien ha sido medida en varios estudios, sólo lo ha sido de forma puntual; la evapotranspiración de los Tamarugos, sujeto a discrepancias entre los estudios y los flujos salientes al sur (hacia el acuífero Sur Viejo) y oeste (hacia el acuífero La Noria) del acuífero.
26. El balance hídrico del acuífero Pampa del Tamarugal muestra una tendencia a un déficit creciente desde la década de 1980, considerando que en 1960 el acuífero Pampa del Tamarugal se encontraba en estado natural (equilibrio). A

la fecha, no existe una proyección de la evolución de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero.

#### Zona Llamara - Río Loa

27. La subcuenca Salar de Llamara, igual que la Pampa del Tamarugal, contiene recursos subterráneos con recarga lateral desde la Precordillera a través de las quebradas de Guatacondo, Mani, Mal Paso y otras. La información hidrogeológica sobre el acuífero Salar de Llamara proviene únicamente de los estudios generados en el marco de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) generados para la Compañía Minera SQM, principal usuario del agua del acuífero Salar de Llamara. Por otra parte, la presencia de instalaciones de las Compañías Mineras Quebrada Blanca y Dona Inés de Collahuasi en la parte alta de las quebradas de Mani y Guatacondo, han generado información geológica, hidrológica e hidrogeológica en estas zonas.
28. LA DGA monitorea la pluviometría y el caudal superficial en la parte alta de la Quebrada de Guatacondo. No existe monitoreo hidrogeológico del acuífero Salar de Llamara por parte de la DGA.
29. Los estudios hidrogeológicos del acuífero Salar de Llamara se han realizado en base a datos escasos y muy localizados, tanto de niveles de pozos como de caudal superficial y precipitación. Las incertidumbres en la caracterización hidrológica e hidrogeológica identificadas para la Pampa del Tamarugal se repiten en el caso del Salar de Llamara y se incrementan debido a la poca distribución espacial de los datos.
30. La recarga del acuífero Salar de Llamara ha sido estimada de 550 a 600 l/s. El aporte más importante proviene, según las estimaciones, de las quebradas de Mani y Mal Paso (>200 l/s). La estimación de la recarga y del volumen disponible está sujeto a un grado elevado de incertidumbre debido a la insuficiencia de datos en la mayor parte de la cuenca.
31. A la fecha el balance hídrico del acuífero Salar de Llamara es negativo aunque no exista una cuantificación actualizada disponible. Previo al inicio de las extracciones (2006), el sistema endorreico se encontraba en equilibrio natural (entradas = salidas a largo plazo).
32. Las aguas de la Quebrada de Guatacondo sobrepasan las concentraciones máximas permisibles en Arsénico, Boro y Manganeso.
33. El acuífero Salar de Llamara presenta los valores de salinidad más altos de las Depresión Central de la región de Tarapacá (valores superiores a los más altos del acuífero Pampa del Tamarugal). El agua de los puquios son salmueras; presentan altos contenidos de sales y de iones específicamente los tóxicos (Arsénico, Boro, etc.).

34. En la cuenca Salar de Llamara existen nueve pozos con derechos otorgados, con un total de 260 l/s, de los cuales siete pertenecen a SQM y uno a la minera Septentrión.

#### Zona de Camiña - Camarones

34. La cuenca de Camiña desemboca al mar y constituye el límite norte de la región de Tarapacá. Esta cuenca ha sido la menos estudiada de la región.
35. Contiene recursos superficiales que sostienen actividades agrícolas, además de recursos subterráneos en los depósitos sedimentarios que conforman la Quebrada de Camiña y el río Camiña. Se registran datos meteorológicos y fluviométricos en la parte alta de la cuenca.
36. El valor medio de precipitación sobre la cuenca varía, según las fuentes, entre 61 y 87 mm/año.
37. Existen 127 DAA superficiales aprobados en la Cuenca de Camiña. Se registran dos pozos de extracción con un caudal total de 3,5 l/s.
38. Las aguas del río Camiña presentan Arsénico (0,60 mg/l) por sobre las normas de consumo humano y riego. La conductividad es adecuada para el consumo humano (900  $\mu$ S/cm).

#### Zona Costera

39. Las cuencas costeras siempre han sido consideradas escasas en recursos hídricos y por ello no han sido objeto de estudios. No obstante, las cuencas costeras albergan recursos hídricos (niebla costera, acuífero de La Noria, presencia de vertientes costeras), que aunque sean escasos ameritan ser caracterizados. De hecho, las cuencas costeras fueron objeto de varios estudios geomorfológicos debido al interés particular que suscita el gran acantilado de la costa y las espectaculares dunas que se forman. La presencia de la estación de Investigaciones Desérticas Alto Patache del Centro del Desierto de Atacama de la Universidad Católica de Chile (EIDAC-PUC) generó numerosos estudios sobre los oasis de niebla.
40. En las cuencas costeras la precipitación es casi nula y la evaporación es del mismo orden de magnitud que en toda la región, con un valor medio anual en Cuya de 2.191 mm/año.
41. La niebla costera genera una cantidad de agua que logra formar los denominados "oasis de niebla" y que ha sido estimada en la estación de Alto Patache en 10 l/m<sup>2</sup>/día (entre 1997 y 2001) aunque la heterogeneidad espacial y temporal de la niebla es muy alta.
42. No existe información de la calidad del agua en las cuencas costeras de la región de Tarapacá. Sin embargo, en la EIDAC-PUC se recolectan aguas de nieblas costeras cuyos análisis muestran una acidez importante (pH=3,1) que se atribuye a la contaminación por formación de ácido sulfúrico en la atmósfera. Una de las causas posible es la emisión

de estos contaminantes desde industrias y plantas de energía localizadas en el centro y norte del país.

43. Existen 14 DAA subterráneos en la subcuenca Pampas El Carmen y de La Unión, con un caudal total otorgado de 27 l/s, diez de los cuales son pozos ubicados en el acuífero de La Noria (con un caudal total otorgado de 18 l/s).

**Este informe genera un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y la información existente sobre los recursos hí-**

**dricos de la Región de Tarapacá.** Mejorar el conocimiento y el acceso a la información sobre el agua contribuirá sin duda al uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos de la región de Tarapacá. Además, se espera generar una experiencia que beneficie la gestión integrada de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas, orientando futuros trabajos de investigación, además de transferir este conocimiento a todos los usuarios públicos, privados y académicos tanto a nivel regional como nacional.

Iquique, marzo 2013



Elisabeth Lictévout

*Hidrogeóloga – Gestión Integrada de Recursos Hídricos  
Dirección Científica*



# Capítulo II

## Análisis Regional

El análisis de la información disponible suscita distintas escalas de visualización de los resultados, permitiendo adoptar conceptos bien en términos regionales o subregionales de acuerdo al área de interés. Varios documentos exponen a la región dentro de un único dominio de estudio, ya sea por intereses particulares o por la necesidad de generar un conocimiento regional de un campo específico.

Teniendo en cuenta lo anterior y para brindar un conocimiento general de la información, a continuación se presenta el análisis regional de los diversos aspectos que acompañan los recursos hídricos en la región de Tarapacá, como pueden ser la geología y geomorfología, la hidrología e hidrogeología, la hidroquímica y la demanda y usos del agua.

### 1. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

#### 1.1. ASPECTOS GENERALES

Existen diversos estudios que coexisten sobre la geología de la región, enmarcados principalmente en estudios suprarregionales, es decir, a dimensiones que contemplan no solo la región sino todo el sector norte de Chile, inclusive sectores de Bolivia y Perú [61]. No obstante, la importancia de los estudios locales, o a mayores escalas, son de gran interés para redefinir aspectos generalizados a pequeña escala, permitiendo identificar particularidades propias de la región.

Bajo este punto de vista, el estudio realizado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) [256] se presenta como el estudio más completo sobre la geología de la zona norte de Chile (regiones XV, I, II y III), presentando una recopilación de un gran número de estudios y mapas que facilitan la comprensión de los principales acontecimientos que definen hoy la geología de la región, con especial atención en el Altiplano chileno. En esta misma línea, el estudio realizado y publicado por

Charrier *et al.* (2012) se presenta como el estudio recopilatorio más moderno ya que expone los avances generales obtenidos sobre el Cenozoico del norte de Chile.

Por otro lado, en el año 1967, la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) publicó el libro "Geología del norte Grande de Chile" [137] en donde se detallan los principales eventos geológicos del norte de Chile, considerando los eventos acaecidos desde el Paleozoico hasta nuestros días. Asimismo, Mortimer & Saric (1975) realizan una recopilación exhaustiva de los estudios y experiencias que definen el Cenozoico en el norte de Chile hasta la fecha, enfocados especialmente en la dinámica global y su implicación en la geología estructural de la zona, así como su consecuente repercusión en la sedimentación y la paleoclimatología del norte de Chile. Al respecto, existen varios estudios que presentan evidencias de la relación entre los levantamientos acontecidos en la región y la paleoclimatología, en especial Los Andes, en donde se puede determinar que las condiciones paleoclimáticas cambiaron sucesivamente desde que pasaran de los 2.000 a 2.500 m s.n.m. en el Mioceno Medio [227; 233; 286].

#### 1.2. EVOLUCIÓN GEOLÓGICA

García (1962), Mortimer & Saric (1975), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009) y Charrier *et al.* (2012) exponen claramente la evolución de las principales unidades geomorfológicas que sobresalen en la región, debido a la modificación de los ambientes paleogeográficos inducida por la formación de orógenos característicos de márgenes activos. Como bien se conoce, la geología de Chile ha sido descrita en cinco grandes ciclos tectónicos: Pampeano (Proterozoico Superior a Cámbrico Inferior), Famantiano (Cámbrico Superior a Devónico Inferior), de Gondwana (Devónico Superior a Pérmico Inferior), Preandino (Pérmico Superior a Jurásico Inferior) y Andino (Jurásico Inferior tardío al Presente) [256]. En el caso de los dos primeros no hay evidencia de su actividad en la región, mientras que en

el caso de Gondwana se reconoce en la Formación Aroma (primera etapa Devónico Medio/Superior al Carbonífero Inferior) [256].

Durante los tres primeros ciclos (Pampeano, Famantiano y de Gondwana) se desarrolla una intensa actividad volcánica relacionada con procesos de subducción a lo largo del margen oeste del continente en formación. Dicha actividad fue continua hasta su interrupción (o al menos hasta su considerable reducción) durante el ciclo Preandino, lo que favoreció la consolidación final del mega continente en formación [90].

Posteriormente a este aparente receso de la actividad volcánica, se da inicio al periodo Andino, el cual es de gran importancia ya que la actual configuración de los Andes de Argentina y Chile se alcanza durante este periodo [61; 137; 227; 256], en especial en la tercera y última de sus etapas. Cuando el proceso de subducción del margen oeste de Sudamérica se inició (Jurásico), la geología característica de entonces consistía en un margen continental principalmente formado por complejos de rocas metamórficas y de origen magmático que se desarrollaron durante el Proterozoico, Paleozoico y Triásico, referidas como "basamento" de las secuencias mesozoicas y cenozoicas andinas [256].

La primera fase de este periodo de subducción inicia con el desarrollo de un arco magmático de orientación N-S a lo largo de lo que hoy es la Cordillera de la Costa, así como una cuenca de trasarco al este del arco en formación. El desarrollo de esta

configuración ha determinado que la región marina más profunda se encuentre en lo que hoy es la Precordillera y el Altiplano. Seguidamente y durante la segunda fase de este periodo, el arco magmático migra hacia el este, desarrollando una cuenca de antepaís al oeste del arco en vez de una cuenca de trasarco al este de dicha cadena [256].

De esta forma la región queda definida (de oeste a este) por la Planicie Litoral, la Cordillera de la Costa, la Depresión Central [61; 256], Longitudinal [227] o Intermedia, la Precordillera y la Cordillera Occidental donde se localiza el Altiplano. Las principales características fisiográficas de estos dominios son: la Cordillera de la Costa tiene un ancho de unos 40 km a la latitud de Iquique (20°14'S) [249] y acaba frente al mar en abruptos acantilados que pueden alcanzar altitudes de hasta cerca de 1.000 m [249]; la Depresión Central queda definida por una Depresión Occidental tipo cuenca endorreica en donde se encuentra la Pampa del Tamarugal sobre los 1000 m s.n.m., y el Dominio de las quebradas marcado por valles flanqueados por un relieve que sube por encima de los 2000 m s.n.m.; el Altiplano se ubica entre los 3.500 y 4.000 m s.n.m. coronado por volcanes activos que superan los 5.000 m s.n.m. (figura 6 y 7) [230; 249].

La modificación de estos paleoambientes se detalla en las características geomorfológicas dominantes en la región cuyo principal hito, según Charrier *et al.* (2012), se ubica en la fase tectónica Incaica (Cretácico tardío a Paleógeno temprano) donde se invierte la tectónica dominante. Esta fase tectónica en su

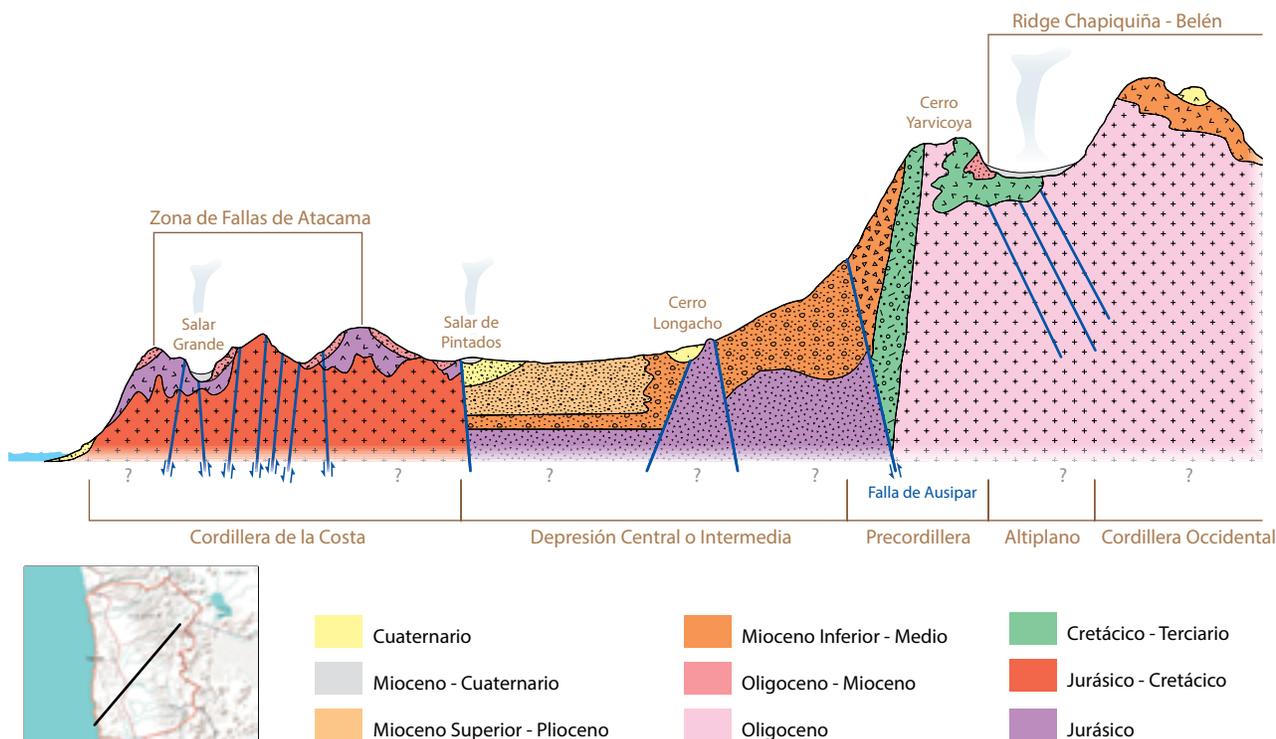


Figura 6. Corte geológico - Región de Tarapacá.



Figura 7. Principales unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá.

proceso de evolución origina un *ridge* motivado por el ascenso de magma y el retroceso de procesos de compresión [61]. El *ridge* originado, conocido como Chapiquiña-Belén, se convierte entonces en el eje de separación de los dos ambientes paleogeográficos originados durante la fase Incaica: la Pampa del Tamarugal y el Altiplano [61].

De acuerdo a este planteamiento, varios estudios detallan las características fundamentales de los paleoambientes originados durante dicha fase, centrando el principal interés en las relaciones inter e intrazonales en cuanto a la tectónica, la sedimentación y el vulcanismo se refiere y que afectaría el proceso de desarrollo de la Pampa del Tamarugal, la cual presentaría una correlación con el Altiplano de acuerdo a la evolución tectónica y paleogeográfica [61; 137; 227; 256]. Por otro lado, Charrier *et al.* (2012) determinan que los dos ambientes originados durante la fase tectónica Incaica presentan evoluciones paleogeográficas distintas, por lo que Mortimer & Saric (1975), Pontificia Universidad Católica de Chile (2009) y Charrier *et al.* (2012) analizan estos dominios geológicos por separado [61; 227; 256].

### 1.3. TECTÓNICA Y VULCANISMO

Debido a la importancia de la actividad volcánica en la zona, García (1962), Digert *et al.* (2003) y Charrier *et al.* (2012) detallan las principales características de los depósitos volcánicos del Mioceno tardío hasta la actualidad, enfatizando en la importancia del mismo en la distribución de los materiales que conforman la Pampa del Tamarugal y el Altiplano [61; 90; 137]. La depositación de estos materiales, como bien se señala en Charrier *et al.* (2012), queda condicionada al levantamiento y deformación de la Cordillera Occidental, Precordillera y Cordillera de la Costa, controlando el aporte de sedimentos tanto a la Pampa del Tamarugal como al Altiplano [61]. Sin embargo, en la región no se aprecian mesetas sobresaliendo de la Pampa del Tamarugal como ocurre sobre los 25°00' de latitud sur, las cuales están constituidas principalmente por ignimbritas [227]. Las investigaciones relacionadas con la actividad geotermal en la región ofrecen una mayor comprensión del vulcanismo y su relación con la tectónica del norte de Chile, así como ocurre con el estudio realizado por Lahsen (1976) en donde se describen los principales episodios de vulcanismo del Cenozoico Superior, pre-Plioceno a Mioceno y del Plioceno-Cuaternario [202].

Respecto a la tectónica, los estudios realizados por García (1962) y Charrier *et al.* (2012) se enfocan en la dinámica estructural que caracteriza los orógenos que limitan a la Pampa del Tamarugal y el Altiplano, como es el caso de la Cordillera de la Costa, la Precordillera y la Cordillera Occidental, destacando la falla de Ausipar en la Precordillera ubicada al oeste del anticlinal de Oxaya, así como el sistema de fallas inversas originadas por el *ridge* Chapiquiña-Belén [61; 137]. Al respecto, García (1962) y Charrier *et al.* (2012) exponen las características tanto estructurales como dinámicas de las deformaciones frágiles y

dúctiles originadas en los orógenos de la región [61; 137]. En García (1962) se describen los plegamientos Paleozoico-Mesozoico, Jurásico-Cretácico y post-Neocomianos, los cuales fueron característicos del norte de Chile.

Por otro lado, en Mortimer *et al.* (1975) se resalta la definición de las características principales de la falla de Atacama y su implicación en la configuración de las unidades morfoestructurales, así como la aplicación de técnicas de teledetección para apreciar algunas fallas en dirección E-W que atraviesan el norte de Chile pero cuya presencia en el terreno es difícil de observar [227; 186].

Debido a estas características estructurales, la tectónica adquiere importancia en la definición de ambientes característicos de gran interés, como es el caso del sector de Pica y la influencia de las fallas en la actividad geotermal en la zona [90; 206; 279], algo similar pero con mayor interés económico en el sector de Puchuldiza [224; 315]; en la definición de los ambientes deposicionales en la Pampa del Tamarugal a lo largo de toda su génesis geológica [61; 90; 202; 206] así como de la región en general [61; 202].

Debido a las interpretaciones realizadas por JICA (1995), se distinguen dos características estructurales en la Pampa del Tamarugal: una serie de anticlinales de dirección N-S y un desarrollo de densas fracturas desarrolladas en la toba soldada de la Formación Altos de Pica, en ocasiones cubiertas por depósitos modernos [90]. Los anticlinales pueden ser observados como montañas bajas y aisladas entre el área de Tarapacá al norte y *Challa Kkollu* en el sur donde aflora el Mesozoico. Las fracturas en la toba soldada muestran dos sistemas: el primero en dirección NE-SW desde Collacagua a Altos de Pica y el segundo de dirección N-S en los Altos de Pica [87; 88; 217]. Por otro lado, Digert *et al.* (2003) concluyen que gran parte de estas fallas existentes en la Pampa del Tamarugal, no parecen tener relación directa con el levantamiento del Altiplano debido a que solamente cortan la parte más antigua del relleno Cenozoico [87].

