



REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

**LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL
DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE AGUA
EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA ZONA NORTE
DE CHILE, REGIONES XV, I, II Y III**

ETAPA 2

INFORME FINAL PARTE VII

Medición de la Evaporación mediante el Método del “Domo”

REALIZADO POR:

**Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental
Pontificia Universidad Católica de Chile**

S.I.T. N° 195

Santiago, Noviembre de 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas

Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Departamento de Estudios y Planificación

Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Sr. Luis Rojas B.

EQUIPO TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Director de Proyecto

Ing. Sr. José Muñoz P.

Jefe de Proyecto

Ing. Sr. Pablo Rengifo O.

Ingeniero a Cargo

Ing. Sr. José Yáñez L.

Especialistas y Profesionales

Sr. Bonifacio Fernández	Especialista en Hidrología (PhD)
Sr. José Francisco Muñoz	Especialista en Hidrogeología (PhD)
Sra. Laura Vitoria	Especialista en Hidrogeoquímica (PhD)
Sr. Pablo Rengifo	Especialista en Hidrogeología (MSc)
Sr. José Yáñez	Ing. de Proyecto, Hidrogeología
Sr. Gustavo Calle	Ing. de Proyecto, Hidrología (PhD)
Sr. Marcelo Solari	Geol. de Proyecto, Geología
Sr. Axel Herzog	Geol. de Proyecto, Hidrogeoquímica
Srta. Victoria Flores	Ing. de Proyecto, Hidrogeología
Srta. Milena Calvo	Ing. de Proyecto, Hidrogeoquímica
Sr. Victor Pérez	Ing. de Proyecto, Hidrología

EQUIPO TÉCNICO – CONTINUACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Tesistas, Memoristas y Ayudantes

Sr. Juan Johnson	Ing. Tesista MSc, Hidrogeología
Srta. Mariana Cervetto	Geol. Memorista, Hidrogeología
Sra. Isidora Arriagada	Geol. Memorista, Hidrogeología
Srta. Yohana Ahumada	Ayudante Ingeniero, Cartografía
Sr. Eduardo Wunderlich	Ayudante Ingeniero, Hidrología
Sr. Cristóbal Valderrama	Ayudante Ingeniero, Hidrología
Sr. Pedro Reinoso	Ayudante Terreno
Sr. Francisco del Solar	Ayudante Terreno
Sr. Sebastián Rojas	Ayudante Terreno
Sr. Fernando Díaz	Ayudante Terreno
Sr. Tomás Latorre	Ayudante Terreno



Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería
Dirección de Investigaciones Científicas
y Tecnológicas de la Universidad Católica



“LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE AGUA EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA ZONA NORTE DE CHILE, REGIONES XV, I, II Y III”

INFORME N°: 460625

FECHA: 25 DE NOVIEMBRE 2009

“DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS”

DICTUC, Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Correo 22, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 686 4281 • 686 4284 • 686 4274 686 4293
Fax: (56-2) 552 2563 / www.ing.puc.cl • www.dictuc.cl



1. Tipo Informe Informe Técnico Final	2. Cuerpo del Informe 200 páginas (incluye portada)
3. Título del Proyecto LEVANTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE NUEVAS FUENTES DE AGUA EN ÁREAS PRIORITARIAS DE LA ZONA NORTE DE CHILE, REGIONES XV, I, II Y III	4. Fecha Informe 25 de Noviembre 2009
5. Autor (es) Director de Proyecto: José Francisco Muñoz Pardo Jefe de Proyecto: Pablo Rengifo Oyarce Ingeniero a Cargo: José Yáñez López	6. Contrato MOP – DGA N° 235
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul - Santiago	7. Período de Investigación Julio 2007 – Noviembre 2009
8. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre: Dirección General de Aguas, MOP. Dirección: Morande 59, 8° Piso RUT: 61.202.200-0 Teléfono: (02) 633 9940	9. Contraparte Técnica Nombre: Luis Rojas Badilla Cargo: Inspector Fiscal
10. Resumen El estudio de los recursos hídricos del altiplano chileno consideró los aspectos hidrográficos, hidrológicos, hidrogeoquímicos, isotópicos e hidrogeológicos de las cuencas cerradas que se ubican en esta franja del norte de Chile. El levantamiento de información sumado a trabajos de terreno y de gabinete orientados a complementar aquellos temas considerados más relevantes son reportados en los 10 tomos de documentos.	

Sr. José Francisco Muñoz P.
Director de Proyecto

Jaime Retamal
DICTUC

Nota: "La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de Dictuc S.A.

PRESENTACIÓN

El presente estudio, realizado entre los años 2007 y 2009, se enmarca en un convenio de cooperación e investigación científica aplicada entre la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA) de la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC).

La investigación o acción de apoyo tuvo como objetivo fundamental el levantamiento, generación y análisis de información hidrogeológica para avanzar en el estudio de los recursos hídricos del sector chileno del Altiplano. En este contexto, este estudio pretende ser un apoyo concreto para el desarrollo de nuevas fuentes de agua subterránea en áreas prioritarias del norte de Chile.

El estudio consistió en el desarrollo de una serie de trabajos de terreno y gabinete, tanto a nivel regional como local. Los resultados obtenidos se presentan en 10 informes o partes independientes, cuyos contenidos son los siguientes:

- **Parte I** Hidrografía Regional del Altiplano.
- **Parte II** Geología Regional del Altiplano.
- **Parte III** Hidrología Regional del Altiplano.
- **Parte IV** Hidrogeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano.
- **Parte V** Implementación de Estaciones Meteorológicas.
- **Parte VI** Campañas de Muestreo Geoquímicos e Isotópicos.
- **Parte VII** Medición de la Evaporación Mediante Método del “Domo”.
- **Parte VIII** Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco.
- **Parte IX** Sistema Piloto II Región: Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada.
- **Parte X** Sistema Piloto III Región: Salares de Maricunga y Pedernales.

Cada parte está estructurada de manera de ser autocontenida y poder ser utilizada para fines y materias específicas. Sin perjuicio de lo anterior, las Parte VIII, IX y X que consideran el estudio de sistemas pilotos, hacen referencias y utilizan resultados de los estudios a nivel regional (Partes I, II, III y IV) y de los trabajos de terreno (Partes V, VI y VII).

La información y resultados de este estudio, junto a las actividades de difusión y formación que se realizaron en el marco de su desarrollo, se encuentran disponibles en el sitio web www.recursoshidricosaltiplano.cl.

El presente informe corresponde a la **Parte VII** del estudio, denominada “**Medición de la Evaporación Mediante Método del ‘Domo’**”.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer en especial a las distintas instituciones y personas que contribuyeron al desarrollo de este estudio, en la forma de aportes de información, apoyo en trabajos de terreno y logística, aportes para la realización de actividades de difusión y formación, y sugerencias para el avance de esta investigación. En especial se agradece a:

- Oficinas DGA Regiones de Tarapacá, Antofagasta y Copiapó.
- Carabineros de Chile.
- Servicio Agrícola y Ganadero.
- Policía de Investigaciones.
- Servicios de Aduana.
- GeoAguas Consultores.
- Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi.
- SQM.
- Profesores Uwe Tröger (U. Técnica de Berlín), Michel Vauclin (LTHE-CNRS Grenoble, Francia) y Scott Tyler (U. de Reno – Nevada, USA).
- Los siguientes profesionales que aportaron en el comienzo del presente estudio: Luciano Achurra (Geología), Francisca Chadwick (Hidrología).

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	MARCO GENERAL DEL ESTUDIO	1
2	INTRODUCCIÓN.....	3
3	OBJETIVOS DEL TRABAJO	5
3.1	Objetivo General.....	5
3.2	Objetivos específicos	6
4	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	7
4.1	Antecedentes de evaporación en zona de estudio	7
4.2	Proceso de evaporación	9
4.3	Técnicas Para Medir Evaporación	12
4.4	Curva de Evaporación en Función de la Profundidad del Acuífero	29
4.5	Clasificación de Suelos.....	31
5	CAMPAÑAS DE TERRENO	35
5.1	Minutas de terreno	35
5.2	Labores de terreno	40
5.3	Metodología de medición y muestreo.....	41
6	RESULTADOS	63
6.1	Mediciones de evaporación	63
6.2	Curvas de Evaporación	96
6.3	Validación Metodología del Domo.....	109
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
8	REFERENCIAS	123
	ANEXO I	129
	ANEXO II	143
	ANEXO III	159
	ANEXO IV	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1: Modelo conceptual de evaporación.	11
Figura 4.2: Reducción por salinidad vs. Densidad de la salmuera en el Salar de Atacama.	13
Figura 4.3: Tanque Evaporímetro Clase A.	14
Figura 4.4: Montaje del equipo de medición en terreno.	16
Figura 4.5: Evolución masa de vapor de agua en el tiempo al interior del domo.	19
Figura 4.6: Comportamiento tipo de la tasa de evaporación a lo largo del día.	20
Figura 4.7: Determinación de tasas de evaporación en proceso de calibración.	22
Figura 4.8: Factor de calibración.	23
Figura 4.9: Diseño de lisímetros de carga variable. A) Sistema implementado por Geoaguas Consultores. B) Esquema de funcionamiento.	25
Figura 4.10: Diseño de lisímetros de carga constante. A) Sistema implementado por Collahuasi-GP Consultores en Salar del Huasco. B) Esquema de funcionamiento.	27
Figura 4.11: Esquema de medición con microlisímetros.	28
Figura 4.12: Curvas de evaporación en función de la profundidad de saturación.	30
Figura 4.13: Curva granulométrica.	32
Figura 4.14: Diagrama de texturas según tamaño de partículas, USDA.	33
Figura 5.1: Ubicación zonas de medición de evaporación II Región.	36
Figura 5.2. Ubicación zonas de medición de evaporación III Región.	37
Figura 5.3: Ubicación zonas de medición de evaporación I Región.	38
Figura 5.4: Diagrama de flujo metodológico general.	42
Figura 5.5: Esquema implementado en zonas de medición.	44
Figura 5.6. Equipamiento domos.	46
Figura 5.7. Plano de ubicación evaporímetros.	49
Figura 5.8. Sistema de medición implementado para la estimación de la evaporación superficial en cuencas sin evaporímetros.	52
Figura 5.9: Pasos en la estimación de evaporación. a) Preparación de instrumentos. b) Ambientación del domo. c) Proceso de medición puntual. d) Curva de evaporación diaria. e) Profundidad de la napa. F) Curva de evaporación diaria en función de la profundidad.	53
Figura 5.10. Comparación evolución de densidad de vapor teórica y real.	57
Figura 5.11: Curvas de calibración (acumulación sensor vs. producción en balanza de precisión). A) domo 1 campaña 3. B) domo 2 campaña 3. C) domo 1 campaña 1. D) domo 2 campaña 1.	59
Figura 6.1. Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, Regiones XV y I. A) Curva regional. B) Estimación lineal franja altioplánica.	64
Figura 6.2. Estaciones de referencia salar del Huasco.	66

Figura 6.3: Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, II Región. A) Curva regional. B) Estimación lineal franja altiplánica.	69
Figura 6.4. Estaciones de referencia II Región.....	72
Figura 6.5. Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, III Región.	75
Figura 6.6: Ubicación puntos de medición I Región. Los círculos de color azul representan la donde se midió evaporación de tanque.....	77
Figura 6.7: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 1.....	78
Figura 6.8: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 2.....	79
Figura 6.9: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 3.....	80
Figura 6.10: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 4.....	81
Figura 6.11: Evaporación v/s Profundidad de la napa I Región.....	82
Figura 6.12: Ubicación puntos de medición II Región.....	83
Figura 6.13: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 5.....	85
Figura 6.14: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 6.....	86
Figura 6.15: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 7.....	87
Figura 6.16: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 8.....	88
Figura 6.17: Evaporación v/s Profundidad de la napa II Región.....	89
Figura 6.18: Ubicación puntos de medición III Región.	90
Figura 6.19: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 9.....	91
Figura 6.20: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 10.....	92
Figura 6.21: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 11.....	93
Figura 6.22: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 12.....	94
Figura 6.23: Evaporación v/s Profundidad de la napa III Región.	95
Figura 6.24: Curvas de ajuste I Región, Salar del Huasco. (a) Modelo exponencial, (b) Modelo exponencial modificado, (c) Modelo lineal, (d) Modelo potencial.	100
Figura 6.25: Ajuste lineal modificado, I Región, Salar del Huasco.	101
Figura 6.26: Curvas de ajuste II Región. (a) Modelo exponencial (Philip y Grilli), (b) Modelo lineal, (c) Modelo lineal de dos etapas, (d) Modelo potencial.....	103
Figura 6.27. Curvas de ajuste III Región. (a) Modelo exponencial (Philip y Grilli), (b) Modelo lineal, (c) Modelo lineal de dos etapas, (d) Modelo potencial.	105
Figura 6.28: Curva compuesta I Región.....	107
Figura 6.29: Curva compuesta II Región.	108
Figura 6.30: Curva compuesta III Región.	108
Figura 6.31: Ubicación lisímetros Laguna Tuyajto.	110
Figura 6.32: Evaluación metodología del domo en Laguna Tuyajto.	111
Figura 6.33: Puntos de extracción e instalación lisímetros Huasco.	112

Figura 6.34: Evaluación metodología del domo en Salar del Huasco.....	114
Figura 6.35: Evaluación metodología del domo con otras estimaciones.	115
Figura 6.36: Curvas de ajuste resumen de mediciones.	116
Figura 6.37: Validación domo, medición en laboratorio.....	117
Figura 6.38: Validación domo, mediciones en terreno.	118
Figura 6.39: Validación domo, medición de terreno con tasa nula.	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Evaporación desde suelos Salar de El Huasco.....	7
Tabla 4.2: Evaporación desde suelos Laguna Tuyajto.	8
Tabla 4.3: Antecedentes evaporación de tanque 9	9
Tabla 4.4: Clasificación de partículas USDA 33	33
Tabla 5.1: Ubicación puntos de medición de evaporación desde suelos.....	39
Tabla 5.2: Evaporímetros existentes en cuencas de medición.	50
Tabla 5.3: Características domos empleados 54	54
Tabla 6.1: Evaporación de bandeja en evaporímetros Collahuasi-GP consultores (2008).	65
Tabla 6.2: Evaporación de tanque según series históricas, I Región.....	65
Tabla 6.3: Distribución mensual de la evaporación anual en el Salar del Huasco.	66
Tabla 6.4: Proyección evaporación de tanque en período abril-mayo en Salar del Huasco.....	67
Tabla 6.5: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno I Región.....	67
Tabla 6.6: Tasas de evaporación desde lagunas adoptadas, I Región 68	68
Tabla 6.7: Evaporación de bandeja en evaporímetros Geoaguas Consultores.	70
Tabla 6.8: Evaporación de tanque Clase A según series históricas II Región.	70
Tabla 6.9: Distribución mensual de la evaporación anual II Región.	71
Tabla 6.10: Proyección Evaporación de tanque mes de diciembre II Región.....	71
Tabla 6.11: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno II Región.	73
Tabla 6.12: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno, III Región.	75
Tabla 6.13: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 1.....	78
Tabla 6.14: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 2.....	79
Tabla 6.15: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 3.....	80
Tabla 6.16: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 4.....	81
Tabla 6.17: Resultados campaña de evaporación II Región, Laguna Tuyajto, Zona 5.....	84
Tabla 6.18: Resultados campaña de evaporación II Región, Laguna Tuyajto, Zona 6.....	85

Tabla 6.19: Resultados campaña de evaporación II Región, Salar de El Laco, Zona 7.....	86
Tabla 6.20: Resultados campaña de evaporación II Región, A. Calientes 2, Zona 8.....	88
Tabla 6.21: Resultados campaña de evaporación III Región. S. Pedernales, Zona 9.....	91
Tabla 6.22: Resultados campaña de evaporación III Región, Pedernales, Zona 10.....	92
Tabla 6.23: Resultados campaña de evaporación III Región, Maricunga, Zona 11.....	93
Tabla 6.24: Resultados campaña de evaporación III Región, Maricunga, Zona 12.....	94
Tabla 6.25: Bondad de ajuste curvas I Región.....	98
Tabla 6.26: Bondad de ajuste curvas II Región.....	102
Tabla 6.27: Bondad de ajuste curvas III Región.....	104
Tabla 6.28: Bondad de ajuste curvas combinadas.....	107
Tabla 6.29: Sistemas de medición implementados por Geoaguas en Laguna Tuyajto.....	109
Tabla 6.30: Comparación tasas medidas y simuladas en L. Tuyajto.....	111
Tabla 6.31: Lisímetros implementados por Collahuasi-GP Consultores en Salar del Huasco.....	113
Tabla 8.1. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 1 campaña 1.....	167
Tabla 8.2. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 2 campaña 1.....	172
Tabla 8.3. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 1 campaña 2.....	175
Tabla 8.4. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 2 campaña 2.....	178

1 MARCO GENERAL DEL ESTUDIO

El Altiplano o Puna es una región de América del Sur que comprende el norte de Chile, el centro y sur del Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Básicamente son cuencas sedimentarias formadas en altura, en su mayoría sobre los 3.500 msnm, debido al tectonismo y a la actividad volcánica existente en estas latitudes.

Debido a la morfología de la zona (cuencas endorreicas en un clima de bastante aridez) se han formado numerosas lagunas y salares. Las precipitaciones en estas cuencas son de origen tropical, y ocurren durante el verano del hemisferio sur, lo que es conocido como el ‘Invierno Boliviano’ o ‘Invierno Altiplánico’. Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial, y se concentran en los meses de enero y febrero. Este fenómeno desaparece más al sur, teniendo una mínima influencia en la Región de Atacama.

Las condiciones extremas sólo permiten que subsista una vegetación especializada, con pocos requerimientos hídricos y capaces de soportar amplias oscilaciones térmicas. Los bofedales conforman sistemas adaptados a estas condiciones, conocidas como vegetación de estepa o esteparia, que minimizan la transpiración debido a la reducida superficie de sus hojas, algunas de las cuales han evolucionado transformándose en espinas.

En Chile, las principales actividades que se desarrollan en la zona de interés son la minería y el turismo, así como también la ganadería y agricultura por parte de los pueblos originarios.

El estudio surge de la necesidad de satisfacer la demanda de agua existente y proyectada para los próximos 20 años en esta zona del norte del país. Esta demanda se refleja en actuales solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, solicitudes de áreas de exploración y de regularizaciones.

Dada la etapa de desarrollo en que se encuentra la zona de estudio, ésta presenta una oportunidad casi única para la elaboración y evaluación de planes de gestión y aprovechamiento del agua de manera sustentable.

En este contexto, el objetivo general del estudio es implementar un programa de investigación que permita establecer el estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas altoandinos. La información levantada y analizada ha sido complementada con trabajos de terreno y gabinete.

El estudio considera un análisis a escala regional y otro a nivel local o sistemas pilotos. En ambas escalas de trabajo se abordan, fundamentalmente, aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Los sistemas piloto son unidades seleccionadas a nivel de cuencas hidrográficas en conjunto con personal de la DGA, actores locales e instituciones

de la zona, en base a criterios de carácter ambiental, demanda comprometida e información disponible.

Como parte de los trabajos de terreno, en estas zonas se han efectuado campañas de reconocimiento, instalación de estaciones meteorológicas, muestreos de agua para análisis químicos e isotópicos y mediciones de evaporación desde el agua subterránea somera.

Las campañas de reconocimiento estuvieron orientadas a recorrer el terreno a través de sus principales rutas de acceso y caminos que conectan las cuencas del Altiplano, además de seleccionar potenciales lugares para la instalación de estaciones meteorológicas.

Uno de los aspectos fundamentales de esta investigación lo constituye la instalación de 12 estaciones meteorológicas en el Altiplano entre la I y III Región, las que miden precipitación y en algunos casos otras variables como temperatura y humedad del aire y del suelo.

Adicionalmente, se realizaron en todos los sistemas, mediciones in-situ de evaporación desde la napa, utilizando la metodología del domo o semiesfera acrílica propuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Estos datos son importantes para realizar el balance hídrico de los sistemas y de especial relevancia para la estimación de la recarga en cuencas cerradas.

Las campañas de muestreo de aguas, tanto superficial como subterránea, permitieron complementar la información existente en reparticiones fiscales, estudios y publicaciones científicas, en particular en los sistemas pilotos estudiados.

Finalmente, cabe señalar que el uso de los recursos hídricos en el Altiplano debe considerar por una parte su importancia para el desarrollo económico y social del país y las Regiones y por otra, la protección y cuidado de los sistemas ambientales sensibles que allí existen. En este sentido, es fundamental entender la extracción de aguas subterráneas y la gestión misma de los acuíferos como un proceso dinámico, tanto espacial como temporalmente. Asimismo, se deben considerar adecuados planes de monitoreo y contingencia.

Por lo mismo, el uso sustentable del agua, la explotación, y en particular la exploración de los recursos hídricos, debe vincularse desde su origen a variables de interés ambiental y cultural de la zona.

2 INTRODUCCIÓN

En el marco del estudio “Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, XV, I, II y III Regiones”, se le ha encargado a la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), a través del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA), la realización de diversas labores que permitan mejorar el conocimiento de los sistemas hidrogeológicos en cuencas altiplánicas prioritarias desde la Primera a la Tercera Región.

Dentro de las actividades propuestas, se encomendó la realización de trabajos de campo, cuyo objetivo general es el levantamiento de nueva información hidrológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica. El presente informe describe las labores de terreno orientadas a la caracterización de la evaporación desde napas freáticas someras a través de los suelos.

La información generada en terreno fue procesada y sintetizada con el fin de incrementar el escaso conocimiento relacionado con la evaporación desde salares del altiplano existente en la actualidad.

En el presente informe se describe la realización de 3 campañas de terreno con el objetivo de caracterizar las tasas de evaporación y determinar su relación con la profundidad a la que se encuentra la napa subterránea. Durante el mes de diciembre de 2007 se trabajó en las cuencas altiplánicas de la Segunda Región (Laguna Tuyajto, Salar de El Laco y Salar de Aguas Calientes 2), mientras una segunda campaña se hizo durante el mes de marzo de 2008 en las cuencas de la III Región (Pedernales y Maricunga). Por último, durante el mes de abril de 2008 se llevó a cabo la campaña de terreno en la Primera Región, en la cuenca del Salar del Huasco.

De estos trabajos se obtuvo estimaciones de evaporación desde aguas subterráneas someras en más de 45 puntos agrupados en 12 zonas representativas del área de estudio. Adicionalmente se realizaron análisis de laboratorio a los suelos de las zonas de medición y se determinó en terreno la tasa de evaporación desde superficies libres mediante la implementación de tanques evaporímetros estándar y otros construidos en terreno.

La metodología empleada para determinar los flujos de evaporación desde napas freáticas fue la propuesta por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)¹, denominada metodología del Domo. Esta herramienta permite medir descargas desde el acuífero de forma directa sobre la superficie del terreno.

¹ USGS, 1998; Stannard y Weltz, 2006

El procedimiento consiste en capturar y cuantificar durante breves períodos de tiempo el vapor de agua emanado desde el acuífero, utilizando una semiesfera acrílica de volumen conocido. El flujo de evaporación queda determinado por la tasa de incremento de la densidad de vapor de agua al interior del dispositivo. El contenido de vapor se registra con un sensor que mide la evolución de la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara en intervalos de 1 segundo.

Este informe se estructura en base a seis capítulos. En el capítulo siguiente se presentan los objetivos del estudio y su importancia para la gestión de los recursos hídricos. En el tercer capítulo se detalla la información que existe sobre evaporación en la zona de estudio y las metodologías más utilizadas en la actualidad para su cuantificación. En el capítulo denominado Campañas de Terreno se describe la metodología general implementada y se presenta un breve resumen de las tres campañas realizadas. En el quinto capítulo se presentan los principales resultados obtenidos y se realiza un breve análisis de la información. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones que emanan de este trabajo, basándose en las labores de terreno y de gabinete realizadas.

3 OBJETIVOS DEL TRABAJO

La caracterización de la recarga de los acuíferos mediante métodos convencionales, como la realización de balances hídricos, conlleva un alto grado de incertidumbre en zonas desérticas, debido principalmente a la falta de información y a la gran variabilidad de los fenómenos climáticos, que hace imprecisa la interpolación.

Uno de los parámetros más importantes y con mayor incertidumbre en este cálculo es la evaporación, que se produce tanto desde superficies libres de agua como desde aguas subterráneas someras. Esta situación es aún más evidente en climas áridos, donde la evaporación puede consumir gran parte de los recursos hídricos que ingresan en forma de precipitación, llegando incluso a igualarla.

En este contexto, la determinación de las tasas de evaporación ayuda a disminuir en parte las incertidumbres inherentes a los modelos de balance. Adicionalmente, muchos modelos de simulación hidrogeológica requieren como dato de entrada estimaciones confiables de evaporación desde aguas superficiales y suelos.

Finalmente, el disponer de información de evaporación permite enfocar el problema de la recarga desde un punto de vista alternativo. Este consiste en estimar la recarga de largo plazo de un sistema a través de sus descargas, procedimiento particularmente aplicable a cuencas cerradas e inexploradas, donde la evaporación desde las zonas bajas o terminales se transforma en la principal vía de evacuación del agua hacia la atmósfera.

3.1 Objetivo General

El objetivo general de las mediciones en terreno consistió en cuantificar la evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno.

Esta nueva información aporta al conocimiento actual de los sistemas, traduciéndose en mayores antecedentes para los modelos de balance y simulación hidrogeológica, así como a la obtención de flujos de descarga a nivel de cuenca y por lo tanto a la aproximación indirecta de los caudales de recarga en el largo plazo.

El objetivo de esta fase del estudio consistió en la generación de información de terreno y el análisis general de la información recopilada. En el presente informe, por lo tanto, no se realizaron evaluaciones específicas de recarga en los sistemas estudiados.

3.2 Objetivos específicos

a) Evaporación desde superficies de agua libre

Determinación de tasas de evaporación desde lagos y lagunas en las 6 cuencas estudiadas. Construcción de curvas históricas de evaporación media diaria en función de la altura para las Regiones I, II y III.

Realización de mediciones directas en terreno.

b) Análisis de suelos

Clasificación de suelos muestreados donde se midió evaporación, de acuerdo a su composición textural. Esto permitirá relacionar la composición del suelo con la evaporación.

c) Curvas de evaporación

Mediante la perforación con barreno se obtendrá la profundidad a la que se encuentra la napa subterránea en la vecindad de los puntos muestreados. De esta forma se construirá curvas que relacionen la evaporación con la profundidad de la napa y con ello obtener la tasa de evaporación para todo el perfil de profundidades.

Se pretende también estudiar el ajuste de diferentes tipos de curvas reportadas en la literatura, que representan el fenómeno tanto en las primeras capas del suelo como en la zona cercana a la profundidad de extinción.

d) Evaluación metodología del Domo

Adicionalmente, se compararán los resultados obtenidos mediante la metodología del domo con otros mecanismos de medición implementados en la zona. Las técnicas de estimación que se utilizarán como medio de comparación son los lisímetros y microlisímetros, instrumentos que han sido previamente implementados en tres de las seis cuencas estudiadas.

4 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

4.1 Antecedentes de evaporación en zona de estudio.

La información de evaporación desde napas freáticas someras en la alta puna chilena es escasa. En las cuencas y sistemas piloto definidos, la situación actual es similar. Recién durante los últimos años se han realizado algunos esfuerzos orientados a conocer los flujos de evaporación que constituyen las descargas de los sistemas desde sus zonas terminales.

Previo al presente estudio, se contaba únicamente con información de mediciones realizadas con los métodos de los lisímetros y microlisímetros en sólo 2 cuencas piloto de esta investigación, las del Salar del Huasco y Laguna Tuyajto.

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi encargó a la empresa GP Consultores la ejecución de estudios orientados a la caracterización y cuantificación de las descargas producidas desde lagunas, humedales y suelos en la cuenca del Salar del Huasco. El proyecto Collahuasi – GP Consultores consideró la construcción, instalación y monitoreo de 12 lisímetros de carga constante con suelos inalterados representativos de 4 zonas del salar. En cada una de las zonas definidas se simularon tres posiciones para el nivel de saturación.

Un resumen de las tasas de evaporación obtenidas en el estudio realizado por GP Consultores en el salar del Huasco se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Evaporación desde suelos Salar de El Huasco

Fuente	Nombre	Profundidad (m)	Evaporación (mm/día)
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 1.2	0,360	2,460
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 1.3	0,610	0,328
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 2.2	0,440	1,558
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 2.3	0,600	0,697
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 3.2	0,330	1,599
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 3.3	0,510	1,148
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 4.2	0,300	1,927
Collahuasi-GP Consultores, 2008	Huasco 4.3	0,545	1,148

Los lisímetros fueron instalados en enero del año 2007 y se mantuvieron operativos durante un año. Debido a problemas técnicos, se descartó la información entregada por 4 de los doce

lisímetros construidos. Cabe señalar que los instrumentos aún se encuentran emplazados en la zona de estudio, pero actualmente no son monitoreados.

Durante el mes de enero del año 2007, la empresa Geoaguas Consultores instaló 3 lisímetros de carga variable en las cercanías de la Laguna Tuyajto, ubicada en el sector oeste de la cuenca homónima.

El lisímetro denominado Tuyajto 1 fue rellenado con suelo alterado, mientras que los dos restantes corresponden a columnas de suelo inalterado. Las labores de terreno llevadas a cabo por Geoaguas Consultores incluyeron la realización de dos campañas de medición de evaporación con microlisímetros, cada una de seis días de duración, efectuadas en noviembre de 2006 y enero de 2007.

La Tabla 4.2 muestra los resultados de evaporación desde napas freáticas someras obtenidos en la cuenca de la Laguna Tuyajto.

Tabla 4.2: Evaporación desde suelos Laguna Tuyajto.

Fuente	Nombre	Profundidad (m)	Evaporación (mm/día)
Geoaguas Consultores, 2007	L. Tuy1	0,410	1,10
Geoaguas Consultores, 2007	L. Tuy2	0,090	1,32
Geoaguas Consultores, 2007	L. Tuy3	0,210	3,46
Geoaguas Consultores, 2007	Micro 1.1	0,256	2,19
Geoaguas Consultores, 2007	Micro 1.2	0,259	2,08
Geoaguas Consultores, 2007	Micro 2.1	0,242	1,62
Geoaguas Consultores, 2007	Micro 2.2	0,236	2,08

En cuanto a la información de evaporación desde superficies de agua libre, se dispone de información histórica proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), de más de 60 estaciones meteorológicas ubicadas en las Regiones XV, I, II y III. Las estadísticas disponibles abarcan el período comprendido entre los años 1960 y 2007, que fueron obtenidas mediante la utilización de tanques evaporímetros estándar Clase A.

Además, existe información de evaporación de tanque en tres de las seis cuencas en que se trabajó durante las campañas de terreno. En el Salar del Huasco, durante enero de 2004, la empresa GP consultores instaló y comenzó el monitoreo de dos tanques evaporímetros, los cuales se mantienen vigentes hasta la fecha. Uno de los tanques instalados es del tipo estándar, mientras que el otro se encuentra parcialmente enterrado.

La estación meteorológica Collacagua, perteneciente a la Dirección General de Aguas, se encuentra ubicada en la zona norte de la cuenca del Salar del Huasco y cuenta con mediciones de evaporación de tanque en forma continua a partir del año 1964.

Por su parte, la empresa Geoaguas Consultores ha realizado diversos estudios de evaporación de bandeja en cuencas altiplánicas de la II Región. Específicamente en la cuenca de la Laguna Tuyajto instaló dos tanques evaporímetros clase A y dos tanques enterrados. Además, en el Salar de El Laco emplazó 3 tanques evaporímetros; un tanque clase A, uno enterrado y uno sumergido. Cabe señalar que todos los evaporímetros implementados poseen las mismas medidas de diseño, siendo su única diferencia el tipo de instalación. Todos cuentan con un registro de 9 meses a partir de agosto de 2006. En junio de 2007 las mediciones fueron interrumpidas, pero los tanques aún se encuentran instalados.

La Tabla 4.3 muestra las tasas medias de evaporación de bandeja de todos los tanques evaporímetros identificados en la zona de estudio.

Tabla 4.3: Antecedentes evaporación de tanque

Id	Cuenca	Procedencia	Tipo	Evaporación (mm/día)
E101	Salar de El Huasco	DGA	Sin información	6,1
E102	Salar de El Huasco	Collahuasi-GP Consultores	Agua vertiente superficial.	5,1
E103	Salar de El Huasco	Collahuasi-GP Consultores	Agua vertiente enterrado	5,3
E202	Laguna Tuyajto	Geoaguas Consultores	Agua laguna enterrado	5,1*
E203	Laguna Tuyajto	Geoaguas Consultores	Agua laguna superficial	6,1*
E204	Laguna Tuyajto	Geoaguas Consultores	Agua subte. enterrado	7,1*
E205	Laguna Tuyajto	Geoaguas Consultores	Agua subte. superficial	7,4*
E206	Salar del Laco	Geoaguas Consultores	Agua laguna en laguna	6,7*
E207	Salar del Laco	Geoaguas Consultores	Agua laguna superficial	7,3*
E208	Salar del Laco	Geoaguas Consultores	Agua laguna enterrado	8,0*

* Poseen información de 9 meses (15 Agosto-15 Mayo 2006)

4.2 Proceso de evaporación

La evaporación es un proceso físico en el cual el agua cambia del estado líquido en que se encuentra en los cauces, lagunas y en las capas más superficiales del suelo, al gaseoso, retornando a la atmósfera en forma de vapor. Hidrológicamente podría definirse como la tasa neta de transporte de vapor hacia la atmósfera (Aparicio, 1997).

La evaporación representa entonces un cambio de estado, por lo que requiere de una fuente que proporcione a las moléculas de agua la suficiente energía para efectuarlo, cuando estas moléculas alcanzan el nivel de energía cinética necesario para salir de la superficie del agua o del suelo húmedo, escapan al aire en forma de vapor. El calor absorbido por unidad de masa de agua durante el proceso de cambio de estado recibe el nombre de calor latente de evaporación (Custodio & Llamas, 1987).

La evaporación se produce por efecto de la radiación solar, el viento y las diferencias de tensión de vapor entre el agua y la atmósfera o déficit higrométrico. De esta forma, la evaporación es proporcional al déficit higrométrico y se relaciona inversamente a la presión atmosférica total. Dalton en 1802 dedujo la expresión:

$$EV = K \cdot (e_s - e_d) \quad (4.1)$$

Siendo EV la evaporación, e_s la tensión de vapor saturante a la temperatura del agua, e_d la tensión de vapor del aire y K el coeficiente que refleja la influencia de otras variables en el proceso.

Algunas variables adicionales que determinan la cantidad de vapor de agua liberada a la atmósfera pueden clasificarse como (Custodio & Llamas, 1987):

- Temperatura: tanto la tensión de vapor del agua como la tensión de vapor del aire aumentan con la temperatura. Si el aumento fuese de igual magnitud, el efecto neto sería nulo.
- Velocidad del viento: la velocidad y turbulencia del viento ayuda a la renovación de las masas de aire, lo que genera un aumento en el déficit higrométrico.
- Presión atmosférica: la evaporación aumenta al disminuir la presión atmosférica, sin embargo, al aumentar la altitud disminuye la evaporación. Este fenómeno se explica por la mayor influencia de otros factores.
- Forma de la superficie evaporante: la magnitud de la evaporación dependerá de la extensión y profundidad de la superficie de agua libre y del tipo de suelo.
- Calidad del agua: la tensión de vapor del agua disminuye a medida que aumenta su contenido de sólidos disueltos. Como orden de magnitud se estima que un aumento del 1% en la concentración de sales disminuye en un 1% la evaporación.

Para el caso de la evaporación desde el suelo, su magnitud se relaciona con la cantidad de agua contenida en sus capas más superficiales. Un suelo totalmente saturado, dependiendo de sus características físicas, puede llegar a evaporar tanta agua como una superficie líquida. Si el nivel freático se encuentra más profundo, la evaporación disminuirá. La magnitud de esta disminución dependerá en gran medida del tipo de suelo.

Los mecanismos de evaporación desde el suelo se encuentran gobernados por el movimiento de agua tanto en su estado líquido como gaseoso. De esta forma, la evaporación se encontrará caracterizada por el transporte ascendente o descendente de vapor en la parte superior del perfil de suelo (F_V) y por un flujo líquido ascendente en su sección inferior (F_L). La línea divisoria entre ambos fenómenos es conocida como frente de evaporación (F_E). A continuación, la Figura 4.1 presenta un esquema explicativo de los factores involucrados en el proceso de evaporación.

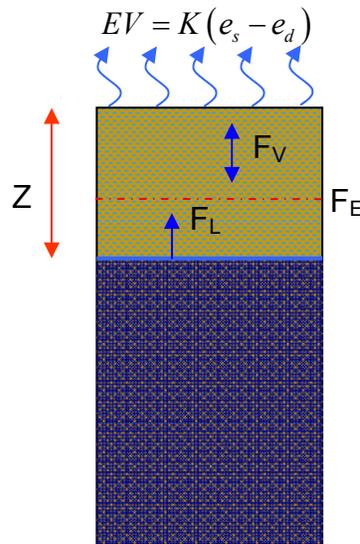


Figura 4.1: Modelo conceptual de evaporación.

Según lo expresado por Philip (1957) y posteriormente estudiado por Grilli y Vidal (1986) y Rushton (2003), la evaporación se produce desde la superficie freática del agua subterránea que se encuentra poco profunda. Dependiendo de esa profundidad el proceso de evaporación puede diferenciarse en tres etapas:

- Desde suelo húmedo: si la superficie del agua subterránea está cercana a la superficie del terreno y el suelo entre esas dos superficies contiene suficiente humedad, la evaporación del agua subterránea está gobernada exclusivamente por las condiciones meteorológicas externas, independientemente de las propiedades físicas del suelo.
- Etapa intermedia: si la superficie freática se encuentra suficientemente profunda y existe una capa de suelo superficial bastante seca, la tasa a la cual el perfil de suelo no saturado puede transmitir humedad a la superficie es menor al potencial evaporativo atmosférico, siendo por lo tanto las propiedades físicas del suelo la condición limitante. En este caso la evaporación se presentará como un flujo de vapor por sobre el frente de evaporación y líquido bajo este.

- Desde suelo seco: la evaporación es controlada por mecanismos de transferencia de vapor ascendentes y descendentes.

Asumiendo que el proceso de evaporación se desarrolla en régimen permanente, el flujo máximo de humedad que el suelo puede entregar quedará determinado entonces por la profundidad a la que se encuentre la superficie freática del agua subterránea, por las propiedades de transmisión del medio poroso o superficie evaporante y por el déficit higrométrico.

4.3 Técnicas Para Medir Evaporación

4.3.1 Evaporación Superficial

La tasa máxima de evaporación en un acuífero se presenta cuando la superficie del agua está en contacto directo con la atmósfera, es decir cuando la napa se encuentra sobre el nivel de terreno.

Uno de los métodos más utilizados para medir la evaporación superficial consiste en la instalación de tanques de evaporación. Estos tanques permiten cuantificar la altura de agua evaporada en un período de tiempo igual o mayor a un día, obteniéndose una tasa media de evaporación. La metodología de medición consiste en adicionar la cantidad de agua necesaria para elevar la altura de agua hasta un nivel fijo, para lo cual pueden utilizarse agujas medidoras, obteniéndose un grado de error menor a 0,5 mm (Chow, 1994).

Por motivos prácticos, el agua utilizada para el llenado de los tanques puede obtenerse desde lagunas o cauces existentes en el lugar de instalación, o puede ser transportada desde otros sectores. Dependiendo del objetivo de medición, deberá considerarse la composición química de las aguas utilizadas en cada caso.

Debido a la existencia de condiciones de borde, la evaporación registrada en este tipo de tanques es mayor a la que podría medirse en la misma zona sobre un afloramiento de agua o un lago. Por esta razón el caudal evaporado debe corregirse mediante factores de ajuste, que permitan estimar la evaporación potencial desde el acuífero o superficies de aguas abiertas. Para ello se utiliza la metodología propuesta por Mardones (1997), que se resume en:

$$E0 = K_e \cdot K_s \cdot E_T \quad (4.2)$$

Donde $E0$ es la evaporación desde superficies de agua libre o evaporación potencial (mm/día), K_e es el coeficiente de embalse (adimensional), K_s es el coeficiente de reducción por salinidad (adimensional) y E_T es la evaporación de bandeja medida en el tanque (mm/día).

El coeficiente de embalse corrige la sobreestimación de la evaporación producto del calor que concentra el material y corrige la influencia del tanque sobre otros factores que determinan el proceso. Dicho factor toma valores cercanos a 0,7, variando mensualmente entre 0,6 y 0,8 (Linsley, 1977). Doorenbos en 1977 (FAO N° 24) propone coeficientes dependientes de la humedad relativa, la velocidad del viento y las condiciones de instalación de la bandeja.

Como se mencionó anteriormente, el flujo de evaporación es proporcional a la diferencia entre la tensión de vapor del agua en la superficie evaporante y la tensión de vapor real de la atmósfera. Un aumento en la salinidad o en la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua provocará una disminución en su presión de vapor y por lo tanto una reducción en la evaporación total registrada. De este modo, el coeficiente de reducción por salinidad intenta independizar las mediciones realizadas del contenido de sales presentes en el agua.

El coeficiente de reducción por salinidad depende entonces de la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua, siendo igual a uno cuando el agua tiene una densidad cercana a la unidad. Ide (1978) realizó en el Salar de Atacama pruebas experimentales para determinar la relación entre la densidad de la salmuera y el coeficiente de reducción por salinidad, cuyos resultados se presentan en la Figura 4.2.

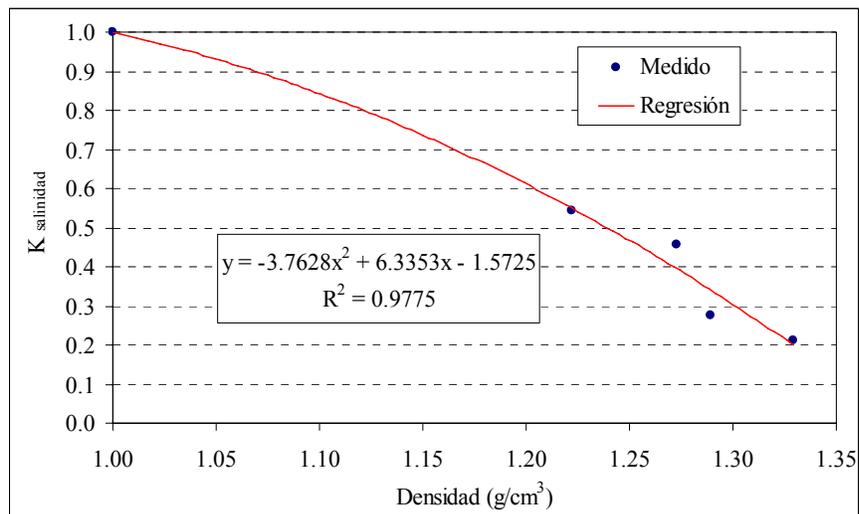


Figura 4.2: Reducción por salinidad vs. Densidad de la salmuera en el Salar de Atacama.

Para el caso de la estimación de recursos hídricos, el interés se centra en la cuantificación de la evaporación potencial en las condiciones naturales de la zona de estudio, es por esto que al utilizar agua de las propias lagunas y acuíferos al realizar mediciones “in situ”, se minimizan los errores de muestreo, haciendo innecesario realizar correcciones por salinidad.

En la actualidad existen varios tipos de tanque que han sido ampliamente estudiados y validados. En particular, el de mayor difusión a nivel mundial es el tanque evaporímetro Clase A (Figura 4.3). Este tanque corresponde a una bandeja de medición de 1,21 m de diámetro y 0,255 m de profundidad y está hecho de metal o hierro galvanizado. Debe ser ubicado sobre un enrejado de madera a 15 cm del suelo, lo que permite la circulación de aire por su sección inferior (Taylor et al., 1997). Cabe señalar que la Dirección General de Aguas (DGA) ha implementado ampliamente este tipo de evaporímetros en su red hidrometeorológica nacional.

Existen dos formas de instalación adicionales para este tipo de tanques, dependiendo de la posición en la cual estos se ubiquen pueden clasificarse como (Custodio & Llamas, 1987):

- Tanque enterrado: corresponde a bandejas de evaporación que se hunden en el suelo dejando una altura libre de 10 cm. El nivel del agua en su interior debe ser coincidente con la superficie del terreno.
- Tanque flotante: buscando una mayor aproximación a las condiciones de evaporación real, este tanque debe ubicarse en el interior de lagunas y cauces, teniendo especial cuidado en asegurar su estabilidad. En este caso, los factores de corrección por embalse aumentan en su valor medio hasta 0,8.



Figura 4.3: Tanque Evaporímetro Clase A.

En caso de no ser posible instalar tanques evaporímetros estándar, pueden ser reemplazados por recipientes de características similares, con diámetro conocido y alturas graduadas en su interior. Ante esta situación se debe prestar particular atención a los factores de corrección por embalse que deben ser aplicados.

4.3.2 Evaporación desde Aguas Subterráneas

En la actualidad existen diversas metodologías que permiten cuantificar la evaporación producida desde las napas freáticas someras. Por lo general, estas técnicas suelen clasificarse, de acuerdo al modo de estimación, como métodos directos o indirectos. Dentro de las técnicas directas se encuentran los lisímetros, microlisímetros, domo y correlación de Eddy. Por su parte, como técnicas indirectas pueden señalarse los acercamientos por medio de balances de agua, la modelación numérica y los métodos de análisis de imágenes satelitales o percepción remota, entre otros.

A continuación se describen los fundamentos conceptuales de las metodologías del domo, lisímetros y microlisímetros, ya que éstas han sido las únicas implementadas a la fecha en la zona de estudio.

4.3.2.1 Metodología del domo

La metodología del domo (Stannard, 1988) consiste en la captura y registro del incremento del vapor de agua, proveniente del acuífero, mediante una cámara semiesférica de acrílico que cumple la función de volumen de control con dimensiones conocidas. La forma de la cúpula y su material permiten el paso de la radiación solar y evita la producción de perturbaciones en las ondas incidentes.

Inicialmente la metodología de las cámaras fue creada con el objetivo de medir la evapotranspiración en zonas cultivadas (Saugier, 1976). Por lo general, estas cámaras no eran fáciles de mover y debían permanecer durante largos períodos en el mismo lugar, alterando significativamente la radiación neta, la temperatura y la tensión de vapor, generando distorsiones en los resultados obtenidos.

El diseño de cámaras que permiten realizar mediciones rápidas de evaporación fue ejecutado por Reicosky & Peters (1977). Estas cámaras, con una superficie cercana a los 3,7 m², requerían la utilización de maquinaria especial para su transporte.

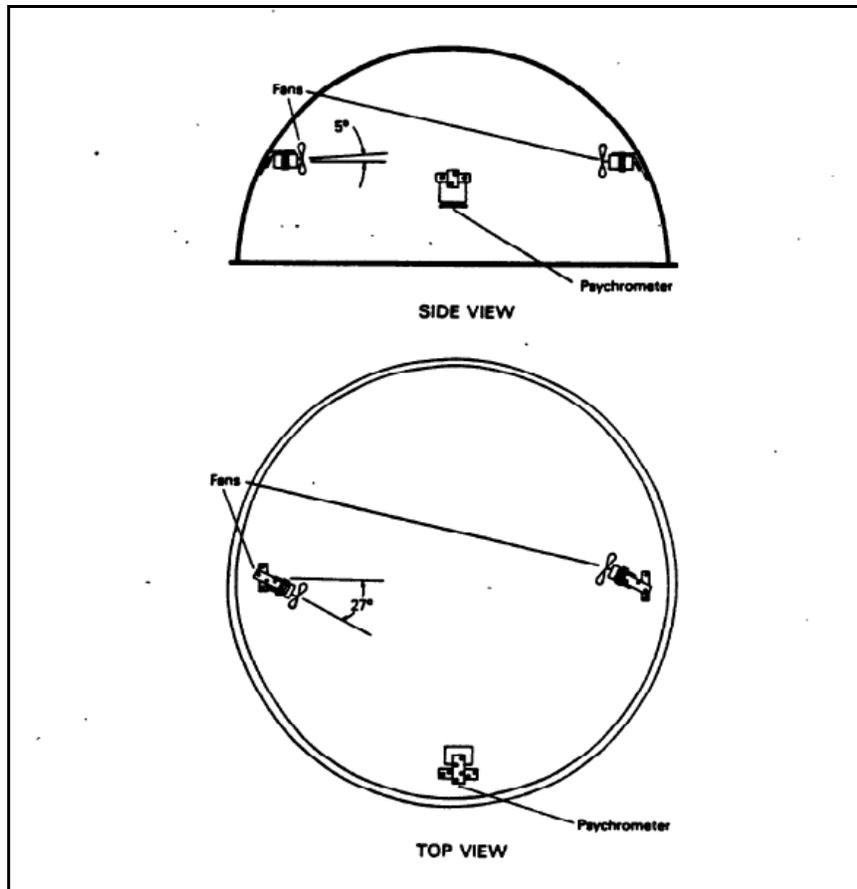
Posteriormente, el Departamento de Geología de Estados Unidos (USGS) propone la metodología de medición del domo. En esta, se plantea la utilización de pequeñas cámaras de acrílico, económicas y fácilmente transportables (Stannard, 1988).

Metodología de Medición

Se utilizó una cámara semiesférica de acrílico de diámetro variable, con un espesor cercano a los 5 mm. Al interior de ésta se coloca un sensor para medir al menos dos parámetros independientes entre los siguientes: humedad relativa, temperatura del aire, presión de saturación de vapor, presión de vapor, déficit de presión de vapor y temperatura de bulbo húmedo.

La cámara cuenta además con dos ventiladores ubicados en los extremos, los que se instalan a 0,27 m desde la base de la cámara con una inclinación de 5 grados bajo la horizontal y un giro de 27 grados con respecto a su centro (Figura 4.4). La función de estos ventiladores es reproducir la velocidad del viento existente en el exterior del domo y establecer una mezcla eficiente del vapor de agua almacenado en el volumen de control.

La Figura 4.4 muestra un esquema con la ubicación de los ventiladores y el sensor utilizado para realizar las mediciones.



Fuente: [Stannard, 1988]

Figura 4.4: Montaje del equipo de medición en terreno.

Generalmente las superficies donde se realizan las mediciones no se encuentran lo suficientemente parejas, lo que puede permitir el ingreso de aire al interior del domo, generando errores de estimación. Este inconveniente puede solucionarse instalando un material aislante en el perímetro de la cúpula.

El proceso de medición consiste en registrar el incremento de vapor de agua en el interior del domo durante el tiempo necesario para lograr su estabilización. Para tener un registro del

comportamiento diario de la evaporación en zonas áridas, las mediciones deben realizarse desde la salida del sol hasta poco después del ocaso.

El cálculo de la tasa de evaporación instantánea se basa en la ley de Dalton (1803), la que establece que la presión que ejerce un gas (presión de vapor) es independiente de la presencia de otros gases (Fritschen, 1979).

En el caso de contar con mediciones de la humedad relativa y de temperatura del aire, el vapor de agua contenido en el interior del domo puede determinarse mediante el siguiente procedimiento.

A partir de la temperatura (T , °C) medida con el sensor se puede obtener la presión de saturación de vapor (e_s , Pa) del vapor de agua usando la expresión:

$$e_s = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right) \quad (4.3)$$

Una vez obtenida la presión de vapor saturado y la humedad relativa (HR , %) medida con el sensor, se calcula la presión de vapor (e , Pa) utilizando la definición de humedad relativa, que se establece como:

$$HR = \frac{e}{e_s} \quad (4.4)$$

La masa de agua presente en el domo puede ser obtenida a partir de la densidad de vapor de agua (a , g/m³) que se expresa mediante la ecuación:

$$a = q_v \cdot \rho_a \cdot 1000 \quad (4.5)$$

Donde q_v es la humedad específica (adimensional), que representa la masa de vapor de agua por unidad de volumen de aire húmedo, y ρ_a es la densidad del aire húmedo (kg/m³).

La humedad específica se obtiene a partir de la presión de vapor y la presión del aire húmedo (P , Pa), correspondiente a la presión atmosférica.

$$q_v = 0,622 \cdot \frac{e}{P} \quad (4.6)$$

Por último, la densidad del aire húmedo (ρ_a) se obtiene a partir de la Ley de los Gases Ideales deducida por Émile Clapeyron (1834):

$$\rho_a = \frac{P}{(R_a \cdot T)} \quad (4.7)$$

$$R_a = R_d \cdot (1 + 0,608 \cdot q_v) \quad (4.8)$$

Aquí R_d es la constante conocida de gas para aire seco (287 J/Kg $^{\circ}$ K) y R_a representa la constante de gas para aire húmedo. En dicha ley (Ecuación 4.7), la temperatura, T , debe expresarse en grados Kelvin ($^{\circ}$ K).

Una vez determinada la densidad de vapor de agua en el domo y conociendo su volumen, se calcula la masa de vapor de agua para cada lectura del sensor a durante el periodo de medición, obteniéndose la curva de acumulación de vapor de agua, tal como se presenta en la Figura 4.5.

Como se observa, la cantidad de agua retenida por el domo presenta un incremento paulatino al inicio, que aumenta para las siguientes mediciones. Luego, se llega a un punto en el que la tasa de generación de vapor decae. Esto ocurre producto de la disminución del gradiente de tensión de vapor producido por la retención de la humedad al interior del domo.

La tasa de evaporación real se obtiene usando el periodo de aumento constante, mostrado por la parte central de la Figura 4.5. Para estimar la máxima pendiente, se recomienda determinar el mejor ajuste lineal mediante el método de los mínimos cuadrados, considerando intervalos móviles de 5 puntos.

Con todo lo anterior, la evaporación instantánea para cada período de medición se calcula con la expresión:

$$E = \frac{86,4 \cdot M \cdot V}{A \cdot C} \left(\frac{\text{mm}}{\text{d}} \right) \quad (4.9)$$

Donde:

E es la tasa de evaporación instantánea (mm/día).

M es la tasa de cambio de la densidad de vapor de agua en el domo (g/m 3 /s), que se calcula como pendiente máxima de la recta de la Figura 4.5.

V es el volumen del domo (m 3), descontando el volumen de los accesorios ubicados en su interior.

A es el área superficial cubierta por el domo (m 2).

C es un factor de calibración, que se explica en el capítulo siguiente.

El factor 86,4 es para la conversión de unidades, que convierte gramos de agua por metro cúbico por segundo a milímetros por día.

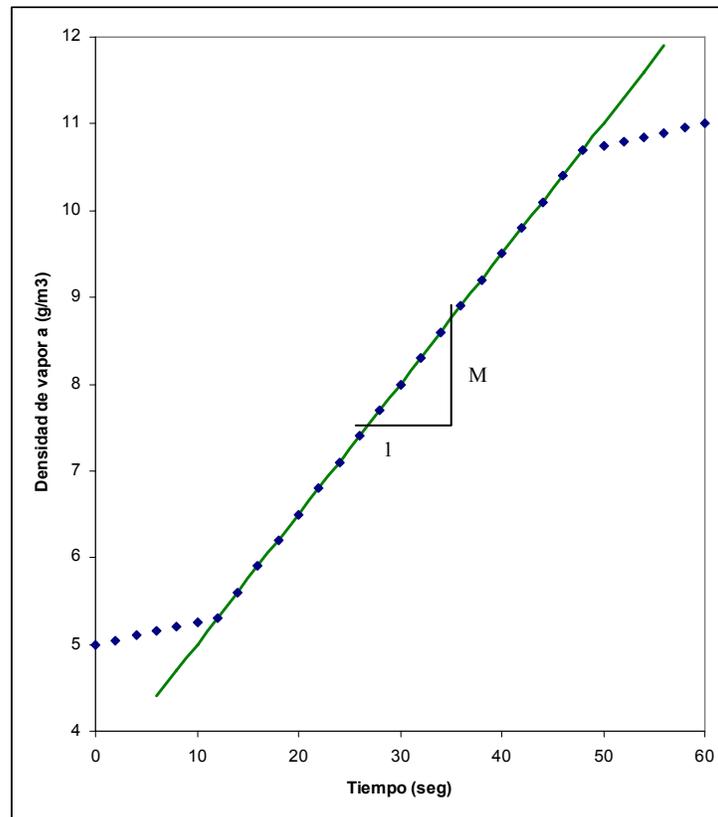


Figura 4.5: Evolución masa de vapor de agua en el tiempo al interior del domo.

La metodología de medición propuesta consta de cinco etapas principales, las que pueden resumirse como:

- Para evitar el ingreso del aire hacia el interior del domo, puede aplanarse y rellenarse la superficie del terreno a lo largo del contorno o perímetro donde se instalará la cúpula. Adicionalmente puede instalarse una tela impermeable a lo largo del perímetro de la cúpula (faldón).
- Activar los ventiladores y el sensor, y ventilar el domo hasta alcanzar la humedad ambiente al interior de la cámara.
- Disponer rápidamente el domo sobre la superficie de medición y comenzar el registro. El tiempo de medición está determinado por la tasa de evaporación. Para el caso de suelos relativamente secos, la estabilización puede producirse después de varios minutos.

- Una vez alcanzado el equilibrio, retirar la cámara y desactivar los dispositivos instalados en su interior. Esperar algunos minutos para realizar una nueva medición.
- La superficie del domo debe mantenerse limpia, pasando un paño húmedo cuando se considere necesario.

El procedimiento descrito hasta ahora permite calcular la tasa de evaporación instantánea de una medición puntual. Para determinar el comportamiento de la tasa de evaporación a lo largo del día deben realizarse mediciones a intervalos regulares. La frecuencia de medición necesaria depende de las condiciones meteorológicas existentes en el lugar, si estas no presentan cambios bruscos, el intervalo debe ser a lo sumo de una hora, durante las horas de luz. En la Figura 4.6 se muestra una curva tipo de la variación de la tasa de evaporación a lo largo del día. Finalmente, la evaporación diaria se obtiene calculando el área bajo la curva de la Figura 4.6.

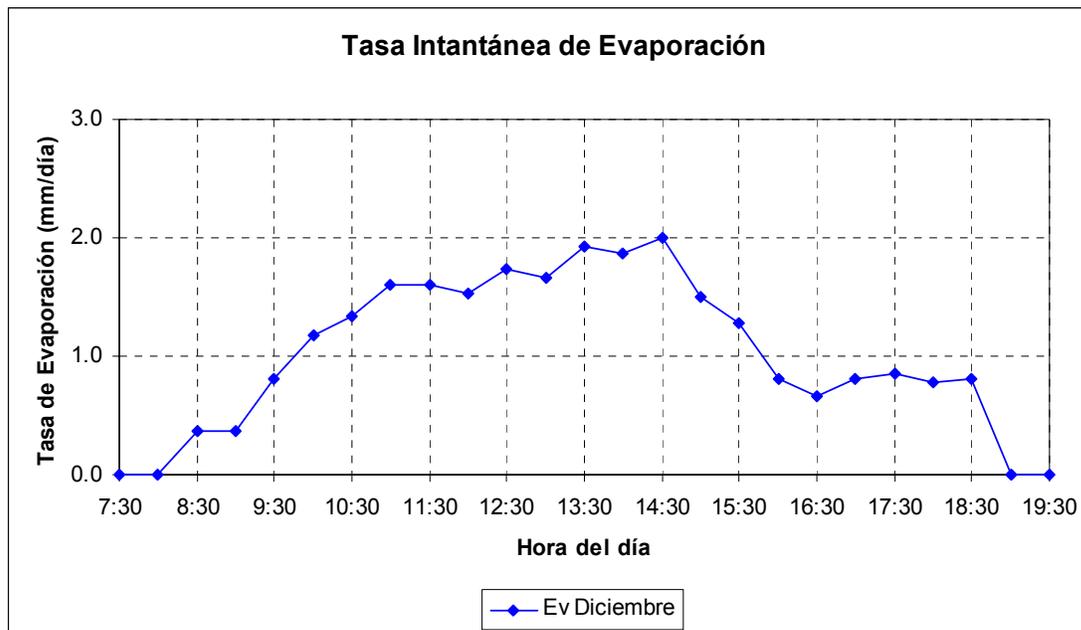


Figura 4.6: Comportamiento tipo de la tasa de evaporación a lo largo del día.

Una descripción detallada de la metodología es presentada por Stannard (1988). La validez del método y su precisión bajo diversas condiciones ha sido evaluada por diversos autores (Rana, 2000; Sanford, 2001; Stannard, 2006).

Calibración del Domo

Debido a que el material de la semiesfera con que se trabajó (acrílico) es ligeramente hidrofílico, es decir, partículas de vapor de agua pueden quedar adsorbidas en su superficie, es necesario efectuar una calibración que determine la cantidad de agua evaporada que no se encuentra inmersa en la masa de aire existente en su interior. La calibración permite además compensar errores de medición propios del sensor y una posible mezcla incompleta de aire producida por los ventiladores. Un buen proceso de calibración debería entregar factores cercano a la unidad (Stannard, 1988).

En términos generales, el proceso de calibración consiste en comparar reiteradas mediciones de evaporación hechas por el domo con otra experiencia independiente y realizada en forma simultánea. El método de comparación utilizado consiste en cuantificar la pérdida de agua por evaporación desde un recipiente con agua, midiendo a través de una balanza de precisión. Para cada repetición deben compararse los resultados obtenidos con ambos procedimientos.

A continuación se detallan los pasos que componen el proceso de calibración (Standard, 1988).

1. Establecer una superficie plana y seca para instalar la cúpula. Con el fin de evitar un flujo de aire entre el domo y el ambiente circundante, puede instalarse algún sello o material aislante en los bordes de la cámara.
2. Disponer una balanza de precisión en la zona en que se instalará el domo.
3. Ubicar sobre la balanza un recipiente con agua y un calefactor conectado a un regulador de voltaje que permita variar su temperatura.
4. Ajustar el voltaje del calefactor y esperar hasta que la temperatura del agua al interior del recipiente permanezca constante. Las tasas de evaporación en el proceso de calibración deben ser del mismo orden de magnitud que las tasas que potencialmente podrían ser medidas en terreno.
5. Activar los 2 ventiladores en el interior del domo y medir la velocidad del viento generada.
6. En forma simultánea comenzar el registro del sensor y de la balanza. Se recomienda un intervalo de medición de 2 segundos para el sensor de humedad. Para la balanza, en caso de no estar conectada a un datalogger o computador que permita transferir los datos en forma automática, se recomienda un intervalo de 5 segundos.
7. Ubicar el domo en la superficie previamente establecida. Controlar el tiempo transcurrido desde el inicio del registro hasta que la cúpula se ha posado sobre la superficie de medición.

8. Mantener el domo en el lugar durante al menos 2 minutos. Una vez transcurrido este período concluir el registro, retirar y ventilar.
9. Repetir el proceso variando la temperatura del agua y/o la velocidad de rotación de los ventiladores.

El análisis de los datos consiste en determinar la tasa de evaporación registrada por la balanza (tasa de producción) en cada repetición y comparar dicho valor con la evaporación calculada mediante la metodología del domo (tasa de acumulación).

La Figura 4.7 muestra un gráfico representativo de las curvas de evaporación obtenidas mediante el sensor y la balanza para una medición. En este punto se deben determinar las pendientes, en gramos por minutos, de ambas funciones para un mismo período de pendiente constante o uniforme.

El último paso consiste en graficar las tasas de producción en función de las tasas de acumulación para todas las repeticiones realizadas. La pendiente de la recta correspondiente al mejor ajuste lineal pasando por el origen, es equivalente al factor de calibración y será utilizado para corregir las mediciones realizadas en terreno (Figura 4.8).

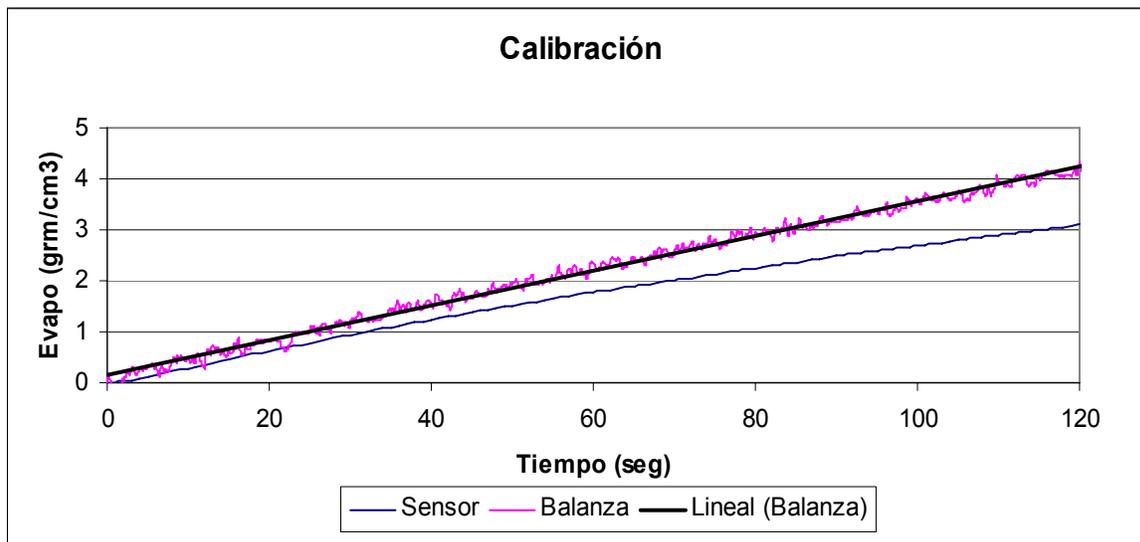


Figura 4.7: Determinación de tasas de evaporación en proceso de calibración.

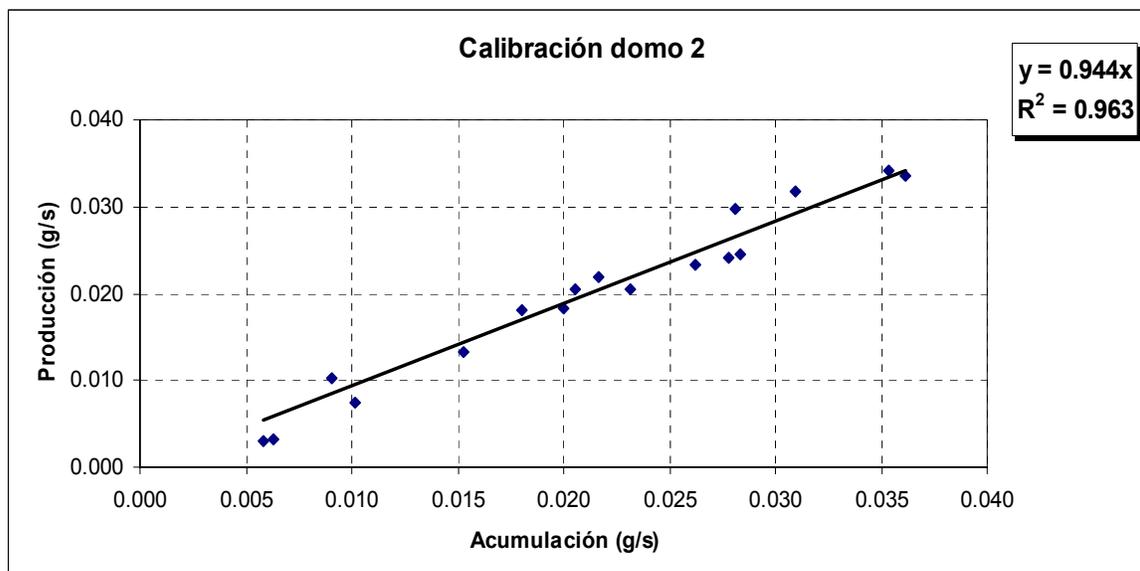


Figura 4.8: Factor de calibración.

4.3.2.2 Lisímetros

La metodología de los lisímetros fue desarrollada hace más de tres siglos con el objetivo de realizar medidas de infiltración. En la actualidad su utilización se ha extendido a otros campos, existiendo una gran variedad de modelos, metodologías y objetivos de implementación (Custodio & Llamas, 1983). Históricamente, los lisímetros han sido considerados como herramientas adecuadas y confiables que permiten cuantificar la evaporación e incluso la evapotranspiración (Aboukhaled et al., 1982).

Un lisímetro podría definirse como un dispositivo que aísla un volumen de suelo o tierra entre la superficie y una profundidad dada (Muller, 1996). En la práctica corresponden a columnas rellenas con suelos inalterados o reconstruidos, los que son depositados en tanques impermeables enterrados. Estos tanques poseen una apertura hacia la superficie del terreno, permitiendo un flujo desde el exterior (infiltración) y desde su interior (evaporación).

La relación de balance de agua que debe ser resuelta para obtener la evaporación real, equivalente al agua consumida desde el lisímetro, se expresa mediante la ecuación 4.10.

$$EV = A - G - \Delta R \quad (4.10)$$

Siendo EV la evaporación real del suelo, A los aportes o ingresos de agua (correcciones que deban realizarse producto de precipitaciones), G las posibles salidas que no corresponden a evaporación (fugas o extracciones artificiales) y ΔR el incremento o disminución en la reserva de agua del suelo, todos expresados en unidades de volumen o altura equivalente.

En términos generales, la metodología de medición consiste en determinar a intervalos conocidos de tiempo la cantidad de agua que ha sido evaporada desde la columna de suelo. De esta forma se obtiene una tasa variable en el tiempo la que puede ser integrada para obtener razones diarias o temporales de la evaporación.

El relleno de la columna puede realizarse mediante dos mecanismos. El primero consiste en utilizar material de la zona en que se instalará el lisímetro, compactándolo para reproducir las características iniciales del suelo. Con esto se obtiene un lisímetro con suelo reconstituido. El segundo mecanismo consiste en hincar el tanque sobre el terreno que se desea evaluar, excavando los alrededores para bajar el cilindro tomando toda la muestra que luego es sellada e impermeabilizada en el fondo. De esta forma se obtiene una columna de suelo inalterado, con características similares a las del terreno en su estado natural y por consiguiente estimaciones más representativas.

Para estimar la altura de agua evaporada en un intervalo de tiempo dado, puede utilizarse una balanza de precisión bajo el lisímetro. La balanza permite cuantificar la diferencia de peso (o pérdida de agua) entre dos mediciones sucesivas. Otro procedimiento (*lisímetro de carga variable*) consiste en realizar una medición del nivel al que la columna de suelo se encuentra saturada. De esta forma, la diferencia entre dos períodos corresponde a la altura de agua evaporada en dicho intervalo. Para el caso de los *lisímetros de carga constante*, en que la profundidad del nivel freático en el sistema se mantiene en el tiempo, el volumen de agua adicionado para mantener la profundidad constante será equivalente al volumen perdido por evaporación.

➤ Lisímetro de carga variable

En la Figura 4.9 se presenta un esquema de implementación de la metodología de los lisímetros de carga variable. En particular, el sistema corresponde a la alternativa desarrollada por Geoaguas Consultores (2007) en algunas cuencas altiplánicas de la Segunda Región.

La instrumentación consta de dos tubos de PVC del mismo diámetro y longitud, conectados en su parte inferior por una tubería que permite la circulación del agua desde el tanque de almacenamiento (sellado) hacia la columna de suelo abierta a la superficie. Asumiendo que inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio, el flujo entre ambos estanques se produce por el gradiente de energía originado por la evaporación desde la muestra de suelo.

En el fondo del cilindro de almacenamiento se instala un sensor de presión que permite determinar la altura de la columna de agua (h) en el estanque. Analizando la diferencia de presión entre dos períodos de tiempo, puede obtenerse el volumen de agua que ha circulado entre ambos estanques para alcanzar el nuevo estado de equilibrio. Para determinar la evaporación producida en un intervalo, se calcula el volumen total de agua que ha dejado el

sistema, esto equivale a sumar el volumen consumido en el tubo de almacenamiento y en la columna de suelo, de modo que la expresión que determina el flujo evaporativo diario resulta:

$$EV \approx \left(\frac{\frac{\Delta h \cdot \pi \cdot d_1^2}{4} + \frac{\Delta h \cdot n \cdot \pi \cdot d_2^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}} \right) = (1 + n) \cdot \Delta h \quad \text{si } d_1 = d_2 \quad (4.11)$$

Donde Ev corresponde a la evaporación (mm/día), Δh a la diferencia de alturas registrada en días consecutivos (mm/día), d al diámetro de los tanques (mm) y n a la porosidad del suelo (adimensional).

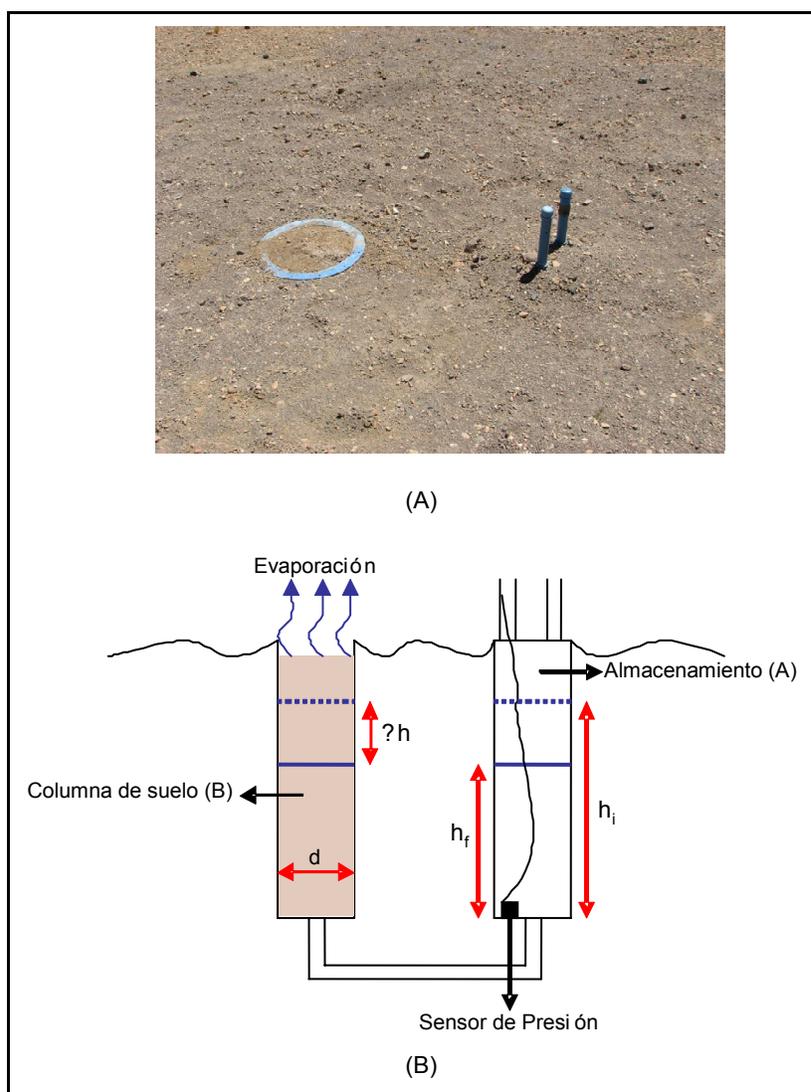


Figura 4.9: Diseño de lisímetros de carga variable. A) Sistema implementado por Geoguas Consultores. B) Esquema de funcionamiento.

➤ Lisímetro de carga constante

Basados en el principio de *Mariotte*, los lisímetros de carga constante (Figura 4.10) son diseñados con el fin de controlar y mantener constante la profundidad del agua, pudiendo determinarse la evaporación asociada a una profundidad del agua subterránea.

Para abastecer de agua a la columna de suelo y de esta forma mantener constante el nivel freático simulado, el tanque de alimentación debe ser equipado con un tubo de *Mariotte*, fijando su extremo inferior a la profundidad de equilibrio deseada.

Al no producirse una variación de nivel de agua al interior de la columna de suelo, no es necesario conocer su porosidad. La altura de agua evaporada quedará entonces definida por la relación:

$$EV = \left(\frac{\frac{\Delta h}{\Delta t} \cdot \pi \cdot d_1^2}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}} \right) \quad (4.12)$$

Por lo general, las mediciones de evaporación con lisímetros deben ser almacenadas temporalmente (dataloger), para luego ser recopiladas mediante visitas periódicas a la zona de estudio.

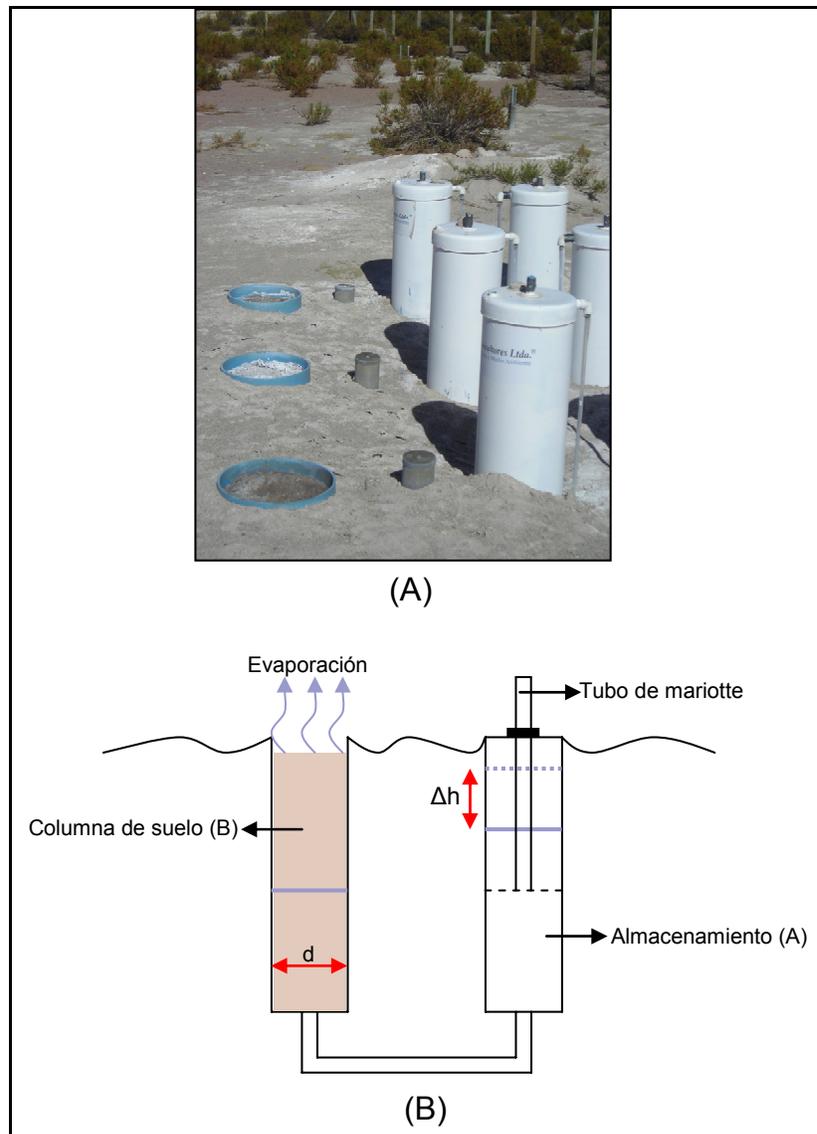


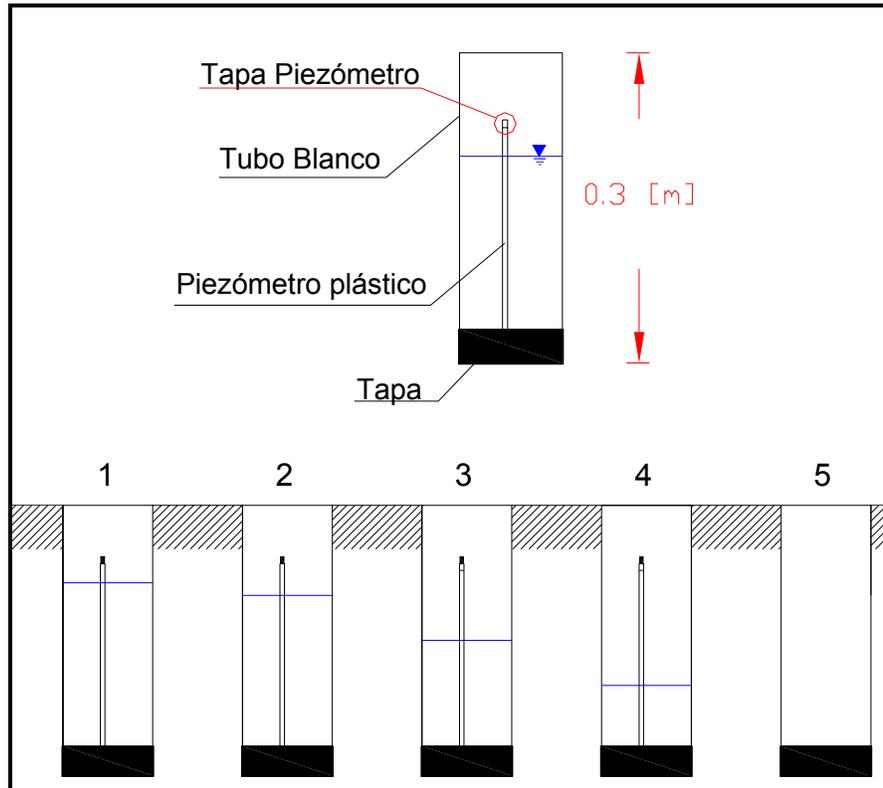
Figura 4.10: Diseño de lisímetros de carga constante. A) Sistema implementado por Collahuasi-GP Consultores en Salar del Huasco. B) Esquema de funcionamiento.

➤ Microlisímetros

Los microlisímetros corresponden a pequeños recipientes rellenos con suelo y agua. Las pérdidas por evaporación son determinadas mediante las diferencia de masa entre dos mediciones consecutivas (Boast, 1982).

La Figura 4.11 presenta un esquema de los microlisímetros implementados por la empresa Geoaguas Consultores en Tuyajto, II Región.

El proceso de medición consiste en desenterrar diariamente los microlisímetros, determinar su peso y altura de agua, para luego reubicarlos en su posición original. Las mediciones con este sistema deben realizarse directamente en terreno, no siendo posible la obtención de datos en forma automática o remota.