### 1.4. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

La cronoestratigrafía que se presenta en García (1962), Saes (1972), Muñoz (1973), Digert *et al.* (2003) y Charrier *et al.* (2012) es amplia y detallada respecto a los distintos eventos que han distinguido a cada uno de los dominios definidos en la región, marcados en ciertas ocasiones por la ausencia/presencia de actividad volcánica en el registro litoestratigráfico [61; 90; 137; 229; 285]. Por otro lado, la región está caracterizada principalmente por unidades del Ciclo Andino que van desde el Jurásico hasta el presente [249; 229]. Los únicos afloramientos del paleozoico de la región se encuentran en la Formación Aroma en el fondo de las quebradas de la Precordillera [249] de acuerdo a lo expuesto anteriormente, así como en el cerro Juan de Morales donde aflora la Formación Juan de Morales [89].

De forma generalizada y destacando las principales formaciones aflorantes en la región, los depósitos del Mesozoico están caracterizados por rocas volcánicas pertenecientes a la Formación La Negra (Jurásico Medio) aflorantes en la Cordillera de la Costa, la Formación Coscaya (Jurásico Superior) aflorante en el entorno de la Quebrada de Tarapacá [229; 249] y la Formación Longacho (Mesozoico) la cual está distribuida en montañas bajas y aisladas formando un anticlinal en el sector oriental de la Pampa del Tamarugal, aflora en el sector de Pica afectada por la intrusión de andesita, dacita, diorita, granito porfídico y gabro [193]. No obstante, los depósitos del Cenozoico están caracterizados por los depósitos sedimentarios clásticos continentales de la Formación El Diablo (Mioceno Medio a Superior), las rocas sedimentarias y volcánicas de la Formación Altos de Pica (Oligoceno Superior – Mioceno Inferior) la cual es subdividida en tres formaciones diferentes: Azapa, Oxaya y El Diablo<sup>1</sup>, aflorantes todas ellas en el dominio de las quebradas del sector oriental de la Depresión Intermedia.

El Cuaternario está constituido por los depósitos lacustres, aluviales y salinos que incluyen el salar de Pintados, Bellavista, Llamara y Grande [229; 249] y los cursos normales de las quebradas. Varios estudios describen con precisión las características principales de estas Formaciones, en especial García (1962), Muñoz (1973) y Schültz (1972) en donde se señalan las principales características litoestratigráficas de las formaciones principales y de otras no mencionadas anteriormente por su escala de detalle [137; 229; 288].

En el caso de la Pampa del Tamarugal, las formaciones características se simplifican en tres Formaciones las cuales se presentan en la tabla 2. Esta simplificación fue realizada por JICA (1995) y asumida a partir de ese momento en un gran número de estudios relacionados con la hidrogeología del acuífero de la Pampa del Tamarugal.

El reconocimiento de cada una de las formaciones de la región se ha realizado por observación directa en columnas estratigráficas donde se pueden establecer paleoeventos característicos de cada edad correspondiente [128; 132], así como el análisis del material paleontológico cuando este era posible de determinar, como es el caso de la datación de la Formación Juan de Morales, en la cual se ha podido establecer una edad de Pérmico inferior tardío de acuerdo a la presencia de *Wagenoconcha humboldti*<sup>2</sup> [89]. Asimismo, en el caso de la Pampa del Tamarugal, se destacan los trabajos de identificación de las características geológicas de la misma mediante interpretación de imágenes satelitales [193] y de fotografías aéreas [193; 91]. Por otro lado, en el estudio realizado por Houston (2004) se detalla la aplicación de técnicas de alta resolución en la defini-

ción de la estratigrafía para la exploración hidrogeológica, permitiendo correlacionar las Formaciones aflorantes en la región con otras zonas externas a la región de Tarapacá, en especial, en la extensión total que comprende al desierto de Atacama [174].

Tabla 2. Estratigrafía característica de la Pampa del Tamarugal.

Edad geológica	Formación	Litología
Cuaternario	Sedimentos recientes	Aluviales, eólicos, evaporíticos y depósitos de abanicos.
	Formación Altos de Pica	Rocas sedimentarias continentales y piroclásticas dividida en 5 miembros.
Mesozoico	Formación Longacho	Pizarra fisible, calizas, arenisca de grano fino y limolitas generalmente de color gris.

## 1.5. DEPÓSITOS DE INTERÉS ECONÓMICO

Por otro lado, dentro de la región adquiere gran importancia la definición del origen de los principales depósitos de interés económico y en los cuales se centra la principal actividad económica de la región, la minería.

Al respecto, Mortimer & Saric (1975) explican la existencia de los depósitos naturales de nitratos en los sectores central y oriental de la Cordillera de la Costa, así como en el sector occidental de la Depresión Central [227]. Estos depósitos de nitrato natural, singulares y exclusivos son parte de una franja N-S de unos 700 km de longitud, cuyo origen ha sido un tema de continuos debates [249]. En relación a esto, Oyarzun *et al.* (2008) presentan algunos aspectos relevantes sobre el origen de los mismos, de los cuales se atribuye dicho origen a la combinación de condiciones hiperáridas (vitales para la estabilización final y preservación de la fase mineral de los nitratos) y vulcanismo masivo como proceso clave para la fijación de grandes cantidades de nitrógeno atmosférico.

Asimismo, en la región se destaca el desarrollo de yacimientos tipo pórfido cuprífero – molibdeno y grandes sistemas filonianos de principios del Cenozoico [249]. Estos depósitos se caracterizan por ser de gran importancia económica en la región, debido a que sus características metalogénicas son apropiadas

<sup>1</sup> Esta unidad es también conocida como Formación debido a que su espesor y sus características geológicas le confieren en muchos sectores el nombre de Formación El Diablo.

<sup>2</sup> Fósil usado como un indicador de aguas heladas provenientes de corrientes que alcanzaban las cuencas marginales durante el Pérmico.

para competir comercialmente a precios atractivos para su explotación.

## 1.6. CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

A escala regional, la cartografía geológica más utilizada es el “Mapa Geológico de Chile” a 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003). Asimismo, existen cartografías regionales de igual escala realizadas por IREN (1976) y a 1:500.000 realizadas por Schültz (1972), Karzulovic & García (1979) y por Naranjo & Paskoff (1985). Por otro lado, el IREN (1976) cita en el “inventario de recursos naturales por método de percepción del satélite Landsat I”, la existencia de otras cartas geológicas elaboradas durante este estudio.

De igual forma, la cartografía geológica aplicada adquiere gran interés por la información geológica que ofrece de la región, como es el caso del mapa hidrogeológico nacional a escala 1:1.000.000 [188] en donde se puede encontrar información geológica de interés hidrogeológico; de áreas de prospección minera [186]; el mapa del vulcanismo Cenozoico del norte de Chile y el de distribución de áreas geotermales en el norte de Chile [202].

Los trabajos realizados hasta la fecha han permitido fortalecer el conocimiento de la geología de la región, centrandose especial atención en las características estructurales que hoy han redefinido hipótesis relevantes desde el punto de vista económico e hidrogeológico en aquellos lugares de interés para la región. Al respecto, los avances en la investigación geológica han permitido realizar modelos conceptuales de la geología de sectores como la Pampa del Tamarugal [107] debido a su importancia hidrogeológica, el cual ha sido importante para la incorporación de los condicionantes geológicos en el comportamiento hidrogeológico característico del acuífero. En la actualidad, el SERNAGEOMIN está desarrollando diversos proyectos relacionados con la generación de nueva cartografía geológica a escala 1:50.000 en la región (aunque en ciertos lugares de la región ya existe cartografía geológica a esta escala; ver capítulo IV) así como nuevos productos geofísicos en la Pampa del Tamarugal para la redefinición en detalle de la geología de la región.

## 1.7. LA PAMPA DEL TAMARUGAL

Dentro de la región, la Pampa del Tamarugal es de gran importancia por sus características hidrogeológicas conferidas principalmente por sus características estructurales y sedimentarias [206; 233]: la Pampa del Tamarugal es una fosa tectónica alargada entre la Cordillera de la Costa y de Los Andes. El relleno Terciario y Cuaternario de la Pampa del Tamarugal es producto de abanicos, glaciares y depósitos eólicos [206; 233]. Esta cualidad le proporciona un comportamiento hidrogeológico particular: a pesar de la extrema aridez, la Pampa del Tamarugal dispone de agua subterránea debido a que las precipitaciones en las partes altas de la cordillera generan un escurrimiento

que se concentra mayoritariamente en quebradas encajonadas en el piedemonte y, que al llegar a la Pampa, se infiltra profundamente en las formaciones gruesas del ápice de los conos de deyección para continuar subterráneamente aguas abajo hacia el extremo oriental de la Cordillera de la Costa, donde estarán más cerca de la superficie, es decir, en las depresiones arcillolimosas que se originan entre los abanicos permitiendo la formación de los salares [206; 285].

Durante este recorrido subterráneo, estas aguas disuelven las sales contenidas en los aluviones de origen volcánico; cuando el agua se encuentra a escasa profundidad las sales precipitan debido a la evaporación intensa originando tres tipos de salares: de tipo caótico o de terrones, laminares o poligonales y mixtos [206]. La composición mineralógica de estos ambientes se detalla en el estudio de Sayes (1972).

De igual forma, el estudio de la distribución de los abanicos o conos de deyección, por donde ha escurrido estos flujos de agua, ha permitido reconstruir la evolución morfoclimática de la Pampa del Tamarugal [199; 206; 233; 232]. En la región se destaca la presencia de uno de los abanicos aluviales más grande del mundo: el abanico de Arcas [199], el cual se comparte entre la I y la II región (siendo esta última la que presenta una mayor extensión del abanico). Dicho abanico ha sido de gran interés por sus características sedimentarias y geomorfológicas, lo que ha llevado al desarrollo de modelos de erosión-transporte-sedimentación para comprender su génesis y su relación con eventos paleoclimáticos característicos en la región [199].

El piedemonte de la Pampa del Tamarugal por donde discurren las quebradas, de acuerdo a las edades radiométricas de las ignimbritas (23 a 16 Ma) las cuales se distribuyen ampliamente en todo el piedemonte, permiten ubicar a la Formación del piedemonte andino en el Oligo-Mioceno. Durante el Mioceno Superior los factores tectónicos y climáticos determinaron una profunda erosión del piedemonte debida a los cursos de agua originados. Al término del Mioceno, las características geomorfológicas del piedemonte definidas hasta entonces, se preservan permanentemente debido a una acentuación de la aridez en la región [230]. Igualmente, las terrazas fluviales de la cuenca de la Pampa del Tamarugal presentan evidencias de flujo superficial existente en el pasado. En los estudios realizados por Nester *et al.* (2007) y Nester (2008) se propone que estos depósitos representan el mayor evento de recarga subterránea de los últimos 18.000 años a pesar de que eventos de menor recarga han ocurrido entre los 1.070 y 700 años antes del presente [232; 233]. Este evento, como es de esperar, repercutió en cambios paleoecológicos de los sectores intermedios de las zonas elevadas y en los lagos del Altiplano [232; 233].

Dentro de las características geomorfológicas mencionadas, Velozo (1974) realiza una caracterización geomorfológica de la Pampa O'Brien<sup>3</sup>, la cual corresponde a una parte de la Pampa del Tamarugal en el sector denominado Pampa Iluga en la des-

embocadura de la quebrada de Tarapacá. En este estudio se detalla mediante croquis las áreas de erosión y sedimentación de las quebradas Aroma, Seca y Tarapacá, así como las áreas de confluencia de las quebradas Tarapacá y Quipisca [286].

Por otro lado, los depósitos eólicos existentes en la pampa tienen forma de médanos (nebkhas) todavía activos por el encostramiento salino, o bien de dunas activas y móviles (barkhanes) [206]. El transporte de estos materiales se debe especialmente a los vientos dominantes del oeste, los cuales transportan grandes cantidades de arena y la acumulan en el reborde oriental de la Pampa, tapizando los altos escarpes de más de 100 metros de altura, como al norte de Puquio Nuñez o en el sector de la Calera y fosilizando totalmente los barrancos pequeños existentes [206].

## 2. HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

La región de Tarapacá se caracteriza por sus cuencas cerradas o endorreicas, tanto en el Altiplano (cuencas altiplánicas) como en la Depresión Intermedia (cuena de la Pampa del Tamarugal), limitadas al norte y sur por cuencas exorreicas que desembocan en el mar (cuencas de Camiña y Río Loa). Esta característica añadida a la condición árida, en la cual la evaporación supera ampliamente la precipitación, ha condicionado y condiciona un funcionamiento hidrológico e hidrogeológico único en el cual dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas con recarga lateral que conforman el único recurso permanente.

Las condiciones meteorológicas, geomorfológicas y geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas condicionan ecosistemas frágiles ya que el equilibrio hidrológico que resulta del balance hídrico en estado natural (las entradas al sistema igualan las salidas a largo plazo), se altera al cambiar una variable como ocurre al aumentar las descargas.

La Región de Tarapacá es, en su mayor parte, una zona árida con precipitaciones casi nulas en la Planicie Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia, que aumentan gradualmente con la altura en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano valores medios anuales entorno a los 150 – 180 mm. Por otro lado, la evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico ya que supera ampliamente a las precipitaciones al alcanzar un promedio de 2.000 a 3.000 mm/año en la Depresión Central [99; 104; 244] y los 1.000 a 2.000 mm/año en el Altiplano [256].

El agua superficial, en forma de precipitaciones y escurrimientos superficiales, sólo se materializa en el Altiplano y en la Precordillera hasta alcanzar la Depresión Intermedia de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos. El

conocimiento de los recursos hídricos superficiales se basa y se limita al análisis de los datos generados por las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la Dirección General de Agua (DGA). Los datos generados por estaciones de monitoreo pertenecientes a instituciones privadas y académicas raramente se han analizados en conjunto [256].

Adicionalmente, el agua subterránea constituye el principal recurso hídrico permanente (característica común de muchas zonas áridas del mundo). Las características geomorfológicas y geológicas han favorecido la acumulación de volúmenes de agua en los acuíferos de la región cuya edad ha sido definida entre reciente y 10.000 años [15; 216; 156]. Lo anterior lleva a considerar una buena parte del agua subterránea de la región como un recurso no renovable. Esto se debe especialmente al movimiento lento del agua hacia las zonas más bajas de las cuencas cerradas desde el Mesozoico.

La DGA monitorea mediante pozos los acuíferos de la Pampa del Tamarugal y el Salar del Huasco. Las compañías mineras generan datos de los acuíferos (de los cuales extraen agua para sus faenas) en el marco de sus respectivos programas de monitoreo. Aun así, varias cuencas y subcuencas no cuentan con un monitoreo de sus aguas subterráneas. Por otra parte, los estudios se han focalizado en definir la recarga y, en menor medida, volúmenes disponibles, lo cual ha determinado un grado de incertidumbre alto debido a la ausencia de datos. No existe una visión clara de la evolución de los niveles de los acuíferos y predicción de la evolución a corto, medio y largo plazo.

### Reseña histórica de los estudios realizados sobre los recursos hídricos de la región

Los estudios más antiguos, a pesar de su antigüedad, generaron datos e información de interés a la hora de estudiar la evolución histórica de la oferta y demanda de los recursos hídricos en la región aunque a menudo solo de forma cualitativa debido la complejidad de compararlos con datos más recientes. Billingham (1893), Bruggen (1918 y 1936), Taylor (1947), Castillo (1960) y Dingman & Galli (1965), describieron la hidrología e hidrogeología de una región que todavía se podía considerar en estado natural con respecto a los recursos hídricos. Los cuatro últimos estudios aportan información geológica, hidrológica e hidrogeológica que se considera de interés y cuyas afirmaciones son vigentes en la actualidad.

En las décadas de los 70 y 80, varios estudios se enfocaron en la descripción de las cuencas y sistemas hidrográficos a partir de la recopilación de datos hidrológicos (precipitación, aforos) y de la descripción más precisa de los sistemas hidrográficos de la región (escurrimientos, vertientes, etc.) [172; 200; 208; 235]. La consultora Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH) en 1983 da un paso más y estudia los registros meteorológicos y fluviomé-

<sup>3</sup> Llamada así debido a que este sector fue cartografiado por el ingeniero Antonio O'Brien durante el siglo XVIII.

tricos de las estaciones de monitoreo de la DGA, proponiendo un modelo hidrológico para estimar las variables en cuencas sin registros, las cuales eran y siguen siendo numerosas en la región.

En 1980, el Comité de Sales Mixtas de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) realizó estudios con el objetivo de investigar la potencial explotación comercial de las sales inorgánicas de los salares de la región (Huasco, Coposa, Bellavista y Llamara), en particular del sulfato de sodio. Los resultados no concluyeron en un interés comercial.

Por otro lado, se destaca el estudio regional realizado por Karzulovic & García (1978-1979) diseñado y coordinado por la DGA con la colaboración de la Intendencia y la Secretaría Regional de Planificación (SERPLAC), el cual se titula: “*Evaluación de los recursos hídricos de la Provincia de Iquique*”. Este estudio trata de una recopilación y análisis de toda la información existente sobre los recursos hídricos a la fecha del estudio. No se generan nuevos datos pero recopila una gran cantidad de datos históricos (niveles, caudales, análisis químicos) que han sido integrados al análisis temporal del presente estudio.

Asimismo, en los años 80 se iniciaron estudios de análisis de la red de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas, fluvio-métricas, de calidad de agua y piezométricas de la DGA [9; 28]. De igual forma se generan los primeros estudios basados en análisis estadísticos y en modelos hidrológicos de los registros para evaluar el balance hídrico de las diferentes cuencas y cuerpos de agua [177; 179; 180; 265; 115]. Las variables hidrológicas que suscitaron más interés, por su relevancia en el balance hídrico, fueron la precipitación y la evaporación [175; 176]. El Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN) (1976) realiza el primer inventario de recursos naturales mediante imágenes satelitales, caracterizando especialmente las variables hidrológicas (precipitación, evaporación, evapotranspiración) para elaborar un balance hídrico por cuenca. En 1987 la DGA realiza el Balance hidrológico por región y cuenca, calculado en las regiones I y II para 20 años entre 1961 y 1980.

De esta forma en los años 80 los estudios denotan ya una preocupación creciente por el futuro abastecimiento del agua potable en las ciudades del norte de Chile, en particular las ciudades de Iquique y Arica. Ruiz (1969) estudia fuentes alternativas de agua, específicamente la reutilización, la desalación y la extracción de agua subterránea en la Pampa del Tamarugal. En este marco, los recursos superficiales permanentes del Altiplano han sido objeto de interés a largo del tiempo debido al interés en aprovechar sus aguas para el riego en el sector de Pica [8].

Alamos & Peralta (1984) mencionan el reiterado interés en el tiempo de aprovechar las aguas de los ríos afluentes del Salar del Huasco para el riego en Pica. El estudio concluye que es factible extraer 100 l/s para su trasvase hacia Pica y así duplicar la superficie de riego de aquella época.

**Los recursos hídricos del Salar del Huasco:** Hargis & Montgomery (1981) cuantificaron los recursos hídricos subterráneos potencialmente disponibles, mientras que en 1985 el estudio CIAPEP titulado “Uso múltiple de las aguas del Salar del Huasco”, en su evaluación económica estima un caudal potencialmente extraíble en el Salar del Huasco de 2.400 l/s, el cual no afectaría de ninguna forma al sistema hidrológico. Posteriormente, la DGA (1986), en un trabajo con la Universidad Católica del Norte, la Universidad Católica de Chile y el Instituto Francés de Investigaciones Científicas para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM), considera sobrevalorado el caudal de extracción determinado y argumenta la necesidad de realizar un estudio de la evaporación e hidrogeológico completo en la Pampa del Tamarugal y en el Salar del Huasco. Este estudio se materializará en el estudio conocido como JICA que se realizara en los años 1993-1995.

Ayala & Cabrera (1987, 2001 y 2007) abordan la problemática de la demanda, su estimación actual y proyección futura. Durante estas experiencias, se ha evidenciado la complejidad para entender y mejorar el conocimiento de la demanda y el uso del agua, lo cual ha estado siempre presente ya que el sistema de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) de la DGA no lo permite [22; 261].

Por otro lado, en esta época, se realiza el Mapa hidrogeológico de Chile a escala 1:2.500.000 y 1:1.000.000, en donde se caracteriza la piezometría de los acuíferos de la Pampa del Tamarugal y del Salar de Llamara, así como de los acuíferos existente en las diferentes cuencas altiplánicas (Colchane, Cariquima, Lirima y Lagunilla, Huasco y Coposa) y del acuífero costero (Iquique).

En las décadas de los noventa y del 2000, varios estudios intentan elucidar la hipótesis de la recarga oriental (Precordillera y Altiplano) de la Depresión Intermedia, lo cual se mantiene todavía vigente al día de hoy ya que la existencia de flujos subterráneos profundos no ha sido comprobada aún. El estudio de la conexión entre cuencas, en particular entre cuencas altiplánicas y la Depresión Central (Pampa del Tamarugal), se ha centrado principalmente en la zona del Salar del Huasco – Pica [156; 193; 197; 279; 314].

En los años noventa, con el inicio de los megaproyectos mineros del cobre, aparecen los primeros Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) en: Minchincha, Coposa, Huasco y Lagunilla. A partir del año 2000, estos estudios aportan al conocimiento hidrológico e hidrogeológico de las cuencas gracias a la generación de una gran cantidad de datos y modelos.

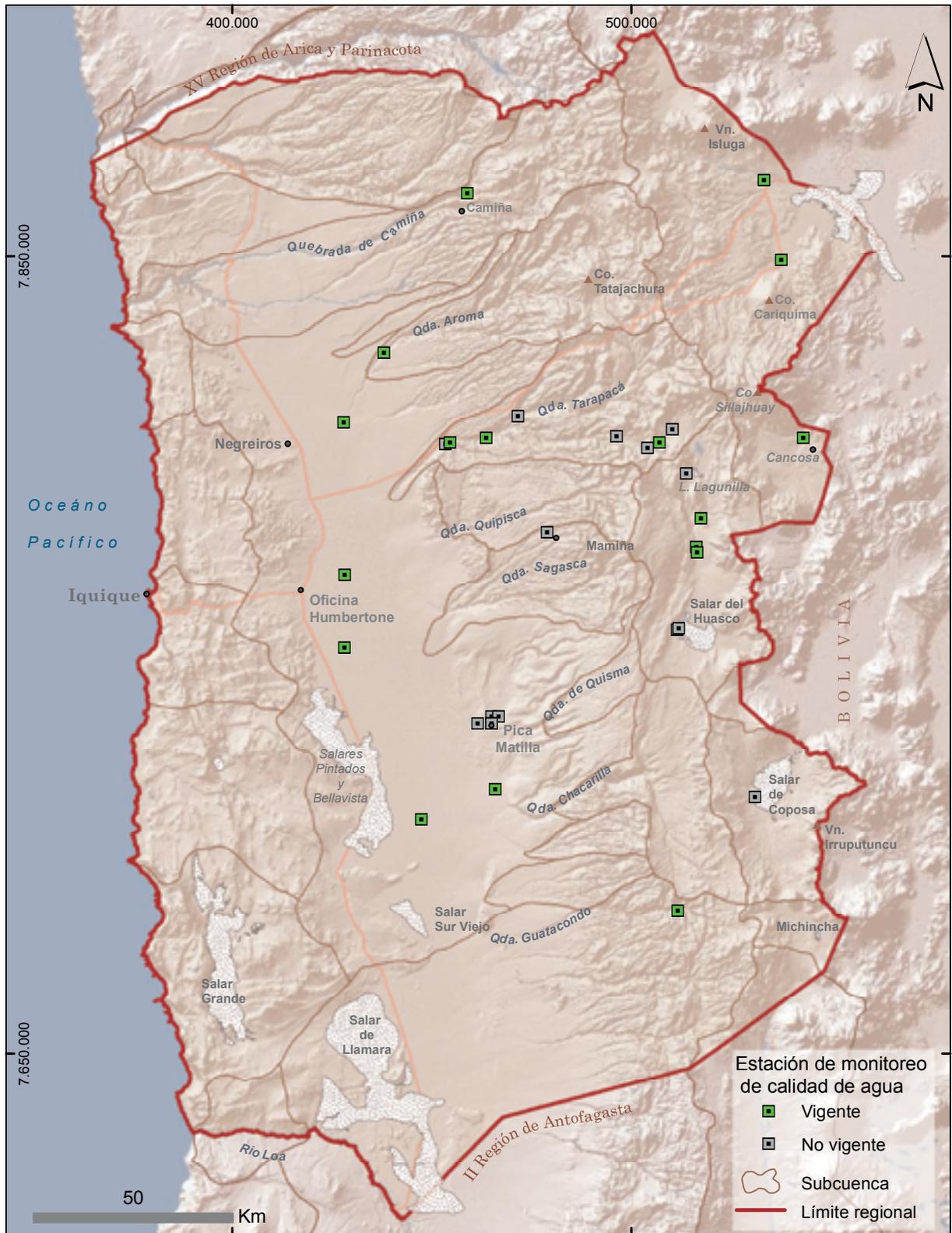


Figura 8. Red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA.

### 3. CALIDAD DEL AGUA

La región de Tarapacá es una de las zonas más áridas del mundo, caracterizada desde el punto de vista geoquímico por la escasa materia orgánica y la notable abundancia de sólidos inorgánicos, por lo que ha sido prioridad realizar estudios públicos y privados relacionados con la hidroquímica de sistemas hídricos particulares. La administración del recurso le corresponde a la DGA perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP), quienes han desarrollado la mayoría de los estudios revisados y analizados en esta sistematización. La DGA presenta estudios estadísticos en sus redes de monitoreo a lo largo y ancho del país, así como estudios específicos por cuencas o unidades hidrográficas encargados a centros de investigación y/o desarrollo, universidades o instituciones académicas. La figura 8 muestra la red de monitoreo en la región de Tarapacá.

En la década de los años noventa se instalaron en el Altiplano y en la Precordillera tres megaproyectos de la minería del cobre liderados por la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), la Compañía Minera Quebrada Blanca (CMQB) y la

Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC). Para el desarrollo de sus actividades industriales, la DGA ha adjudicado a estas empresas DAA en los acuíferos localizados en las cuencas endorreicas altiplánicas de la región: las cuencas de los salares de Michincha, Coposa y Lagunilla.

Junto con estos derechos adjudicados, se han establecido programas de monitoreo en las áreas de impacto del proyecto, lo que ha permitido tener un mayor conocimiento de la calidad de las vertientes, los cuerpos de agua someros y las lagunas situadas en las cuencas del Salar de Michincha, Salar de Coposa, Salar del Huasco y Laguna Lagunilla [39; 40].

Asimismo, otra de las principales actividades económicas de la región está relacionada con la explotación de yodo, nitratos, sulfatos y cloratos, la cual se desarrolla en la Depresión Intermedia. Entre las actividades desarrolladas en dicho lugar, se destaca la realizada por la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) con el proyecto Pampa Hermosa. Al igual que las otras compañías mineras, la DGA otorgó DAA a dicha empresa para el desarrollo de sus actividades, con el compromiso junto con el EIA correspondiente, de efectuar una monitorización de la calidad del agua subterránea y superficial en las áreas de influencia del respectivo proyecto (considerando exclusivamente el Salar de Llamara, la quebrada Amarga y la desembocadura del río Loa).

Además de esta información, los estudios de isotopía en las aguas de nieve, lluvia, superficial y subterránea [271; 272; 320] y los estudios de vías evolutivas y simulación por evaporación de aguas [211; 213], forman una importante fuente de información en cuanto a la hidroquímica de los recursos hídricos de la región de Tarapacá. Sin embargo, no existe información de la hidroquímica en las cuencas costeras y de los humedales que se encuentran en la desembocadura del río Camiña. En la tabla 3 se recogen los principales estudios desarrollados hasta la fecha relacionados con la hidroquímica de los recursos hídricos de la región, mientras que en la tabla 4 se desarrolla cronológicamente las principales temáticas tratadas en los respectivos estudios hidroquímicos.

De esta forma, el conjunto de información actualmente disponible sobre la hidroquímica de los principales recursos hídricos de la región, se configura como un banco de datos de gran importancia que desde principios de los años sesenta, han evaluado los parámetros físicos-químicos, la evolución temporal y espacial de elementos representativos, y la composición química de especies nocivas para la salud presentes en el recurso hídrico, con el principal objetivo de evaluar la calidad del agua destinada al consumo humano o a la agricultura.

Estos parámetros se evalúan de acuerdo a la normativa vigente desarrollada por el estado<sup>4</sup> o por normas secundarias relacionadas con estudios isotópicos con el fin de determinar criterios de referencia en la evaluación de los parámetros obtenidos. Al respecto, los parámetros usualmente analizados para la caracterización hidroquímica (salinidad, pH, iones mayorita-

Tabla 3. Estudios hidroquímicos por zona hidrográfica.

Fuente	I	II	III	IV
Castillo, 1960		◆		
DGA, 1978 a/b	◆	◆	◆	◆
DGA, 1985	◆	◆		◆
Magaritz <i>et al.</i> , 1989	◆	◆		
Ayala <i>et al.</i> , 1994	◆	◆		◆
JICA, 1995	◆	◆		◆
Carrasco <i>et al.</i> , 1993	◆			
Torres, 1997	◆			
Hauser, 1997	◆	◆		◆
Grilli, 1999	◆	◆		
Risacher <i>et al.</i> , 1998	◆	◆		
Risacher <i>et al.</i> , 2003	◆	◆		
CADE-IDEPE, 2004		◆		
Herrera <i>et al.</i> , 2004	◆			
PRAMAR <i>et al.</i> , 2007			◆	
Sträter <i>et al.</i> , 2010				◆
DICTUC, 2007d/e		◆	◆	
PUC, 2009	◆			
Herrera <i>et al.</i> , 2009	◆		◆	
DGA, 2005	◆	◆	◆	◆
Herrera <i>et al.</i> , 2012b	◆	◆	◆	◆

I: Altiplánica; II: Pampa del Tamarugal; III: Llamara y Río Loa; IV: Costeras y Camiña - Camarones.

Tabla 4. Evolución de las temáticas en los estudios analizados en función del tiempo.

TÓPICOS	PERIODO									
	1960	1990-00	2000-01	2002-03	2004-05	2006-07	2008-09	2010-11	2012	
Calidad (clasificación geoquímica As, B)	■	■								■
EIA/Monitoreos		■								■
Termas y aguas minerales			■							
Isotopía (conexiones entre cuencas)			■							
Vías evolutivas			■	■						
Normas secundarias de aguas continentales					■					■
Recarga, circulación y descarga en acuíferos						■				
Normativa chilena al respecto							■			■
Modelos							■			■

rios, metales y metaloides), han permitido identificar tendencias y comportamientos característicos de los diversos cuerpos de agua que existen en la región. Aun así, para armonizar las clasificaciones en cada estudio es necesario considerar las metodologías de medición y de análisis definidas por cada autor, aunque dicho proceso resulta ser complejo por la ausencia de una descripción clara y completa de la metodología en la mayoría de los estudios analizados.

En base a lo anterior, en la región se reconocen varios cuerpos de agua naturales con pH cercanos a la neutralidad, salvo en las cabeceras de los ríos del Altiplano en donde la acidez disminuye. Este comportamiento característico se aprecia especialmente en una vertiente termal cercana al volcán Irruputuncu (cuenca Salar de Coposa) donde el pH es ácido (2,7-3,1) [162]. A medida que las aguas circulan, ocurren reacciones de neutralización que junto al aporte de especies básicas, se eleva el pH hasta alcanzar la característica alcalinidad. A pesar de este comportamiento, otro de los posibles causantes del aumento de la acidez es la contaminación por relaves y por botaderos producto de la actividad minera<sup>5</sup>, aunque al respecto es necesario realizar más investigación.

Asimismo, la mayoría de las clasificaciones geoquímicas presentan valores de las concentraciones de Sodio (Na<sup>+</sup>), Potasio (K<sup>+</sup>), Magnesio (Mg<sup>2+</sup>), Cloruro (Cl<sup>-</sup>), Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y Carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), lo que permite desarrollar, mediante gráficos, la clasificación geoquímica de las aguas por iones

dominantes. En base a esto, varios documentos presentan diagramas de Piper o representaciones gráficas de Scott donde se determina la clasificación geoquímica en función del porcentaje significativo del ión dominante.

**El análisis de estos parámetros ha permitido identificar problemas de salinidad en las aguas naturales de la región, así como la presencia de elementos tóxicos y/o nocivos para la salud.** En este aspecto, las elevadas concentraciones de Arsénico (As) registradas en los puntos de la red de monitoreo de la DGA, sobrepasan en varias unidades el máximo establecido por la normativa vigente. Tal es el caso del río Isluga y de los pozos Quebrada Chacarilla y Quebrada Aroma. Asimismo, los valores de salinidad encontrados definen un intervalo que va desde los 50 a 350.000 mg/l (contenido total de Sólidos Totales Disueltos - STD), definiendo una característica particular de las aguas de la región en comparación con las existentes en las regiones sur del país. Por otro lado, en el oasis de Pica y en el sector de Matilla las aguas han sido clasificadas de excelente calidad de acuerdo a la legislación vigente [24; 111; 124].

La definición de estos parámetros guarda una relación con las características geológicas de los reservorios y/o lechos de escorrentía por donde el agua circula bajo una continua dinámica físico-química. De esta forma, las aguas con contenidos de STD hasta 500 mg/l, deben principalmente su origen a la mineralización de rocas volcánicas sin la mineralización de sulfatos, mientras que aquellas con contenidos de STD de 600 a 2.000 mg/l son

<sup>4</sup> El Instituto Nacional de Normalización (INN), es el organismo chileno responsable del estudio y preparación de las normas oficiales de calidad del recurso hídrico.

<sup>5</sup> Usualmente en sectores de la minería del cobre que usan procesos de lixiviación en pila, hay probabilidad de contaminación atmosférica por difusión de ácido sulfúrico y el consecuente efecto de las lluvias ácidas.

producto de la lixiviación de rocas sedimentarias así como de aguas sometidas a procesos de evaporación.

En el caso de las lagunas de los salares de Coposa y Huasco (Altiplano) y los “*puquios*” del salar de Llamara (Depresión Intermedia), los máximos contenidos de STD se dan en las épocas de mayor evaporación (octubre-diciembre). Por otro lado, las aguas subterráneas de la Pampa del Tamarugal presentan variabilidad espacial en los STD: en los sectores de la Huaica, la Tirana, Canchones y de Colonia de Pintados la salinidad es baja mientras que en los sectores de Dolores, Negreiros, Cala-Cala ocurre lo contrario, debido fundamentalmente a los procesos de evaporación de las aguas sulfatadas y cloradas que allí se localizan. Asimismo, en el sector de norte del salar de Bellavista se encuentran las aguas con mayores STD registrados [124; 193].

De igual modo, las concentraciones de Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), Fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), Arseniatos ( $\text{AsO}_4^{3-}$ ) y Boratos ( $\text{BO}_3^{3-}$ ) no han sido registrados sistemáticamente aunque en reiterados estudios se realizan análisis de los  $\text{AsO}_4^{3-}$  y  $\text{BO}_3^{3-}$ . En los reportes de calidad de las aguas termales de la región, se señalan concentraciones de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y Litio (Li) debido a que son elementos asociados a la actividad termal [162]. En la región, se identifican áreas con elevadas concentraciones de As, B y Mn, principalmente en todas las aguas del Altiplano y en las quebradas de Camiña, Aroma, Chacarilla y Huatacondo, particularmente en el pozo de la Colonia de Pintados.

Esta síntesis deja en evidencia que la mayoría de los estudios ha permitido caracterizar la hidroquímica de los cuerpos naturales de agua. Junto a los estudios isotópicos, han hecho posible la caracterización de sus comportamientos y sus relaciones o conexiones entre sí. Asimismo, en los estudios mencionados anteriormente, no hay registro de programas de monitoreo o vigilancia para microorganismos fecales ni de pesticidas y/o triclorometano en aguas naturales de la región.

Por lo tanto, es necesario ampliar la red de monitoreo actual con el fin de disponer de una red de vigilancia de “alerta temprana” en aquellos sectores donde se desarrollan actividades agrícolas, mineras y sanitarias, debido especialmente a la escasa o nula información disponible en ciertos sectores de interés, lo que permitiría la preservación del recurso y la prevención de enfermedades hídricas en ciertos lugares de interés demográfico. En esta red de monitoreo, es necesario contemplar las normas de vigilancia de aguas continentales las cuales proponen programas de monitoreo para tres años considerando ciertos parámetros obligatorios tales como el registro de cationes y aniones mayoritarios, la relación  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ , coliformes, As, B, Mn, Vn, Zn y Fe en las quebradas de Camiña, Tana, Aroma, Guaraciña, Mamiña, Guatacondo, Maní, Amarga y en el sector de la Calera.

Además, es necesario realizar un estudio exhaustivo sobre la relación entre las características geológicas de la región y la hidroquímica resultante, en especial, aquella que define los patrones de recarga, circulación y descarga de agua en la región, como por ejemplo el impacto del volcán Isluga por el norte y el volcán Irruputuncu por el sur, el impacto de la temperatura en las rocas y lavas volcánicas. Finalmente, en el patrón propuesto de recargas, movimientos y descargas de aguas en la región de Tarapacá y que se detallan en el capítulo III, se han considerado las siguientes características geológicas y geográficas:

- Recarga por precipitaciones y el deshielo.
- Presencia del volcán Isluga por el norte y el volcán Irruputuncu por el sur.
- El cerro Sillajuay de 5.995 m s.n.m. y su glaciar.
- La temperatura en conjunto con las concentraciones de Si, Li y As-Se-Sb y B, estableciendo rangos de temperatura entre 80 °C; 40 °C; 33 °C y 20 °C.
- La Formación Altos de Pica.
- Carácter endorreico y exorreico de las cuencas de la región.
- La presencia de salares al sur de la Depresión Intermedia en la región.

Las consideraciones geológicas principales son de gran utilidad para planear los futuros aprovechamientos de los recursos hídricos, apoyando la caracterización de los acuíferos según la geoquímica y definiendo los problemas ambientales así como los conflictos entre usuarios del agua.

## 4. DEMANDA Y USO DEL AGUA

La estimación de la demanda hídrica y el análisis de los diferentes usos del agua en la región de Tarapacá (como en todo Chile) se basan en la información contenida en el Catastro Público de Aguas, en el cual la DGA registra los DAA. Sin embargo, existen altas incertidumbres a la hora de analizar la demanda y los usos del agua.

El Código del Agua del año 1981, define un *derecho de aprovechamiento* como todo aquel derecho otorgado tanto a personas naturales como jurídicas que solicitan un caudal, siempre y cuando este no afecte a terceros y/o produzca algún impacto ambiental. Es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe el Código.

La DGA, encargada de la administración de los DAA, otorga o rechaza solicitudes de DAA (de tipo ND y UA<sup>6</sup>); sin embargo, no cuenta con la potestad para regularizar el DAA tipo NR<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Clasificación de la DGA respecto a las solicitudes de DAA: ND = Nuevos Derechos; NR = Regularización de derechos; UA = Usuarios Antiguos o Merced de Agua: Derechos de aprovechamientos de aguas, otorgados y reconocidos como tal, antes de la creación de la DGA (1981).

ya que solo actúa como contraparte técnica frente al Juez de Letras, quien revisa, dicta la resolución y otorga un respectivo caudal<sup>7</sup> al DAA. El proceso finaliza cuando el DAA está inscrito ante el Conservador de Bienes Raíces (CBR), siendo este último el que cuenta con la información completa sobre regularizaciones de DAA. Sin embargo, la DGA desconoce casi en su totalidad la finalización de la solicitud a pesar de que la ley 20.017 del 2005 obliga la retroalimentación de la información hacia la DGA<sup>8</sup>. En consecuencia, la información con la que cuenta la DGA referente a las regularizaciones es incierta e incompleta, no permitiendo estimar de manera precisa tanto la cantidad de DAA regularizados (NR), como el caudal total otorgado. Por ello, en este trabajo para la cuantificación del caudal existente por cuenca se especifica el caudal *solicitado* (establecido por el propio peticionario) y caudal *otorgado* (propuesto por la DGA).

Asimismo, existe una gran incertidumbre en la cuantificación de los diferentes usos del agua. En el proceso de solicitud de un DAA, no se especifica el uso que se pretende dar al recurso hídrico. Sin embargo, la DGA según la información presentada por el titular o peticionario del derecho de agua, logra establecer un posible uso, siendo por lo tanto solo una especulación. De igual forma, se desconocen las transacciones de DAA que ocurren después del otorgamiento (propietario actual del DAA).

Finalmente, se intuye una diferencia notable entre el caudal otorgado y el consumo real, ya que la DGA por limitaciones internas no ha podido poner en marcha un programa de control de extracciones de todos los DAA, aunque lo ha realizado para los usuarios de aguas subterráneas con mayores caudales, es decir, cuyo DAA sea mayor a los 20,0 l/s<sup>9</sup>.

Por otro lado, en este trabajo se han analizado los DAA de naturaleza subterránea y superficial en la región de Tarapacá, cuya información se ha obtenido de los registros de la DGA para su posterior sistematización. Se consideraron todas las solicitudes de DAA en estado actual "Aprobado, Aprobados Provisionalmente o Aprobado con Recurso de Reconsideración".

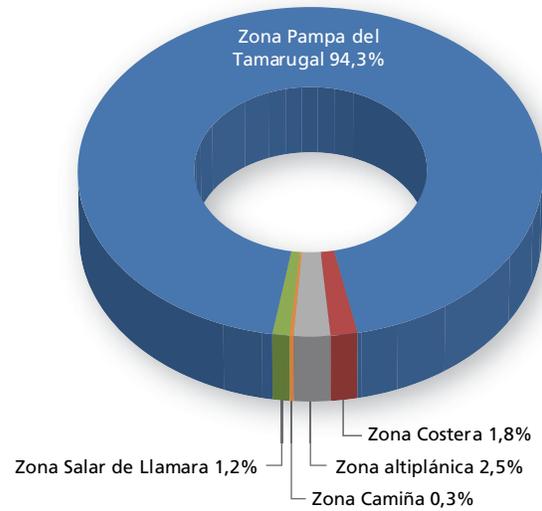


Figura 9. Repartición de los DAA subterráneos por zona hidrográfica.