Fuente: [Geoaguas Consultores, 2007]

Figura 4.11: Esquema de medición con microlisímetros

Cabe señalar que durante el presente estudio no se realizaron experiencias prácticas con lisímetros o microlisímetros, todos los datos obtenidos mediante esta metodología fueron recogidos de estudios disponibles.

4.4 Curva de Evaporación en Función de la Profundidad del Acuífero

Philip (1957) propuso que la tasa de evaporación disminuye en forma exponencial con la profundidad de la napa, de acuerdo a la siguiente relación:

$$EV = EV_{\max} \cdot e^{(\alpha \cdot z)} \quad (4.13)$$

Donde:

EV corresponde a la tasa de evaporación (mm/día).

EV_{\max} es el valor máximo de la tasa de evaporación (mm/día), medida en superficie (E_0).

α es un parámetro de ajuste de la curva (adimensional, menor que 0).

Z corresponde a la profundidad de la napa (m).

Basado en la caracterización del proceso de evaporación en tres etapas descrito en el apartado 4.2 y presentando una generalización de la relación anterior, Grilli (1986) y posteriormente Shah (2007) plantean las expresiones:

$$EV = EV_{\max} \cdot e^{[\alpha \cdot (z - z_0)]} \quad \text{Para } EV \leq EV_{\max} \quad (4.14)$$

$$EV = EV_{\max} \quad \text{Para } EV \geq EV_{\max} \quad (4.15)$$

Donde Z_0 corresponde a la profundidad máxima a la cual la evaporación desde el acuífero continúa siendo gobernada por las condiciones meteorológicas externas y por lo tanto resulta igual al potencial evaporativo.

Otra relación propuesta para estimar la evaporación en función de la profundidad de la napa fue enunciada por Morel-Seytoux (1989):

$$EV = E_0 \cdot z^{-m} \quad (4.16)$$

Donde E_0 y m son parámetros dependientes de las propiedades hidráulicas del suelo y pueden ser ajustados con mediciones obtenidas en terreno.

Finalmente, Mardones (1998) propone una relación lineal para la curva de evaporación en el salar de Atacama:

$$Z = -0,2262 \cdot EV + 0,7226 \quad (4.17)$$

Como puede observarse, existen diversas aproximaciones que permiten explicar el comportamiento de la evaporación en función de la profundidad a la que se encuentra la napa freática y dependerá de cada caso particular la aproximación que mejor represente los valores obtenidos en terreno.

En la Figura 4.12 se presenta una gráfica de los distintos ajustes descritos. Dependiendo de la relación que se adopte, los balances de evaporación y descarga a escala de cuenca pueden diferir significativamente.

Si consideramos el ejemplo de la figura, tenemos que para una profundidad de 0,5 m, el ajuste de Philip entregará una tasa de evaporación de 0,7 mm/día, la curva de Morel-Seytoux predecirá una evaporación de 1,4 mm/día, mientras que el ajuste de Grilli entregará un flujo de 2,1 mm/día. Finalmente, optando por el ajuste lineal, se tendrá una descarga cercana a los 3 mm/día.

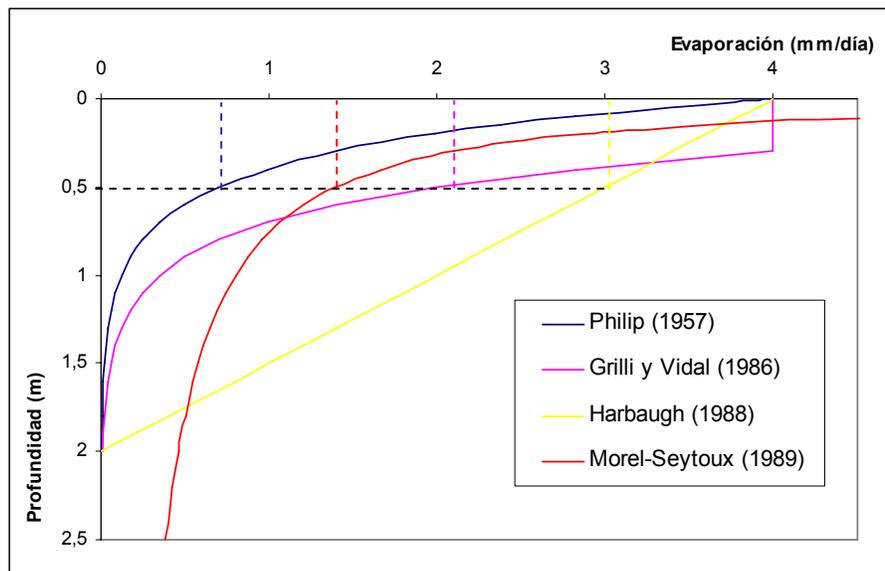


Figura 4.12: Curvas de evaporación en función de la profundidad de saturación.

Un parámetro importante en la caracterización de los procesos de evaporación desde el acuífero es la denominada profundidad de extinción, este parámetro corresponde a la profundidad mínima de la napa a partir de la cual ya no se produce evaporación. En efecto, un gran número de modelos de balance hídrico y de modelación hidrogeológica requieren como dato de entrada la profundidad de extinción, siendo muy sensibles a pequeñas variaciones en dicho parámetro.

Como se observa en la figura anterior, la profundidad de extinción se encuentra estrechamente relacionada con el tipo de ajuste adoptado. De esta forma, si se desea modelar las descargas por evaporación desde las aguas subterráneas, la curva de ajuste y la profundidad de extinción deben ser determinadas en forma conjunta.

4.5 Clasificación de Suelos

La magnitud de la evaporación desde las aguas subterráneas medida en terreno dependerá de diversos factores, entre los que destacan la radiación neta incidente, la cobertura vegetal, la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático y el tipo de suelo sobre el que se realicen las mediciones (Liu et al., 2004). En forma adicional, la profundidad de extinción para la evaporación, según los estudios realizados por Shah (2007), se encuentra dominada por el tipo y distribución de las partículas presentes en la franja no saturada del suelo. En consecuencia, el conocimiento de las propiedades físicas del suelo permitirá caracterizar de mejor manera su comportamiento hidráulico y por consiguiente los flujos evaporativos a través de él.

Físicamente el suelo puede ser caracterizado de acuerdo a un gran número de propiedades, las que pueden dividirse en principales y secundarias. Dentro del primer grupo se encuentran la estructura, densidad, porosidad y textura, mientras que como propiedades secundarias pueden mencionarse la capacidad de retención de humedad, plasticidad y temperatura entre otras.

4.5.1 Análisis granulométrico

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) propone clasificar los suelos de acuerdo a su composición granulométrica y textural. Para esto es necesario caracterizar las partículas que lo componen según sus tamaños representativos o granulometría.

El análisis granulométrico se realiza pasando una muestra de suelo por una batería de tamices con diferente tamaño de apertura, los que deben ser dispuestos verticalmente en orden decreciente. De esta forma, cada tamiz retendrá las partículas de diámetro superior al tamaño de apertura de su malla, dejando pasar el resto de la muestra (MOP, 2003). Para las partículas más finas, la clasificación debe continuar mediante un proceso de sedimentación, el cual permite diferenciar el tamaño del material de acuerdo a su velocidad de sedimentación en un medio acuoso (ASTM, 1995).

La Figura 4.13 presenta el resultado gráfico de un análisis granulométrico tipo. Como puede observarse, este método permite obtener una curva continua representativa del tamaño de las partículas constituyentes del suelo.

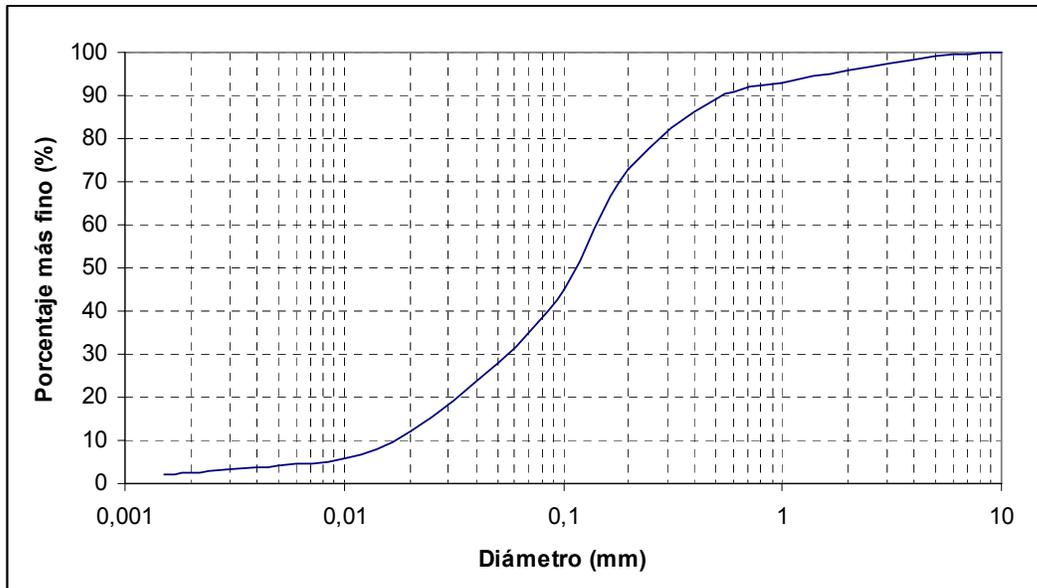


Figura 4.13: Curva granulométrica.

Para el caso de suelos con un alto contenido de sales, es posible realizar un proceso de lavado que permita cuantificar y eliminar el porcentaje de la muestra correspondiente a partículas salinas (MOP, 2003). Las sales no forman parte de la clasificación de suelos propuesto por el USDA, por lo que este procedimiento debe ser llevado a cabo en forma previa a los análisis granulométricos por tamizado y sedimentación.

La clasificación textural se estructura en base a la diferenciación de cuatro tipos de suelo principales, los que se denominan, en orden de tamaño decreciente, como gravas, arenas, limos y arcillas. Adicionalmente, las arenas y gravas pueden ser subclasificadas como gruesas, medias y finas.

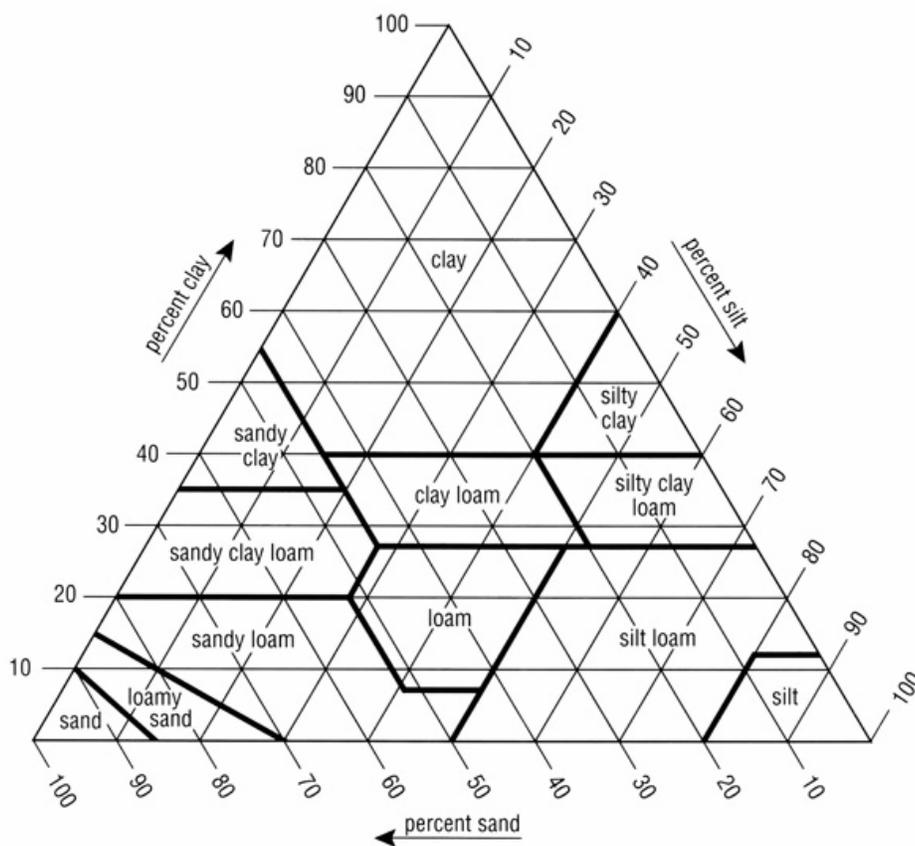
La Tabla 4.4 presenta un cuadro resumen con el diámetro de partícula asociado a cada categoría (Soil Survey Staff, 2006).

De acuerdo al porcentaje de cada tipo de partícula existente en un suelo, excluyendo todo el contenido de diámetro mayor a 2 mm (gravas), se determina su textura según el diagrama de clasificación expuesto en la Figura 4.14.

Una vez obtenida la clasificación textural, es posible diferenciar zonas de evaporación en función de propiedades físicas del suelo y por lo tanto generar curvas de evaporación para los distintos tipos existentes en el sitio que se desea evaluar.

Tabla 4.4: Clasificación de partículas USDA

Partícula	Tamaño min (mm)	Tamaño max (mm)
Grava gruesa	20	***
Grava media	10	20
Grava fina	2	10
Arena gruesa	0,5	2
Arena media	0,25	0,5
Arena fina	0,1	0,25
Arena muy fina	0,05	0,1
Limo	0,002	0,05
Arcilla	***	0,002



Fuente: [USDA, 2004]

Figura 4.14: Diagrama de texturas según tamaño de partículas, USDA.

5 CAMPAÑAS DE TERRENO

En el presente capítulo se describen las metodologías de medición y análisis implementadas en el estudio. Se detallan las labores de terreno y las experiencias de laboratorio realizadas, incluyendo además una breve descripción de las tres campañas de medición efectuadas.

5.1 Minutas de terreno

Con el fin de realizar el levantamiento de información de evaporación desde suelos, durante el estudio se llevaron a cabo tres campañas de terreno, las que fueron organizadas y ejecutadas según Región Administrativa y más específicamente según Sistema Piloto seleccionado.

5.1.1 Primera Campaña: II Región de Antofagasta

La primera campaña, desarrollada durante el mes de diciembre de 2007, fue realizada en la Segunda Región del país, abarcando las cuencas de la Laguna Tuyajto, Salar de El Laco y Salar de Aguas Calientes 2. El campamento base se estableció en el control fronterizo Avanzada el Laco, al interior de las dependencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

El trabajo en terreno contó con un primer día de reconocimiento y definición de los sectores donde se realizarían las mediciones, más nueve días para el monitoreo y toma de muestras. Se efectuaron estimaciones de evaporación desde el acuífero en dieciséis sitios, los que fueron organizados en cuatro zonas de medición, con igual número de puntos en cada zona.

Como se observa en la Figura 5.1, dos de las zonas (8 puntos) se ubican en la cuenca de la Laguna Tuyajto, una en el salar de El Laco (4 puntos) y una en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 (4 puntos). En todos los casos estudiados, los puntos de muestreo fueron ubicados al interior o en las cercanías de salares y lagunas principales.

Adicionalmente, se determinó la tasa de evaporación de tanque en 3 puntos ubicados en las zonas 6, 7 y 8 (Figura 5.1) y se realizaron análisis granulométricos a las muestras de suelo recopiladas desde los 16 puntos de medición.

Cabe señalar que en la cuenca de Tuyajto se encuentran tres lisímetros de carga variable implementados por la empresa Geoaguas Consultores. Con el objetivo de comparar las mediciones efectuadas por ambos métodos, las dos zonas de medición en esta cuenca fueron cercanas a los lisímetros preexistentes.

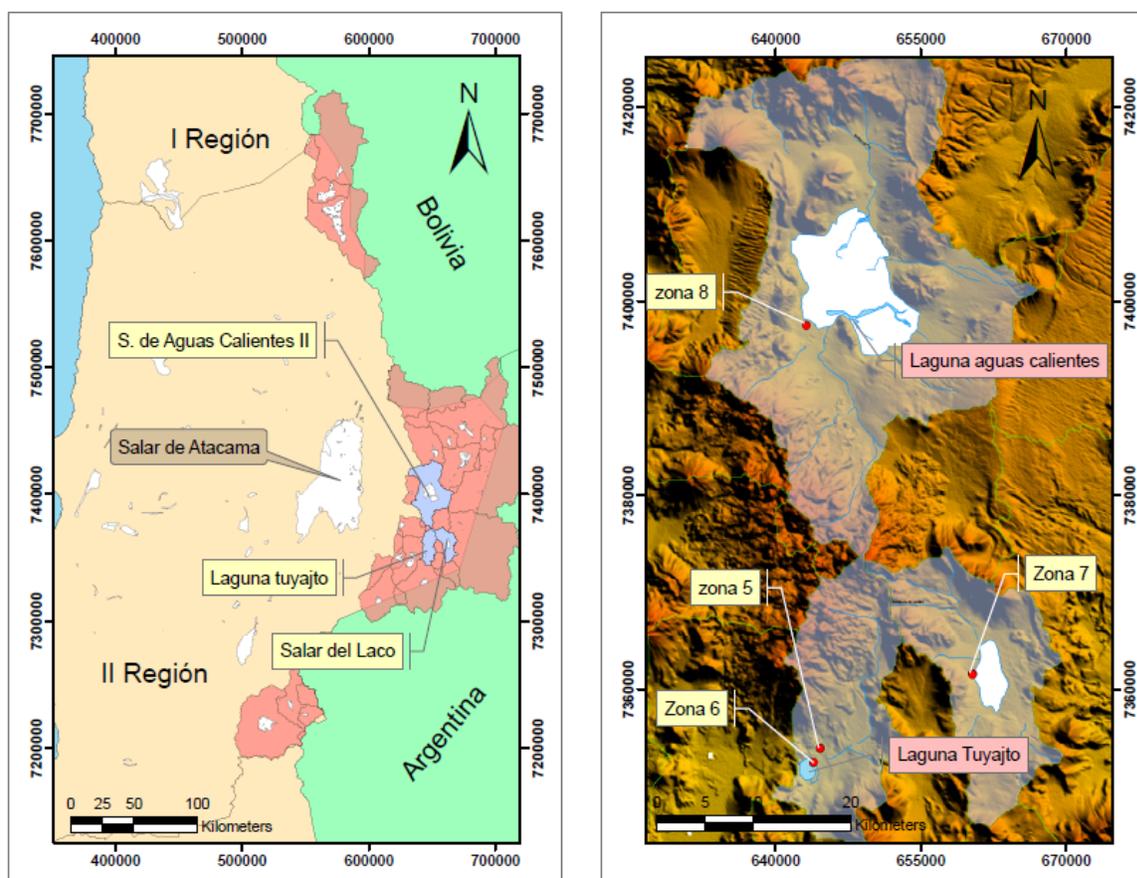


Figura 5.1: Ubicación zonas de medición de evaporación II Región.

5.1.2 Segunda Campaña: III Región de Atacama

La segunda campaña se llevó a cabo durante el mes de marzo de 2008 y fue realizada en la Tercera Región de Atacama. En este caso se realizaron estimaciones de evaporación desde el suelo en 17 puntos pertenecientes a las cuencas de los salares de Pedernales y Maricunga (Figura 5.2). En ambas cuencas se seleccionaron dos zonas de medición, una ubicada sobre superficie de salar y otra en las cercanías de ríos o lagunas.

Para el caso de la hoya de Pedernales, se llevaron a cabo estimaciones en 4 puntos ubicados sobre el sector oeste del salar y cuatro en la ribera oriental del Río La Ola, algunos kilómetros aguas arriba del tranque de almacenamiento construido por CODELCO.

En la cuenca de Maricunga se realizaron mediciones en 5 puntos situados en el margen noreste del salar y cuatro en el sector sur, a orillas de la laguna Santa Rosa, perteneciente al Parque Nacional Nevado Tres Cruces.

Durante las labores de terreno, el alojamiento se efectuó en el control fronterizo Paso San Francisco (Maricunga), el campamento La Ola (Pedernales) y el refugio del SAG en la Laguna Santa Rosa (Maricunga).

Durante la campaña se destinaron dos días al reconocimiento y definición de puntos de control y diez días para la realización de mediciones.

Se determinó adicionalmente la evaporación de tanque en las zonas 9, 10 y 11 y se recolectaron muestras de suelo en los 17 puntos establecidos.

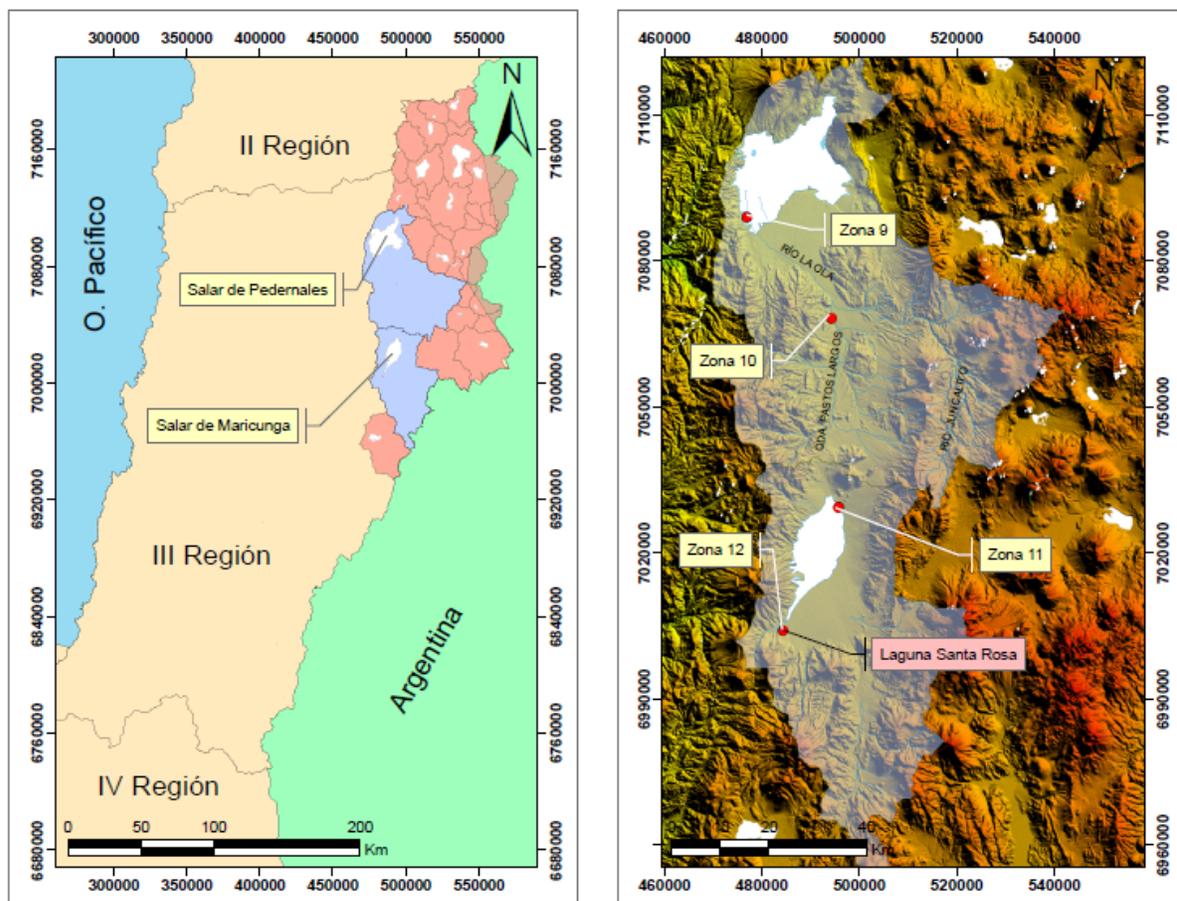


Figura 5.2. Ubicación zonas de medición de evaporación III Región.

5.1.3 Tercera Campaña: I Región de Tarapacá

Finalmente, la tercera campaña se realizó en la cuenca del Salar del Huasco ubicada en la Primera Región del país. En esta campaña se midieron tasas de evaporación durante el mes de abril de 2008, en un total de 16 puntos. Durante las labores de terreno se pernoctó en el sector sur-oeste del salar, en dependencias de los lugareños. El primer día de medición fue empleado en el reconocimiento del lugar y definición de puntos de muestreo

Como puede observarse en la Figura 5.3, se realizaron mediciones de evaporación desde las aguas subterráneas mediante la metodología del domo en tres zonas ubicadas en el interior o en los márgenes del salar. Con el fin de obtener una mayor representatividad de los distintos suelos existentes la cuenca, la cuarta zona de medición se estableció sobre suelos en la ribera oriental del río Collacagua, aguas abajo de la desembocadura del río Piga. En este tramo el cauce es alimentado por aguas provenientes desde el acuífero.

En cada una de las zonas definidas se realizaron mediciones de evaporación desde la napa freática en cuatro puntos, por lo que finalmente se dispone de estimaciones de evaporación en función de la profundidad en un total de 16 puntos.

Las tasas diarias de evaporación de bandeja fueron determinadas mediante la instalación de tanques evaporímetros plásticos de 60 litros de capacidad, que fueron ubicados en las zonas 2, 3 y 4.

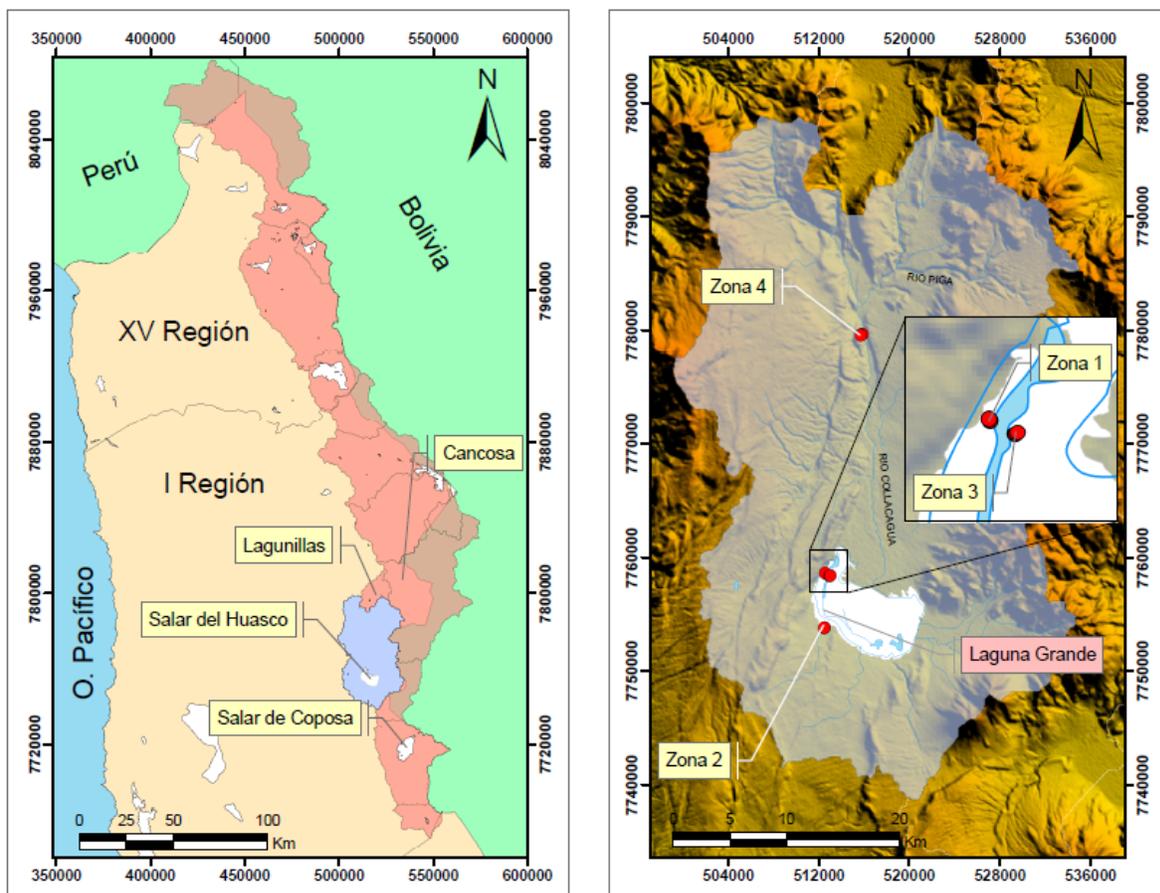


Figura 5.3: Ubicación zonas de medición de evaporación I Región.

La Tabla 5.1 presenta un cuadro resumen con el nombre de identificación, ubicación y altitud de los puntos en que se cuantificó la evaporación desde suelos.

Tabla 5.1: Ubicación puntos de medición de evaporación desde suelos.

ID Zona	ID Punto	Cuenca	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
			Este (m)	Norte (m)	
1	H1D1	S. del Huasco	512.600	7.758.668	3.825
1	H2D2	S. del Huasco	512.604	7.758.675	3.836
1	H3D1	S. del Huasco	512.603	7.758.671	3.823
1	H4D2	S. del Huasco	512.586	7.758.696	3.840
2	H5D1	S. del Huasco	512.531	7.753.768	3.830
2	H6D2	S. del Huasco	512.544	7.753.790	3.815
2	H7D1	S. del Huasco	512.518	7.753.793	3.840
2	H8D2	S. del Huasco	512.517	7.753.806	3.862
3	H9D1	S. del Huasco	512.988	7.758.451	3.820
3	H10D2	S. del Huasco	512.982	7.758.451	3.825
3	H11D1	S. del Huasco	513.002	7.758.460	3.821
3	H12D2	S. del Huasco	513.021	7.758.479	3.824
4	H13D1	S. del Huasco	515.852	7.779.655	3.917
4	H14D2	S. del Huasco	515.863	7.779.650	3.910
4	H15D1	S. del Huasco	515.710	7.779.583	3.914
4	H16D2	S. del Huasco	515.702	7.779.563	3.902
5	T1D1	L. Tuyajto	644.669	7.353.876	4.082
5	T2D2	L. Tuyajto	644.663	7.353.853	4.079
5	T3D1	L. Tuyajto	644.683	7.353.914	4.084
5	T4D2	L. Tuyajto	644.673	7.353.895	4.083
6	T6D1	L. Tuyajto	643.987	7.352.420	4.083
6	T7D2	L. Tuyajto	643.972	7.352.402	4.080
6	T8D1	L. Tuyajto	644.028	7.352.452	4.075
6	T9D2	L. Tuyajto	644.015	7.352.439	4.078
7	L1D1	S. del Laco	660.387	7.361.648	4.283
7	L2D2	S. del Laco	660.336	7.361.626	4.277
7	L3D1	S. del Laco	660.360	7.361.562	4.271
7	L4D2	S. del Laco	660.360	7.361.562	4.267
8	A1D1	S. de A. Calientes II	643.240	7.397.512	4.238
8	A2D2	S. de A. Calientes II	643.233	7.397.501	4.241
8	A3D1	S. de A. Calientes II	643.214	7.397.461	4.248
8	A4D2	S. de A. Calientes II	643.219	7.397.474	4.246
9	P1D1	S. de Pedernales	476.878	7.089.100	3.389

ID Zona	ID Punto	Cuenca	Coordenadas UTM		Altura (msnm)
			Este (m)	Norte (m)	
9	P2D2	S. de Pedernales	476.855	7.089.141	3.391
9	P3D1	S. de Pedernales	476.768	7.089.107	3.396
9	P4D2	S. de Pedernales	476.824	7.089.072	3.398
10	P5D1	S. de Pedernales	494.209	7.068.315	3.634
10	P6D2	S. de Pedernales	494.219	7.068.318	3.643
10	P7D1	S. de Pedernales	494.232	7.068.323	3.645
10	P8D2	S. de Pedernales	494.245	7.068.341	3.645
11	M1D1	S. de Maricunga	495.562	7.029.335	3.801
11	M2D2	S. de Maricunga	495.548	7.029.327	3.797
11	M3D1	S. de Maricunga	495.656	7.029.377	3.795
11	M4D2	S. de Maricunga	495.695	7.029.389	3.796
11	M5D1	S. de Maricunga	484.232	7.004.141	3.804
12	M6D2	S. de Maricunga	484.193	7.004.150	3.807
12	M7D1	S. de Maricunga	484.270	7.004.146	3.808
12	M8D2	S. de Maricunga	484.315	7.004.128	3.799
12	M9D1	S. de Maricunga	465.612	7.029.354	3.795

5.2 Labores de terreno

5.2.1 Determinación de tasas de evaporación desde el suelo

Las mediciones diarias de evaporación desde aguas subterráneas con la metodología del domo se realizaron en más de 45 puntos distribuidos en seis cuencas endorreicas del altiplano.

Estas mediciones fueron agrupadas en zonas de acuerdo al tipo de suelo y cuenca de medición, estimando curvas de evaporación en función de la profundidad del acuífero en cada una de las regiones estudiadas. Las mediciones de densidad de vapor al interior del domo se realizaron utilizando un sensor de humedad relativa y temperatura (Vaisala HMP75), previamente calibrado en laboratorio siguiendo una metodología similar a la propuesta en el capítulo 4.3.2.1.

Para validar la metodología utilizada, los resultados obtenidos (estimaciones puntuales y curvas de evaporación) fueron comparados con mediciones realizadas en lisímetros y microlisímetros preexistentes en algunas de las cuencas estudiadas (Geoaguas Consultores, 2007; Collahuasi-GP Consultores, 2008).

5.2.2 Determinación de tasas de evaporación superficial

Durante las campañas de terreno se monitorearon las tasas de evaporación superficial en 9 de las 12 zonas definidas. Para esto se utilizaron tanques evaporímetros estándar Clase A instalados en algunas de las cuencas y se construyeron evaporímetros plásticos en terreno.

Adicionalmente, se analizó la información histórica de evaporación, considerando todas las estaciones que la Dirección General de Aguas (DGA) posee en la zona de estudio.

5.2.3 Determinación de la profundidad de la napa

En forma paralela a las mediciones de evaporación con el domo, se determinó la profundidad de la napa freática en cada punto muestreado mediante la instalación de punteras. Una vez determinado el nivel de saturación, se tomaron muestras de las aguas subterráneas, las que fueron caracterizadas según su densidad y temperatura. Las punteras fueron realizadas con barrenos, alcanzando profundidades máximas de 3,5 m.

5.2.4 Análisis granulométrico

Finalmente, se tomaron muestras de suelo en todos los puntos de evaporación estudiados. Las muestras de suelo fueron sometidas a ensayos de granulometría por tamizado y sedimentación, a partir de los cuales se determinaron sus curvas granulométricas y se clasificaron de acuerdo a su clase textural (Staff S.S., 2006). Los análisis fueron encargados a la División de Ingeniería Estructural y Geotécnica de DICTUC S.A.

5.3 Metodología de medición y muestreo

La Figura 5.4 presenta el diagrama utilizado en este estudio para aplicar la metodología que permite estimar la evaporación desde las aguas subterráneas en las seis cuencas altiplánicas seleccionadas.

Las experiencias pueden dividirse en tres grandes áreas, la primera relacionada con estudios previos de la zona y definición tentativa de puntos a muestrear, la segunda correspondiente a la determinación de tasas diarias de evaporación en terreno y la tercera orientada a la clasificación textural de los suelos muestreados a partir de información granulométrica básica.

A continuación se describen las principales labores asociadas a cada una de las áreas definidas.

5.3.1 Identificación de zonas y puntos de medición

Con el fin de facilitar y optimizar los trabajos realizados durante las campañas de terreno, se efectuaron estudios previos orientados a la determinación de las zonas y puntos tentativos de medición.

El procedimiento empleado para definir las zonas de medición y los puntos de muestreo puede dividirse en cuatro etapas principales. En primer lugar se escogieron y delimitaron las cuencas que serían estudiadas. Posteriormente se procedió a definir zonas de evaporación al interior de cada una de ellas. En tercer lugar se identificaron los puntos donde existiesen estimaciones previas de evaporación desde los suelos. Finalmente, se procedió a definir los puntos tentativos donde podrían ser llevadas a cabo las mediciones.

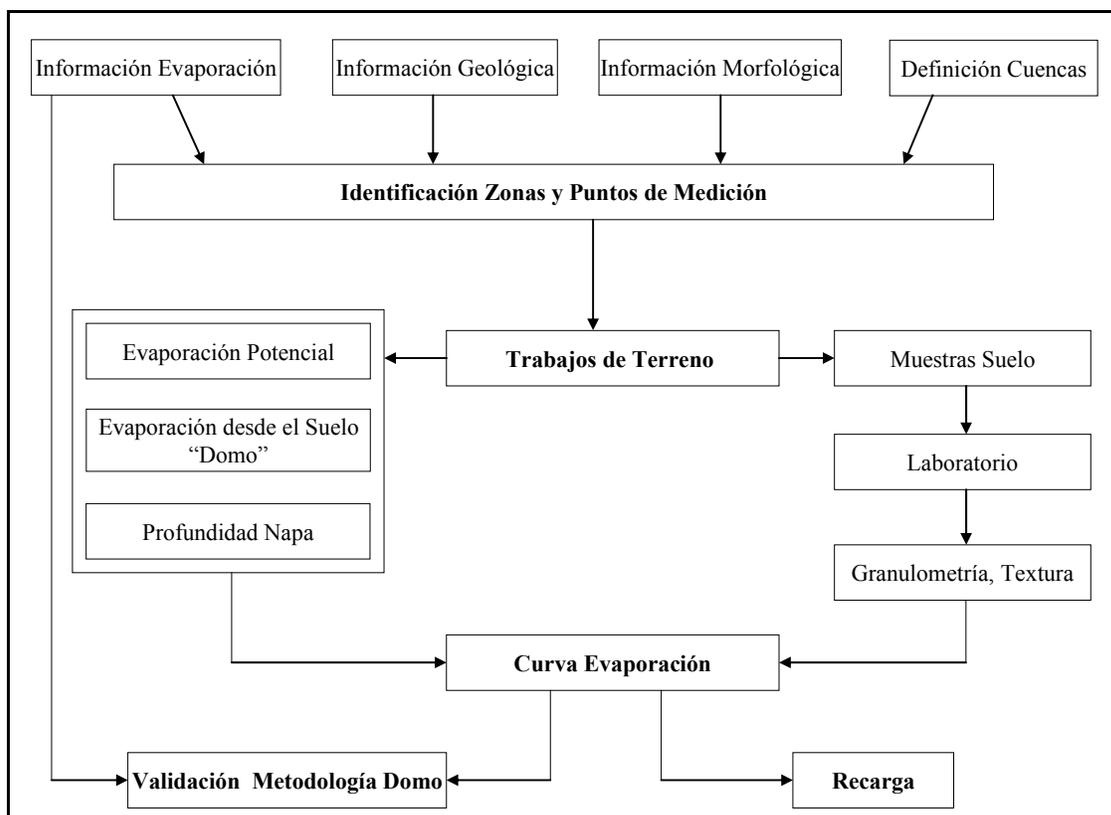


Figura 5.4: Diagrama de flujo metodológico general.

Las cuencas en que se realizaron las campañas son las cuencas o sistemas piloto de este estudio, seleccionadas de acuerdo a criterios de carácter ambiental, demanda comprometida y proyectada, además de disponibilidad de información para su estudio.

Por su parte, la delimitación de las cuencas y la determinación de sus principales características físicas se llevaron a cabo mediante el análisis de Modelos de Elevación Digital

(DEM), coberturas geográficas digitales de la Dirección General de aguas (DGA), imágenes satelitales y otros estudios de referencia. Una descripción detallada de este proceso se presenta en el informe “Hidrografía Regional del Altiplano”.

Una vez escogidas las cuencas se procedió a diferenciar zonas de evaporación y definir áreas de medición. Fue necesario analizar tipos de suelo e información de niveles de agua subterránea disponible en cada una de las cuencas estudiadas. Usando mapas geológicos, mapas hidrogeológicos e imágenes satelitales Landsat, se establecieron zonas con suelos de características similares.

Luego se identificaron sectores con afloramientos o próximos a éstos y que, de acuerdo con la información de niveles, presentaran napas freáticas someras (salares, lagunas y cauces permanentes). Mediante este procedimiento se seleccionó zonas de evaporación candidatas a ser evaluadas en terreno.

Como se ha mencionado más arriba en este reporte, para validar las mediciones hechas con el domo, se realizaron pruebas en lugares en que se contaba con información de lisímetros en las cuencas de estudio.

Se revisó la información topográfica y de niveles disponible para determinar los puntos tentativos de medición, que se confirmaron o modificaron de acuerdo a la inspección visual en terreno. Además de los antecedentes disponibles, GPS y perforaciones con barrenos se usaron para verificar y complementar.

Algunos criterios básicos para la elección de los sitios de monitoreo fueron los siguientes:

- Superficie del suelo debe estar poco o nulamente alterada, de manera que la medición sea representativa de la zona de estudio.
- Superficie del suelo dentro del domo debe ser horizontal, para tener variaciones pequeñas en la profundidad del acuífero en un punto de medición, lo que hace más exactos los resultados obtenidos.
- Debe existir acceso vehicular hasta los sitios de medición, dado que se requiere energía eléctrica y el traslado de equipos pesados.