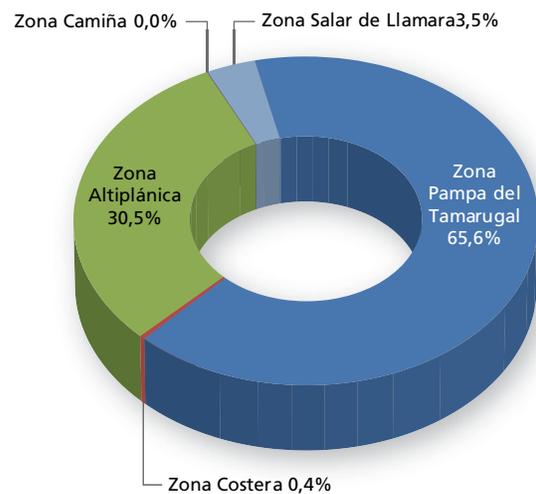


Figura 10. Repartición del caudal total otorgado a DAA subterráneos por zona hidrográfica.

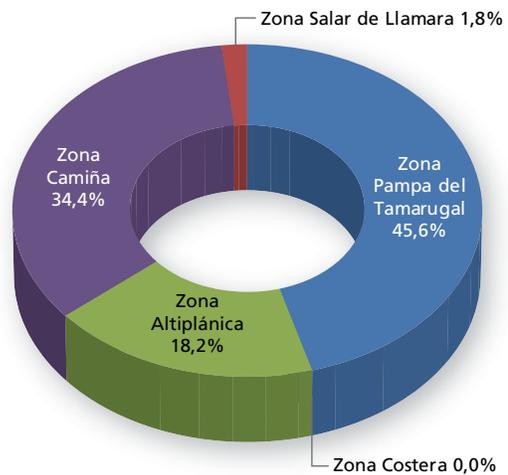


Figura 11. Repartición de los DAA superficiales por zona hidrográfica.

<sup>7</sup> La DGA elabora un informe favorable o desfavorable a la solicitud del peticionario que entrega al Tribunal Letrado, en donde el Juez determina el otorgamiento o rechazo de dicha solicitud. En el caso de que el Juez de Letras otorgue la solicitud de DAA, puede considerar o no el caudal propuesto por la DGA (puede otorgar como un caudal máximo el solicitado por el peticionario u otorgar un caudal menor a lo propuesto por la DGA en su informe).

<sup>8</sup> Las modificaciones realizadas al Código de Agua en el año 2005 determinan que el Catastro Público de Aguas debe ser actualizado diariamente, utilizando entre otras fuentes, la información que emane de escrituras públicas y de inscripciones que se practican en los registros de los CBR. Para cumplir lo anteriormente señalado, los Notarios y el CBR deben enviar las inscripciones y demás actos que se relacionen con la transferencia y transmisiones del dominio de los DAA, lo que desgraciadamente no siempre se cumple.

<sup>9</sup> Resolución DGA n° 395, 26 de septiembre 2011.

Tabla 5. Resumen de los DAA de naturaleza subterránea y superficial aprobados con el caudal otorgado en la Región de Tarapacá por zona hidrográfica.

Zona hidrográfica	DAA Superficial				DAA Subterránea			
	DAA		Caudal		DAA		Caudal	
	N°	%	l/s	%	N°	%	l/s	%
Pampa del Tamarugal	178	46	-	-	722	94	4924	65,5
Costera	0	0	-	-	14	2	27	0,4
Altiplánica	71	18	-	-	19	2,5	2289	30,5
Camiña	134	34	-	-	2	0,3	3,5	0,1
Río Loa (Salar de Llamara)	7	2	-	-	9	1,2	260	3,5
<b>TOTAL</b>	<b>390</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>766</b>	<b>100</b>	<b>7503</b>	<b>100</b>

En la Región de Tarapacá, a la fecha de 2012, existen 2.298 solicitudes de DAA subterráneos y 425 DAA superficiales. El análisis por zona hidrográfica de la demanda considera solo los registros posibles de localizar, los cuales corresponden a 2.033 solicitudes de DAA subterráneos y a 390 DAA superficiales.

#### 4.1. DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

En la Región de Tarapacá, en 2012 existen 766 DAA subterráneos aprobados<sup>10</sup> que corresponden a 928 puntos de captación<sup>11</sup> y a un caudal otorgado total de 7.503 l/s. Esta cantidad equivale a un 33% de los DAA subterráneos solicitados en la región a la DGA<sup>12</sup>.

De acuerdo a las zonas hidrográficas definidas en base a la delimitación de la DGA (2000), se observa que la cuenca Pampa del Tamarugal posee la mayor cantidad de DAA subterráneos aprobados en la región alcanzando un 94% del total, mientras que la cuenca Quebrada de Camiña posee el menor porcentaje con un 0,3% de DAA subterráneos aprobados. Asimismo, las cuencas costeras presenta un 2%, las cuencas altiplánicas un 2,5% y la subcuenca Salar de Llamara un 1,2%.

En cuanto al caudal extraíble otorgado en la región, se observa que en la cuenca de la Pampa del Tamarugal se extrae el 65,5% del caudal total otorgado, en las cuencas altiplánicas el 30,5%, la subcuenca Salar de Llamara el 3,50%, las cuencas costeras el 0,4% y la cuenca Quebrada de Camiña el 0,1% (ver tabla 5 y figuras 9 y 10).

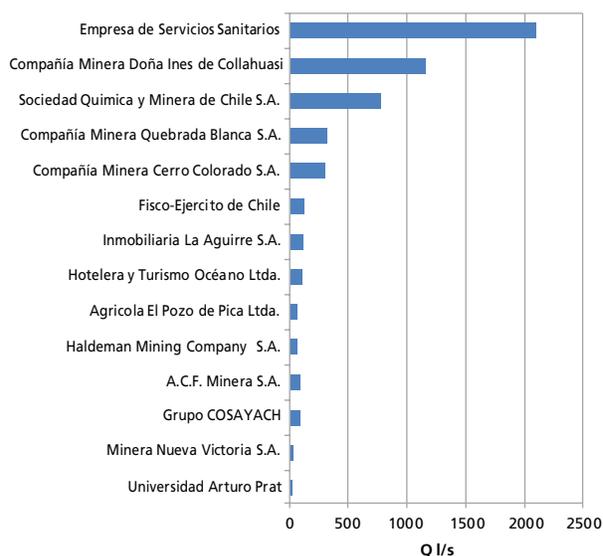


Figura 12. Caudal otorgado a los usuarios con DAA subterráneo mayor a 20 l/s en la región de Tarapacá.

#### 4.2. DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES

En la Región de Tarapacá, hasta el 2012, existen 390 solicitudes de DAA superficiales aprobados correspondientes a 776 puntos de captación aprobados.

Se puede constatar que la cuenca de la Pampa del Tamarugal posee 45,6 % del total de los DAA superficiales aprobados en

<sup>10</sup> Se consideraron todos los expedientes de DAA en estado actual de "Aprobado, Aprobados Provisionalmente o Aprobado con Recurso de Reconsideración".

<sup>11</sup> Punto desde el cual se extrae el caudal otorgado, representado por un pozo en el caso de aguas subterráneas o una vertiente o bocatoma en caso de aguas superficiales.

<sup>12</sup> La DGA fue creada en el año 1981. Anteriormente a 1981 la Dirección de Riego se comportaba como su homóloga.

la Región de Tarapacá, la cuenca de Camiña el 34,4 %, las cuencas altiplánicas el 18,2 % y la cuenca Salar de Llamara el 1,8 %. La cuenca Costera no tiene DAA superficiales aprobados.

Actualmente no se cuenta con la información del caudal otorgado de los DAA de naturaleza superficial, por ello solo se realiza el conteo del número de DAA existente en la unidad de análisis (tabla 5 y figura 11).

En la resolución DGA con fecha 2011<sup>13</sup>, se registran los usuarios con DAA mayor a 20l/s, correspondiendo a 241 puntos de captación (pozos) y a un caudal otorgado de 5.600 l/s (ver figura 12).

### 4.3. DEMANDA COMPROMETIDA

Las demandas comprometidas se entienden como aquellas que están “Aprobadas” y “Aprobadas Provisionalmente”, así como todo tipo de expediente que se encuentre con algún tipo de “Recurso de Reconsideración”, por lo que aquellos expedientes de tipo NR (regularización) son considerados dentro de la demanda comprometida.

Esta demanda comprometida presenta cierto grado de incertidumbre, debido a que puede o no ser otorgado el derecho de aprovechamiento posteriormente. Esto se debe a ciertas variabilidades presentes tanto a nivel legal como a nivel de existencia del recurso hídrico en el lugar de la extracción. Tal es el caso de los “Aprobados Provisional”, los cuales se encuentran condicionados a la disponibilidad del recurso en el medio, y que pueden ser afectados en condiciones extraordinarias o de escases del recurso por condiciones naturales.

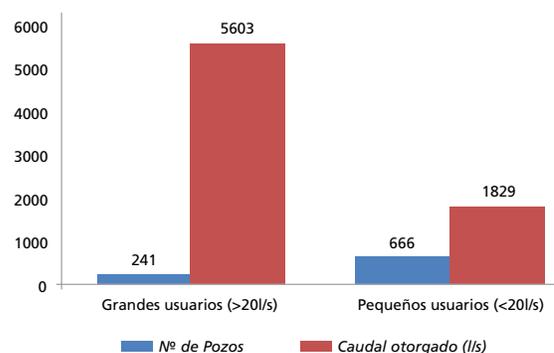


Figura 13. Número de pozos y caudal otorgado por categoría de pequeño y grandes usuarios.

#### Subcuenca Pampa del Tamarugal

De los 703 DAA existentes en la cuenca Pampa del Tamarugal, existen dos derechos comprometidos donde uno tiene por caudal otorgado 1,7 l/s y el otro de 38 l/s. Este DAA puede verse afectado así como también puede mantenerse y constituirse formalmente en un DAA de situación “Aprobado”.

#### Salar de Coposa

De los 15 DAA existentes en la subcuenca Salar de Coposa, existen siete DAA comprometidos, los cuales tienen un caudal total otorgado de 174 l/s.

<sup>13</sup> Resolución DGA n° 395

## Bibliografía

- [1] Acosta O. & Custodio E. (2008). *Impactos Ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile)*. En: Boletín Geológico y Minero, 119, p. 33 – 50. ISSN: 0366-0176
- [2] Acosta O. (2010). *A socially sustainable approach for the intensive use of aquifers in northern Chile*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [3] Acosta O. (2010). *El caso Coposa: Cómo pasar del conflicto ambiental a la construcción de una gestión hídrica proactiva y transparente*. En: Transparencia en el ámbito público y privado: Balance y desafíos pendientes. Chile Transparente. Santiago, Chile, p. 117 – 123.
- [4] Acosta O.; Rengifo P. & Dzogolyk E. (2010). *Saline groundwater: An alternative for the sustainable exploitation of Andean Highland groundwater reserves*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [5] Acosta O.; Rengifo P. & Muñoz J. (2009). *De la exploración hidrogeológica a la gestión hídrica avanzada, Salar de Coposa, norte de Chile*. En: Seminario GEOMIN 2009. Antofagasta, Chile.
- [6] Alamos F. & Peralta F. (1981). *Las aguas subterráneas en la Pampa del Tamarugal. Los recursos de agua y la reforestación*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Iquique, Chile.
- [7] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Medición y análisis de los recursos hídricos en la Pampa del Tamarugal*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [8] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1984). *Medición y análisis de los recursos hídricos en la Pampa del Tamarugal, Pica – Matilla y Río Piga y Collacagua*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [9] Alamos y Peralta Ingenieros Consultores Ltda. (1987). *Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. Región I, II, III, IV y V*. Dirección General de Agua (DGA). Chile.
- [10] Alfa Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Catastro Usuarios Provincia de Iquique. Tomo I (Pica, Matilla, Quebrada Tarapacá)*. Dirección General de Agua (DGA). Santiago, Chile.
- [11] Almeyda E. (1948). *Pluviometría de las zonas del desierto y las estepas cálidas de Chile*. Santiago, Chile.
- [12] Alvarez J. (1962). *Informe ENAP sobre posibilidades aguas subterránea en zona norte del país (provincia Tarapacá)*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [13] Aravena R. & Acevedo E. (1984). *Estudio de la relación hídrica de Prosopis Tamarugo Phil. Mediante isotopos estables, Oxígeno – 18 y Deuterio*. Chile.
- [14] Aravena R. & Suzuki O. (1983). *Evolución isotópica en ríos del norte de Chile*. Proyecto CORFO/ PNUD/ FAO/ Comisión Chilena de Energía Nuclear/ universidad de Chile. Chile.
- [15] Aravena R. (1995). *Isotope Hydrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters*. En: Bull. Inst. fr. Études andines, p. 495 – 503.
- [16] Aravena R.; Suzuki O.; Peña H.; Pollastri A.; Fuenzalida H. & Grilli A. (1999). *Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile*. En: Applied Geochemistry, p. 411 – 412.
- [17] ARCADIS GEOTECNICA. (2001). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Expansión 110 KTPD Planta Concentradora Collahuasi. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [18] ARCADIS GEOTECNICA. (2003). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto optimización Collahuasi. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [19] ARCADIS GEOTECNICA. (2006). *Declaración de Impacto Ambiental (DÍA) - Traslado puntos de captación de aguas subterráneas en Cuenca Coposa. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Santiago, Chile.
- [20] ARCADIS GEOTECNICA. (2011). *Línea Base Ambiental Salar del Huasco. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi*. Chile.
- [21] ARCADIS GEOTECNICA. (2012). *Estudio de Impacto Ambiental. Quebrada Blanca Fase 2. Teck Quebrada Blanca*. Santiago, Chile.
- [22] Aretech Geonova. (2008). *Historial de transferencia, transmisiones y otras mutaciones de derechos de aprovechamiento de aguas en conservadores de bienes raíces de las regiones Arica – Parinacota y Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [23] Atienzo K. *Cuantificación de metales y metaloides en matrices ambientales, mediante espectroscopia atómica*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [24] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (1994). *Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional. Etapa I. Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [25] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2001). *Actualización recursos hídricos para restablecimiento de derechos ancestrales indígenas I y II regiones. Informe final, SIT N° 73*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago,

- Chile.
- [26] Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Región I a IV*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [27] BF Ingenieros Civiles. (1984). *Análisis crítico de la red fluviométrica nacional. Red de calidad de aguas I y II región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [28] BF Ingenieros Civiles. (1985). *Análisis de la red hidrometeorológica nacional. Regiones I, II, III y IV. Tomo I*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [29] Billingham G. (1893). *La irrigación en Tarapacá*. Santiago, Chile.
- [30] BIOTA Gestión y Consultoría Ambientales Ltda. (2005). *Descripción vegetacional Salar del Huasco, I región de Tarapacá*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile.
- [31] BIOTA Gestión y Consultoría Ambientales Ltda. (2006). *Estudio de los sistemas vegetacionales azonales hídricos del altiplano*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Santiago, Chile.
- [32] Bolch, T. & Schröder, H. *Geomorphologische Kartierung und Diversitätsbestimmung der periglazialformen am Cerro Sillajhuay (Chile/Bolivien)*. Erlangen, Alemania, 2000.
- [33] Börgel R. (1975). *Algunas aproximaciones recientes al problema de la evolución geomorfológica de la Pampa del Tamarugal*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 375–386.
- [34] Bruggen J. (1918). *Informe sobre el agua subterránea de la región de Pica*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [35] CADE – IDEPE Consultores en Ingeniería. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad – cuenca río Loa*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [36] CADE – IDEPE. (1992). *Catastro General de Usuarios de Aguas de Cauces Ubicados en la Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [37] CADE – IDEPE. (1994). *Catastro General de Usuarios de Aguas de Cauces Ubicados en la Primera región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [38] CADE-IDEPE. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [39] Carrasco C. (1999). *Disponibilidad de agua y desarrollo sustentable en la región de Tarapacá*. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS. Antofagasta, Chile.
- [40] Carrasco C.; Sielfeld W.; Herrera V.; Tello V.; Torres C. & Torres J. (1993). *Estudio del ecosistema de Pampa Lagunilla*. Compañía Minera Cerro Colorado. Iquique, Chile.
- [41] Castillo G.; Castro M.; Bahamondes M. & Lorca V. (1993). *Caracterización de la calidad sanitaria de aguas de bofedales y vegas del área andina chilena*. En: Biblioteca Digital de la Universidad de Chile, p. (sin número).
- [42] Castillo O. (1960). *El agua subterránea en el norte de la Pampa del Tamarugal*. Boletín N° 5. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [43] Castillo O. (1966). *Profundidad, sentido de escurrimiento y calidad química de la superficie freática del agua subterránea del Salar de Pintados*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [44] Castillo O. (1967). *Plan de investigación de recursos de agua subterránea en la región precordillerana de los Altos de Pica*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [45] Castro L. (2004). *Recursos hídricos altoandinos, estrategias de desarrollo económico y proyectos de riego: Tarapacá, 1880-1930*. En: Chungara, Revista de Antropología Chilena, volumen 36, N° 1, p. 205 – 220.
- [46] Castro L. (2009). *Visión histórica del manejo de los recursos hídricos en el norte grande de Chile (fines del siglo XIX y comienzo del XX)*. 53° Congreso Internacional de Americanistas. Simposio “El acceso al agua en América: historia, actualidad y perspectivas”. México.
- [47] Castro M. (1991). *Caracterización antropológica de las poblaciones andinas de la I y II región*. Universidad de Chile y Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [48] Castro M. (1993). *Identificación y ubicación de áreas de vegas y bofedales de las regiones primera y segunda*. Universidad de Chile y Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [49] Castro M. & Bahamonde M. (2001). *Summer rains in the arid zones of the Andes mountain: the case of the aymaras and the atacameños*. En: Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community. Rio Janeiro, Brazil.
- [50] Cecioni G.; Meyerhoff A. & Teitz H. (1988). *Geology, geomorphology, and petroleum possibilities of the El Godo area, Iquique, Chile*. En: Journal of Petroleum Geology, p. 245 – 276.
- [51] CEGA Ingenieros Ltda. (2006). *Declaración de Impacto Ambiental - Explotación de sal del Salar Grande - I región*. Compañía Minera Cordillera S.A. Santiago, Chile.
- [52] Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2009). *Estudio estacional de los salares de Coposa, Michincha y Huasco*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile.
- [53] Centro de Estudios Científicos (CECS). (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [54] Centro de Estudios para el Desarrollo (CED). (2006). *Conservación de la biodiversidad y manejo sustentable del Salar del Huasco*. Chile.
- [55] Centro de Estudios para el Desarrollo (CED). (2012). *Catastro de humedales y usos indígenas de la Provincia del Tamarugal*. Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI). Chile.
- [56] Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2010). *Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile*. Región de Tarapacá. Santiago, Chile.
- [57] Centro Privado de Servicios Aéreos (CEPRISER). (1993). *Trabajo de estimulación de las precipitaciones en la primera región, mediante siembra aérea de nubes con Agl, año 1993*. Chile.
- [58] Cereceda P.; Larrain H.; Osses P.; Lazaro P.; Pinto R. & Schemenauer R. (2001). *Penetración continental de la niebla de advección en Tarapacá, Chile*. En: 8vo Encuentro de Geógrafos América Latina. Santiago, Chile.
- [59] Cereceda P.; Larrain H.; Velasquez F.; von Igel B.; Egaña I.; Osses P.; Farías M. & Pinto R. (2004). *Caracterización del clima de desierto costero y su relación con algunos oasis de niebla en Tarapacá*. Chile. Chile.
- [60] Chadwick F.; Acosta O.; Rengifo P.; Uribe J.; Delgado J.L. (2012). *Generation of long-term hidrometeorological information to improve knowledge of the local water cycle, Collahuasi, Chile*. Chile.
- [61] Charrier R.; Héral G.; Pinto L.; García M.; Riquelme R.; Farías M. & Muñoz N. (2012). *Cenozoic tectonic evolution in the Central Andes in northern Chile and west central Bolivia: implications for paleogeographic, magmatic and mountain building evolution*. En: International Journal of Earth Sciences, p. (sin número). DOI: 10.1007/s00531-012-0801-4.
- [62] Clark J. (2012). *A new approach to groundwater recharge modelling in*