En síntesis la metodología empleada consistió en definir cinco puntos de medición por zona, ubicados en una recta perpendicular al afloramiento más cercano. De estos cinco puntos, cuatro corresponden a estimaciones de tasas de evaporación desde aguas subterráneas, mientras el último (situado en el afloramiento) fue para determinar el flujo de evaporación potencial en superficie. Esta metodología permite establecer de forma sencilla algunos puntos con distintas profundidades del nivel freático.

La Figura 5.5 presenta un esquema explicativo del procedimiento adoptado en la mayoría de las zonas estudiadas. Como es de esperar, sujeto a las características topográficas del terreno, la profundidad de la napa aumentará a medida que la distancia al afloramiento también lo haga.

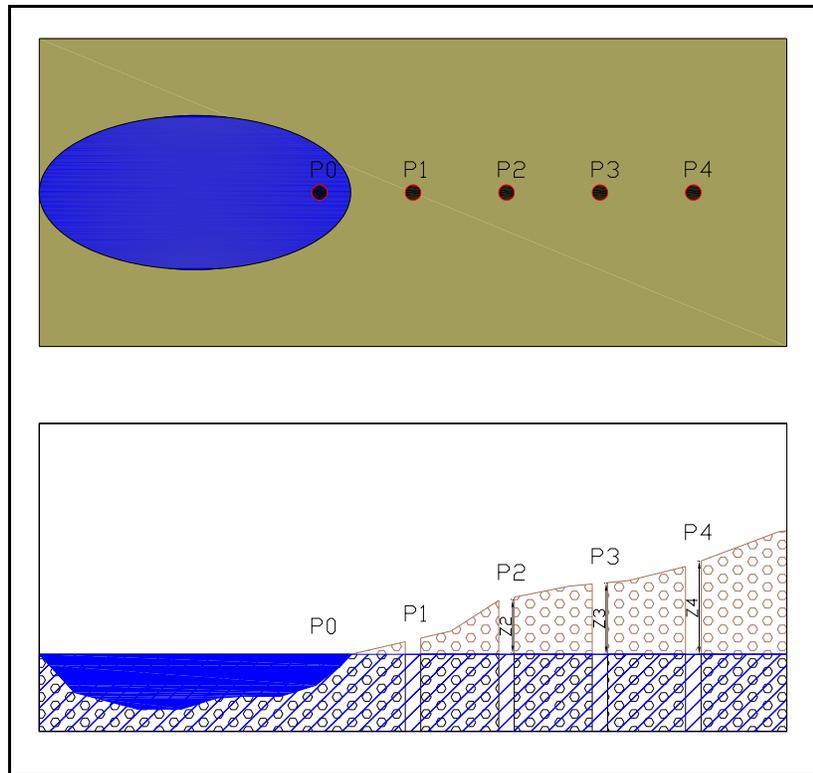


Figura 5.5: Esquema implementado en zonas de medición.

5.3.2 Medición de evaporación en terreno

Durante las campañas de terreno se estimaron flujos de evaporación desde superficies de agua libre, usando tanques disponibles o construidos, y desde aguas subterráneas, con la metodología del domo.

5.3.2.1 Materiales

Los materiales pueden separarse en aquellos que componen el domo o están relacionados con su implementación y los utilizados en otras actividades, como las mediciones de evaporación superficial, muestreo de aguas o determinación de la profundidad de la napa. A continuación se describen de acuerdo al objetivo para el que fueron utilizados.

Domo

Para las mediciones de evaporación en terreno, se utilizaron (Figura 5.6):

- 2 cámaras de acrílico de 4 mm de espesor, denominados domo1 y domo2. Las cámaras tienen forma semiesférica con radios de 0,6 m y 0,625 m y volúmenes de 0,302 m³ y 0,343 m³ respectivamente.
- 2 sensores para medición de humedad relativa y temperatura modelo *Vaisala HMP75*. Estos sensores pueden registrar ambas variables con un intervalo mínimo de un segundo, y almacenar bajo esta configuración hasta 15 minutos de información. En terreno cada sensor se utilizó con un domo específico.
- 4 ventiladores (2 por cámara) *Commonwealth* de 12 V, con capacidad máxima de ventilación 4,5 m/s. Más cables para conectar a baterías.
- 2 baterías de 12 V y 7,2 A.
- 2 reguladores de voltaje *RS Components*, con rango de regulación continuo entre 0 y 12 Volts.
- 2 faldones impermeables resistentes al viento.
- 2 tubos de PVC de 1" de diámetro y 30 cm de altura, para ubicar los sensores dentro de los domos.
- Anemómetro *CFM*.
- Nylon de 4x4 m.
- Cronómetro



Figura 5.6. Equipamiento domos.

Otros materiales

- Bidón plástico 60 litros.
- Set de barrenos *Eijkelkamp*.
- Pozómetro.
- Probeta de 1 litro graduada.
- 2 hidrómetros estándar (para densidad) con rango de medición entre 1000 y 1200 g/l.
- Conductivímetro *Hatch* modelo *Sension 5*.
- Tubos de PVC.
- Manguera, Pala y Chuzo.

5.3.2.2 Tasa de evaporación superficial

El procedimiento para estimar tasas de evaporación superficial consistió en establecer un punto de medición ubicado en el interior o en la vecindad de algún afloramiento, próximo a las zonas de monitoreo de aguas subterráneas. Ambas actividades se realizaron de manera simultánea, con iguales condiciones meteorológicas y características químicas similares de las aguas.

Los procedimientos utilizados para este propósito se resumen en:

- Recopilación y estudio de información histórica disponible. La información corresponde a mediciones de evaporación de tanque realizadas durante las últimas décadas por la Dirección General de Aguas.
- Cuantificación de la evaporación potencial utilizando tanques evaporímetros Clase A, donde estuvieran disponibles.
- Construcción *in situ* de tanques evaporímetros plásticos, instalados al interior de afloramientos o lagunas.

Dependiendo de la información existente y de las instalaciones disponibles en los sectores estudiados, la tasa de evaporación superficial fue determinada en base a uno de estos procedimientos y/o al complemento de ellos. De esta forma, en caso de disponer de mediciones directas en terreno, éstas fueron contrastadas con la estadística analizada.

Información histórica

Se analizó la estadística sobre evaporación disponible en las cuencas altiplánicas y en zonas cercanas. La información ha sido en su mayoría colectada de estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas, además de empresas que cuentan con registros en la zona.

Los valores de evaporación estimados fueron utilizados para validar las mediciones realizadas durante las labores de terreno o para contar con información en zonas en que no fue posible cuantificarla directamente.

En la Figura 5.7 se presenta la ubicación de todas las estaciones meteorológicas que cuentan con mediciones de evaporación en la zona norte del país. Todas las estaciones pertenecientes a la DGA han sido implementadas con tanques evaporímetros estándar Clase A, mientras que los evaporímetros utilizados por las empresas privadas poseen las dimensiones estándares, pero su instalación en algunos casos difiere de lo establecido para este tipo de tanques.

Como puede observarse en la Figura 5.7, la cuenca del Salar del Huasco cuenta con tres tanques evaporímetros; uno de ellos ha sido operado por la DGA (estación Collacagua) y los otros dos fueron implementados por Collahuasi - GP Consultores. Estos últimos cuentan con un registro de cuatro años, comenzando sus mediciones en enero de 2004. En la Segunda Región se cuenta con información de más de 20 años, correspondiente a la estación meteorológica Socaire (DGA), ubicada al oeste de la zona de estudio. En forma adicional se dispuso del registro de siete tanques evaporímetros instalados por Geoaguas Consultores en agosto de 2006, con información estadística de un año (2006 - 2007). Finalmente, en el Altiplano Andino de la Tercera Región no se contó con evaporímetros.

Usando la información estadística se construyeron curvas de evaporación en función de la altitud para las tres primeras Regiones del país, considerando todas las estaciones disponibles con un registro mínimo de 10 años. A partir de este tratamiento se determinó la evaporación de tanque histórica en las 16 zonas donde se cuantificó la evaporación desde el suelo. En el ANEXO III se presenta un resumen con la ubicación, altitud, evaporación de bandeja media diaria y años de registro de las estaciones consideradas.

Usando las curvas de evaporación de tanque se estimaron gradientes en función de la altura tanto a nivel Regional como para la zona altiplánica. Para el caso del gradiente en el altiplano se consideró el ajuste lineal de las estaciones ubicadas por sobre los 3.000 metros de altitud.

Las estaciones de medición ubicadas próximas a la zona de estudio fueron utilizadas además para validar las mediciones efectuadas en terreno.

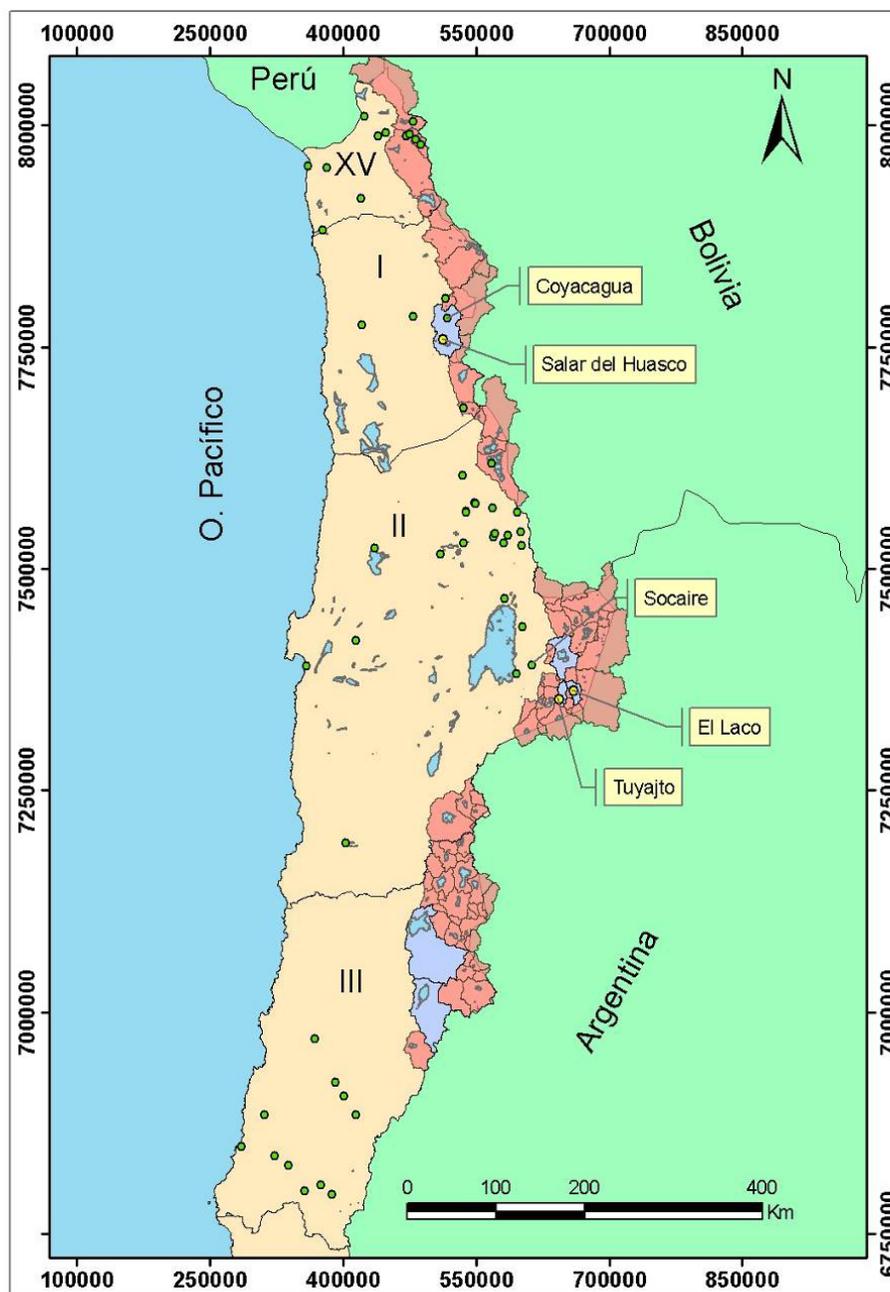


Figura 5.7. Plano de ubicación evaporímetros.

La Tabla 5.2 muestra los evaporímetros utilizados para la validación de las mediciones de terreno. Se detalla su identificación, tipo (enterrado, superficial), ubicación, factor de tanque adoptado para estimar la evaporación desde lagunas y su operador. En el presente estudio se consideraron coeficientes de bandeja típicos para las condiciones atmosféricas y geográficas existentes en el lugar, estos valores suelen ser cercanos a 0,7 y dependen de la ubicación del tanque en la cuenca.

Tabla 5.2: Evaporímetros existentes en cuencas de medición.

Id	Tipo	Reg.	Cuenca	Coordenadas utm		Altura msnm	Factor tanque	Opera
				Norte	Este			
E101	-	I	S. del Huasco	7.784.012	511.057	3.990	0,70	DGA-Collacagua
E102	Agua vertiente sup.	I	S. del Huasco	7.758.641	512.603	3.840	0,75	CMDIC-GP Consultores
E103	Agua vertiente ent.	I	S. del Huasco	7.758.631	512.600	3.840	0,75	CMDIC-GP Consultores
E201	-	II	S. de Atacama	7.390.976	613.694	3.251	0,70	DGA-Socaire
E202	Agua laguna ent.	II	L. Tuyajto	7.352.593	644.153	4.049	0,75	Geoaguas Consultores
E203	Agua laguna sup.	II	L. Tuyajto	7.352.607	644.159	4.048	0,70	Geoaguas Consultores
E204	Agua subte. ent.	II	L. Tuyajto	7.352.763	644.271	4.059	0,75	Geoaguas Consultores
E205	Agua subte. sup.	II	L. Tuyajto	7.352.805	644.266	4.059	0,70	Geoaguas Consultores
E206	Agua laguna en lag.	II	S. de El Laco	7.361.982	660.570	4.252	0,70	Geoaguas Consultores
E207	Agua laguna sup.	II	S. de El Laco	7.361.987	660.629	4.250	0,70	Geoaguas Consultores
E208	Agua laguna ent.	II	S. de El Laco	7.361.995	660.668	4.252	0,75	Geoaguas Consultores

Para obtener la evaporación potencial en los sectores de interés usando la información histórica, se interpolaron o extrapolaron los datos de las estaciones de la Tabla 5.2 de acuerdo a los gradientes Regionales estimados.

Mediciones realizadas en tanques evaporímetros estándar Clase A

La segunda metodología empleada correspondió a la utilización de tanques evaporímetros Clase A, actualmente en desuso, identificados en algunas cuencas de la zona de estudio. El procedimiento de medición empleado fue similar al presentado en la sección 4.3.1.

El agua utilizada fue de afloramientos cercanos, por lo que no se realizaron correcciones posteriores por salinidad.

Los tanques evaporímetros se rellenaron hasta una altura de referencia conocida, en ciclos de 24 horas comenzados a las 13:30 horas de cada día. La tasa de evaporación superficial diaria se determinó de acuerdo al volumen de agua adicionada para alcanzar el nivel de referencia, utilizando una probeta graduada.

Para corregir los valores medidos y obtener la evaporación desde lagunas, se adoptaron los coeficientes de tanque reportados por los organismos que instalaron y realizaron mediciones en ellos.

En el campo se utilizaron 2 tanques Clase A, uno de ellos ubicado en la cuenca de Tuyajto y el otro en la hoya del Salar del Laco, los que se han denominado E204 y E207, respectivamente

(Tabla 5.2). Si bien en el Salar del Huasco existen dispositivos de este tipo, no fue posible emplearlos ya que estos se encuentran actualmente en funcionamiento.

Mediciones realizadas en tanques evaporímetros construidos

Donde no había tanques evaporímetros se utilizaron tanques construidos en terreno. Estos tanques fueron semisumergidos en afloramientos, lagunas o cauces cercanos a los lugares de medición de evaporación desde el suelo, al igual que en el caso de los evaporímetros Clase A. El agua utilizada se obtuvo desde afloramientos cercanos, por lo que no se realizaron correcciones por salinidad. El procedimiento de medición fue análogo al implementado en los tanques evaporímetros estándar.

Los tanques fueron construidos a partir de bidones cilíndricos de 60 litros, con un diámetro de 39,5 cm, que se modificaron dependiendo de las características del afloramiento en que serían instalados. Para evitar pérdidas producto del viento, se consideró una altura de revancha mínima de 7 cm.

Debido a que los afloramientos presentan fluctuaciones en su nivel a lo largo del día y con el fin de asegurar la estabilidad de los tanques sumergidos, su altura de llenado fue unos 5 centímetros superior al nivel del afloramiento o laguna en el momento de instalación. Previo a esto, los tanques fueron graduados en su interior a intervalos regulares de 1 mm.

La Figura 5.8 enseña una imagen representativa del instrumental empleado para estimar la evaporación superficial en cuencas sin tanques evaporímetros estándar.

En las mediciones de evaporación superficial realizadas durante las campañas de terreno, se registró la densidad de las aguas utilizadas utilizando densímetros de rango variable. Luego se comparó en forma indirecta la salinidad de los afloramientos con la de las napas freáticas someras desde las que se determinó la evaporación.



Figura 5.8. Sistema de medición implementado para la estimación de la evaporación superficial en cuencas sin evaporímetros.

5.3.2.3 Tasa de evaporación desde el suelo

La metodología de estimación de evaporación desde napas freáticas someras empleada en terreno puede resumirse en los siguientes pasos (Figura 5.9):

1. Preparación e instalación de equipos (ventiladores, sensor, faldón, etc.)
2. Ventilación del interior del domo en forma previa a cada medición. Durante este proceso deben activarse y regularse los ventiladores.
3. Medición instantánea de 2,5 minutos. Utilización de 2 domos en forma simultánea.
4. Repetición de medición cada 30 minutos.
5. Determinación de evaporación diaria.
6. Determinación profundidad de la napa.
7. Curva de evaporación E (mm/día) v/s Z (m).

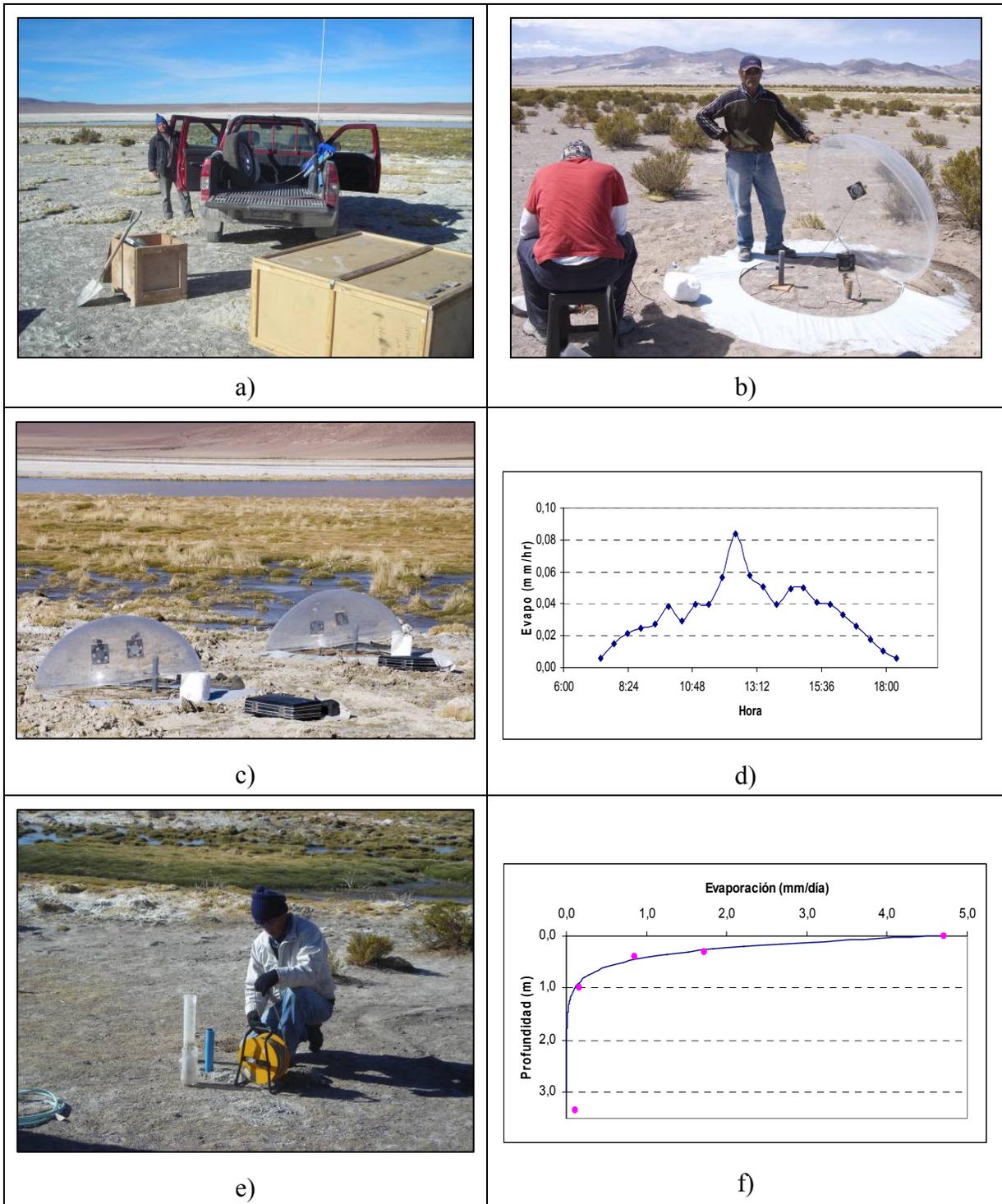


Figura 5.9: Pasos en la estimación de evaporación. a) Preparación de instrumentos. b) Ambientación del domo. c) Proceso de medición puntual. d) Curva de evaporación diaria. e) Profundidad de la napa. F) Curva de evaporación diaria en función de la profundidad.

Procedimiento de medición

Siguiendo la metodología expuesta en el apartado 4.3.2.1, se realizaron mediciones de evaporación en 49 puntos, abarcando 12 zonas de muestreo en seis cuencas endorreicas del Altiplano chileno.

En terreno se utilizaron 2 domos en forma simultánea, completando 2 puntos en cada día de trabajo. Las jornadas se planificaron para cubrir todo el intervalo horario en que hay evaporación desde la napa. En algunos casos se hizo hasta que las tasas registradas fueran lo suficientemente bajas para realizar aproximaciones razonables. Usualmente en regiones áridas, la evaporación es cercana a cero poco después de la puesta de sol y se mantiene muy baja hasta su salida, por lo que al asumir una evaporación nula durante ese período se incurre en errores mínimos en los resultados diarios totales (Stannard, 1988).

La Tabla 5.3 presenta un resumen con las principales características de los domos utilizados durante las labores de terreno. La tercera columna de la tabla, denominada volumen de medición, corresponde al volumen total del domo descontando el volumen de los accesorios que se instalan en su interior (ventiladores, sensor y soportes). Este es el volumen utilizado para estimar las tasas de evaporación durante las mediciones en terreno. Para el caso del volumen de calibración deben descontarse además los volúmenes de la balanza y del recipiente de evaporación.

Tabla 5.3: Características domos empleados

Domo	Vol. Total (m³)	Vol. medición (m³)	Vol. Calibr. (m³)	Area (m²)	Espesor(mm)
D1	0,3022	0,3005	0,2967	1,1310	4
D2	0,3427	0,3410	0,3373	1,2272	4

Cada medida de terreno consiste en el registro de la variación de la humedad relativa y la temperatura al interior de la cúpula de acrílico, durante un intervalo de 2,5 minutos, mediante la utilización del sensor modelo *Vaisala HMP75*. A lo largo del día, las mediciones se realizaron cada 30 minutos como máximo, lo que permite representar en forma adecuada la evolución diaria del fenómeno. De esta forma, durante el estudio se llevaron a cabo más de 1.000 mediciones instantáneas para la evaporación desde los suelos.

Durante el tiempo entre mediciones, el domo se mantuvo en el lugar de medición, con uno de sus extremos levantado alrededor de 30 cm para permitir la circulación de aire en su interior. Adicionalmente, en forma previa a cada proceso de medición, se levantó completamente el domo a unos 1,5 m de la superficie durante un período mínimo de 1 minuto.

Es de suma importancia considerar durante las mediciones el aislamiento del volumen de control, evitando que entre aire desde el exterior. Para esto se instalaron faldones

impermeables y resistentes al viento, de 50 cm de ancho (ver Figura 5.6). Además de impedir el ingreso de aire desde afuera, el faldón impide la fuga de vapor desde el domo, permitiendo obtener resultados representativos de la realidad.

Las condiciones eólicas durante los trabajos de campo presentaron características similares en todas las zonas, registrándose bajas velocidades durante las primeras horas del día y experimentando un brusco cambio alrededor del mediodía, cuando el viento comienza a manifestarse en forma de ráfagas de gran intensidad y frecuencia, alcanzando velocidades del orden de 15 m/s. Estas condiciones se mantienen hasta aproximadamente una hora después de la puesta del sol. Debido a este comportamiento, los ventiladores al interior del domo se operaron a una velocidad mínima recomendada entre 0,8 m/s y 1 m/s durante la mañana y a su potencia máxima (4,5 m/s aproximadamente) durante la tarde.

La velocidad del viento, tanto dentro como fuera del domo, se midió con un anemómetro digital, a intervalos regulares durante el día. La velocidad de viento mínima en el interior de la cúpula tiene como objetivo homogeneizar el aire allí presente, evitando las estratificaciones con diferente contenido de humedad.

La velocidad de rotación de los ventiladores se controló con reguladores de voltaje sobre baterías de 12 V, desde los que se ajustó la corriente para generar la velocidad de viento requerida.

Para evitar que las mediciones de evaporación de la napa estuvieran afectadas por la humedad del suelo, se cubrió con nylon durante la tarde y noche los sectores programados para monitorear al día siguiente.

En forma adicional, en cada punto estudiado se clasificó el estrato superficial del suelo de acuerdo a su composición (con costra salina o sin costra) y la litología de superficie (arena, limo o arcilla). Esto para poder relacionar la tasa de evaporación con el tipo de suelo en el que ésta se produce.

De acuerdo a consideraciones teóricas, la determinación de la tasa de evaporación mediante la metodología del domo debe ser calculada considerando el tramo de pendiente constante de la curva de evolución de la densidad de vapor de agua en el tiempo. En la práctica, esta curva no presenta una marcada sección de pendiente constante, por el contrario, su comportamiento podría dividirse en 3 etapas descritas a continuación:

- Durante los primeros segundos de medición se presenta un leve o nulo incremento en la densidad de vapor de agua en función del tiempo.
- Luego, en un segundo tramo, comienza un acentuado incremento en la pendiente de la curva. Después de llegar a su valor máximo, ésta disminuye paulatinamente debido al

aumento en el contenido de humedad del aire existente al interior del domo y por lo tanto a una disminución en el déficit higrométrico.

- Finalmente, cuando el aire al interior del domo ha alcanzado el nivel de saturación, la densidad de agua permanece constante y el flujo de vapor aún existente se condensa en las paredes de la cúpula y el suelo.

En la Figura 5.10 se presenta un gráfico comparativo entre el comportamiento teórico y la evolución real de la densidad de vapor de agua al interior del domo. Debido a este comportamiento, para cada estimación puntual, la tasa de cambio de la densidad de vapor de agua en el domo (M) fue determinada como el valor máximo del ajuste lineal móvil de 10 puntos, entre la densidad de vapor y el tiempo.

Las tasas de evaporación diaria en cada punto de medición, fueron obtenidas integrando las estimaciones puntuales realizadas a lo largo del día. Generalmente, la curva de evaporación obtenida no comienza ni termina con tasas instantáneas iguales a cero, por lo tanto, para no subestimar la evaporación real producida, las curvas diarias fueron extrapoladas siguiendo la tendencia de los primeros y los últimos puntos medidos en el día, hasta llegar a tasas nulas.

Para determinar la profundidad de la napa y tomar muestras de éstas, en los puntos de medición se construyeron punteras de 7 cm de diámetro, perforadas con barrenos. La distancia máxima de las punteras al punto donde se situó el domo fue de 1 m, en que las profundidades determinadas con pozómetros fueron entre 5 cm y 4 m,.

Debido a las fluctuaciones en el nivel freático a lo largo del día, principalmente cuando la napa se encuentra a escasa profundidad, éste se registró a intervalos regulares, adoptando el valor promedio de los valores a lo largo del día.

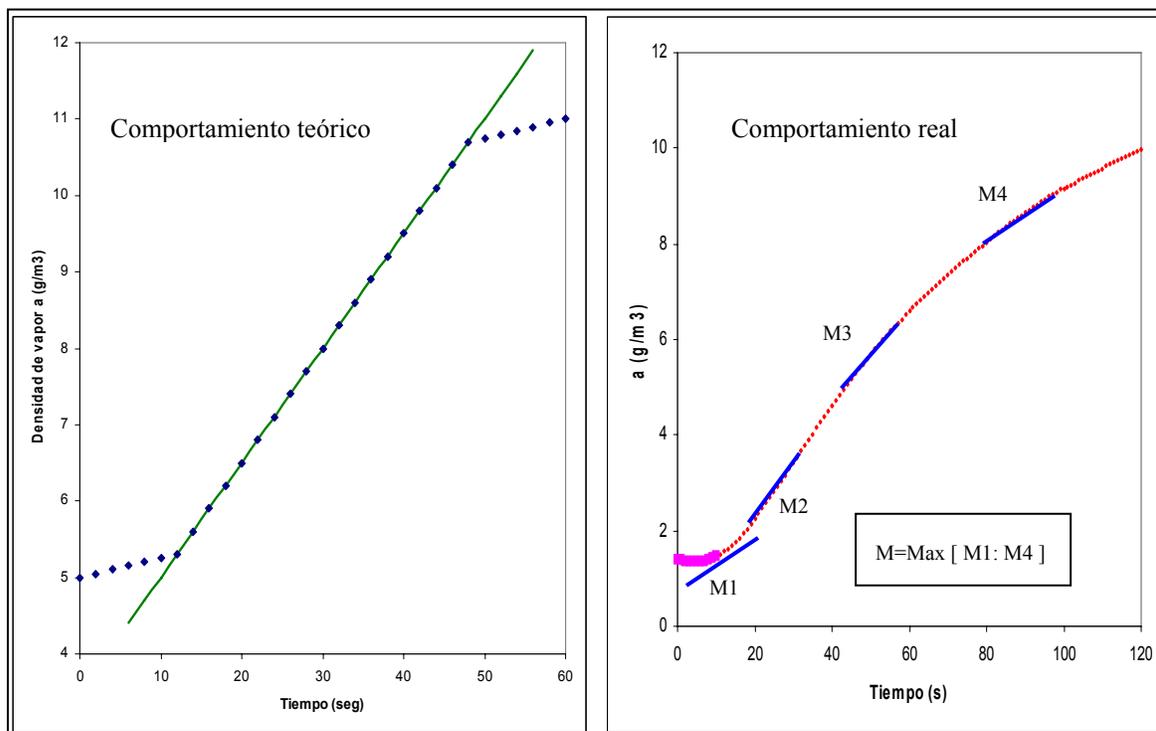


Figura 5.10. Comparación evolución de densidad de vapor teórica y real.

Adicionalmente, con el objetivo de evitar errores de estimación producidos por la heterogeneidad del terreno, se realizaron al menos dos perforaciones por punto de medición, las que fueron ubicadas en extremos opuestos del domo. En el caso de puntos de medición de evaporación cercanos a pozos de exploración o bombeo, no se realizaron perforaciones, ya que las profundidades fueron determinadas directamente desde éstos.

Las muestras de agua se obtuvieron con manguera y se dejaron sedimentando durante una hora. En todas se determinó densidad y en algunos temperatura y conductividad. Debido a la profundidad de algunas napas y a la baja estabilidad en las paredes de la perforación no fue posible obtener muestra de todos los puntos.

Con las mediciones realizadas se construyeron curvas de evaporación en función de la profundidad de la napa para cada zona, además de curvas resumen a nivel regional. Estas son ajustadas de acuerdo a los modelos propuestos en el apartado 4.4.

Calibración domo

En el marco del presente estudio, se realizaron dos procesos de calibración en laboratorio, uno previo a la primera campaña (II Región) y otro previo a la tercera (III Región). Durante cada uno de ellos se obtuvieron factores de ajuste para los domos utilizados en terreno.

La reiteración del proceso permite corregir posibles errores producidos por cambios en la superficie interna del domo y en el nivel de precisión de los sensores. Estos últimos tuvieron mantención del proveedor entre las 2 últimas campañas.

Las calibraciones se realizaron en laboratorio sobre una superficie plana y previamente aislada. Dentro del domo se instaló una balanza electrónica conectada a un procesador y sobre ella se dispuso un recipiente de agua al que se aplicó calor con un termostato. La balanza se utilizó para determinar la evaporación que ocurre desde el recipiente de agua, a través de su pérdida de masa. En forma simultánea a la medición con la balanza se realizó la medición de humedad relativa y temperatura mediante el sensor instalado al interior del domo. Una vez dispuesto el domo sobre la superficie, se registraron los valores con ambos métodos por un período de 3 minutos.

Se realizaron pruebas variando la velocidad del viento (ventiladores) y la temperatura del agua en el recipiente (reguladores de voltaje). Se trabajó con tasas de evaporación entre 0,5 y 2,5 mm/día, similares a las observadas en terreno en estudios anteriores.

La determinación del factor de calibración (C) para cada una de las mediciones realizadas se hizo siguiendo el protocolo descrito en el apartado 4.3.2.1.

Con el fin de asegurar un ajuste representativo de los factores de calibración, se estableció un mínimo de 10 repeticiones para cada caso y se exigió un coeficiente de determinación para la regresión de al menos 0,85.

Previo a la primera campaña se obtuvieron factores de calibración de 1,069 y 0,944 para los domos 1 y 2, respectivamente. Los factores de calibración previos a la tercera campaña fueron 1,022 para el domo 1 y 1,003 para el domo 2. En el ANEXO IV se presentan los gráficos correspondientes a cada una de las mediciones realizadas en los procesos de calibración.

La Figura 5.11 muestra los resultados gráficos de los procesos de calibración realizados. Como puede observarse el coeficiente de determinación siempre fue superior al mínimo estadístico establecido.

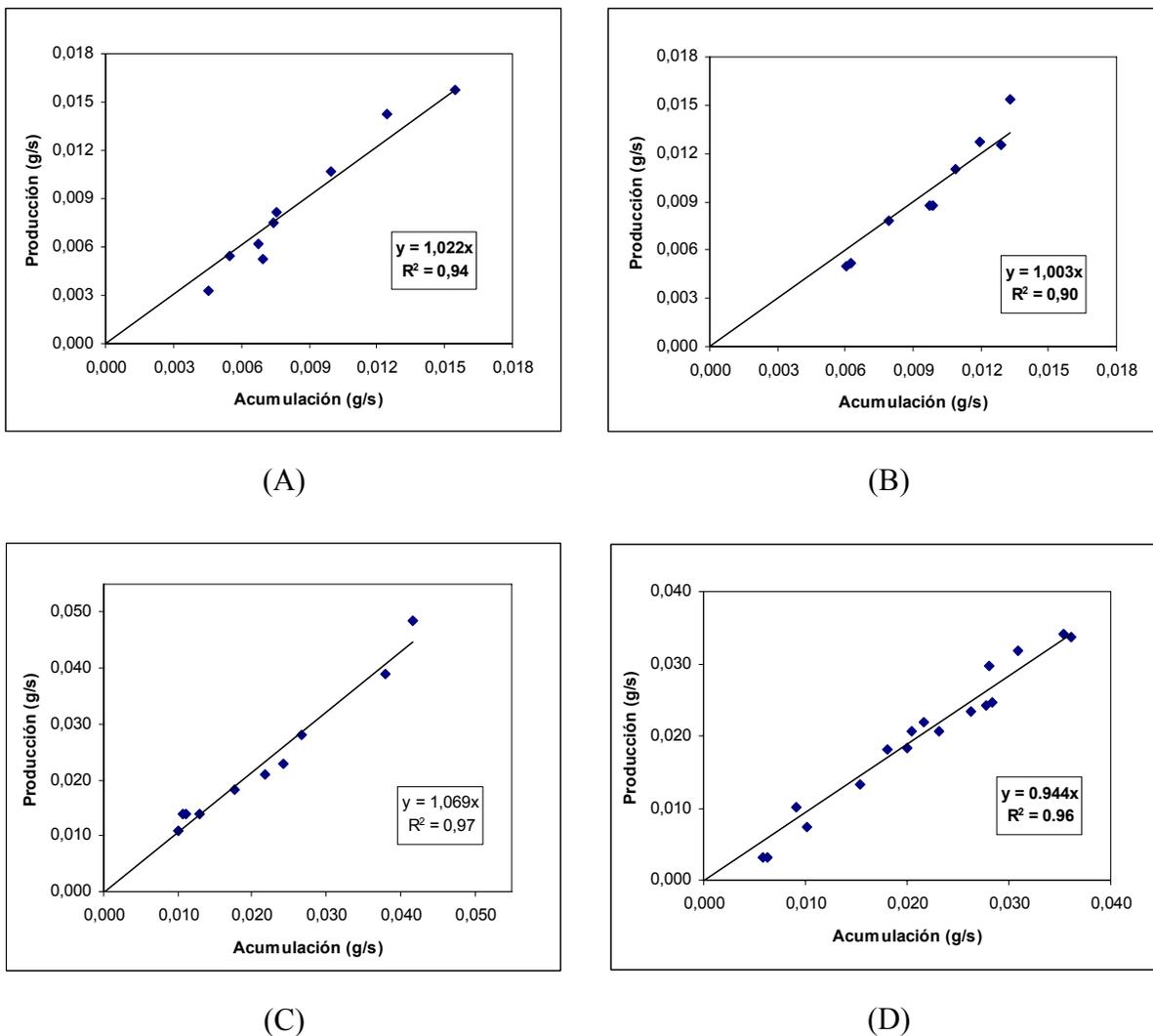


Figura 5.11: Curvas de calibración (acumulación sensor vs. producción en balanza de precisión). A) domo 1 campaña 3. B) domo 2 campaña 3. C) domo 1 campaña 1. D) domo 2 campaña 1.

5.3.3 Muestreo y análisis de suelos

En forma conjunta a las estimaciones de evaporación desde aguas subterráneas se tomaron muestras de suelo, en todos los puntos de medición. Las muestras fueron analizadas en laboratorio para establecer su composición granulométrica y clasificación textural.

Las muestras corresponden al material extraído con barreno para determinar la profundidad de la napa. De éstas se almacenó una mezcla de suelo de todo el horizonte comprendido entre la superficie del suelo y la zona saturada. Como regla general, se recogieron muestras de suelo de unos 3 kg.

5.3.3.1 *Materiales*

Los materiales usados para la toma y análisis de muestras de suelo fueron:

- Set barrenos *Eijkelkamp*.
- Pala, chuzo.
- Frascos y bolsas *Ziploc*.

5.3.3.2 *Análisis de laboratorio*

El estudio de suelos fue encomendado a DICTUC S.A., Área de Ingeniería Geotécnica. Se analizaron 49 muestras.

Los análisis realizados fueron:

- Granulometría por tamizado según “Manual de Carreteras LNV 105-86” (MOP, 2003). Permite conocer la distribución del tamaño de granos en una muestra de suelo. Mediante el tamizado de la muestra se determina el porcentaje que posee un diámetro característico. El rango en que opera esta metodología comprende desde gravas hasta partículas con un diámetro mínimo de 0,075 mm (arenas muy finas).

Este ensayo fue aplicado todas las muestras.

- Granulometría por sedimentación según norma “ASTM D422”. Permite complementar el análisis granulométrico en muestras que poseen un alto contenido de material fino. El ensayo consiste en determinar el tamaño de los granos pertenecientes a una muestra de acuerdo a la velocidad con que estos sedimentan en un medio acuoso.

Este ensayo fue realizado a todas las muestras tomadas en la Segunda Región, que según el análisis por tamizado presentaron un porcentaje de granos finos (con un tamaño menor a 0,075mm) mayor al 15%. Debido a que los análisis se realizaron en forma conjunta a los de la III Región, el criterio de selección en este último caso fue de carácter visual y de tacto. Como resultado de esto, el análisis por sedimentación se realizó a un total de 16 muestras, 8 correspondientes a la Segunda Región y 8 a la Tercera.

- Sales solubles según “Manual de Carreteras, Volumen 8, sección 8.202.14” (MOP, 2003). Este ensayo permite cuantificar y eliminar el contenido de sales solubles que se encuentra adherido a un suelo. A modo de obtener una estimación general del máximo contenido existente en los suelos de la zona de estudio, el ensayo fue aplicado a dos muestras tomadas en la Segunda Región.

En el ANEXO II se presenta el detalle de los resultados obtenidos para los tres tipos de análisis realizados. Los resultados revelaron un alto contenido de sales solubles y suelos relativamente gruesos en cuanto a su composición granulométrica.

La clasificación textural de suelos mediante el análisis granulométrico y de sedimentación requiere disponer de muestras constituidas íntegramente por partículas de grava, arena, limo y arcilla. La presencia de cualquier elemento anexo a los antes nombrados producirá distorsiones en los resultados. Debido a esto, la clasificación de los suelos efectuada en el presente estudio debe ser considerada como una primera aproximación.