- the Andean High Cordillera*. Profesor guía: Pedersen T.; Guimera J. & Arora V. University of Victoria, EE.UU.
- [63] Comisión Regional de Recursos Hídricos; Comité Público – Privado para la Conservación de la Biodiversidad y Gestión Sustentable del Salar del Huasco & Centro de Estudios del Desarrollo (CED). (2005). *Plan de gestión para la conservación de la biodiversidad del Salar del Huasco*. Chile.
- [64] Comité Chileno para el estudio de las zonas áridas (1963). *Las zonas áridas de Chile*. Santiago, Chile.
- [65] Comité Sales Mixtas. (1980). *Informe prospección preliminar Salar de Coposa*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [66] Comité Sales Mixtas. (1981a). *Informe prospección preliminar Salar Huasco*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [67] Comité Sales Mixtas. (1981b). *Proyecto Salar del Huasco. Producción de sulfato de sodio*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [68] Comité Sales Mixtas. (1981c). *Informe prospección preliminar Salar de Llamara y Bellavista*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [69] Compañía de Salitre y Yodo de Chile (SCM COSAYACH). (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Aumento Producción de Yodo Cala-Cala*. Chile.
- [70] CONIC – BF Ingenieros Civiles Consultores. (2012). *Diagnóstico de obras hidráulicas para riego, región de Tarapacá*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [71] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983a). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Aroma I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [72] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983b). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Guatacondo I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [73] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983c). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Mamiña I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [74] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983d). *Catastro General Usuarios de Aguas Quebrada de Quipisca I región – Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [75] Consultores en Economía, Planificación y Administración (CEPA Ltda.) (1983e). *Catastro General de usuarios de Aguas de la Quebrada Camiña, Primera región. Provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [76] Contreras L. & Jorquera M. *Evaluación de los genes arsenito oxidasa (aox) y arseniato reductasa (ars) en proteobacterias del sedimento del salar del Huasco, altiplano norte de Chile*. Departamento de ciencias del mar, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.
- [77] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1969). *División hidrográfica n 604 Pampa del Tamarugal. Catastro de pozos al 31 de Diciembre de 1969*. Chile.
- [78] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1970). *Informe de sondaje en pertenencia minera "Queen Elizabeth 1 – 12"*. Chile.
- [79] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1971). *Mapa Hidrográfico de Chile*. Chile.
- [80] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1982a). *Análisis de los ecosistemas de la I región de Chile*. Chile.
- [81] Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). (1982b). *Informe de suelos. Sector Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [82] Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). (1988). *Plan de manejo Parque Nacional Volcan Isluga*. Chile.
- [83] Corporación Nacional Forestal de Chile (CONAF). (1997). *Plan de Manejo Reserva Nacional Pampa del Tamarugal*. Santiago, Chile.
- [84] Corporación Norte Grande (2011). *Trabajo de cooperación para monitoreo y seguimiento al "plan de trabajo para mantención de las funciones ecosistémicas del sistema lacustre Lagunillas", entre la comunidad indígena de Cancosa y Cía Minera Cerro Colorado (CMCC)*. Chile.
- [85] Cortes A. *Caracterización de la microflora acuática en la vertiente y la laguna permanente del salar del Huasco. Altiplano del norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [86] Cuevas A. *Diagnóstico de la demanda de agua e identificación de conflictos socio-ambientales, para la propuesta de criterios de gestión sustentable de los recursos hídricos de la comuna de Pica*. Profesor guía: Romero H. Facultad de ciencias forestales y conservación de la naturaleza, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.
- [87] De la Lanza G., Cáceres C., Adame S., Hernández S. (1999). *Diccionario de Hidrología y Ciencias afines*. Instituto de Biología, UNAM y Plaza y Valdés Editores, México.
- [88] Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile (DICUC). (1988). *Modelo de Simulación Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [89] Díaz-Martínez E.; Mamet B.; Isaacson P. & Grader G. (2000). *Permian marine sedimentation in northern Chile: new paleontological evidence from the Juan de Morales Formation, and regional paleogeographic implications*. En: South American Earth Sciences, p. 511 – 525.
- [90] Digert F.; Hoke G.; Jordan T. & Isacks B. (2003). *Subsurface stratigraphy of the neogene Pampa de Tamarugal basin, northern Chile*.
- [91] Dingman R. & Galli C. (1965). *Geology and Ground-Water Resources of the Pica Área, Tarapacá Province, Chile*. En: Geological Survey Bulletin 1189. Washinton, United States of America.
- [92] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1998a). *Evaluación de recursos en zona sur de la Pampa del Tamarugal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [93] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1998b). *Informe hidrogeológico Salar Sur Viejo, I región*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [94] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (1999). *Acuífero de Sur Viejo. Caracterización hidrogeológica y evaluación de recarga subterránea*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [95] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2003). *Estudio Hidrogeológico del Salar de Llamara, I Región*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [96] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2004). *Revisión del estudio. Estación Cerro Gordo: Modelo de flujo numérico de aguas subterráneas*.

- Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) Santiago, Chile.
- [97] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005a). *Análisis técnico de las solicitudes de cambios de puntos de captación y de derechos de aprovechamientos de ESSAT. Acuífero Pampa del Tamarugal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [98] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005b). *Simulación de la Evolución del Nivel de la Napa en el Acuífero de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Anexo VIII Estudio Salar de Llamara, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [99] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2005c). *Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Santiago, Chile.
- [101] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006a). *Análisis fluviométrico del río Loa entre Quillagua y desembocadura*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VII.1 Hidrología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [102] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006b). *Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa Tamarugal y Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VII.2 Hidrología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [103] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006c). *Evolución del nivel de la napa en la Pampa Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Anexo VII, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [104] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007a). *Medición de la evaporación desde acuíferos de la Pampa del Tamarugal y Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.1 Hidrogeología, Pramar Ambiental. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [105] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007b). *Modelación de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.2 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [106] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007c). *Modelación de la evolución del nivel de la napa en el salar de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.3 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [107] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007d). *Geología del acuífero de la Pampa del Tamarugal*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo IX.1 Geología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [108] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2007e). *Geología del salar de Llamara*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo IX.2 Geología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [109] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2008a). *Geología e hidrogeología del acuífero de Sur Viejo*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa*. Anexo VIII.4 Hidrogeología, Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [110] Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2008b). *Informe consolidado de monitoreo del nivel de la napa, caudales de extracción y calidad química del Acuífero del Salar de Llamara*. En: *Plan de Seguimiento Ambiental de Tamarugos, DIA Aducción Llamara*. Anexo I. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [111] Dirección General de Aguas (DGA). (1978a). *Calidad de Agua Primera región*. Chile.
- [112] Dirección General de Aguas (DGA). (1978b). *Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile*. Chile.
- [113] Dirección General de Aguas (DGA). (1985). *Estudios de Hidrología Isotópica. Área Salar de Llamara. Desierto de Atacama, Chile*. Santiago, Chile.
- [114] Dirección General de Aguas (DGA). (1987). *Balace Hidrológico de Chile*. Santiago, Chile.
- [115] Dirección General de Aguas (DGA). (1992). *Análisis estadísticos de caudales en los ríos de Chile*. Chile.
- [116] Dirección General de Aguas (DGA). (1996a). *Delimitación de acuíferos de vegas y bofedales de las regiones de Tarapacá y Antofagasta*. Santiago, Chile.
- [117] Dirección General de Aguas (DGA). (1996b). *Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del acuífero de la Pampa del Tamarugal*. Minuta técnica, SDT 68. Santiago, Chile.
- [118] Dirección General de Aguas (DGA). (1997a). *Disponibilidad de aguas subterráneas en el Salar de Llamara*. Minuta técnica, N° 72. SDT N° 112. Santiago, Chile.
- [119] Dirección General de Aguas (DGA). (1997b). *Divisoria de Cuencas por Comunas*. Santiago, Chile.
- [120] Dirección General de Aguas (DGA). (2000). *Divisoria de Subsubcuencas por Regiones*. Santiago, Chile.
- [121] Dirección General de Aguas (DGA). (2006). *Determinación de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas factibles de constituir en el acuífero del Salar de Llamara, I región*. Informe técnico, SDT N° 240. Santiago, Chile.
- [122] Dirección General de Aguas (DGA). (2009). *Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Llamara*. Informe técnico, SDT N° 281. Santiago, Chile.
- [123] Dirección General de Aguas (DGA). (2011). *Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal*. Informe técnico, SDT N° 311. Santiago, Chile.
- [124] Dirección General de Aguas (DGA) & Hernández S. (2005). *Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del*

- norte de Chile. Informe técnico, SDT N° 221. Chile.
- [125] Dirección General de Aguas (DGA); Universidad Católica del Norte (UCN); Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) & ORSTOM. (1986). *Gestión y conservación de recursos hídricos I y II región*. Chile.
- [126] DSM Minera S.A. (2003). *Recursos de agua subterránea del Acuífero Sur Viejo*. Chile.
- [127] EDIC Ingenieros Ltda. (2003). *Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Iquique*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [128] Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). (1983). *Informe geológico Pozo: Pintados 1*. Chile.
- [129] Errol L. Montgomery & Associates. (2005). *Resumen de los resultados del desarrollo y aplicación de un modelo de flujo de agua subterránea en la cuenca Salar de Lagunilla*. Compañía Minera Cerro Colorado. Chile.
- [130] Estrada A. *Estudio estacional y temporal de proteobacterias y fisicoquímica de sedimentos del bofedal de Pampa Lagunilla, altiplano del norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [131] Fuenzalida H. & Rutllant J. (1986). *Estudio sobre el origen del vapor de agua que precipita en el invierno altiplánico*. Chile.
- [132] Gallardo A. (1961). *Informe geológico sobre el pozo de exploración de Pintados N° 1 – Tarapacá*. Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). Santiago, Chile.
- [133] Gallardo A. (1961). *Sección estratigráfica del pozo Pintados-2, esc. 1\_1.000*. Empresa Nacional del Petróleo (ENAP). Chile.
- [134] Galli C. (1968). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulo Juan de Morales. Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [135] Galli C.; & Dingman R. (1962). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla, Chacarilla*. Institutos de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [136] Garín C. (1986). *Inventario de glaciares de los Andes chilenos desde los 18° a los 32° de latitud sur*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [137] García F. (1967). *Geología del Norte Grande de Chile*. En: Sociedad Geológica de Chile. Symposium sobre el geosinclinal andino. Santiago, Chile.
- [138] Garrido N. *Proyecto sistema de energización sustentable para Huatacondo, comuna de Pozo Almonte, región de Tarapacá*. Profesor guía: Contreras M. Escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010.
- [139] Gayo E.; Latorre C.; Jordan T.; Nester P.; Estay S.; Ojeda K. & Santoro C. (2012). *Late quaternary hydrological and ecological change in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (~ 21°S)*. Chile.
- [140] Gayo E.; Latorre C.; Santoro C.; Maldonado A. & De Pol – Holz R. (2011). *Hydroclimate variability in the low – elevation Atacama Deserto over the last 2.500 years*. En: Climate of the Past Discussions. Chile.
- [141] GCF Ingenieros Limitada. (2010). *Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones. Informe técnico, SIT N°221*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [142] Geohidrología. (2010). *Informe consolidado de monitoreo del nivel de la napa, caudales de extracción y calidad química del Acuífero del Salar de Llamara*. Proyecto: *Plan de Seguimiento Ambiental de Tamarugos*. Sociedad Química y Minera de Chile (SQM). Santiago, Chile.
- [143] Geraldo E. (1972). *Anteproyecto regadío Pica – Matilla. Informe sobre la factibilidad de incrementar el área de riego en la zona Pica – Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [144] GESCAM Consultores Ambientales & Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). (2004). *La cuestión del agua en la Provincia de Iquique. Síntesis de un debate*. Chile.
- [145] GHD. (2008a). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Huara, región de Tarapacá*. Aguas del Altiplano. Huara, Chile.
- [146] GHD. (2008b). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Pozo Almonte*. Aguas del Altiplano. Pozo Almonte, Chile.
- [147] GHD. (2009a). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable de la localidad de Huara, I Región*. Aguas del Altiplano. Huara, Chile.
- [148] GHD. (2009b). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto mejoramiento del sistema de tratamiento de agua potable, localidad de La Tirana, Región de Tarapacá*. Aguas del Altiplano. La Tirana, Chile.
- [149] GHD. (2010a). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas de Huara*. Ilustre Municipalidad de Huara. Huara, Chile.
- [150] GHD. (2010b). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de recolección y tratamiento de aguas servidas de la localidad de La Tirana*. Ilustre Municipalidad de Pozo Almonte. Pozo Almonte, Chile.
- [151] GHD. (2011a). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la ciudad de Alto Hospicio, Región de Tarapacá (Sitio A)*. Aguas del Altiplano. Comuna de Alto Hospicio, Chile.
- [152] GHD. (2011b). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la ciudad de Alto Hospicio, Región de Tarapacá (Sitio B)*. Aguas del Altiplano. Comuna de Alto Hospicio, Chile.
- [153] GP Consultores Ltda. (2005). *Estudio Hidrogeológico y Biológico del Sistema Jachucoposa*. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Chile.
- [154] Grilli A. (1985). *Una aproximación al Estudio de la Evaporación desde Salares*. En: VII Congreso Nacional – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [155] Grilli A. (1987). *Evaluación de la evaporación desde salares, utilizando trazadores naturales ambientales*. En: VIII Congreso Nacional – Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [156] Grilli A.; Aguirre E. & Duran M. (1999). *Origen de las aguas subterráneas del sector Pica – Salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá*. En: XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS – Chile. Antofagasta, Chile.
- [157] Grilli A.; Pollastri A.; Ortiz J. & Aguirre E. (198-). *Evaluación de tasas de evaporación desde salares, utilizando técnicas isotópicas. Aplicación en el Salar de Bellavista, I región Chile*. Chile.
- [158] Grilli A. & Vidal F. (1986). *Evaporación desde Salares: Metodología para evaluar los recursos renovables. Aplicación en las regiones I y II*. En: Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (vol. I, año I, N° 2), p. (sin número). Chile.
- [159] Guerra P. (1975). *Guatacondo: Un Caso de Transformación Agraria y Cultural en la Zona Árida*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, Vol I. N°s. 3 -4, p. 387 – 400. Chile.
- [160] Guerrero V. (1992). *Factores socio – políticos de la degradación*

- ambiental en la provincia de Iquique*. En: Revista de Ciencias Sociales, N° 001, p. 3 – 20. Iquique, Chile
- [161] Guerrero V. (1994). *Salar de Huasco: en busca del agua perdida*. En: Revista Ciencias Sociales, p. 38 – 54.
- [162] Hauser A. (1997). *Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile*. Servicio Nacional de Geografía y Minería Boletín (SERNAGEOMIN), N° 50. Santiago, Chile.
- [163] Hernández M. *Evaluación experimental y numérica de la evaporación desde aguas subterráneas someras. Aplicación a suelos salinos de la cuenca del Salar del Huasco*. Profesor guía: Muñoz J. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [164] Herrera V. *Distribución y especiación de algunos elementos traza en salares andinos, I región, Chile*. (2002). Facultad de Ciencias Básicas y Matemáticas, Universidad Católica de Valparaíso, Chile, 2002.
- [165] Herrera V.; Carrasco C.; Sielfeld W.; Mahendra K.; Berrios V. & González C. (2004). *Evaluación del efecto de suplemento de agua sobre el ecosistema de Jachucoposa*. Chile.
- [166] Herrera, V.; Carrasco, C.; Briceño M.; Silva, M. & Ramirez, E. (2010a). *Behavior dissolved and precipitated material in surface water of Salar del Huasco, high Plateau northern Chile*. En: *International Conference Arid and Semi-Arid development through water augmentation*. Valparaíso, Chile, 14-16 diciembre.
- [167] Herrera V.; Carrasco C., González C., Ramírez E., Ostría E., Angel A. & Atienzo K. (2010b). *Hidrogeoquímica y comportamiento del agua en tres cuencas del altiplano del norte de Chile*. En: *IV Congreso Iberoamericano de Química Analítica en conjunto con el X Encuentro Nacional de Química Analítica y Ambiental*. Concón-Valparaíso, Chile.
- [168] Herrera V.; De Gregori I. & Pinochet H. (2009a). *Assessment of trace elements and mobility of arsenic and manganese in lagoon sediments of the Huasco and Coposa salt flats, Chilean Altiplano*. En: *Chilean Chemical Society*, Vol. 54, N° 4, p. 1 – 23.
- [169] Herrera V.; De Gregori I. & Pinochet H. (2009b). *Trace elements and operational speciation of antimony, arsenic, copper, iron, manganese and zinc in soils of two High-Andean salars of northern Chile*. En: *Chilean Chemical Society*, Vol. 54, N° 3.
- [170] Herrera, V.; Lictevoud, E.; Maass, C.; Córdoba, D.; Beltrán, P.; Aguilera, J. & Carrasco, C. (2012a). *Sistematización y diagnóstico de la información sobre hidroquímica y calidad de aguas de Tarapacá, Norte de Chile*. En: *XI Encuentro de Química Analítica y Ambiental*. Antofagasta, Chile, 12-16 noviembre.
- [171] Herrera V.; Beltrán P.; Alvarado P.; Meza R.; Córdoba D.; Castañeda A. & Carrasco C. (2012b). *Evaluación espacio-temporal de la calidad química en sector puquios del Salar de Llamara, norte de Chile*. En: *XI Encuentro de Química Analítica y Ambiental*. Antofagasta, Chile, 12-16 noviembre.
- [172] House H. (1962). *Recursos de agua subterránea de la zona norte*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [173] Houston J. (2001). *La precipitación torrencial del año 2000 en Quebrada Chacarilla y el cálculo de recarga al acuífero Pampa Tamarugal, norte de Chile*. En: *Rev. geol. Chile* v.28 n.2 Santiago. Ed. ISSN 0716-0208. DOI: 10.4067/S0716-02082001000200002.
- [174] Houston J. (2004). *High-resolution sequence stratigraphy as a tool in hydrogeological exploration in the Atacama Desert*. En: *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, p. 7 – 17. DOI: 10.1144/1470-9236/03-013. Chile.
- [175] Houston J. (2006a). *Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes*. En: *Elsevier Science Hydrology*, p. 402 – 412. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.03.036. Chile.
- [176] Houston J. (2006b). *Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact*. En: *International Journal of Climatology*. 26: 2181 – 2189. DOI: 10.1002/joc.1359 Santiago, Chile.
- [177] ICC – CONIC Ingenieros Consultores Ltda. (1982). *Estudio de las precipitaciones de la región de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [178] Ingeniería Alemana S.A. (2011). *Declaración de Impacto Ambiental. Sistema de agua potable rural Chanavayita*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [179] Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH). (1983). *Evaluación de los recursos de aguas superficiales de la provincia de Iquique*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [180] Ingeniería y Recursos Hidráulicos (IRH). (1985). *Procesamiento de datos pluviométricos, pluviográficos y nivométricos de la I a la VII región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [181] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (IREN – CORFO). (1975). *Catastro Pampa del Tamarugal*. Santiago, Chile.
- [182] Instituto Nacional de Estadísticas (INE); Comisión Económica para América Latina (CEPAL). (2005). *Chile: Proyecciones y Estimaciones de Población. Total País.1950-2050*. Serie de la publicación (CEPAL): OI N° 208. <http://www.ine.cl>.
- [183] Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2008). *Anuario Regional de Tarapacá 2008*. Dirección Regional de Tarapacá. [www.inetarapaca.cl](http://www.inetarapaca.cl).
- [184] Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2012). *Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012*. [http://www.censo.cl/2012/08/resultados\\_preliminares\\_censo\\_2012.pdf](http://www.censo.cl/2012/08/resultados_preliminares_censo_2012.pdf)
- [185] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (IREN). (1976a). *Carta nivel de cobertura vegetal de los suelos de Chile, Primera región*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO).
- [186] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) & IREN. (1976b). *Inventario de recursos naturales por método de percepción del satélite Landsat. I Región de Tarapacá*. Chile.
- [187] Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales - Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) & IREN. (1979). *Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile*. Santiago, Chile.
- [188] IPLA Ltda. (1986). *Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional. Escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000*. Santiago, Chile.
- [189] IPLA Ltda. (1996). *Análisis uso actual y futuro de los recursos hídricos de Chile. Informe final. Regiones I, II, III, IV. SIT 26*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [190] Jaksic F.; Marquet P. & González H. (1997). *Una perspectiva ecológica sobre el uso del agua en el norte grande. Región de Tarapacá como estudio de caso*. En: *Seminario Minería y uso de agua de Chile*. Chile.
- [191] Japan International Cooperation Agency (JICA). (1979). *Report on geothermal power development project in Puchuldiza área*. Gobierno de la República de Chile. Chile.
- [192] Japan International Cooperation Agency (JICA). (1981). *Report on geothermal power development project in Puchuldiza área*. Gobierno

- de la República de Chile. Chile.
- [193] Japan International Cooperation Agency (JICA); Pacific Consultants Internacional & Dirección General de Aguas (DGA). (1995). *The study on the development of water resources in northern Chile (El Estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte Norte de Chile)*. Gobierno de la República de Chile. Chile.
- [194] Jhonson J. *Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno*. Profesor guía: Muñoz J. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [195] Kampf S. (1999). *El clima del altiplano y los recursos de aguas subterránea en el norte grande de Chile: Una visión comprensiva*. Santiago, Chile.
- [196] Karzulovic J. & García F. (1978). *Evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Iquique. Antecedentes básicos*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [197] Karzulovic J. & García F. (1979). *Evaluación de recursos hídricos Provincia de Iquique. I Región de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Iquique, Chile.
- [198] Karzulovic J. (1980). *Informe hidrogeológico del sondaje profundo de Chacarilla Cuenca artesiana de Pica*. Provincia de Iquique. Santiago, Chile.
- [199] Kiefer E.; Dörr M.; Ibbeken H. & Götz H. (1997). *Gravity-based mass balance of an alluvial fan giant: the Arcas Fan, Pampa del Tamarugal, Northern Chile*. En: Revista Geológica de Chile, Vol. 24, N° 2, p. 165 – 185.
- [200] Klohn W. (1972). *Hidrografía de las Zonas Desérticas de Chile*. Santiago, Chile.
- [201] Knight Piésold S.A.; ARCADIS GEOTECNICA; Rock Drilling S.A. & GP Consultores Ltda. (2005). *Estudio de Impacto Ambiental Actualización Faena Minera Cerro Colorado*. Compañía Minera Cerro Colorado. Santiago, Chile.
- [202] Lahsen A. (1976). *La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile*. En: Actas primer congreso geológico Chileno. Santiago, Chile.
- [203] Lahsen A. (1978). *Evaluación de los resultados de la exploración del campo geotérmico de Puchuldiza I región Tarapacá*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [204] Lanino M. (2005). *Antecedentes climáticos de la estación experimental Canchones, en la Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [205] Larrain H. & Couyoumdjian R. (1975). *El plano de la quebrada de Tarapacá de Antonio O'Brien. Su valor geográfico y socio-antropológico*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 329 – 362.
- [206] Lecarpentier C. (1973). *Géomorphologie et eaux souterraines: présentation de la carte géomorphologique de la Pampa del Tamarugal (Désert Nord Chilien)*. En: Bull – Inst Fr. Et. And., p. 29 – 57. (00113)
- [207] Lliboutry L. (1975). *Nieves y glaciares de Chile: Fundamentos de la glaciología*. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- [208] Lobo E. (1978). *Recursos de Agua en Chile*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile (00130)
- [209] Lobos, F. *Variación espacio-temporal en la extensión de la superficie glaciar del cerro Sillajhuay entre 1989 y 2008, Comuna de Pica-Colchane, Región de Tarapacá, Chile*. Profesor guía: Cereceda P. & Osses P. Facultad de historia, geografía y ciencias políticas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [210] López P.; Auqué L.; Garcés I.; Chong G.; Valles V. & Gimeno M. (1996). *Aplicación de la modelización geoquímica al estudio de pautas evolutivas en las salmueras del Salar de Llamara (Chile). Aproximación de método inverso*. En: Estudios Geológicos, v. 52, p. 197 – 209.
- [211] López P.; Auqué L.; Garcés I. & Chong G. (1999). *Características geoquímicas y pautas de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile*. En: Revista Geológica de Chile, V. 26 N°1, p. 89 – 108. DOI: 10.4067/S0716-02081999000100005.
- [212] López C. & Manzur A. (2005). *Acciones ciudadanas y análisis de impacto vinculados a extracción de aguas subterráneas en salares Altoandinos, región de Tarapacá, Chile*. Santiago, Chile.
- [213] López P. & Garcés I. (2002). *Evolución química de las salmueras del Salar de Huasco (Chile) en condiciones experimentales controladas*. En: Revista Real Academia de Ciencias. Zaragoza 57, p. 201 – 209.
- [214] Luza J.; Pastenes J. & Zagal A. (1977). *Catálogo taxonómico de la florula de Pica*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Chile.
- [215] Madaleno I. & Gurovich A. (2007). *Usos conflictivos del agua en el Norte de Chile*. En: Boletín de la A.G.E. N° 45, p. 353 – 372.
- [216] Magaritz M.; Suzuki O. & Peña H. (1985). *Isotopic and chemical study of the water resources in the Iquique Province*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [217] Magaritz M.; Aravena R.; Peña H.; Suzuki O. & Grilli A. (1989). *Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile*. En: Elsevier Science Publishers B.V., p. 323 – 341.
- [218] Magaritz M.; Aravena R.; Peña H., Suzuki O. & Grilli A. (1990). *Source of Groundwater in the Desert of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Groundwater from the Andes*. En: Ground water, Vol. 28, N° 4, p. 513 – 517.
- [219] Maturana V. *Bioconcentración de arsénico y hierro en plantas de bofedales asociados a las vertientes de los salares altoandinos, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [220] Meneses C. (1980). *Identificación, descripción y evaluación de fuentes de información sobre el uso del recurso agua. I Región de Tarapacá*. Chile.
- [221] Millones M. *La herencia de la modernidad: Tarapacá en la sociedad del riesgo*. Profesor guía: Leiva S. Departamento de ciencias sociales, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2008.
- [222] Ministerio de Obras Públicas (MOP) y BHP Billiton. (2003). *Declaración de Impacto Ambiental. Mejoramiento ruta A-65, sector Cuesta Duplijsa. I Región*. Ministerio de Obras Públicas (MOP). Santiago, Chile.
- [223] Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2011). *Plan regional de infraestructura y gestión del recurso hídrico al 2021, Región de Tarapacá*. Chile.
- [224] Montenegro C. *Actualización de los antecedentes geoquímicos y geofísicos del campo geotérmico de Puchuldiza y su comparación con el área de exploración geotérmica de Guanacota, Región de Tarapacá*. Profesor guía: Deckart K. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2008.
- [225] Montero P. (1969). *Estudio de regadío para la zona de Pica. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)*. Santiago, Chile.
- [226] Morales P. (2011). *Valoración económica de 4 humedales altoandinos de la I región (Huasco, Coposa, Caya y Lirima)*. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Chile.
- [227] Mortimer C. & Saric N. (1975). *Cenozoic studies in northernmost Chile*. En: Geologische Rundschau, p. 395 – 420.
- [228] Muñoz – Schick M.; Pinto R.; Mesa A.; Moreira – Muñoz A. (2001).

- Oasis de neblina en los cerros costeros del sur de Iquique, Región de Tarapacá, Chile, durante el evento El Niño 1997-1998. En: Revista chilena historia natural, v. 74 N° 2, p. (sin número).
- [229] Muñoz J. (1973). *Geología de Chile*. Chile.
- [230] Naranjo J. & Paskoff R. (1985). *Evolución cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, norte de Chile (18° -21 °S)*. En: IV Congreso Geológico Chileno. Antofagasta, Chile.
- [231] Navarrete C. *Remoción de arsénico (v) por biomasa de escamas de pescado*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [232] Nester P.; Gayo E.; Latorre C.; Jordan T. & Blanco N. (2007). *Perennial stream discharge in the hiperarid Atacama desert of northern Chile during the last pleistocene*. En: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). Ed. H. E. Wright, Jr., p. 19.724 – 19.729.
- [233] Nester P. *Basin and paleoclimate evolution of the Pampa del Tamarugal forearc valley, Atacama Desert, northern Chile*. Faculty of the Graduate School, Cornell University, EE.UU., 2008.
- [234] Nester P. & Jordan T. (2012). *The Pampa del Tamarugal forearc basin in Northern Chile: the interaction of tectonics and climate*. En: Cathy Busby and Antonio Azor. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances, first edition*, p. 369 – 381.
- [235] Niemeyer H. (1980). *Hoyas hidrográficas de Chile: Primera región*. Chile.
- [236] Niemeyer H. & Cereceda P. (1984). *Geografía de Chile. Tomo VIII, Hidrografía*. Chile.
- [237] Novoa A. & Bravo N. (1963). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Mamiña*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [238] Novoa A. (1970). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Iquique y Caleta Molle (N° 21 y 22)*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [239] Oikos Chile. (2004). *Estudio para la implementación de medidas para el control de la contaminación hídrica*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Santiago, Chile.
- [240] Orellana H. *Aspectos geodinámicos del desierto costero de Atacama, sector Alto Patache (oasis de niebla) y Bajo Patache*. Profesor guía: Victoria M. Escuela de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010.
- [241] Orellana J. (1970). *Utilización de pozos CORFO en área Pica – Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [242] Orostegui J. *Hidrogeología de la Quebrada de Guatacondo, I región de Tarapacá, Chile*. Profesor guía: Herrera C. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 2005.
- [243] Orrego J. (2002). *El Estado de las Aguas Terrestres en Chile: Cursos y Agua Subterráneas*. En: Publicación Fundación Terram. Santiago, Chile.
- [244] Ortiz C. (2008). *Mediciones de evaporación con el domo en la Pampa del Tamarugal y el Salar de Llamara*. En: Seminario Internacional “La evaporación en la estimación de los recursos hídricos en cuencas del norte de Chile. Chile.
- [245] Ortiz M.; Morales L.; Silva P. & Acevedo E. (2012). *Estimación del nivel freático a partir del NDVI Landsat en la Pampa del Tamarugal (Chile)*. En: Revista de Teledetección N° 37, p. 42 – 50. Chile.
- [246] Ostría E. *Parámetros fisicoquímicos y plantas de los suelos de los bofedales asociados a las vertientes de los salares del Huasco y Coposa. Norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2007.
- [247] Ostría E. *Biodisponibilidad de arsénico en los bofedales de los salares del Huasco y Coposa. Altiplano, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.
- [248] Oyarzo M. *Curvas intensidad – duración – frecuencia en las regiones I y II*. Profesor guía: Vidal F. Departamento de Física y Meteorología, Universidad de Valparaíso, Santiago, Chile, 1994.
- [249] Oyarzun R.; Cubas P. & Oyarzun F. (2008). *Apuntes geológicos, botánicos y antropológicos de un viaje por la Región de Tarapacá, Desierto de Atacama, Chile*. Chile.
- [250] Paskoff R. (1979). *Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del norte grande de Chile*. En: Norte Grande, Instituto Geográfico Universidad Católica de Chile. N°6, p. 7 – 22.
- [251] Paskoff R.; Cuitiño L. & Petiot R. (1998). *Carácter relicto de la Gran Duna de Iquique, región de Tarapacá, Chile*. En: Revista Geológica de Chile, V. 25 N°2, p. (sin número). DOI: 10.4067/S0716-02081998000200008.
- [252] Pavez A. (2008). *Las aguas subterráneas en la costa del Perú y el norte de Chile*. Chile.
- [253] Peña H.; Grilli A.; Salazar C.; Orphanopoulos D.; Suzuki O.; Aravena R. & Rauert W. (1987). *Estudio de hidrología isotópica en el área del Salar de Llamara. Desierto de Atacama, Chile*. Dirección General de Aguas (DGA) y Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). Chile.
- [254] Peña H.; Suzuki O. & Grilli A. (1985). *Utilización de técnicas isotópicas en hidrología de zonas áridas. Aplicación en la Provincia de Iquique, I región – Chile*. En: VIII Congreso Nacional de Sociedad Chilena en Ingeniería Hidráulica. Chile.
- [255] Peralta F. (1983). *Recursos hídricos de la Pampa del Tamarugal*. En: Seminario “Desarrollo de zonas desérticas de Chile”. Chile.
- [256] Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). (2009). *Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de aguas en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Etapa II Informe Final Parte IV*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [257] Pramam Ambiental. (2006a). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [258] Pramam Ambiental. (2006b). *Caracterización hidrogeológica del Salar Sur Viejo*. En: *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Soronal. Anexo XVI*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [259] Pramam Ambiental. Laboratorio de relación Suelo-Agua-Planta (SAP) de la Universidad de Chile & Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). (2006 - 2008). *Plan de Seguimiento Ambiental Salar de Llamara. Informe de monitoreo, etapa de operación. Proyecto Aducción Llamara*. Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH). Santiago, Chile.
- [260] Pramam Ambiental. (2007). *Estudio de Impacto Ambiental. Zona de Mina Nueva Victoria*. Sociedad Química y Minera S.A. (SQM). Santiago, Chile.
- [261] Proust Consultores. (2008). *Informe derecho, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero. Regiones centro – norte de Chile. Informe técnico, SIT N° 146*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [262] Quezada J.; Cerda J. & Jensen A. (2010). *Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile*. En: *Andean Geology* formerly *Revista Geológica de Chile*, p. 78 – 109.
- [263] Ramírez E. *Propiedades físico – químicas de matrices abióticas en hábitats de escorrentías del Salar de Coposa, altiplano norte de Chile*.

- Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2006.
- [264] Ramírez E. *Distribución de arsénico total en hábitats de alimentación de flamencos: aguas, sedimentos, fitoplancton y zooplancton. Salar del Huasco. Altiplano norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2007.
- [265] REG Ingenieros Consultores Asociados Ltda. (1987). *Actualización de las estadísticas fluviométrica de la I a la VII Región*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [266] REG Ingenieros Ltda. (1991). *Estudio de síntesis de catastros de usuarios de agua e infraestructuras de aprovechamiento. Informe técnico, SIT N°6*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [267] Rengifo P.; Acosta O. & Muñoz J. (2012). *Estimación de la recarga por precipitación al acuífero de las cuencas del Salar de Coposa y Michincha*. Chile.
- [268] Rengifo P.; Dzogolyk E. & Acosta O. (2010). *Use of deep groundwater reserves: Practical experience in deep water production*. En: Congreso WIM. Santiago, Chile.
- [269] Rengifo P.; Dzogolyk E.; Acosta O. & Delgado J. *Exploración y explotación de acuíferos altiplánicos profundos: Caso de estudio y aplicación de cuenca de Coposa, Chile*. Compañía Minera Doña Ines de Collahuasi. Chile.
- [270] Reyes P.; Diaz C. & Orellana F. (2009). *Trace elements and operational speciation of antimony, arsenic, copper, iron, manganese and zinc in soils of two high-andean salars of northern Chile*. En: Chilean Chemical Society, Vol. 54, N°3, p. 1 – 18.
- [271] Risacher F.; Alonso H. & Salazar C. (1998). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III Regiones – Chile*. Santiago, Chile.
- [272] Risacher F.; Alonso H. & Salazar C. (2003). *The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review*. En: Earth Sciences, p. 249 – 293. DOI: 10.1016/S0012- 8252 (03) 00037- 0
- [273] Roja R. *Groundwater flow model for Pampa del Tamarugal aquifer – Northern Chile*. Profesor guía: Dassargues A. Vrije Universiteit Brussel, Belgium, 2005.
- [274] Rojas R. & Dassargues A. (2006). *Stochastic analysis of the recharge uncertainty of a regional aquifer in extreme arid conditions*. En: XI International Congress Int. Assoc. For Mathematical Geology. Belgium.
- [275] Rojas R. & Dassargues A. (2007). *Groundwater flow modelling of the regional aquifer of the Pampa del Tamarugal, northern Chile*. En: Hydrogeology Journal 15, p. 537 – 551. DOI: 10.1007/s10040-006-0084-6
- [276] Rojas R.; Batelaan O.; Feyen L. & Dassargues A. (2010). *Assessment of conceptual model uncertainty for the regional aquifer Pampa del Tamarugal - North Chile*. En: Hydrol. Earth. Syst. Science, p. 171 – 192.
- [277] Ruiz G. (1969). *Abastecimiento futuro de agua potable del norte grande*. Chile.
- [278] Salazar C. (1995). *Aplicación de técnicas de hidrología isotópica en el área de la provincia de Iquique, I Región*. En: IV Jornada de trabajo. Programa hidrológico internacional. Chile.
- [279] Salazar C.; Rojas L. & Pollastri A. (1998). *Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal. I Región*. Informe técnico, SIT N° 48. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [280] Salazar C.; Rojas L.; Lillo A. & Aguirre E. (1999). *Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile*. Chile.
- [281] Sanchez J. (1974a). *Antecedentes hidrogeológicos de Pampa de Huara, Provincia de Tarapacá, Chile*. En: Revista Norte Grande, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 97 – 100.
- [282] Sánchez J. (1974b). *Posibilidades de aprovechamiento de aguas subterráneas en la rehabilitación de terrenos de cultivo en Pampa del Tamarugal*.
- [283] Santis L. *Análisis químico de soluciones acuosas naturales y de lixiviación de minerales de cobre*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2010.
- [284] Santoro C.; Núñez L.; Standen V.; González H.; Marquet P. & Torres A. (1998). *Proyecto de irrigación y la fertilización del desierto*. En: Estudio Atacameños N° 16, p. 321 – 336.
- [285] Sayes J. (1972). *Geología del Salar de Pintados – Bellavista. Provincia de Tarapacá*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Iquique, Chile.
- [286] Schlunegger F.; Kober F.; Zeilinger G. & von Rotz R. (2010). *Sedimentology-based reconstructions of paleoclimate changes in the Central Andes in response to the uplift of the Andes, Arica region between 19 and 21°S latitude, northern Chile*. En: Geol Rundsch, p. 123 – 137.
- [287] Schultz A. (1959). *Mapa geológico de Tarapacá*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [288] Schultz A. (1972). *Mapa geológico de Tarapacá y sus aplicaciones*. En: *Seminario sobre uso de los recursos de agua en Chile*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile
- [289] Schultz A. (1984). *Catastro de Pozos por región*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [290] Secretaria Comunal de Planificación. (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Optimización y mejoramiento de operación del relleno sanitario de Pica*. Pica, Chile
- [291] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003)*. Santiago. Chile.
- [292] SIGA Ingeniería y Consultoría S.A. (2009). *Diagnóstico manejo de cauce Quebrada de Tarapacá. Región de Tarapacá*. Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Chile.
- [293] Silva L. (1977). *Carta Geológica de Chile. Hojas Pisagua y Zapiga, Provincia de Iquique, Tarapacá (I Región) Chile*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [294] Silva M. *Distribución de arsénico total presente en lessonia nigrescens (Bory, 1826) y en aguas de su hábitat, zona costera de la provincia de Iquique - norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2006.
- [295] Silva M. *Estudios comparativo en geoquímica de aguas lenticas: vertiente Jachucoposa y desembocadura río Loa*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2005.
- [296] SITAC Servicio de Ingeniería. (2007). *Balance Hídrico Nivel Regional. Tarapacá, Antofagasta, Atacama*. Corporación de fomento de la Producción. Santiago, Chile.
- [297] Skarmeta J. & Marinovic N. (1981). *Carta Geológica de Chile (N°51). Hoja Quillagua*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago, Chile.
- [298] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2011a). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Norte-Norte. Producción de Yodo Pampa Chiza*. Chile.
- [299] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2011b). *Declaración de Impacto Ambiental. Aducción agua de mar en sector Junín*. Chile.
- [300] Sociedad Contractual Minera – Minera Copiapo. (2012). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Trazado de agua a Chiquiquiray*. Chile.
- [301] Soluciones en Gestión Ambiental (SGA). (2009). *Declaración de Impacto Ambiental. Proyecto Producción de Yodo SCM Bullmine*. SCM Bullmine.

- Santiago, Chile.
- [302] SRK (Sudamérica) S.A. (1996). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Lagunas*. Sociedad Química y Minera. Santiago, Chile.
- [303] Sträter E.; Westbeld A. & Klemm O. (2010). *Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile*. En: *Environ Sci Pollut Res*, p. (sin número). DOI: 10.1007/s11356-010-0343-x.
- [304] Sustentable S.A. (2010). *Estudio de Impacto Ambiental. Exploración Geotérmica Puchuldiza Sur 2*. Geoglobal Energy (GGE). Santiago, Chile.
- [305] Sustentable S.A. (2011). *Declaración de Impacto Ambiental. Exploración Minera Puchuldiza*. Minera Southern Legacy Chile Ltda. Santiago, Chile.
- [306] Suzuki O. & Aravena R. (1984). *Hidrología Isotópica y el Recurso del Área Esmeralda - Pica - Matilla*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [307] Suzuki O. & Aravena R. (1985). *Hidrología Isotópica y el Recurso Agua del Sector Esmeralda - Pica - Matilla*. En: *Nucleotecnica*, Vol. 4, N° 8, p. 41 – 51.
- [308] Suzuki O.; Silva C.; Fritz P. & Salati E. (1979). *Isotope hydrology of groundwaters in the Pampa del Tamarugal, Chile*. Chile.
- [309] Suzuki O. (2007). *The future of Northern Chile and water resources*. En: *Environmental Issues Analysis*.
- [310] Taylor G. (1947). *Ground water studies in Tarapaca Province*. Chile. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [311] Tomlinson A.; Blanco N.; Maksae V.; Dilles J.; Grunder A. & Ladino M. (2001). *Geología de la Precordillera Andina de Quebrada Blanca - Chuquicamata, Región I y II (20°30' - 22°30'S)*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). Chile.
- [312] Toro J. (1967). *Evaporación de distintos tipos de suelos de la Pampa del Tamarugal*. Chile.
- [313] Torres C. *La salinidad y su relación con el contenido de Boro y Arsénico en cuerpos de agua del Salar del Huasco, I Región de Tarapacá*. Profesor guía: Cortes J. Departamento de Química, Universidad de Tarapacá, Chile, 1997.
- [314] Tröger U. & Gerstner D. (2004). *Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación altos de Pica. Informe técnico, SDT N° 174*. Dirección General de Aguas (DGA). Santiago, Chile.
- [315] Trujillo P. & Bravo R. (1978). *Prospección campo de Puchuldiza. Resumen de actividades*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Chile.
- [316] Universidad de Chile. (1973). *Estudio de los recursos hídricos de la cuenca del río Loa*. Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). Santiago, Chile.
- [317] Universidad de Chile. (1991). *Caracterización geográfica del sistema físico - ambiental de las regiones I y II*. Dirección General de Aguas (DGA). Chile.
- [318] Universidad de Chile. (2009). *Caracterización de los humedales de Lirima y Caya. Región de Tarapacá*. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Chile.
- [319] Universidad de Concepción. (2010). *Diagnóstico de fuentes de aguas no convencionales en el regadío inter-regional*. Ministerio de Agricultura – Comisión Nacional de Riego. Chile.
- [320] Valverde V. (1996). *Ficha informativa sobre humedales Ramsar*. Corporación Nacional de Forestal (CONAF). Chile
- [321] Velozo L. (1974). *Características Geomorfológicas de la Pampa de O'Brien, Pampa del Tamarugal, Tarapacá*. En: *Revista Norte Grande*, Instituto Geográfico, Universidad Católica de Chile, p. 101 – 111.
- [322] Velozo L. & Sanchez M. (1991). *Características Geomorfológicas. Área litoral: Iquique-Caleta Molle*. En: *Revista de Geografía Norte Grande*, p. 3 – 8.
- [323] Vergara H. (1978). *Carta Geológica de Chile. Cuadrángulos Ujina*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Chile.
- [324] Weischet W. (1975). *Las condiciones climáticas del desierto de Atacama como desierto extremo de la tierra*. En: *Revista Norte Grande*, Instituto de Geografía - Universidad Católica de Chile, Volumen 1 (3-4), p. 363 – 374.
- [325] Welsch L. *Geoquímica y biodisponibilidad de arsénico y cobre en la desembocadura del río Loa, norte de Chile*. Departamento de ciencias químicas y farmacéuticas, Universidad Arturo Prat, Iquique, Chile, 2009.