6 RESULTADOS

6.1 Mediciones de evaporación

En el presente capítulo se detallan los principales resultados obtenidos durante las campañas de evaporación llevadas a cabo entre diciembre del año 2007 y mayo del 2008. Se determinan las tasas de evaporación superficial medidas en tanques evaporímetros estándar y otros construidos *in situ*, además de las estimaciones puntuales de evaporación desde suelos mediante la metodología del domo.

6.1.1 Evaporación superficial

Se realizaron mediciones puntuales y análisis estadísticos de la información de acuerdo a lo descrito en el apartado 5.3.2.2. Los resultados se presentan organizados según Región Administrativa y metodología de estimación. En la Parte III del presente estudio titulada “Hidrología Regional del Altiplano” se presenta el detalle de la información estadística disponible.

6.1.1.1 Región I de Tarapacá y XV de Arica y Parinacota

Información histórica

Una vez eliminadas las series con un período de registro menor a 10 años, se analizó la información histórica en 17 estaciones operadas por la DGA. Estas estaciones abarcan un registro de más de 40 años comprendidos entre 1960 y el año 2007.

La Figura 6.1 a) presenta la variación de la evaporación de bandeja en función de la altitud para las Regiones I y XV del país. Como puede observarse, la curva tiene forma parabólica, presentando un leve incremento de la evaporación para alturas menores a 750 msnm, donde se encuentra un máximo de 7,2 mm/día, para luego comenzar una disminución con la cota.

La Figura 6.1 b) muestra el ajuste lineal de los valores históricos registrados en estaciones representativas del altiplano, ubicadas sobre los 3.000 msnm. Para este tramo se observa que existe una pequeña disminución de la evaporación media con la altura, de manera que en promedio se puede estimar en 0,1 mm/día por cada 100 metros de altura.

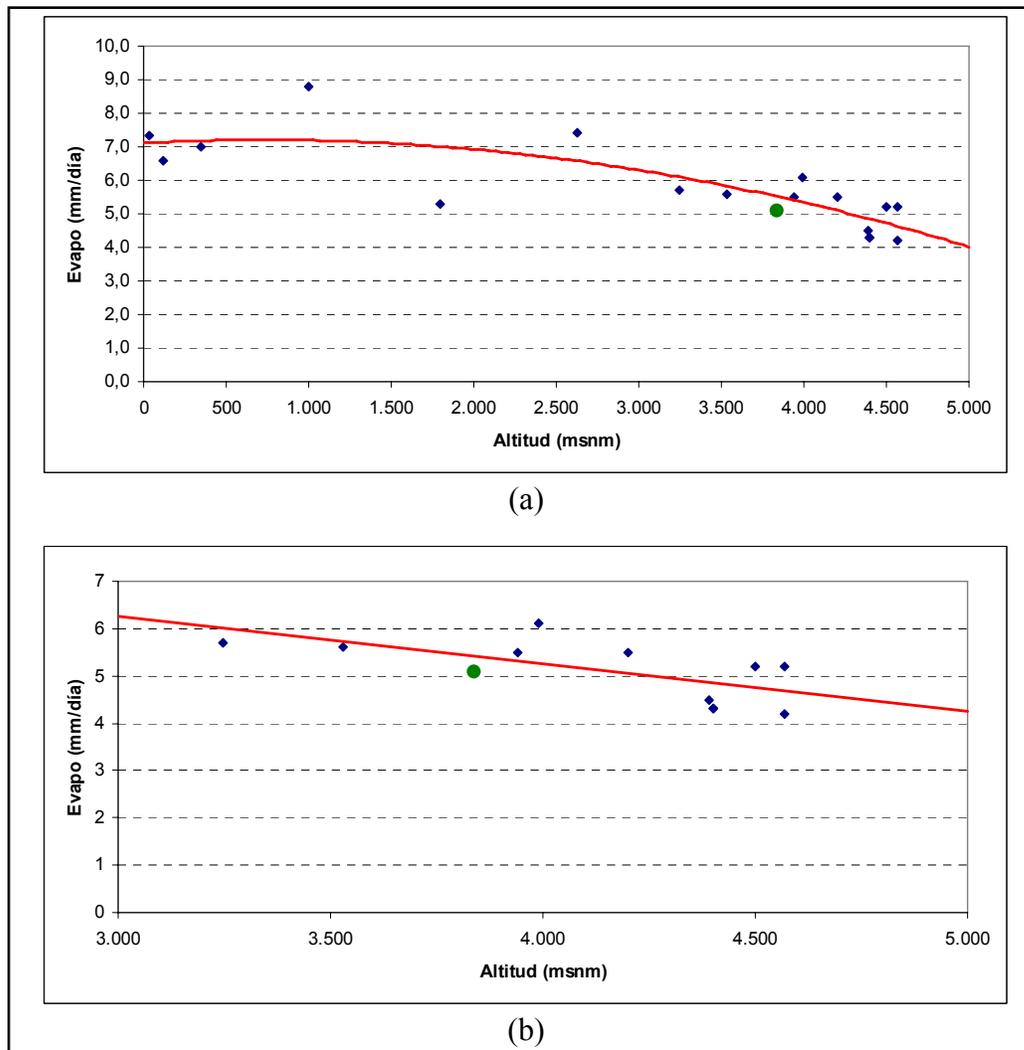


Figura 6.1. Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, Regiones XV y I. A) Curva regional. B) Estimación lineal franja altiplánica.

Se dispone además del registro de evaporación efectuado en dos tanques evaporímetros instalados en la cuenca del salar del Huasco (Collahuasi-GP consultores, 2008). En estos sólo se cuenta con la información estadística del período enero 2004 – diciembre 2007. Tabla 6.1 presenta la tasa diaria media anual y los valores medios mensuales correspondientes a abril y mayo (fecha de realización de la campaña de terreno en el Salar de Huasco) para ambos tanques.

Tabla 6.1: Evaporación de bandeja en evaporímetros Collahuasi-GP consultores (2008).

Id	Tipo	Ev. Media	Ev. Abril	Ev. Mayo
		mm/día	mm/día	mm/día
E102	Superficial (Clase A)	5,09	4,82	3,35
E103	Enterrado	5,32	4,75	3,75

El ajuste de las curvas fue realizado sin incorporar la información obtenida de los tanques evaporímetros operados por Collahuasi – GP Consultores. El punto circular de color verde presente en ambos gráficos (Figura 6.1) muestra la evaporación de bandeja media diaria registrada en estos evaporímetros. Como puede observarse, la evaporación medida al interior de la cuenca se ajusta en forma adecuada tanto a la curva regional como a la estimación realizada para la franja altiplánica.

La Tabla 6.2 presenta la estimación de la evaporación media anual, realizada en base al análisis de las series históricas para las cuatro zonas de medición muestreadas al interior del Salar del Huasco. En el análisis se consideró el gradiente regional determinado para la franja altiplánica y la información correspondiente a las estaciones de Collacagua (o Coyacagua, DGA) y Salar del Huasco (E102).

Tabla 6.2: Evaporación de tanque según series históricas, I Región.

Zona	Altitud (m)	Est. Collacagua (3.990msnm)		Est. Huasco (3.840msnm)	
		Dif. cota (m)	Ev. (mm/día)	Dif. cota (m)	Ev. (mm/día)
Z1	3.831	-159	6,26	-9	5,11
Z2	3.837	-153	6,25	-3	5,10
Z3	3.823	-167	6,27	-17	5,12
Z4	3.911	-79	6,18	71	5,03

Las estimaciones usando el registro de la estación Collacagua son mayores a las obtenidas de la estación Salar del Huasco. La diferencia se debe a que la evaporación media anual en la estación DGA (E101) es cerca de un 20% mayor que la tasa registrada en la estación de Collahuasi – GP Consultores (E102).

Si bien para la estación operada por Collahuasi – GP Consultores se cuenta con un período de registro menor a cinco años, su ubicación es más representativa de las zonas de medición definidas para el estudio de la evaporación desde los suelos (Figura 6.2).

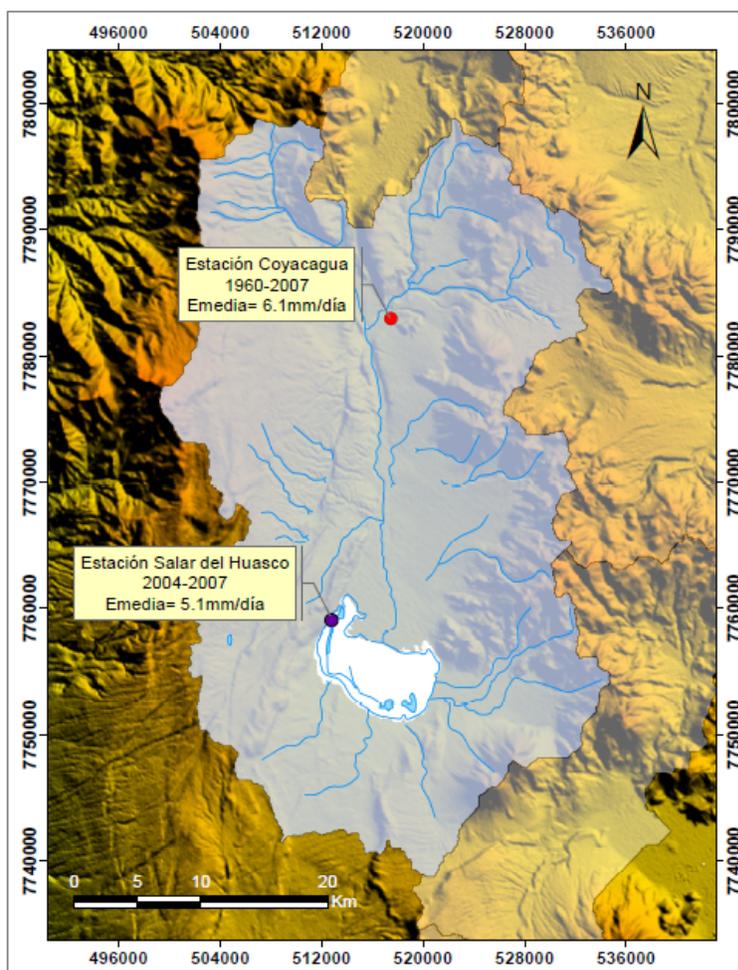


Figura 6.2. Estaciones de referencia salar del Huasco.

Para conocer la variación de la evaporación durante los meses del año, se utiliza la razón entre la evaporación media mensual y la evaporación media anual. La Tabla 6.3 presenta la distribución mensual de la razón entre la evaporación media mensual y la evaporación media anual según los datos de la estación Coyacagua.

Tabla 6.3: Distribución mensual de la evaporación anual en el Salar del Huasco.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Emes/Eanual	1,05	1,03	1,02	1,02	0,82	0,70	0,72	0,82	1,02	1,21	1,31	1,28

Debido a que las mediciones de terreno fueron efectuadas entre los meses de abril y mayo de 2008, es necesario conocer la evaporación de bandeja histórica para ese período. De esta forma se podrán comparar las mediciones puntuales con los valores estadísticos correspondientes. Ponderando los valores medios anuales de la Tabla 6.2 por el factor de

ponderación mensual abril-mayo (0,92), se obtienen los resultados que se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Proyección evaporación de tanque en período abril-mayo en Salar del Huasco.

Zona	Evaporación período Abr-May	
	Coyacagua (mm/día)	Huasco (mm/día)
Z1	5,76	4,70
Z2	5,75	4,69
Z3	5,77	4,71
Z4	5,68	4,63

Mediciones en terreno

Durante la campaña de terreno en la cuenca del salar del Huasco se determinaron las tasas de evaporación potencial diarias en tres de las cuatro zonas consideradas. Si bien los tanques evaporímetros de Collahuasi – GP consultores (E102 y E103) se encuentran en la zona Z1, no fue posible utilizarlos ya que estaban operando. La Tabla 6.5 presenta los resultados de evaporación superficial medidos en terreno en los sectores Z2, Z3 y Z4. Para el caso de las estimaciones en las zonas Z2 y Z3 cabe señalar que al concluir el registro los tanques contenían una pequeña capa hielo en su interior.

Tabla 6.5: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno I Región.

Zona	Tanque	Fecha	Ev. (mm/día)	Hora control	Observación
Z2	Construido	(25-26)/04/2008	4,1	11:15	N. O.*
Z3	Construido	(27-28)/04/2008	4,7	12:55	N. O.*
Z4	Construido	(30-01)/04/2008	4,9	15:30	Despejado

*N. O.: Nubes Ocasionales

Las estimaciones de evaporación de tanque fueron hechas con dispositivos construidos en terreno, los que fueron instalados dentro de afloramientos de agua cercanos a los puntos de medición con el domo. Los valores obtenidos son cercanos a las tasas proyectadas para las tres zonas usando la estación Huasco (E102), con diferencias menores al 15%.

El control de las condiciones climáticas consideró 3 clasificaciones, que se describen en forma creciente de nubosidad como sigue: despejado, nublados ocasionales (N. O.) y parcialmente nublado (P. N.).

Debido a lo anterior, las tasas de evaporación de tanque adoptadas en los análisis posteriores corresponden a las medidas directamente en terreno. En efecto, para las zonas Z1 y Z2 se asumió una evaporación de 4,1 mm/día, mientras que para las zonas Z4 y Z5 se adoptaron valores de 4,7 y 4,9 mm/día, respectivamente.

Corrigiendo dichos valores por un coeficiente de tanque de 0,75, las tasas de evaporación desde superficies de agua libre serán de 3,1 mm/día en Z1 y Z2, de 3,5 mm /día en Z3 y de 3,7 mm/día en la zona Z4. La Tabla 6.6 presenta un cuadro resumen de la evaporación desde lagunas y napas freáticas en contacto con la superficie del suelo adoptadas en la cuenca. El factor aplicado es mayor al utilizado para tanques Clase A instalados en la zona de estudio (generalmente de 0,70), ya que en este caso se instaló un embalse sumergido, lo que ayuda a disminuir la influencia de las condiciones de borde inducidas por el calentamiento de las paredes laterales del tanque.

Tabla 6.6: Tasas de evaporación desde lagunas adoptadas, I Región

Zona	Coordenadas UTM		Ev. (mm/día)
	Norte	Este	
Z1	---	---	3,1
Z2	7754029	512605	3,1
Z3	7758430	512990	3,5
Z4	7779613	515706	3,7

6.1.1.2 Región II de Antofagasta

Información histórica

El análisis de evaporación de bandeja en la Segunda Región del país se efectuó considerando 24 estaciones DGA, las que abarcan elevaciones que van desde los 50 hasta los 4.320 metros sobre el nivel del mar.

Se consideraron estaciones con un registro mínimo de 10 años para confeccionar la curva de evaporación regional (Figura 6.3 a)). Esta presenta un incremento que va desde los 5,8 mm/día en la zona costera, hasta un valor máximo de 9,7 mm/día en zonas de elevación cercana a los 2.000 msnm, a partir de donde comienza a descender hasta un mínimo de 1,7 mm/día a los 5.000 msnm. La Figura 6.3 b) muestra la estimación lineal usando las estaciones sobre los 3.000 msnm.

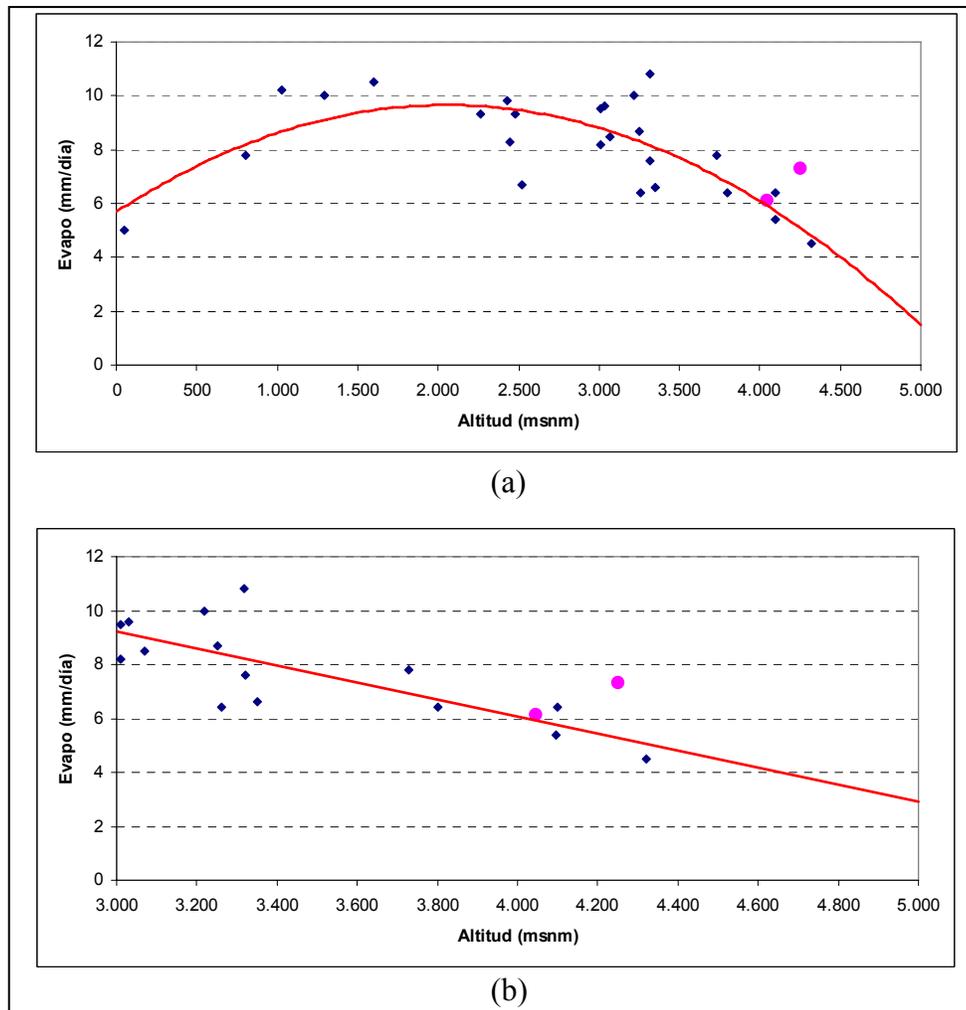


Figura 6.3: Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, II Región. A) Curva regional. B) Estimación lineal franja altiplánica.

De acuerdo a la Figura 6.3, la evaporación de bandeja disminuye en la franja altiplánica, sin embargo con un gradiente de 0,3 mm/día por cada 100 metros de variación en la altura, menor a lo expuesto sobre la I Región.

Adicionalmente, en la II Región se cuenta con una estadística de evaporación de tanque de siete evaporímetros Clase A, entre agosto de 2006 y mayo de 2007. Estos dispositivos fueron instalados por Geoaguas Consultores en la zona de estudio y en el momento de la visita a terreno se encontraban sin uso. Cuatro de los evaporímetros mencionados se encuentran en la cuenca Tuyajto y tres en El Laco. La Tabla 6.7 muestra los resultados de evaporación registrados en dichas estaciones, tanto en sus valores medios anuales como los del mes de diciembre de 2007 (periodo campaña Segunda Región).

Tabla 6.7: Evaporación de bandeja en evaporímetros Geoaguas Consultores.

Id	Cuenca	Tipo	Ev. media	Ev. Dic.
			mm/día	mm/día
E202	Laguna Tuyajto	Agua laguna enterrado	5,1	5,7
E203	Laguna Tuyajto	Agua laguna superficial (Clase A)	6,1	8,9
E204	Laguna Tuyajto	Agua subterránea enterrado	7,1	9,3
E205	Laguna Tuyajto	Agua subterránea superficial	7,4	11,2
E206	Salar de El Laco	Agua laguna en laguna	6,7	9,1
E207	Salar de El Laco	Agua laguna superficial (Clase A)	7,3	9,6
E208	Salar de El Laco	Agua laguna enterrado	8,0	8,3

En la Figura 6.3 se observa como la evaporación de bandeja medida en los tanques implementados por Geoaguas Consultores en Tuyajto (E203), se acerca a las curvas ajustadas. Sin embargo, para el caso de los evaporímetros instalados en El Laco (E207), las curvas proyectadas subestiman en forma considerable las tasas medidas en terreno.

Cabe señalar que los estos tanques fueron monitoreados durante 9 meses (período 2006-2007), por lo que pueden no ser representativos de los valores medios históricos de la zona.

Tomando como referencia los valores medios anuales de evaporación registrados en las estaciones de Tuyajto (6,1 mm/día), El Laco (7,3 mm/día) y Socaire (8,3 mm/día) (Figura 6.4), se determinaron tasas de evaporación históricas en las cuatro zonas de medición de la Segunda Región. Los resultados se presentan en la Tabla 6.8.

Se observa que los valores registrados en las estaciones Tuyajto y Socaire presentan leves diferencias, mientras que las tasas obtenidas en la estación de El Laco tienden a ser mayores, cercanas al 30%.

Tabla 6.8: Evaporación de tanque Clase A según series históricas II Región.

Zona	Altitud (m)	Est. Tuyajto (4.048 msnm)		Est. El Laco (4.250 msnm)		Est Socaire (3.251 msnm)	
		Dif. cota (m)	Ev. (mm/día)	Dif. cota (m)	Ev. (mm/día)	Dif. cota (m)	Ev. (mm/día)
Z5	4.082	34	5,99	-168	7,84	831	6,04
Z6	4.079	31	6,00	-171	7,85	828	6,05
Z7	4.275	227	5,37	25	7,22	1.024	5,42
Z8	4.243	195	5,48	-7	7,32	992	5,53

La Tabla 6.9 muestra la razón entre la evaporación media mensual y la anual para la segunda Región, considerando el registro histórico de la estación de Socaire.

Tabla 6.9: Distribución mensual de la evaporación anual II Región.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Emes/Eanual	1,23	1,20	1,08	1,00	0,85	0,70	0,68	0,74	0,89	1,09	1,25	1,30

Para generar la serie de evaporación de bandeja representativa del período en que se realizaron las mediciones de terreno, se ponderaron los valores medios anuales por el factor correspondiente a diciembre. Los resultados se presentan en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10: Proyección Evaporación de tanque mes de diciembre II Región.

Zona	Ev. Diciembre (mm/día)		
	Tuyajto	El Laco	Socaire
Z5	7,79	10,19	7,85
Z6	7,80	10,20	7,87
Z7	6,99	9,39	7,05
Z8	7,12	9,52	7,18

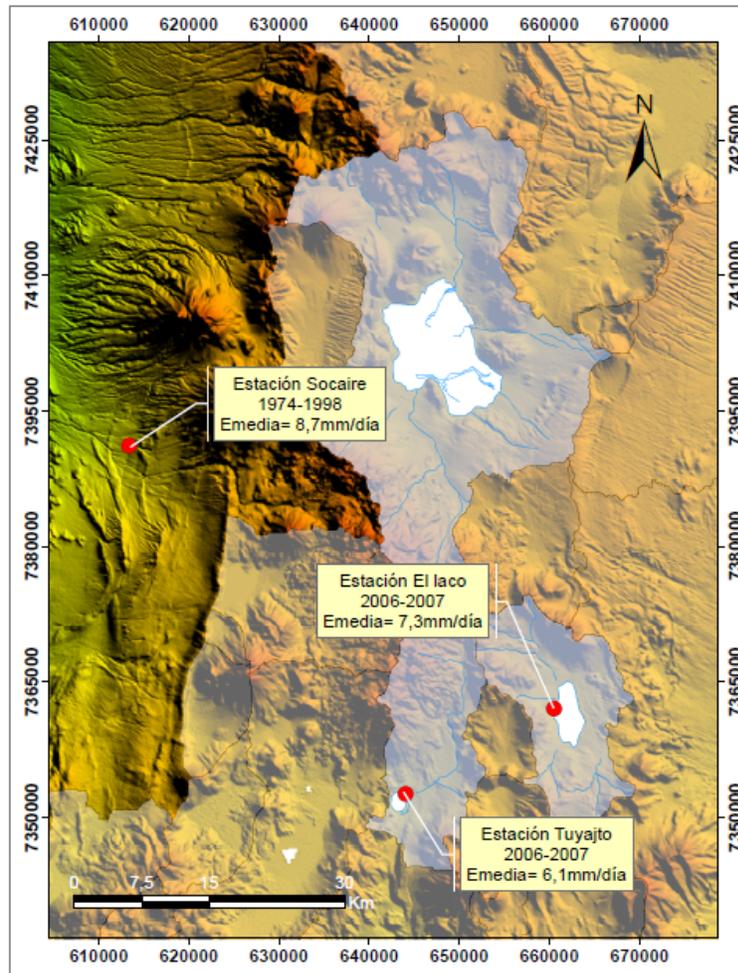


Figura 6.4. Estaciones de referencia II Región.

Mediciones en terreno

En tres de las cuatro zonas se midió evaporación superficial. El sector en el que no fue posible trabajar fue en el denominado como Z5. En la

Tabla 6.11 se muestran los valores obtenidos en las zonas Z6, Z7 y Z8. Se presentan tasas, instrumento de medición utilizado y horas de inicio y fin del muestreo para los tres casos.

Las tasas de evaporación potencial están fuertemente relacionadas con la variación de las condiciones ambientales, disminuyendo significativamente en días nublados. Para reconocer algunas diferencias se llevó un registro de las condiciones climáticas durante los días de medición.

Tabla 6.11: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno II Región.

Zona	Tanque	Fecha	Ev. (mm/día)	Hora control	Observación
Z6	E203	(11-12)/12/2007	10,2	13:45	Despejado
Z7	E207	(13-14)/12/2007	9,5	12:15	N. O.*
Z8	Construido	(15-16)/12/2007	8,4	12:45	N. O.*

*N. O.: Nubes Ocasionales

- **Laguna Tuyajto.** En la zona Z6 el valor de la tasa de evaporación fue de 10,2 mm/día, un 15% mayor que el valor medio registrado en el mismo instrumento durante diciembre de 2006). Al comparar este valor con los históricos de diciembre para la zona (Tabla 6.10), éste es un 30% mayor que las tasa reportadas por las estaciones de Tuyajto y Socaire, pero cercano al valor de la estación de El Lago.

Debido a la variabilidad diaria del fenómeno y a que la medición en terreno no se aleja en gran medida de los valores históricos, la evaporación de tanque adoptada para las zonas 5 y 6 fue de 10,2 mm/día. Aplicando el factor de corrección de bandeja utilizado por Geoaguas Consultores en los tanques Clase A (0,70), la evaporación máxima desde una superficie de agua libre para estas zonas es de 7,14 mm/día.

- **Salar de El Lago.** En la cuenca del salar de El Lago (Z7) las tasas de evaporación medidas por Geoaguas Consultores durante diciembre de 2006 resultaron ser más homogéneas que en la hoya de la laguna Tuyajto. Esto se explicaría debido a que los tres tanques en la cuenca fueron rellenados con aguas del mismo tipo, llegándose a un valor promedio de 9,0 mm/día, con un máximo de 9,6mm/día para el caso del evaporímetro Clase A (E207).

Si se compara el valor obtenido con los valores históricos, se observa que tanto la evaporación durante diciembre de 2006 como la histórica en la zona (basada en la estación El Lago) presentan resultados similares. Esto permite asumir una evaporación de tanque de 9,5mm/día y una tasa de descarga desde lagunas de 6,65 mm/día (factor de 0,7) en Z7.

- **Salar de Aguas Calientes.** En la zona 8 (Z8) se construyó y sumergió un tanque en un afloramiento (UTM Norte: 7.397.527, UTM Este: 643.250, PSAD 56). El valor de bandeja tras 24 horas fue de 8,4 mm/día, equivalente a una evaporación máxima desde lagunas de 6,3 mm/día al aplicar un factor de embalse de 0,75.

Si bien no se cuenta con otras estimaciones puntuales que permitan contrastar los resultados obtenidos para la evaporación superficial en esta cuenca, puede observarse que los valores son del mismo orden de magnitud que las proyecciones basadas en las series históricas y curvas de evaporación. Además, al pertenecer las tres cuencas a zonas con características climáticas similares y debido a que las mediciones se llevaron a cabo durante días consecutivos sin grandes diferencias climáticas, puede presumirse que la tasa obtenida representa un valor referencial para la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 y será considerada como la tasa máxima de evaporación desde superficies de agua libre.

6.1.1.3 Región III de Atacama

Información histórica

Para el caso de la Tercera Región, sólo 11 estaciones con control de evaporación poseen un período de registro superior a 10 años. De éstas, 6 se encuentran ubicadas bajo la cota 1.000 m, mientras que las 5 restantes no logran superar los 2.000 msnm. Considerando todas estas estaciones se cuenta con un registro de 44 años, entre 1963 y el año 2007.

La falta de estaciones sobre los 2.000 msnm impide contar con curvas apropiadas de variación de evaporación de bandeja con la altura, tanto a nivel regional como para la franja altiplánica. Sin embargo, es posible comparar cualitativamente la curva generada usando las 11 estaciones disponibles (Figura 6.5), con la tendencia regional de la Segunda Región.

Como se observa, el cambio de la evaporación con la altura en la III Región presenta un comportamiento similar al primer tramo de la curva regional de la Región de Antofagasta. El análisis permite establecer, como criterio general, que las tasas diarias de evaporación medias anuales son menores para el caso de la Tercera Región, sin embargo, la estación ubicada a mayor altitud (Iglesia Colorada, 1.950 msnm) presenta una evaporación media cercana a los 11 mm/día, valor superior a todas las estaciones de la Segunda Región.

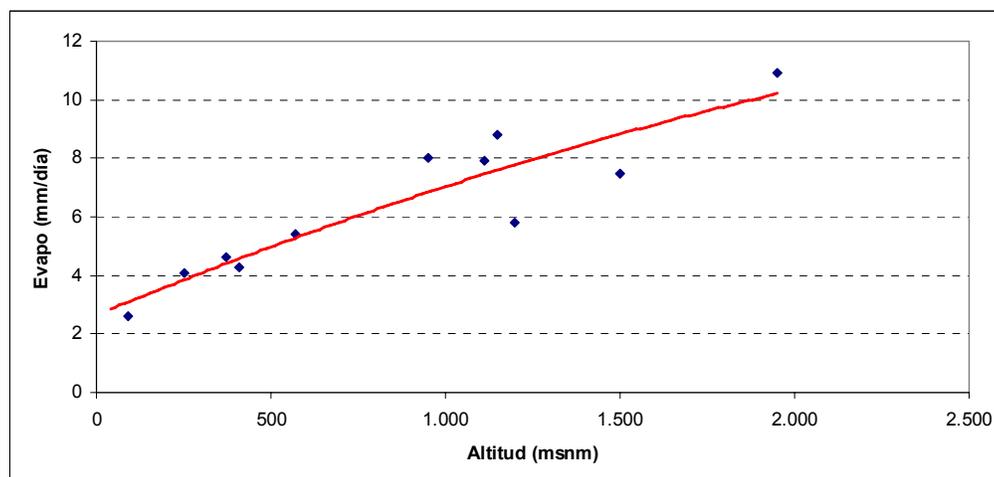


Figura 6.5. Evaporación de bandeja media diaria en función de la altura, III Región.

Mediciones en terreno

Para las dos cuencas estudiadas en la zona, se estimaron las tasas de evaporación potencial mediante la misma metodología empleada en las hoyas del Salar de Aguas Calientes 2 y Salar del Huasco. En ambos casos los tanques construidos se emplazaron en el interior de lagunas o afloramientos cercanos a los puntos de medición de evaporación desde suelos.

Se realizaron tres estimaciones directas de evaporación diaria de tanque, representativas de las zonas Z9, Z10 y Z11. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12: Tasas de evaporación de tanque medidas en terreno, III Región.

Zona	Tanque	Fecha	Ev. (mm/día)	Hora control	Observación
Z9	Construido	(07-08)/3/2008	6,5	12:30	P. N.*
Z10	Construido	(09-10)/3/2008	8,2	11:00	Despejado
Z11	Construido	(12-13)/03/2008	8,2	10:15	Despejado

*P. N.: Parcialmente Nublado

- **Salar de Pedernales.** Se realizaron dos pruebas de 24 horas para tener mediciones más confiables. La primera se llevó a cabo dentro de un afloramiento en la zona marginal del salar por su lado oeste (UTM Norte: 7.089.135, UTM Este: 476.891, PSAD 56, Z9), mientras la segunda se efectuó en la zona central de la cuenca, a orillas del río La Ola. (UTM Norte: 7.068.310, UTM Este: 494.200, PSAD 56, Z10). Una vez aplicado un factor de corrección por embalse de 0,75 se obtuvieron valores de 4,9 y 6,1 mm/día,

respectivamente. Cabe señalar que durante el proceso de estimación dentro del salar, las condiciones atmosféricas fueron inestables, presentándose incluso precipitaciones leves durante la tarde.

- **Salar de Maricunga.** En Maricunga se efectuó una medición de evaporación superficial (zona Z11). Esta se realizó en un afloramiento del sector nororiente de la cuenca (UTM Norte: 7.029.345, Este: 495.581, PSAD 56). La tasa de evaporación corregida se traduce en un flujo de 6,1 mm/día, cuyo valor es igual al medido en la cuenca de Pedernales y levemente inferior a los resultados registrados en la Segunda Región. Esta diferencia podría atribuirse a la variación en las condiciones geográficas y atmosféricas entre ambas regiones, así como al período del año en que se realizaron las mediciones.

Dado que las condiciones climáticas durante los cuatro días de medición en Maricunga fueron similares, se asumió que la tasa de evaporación en la zona Z12 es igual al valor obtenido en Z11.

6.1.2 Tasa de evaporación desde suelos

A continuación se presenta un resumen con los principales resultados de evaporación desde napas freáticas obtenidos en terreno. Con el objeto de permitir una rápida comprensión, los resultados han sido separados por Región Administrativa y cuenca.

En particular se detallan las tasas diarias de evaporación en cada zona de estudio y la profundidad de la napa en cada punto de medición. También se expone la textura de los suelos, denominada ‘Clasificación Textural’, que se estipula usando los resultados del análisis granulométrico y el triángulo de texturas de la Figura 4.14.

Resulta interesante conocer además la evolución de la evaporación a lo largo del día, cuyas curvas se presentan en el ANEXO I. Las curvas tienen un comportamiento característico, con bajas tasas de evaporación en las primeras horas de la mañana y en la tarde, y máximos que suelen presentarse entre las 10:00 y las 16:00 hrs.

6.1.2.1 Región I de Tarapacá

La campaña se realizó íntegramente en la cuenca del salar del Huasco, donde se muestrearon cuatro zonas de las cuales dos se ubicaron sobre costra salina (Z1, Z3), una próxima al salar (Z2) y una en la ribera del río Coyacagua (Z4).

La Figura 6.6 muestra la ubicación de las 4 zonas estudiadas en la cuenca, donde además se presenta un esquema con la ubicación de los 16 puntos monitoreados, identificando la profundidad a la que se encontró la napa en cada uno de ellos.

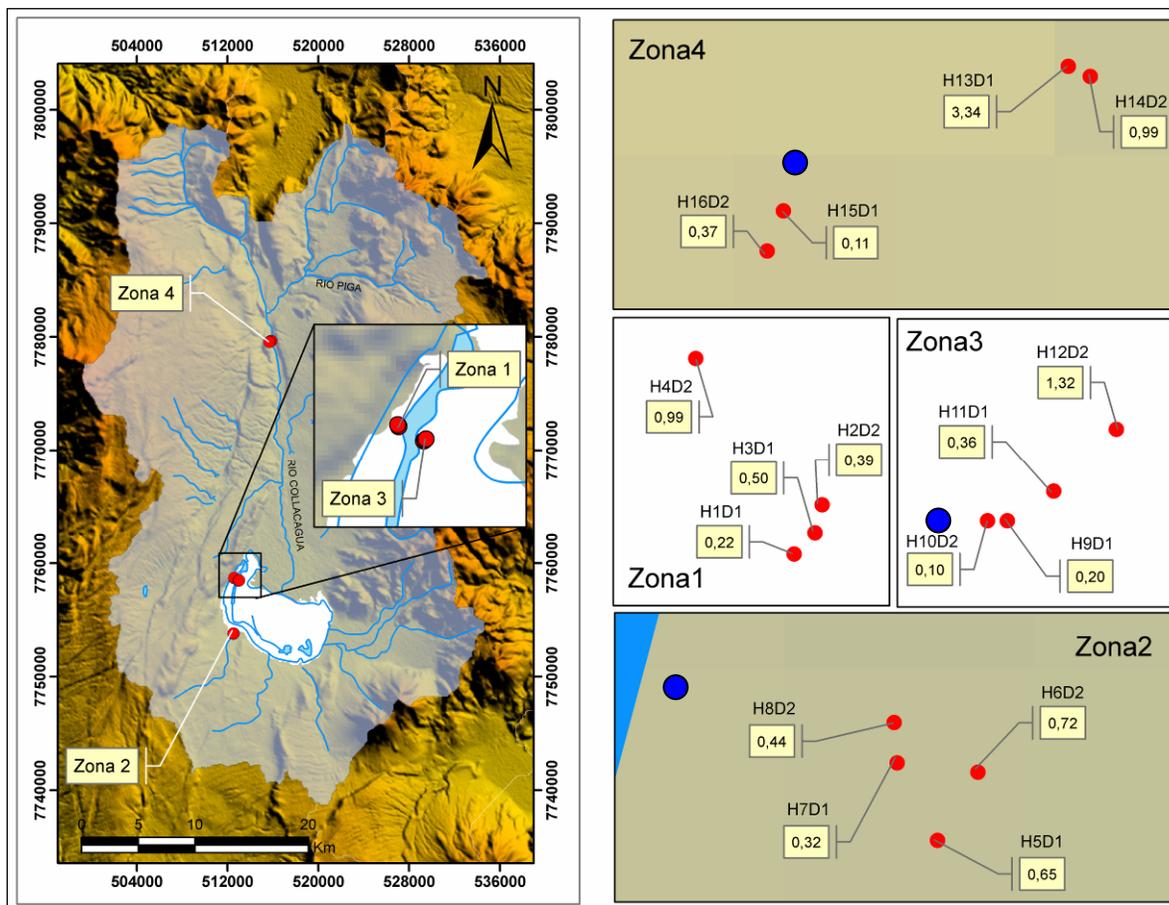


Figura 6.6: Ubicación puntos de medición I Región. Los círculos de color azul representan la donde se midió evaporación de tanque.

Como se observa en la Figura 6.6, en la zona 1 no se realizaron estimaciones de evaporación superficial. Las mediciones realizadas abarcan profundidades de aguas subterráneas entre 0,1 (Z3) y 3,3 metros (punto H13D1, Z4).

A continuación, entre la Tabla 6.13 y la Tabla 6.16 se presenta un resumen con los principales resultados obtenidos en la campaña de terreno realizada durante abril de 2008. Debido a que los suelos poseen características diferentes, los resultados han sido divididos por zona de medición.

De la misma forma, de la Figura 6.7 a la Figura 6.10 se muestran en forma gráfica los resultados de evaporación en función de la profundidad de las napas freáticas correspondientes a la cuenca del salar del Huasco.

Zona 1

Como se observa en el gráfico de la Figura 6.7, los resultados en la zona 1 se comportan de acuerdo a las consideraciones teóricas presentadas en el apartado 4.4.

Comenzando con una evaporación desde superficies libres de 3,1 mm/día, se presenta una acelerada disminución de las tasas de evaporación en función de la profundidad para napas someras. Cuando la napa ha alcanzado una profundidad cercana a los 0,4 m, la evaporación comienza a estabilizarse, alcanzando un valor residual que bordea los 0,25 mm/día.

Tabla 6.13: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 1.

Id	Fecha	Ev. (mm/día)	P. napa (mbnt)	Textura	Clima	Densidad (g/l)
Tanque	---	3,1	0,00	---	---	---
H1D1	23-04-2008	1,373	0,21	Arena	Despejado	999,5
H2D2	23-04-2008	0,401	0,39	Arena	Despejado	1000
H3D1	24-04-2008	0,254	0,50	Areno francoso	Despejado	999,5
H4D2	24-04-2008	0,269	0,99	Areno francoso	Despejado	1000

El valor residual de evaporación para napas más profundas podría atribuirse a un error de los instrumentos utilizados o a una baja tasa de evaporación producida a partir del contenido de humedad presente en el perfil de suelo. Esta situación es analizada en el apartado 5.3: Metodología de medición y muestreo.

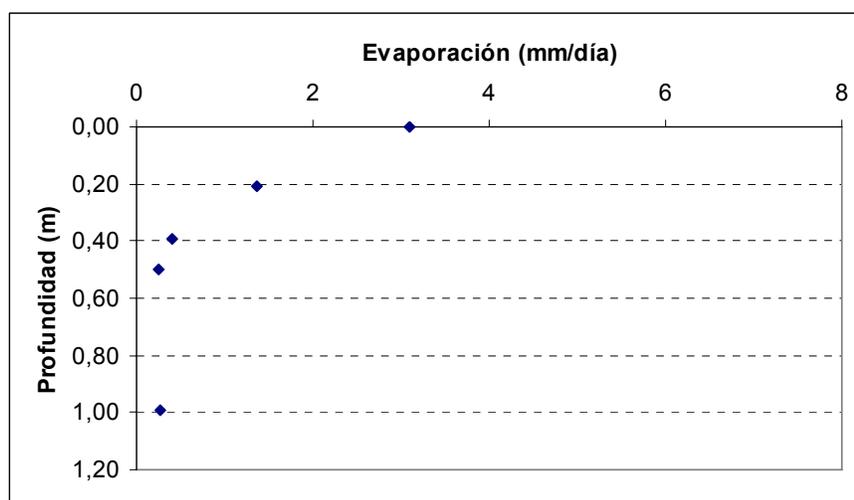


Figura 6.7: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 1.