## Glosario

216

**Acuífero.** Del latín *aqua*, *agua* y *fero*, llevar. Terreno permeable que contiene una napa de agua subterránea. *Ver napa de agua subterránea.*

**Afloramiento.** Parte de un terreno visible a la superficie del suelo.

**Afluente.** El *afluente* o *tributario* es una corriente de agua, río o arroyo (de segundo orden) que vierte sus aguas en otro principal. En caso de tener idéntico caudal, es aquel que tiene menor extensión en su recorrido, desde el origen hasta la confluencia.

**Aforo.** Medida del caudal (de un río, manantial, etc.). *Véase caudal.*

**Aguas Subterráneas.** *Ver napa de agua subterránea.*

**Agua Superficial.** Agua en estado líquido o sólido que fluye o se almacena sobre la superficie del suelo y en contacto directo con la atmósfera.

**Aguas meteóricas.** Aguas provenientes de la precipitación: lluvia, rocío, pedrisco y/o nieve.

**Algoritmo.** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

**Altiplano.** El *Altiplano* o *Puna* es una región de América del Sur que comprende el norte de Chile, el centro y sur de Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Corresponde a cuencas sedimentarias formadas sobre los 3.500 m s.n.m. por la actividad tectónica y volcánica acontecida en estas latitudes.

**Análisis de sensibilidad.** En modelación, el análisis de sensibilidad es el proceso por el cual un modelo es probado para establecer una medida del cambio relativo en los resultados del modelo causado por un cambio correspondiente en los parámetros del modelo. Este tipo de análisis provee información sobre el nivel de certeza (o no) para asegurar los resultados del modelado.

**Anisotropía.** Cualidad de los materiales en los que el comportamiento varía según la dirección considerada. En los acuíferos esta propiedad está condicionada por la distribución y ordenamiento de los materiales, considerando en un mismo punto valores de conductividad hidráulica horizontal distintos a los valores en la vertical.

**Ápice.** Cumbre o punto más alto de una geoformación como una montaña. Específicamente es el punto más alto de un abanico aluvial, usualmente el punto donde las corrientes que forman el abanico emergen de las montañas o de los cañones confinados.

**Árido.** Caracteriza un clima o una zona con precipitaciones anuales inferiores a 250 mm. El término semiárido caracteriza precipitaciones anuales entre 200 y 400 mm.

**Balance hídrico.** El *balance hídrico* o *hidrológico* consiste en establecer una igualdad entre las entradas y salidas de agua de un sistema (cuenca hidrográfica, embalse, acuífero, etc.).

**Bofedal.** Humedal de altura, pradera nativa poco extensa con permanente humedad. Está habitado por especies vegetales herbáceas que presentan crecimiento en cojines, semiglobosa y cuerpos compactos en superficie.

**Calibración.** Proceso por el cual los valores obtenidos a partir de un modelo son comparados con valores o registros tomados en el terreno, o bien, mediante sistemas de referencia que permitan acercar el modelo al comportamiento real del sistema modelado. En física, es el proceso de ajustar con la mayor exactitud posible las indicaciones de un instrumento de medida con los valores de la magnitud que ha de medir.

**Calidad del agua.** Características físicas, químicas y biológicas que definen la composición del agua.

**Carta geológica.** Mapa donde se representan sobre una base planimétrica-altimétrica (mapa topográfico), los diferentes tipos de rocas, fallas, pliegues y estructuras que afloran en una región determinada.

**Carta geomorfológica.** Mapa donde se representan las características propias de la corteza terrestre; la geometría y disposición de las formas del relieve; la naturaleza y estructura de las formas superficiales; los procesos, ritmo de formación y edad de las formas del relieve. *Ver Geomorfolología.*

**Caudal.** En términos hidrológicos el *caudal* (también llamado *gasto*) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo. Al proceso de medición del caudal se denomina "aforo". Asimismo, el caudal se puede definir como el producto de la sección del canal por la velocidad media del flujo que discurre a través.

**Celda.** Es una unidad de discretización espacial en la cual un modelo puede cuantificar dinámicamente variables de estado (ej. almacenamientos por intercepción superficial en el perfil del suelo y subterráneo); flujos de intercambio (ej. evapotranspiración, escurrimientos,

infiltración, etc.) y otros tipos de variables relacionadas con la dinámica del flujo.

**Cobertura cartográfica.** La *cobertura* o *capa cartográfica* es un archivo geoespacial propio de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que representa elementos territoriales en 2 y 3 dimensiones mediante puntos, líneas y polígonos.

**Coefficiente de almacenamiento.** Relación entre el volumen de agua liberado por una columna de acuífero de superficie igual a la unidad cuando el nivel piezométrico desciende una unidad; y un volumen unitario de acuífero.

**Coefficiente de determinación.** Coeficiente que mide el grado de dependencia entre variables, tomando el valor 0 en caso de correlación nula o el valor 1 en caso de correlación total.

**Coefficiente fenomenológico.** El *coeficiente fenomenológico* o *cinético* es el coeficiente de viscosidad (de cizalla;  $\eta$ ), que establece la relación entre el flujo de un proceso y la afinidad de dicho proceso mediante una ecuación definida por la ley de Newton.

**Columna estratigráfica.** Representación gráfica en forma de corte vertical de una serie de materiales depositados en un punto. En regla general, los materiales más antiguos se encuentran en la parte inferior y los más modernos en la parte superior de la columna.

**Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad.** Volumen de agua que atraviesa un material por unidad de tiempo, bajo el efecto de un gradiente hidráulico unitario en una unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo, de acuerdo a la Ley de Darcy. Representa la facilidad con la que un material permite el paso del agua a través de él.

**Cono de deyección o abanico aluvial.** Acumulación de material en forma de abanico ensanchado hacia abajo, transportado por corrientes de montaña (fuerte pendiente y caudal irregular) y depositado en el punto en el cual la corriente pierde velocidad y capacidad a transportar materiales (sobre una llanura o un amplio valle). Se caracteriza por una suave pendiente entre 1 y 10 grados, dependiendo de la pendiente por la que se desliza.

**Coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator).** Sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator que se construye como la proyección de Mercator normal, pero tangente a un meridiano en vez de hacerlo por el Ecuador. A diferencia del sistema de coordenadas geográficas, expresadas en longitud y latitud, las magnitudes en el sistema UTM se expresan en metros únicamente al nivel del mar que es la base de la proyección del elipsoide de referencia.

**Cordillera.** Unidad de relieve formada por un conjunto de montañas relacionadas entre sí por su constitución geológica, estructura y génesis.

**Corte geológico o perfil geológico.** Sección transversal o longitudinal de parte de la corteza terrestre entre dos puntos de una determinada región, en el cual se representan las estructuras geológicas y las secuencias litológicas.

**Estratigrafía.** Parte de la geología que estudia la disposición y características de las rocas de acuerdo a su propia génesis y su relación con el ambiente deposicional característico.

**Cuenca hidrográfica.** Superficie delimitada por una línea divisoria de agua y constituida por un conjunto de pendientes inclinadas hacia una corriente de agua y en la cual vierte sus aguas de escurrimiento. Existen varios tipos de cuencas: *endorreicas* (cuyas aguas no tienen salida fluvial hacia el mar, sino que desembocan en lagos, lagunas o pequeños cuerpos de agua), *exorreicas* (descarga sus aguas en el mar) y *arreicas* (sus aguas no desembocan ni en lagos ni en mares, pues se evaporan o se infiltran).

**Cuenca sedimentaria.** Región de hundimiento progresivo de un sector de la corteza (subsidente) en la cual se acumulan sedimentos producidos principalmente por la erosión de la superficie de la tierra y su posterior transporte. Existen varios tipos de cuencas sedimentarias, de las cuales se destacan: *cuenca de antepaís* formadas junto a orógenos compresivos debido a la flexión de la litosfera terrestre bajo el peso de las rocas apiladas durante la colisión tectónica; y *cuenca de antearco* o *cuenca de fosa-arco* que es la parte de antearco adyacente al arco-isla que se caracteriza por el depósito de sedimentos en capas horizontales en contraste con el prisma de acreción altamente formado, adyacente a la fosa oceánica.

**Datum.** Punto de referencia para la realización de mediciones de posición horizontal y/o vertical, y que de acuerdo a un conjunto de parámetros geométricos y geodésicos que lo definen permite asociar las mediciones realizadas con un modelo de representación de la superficie terrestre. En Chile se utilizan los datum SAD 69, PSAD 56 y WGS 84 (*World Geodetic System 84*, que significa Sistema Geodésico Mundial 1984).

**Delimitación Hidrográfica.** La *delimitación hidrográfica* o *delimitación de una cuenca hidrográfica* es determinar o fijar con precisión los límites de una cuenca hidrográfica. Espar del estudio y el análisis hidrológico ya que permite delimitar el área del sistema hidrológico utilizado para calcular el balance hídrico. La metodología empleada para la delimitación puede ser manual (sobre un plano topográfico o directamente en pantalla) o digital de forma semiautomática, mediante herramientas SIG e información base geoespacial.

**Demografía.** Estudio estadístico de una colectividad humana, referido a un determinado momento o a su evolución.

**Depósito lacustre, aluvial, salino, eólico y glacis.** Material terrestre de cualquier tipo, consolidado o no, acumulado por procesos o agentes naturales (agua, viento, hielo, volcanes y otros agentes). Existen varios tipos de depósito de acuerdo al tipo de sedimentación y al mecanismo que los genera, tales como: *lacustre* (depositado en el fondo de los lagos); *aluvial* (depositado por un río a lo largo de su llanura de inundación); *eólicos* (depositados por el viento); *glacis* o *glaciares* (depositados por el hielo o por el agua de deshielo).

**Depresión.** En geomorfología, el término *depresión* designa la zona del relieve terrestre situada a una altura inferior a las regiones circundantes. En un terreno u otra superficie, es una concavidad de extensión determinada.

**Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA).** Derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los

requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe el Código de Aguas chileno<sup>1</sup>.

**Desalación / Desalinización de agua.** Proceso mediante el cual se quita la sal del agua de mar o agua salobre para producir agua potable u otros fines, de acuerdo a los estándares de calidad correspondientes

**Diagrafía de Pozo.** Registro continuo en un pozo de parámetros físicos, principalmente la resistividad eléctrica, polarización espontánea e inducida, radioactividad natural e inducida, rayo gamma natural, temperatura, conductividad, etc.

**Diagramas de Piper, de Stiff y de Schoeller.** Gráficos hidrogeoquímicos que permiten estudiar la composición de las aguas, representando el quimismo de las muestras a partir de las concentraciones de sus compuestos mayoritarios [Cloro (Cl<sup>-</sup>), Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), Sodio (Na<sup>+</sup>), Calcio (Ca<sup>2+</sup>), Potasio (K<sup>+</sup>) y Magnesio (Mg<sup>2+</sup>)]. Representan, con diagramas triangulares, la proporción de tres componentes en la composición de un conjunto o de una sustancia. Los diagramas de Stiff o poligonales representan en escala logarítmica la concentración de aniones y cationes en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono. Los diagramas de Schoeller o de columnas verticales representan el valor en miliequivalentes por litro (meq/l) de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, utilizando una escala logarítmica y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas.

**Diferencias finitas.** Método o expresión matemática (de la forma  $f(x + b) - f(x + a)$ ) que consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un limitado número de puntos seleccionados.

**Divisoria de aguas.** Es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que representa el límite entre dos cuencas hidrográficas vecinas.

**Drenaje.** En geomorfología, el drenaje o red drenaje se refiere a la red natural de transporte gravitacional de agua, sedimento o contaminantes, formada por ríos, lagos y flujos subterráneos, alimentados por la lluvia o la nieve fundida.

**Ecorregión.** Región geográfica con determinadas características climáticas, geológicas, hidrológicas y biológicas.

**Ecosistema.** Sistema natural formado por un conjunto de seres vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo). Se trata de una unidad de organismos relacionados entre sí y su ambiente.

**Datación radiométrica.** Método para determinar la edad absoluta de rocas, minerales y restos orgánicos fosilizados (paleontológicos) utilizando la variación regular a lo largo del tiempo de isótopos radioactivos en estos elementos. Se compara la abundancia natural de isótopos radioactivos con sus descendientes utilizando la semivida o periodo de semidesintegración.

**Efluente.** En hidrología, un *efluente* o *distributivo* corresponde a un curso de agua que, desde un lugar llamado confluencia, se des-

prende de un lago o río como una derivación menor, ya sea natural o artificial. En hidrogeología también se denomina "río efluente" o "río ganador" al que recibe volumen líquido desde un acuífero. Por el contrario, un "río influente" o "río perdedor" es el río que cede agua por infiltración a las napas freáticas.

**Elementos finitos.** Los *elementos finitos* o *método de los elementos finitos* es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado.

**Endémico.** Propio y exclusivo de determinadas localidades o regiones.

**Enfermedades hídricas.** Las *enfermedades hídricas* (o *efectos adversos del agua sobre la salud humana*) son aquellas afecciones causadas por la contaminación del agua por desechos humanos, animales o químicos. Las enfermedades más comunes son: el cólera, la fiebre tifoidea, la shigella, la poliomielitis, la meningitis, la hepatitis, la diarrea, etc.

**Ensayo de bombeo.** Un *ensayo de bombeo* o *prueba de bombeo* consiste en extraer una cantidad de agua de una captación durante un cierto período de tiempo, observando la variación que se produce en los niveles piezométricos del acuífero. Permite conocer la capacidad o el rendimiento de una captación y determinar las características hidráulicas del acuífero.

**Erosión.** Desgaste o destrucción producida en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro. La erosión de la superficie terrestre es el resultado de la acción combinada de varios factores o agentes externos, como la temperatura, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal.

**Escala.** Relación entre la distancia en la fotografía, carta o mapa u otro elemento gráfico, y su distancia correspondiente en el terreno. Un mapa con escala pequeña (1:25.000, 1:50.000, 1:200.000) proporciona menos detalle, aunque la cobertura espacial será mayor, que un mapa con escala grande (1:5.000, 1:2.000...) que proporciona mayor información y detalle pero, en contraparte, representa una área de territorio menor.

**Escarpe.** Declive áspero del terreno.

**Ecurrimiento.** Agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie del suelo y llega a una corriente principal para finalmente ser drenada hacia la salida de la cuenca. De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en las que se realiza el escurrimiento, éste se puede dividir en: *escurrimiento superficial* o *escorrentía* (parte del agua que escurre sobre el suelo y por los cauces de los ríos); *escurrimiento subsuperficial* (parte del agua que se infiltra y se desliza a través de los horizontes superiores del suelo); y *escurrimiento subterráneo* (parte del agua que percola hacia el agua subterránea).

**Estación de monitoreo de agua de niebla, calidad de agua, fluviométrica, meteorológica y piezométrica.** Punto de medición

<sup>1</sup> Código de Aguas 1981. Art.5. Más información sobre el Código de Aguas en <http://www.leychile.cl>

y registro regular de diversas variables, ya sean meteorológicas, de agua de niebla, de calidad de agua, pluviométricas, piezométricas, etc. Ver capítulo IV: *Observatorio del agua*.

**Evaluación de Impacto Ambiental (EIA).** Es el procedimiento técnico-administrativo que sirve para identificar, predecir, prevenir e interpretar los impactos ambientales que producirá la ejecución de un proyecto en su entorno, todo ello con el fin de que la institución ambiental competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo.

**Evaporación.** Proceso físico mediante el cual, el agua pasa del estado líquido o sólido al estado gaseoso mediante la transferencia de energía calórica. Se expresa en mm o litros por unidad de tiempo.

**Evapotranspiración.** Proceso de pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

**Evolución morfoclimática.** Modificación de una organización altitudinal como consecuencia de fluctuaciones climáticas.

**Falla.** Discontinuidad que se forma por fractura en las rocas de la corteza terrestre, a lo largo de la cual ha habido movimiento de uno de los lados respecto del otro.

**Flujo superficial y subsuperficial.** Ver definición de *escurrimiento*.

**Forestal.** Perteneciente o relativo a los bosques y a los aprovechamientos de leñas, pastos, etc. Asimismo, se entiende como bosque forestal a una replantación de especies realizada para fines de protección y reacondicionamiento de un espacio de interés ecológico, económico y turístico.

**Fortran.** Es un lenguaje de programación de alto nivel de propósito general, procedimental e imperativo, que está especialmente adaptado al cálculo numérico y a la computación científica.

**Fosilizar.** Conjunto de procesos que hacen que un organismo (o cuerpo orgánico), alguna de sus partes o los rastros de su actividad, pasen a formar parte del registro fósil o se convierta en fósil.

**Fotografía aérea.** La *fotografía aérea* o *aerofotografía* es una imagen de la superficie del terreno en blanco y negro, color o en longitudes de onda del infrarrojo, que ha sido capturada con una cámara fotogramétrica análoga o digital desde un avión en vuelo. Son fuente de información básica para la elaboración de cartografía del territorio, planificación urbana, prospección agrícola, minera y de recursos naturales en general.

**Fractura.** Separación bajo presión de terrenos, rocas e incluso minerales.

**Galerías.** Una *galería* o *socavón* es un sistema de irrigación subterráneo que permite captar aguas subterráneas y conducir las hasta un punto determinado, mediante una excavación subterránea subhorizontal en forma de túnel, a diferencia de los pozos, que se construyen con la misma finalidad.

**Geodatabase (GDB).** Una *geodatabase (GDB)* o *base de datos espacial (BD)* se define como una colección de uno o más ficheros de datos o tablas almacenadas de manera estructurada, tal que las interrelaciones que existan entre diferentes campos o conjuntos de datos puedan ser utilizadas por el sistema de gestor de base de datos (SGBD) para su manipulación y recuperación.

**Geofísica.** Rama de las Ciencias de la Tierra que estudia las características físicas de la Tierra utilizando técnicas de medición indirectas como la gravimetría, geomagnetismo, sismología, radar geológico, resistividad aparente, etc. Con la ayuda de hipótesis geológicas, la geofísica busca validar un modelo matemático resultante de medidas hechas en el terreno.

**Geoforma.** Se refiere a cualquier componente o rasgo físico de la superficie terrestre que ha sido formado por procesos naturales y que tiene una forma particular.

**Geología.** Ciencia que estudia la tierra, en todos sus aspectos y alcances, su origen, constitución, evolución, los procesos que se realizan en ella tanto interna como externamente a lo largo del tiempo geológico (Geo = Tierra, Logo = Tratado, discurso lógico).

**Geomorfología.** Ciencia que estudia las formas del relieve terrestre teniendo en cuenta su origen, la naturaleza de las rocas, el clima de la región y las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general, entran como factores constructores del paisaje (Geo = Tierra, Morfo = Forma, Logo = Tratado, discurso lógico).

**Geoquímica.** Rama de las ciencias de la tierra que estudia la composición y dinámica de los elementos químicos en la Tierra y las reglas que gobiernan la distribución de dichos elementos.

**Georreferenciación.** Técnica o proceso utilizado en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que consiste en asignar una serie de coordenadas geográficas procedentes de un objeto espacial (representado por un punto, línea, área o volumen) de referencia conocida, a un objeto espacial de destino. Este proceso permite localizar una imagen (o mapa) en un sistema de coordenadas y Datum determinado, mediante el registro de tres o más puntos de control, de tal manera que se defina con precisión el mapa sobre la superficie terrestre.

**Geotermal.** Actividad hidrológica mediante la cual el agua aflora caliente debido a su circulación por zonas profundas.

**Glaciar.** Masa de hielo perenne, formada por acumulación de nieve, cualesquiera sean sus dimensiones y formas. En Chile existen varios tipos de glaciares tales como: *Glaciares de piedemonte*, *Glaciares de valle*, *Glaciares de montaña*, *Glaciares de Circo*, *Glaciaretas*, *Glaciares rocosos*, etc. Ver capítulo IV.

**Geíser.** Fluencia violenta más o menos vertical, con intermitencia de agua y/o vapor y con caracteres térmicos y minerales específicos. Está vinculada en general a áreas volcánicas.

**Glaciología.** Rama de las ciencias de la Tierra que estudia el hielo y los glaciares.

**Gradiente hidráulico.** Pendiente de la superficie piezométrica en el acuífero en una dirección dada. Se determina por la relación de la diferencia de niveles entre dos puntos y la distancia que los separa.

**Hidrogeología.** La *hidrogeología* o *hidrología subterránea* es la ciencia que estudia el agua subterránea, su origen, dinámica, distribución y circulación en el suelo y las rocas, teniendo en cuenta su interacción con las condiciones geológicas y el agua de superficie.

**Hidrogeoquímica.** Especialidad de la Hidrogeología e Hidroquímica que estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas subterráneas.