Zona 2

Las mediciones más profundas realizadas en la zona 2 presentan tasas de evaporación cercanas e incluso más altas a las obtenidas para niveles de la napa poco más someros (ver Figura 6.8). Leves diferencias en las condiciones climáticas predominantes pueden ser responsables de esta situación, las que se recomienda caracterizar al momento de realizar las pruebas para establecer o descartar relaciones en los resultados.

Durante los trabajos de campo se llevó un control cualitativo de la nubosidad, que permitiera observar los datos bajo la óptica del tiempo dominante del día. Para efectos de la comparación con los demás puntos de la zona, algunos registros pueden ser incluso descartados o reinterpretados.

La Tabla 6.14 muestra la densidad de las muestras de agua tomadas. Sus diferencias son pequeñas, por lo que su influencia en la evaporación también lo es. Estas diferencias se reducen aún más al aplicar correcciones por salinidad, llegando a ser menores al 0,5%.

Tabla 6.14: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 2.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	25-04-2008	3,1	0,00	---	N. O.*	999,5
H5D1	25-04-2008	0,516	0,65	Franco arenoso	N. O.*	1000
H6D2	25-04-2008	0,452	0,72	Franco arenoso	N. O.*	1000
H7D1	26-04-2008	0,615	0,32	Franco arenoso	Despejado	1002,5
H8D2	26-04-2008	0,487	0,44	Franco arenoso	Despejado	1002

*N. O.: Nublados Ocasionales

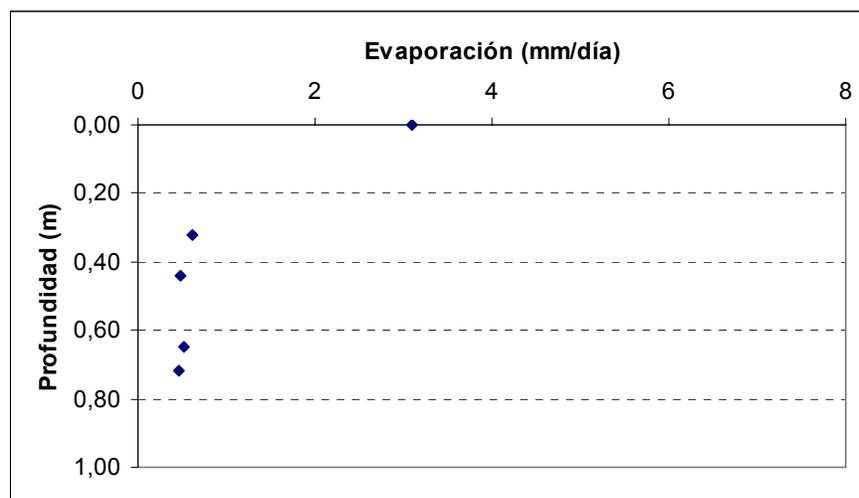


Figura 6.8: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 2.

Zona 3

Para el caso de la zona 3, la tasa de evaporación medida a los 10 cm de profundidad es menor que la tasa registrada con la napa a 20 cm (Figura 6.9), algo similar a lo que ocurrió en la zona 2. Ambos puntos fueron monitoreados el mismo día a no más de 30 metros de distancia. El suelo donde la napa se encontraba a 10 cm estaba formado por una costra salina de densidad considerable, lo que inhibiría los flujos ascendentes de vapor. El suelo en el punto con napa a 20 cm de profundidad tenía una densidad menor, con baja compactación.

Como se observa en la Tabla 6.15, durante los dos días de medición empleados en la zona 3 se presentaron condiciones atmosféricas inestables, con presencia de nubes débiles ocasionales, principalmente durante el primer día.

Tabla 6.15: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 3.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	27-04-2008	3,5	0,00	---	N. O.*	1000
H9D1	27-04-2008	1,040	0,20	Franco arenoso	P. N.**	1001,5
H10D2	27-04-2008	0,985	0,10	Franco arenoso	P. N.**	1001,5
H11D1	28-04-2008	0,176	0,36	Franco arenoso	N. O.*	999,5
H12D2	28-04-2008	0,185	1,32	Franco arenoso	N. O.*	1000

*N. O.: Nubes Ocasionales; **P. N.: Parcialmente Nublado

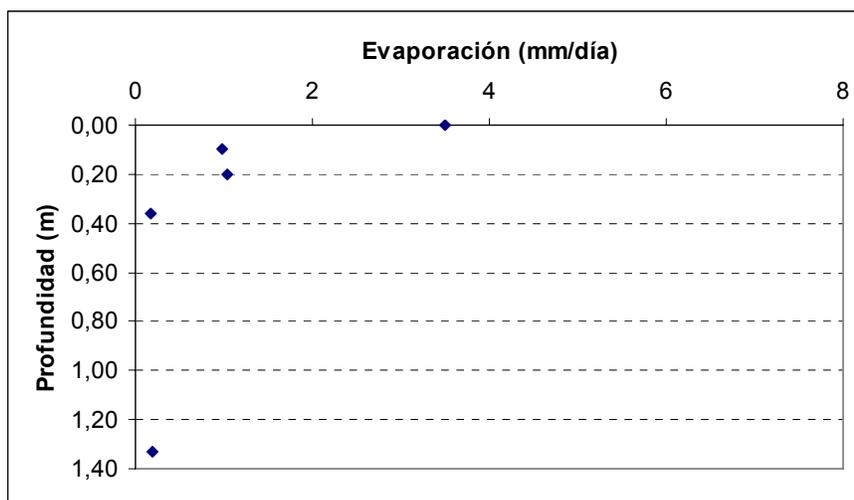


Figura 6.9: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 3.

Zona 4

La zona 4 presenta un comportamiento similar al teórico en la evaporación, con una tasa máxima de 1,63 mm/día a los 0,11 m de profundidad y una mínima de 0,1 mm/día cuando la napa se encontró a 3,3 m de profundidad (Tabla 6.16 y Figura 6.10).

Las mediciones se llevaron a cabo en días con condiciones climáticas similares, en la ribera del río Coyacagua, donde es posible encontrar suelos con características más homogéneas que sobre el salar o en su vecindad.

Cabe señalar que la profundidad de saturación para los puntos H13D1 y H14D2 fue determinada mediante pozos existentes en el lugar de medición, por lo que no fue necesaria la utilización de barrenos.

Tabla 6.16: Resultados campaña de evaporación I Región, Salar del Huasco, Zona 4.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	27-04-2008	3,7	0,00	---	Despejado	1.000
H13D1	27-04-2008	0,102	3,34	Arena	Despejado	999,5
H14D2	27-04-2008	0,161	0,99	Arena	Despejado	999,5
H15D1	28-04-2008	1,635	0,11	Arena	Despejado	1.000
H16D2	28-04-2008	0,862	0,37	Arena	Despejado	1.000

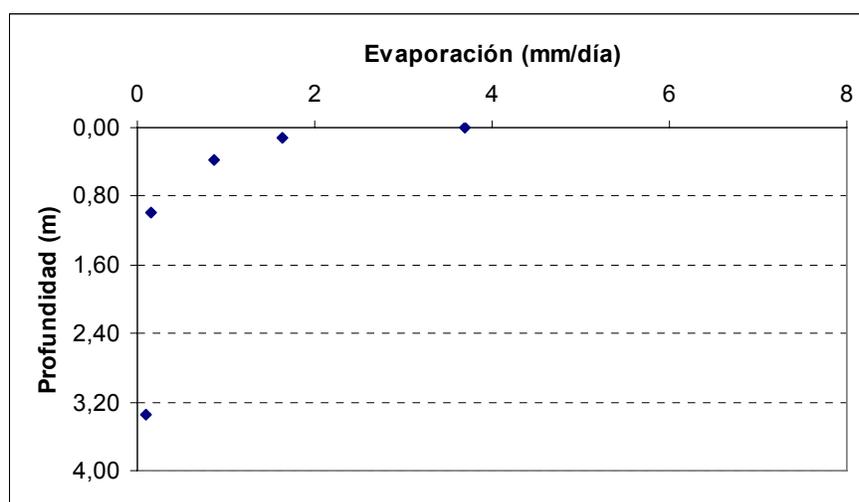


Figura 6.10: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 4.

Resumen

Durante las labores de terreno realizadas en el Salar de Huasco, Primera Región, no se detectaron diferencias marcadas en la densidad de las aguas de los diversos sectores de la cuenca. Los valores mínimos observados bordean los 1.000 g/l y los máximos los 1.002,5 g/l.

Como puede observarse, las tasas de evaporación calculadas tienden a ser mayores en la medida que aumenta el tamaño de los granos que componen el suelo. De esta forma, para una profundidad del nivel de saturación cercano a los 0,2m, tenemos una evaporación de 1,37mm/día en el punto H1D1 (compuesto de arena) y una tasa diaria de 1.04 mm en el punto H9D1 (correspondiente a un suelo franco arenoso). Las mediciones realizadas representan una variación mayor al 30%.

La Figura 6.11 presenta un gráfico resumen de todas las mediciones de evaporación hechas en la cuenca del salar de Huasco. Se muestran tasas de evaporación registradas sobre distintas superficies y condiciones climáticas, que permite hacerse una idea general del comportamiento de la evaporación en la cuenca. Los resultados fueron normalizados según la evaporación desde superficies de agua libre (E0) de cada zona.

Existe una tendencia en los puntos graficados que muestra una disminución de la tasa de evaporación a medida que la napa se encuentra más profunda.

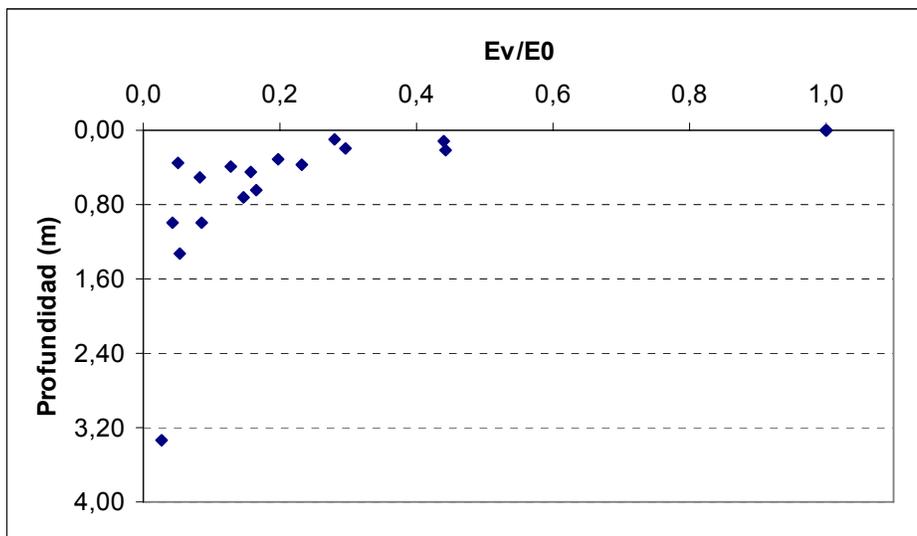


Figura 6.11: Evaporación v/s Profundidad de la napa I Región.

6.1.2.2 Región II de Antofagasta

Las cuatro zonas de medición en la II Región de Antofagasta se muestran en la Figura 6.12. Además, se muestra la ubicación específica de los puntos seleccionados dentro de cada zona, indicando profundidad de la napa en cada uno de ellos y su nombre de identificación. Los círculos de color azul corresponden a zonas donde se monitoreó evaporación de tanque.

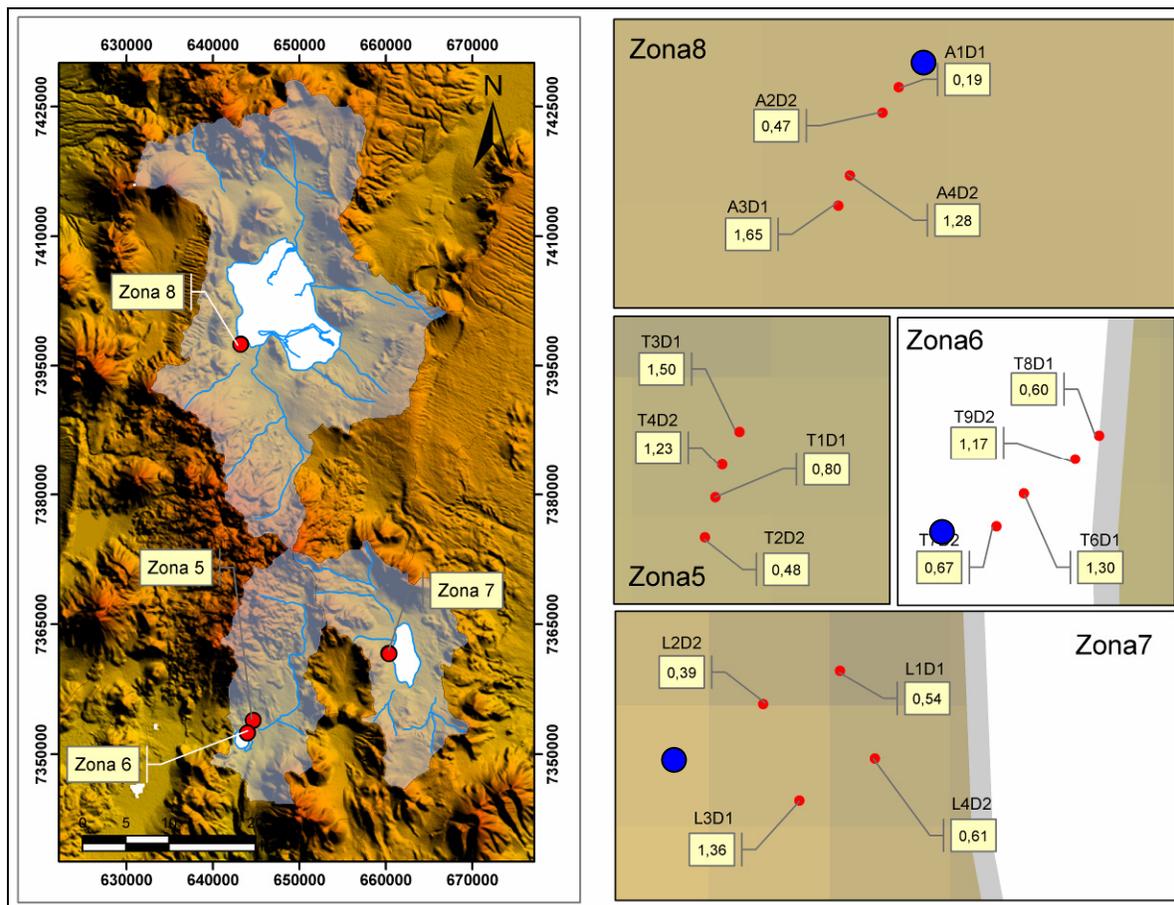


Figura 6.12: Ubicación puntos de medición II Región.

Las dos zonas ubicadas en Tuyajto (Zonas 5 y 6) se encuentran en la vecindad de la laguna del mismo nombre, una sobre costra salina y la otra en el margen norte del salar. Los niveles freáticos en los puntos monitoreados iban entre 0,4 y 1,5 metros de profundidad.

En el Salar de El Laco se midió sobre el salar propiamente tal, con profundidades de napa que van desde 0,4 a 1,4 metros.

La zona 8, ubicada en el Salar de Aguas Calientes 2, se sitúa al sur-oeste de la costra de sal, donde se registró una profundidad mínima de 0,19 m y una máxima de 1,65 m.

Las estimaciones de evaporación instantánea se realizaron en forma sistemática desde las 07:00 hasta las 19:30, con un intervalo de medición constante de 30 minutos.

➤ Laguna Tuyajto

En Tuyajto se efectuaron mediciones de evaporación en ocho puntos agrupados en dos zonas, denominadas como zona 5 y zona 6.

La litología superficial indicó que los suelos de la zona 5 son arenosos, mientras que los de la zona 6, ubicada sobre costra salina, poseen un mayor porcentaje de finos y corresponden a suelos del tipo franco.

En la Tabla 6.17 y en la Tabla 6.18 se presenta un resumen con los datos obtenidos en la campaña de terreno realizada durante diciembre de 2007. Por su parte, la Figura 6.13 y la Figura 6.14 muestran la relación entre flujos de evaporación y profundidad de saturación en estas zonas.

Zona 5

En las 4 zonas evaluadas en la Segunda Región se estimó la densidad de las aguas monitoreadas y su temperatura. Los valores de temperatura mostrados en la Tabla 6.17 muestran que para esta zona varió entre 13,5 y 18 °C.

Debido a la profundidad de la napa y a la inestabilidad de la perforación, no fue posible tomar muestras de agua desde el acuífero en el punto T3D1, luego no se dispone de información de temperatura ni densidad para dicho punto.

Tabla 6.17: Resultados campaña de evaporación II Región, Laguna Tuyajto, Zona 5.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad	Temperatura
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)	(°C)
Tanque	---	7,14	0	---	---	---	---
T1D1	08-12-2007	0,142	0.8	Arena	Despejado	1001	17,7
T2D2	08-12-2007	0,291	0.48	Arena	Despejado	1001.5	15,5
T3D1	10-12-2007	0,174	1.5	Arena	Despejado	S/M	---
T4D2	10-12-2007	0,223	1.23	Arena	Despejado	1001	13,5

Las tasas de evaporación se comportan de manera similar a lo teóricamente esperable (Figura 6.13). Aunque no se realizaron mediciones en napas más someras que 0,48 m de profundidad, a partir de este punto podría verse un leve cambio en la pendiente de la curva cuando se acerca al nivel de terreno.

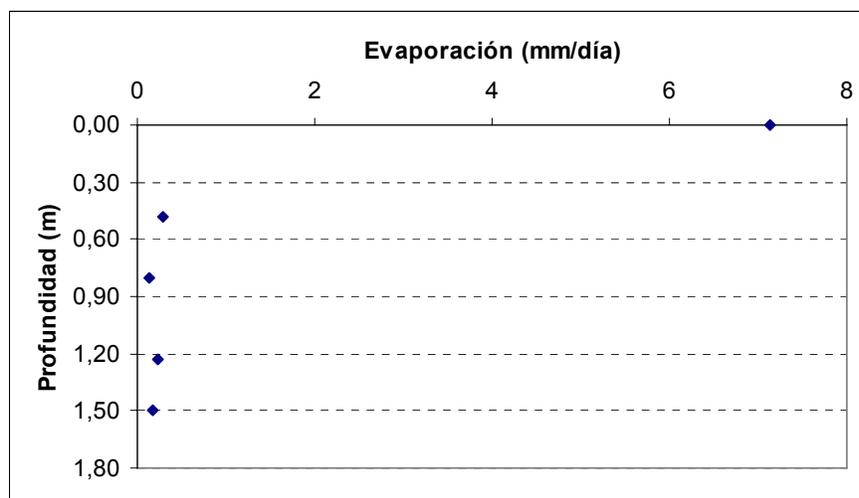


Figura 6.13: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 5.

Zona 6

Las tasas de evaporación registradas en la zona 6 fluctúan entre cerca de 0,2 mm/día y 0,8 mm/día.

Las condiciones climáticas se mantuvieron estables durante los dos días de medición. A pesar de esto los valores difieren del comportamiento teórico, con relaciones aceptables para un mismo día, no así al considerarlos conjuntamente (Tabla 6.18 y Figura 6.14). La presencia de un estrato impermeable o un mayor espesor de la costra salina sobre los puntos T8D1 y T9D2 podrían explicar los valores observados.

En algunos puntos de medición hubo dificultades para determinar la profundidad de la napa. El suelo presentó un alto contenido de humedad en los primeros centímetros de la perforación y una vez alcanzada la zona saturada el proceso de estabilización del nivel freático fue lento, alcanzando niveles dispares en las diversas punteras de un mismo sector. Debido a esto, la medición en el punto T6D1 se consideró anómala y no es incluida en análisis posteriores.

Tabla 6.18: Resultados campaña de evaporación II Región, Laguna Tuyajto, Zona 6.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad	Temperatura
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)	(°C)
Tanque	11-12-2007	7,14	0	---	Despejado	1.001	16,3
T6D1	11-12-2007	0,813	1,30	Franco limoso	Despejado	1.007	15
T7D2	11-12-2007	0,701	0,67	Franco arenoso	Despejado	1.005	20
T8D1	12-12-2007	0,363	0,60	Franco arenoso	Despejado	1.001,5	16,1
T9D2	12-12-2007	0,211	1,17	Franco	Despejado	1.001,5	19,7

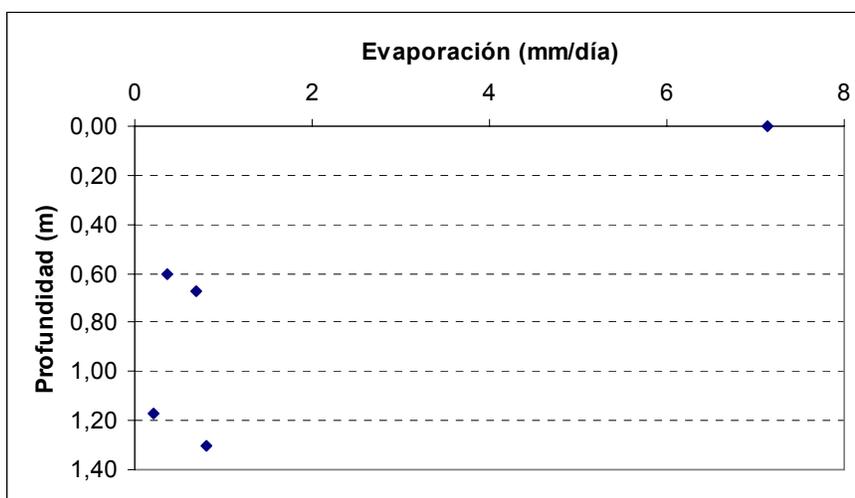


Figura 6.14: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 6.

➤ Salar de El Laco

Zona 7

Se midió evapotranspiración en cuatro puntos ubicados sobre el salar del Laco propiamente tal. Las profundidades del nivel freático en la zona 7 variaban entre 0,4 y 1,4 metros.

Los suelos aquí presentes tienen a una textura franco-arenosa, con un alto contenido de arena, seguido de limos y en menor medida arcillas.

La representación gráfica de los resultados obtenidos muestra una clara tendencia de disminución de la tasa de evaporación con el aumento de la profundidad de la napa (Tabla 6.15).

Tabla 6.19: Resultados campaña de evaporación II Región, Salar de El Laco, Zona 7.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad	Temp.
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)	(°C)
Tanque	13-12-2007	6,65	0	---	N. O.*	1.000,5	14,3
L1D1	13-12-2007	0,275	0,55	Franco arenoso	Despejado	1.000	20,5
L2D2	13-12-2007	0,849	0,39	Franco arenoso	Despejado	1.000	17,4
L3D1	14-12-2007	0,373	1,36	Franco	P. N.**	1.001	13,2
L4D2	14-12-2007	0,665	0,61	Franco	P. N.**	---	---

*N. O.: Nubes Ocasionales; **P. N.: Parcialmente Nublado

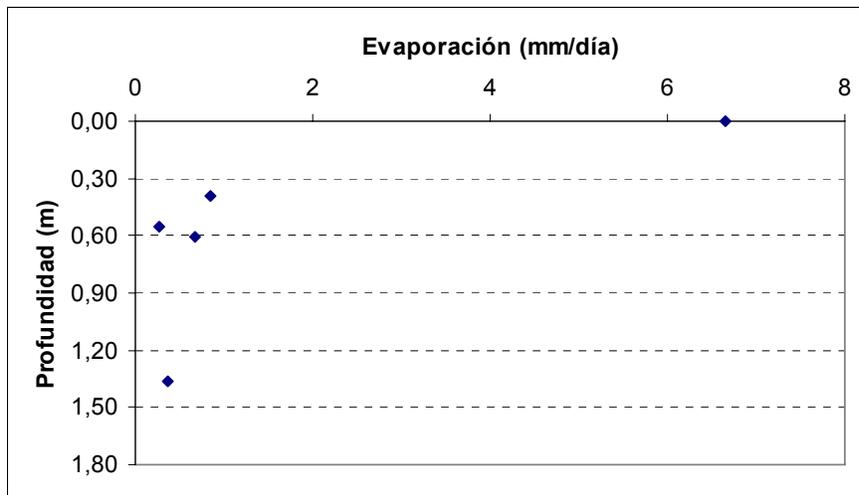


Figura 6.15: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 7.

Dada la inestabilidad de la puntera en el punto L4D2 no fue posible tomar muestra de agua. Los puntos muestreados poseen características similares entre sí, con densidades cercanas a los 1.000 g/l y temperaturas variables entre 13 y 20 °C (Tabla 6.19).

Durante el segundo día de medición (puntos L3D1 y L4D2) hubo nubes ocasionales que no muestran una influencia significativa en los valores obtenidos.

➤ Salar de Aguas Calientes 2

Zona 8

Se monitorearon 4 puntos en suelo de textura gruesa, principalmente arenas (mayor al 90%).

Los flujos evaporativos en la zona disminuyen en forma abrupta con el aumento de la profundidad del nivel saturado (Figura 6.16), con una tasa máxima de 1,4 mm/día a los 19 cm de profundidad y un mínimo de 0,12 mm/día cuando la napa se encuentra a 1,65 m de profundidad.

Al igual que en algunas de las zonas anteriores, no fue posible muestrear agua desde todos los puntos definidos. El único dato obtenido en terreno es de la densidad de 1.000,5 g/l y una temperatura de 16,5 °C, cifras que se encuentran dentro de los rangos observados en los otros puntos de control. Debido a esto, se asumió que las características de los escurrimientos subterráneos en los puntos sin información serán similares a las presentes en las zonas muestreadas, por lo que no se aplicaron correcciones por salinidad.

Tabla 6.20: Resultados campaña de evaporación II Región, A. Calientes 2, Zona 8.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad	Temp.
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)	(°C)
Tanque	15-12-2007	6,3	0	---	N. O.*	1.001	12,5
A1D1	15-12-2007	1,408	0,19	Arena	N. O.*	1.000,5	16,5
A2D2	15-12-2007	0,763	0,47	Arena	N. O.*	---	---
A3D1	16-12-2007	0,122	1,65	Arena	N. O.*	---	---
A4D2	16-12-2007	0,296	1,28	Arena	N. O.*	---	---

*N. O.: Nubes Ocasionales

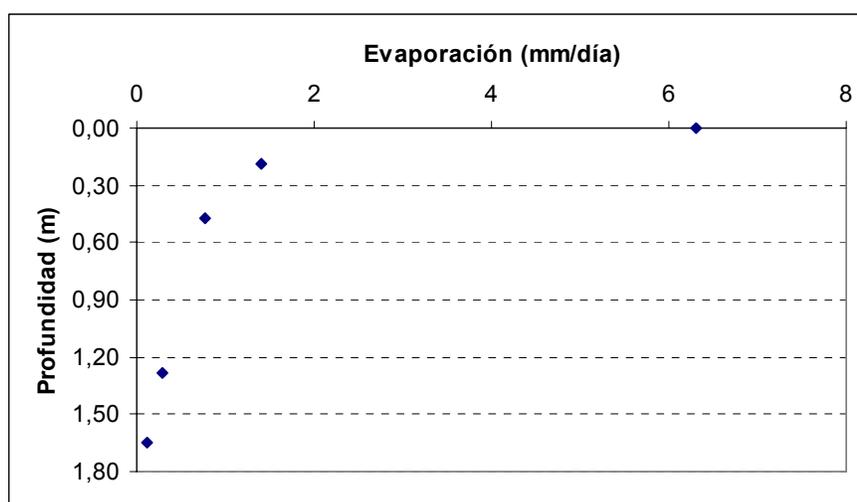


Figura 6.16: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 8.

Durante el transcurso de las mediciones las condiciones climáticas presentaron inestabilidad, aunque en líneas generales la demanda evaporativa total fue similar para ambos días.

Resumen

Al comparar las tasas de evaporación medidas en las diferentes zonas (sobre diferentes composiciones texturales) a una profundidad de saturación de 47, se tiene que para un suelo arenoso (zona 5) la tasa de evaporación medida fue un 60% menor que la tasa medida en en la zona 8 (también formada por arenas), donde se obtuvo una tasa diaria de 0,76 mm. Esta diferencia puede deberse a que las mediciones fueron realizadas bajo distintas condiciones atmosféricas y litológicas. Por su parte, la tasa de evaporación interpolada linealmente entre los puntos a 0,39 y 0,55 m de la zona 7 (suelo mixto con predominancia de arenas) fue de 0,56 mm/día, valor que representa un 30% de disminución con respecto al flujo medido en la zona

La ubicación de las cuatro zonas y el detalle de los 17 puntos muestreados se presenta en la Figura 6.18. Se indica el nombre y profundidad de los puntos de medición y la ubicación de tanques evaporímetros instalados durante las campañas de terreno (círculos azules).

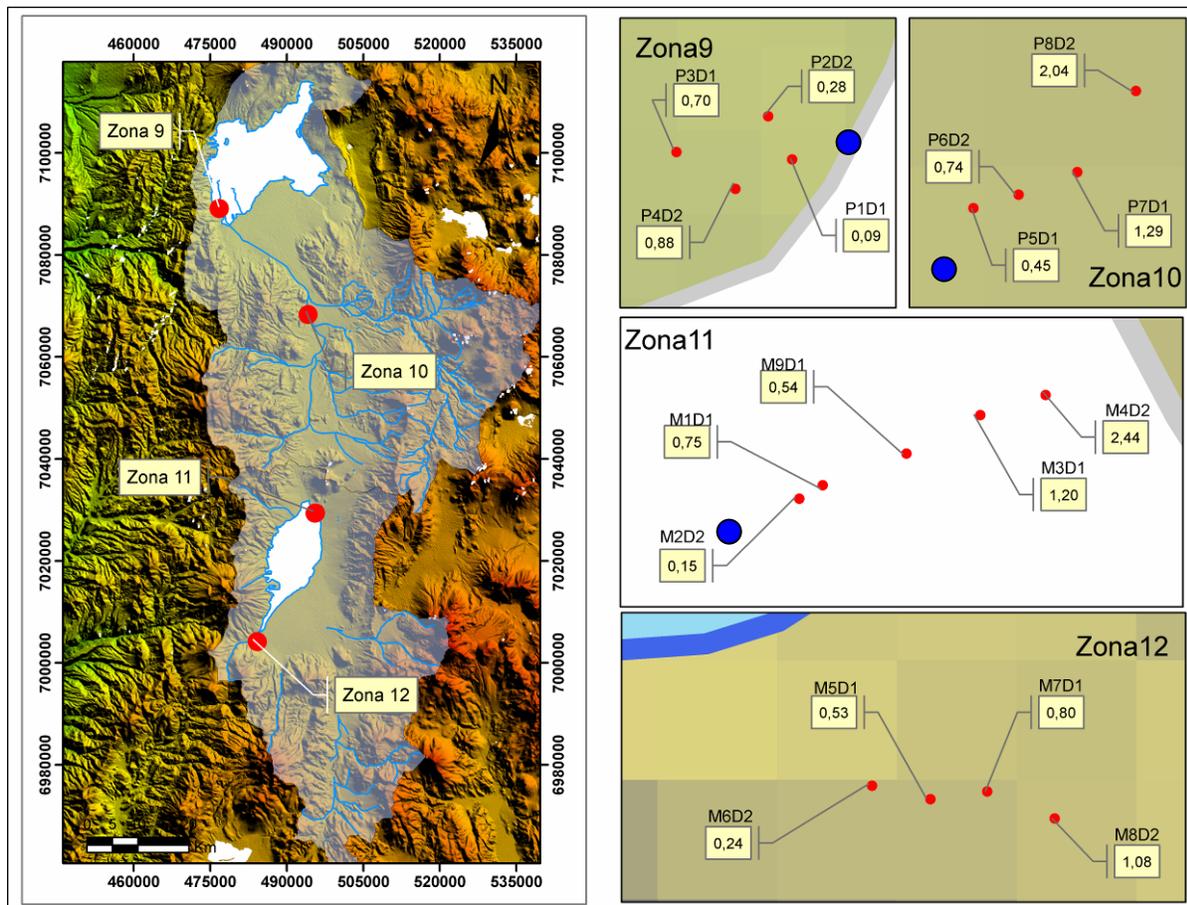


Figura 6.18: Ubicación puntos de medición III Región.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la campaña de terreno realizada en la III Región de Atacama. Entre la Tabla 6.21 y la Tabla 6.24 se exponen las principales variables de interés. Por su parte, entre la Figura 6.19 y la Figura 6.22 se presentan gráficamente las tasas de evaporación medidas.

➤ Salar de Pedernales

Zona 9

En esta zona se midió evaporación en la napa más somera del presente estudio. Esta correspondió al punto denominado P1D1, con una profundidad de saturación de 8 cm. Allí se registró una tasa de 1,2 mm/día, equivalente al 25% de la evaporación desde superficies de agua libre obtenida en terreno.

Tabla 6.21: Resultados campaña de evaporación III Región. S. Pedernales, Zona 9.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	07-03-2008	4,9	0,00	---	P. N.*	1.003
P1D1	07-03-2008	1,209	0,08	Franco arenoso	P. N.*	1.003
P2D2	07-03-2008	0,557	0,28	Franco arenoso	P. N.*	1.013
P3D1	08-03-2008	0,375	0,70	Franco arenoso	Despejado	1.005,5
P4D2	08-03-2008	0,513	0,88	Franco	Despejado	1.003

*P. N.: Parcialmente Nublado

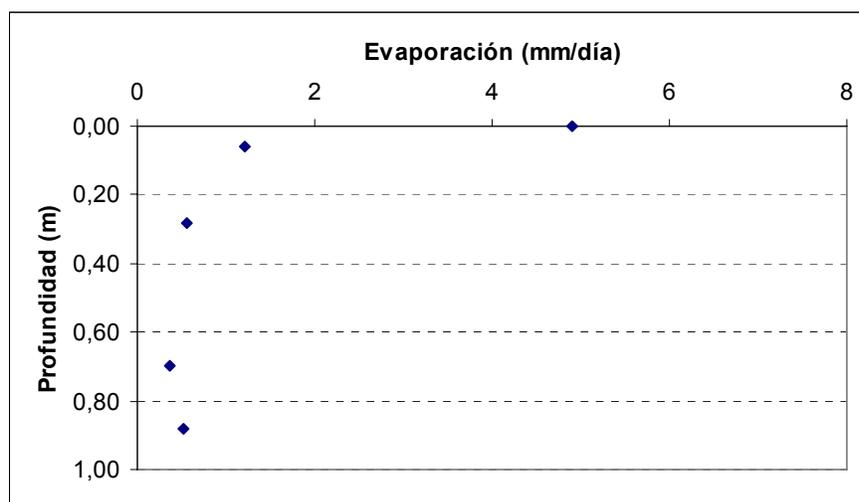


Figura 6.19: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 9.

De acuerdo a la Figura 6.19, a excepción del punto P4D2 los demás siguen la forma de alguna de las relaciones propuestas entre la tasa de evaporación y la profundidad de la napa.

Las densidades registradas presentaron variaciones de hasta 10 g/l (Tabla 6.21). Esta diferencia se traduciría en una corrección de los flujos de evaporación cercana al 1%. Se considera que ajustes menores al 5% son irrelevantes comparados con la influencia de otros factores con mayor incertidumbre involucrados en el fenómeno.

Zona 10

En la Figura 6.20 se ha graficado la relación entre la tasa de evaporación cuantificada mediante la metodología del domo y la profundidad de saturación del suelo para la zona de medición 10. Se observa que a partir de los 0,75 m el flujo de evaporación comienza a

estabilizarse alrededor de los 0,4 mm/día, experimentando un leve descenso para profundidades mayores.

Las condiciones climáticas durante la medición se mantuvieron estables, con cielos despejados. De la misma forma, las densidades de los puntos muestreados no presentaron grandes variaciones (Tabla 6.22).

Los suelos de la zona presentaron un alto contenido de granos gruesos, correspondientes a una clasificación textural arenosa.

Tabla 6.22: Resultados campaña de evaporación III Región, Pedernales, Zona 10.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	09-03-2008	6,1	0,00	---	Despejado	1.003
P5D1	09-03-2008	0,912	0,45	Arena francosa	Despejado	1.004
P6D2	09-03-2008	0,423	0,74	Arena	Despejado	1.002
P7D1	10-03-2008	0,459	1,29	Arena	Despejado	1.000
P8D2	10-03-2008	0,378	2,04	Arena	Despejado	---

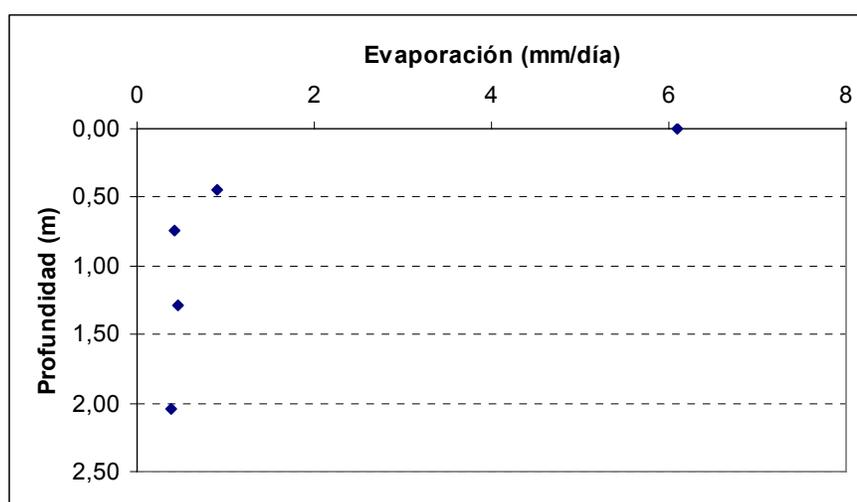


Figura 6.20: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 10.

➤ Salar de Maricunga

Zona 11

En esta zona se monitoreó evaporación durante 3 días en cinco puntos del salar de Maricunga, los que fueron agrupados en la zona de estimación 11.

La zona definida se caracteriza por suelos de composición mixta con predominancia de partículas de arena. Las mediciones fueron realizadas bajo condiciones climáticas estables.

Tabla 6.23: Resultados campaña de evaporación III Región, Maricunga, Zona 11.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	12-03-2008	6,1	0,00	---	Despejado	1.027
M1D1	12-03-2008	0,441	0,72	Areno francoso	Despejado	1.000,5
M2D2	12-03-2008	1,458	0,15	Areno francoso	Despejado	1.000,5
M3D1	13-03-2008	0,347	1,20	Franco arenoso	Despejado	1.000
M4D2	13-03-2008	0,257	2,44	Franco arenoso	Despejado	1.000
M9D1	14-03-2008	0,458	0,54	Areno francoso	Despejado	1.000,5

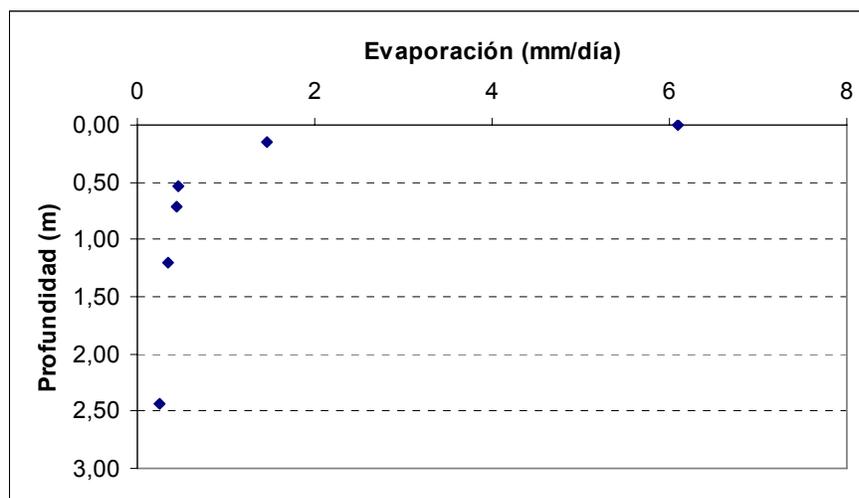


Figura 6.21: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 11.

En la Tabla 6.23, y Figura 6.21 se observa que los puntos muestreados siguen un comportamiento similar al teórico, con una disminución acelerada de la evaporación para los niveles de saturación superiores a los 0,5 m de profundidad y menos pronunciados para niveles más someros. La menor tasa registrada fue de 0,26 mm/día, que se alcanzó a los 2,5 m.

Cabe señalar que la obtención de una tasa de evaporación diaria de 0,2 mm es el resultado de más de 20 mediciones instantáneas, muchas de las cuales poseerán un valor mayor a la tasa media. Para el caso del punto M4D2 (0,26 mm/día), la mayor tasa instantánea obtenida fue de 0,85 mm/día.

Zona 12

Los últimos cuatro puntos muestreados correspondieron a la zona 12, ubicada en el margen sur-este de la Laguna Santa Rosa.

Las densidades de aguas muestreadas en esta zona fueron prácticamente iguales, lo mismo que las condiciones climáticas durante los trabajos de campo (Tabla 6.24). Por su parte, la litología superficial de la zona es de un material mixto con predominancia de arenas, clasificándose como suelo areno francoso.

En la Figura 6.22 se muestra que, para una profundidad del nivel freático de 24 cm, la tasa de evaporación máxima fue de 0,82 mm/día, la que disminuye hasta alcanzar los 0,27 mm/día a una profundidad de 1,08 m.

Tabla 6.24: Resultados campaña de evaporación III Región, Maricunga, Zona 12.

Id	Fecha	Ev.	Prof. napa	Textura	Clima	Densidad
		(mm/día)	(mbnt)			(g/l)
Tanque	---	6,1	0,00	---	---	---
M5D1	15-03-2008	0,396	0,53	Arena	Despejado	1.000
M6D2	15-03-2008	0,816	0,24	Franco arenoso	Despejado	1.000
M7D1	16-03-2008	0,328	0,80	Areno francoso	Despejado	1.000
M8D2	16-03-2008	0,266	1,08	Areno francoso	Despejado	1.001

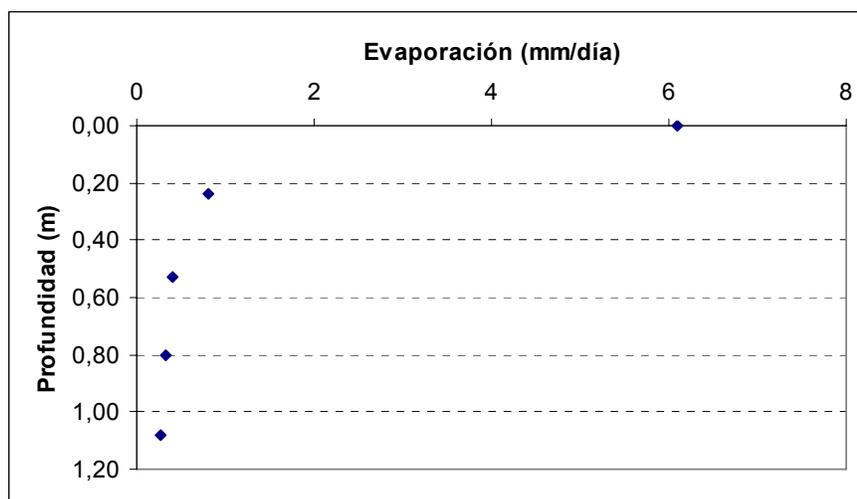


Figura 6.22: Evaporación v/s Profundidad de la napa Zona 12.

Resumen

Al comparar los valores de las zonas 11 y 12 (ambos formados por suelos mixtos con predominancia de arenas), se observa que para una profundidad de 0,5 m y condiciones climáticas similares, ambos suelos registran tasas de evaporación de la misma magnitud (0,46 y 0,4 mm/día respectivamente) con una diferencia inferior al 15%.

La zona 10 (arenas gruesas) presentó un nivel freático a 45 cm de profundidad y una tasa de evaporación de 0,912 mm/día, mientras que para una profundidad de 0,74 m la tasa fue de 0,42 mm/día. Interpolando linealmente estos valores para comparar con las zonas 11 y 12, se obtuvo una tasa de 0,83 mm/día para una profundidad de 0,5 m, que representa poco más del doble de lo registrado en la zona 12.

La zona 9 no se incluyó en la comparación dado que las condiciones climáticas fueron inestables y la demanda evaporativa durante el primer día fue considerablemente menor a la registrada en las otras zonas.

La Figura 6.23 muestra las tasas de evaporación normalizadas que se obtuvieron durante la campaña realizada en la III Región de Atacama. Se observa una disminución de la evaporación con la profundidad que podría ser representativa de los suelos y condiciones meteorológicas en la zona de estudio.

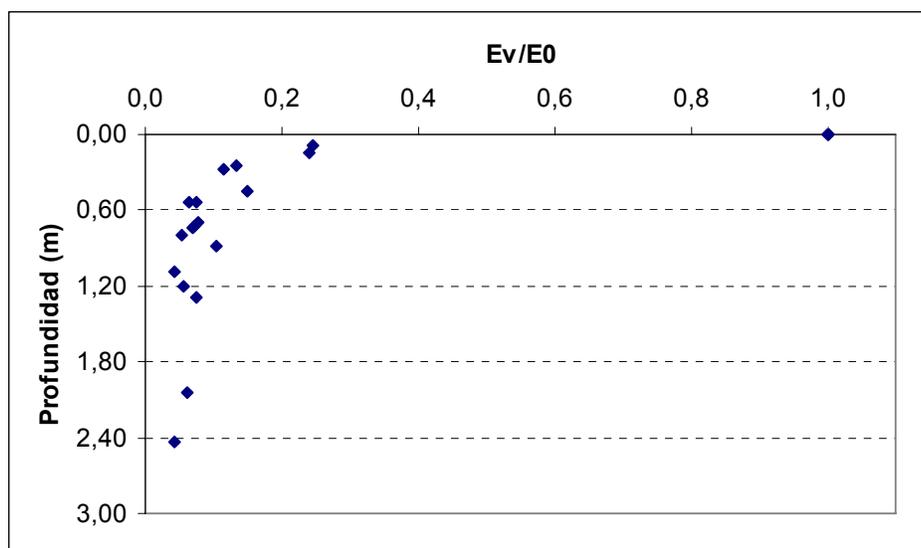


Figura 6.23: Evaporación v/s Profundidad de la napa III Región.

Los resultados obtenidos durante las tres campañas realizadas, son representativos de diversos tipos de suelos y condiciones climáticas.

El análisis de los datos de evaporación permite concluir que la tasa de evaporación depende principalmente de la profundidad a la que se encuentra la napa y de la composición litológica de la zona no saturada del perfil de suelo. Cabe señalar que si bien la textura es un parámetro importante en la caracterización del perfil de suelo, existen otras características no consideradas que influyen en el proceso. Estas propiedades tienen relación con la cantidad de sales en el suelo, la presencia de materia orgánica y otras estructuras que no se reflejan en el análisis granulométrico y textural.

Las densidades de las muestras en las 6 cuencas no presentaron grandes variaciones, con valores que fluctuaron entre los 1.000 y los 1.027 g/l.

Como criterio general puede establecerse que para iguales condiciones atmosféricas y profundidad de saturación, los suelos con un mayor contenido de arena presentan mayores tasas de evaporación.

6.2 Curvas de Evaporación

Establecer curvas de evaporación permite definir una relación analítica (continua) entre la evaporación a través del suelo y la profundidad de saturación del agua subterránea. Mediante el análisis de los posibles ajustes a los datos colectados se puede estudiar el comportamiento de la evaporación para niveles de napa someros, así como determinar valores para la profundidad de extinción de la evaporación.

De acuerdo con la bibliografía consultada las mediciones de evaporación fueron ajustadas siguiendo los modelos exponencial (Philip, 1957), exponencial modificado (Grilli, 1986), lineal (Harbaugh, 1988) y potencial (Morel-Seytoux, 1989).

Las curvas ajustadas son de carácter regional y no zonal, es decir, se consideró una por cada Región Administrativa. Con esto se reduce la influencia de errores puntuales de medición y se evita la necesidad de caracterizar detalladamente los suelos de las zonas de estudio. De esta forma, la metodología propuesta consiste en utilizar valores promedio a nivel de cuenca o Región, para determinar flujos a la atmósfera a esta misma escala.

Cuando se han caracterizado los suelos y se cuenta con suficientes mediciones de evaporación en cada zona, se recomienda construir curvas relacionando estos parámetros. Así se podría estimar caudales a la atmósfera e integrar después en toda la cuenca conociendo su litología.

Para comparar estimaciones en distintos días e incluso en diferentes estaciones del año, se requiere normalizar la evaporación (E_N) usando la evaporación potencial (de superficie de agua libre) del día en que éstas se efectuaron. Como medida representativa de esta demanda evaporativa de la atmósfera se consideró la evaporación desde lagunas o superficies de agua libre, equivalente a la evaporación de tanque corregida por los factores de bandeja y salinidad.

Por lo tanto, todas las mediciones con la metodología del domo se dividieron por la tasa de evaporación máxima ($E0$).

Debido a consideraciones prácticas, sólo se cuenta con un valor de evaporación superficial por zona; un dato promedio por cada dos días de medición.

La comparación de los diferentes ajustes realizados se hizo observando el error cuadrático medio (ECM) y el parámetro “*Fit*” o índice de correlación, que se obtiene de la siguiente expresión:

$$Fit = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{\sum_i (\hat{Q}_i - Q_i)^2}}{\sqrt{\sum_i (\hat{Q}_i - \bar{Q})^2}} \right) \quad (6.1)$$

Donde \hat{Q}_i son los valores estimados mediante el ajuste, Q_i son los valores medidos en terreno y \bar{Q} representa el promedio de los valores observados. Cuando “*Fit*” alcanza un valor de 100, las series de valores medidos y calculados coinciden entre sí.

Con el fin de lograr un ajuste satisfactorio en los tramos de interés, las curvas conseguidas usando la minimización del ECM fueron corregidas mediante un ajuste visual, cuando se consideró necesario.

Al calibrar el ajuste exponencial la estructura le asigna una mayor importancia relativa a los puntos de menor profundidad. En este tramo la curva es casi horizontal, por lo que una pequeña desviación en sentido vertical se traducirá en un aumento considerable en el ECM. Para profundidades mayores la curva posee una forma prácticamente vertical, por lo que una traslación en ese sentido no involucrará grandes cambios en el ECM.

Una situación similar ocurre en la calibración del modelo lineal. En este tipo de ajuste se impone una evaporación nula cuando la recta ajustada predice valores negativos. Debido a esto, los valores de evaporación desde napas relativamente más profundas prácticamente no influyen los parámetros de calibración.

6.2.1 Región I de Tarapacá

Usando los 16 puntos muestreados en la cuenca del salar del Huasco se ajustaron curvas de evaporación. La Figura 6.24 presenta los ajustes obtenidos usando las cuatro expresiones con que se trabajó. Como se observa, la curva exponencial modificada posee el mismo comportamiento que la del tipo exponencial. De esto se desprende que los suelos de la cuenca no permiten una evaporación igual a la potencial para napas someras.

Las curvas calibradas pueden ser expresadas mediante las siguientes ecuaciones:

➤ Exponencial $E_N = e^{-4,2 \cdot Z}$ (6.2)

➤ Exp. modificada $E_N = e^{-4,2 \cdot (Z-0)}$ (6.3)

➤ Lineal $E_N = -2,05 \cdot Z + 1$ (6.4)

➤ Potencial $E_N = 0,083 \cdot Z^{-0,714}$ (6.5)

Tanto para el análisis del error cuadrático medio como para el índice de correlación, el mejor ajuste obtenido corresponde al modelo potencial (Tabla 6.25).

Tabla 6.25: Bondad de ajuste curvas I Región.

Curva	ECM	Fit
Exponencial	0,124	54,82
Exp. Modificado	0,124	54,82
Lineal visual	0,191	42,36
Potencial	0,073	66,93

El criterio para definir la profundidad de extinción de la evaporación depende del tipo de curva. Para el caso del ajuste lineal esta profundidad puede determinarse en forma directa de la ecuación, despejando el término Z para una evaporación normalizada nula. Por su parte, la profundidad de extinción para los ajustes exponenciales se definió como aquella que entrega una evaporación diaria menor a 0,001 mm/día.

Las curvas de tipo potencial tienden a una estabilización asintótica, definiendo una tasa de evaporación residual que se mantiene aproximadamente constante a lo largo del perfil del suelo. Debido a esto, no es posible definir un criterio para la profundidad de extinción y cada caso debe analizarse en forma particular.

Las profundidades de extinción obtenidas son de 0,49 m para el ajuste lineal y de 1,81 m para el caso exponencial. Para el ajuste potencial, a una profundidad de 18,3 m la tasa de evaporación proyectada es de 0,01 mm/día, y disminuye a la mitad cuando la profundidad del nivel freático es de 45,3 metros. La variación de la evaporación entre ambas profundidades en relación a la tasa máxima es de 0,5%.

Se observa en la Figura 6.24 y en la Tabla 6.25 que de manera general el ajuste lineal no representa en buena forma el comportamiento de los datos colectados en terreno. Debido a su simplicidad en términos de información requerida para su construcción, esta forma es comúnmente usada en modelos de simulación hidrogeológica. Para mejorar su

representatividad pueden definirse tramos de ajuste, con una recta para puntos superficiales y otra para los más profundos.

La Figura 6.25 presenta el ajuste lineal a los puntos de la I Región (Salar del Huasco), considerando una calibración de dos tramos. Las ecuaciones que describen este comportamiento son:

$$E_N = -3,680 \cdot Z + 1 \quad 0 < Z < 0,23 \quad (6.6)$$

$$E_N = -0,112 \cdot Z + 0,194 \quad Z > 0,23 \quad (6.7)$$

La bondad de ajuste queda definida por un ECM de 0,114 (disminución del 41%) y un índice de correlación de 54,75, lo que representa un incremento del 29%.

Finalmente, para este caso la profundidad de extinción alcanza un valor de 1,73 m.

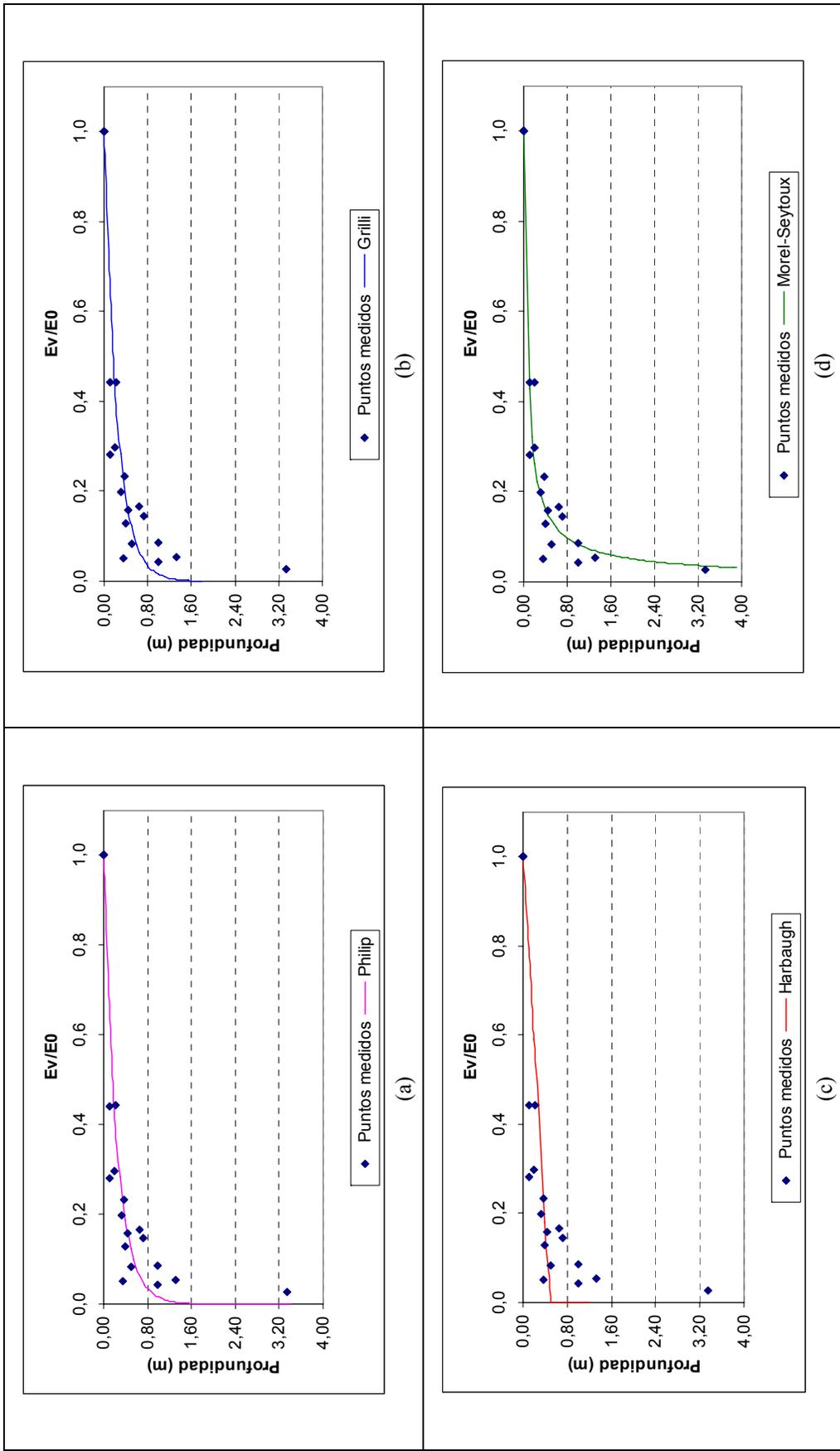


Figura 6.24: Curvas de ajuste I Región, Salar del Huasco. (a) Modelo exponencial, (b) Modelo exponencial modificado, (c) Modelo lineal, (d) Modelo potencial.

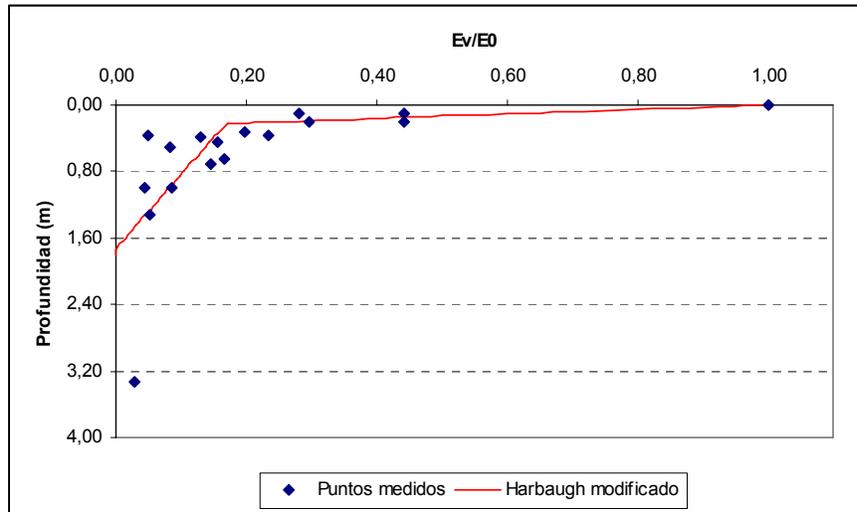


Figura 6.25: Ajuste lineal modificado, I Región, Salar del Huasco.

6.2.2 Región II de Antofagasta

Las relaciones obtenidas para la evaporación normalizada en función de la profundidad del nivel saturado mediante los ajustes estudiados quedan expresadas por:

➤ Exponencial $E_N = e^{-4,8 \cdot Z}$ (6.8)

➤ Exp. modificada $E_N = e^{-4,8 \cdot (Z-0)}$ (6.9)

➤ Lineal $E_N = -1,6 \cdot Z + 1$ (6.10)

➤ Lineal modificada $E_N = -4,087 \cdot Z + 1$ $0 < Z < 0,23$ (6.11)

$E_N = -0,034 \cdot Z + 0,089$ $Z > 0,23$ (6.12)

➤ Potencial $E_N = 0,047 \cdot Z^{-0,919}$ (6.13)

Al igual que en la Primera Región, la curva exponencial modificada presenta los mismos parámetros de ajuste que los obtenidos en el modelo exponencial, por lo que no existe evidencia que ratifique la existencia de una franja de saturación superficial, a través de la cual se genera una tasa de evaporación constante e igual a la máxima. Debido a esto, ambas aproximaciones son tratadas en forma conjunta.

La Tabla 6.26 presenta la bondad de ajuste de las cinco curvas estimadas. El menor error cuadrático corresponde al ajuste potencial, curva que además presenta el mayor índice de correlación. Cabe señalar que el ajuste lineal modificado alcanza valores estadísticos muy cercanos al mejor ajuste.

Tabla 6.26: Bondad de ajuste curvas II Región

Curva	ECM	Fit
Exponencial	0,061	74,69
Lineal	0,150	46,45
Lineal mod.	0,032	85,87
Potencial	0,030	86,33

La Figura 6.26 muestra los ajustes obtenidos para la evaporación a través de suelos en la franja altiplánica de la II Región.

Como criterio general se ha observado que el ajuste lineal tiende a sobreestimar los caudales de descarga para niveles freáticos superficiales, mientras que subestima los flujos para napas más profundas. Por su parte, la curva potencial representa un ajuste conservador (subestima la evaporación) para las primeras capas del suelo en relación al ajuste exponencial, pero este último subestima las tasas de evaporación para profundidades mayores.

Las profundidades de extinción obtenidas son de 1,59 m para el ajuste exponencial, 0,63 m para el lineal y 2,65 m para el lineal modificado. En el ajuste potencial se tiene que a una profundidad de saturación de 5,15 m, la tasa de descarga sería de 0,01 mm/día, mientras que para 10,40 m ésta disminuiría a la mitad (0,005 m/día). Una tasa diaria de 0,001 mm se alcanzaría cuando el nivel freático se encuentra por debajo de los 60 metros de profundidad.

Debido a que las profundidades de extinción presentan grandes diferencias con los ajustes (por ejemplo, en ajuste lineal modificado es 4,2 veces mayor que en ajuste lineal), para definir su valor debe considerarse aquella que se utilizará para determinar los flujos de descarga por evaporación desde los suelos.

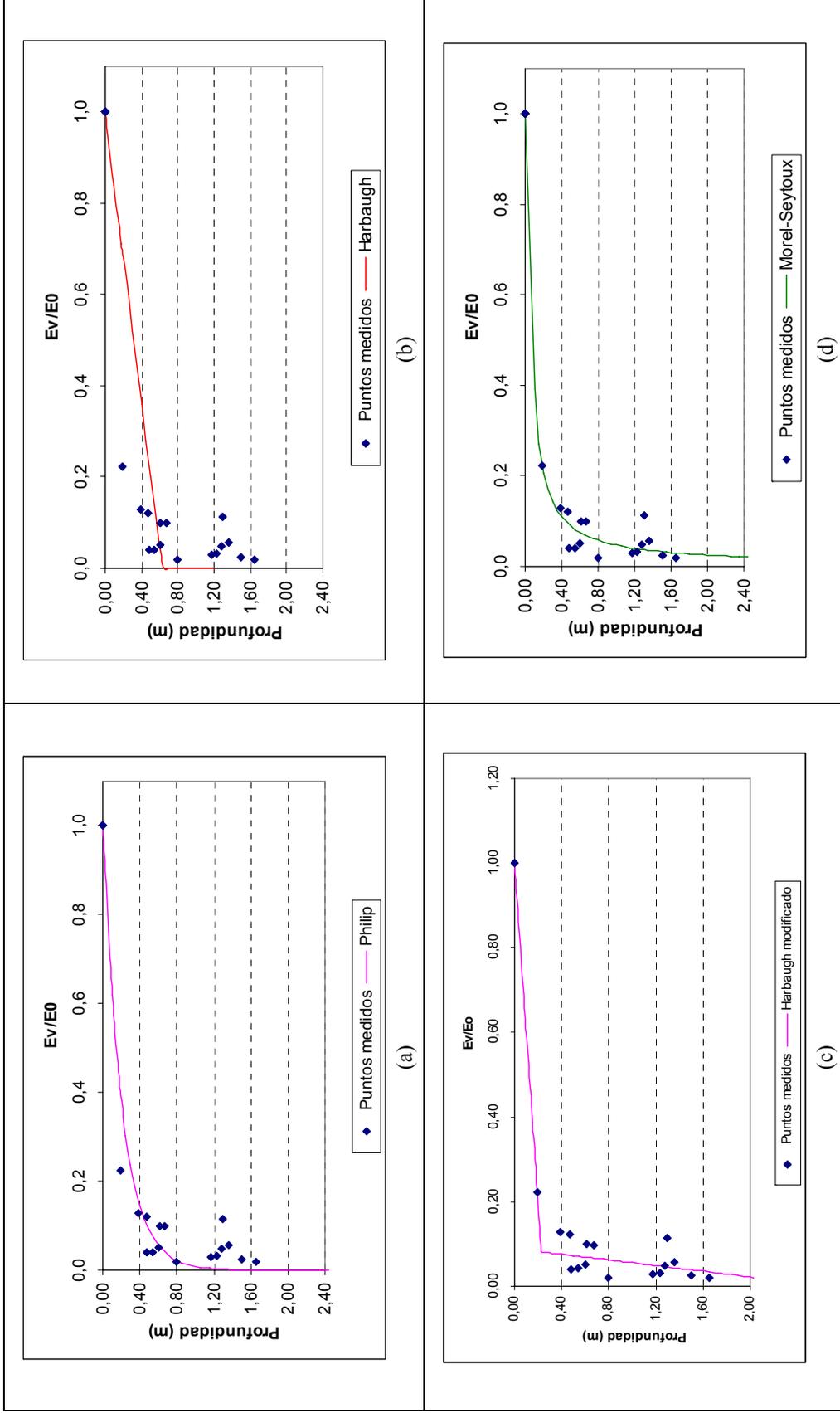


Figura 6.26: Curvas de ajuste II Región. (a) Modelo exponencial (Philip y Grilli), (b) Modelo lineal, (c) Modelo lineal de dos etapas, (d) Modelo potencial.

6.2.3 Región III de Atacama

Las curvas de evaporación para la Tercera Región se ajustaron usando los 17 puntos muestreados en las cuencas de Pedernales y Maricunga. Con esta información se calibraron las cinco curvas propuestas, obteniéndose las siguientes relaciones:

$$\text{➤ Exponencial} \quad E_N = e^{-5,5 \cdot Z} \quad (6.14)$$

$$\text{➤ Exp. Modificada} \quad E_N = e^{-5,5 \cdot (Z-0)} \quad (6.15)$$

$$\text{➤ Lineal} \quad E_N = -2,5 \cdot Z + 1 \quad (6.16)$$

$$\text{➤ Lineal modificada} \quad E_N = -6,1 \cdot Z + 1 \quad 0 < Z < 0,15 \quad (6.17)$$

$$E_N = -0,032 \cdot Z + 0,109 \quad Z > 0,15 \quad (6.18)$$

$$\text{➤ Potencial} \quad E_N = 0,065 \cdot Z^{-0,575} \quad (6.19)$$

Su representación gráfica se muestra en la Figura 6.27. Como se observa en las expresiones anteriores, en un contexto regional no se desarrolla una profundidad de desacoplamiento a partir de la cual la tasa de evaporación puede ser considerada igual a la de una superficie de agua libre.

Al igual que en las dos primeras Regiones, el mejor ajuste corresponde a la curva potencial, seguido del ajuste lineal de dos tramos. Posteriormente se encuentran el modelo exponencial y el lineal de un tramo. La Tabla 6.27 muestra la bondad de los ajustes logrados.

Tabla 6.27: Bondad de ajuste curvas III Región

Curva	ECM	Fit
Exponencial	0,115	56.36
Lineal	0,184	40.30
Lineal mod.	0,062	72.26
Potencial	0,022	89.52

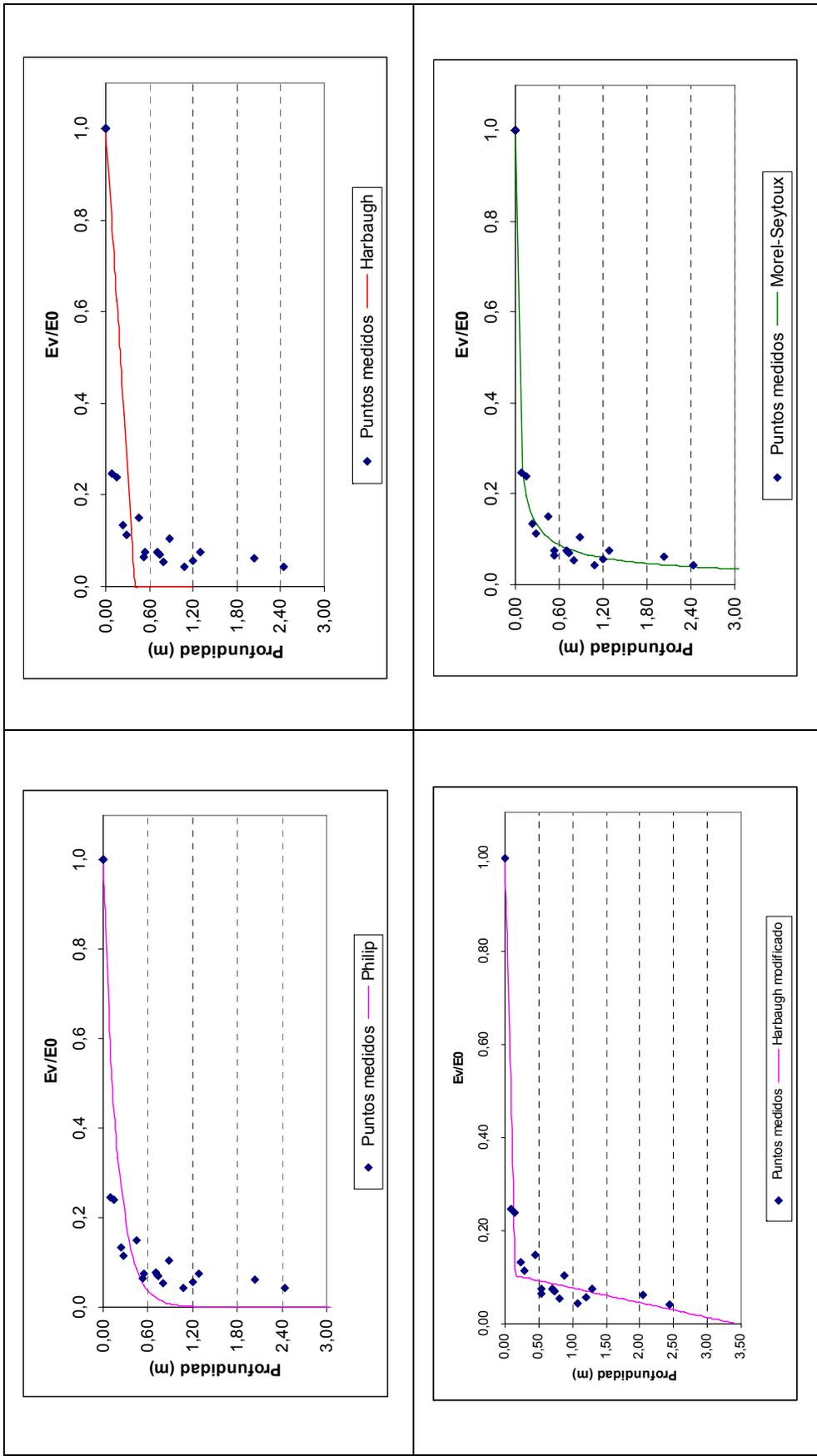


Figura 6.27. Curvas de ajuste III Región. (a) Modelo exponencial (Philip y Grilli), (b) Modelo lineal, (c) Modelo lineal de dos etapas, (d) Modelo potencial.

Las profundidades de extinción son de 1,4 m para los ajustes exponencial y exponencial modificado, 0,4 m para el caso lineal y 3,44 m para el ajuste lineal modificado. El ajuste potencial o de Morel-Seytoux entrega una tasa de evaporación de 0,01 mm/día para un nivel freático cercano a los 24 metros de profundidad. Esta tasa disminuye a la mitad cuando el nivel de saturación alcanza los 75 m.

6.2.4 Revisión y ajuste curvas Regionales

En los tres casos estudiados, uno para cada Región, la curva que obtuvo el mejor ajuste correspondió a la aproximación de Morel-Seytoux. En términos matemáticos este ajuste no converge cuando la profundidad de saturación es igual a 0, por lo que se requiere imponer una tasa de evaporación constante para $Z=0$ (evaporación desde superficies de agua libre para el caso de tasas relativas o 1 para variables normalizadas). Al normalizar los valores, los parámetros de calibración son independientes de la tasa de evaporación desde lagunas.

El ajuste analítico de la evaporación en función de la profundidad del acuífero mediante el modelo potencial puede no ser representativo de la situación real para napas freáticas cercanas a la superficie. Para contar con curvas representativas para todo el dominio, es posible construir ajustes combinados o compuestos. Una solución consiste en acoplar el ajuste exponencial para niveles someros con el ajuste potencial para napas más profundas. La Figura 6.28, la Figura 6.29 y la Figura 6.30 presentan las curvas resultantes separadas por Región.

Las ecuaciones de los ajustes compuestos para las Regiones I, II y III son:

$$\text{➤ I Región de Tarapacá} \quad E_N = e^{-5,7 \cdot z} \quad Z < 0,27 \quad (6.20)$$

$$E_N = 0,083 \cdot z^{-0,714} \quad Z > 0,27 \quad (6.21)$$

$$\text{➤ II Región de Antofagasta} \quad E_N = e^{-6,01 \cdot z} \quad Z < 0,34 \quad (6.22)$$

$$E_N = 0,047 \cdot z^{-0,919} \quad Z > 0,34 \quad (6.23)$$

$$\text{➤ III Región de Atacama} \quad E_N = e^{-11,09 \cdot z} \quad Z < 0,15 \quad (6.24)$$

$$E_N = 0,065 \cdot z^{-0,575} \quad Z > 0,15 \quad (6.25)$$

Cuyos parámetros estadísticos se presentan en la Tabla 6.8.

Tabla 6.28: Bondad de ajuste curvas combinadas

Curva	ECM	Fit
I Región	0,091	62,27
II Región	0,037	83,41
III Región	0,036	83,39

En los tres casos el error cuadrático medio (ECM) del ajuste compuesto es mayor al obtenido en los ajustes del tipo potencial, sin embargo, esta disminución en la calidad del ajuste sería aceptada en beneficio de una mayor representatividad física del fenómeno.

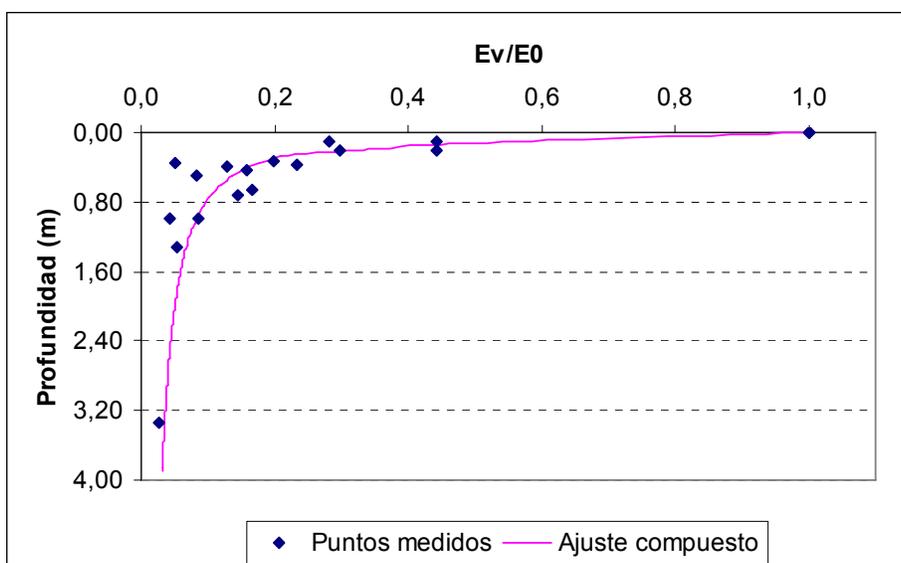


Figura 6.28: Curva compuesta I Región

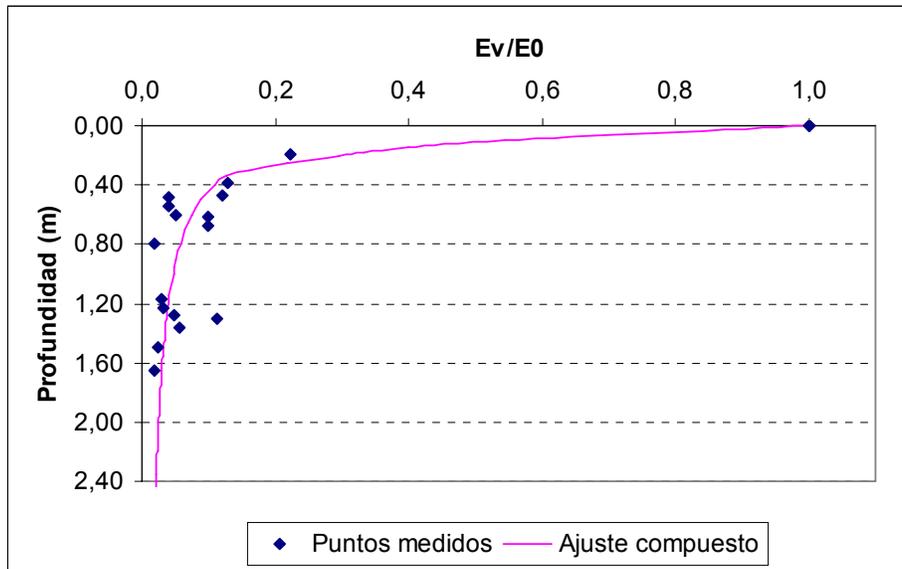


Figura 6.29: Curva compuesta II Región.

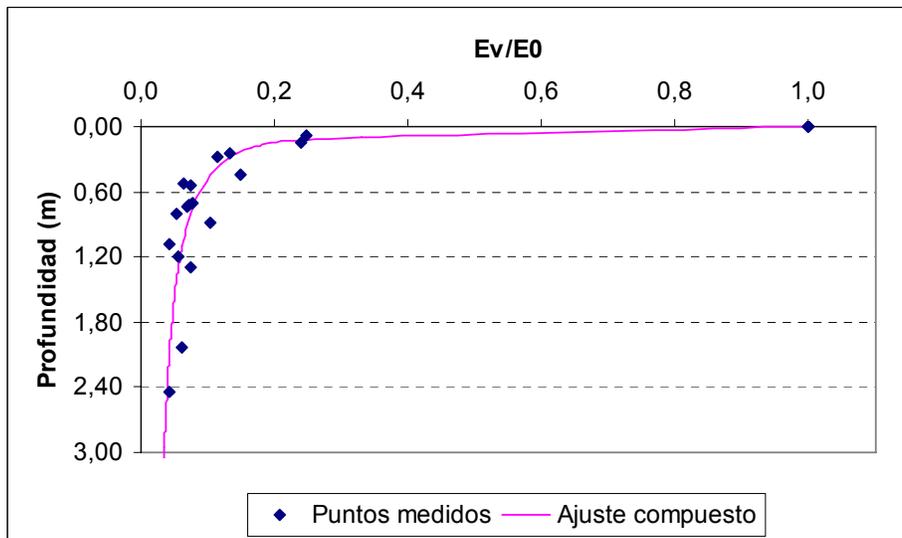


Figura 6.30: Curva compuesta III Región.

6.3 Validación Metodología del Domo

La metodología del domo representa una alternativa simple, rápida, directa y de bajo costo para estimar la evaporación desde suelos desnudos o incluso con vegetación. Su implementación en forma masiva puede ayudar significativamente a incrementar el conocimiento sobre el fenómeno.

A nivel nacional, la información disponible sobre evaporación desde suelos es escasa. En la mayor parte de las cuencas altiplánicas no existen estimaciones directas, debiendo adoptarse valores referenciales de estudios realizados en zonas cercanas. En este contexto, contar con una metodología confiable y de bajo costo es de gran utilidad ya que permite realizar mediciones directas en un mayor número de lugares.

El objetivo de este apartado es validar los valores obtenidos en este estudio contrastándolos con los de otras metodologías probadas y que se encuentran en la zona de estudio o cercana a ésta. Esto reduce la incertidumbre de los resultados, robusteciendo la aplicación hecha.

6.3.1 Comparación con otras mediciones

6.3.1.1 Laguna Tuyajto

Para esta cuenca altiplánica se cuenta con información de evaporación en diferentes tipos de suelo. La información ha sido generada mediante la instalación y operación de tres lisímetros de carga variable y cinco microlisímetros pesables por parte de Geoaguas Consultores. Estos lisímetros tienen una altura de 1,5 m y un diámetro interno de 29 cm, mientras que los microlisímetros tienen 30 cm de altura y un diámetro aproximado de 15 cm.

La Tabla 6.29 muestra las principales características de los sistemas de medición implementados en Tuyajto. Como se observa, el lisímetro denominado Tuyajto 1 fue construido con suelo alterado, lo que puede no representar adecuadamente sus propiedades físicas. Para el caso de los microlisímetros se presenta el período completo durante el que fueron operados.