**Hidrología.** Ciencia de la tierra que estudia el ciclo del agua, es decir los intercambios entre la atmósfera, la superficie terrestre y su subsuelo. Se divide en hidrología de superficie e hidrología subterránea o hidrogeología

**Hidrometeorología.** Rama de la ciencia de la atmósfera (Meteorología) y de la Hidrografía que estudia la transferencia de agua y energía entre la superficie y la atmósfera.

**Hidroquímica.** Especialidad de la hidrología, que estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas, basadas especialmente en la teoría y los conocimientos químicos, pero también en la biología y geología como ciencias que interactúan con el medio acuoso y que pueden modificar su quimismo.

**Hidrotermal.** Que se refiere a circulaciones de aguas calientes asociadas a la actividad ígnea y el agua existente en los cuerpos afectados.

**Humedal.** Zona de tierras, generalmente planas, cuya superficie se inunda de manera permanente o intermitentemente. Al cubrirse regularmente de agua se produce una saturación del suelo, quedando desprovisto de oxígeno y dando lugar a un ecosistema híbrido entre los puramente acuáticos y los terrestres.

**Imagen satelital.** Representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial o nave espacial.

**Ión.** Átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica.

**Isótopo.** Átomos de un mismo elemento que tienen igual número de protones y electrones (igual número atómico), pero diferente número de neutrones (difieren en su masa atómica).

**Isoyeta o Isohieta.** Línea que une, en un mapa, los puntos que reciben igual cantidad de precipitación.

**Línea de flujo.** Una *línea de flujo* o *línea de corriente* es la trayectoria seguida por un elemento (o partícula) suspendido en un fluido móvil.

**Litología.** Características petrológicas (referente a las propiedades físicas, químicas y físico-químicas de una roca) de un sustrato, cuerpo o elemento rocoso.

**Lixiviación.** La *lixiviación* o *extracción sólido-líquido* es un proceso en el que un disolvente líquido pasa a través de un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno o más de los componentes solubles del sólido. En geología, la lixiviación es el proceso de lavado de un estrato de terreno o capa geológica por el agua.

**Magma.** Masa ígnea en fusión existente en el interior de la Tierra, que se consolida por enfriamiento.

**Malla.** Una *malla* o *red* es un conjunto de celdas conectadas mediante nodos en donde se produce un intercambio de información entre ellos. Dependiendo de la configuración de la malla, la información de cada entidad puede estar incluida bien en la propia celda o directamente en los nodos.

**Manantial.** Agua que brota naturalmente de la tierra o entre las rocas.

**Mapa.** Representación gráfica y métrica en 2 dimensiones de una parte de la superficie terrestre, en la que se da información relativa

a una ciencia determinada. Existen un sinnúmero de tipos de mapas entre ellos están los que se mencionan en este trabajo:

- **Mapa topográfico:** representación parcial, del relieve de la superficie terrestre a una escala definida.
- **Mapa de isotermas:** representa las curvas que unen los puntos con igual temperatura en la unidad de tiempo considerada.
- **Mapa geológico:** representación de las características geológicas de una superficie determinada
- **Mapa hidrogeológico:** mapa que representa las condiciones de la ocurrencia y distribución de las aguas subterráneas, específicamente la interrelación de la estructura geológica, el terreno y el agua subterránea.
- **Mapa piezométrico:** representación cartográfica de la superficie piezométrica de un acuífero, construida por interpolación de medidas puntuales del nivel del agua subterránea en diferentes puntos.

**Metalogenia.** Ciencia que estudia los mecanismos de formación de los yacimientos minerales y define herramientas metodológicas y guías de prospección utilizables en la exploración minera.

**Mineralización.** Concentración local de sustancias metálicas (o proceso que permite tal concentración).

**Mineralogía.** Ciencia que estudia los minerales en sus diferentes estados de agregación y sus propiedades físicas y químicas.

**Modelo.** Representación teórica de un objeto, sistema o idea. Su elaboración exige definir una primera idea general y previa del objeto de modelizar, la estructura del sistema (límites, características geométricas, etc.) y formular las leyes que relacionan las entradas del sistema y sus respuestas (salidas), de acuerdo con los parámetros que intervienen en dichas relaciones. El propósito de los modelos es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema. Los modelos pueden ser de varios tipos: reducidos, analógicos, determinísticos (numéricos) y estocásticos (probabilísticos), etc.

**Modelos de Elevación Digital.** El *modelo de elevación digital* o *modelo digital de elevación* (MDE) es una representación digital de la distribución espacial de la elevación de la superficie del terreno. La unidad básica de información es un valor de elevación, altura o posición vertical (coordenada Z), al que acompañan los valores correspondientes de posición horizontal (coordenadas X e Y) expresados en un sistema de proyección, para cada uno de los puntos del terreno.

**Molinete.** El *molinete* o *correntómetro* es un instrumento constituido por una rueda con aspas, la cual, al ser sumergida en una corriente de agua gira proporcionalmente a la velocidad de la misma y a partir de un transductor eléctrico, indica el número de revoluciones con que gira la hélice. Esta velocidad angular se traduce a velocidad del agua (en m/s), utilizando una fórmula de calibración que previamente se ha determinado para cada instrumento en particular.

**Morfoestructural.** Característica de las formas (morfos) y la disposición interna (estructura) que adopta el relieve.

**Napa (de agua subterránea).** Agua subterránea que rellena totalmente los intersticios de un terreno poroso y permeable de manera que siempre haya conexión entre los poros, por el agua.

**Neblinómetro.** Instrumento estándar que mide el volumen de agua de niebla captado en una unidad de tiempo determinada.

**Nivel piezométrico.** Altura o profundidad (por debajo la superficie del suelo) del límite entre la zona no saturada y la zona saturada de un acuífero. En el caso de un acuífero libre, se llama *nivel freático*; en caso de no estar influenciado por extracción de agua subterránea, se llama *nivel estático*; en el caso contrario, se llama *nivel dinámico*.

**Nodos.** En informática, un nodo es un punto de intersección o unión de varios elementos que confluyen en el mismo lugar.

**Norias.** Pozos o captaciones que captan agua subterránea en acuíferos freáticos. Generalmente, son perforaciones verticales realizadas en forma manual para extraer agua subterránea y que por lo general, presentan un diámetro mucho mayor que el de un sondaje.

**Oasis.** Zona con vegetación y agua aislada en el desierto. En general, se genera gracias a una fuente de agua (manantial o capa freática poco profunda).

**Orógeno.** Estructura lineal situada en el límite entre una placa continental y otra oceánica, o bien en la unión de dos placas continentales. Presenta pliegues, mantos de corrimiento y fallas.

**Ortofoto.** Imagen fotográfica del terreno con el mismo valor cartográfico que un plano, que ha sido sometida a un proceso de rectificación diferencial que permite realizar la puesta en escala y nivelación de las unidades geométricas que lo componen.

**Paleo.** Prefijo que significa en general “antiguo” o “primitivo”, referido frecuentemente a eras geológicas anteriores a la actual. Por ejemplo: paleoambiente, paleoclimatología, paleoecológico, paleogeográfico, etc.

**Pampa.** Cada una de las llanuras extensas de América Meridional que no tienen vegetación arbórea.

**Parámetro.** Variable que, en una familia de elementos, sirve para identificar cada uno de ellos mediante su valor numérico. Existe un sinnúmero de parámetros, entre ellos los que se mencionan en este trabajo: *parámetros físico-químicos* (turbidez, conductividad, pH, dureza, etc.), *parámetros hidrológicos* (coeficiente de escorrentía, caudal medio, velocidad del flujo, etc.), *parámetros hidrogeológicos* (porosidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, etc.).

**Perfil fisiográfico.** Representación de los procesos que han originado los distintos paisajes de una región, dentro de los cuales habrá cierta homogeneidad en su geogénesis, permitiendo conocer las características internas de los suelos.

**Período de retorno.** Tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos improbables y con posibles efectos catastróficos. En hidrología, el período de retorno generalmente expresado en años, puede ser entendido como el número de años en que se espera que se repita un cierto caudal (o lluvia).

**Piedemonte.** Acumulación de material muy heterogéneo (dependiendo de la escala de observación), constituido por bloques, cantos, arenas, limos y arcillas inconsolidados ubicados al pie de las cadenas montañosas. La diagénesis y litificación de estos materiales da lugar a una familia o grupo de rocas características.

**Pliegue.** El *pliegue* o *plegamiento* es el efecto producido en la cor-

teza terrestre por el movimiento conjunto de rocas sometidas a una presión lateral. Por la disposición de sus capas, los pliegues se dividen en *anticlinal* (plegamiento en el terreno en forma de A o de V invertida, donde los estratos más antiguos están hacia el núcleo) y *sinclinal* (plegamiento en el terreno en forma de V, donde los estratos más jóvenes están hacia el núcleo).

**Pluviómetro.** Instrumento que sirve para calcular la cantidad de lluvia (o precipitación pluvial) que cae en una zona concreta durante un período de tiempo determinado.

**Pozos.** Excavación vertical que perfora la tierra para alcanzar una reserva de agua subterránea y permite su extracción. De acuerdo a su funcionalidad existen varios tipos de pozos, entre ellos: *pozo de explotación* (para la extracción del agua subterránea); *pozo de monitoreo* (para el registro de parámetros hidrogeológicos como nivel piezométrico, calidad de agua, etc.); *pozo de exploración* (para identificar horizontes potencialmente acuíferos)

**Precipitación.** Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

**Precordillera.** Nombre con el que se denominan las estribaciones más bajas de una cadena montañosa, siendo principalmente utilizado en Argentina y Chile en relación a la cordillera de los Andes.

**Puquios.** Del *quechua* “*pukyu*” que significa “vertiente de agua pura y cristalina”. (Ver *manantial*).

**Quebrada.** Designa un paso estrecho entre montañas y, por tanto, equivale a desfiladero por donde se origina un arroyo o riachuelo que discurre a través de manera temporal o permanente.

**Radiación Solar.** La *radiación solar* o *energía emitida por el sol*, es un proceso físico, por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas. La energía que emite el sol, recibida en la superficie terrestre, es la fuente de casi todos los fenómenos meteorológicos y de sus variaciones en el curso del día y del año.

**Recarga y Descarga.** Designa los recursos hídricos que ingresan a un sistema (recarga o entradas) y que salen del mismo (descarga o salidas). El equilibrio entre ambos, en un intervalo de tiempo determinado, describe el concepto de balance hídrico. El sistema puede ser una cuenca hidrográfica, un acuífero, un embalse, etc. En el caso de una cuenca hidrográfica, las entradas pueden darse en forma de precipitación, flujo subterráneo y/o trasvase. Las salidas pueden darse en forma de evaporación, evapotranspiración, extracción antrópica, infiltraciones profundas, flujos salientes hacia otro cuerpo receptor.

**Red de monitoreo.** Conjunto de estaciones en las cuales se mide y registra con cierta frecuencia uno o más parámetros tal como la cantidad de lluvia, caudales, niveles de agua, temperatura, etc. Se pueden medir de forma manual o mediante equipos compuestos por sensores, codificadores, transmisores, decodificador y equipo informático.

**Red hidrográfica.** Sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca hidrográfica.

**Régimen permanente y no permanente (intermitente o transitorio).** Condición del escurrimiento en relación con el tiempo. El régimen es permanente cuando la velocidad del escurrimiento y las otras variables (densidad, temperatura, presión) no cambian con el tiempo

(permanecen constante en el tiempo) o las variaciones son mínimas en relación con los valores medios. Se llama también flujo estacionario. El régimen es no permanente si la velocidad y las otras variables varían con el tiempo.

**Relave.** Los *relaves* o *cola* son desechos tóxicos, subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas.

**Rendimiento específico.** El *rendimiento específico* (*Sy*) de un acuífero es la relación entre la cantidad de agua que puede drenar libremente el material y el volumen total de la formación, resultando siempre menor que la *porosidad total* y asociado al concepto de *porosidad eficaz*.

**Recurso renovable y no renovable.** Un *recurso renovable* es un recurso natural que se puede restaurar por procesos naturales, en un periodo corto a escala humana y a una velocidad superior a la de su consumo. Sin embargo, un *recurso* es *no renovable* cuando su tasa de destrucción supera, ampliamente o no, su velocidad de creación; una vez agotado no habrá más disponible para uso futuro.

**Reutilización de agua.** Procedimiento que consiste en utilizar de nuevo las aguas procedentes de un uso previo después de uno o más tratamientos que le permita alcanzar cierta calidad sanitaria y estética.

**Ridge.** Formación geológica que consiste en una cadena de montañas o colinas que forman una cima continua elevada a cierta distancia. Asimismo, un *ridge* se cataloga también para aquellas cadenas montañosas localizadas en el suelo profundo oceánico que presentan lados muy pronunciados y una topografía menos regular que una plataforma.

**Roca.** Agregado de minerales de uno o más tipos en diversas proporciones. Dependiendo de su génesis y composición, las rocas se pueden dividir en tres grandes grupos: sedimentarias (formadas por la acumulación de sedimentos a la superficie terrestre), ígneas (formadas por el enfriamiento y solidificación del magma) y metamórficas (formada por la alteración textural o composicional de cualquiera de las otras rocas, incluso metamórfica, debido a procesos de calentamiento, presión o actividad química de fluidos).

Las rocas, debido a su composición mineralógica, textura y origen, reciben nombres característicos entre las cuales, se destacan:

- **Ignimbritas:** rocas ígneas formadas por una amplia deposición y consolidación de flujos de ceniza.
- **Andesita:** rocas ígneas de grano fino formadas en un 75% de minerales tipo feldespato y plagioclasas con ausencia del cuarzo y ortoclasa.
- **Dacita:** roca ígnea con una composición similar a la andesita pero con menos plagioclasas y más contenido en cuarzo.
- **Diorita:** roca ígnea de grano grueso con composición tipo andesita.
- **Granito:** roca ígnea de grano grueso dominada por minerales claros, formada por un 50% de ortoclasa, 25% de cuarzo y

plagioclasas o silicatos ferromagnesianos. Los granitos y las granodioritas comprenden el 95% del total de rocas ígneas intrusivas.

- **Basalto:** roca ígnea de grano fino dominada por minerales oscuros, compuestas por plagioclasas y silicatos ferromagnesianos. Los basaltos y las andesitas representan el 98% del total de rocas extrusivas.
- **Gabro:** roca ígnea de grano grueso con la composición de basalto.
- **Pizarra:** roca metamórfica de grano fino con un buen desarrollo de fuerte clivaje (el clivaje describe el desarrollo de capas en una roca luego de su deformación y metamorfismo).
- **Caliza:** roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por el mineral de la calcita, formada por procesos orgánicos o inorgánicos.
- **Limolitas:** roca sedimentaria formada por grano de tamaño intermedio entre las arcillas y las areniscas.
- **Areniscas:** roca sedimentaria detrítica formada por la cementación de granos individuales o de un grupo de ellos y que comúnmente están compuestas por cuarzo.

Son diversas las rocas que existen, pero las anteriormente definidas se realiza con el propósito de asociar al lector con las rocas más comunes de la región. Para otros tipos, consulte "The dictionary of mining, mineral and related terms" de la Universidad de Hacettepe<sup>2</sup>.

**Salar.** Un *salar* o *depósito salino* es un lago superficial mas o menos temporario cuyos sedimentos están constituido esencialmente por sales (boratos, cloruros de sodio o sal común, salitre o nitrato natural, sulfatos, etc.) y otros elementos como el litio y el yodo. Generalmente, los salares se clasifican en: *caótico* o *de terrones*, *laminares* o *poligonales* y *mixtos*. Pueden ser activos o inactivos, con o sin lagunas superficiales.

**Salmueras.** Agua con una alta concentración de sal (NaCl) disuelta (>50mg/l, según la clasificación del agua por su contenido en sales).

**Sedimentación.** Acumulación por deposición de sedimentos o de todos aquellos materiales alterados y transportados previamente.

**Semiárido.** Ver definición *árido*.

**Sensor.** Instrumento capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas.

**SIG (Sistema de Información Geográfica).** Integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, sistematizar, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

**Sistemas lóticos y lénticos.** Los *sistemas lóticos* son aquellos sistemas que incluyen hábitats acuáticos de aguas corrientes como ríos, riachuelos y quebradas desprovistos de vegetación acuática emergente. Sin embargo, los *sistemas lénticos* son aquellos sistemas de aguas

<sup>2</sup> <http://www.maden.hacettepe.edu.tr/dmmrt/index.html>

estancadas que incluyen hábitat de tipo humedal, pantanos, lagos, lagunas, jagüeyes, es decir cuerpos de agua y por lo general con vegetación acuática emergente.

**Sobrexplotación.** Utilizar en exceso los recursos naturales.

**Socavón.** Ver definición de galería subterránea.

**Sondaje.** Perforación en la superficie para obtener información de la calidad del suelo o de la roca. Se utiliza principalmente para estudios de infraestructura, hidrogeología, caracterización de suelos, etc.

**Subcuenca.** Subdivisión de una cuenca hidrográfica. Corresponde a la superficie hidrográfica de los afluentes de una corriente de agua principal.

**Subducción.** Deslizamiento del borde de una placa de la corteza terrestre de mayor densidad por debajo del borde de otra de menor densidad.

**Tamarugo o prosopis tamarugo.** Especie de Leguminosa endémico del norte de Chile que crece particularmente en la “Pampa del Tamarugal”, con clima árido y suelos salinos. Es un árbol que puede llegar a los 25 metros de altura y generalmente presenta un tronco corto muy ramificado o desarrolla varios vástagos del mismo tamaño.

**Tanque evaporimétrico.** Instrumento utilizado para medir la evaporación efectiva o tasa de evaporación. Proporciona una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua.

**Tectónica.** Relacionado con las fuerzas involucradas en la configuración de la litosfera generando todo tipo de estructuras o fallas por la dinámica estructural interna de la tierra que se caracteriza en ciclos tectónicos con eventos de importancia; en la Región de Tarapacá han sido cinco:

- **Ciclo Tectónico Pampeano** comprendido desde el Proterozoico Superior (1.000 a 650 M.a.) al Cámbrico Inferior (540 a 530 M.a.); y el **Ciclo Tectónico Famantiano** comprendido desde el Cámbrico Superior al Devónico Inferior (510 a 390 M.a.).
- **Ciclo Tectónico de Gondwana** comprendido desde el Devónico Superior (385 a 370 M.a.) al Pérmico Inferior (300 a 275 M.a.).
- **Ciclo Tectónico Preandino** comprendido desde el Pérmico Su-

perior (260 a 253 M.a.) al Jurásico Inferior (250 a 245 M.a.).

- **Ciclo Tectónico Andino** comprendido desde el Jurásico Inferior (245 M.a.) al Presente.

**Teledetección.** Técnica mediante la cual se obtiene información de un objeto o área de la superficie terrestre, a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento (sensor remoto) situado a cierta distancia del elemento sometido a investigación.

**Terreno.** Conjunto de sustancias minerales que tienen origen común o cuya formación corresponde a una misma época

**Topografía.** Ciencia y arte de representar en un plano la superficie o el relieve de detalle de una determinada área.

**Transmisibilidad o transmisividad.** Parámetro hidrogeológico que representa el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado de acuífero (en un medio isótropo). Puede ser interpretado como el caudal de agua que atraviesa una franja de acuífero, orientada perpendicularmente al flujo, de anchura unidad y bajo un gradiente hidráulico unitario.

**Trazabilidad.** Posibilidad de identificar el origen y las diferentes etapas de un proceso de producción y distribución de un bien de interés.

**Variación intercensal.** Ritmo de evolución de la población en un periodo determinado, expresado en porcentaje. Permite calcular cuánto creció o disminuyó la población entre dos años censales.

**Vega.** Parte de tierra baja, llana y fértil.

**Vertiente y vertientes termales.** Ver manantial. Las *vertientes termales* son aquellos sitios por donde corre el *agua termal*, que brota a temperatura superior a la media ambiental.

**Vulcanismo.** Proceso de formación de volcanes y otras formas de actividad ígnea extrusiva. Se produce cuando el material fundido del interior de la Tierra sale a la superficie a través de grietas, fisuras y orificios.

**Yacimientos.** Sitio donde se halla naturalmente una roca, un mineral o un fósil. Estrictamente, es una concentración significativa, en una zona, de un determinado mineral, gas, fósil o roca, susceptible de ser explotado -beneficiado- conforme a un uso.





Región de  
**Tarapacá**



Universidad  
**ARTURO PRAT**  
del Estado de Chile



La presente publicación corresponde al informe final del estudio *“Diagnóstico y sistematización de la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá”*, realizado por el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) durante el año 2012. El objetivo ha sido generar un diagnóstico completo y preciso del conocimiento y de la información existente sobre los recursos

hídricos de la región, con el fin de identificar las brechas de conocimiento para orientar el trabajo futuro de investigación y transferir este conocimiento a la comunidad. Se enmarca dentro de la estrategia con la cual el CIDERH aborda la problemática hídrica regional, constituyendo la primera etapa en la caracterización de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá.

**CIDERH**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN RECURSOS HÍDRICOS



Vivar 493, 3er Piso, Edificio Don Alfredo, Iquique, Chile

Fono: (56)(57) 530800 – E-mail: [contacto@ciderh.cl](mailto:contacto@ciderh.cl)

[www.ciderh.cl](http://www.ciderh.cl)