Tabla 6.29: Sistemas de medición implementados por Geoaguas en Laguna Tuyajto

Id	Tipo de suelo	Inicio de operación	Ubicación (UTM, PSAD 56)		Cota (msnm)
			Norte (m)	Este (m)	
Tuyajto 1	Alterado	30-08-2006	644.218	7.352.820	4.053
Tuyajto 2	Inalterado	09-01-2007	644.314	7.351.752	4.053
Tuyajto 3	Inalterado	09-01-2007	644.892	7.354.295	4.056
Microlisímetros 1	Inalterado	(09/16)-11-2006	644.217	7.352.828	4.053
Microlisímetros 2	Inalterado	(04/12)-01-2007	644.217	7.352.828	4.053

Fuente: [Exploraciones Mundo, 2007]

Durante las campañas de terreno se realizaron mediciones de evaporación usando la metodología del domo en la vecindad del conjunto de microlisímetros y lisímetros Tuyajto 1 y Tuyajto 3 de la Tabla 6.29. La Figura 6.31 muestra la ubicación de los lisímetros utilizados para la comparación. El punto de color amarillo corresponde al punto de instalación del lisímetro 1 y del conjunto de microlisímetros.

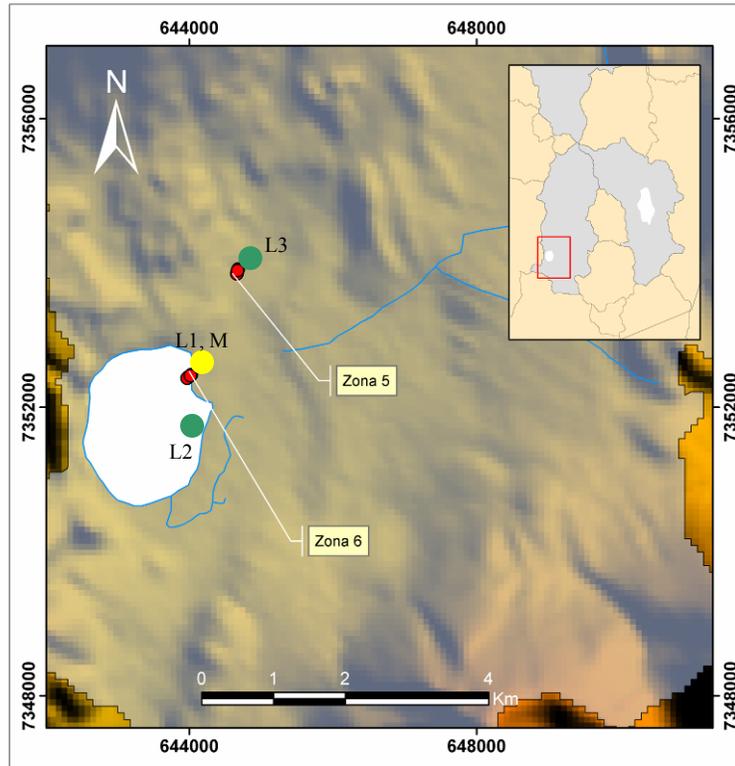


Figura 6.31: Ubicación lisímetros Laguna Tuyajto.

La Figura 6.32 presenta la comparación entre las estimaciones realizadas en el presente estudio y las efectuadas por Geoaguas Consultores. La curva ajustada considera sólo los puntos obtenidos con la metodología del domo. El ajuste realizado es el exponencial de menor error cuadrático medio.

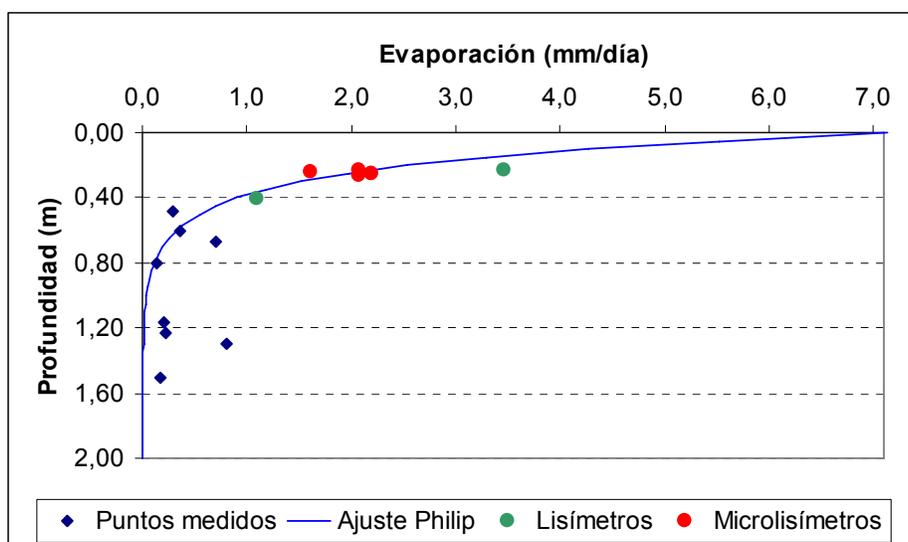


Figura 6.32: Evaluación metodología del domo en Laguna Tuyajto.

La Tabla 6.30 presenta una comparación entre los valores proyectados mediante el ajuste exponencial y los valores estimados con lisímetros y microlisímetros. Los valores no se obtuvieron en la misma fecha, por lo que es esperable que existan diferencias.

Tabla 6.30: Comparación tasas medidas y simuladas en L. Tuyajto

Tipo	Prof. Napa (m)	Evaporación (mm/día)		
		Medida	Estimada	Error
L1	0,410	1,10	0,85	0,26
L3	0,210	3,46	2,24	1,22
M1	0,256	2,19	1,79	0,40
M2	0,259	2,08	1,76	0,32
M3	0,242	1,62	1,92	-0,30
M4	0,236	2,08	1,97	0,11

Los puntos de lisímetros y microlisímetros se ajustan en forma adecuada a la curva de evaporación proyectada para la cuenca.

6.3.1.2 Salar del Huasco

Collahuasi-GP Consultores ha implementado en la cuenca del Salar del Huasco un conjunto de 12 lisímetros de carga constante, construidos con suelo inalterado. Las columnas fueron tomadas desde cuatro puntos representativos de diferentes sectores del salar.

En cada sector se extrajeron tres columnas de suelo, utilizadas para simular diferentes profundidades de napas subterráneas.

La Figura 6.33 presenta la ubicación desde donde fueron tomadas las columnas de suelo, además del lugar donde los 12 lisímetros fueron instalados.

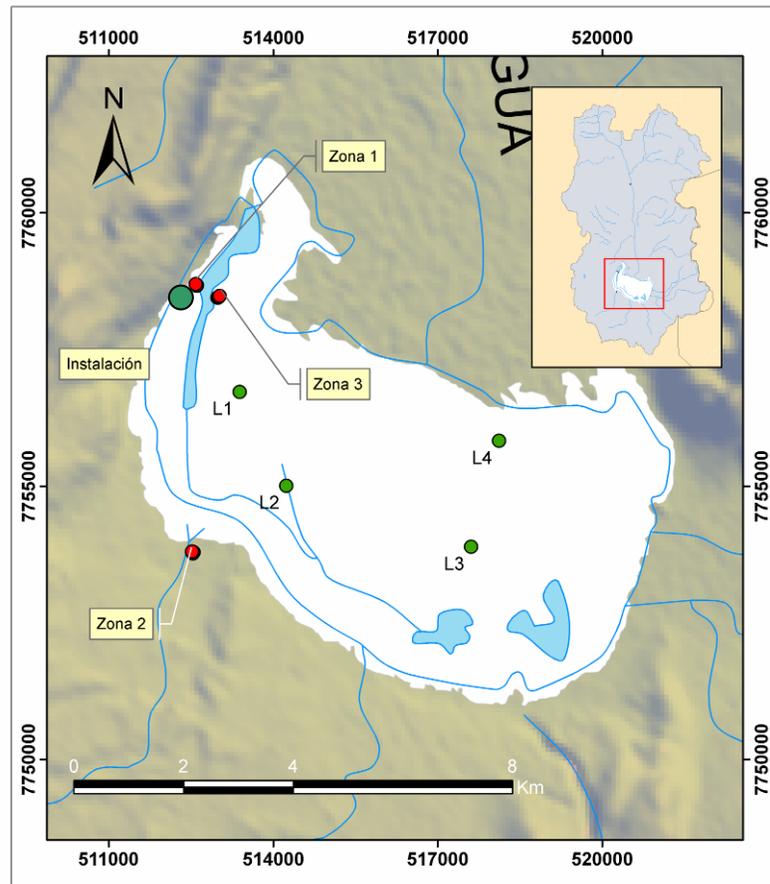


Figura 6.33: Puntos de extracción e instalación lisímetros Huasco.

Los lisímetros utilizados corresponden a tubos cilíndricos de PVC de 1 m de altura y 40 cm de diámetro, alimentados por estanques de recarga de 32,5 cm de diámetro y 1,8 m profundidad. La muestra de suelo se ubica en los 80 cm más superficiales del lisímetro dejando los 20 cm restantes para la instalación de filtros y el ingreso del agua proveniente del estanque de recarga.

Para asegurar un fácil acceso para su operación, los lisímetros fueron trasladados desde sus puntos de construcción hacia un único sector (UTM 7.759.059N, 512.790E, PSAD 56). Los registros comenzaron en enero de 2007 y concluyeron en enero de 2008.

Los datos de los 4 lisímetros superficiales (Huasco 1.1, 2.1, 3.1 y 4.1) no fueron considerados en el análisis de Collahuasi-GP Consultores. La omisión se argumenta con posibles errores en el diseño de los dispositivos, que habría afectado las mediciones y por tanto los resultados obtenidos.

La Tabla 6.31 presenta un resumen con las principales características de los lisímetros implementados en la cuenca del salar del Huasco.

Tabla 6.31: Lisímetros implementados por Collahuasi-GP Consultores en Salar del Huasco.

Id	Prof. napa (m)	Ubicación (UTM)		Cota (msnm)
		Norte (m)	Este	
Huasco 1.1	0,175	7.756.725	513.385	3.781
Huasco 1.2	0,360	7.756.725	513.385	3.781
Huasco 1.3	0,610	7.756.725	513.385	3.781
Huasco 2.1	0,190	7.755.008	514.237	3.782
Huasco 2.2	0,440	7.755.008	514.237	3.782
Huasco 2.3	0,600	7.755.008	514.237	3.782
Huasco 3.1	0,210	7.753.893	517.609	3.781
Huasco 3.2	0,330	7.753.893	517.609	3.781
Huasco 3.3	0,510	7.753.893	517.609	3.781
Huasco 4.1	0,160	7.755.807	518.116	3.781
Huasco 4.2	0,300	7.755.807	518.116	3.781
Huasco 4.3	0,545	7.755.807	518.116	3.781

Fuente: [Collahuasi-GP Consultores, 2008]

La curva del ajuste compuesto en la Figura 6.34 se hizo considerando los puntos medidos con la metodología del domo en esta la cuenca, mostrada en el apartado anterior (6.2.4). Como se observa, en general los valores entregados por lisímetros sobreestiman la evaporación ajustada. Esto se traduce en que para una cierta profundidad, la tasa de evaporación cuantificada mediante lisímetros será mayor a la cuantificada con el domo. Sin embargo, exceptuando los puntos en círculo (Figura 6.34), las mediciones realizadas con ambas metodologías mantienen una misma tendencia general. Las mayores diferencias entre las tasas observadas y simuladas son cercanas a 1 mm/día.

Debido a limitaciones físicas, la metodología de lisímetros implementada por Collahuasi-GP Consultores impide medir evaporación con niveles freáticos bajo los 0,6 m, no logrando observarse una tendencia de la relación evaporación – profundidad napa.

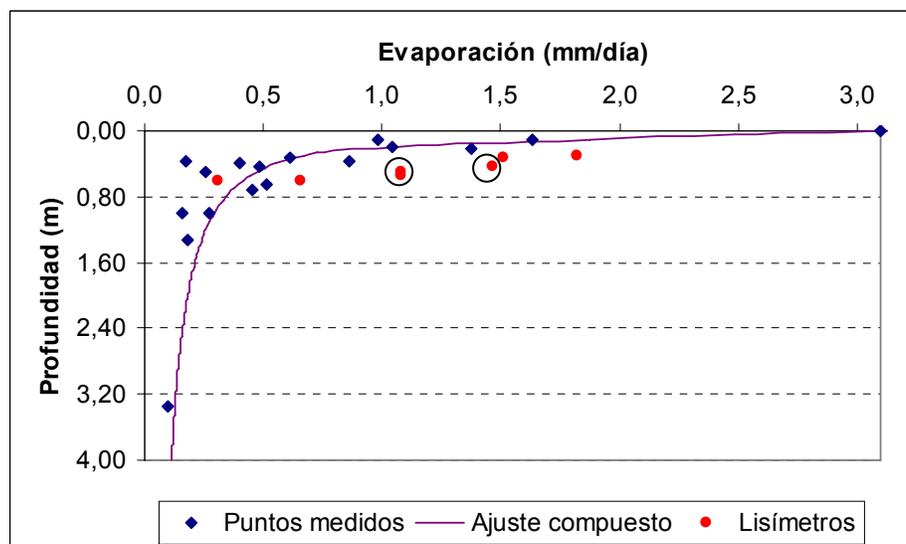


Figura 6.34: Evaluación metodología del domo en Salar del Huasco.

6.3.1.3 Otras Estimaciones

Durante los últimos años se han realizado diversos esfuerzos orientados a cuantificar la evaporación desde salares. En este contexto, se han llevado a cabo estimaciones por medio de diferentes técnicas, entre las que destacan los lisímetros, correlación de Eddy y razón de Bowen.

En particular se dispone de información en la Pampa del Tamarugal (Toro, 1960; Grilli, 1985; Tyler, 2002) y en el Salar de Atacama (Mardones, 1986; Hydrotechnica, 1987; MINSAL, 1988; Kampf, 2005). Dichas estimaciones fueron contrastadas con las mediciones efectuadas en el presente estudio en la Figura 6.35.

Las mediciones realizadas por Toro (1967) en el sector de Refresco y Grilli (1985) en el Salar de Bellavista se basaron en la medición de gradientes de humedad y temperatura en el perfil del suelo, lo que requiere además el uso de modelos de flujo de agua en la zona no saturada.

Por su parte, las mediciones realizadas por Hydrotechnica (1987b) y Kampf (2002) en el Salar de Atacama, y Tyler (2002) en el Salar de Llamara, utilizan el método de correlación de Eddy. Este método requiere la utilización de una estación micro-meteorológica que permite medir en forma directa la tasa de evaporación que sale desde el acuífero hacia la atmósfera.

Las mediciones realizadas para la compañía minera Minsal (1988) en el Salar de Atacama se basaron en la implementación de lisímetros y en el análisis de la razón de Bowen. Este último método se sustenta en la realización de un balance de energía sobre la superficie del suelo.

Las mediciones de Grilli et al. (1989) en el Salar de Bellavista fueron utilizando técnicas isotópicas, que consisten en medir una molécula de agua que asciende por evaporación experimentando fraccionamiento isotópico.

Finalmente, Mardones en 1986 e Hydrotechnica en 1987 (1987a) cuantificaron la evaporación desde los suelos del Salar de Atacama mediante la instalación de lisímetros.

Para algunas de las mediciones disponibles no se cuenta con información de la tasa de evaporación de tanque o desde superficies de agua libre, razón por la cual las mediciones no han sido normalizadas. Se asume que las mediciones han sido realizadas en diversos períodos del año y por lo tanto son representativas del comportamiento promedio de la zona norte de Chile.

Cabe señalar que el conjunto de todas mediciones revisadas es representativo de diversos tipos de suelo en cuanto a composición y textura, además de abarcar diferentes tipos de agua subterránea.

Como puede observarse, existe una tendencia en el conjunto de puntos disponibles que muestra una disminución de la evaporación con el aumento de la profundidad del nivel saturado. Los puntos conforman una única nube, salvo dos *outliers* que se alejan de la tendencia promedio (Grilli, 1989).

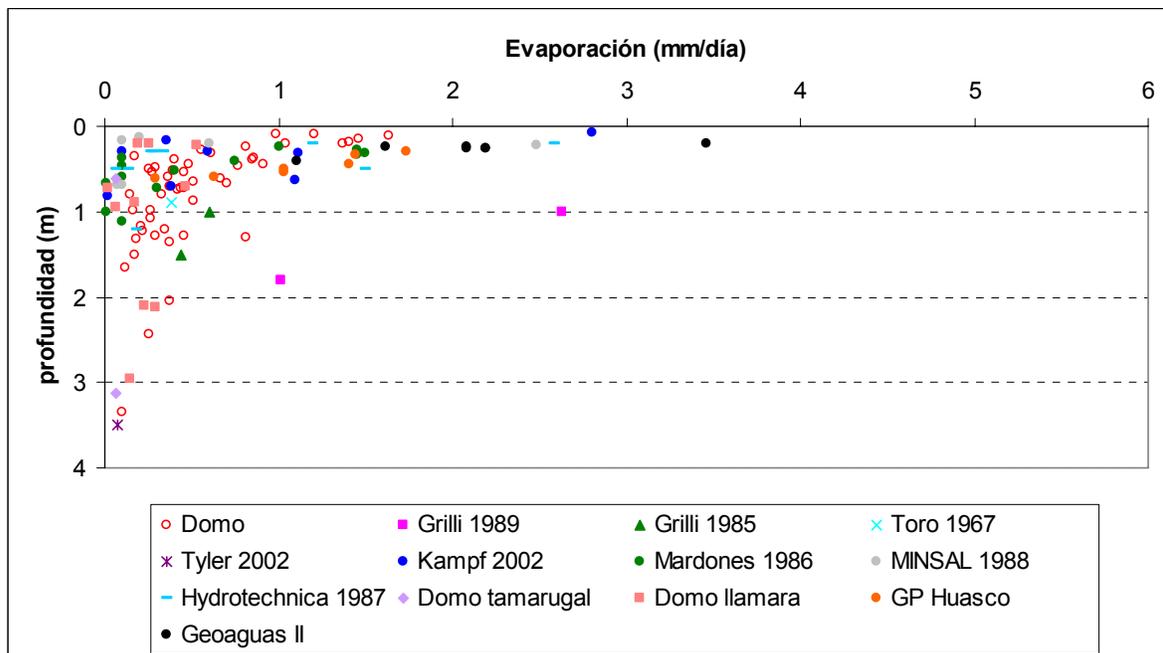


Figura 6.35: Evaluación metodología del domo con otras estimaciones.

En la Figura 6.35 se ve que las tasas de evaporación medidas con el domo tienen el mismo orden de magnitud que las estimaciones realizadas usando otras metodologías, por lo que el método puede considerarse un procedimiento alternativo apropiado para estimar flujos de evaporación desde napas freáticas.

La Figura 6.36 presenta tres ajustes del tipo potencial para el resumen de todos los puntos disponibles que se presentaron en la Figura 6.35. Un ajuste conservador (en color verde), mostrando el límite inferior de la curva de evaporación; otro ajuste promedio (en color rojo) y un tercer ajuste (en color azul) representa el límite superior para la curva de evaporación, que entrega una idea de las tasas máximas esperables durante las mediciones de terreno.

Las ecuaciones que describen las tres curvas propuestas son las siguientes:

➤ Límite Inferior $E_V = 0,4 \cdot Z^{-0,9}$ (6.26)

➤ Ajuste Medio $E_V = 0,14 \cdot Z^{-1,2}$ (6.27)

➤ Límite Superior $E_V = 0,6 \cdot Z^{-0,9}$ (6.28)

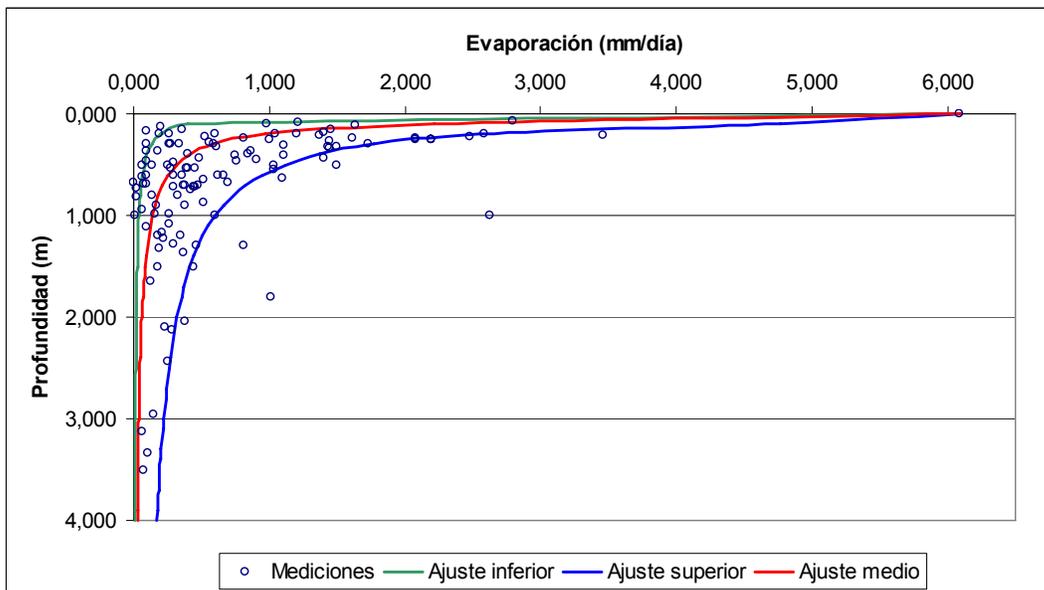


Figura 6.36: Curvas de ajuste resumen de mediciones.

6.3.2 Mediciones en zonas sin evaporación

Resulta interesante evaluar el comportamiento del domo ante situaciones límite. En este caso se ha estudiado su respuesta bajo condiciones controladas en laboratorio, en particular, la experiencia consistió en medir el flujo de evaporación sobre una superficie sin evaporación.

Para esto, se dispuso la cúpula sobre una superficie sólida y completamente aislada con un nylon seco e impermeable.

En la Figura 6.37 se presenta el resultado obtenido de dicha experiencia. Se observa que la densidad de vapor al interior del domo presenta un comportamiento errático con una leve tendencia a la disminución y una variación máxima para todo el intervalo de $0,04 \text{ g/m}^3$. Utilizando el procedimiento de medición y análisis de resultados definido en el capítulo 2.2.2, la tasa de evaporación obtenida del presente ensayo es de $0,07 \text{ mm/día}$, valor cercano a las tasas instantáneas mínimas medidas durante las campañas de terreno.

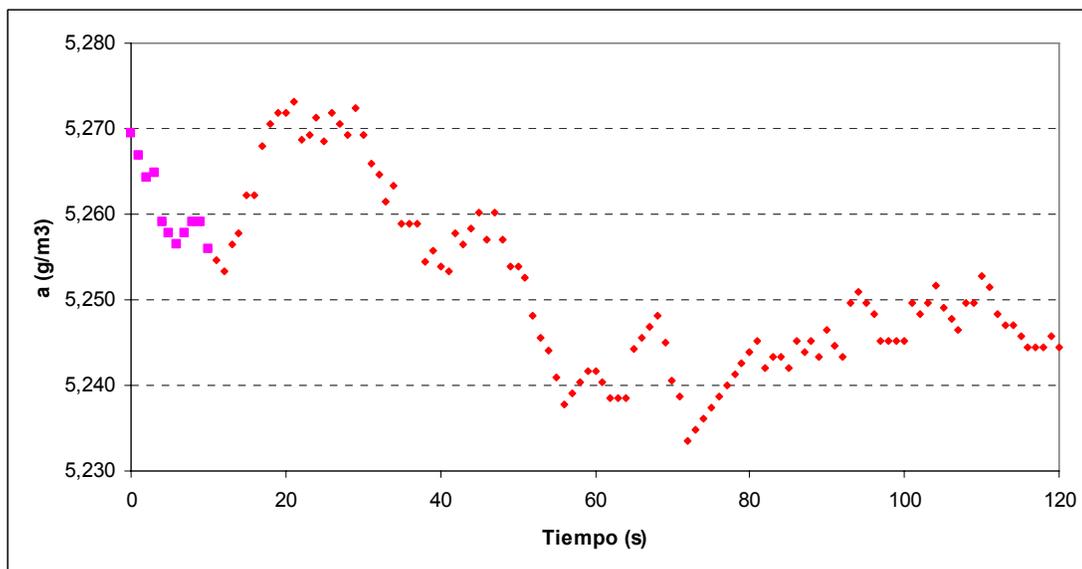


Figura 6.37: Validación domo, medición en laboratorio.

La Figura 6.38 presenta la comparación de dos mediciones en terreno. En la Figura 6.38-A se aprecia el comportamiento típico de una medición de evaporación instantánea. La curva presenta un período inicial con densidad de vapor (a) constante, luego se manifiesta un marcado incremento de la tasa registrada, que comienza a disminuir tendiendo a un valor de equilibrio o saturación de vapor.

El ejemplo corresponde a una medición instantánea, con una tasa de evaporación de $1,9 \text{ mm/día}$. La densidad de vapor de agua dentro del domo tuvo una variación total de 5 g/m^3 .

Por su parte, la Figura 6.38-B muestra el resultado de una medición instantánea con una tasa de evaporación de $0,072 \text{ mm/día}$. Si bien esta tasa es similar a la obtenida en el ensayo de laboratorio, durante la medición en terreno se observó una tendencia en la evolución de la densidad de vapor de agua. La variación total fue de $0,25 \text{ g/m}^3$, es decir, 6 veces mayor que la registrada en laboratorio.

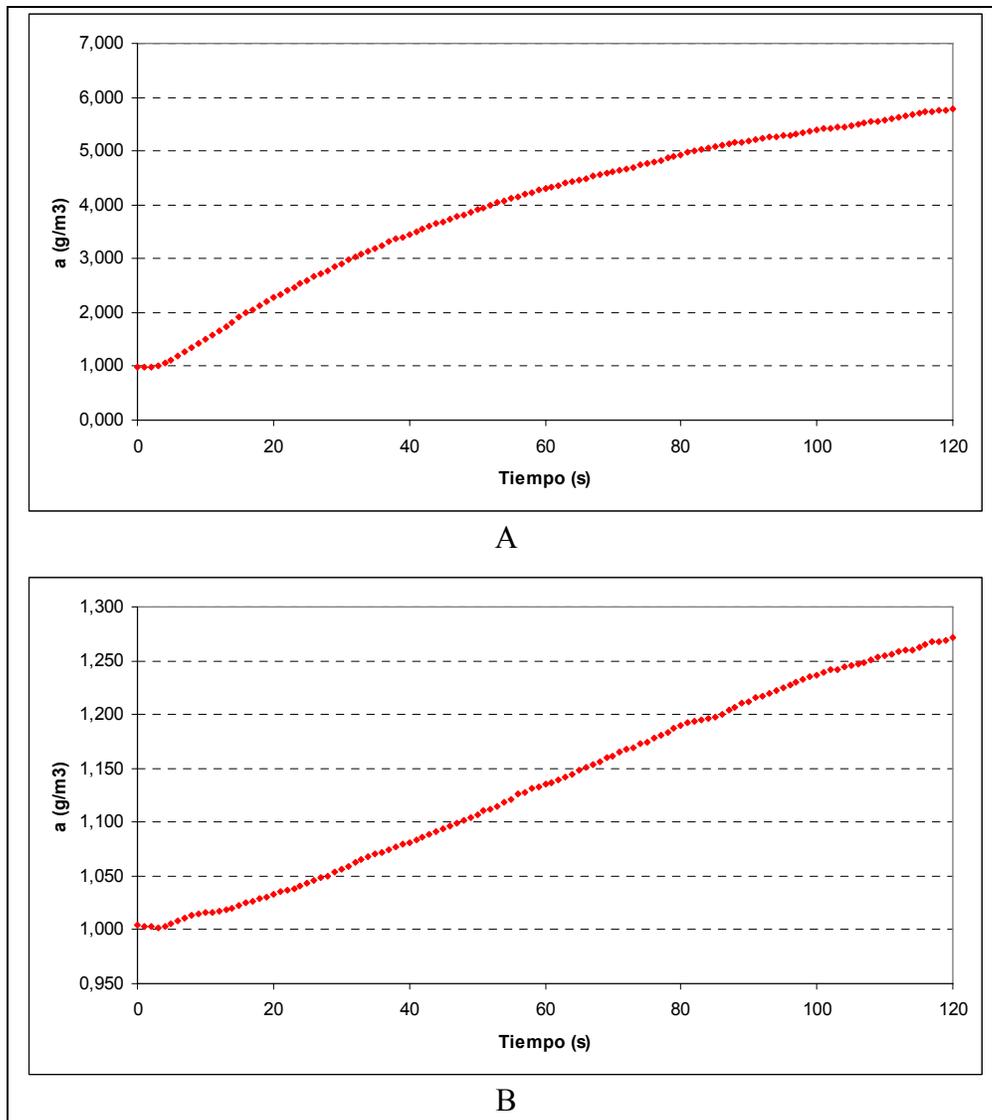


Figura 6.38: Validación domo, mediciones en terreno.

En la Figura 6.39 se presenta el resultado de una medición instantánea de evaporación. Aunque se tiene un flujo de 0,01 mm/día, se asumió con una tasa de evaporación nula. Es posible observar una disminución de la densidad de vapor de agua dentro del domo para el período de medición.

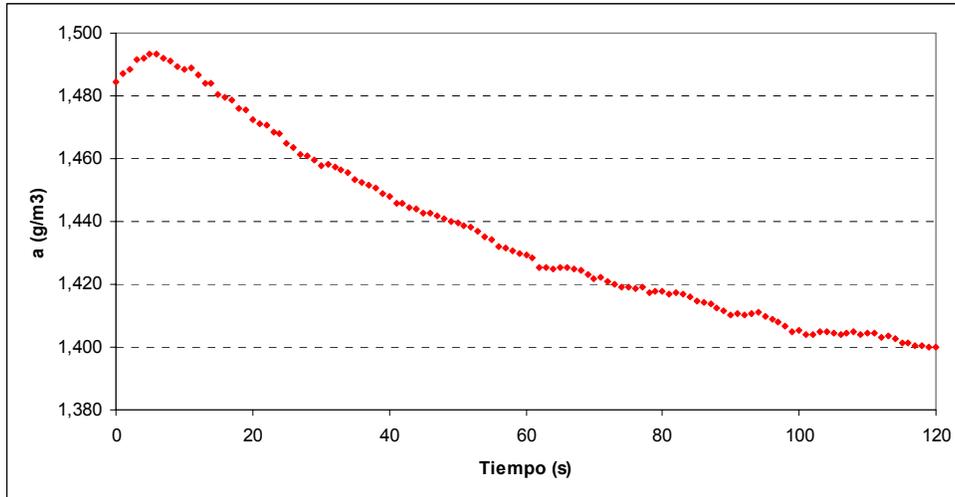


Figura 6.39: Validación domo, medición de terreno con tasa nula.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se midieron tasas de evaporación diaria desde napas freáticas en 49 puntos en las cuencas del Salar del Huasco (16), Laguna Tuyajto (8), Salar de El Laco (4), Salar de Aguas Calientes 2 (4), Salar de Pedernales (8) y Salar de Maricunga (9), contribuyendo en forma considerable al aumento de la información existente en la zona.

En 9 de las 12 zonas monitoreadas dentro de estas cuencas se cuantificaron también tasas de evaporación desde superficies de agua libre. Las mediciones se realizaron con tanques evaporímetros Clase A presentes en el lugar o a través de la construcción “*in situ*” de tanques plásticos, instalados dentro de lagunas y afloramientos.

Adicionalmente, basados en la información histórica de más de 50 estaciones meteorológicas DGA, se ajustaron curvas de evaporación en función de la altura para las Regiones XV, I, II y III. Dicho análisis incluye información histórica comprendida entre 1960 y 2007. Se estimaron además ajustes para la franja altiplánica de las Regiones I y II.

Se determinó la textura de los suelos en los puntos en que se cuantificó la evaporación, usando para esta clasificación los resultados de los análisis granulométricos practicados a las muestras. Por lo general los suelos presentaron un alto contenido de sales y una granulometría gruesa, con predominio de partículas de arena.

Según las mediciones realizadas en terreno, las tasas de evaporación desde el suelo dependen principalmente de la demanda evaporativa de la atmósfera (condiciones climáticas) y de la composición litológica de la zona no saturada del perfil (textura).

De acuerdo a los análisis efectuados, se concluye que el domo entrega valores para la evaporación desde napas freáticas someras comparables con los registros realizados mediante metodologías alternativas como lisímetros y microlisímetros. Por lo tanto, el domo puede ser considerado como una herramienta confiable para realizar estimaciones puntuales de evaporación.

En términos generales, la curva propuesta por Morel-Seytoux para el ajuste de la evaporación como función de la profundidad de la napa es la que presenta el mejor grado de ajuste con los datos normalizados de las mediciones en terreno.

Las curvas de ajuste propuestas para las tres Regiones en que se trabajó pueden contribuir en la comprensión y determinación de los flujos de descarga por evaporación en las distintas zonas de estudio. Por su parte, la curva resumen de todas las mediciones realizadas en el norte del país puede ser utilizada como una primera aproximación al problema de las descargas en el largo plazo.

La determinación de la profundidad de la napa, principalmente en suelos finos o con un alto contenido de sales, puede ser compleja. Se recomienda efectuar varias perforaciones alrededor de cada punto de medición y determinar su profundidad, si es posible, un día después de su realización.

Debido a que los tanques evaporímetros suelen congelarse durante la noche, se recomienda realizar el monitoreo en ciclos de 24 horas, comenzando siempre después del mediodía.

Con el fin de independizar las mediciones de evaporación de las variables climáticas, y para contribuir en el estudio de la influencia de la composición del suelo en la evaporación, se recomienda trabajar con dos cuadrillas y cuatro domos en forma simultánea.

Como método de validación, se recomienda medir la evaporación desde lagunas u otras superficies de agua libre en forma directa con el domo y comparar dichos resultados con mediciones de tanque.

Adicionalmente, se recomienda la construcción en laboratorio de un sistema para medir simultáneamente los flujos de evaporación con el domo y con lisímetros.

Para determinar en terreno el rango de operación de la metodología empleada, se sugiere medir en suelos con napas freáticas profundas (cercanas o mayores a los 20 m) y comparar dichos resultados con los valores entregados por otras herramientas disponibles, como el método de Correlación de Eddy.

Para estimar la descarga a nivel de cuenca se propone hacer mediciones de la evaporación con el domo en una grilla homogénea, que cubra toda la superficie de interés, y luego comparar con las curvas de ajuste presentadas en este informe.

8 REFERENCIAS

- Aboukhaled, A., Alfaro, A., & Smith, M. (1982). Lysimeters. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 39.
- Aparicio Mijares, F. J. (1997). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- ASTM. (1995). D. 422-63, standard test method for particle size analysis of soils. *Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials*, 4, 10-16.
- Boast, C. W., & Robertson, T. M. (1982). A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: Description and laboratory evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 46(4), 689.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada* (J. G. Saldarriaga Trans.). (8th ed.). Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- Collahuasi-GP Consultores Ltda. (2008). Evaluación de la evaporación desde el salar del huasco. Santiago. Chile.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona. Omega.
- Dirección de Vialidad, MOP (2002). Volumen N°8 especificaciones y métodos de muestreo, ensayo y control. *Manual de carreteras*. Santiago, Chile.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 24 (2).
- Fritschen, L., & Gay, L. W. (1979). *Environmental instrumentation*. New York: Springer-Verlag.
- Geoaguas Consultores. (2007). Disponibilidad de recursos subterráneos en el sistema tuyajto II región de antofagasta. Santiago. Chile
- Greenwood, E. A. N., & Beresford, J. D. (1980). Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique, II. evaporation from atriplex plantations over a shallow saline water table. *Journal of Hydrology*, 45(3-4), 313-319.
- Grilli, A. (1985). Una aproximación al estudio de la evaporación desde salares. *VII Congreso Nacional De Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena De Ingeniería Hidráulica*, 495-514.
- Grilli, A., & Vidal, E. (1986). Evaporación desde salares: Metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. *Revista De La Sociedad Chilena De Ingeniería Hidráulica*, 1(2)
- Grilli, A., Pollastri, A., Ortiz, J., & Aguirre, E. (1989). Evaluación de tasas de evaporación desde salares, utilizando técnicas isotópicas. Aplicación en el salar de bellavista, I región Chile.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000. The U. S. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. *US Geological Survey*, 130 pp.

Hydrotechnica. (1988). Evaluation of the brine reserves of the salar de atacama. informe no publicado para amax de chile ltda.

Ide, F. (1978). Cubicación del yacimiento salar de atacama. Memoria De Título (Inédito), *Universidad de Chile, Departamento de Minas*, 144 p. Santiago.

Kampf, S. K., Tyler, S. W., Ortiz, C. A., Muñoz, J. F., & Adkins, P. L. (2005). Evaporation and land surface energy budget at the salar de atacama, northern chile. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 236-252.

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros* (2nd ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.

Liu, S., Graham, W. D., & Jacobs, J. M. (2005). Daily potential evapotranspiration and diurnal climate forcings: Influence on the numerical modelling of soil water dynamics and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), 39-52.

Mardones, L. (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del salar de atacama. In G. Lagos (Ed.), *El litio: Un nuevo recurso para chile* (pp. 181-216). Santiago, Chile: Universitaria.

Mardones, L. (1997). Flux et évolution des solutions salines dans les systèmes hydrologiques des salars d'ascotan et d'atacama. *Thèse De Doctorat En Sciences De La Terre*.

MINSAL, Ltda. (1988). Hydrology. Salar De Atacama, Appendix V: Evaporation Study.

Morel-Seytoux, H., & Mermoud, A. (1989). Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. *J. Hydrol. Continent.*, 4(1), 11-23.

Muller, J. C. (1996). Un point sur... trente ans de lysimétrie en france (1960-1990). une technique, un outil pour l'étude de l'environnement. *INRA, Editions*, 390.

Philip, J. R. (1957). Evaporation and moisture and heat fields in the soil. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 14(4), 354-366.

Philip, J., & de Vries, D. (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Trans.Am.Geophys.Union*, 38(2), 222-232.

Rana, G., & Katerji, N. (2000). Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under mediterranean climate: A review. *European Journal of Agronomy*, 13(2-3), 125-153.

Reicosky, D. C., & Peters, D. B. (1977). A portable chamber for rapid evapotranspiration measurements on field plots. *Agronomy Journal*, 69(4), 729.

Rushton, K. R. (2003). *Groundwater hydrology: Conceptual and computational models*. Chichester: Wiley.

- Sadzawka, A., Flores, H., Grez, R., Carrasco, R., Mora, M., Neaman, A., et al. (2007). *Métodos de análisis de lodos y suelos*. Santiago, Chile.
- Sanford, W. E., & Wood, W. W. (2001). Hydrology of the coastal sabkhas of abu dhabi, united arab emirates. *Hydrogeology Journal*, 9(4), 358-366.
- Shah, N., Nachabe, M., & Ross, M. (2007). Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers. *Ground Water*, 45(3), 329-338.
- Staff, S. S. (2006). In Department of Agriculture (Ed.), *Claves para la taxonomía de suelos* [Keys to Soil Taxonomy/Claves para la Taxonomía de suelos] (C. A. Ortis Trans.). (10th ed.). Washington, DC United States: Service.US Government Printing Office.
- Stannard, D. (1988). Use of a hemispherical chamber for measurement of evapotranspiration. *US Geological Survey Open-File Report*, 88-452.
- Stannard, D. I., & Wertz, M. A. (2006). Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. *Water Resour.Res*, 42, W02413.
- Toro, J. M. (1967). Evaporación de distintos tipos de suelo de la pampa del tamarugal. (Inédito) CORFO.
- Tyler, S., Kranz, S., Parlange, M., Albertson, J., Katul, G., Cochran, G., et al. (1997). Estimation of groundwater evaporation and salt flux from owens lake, california, USA. *Journal of Hydrology*, 200(1-4), 110-135.
- Tyler, S. W. (2002). Evaporation over the salar de llamara, northern chile. *Informe confeccionado para SQM*.

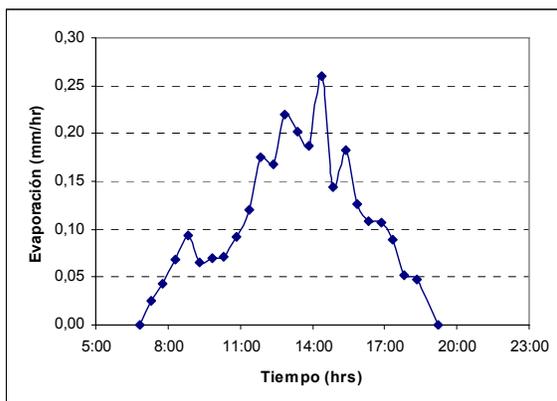
ANEXOS

ANEXO I
“Curvas Diarias de Evaporación”

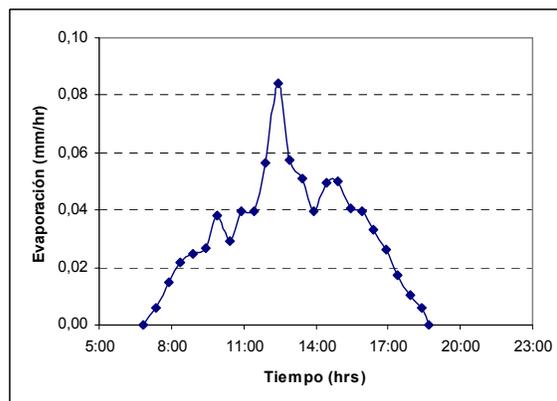
ANEXO I CURVAS DIARIAS DE EVAPORACIÓN

AI.1 Región I de Tarapacá

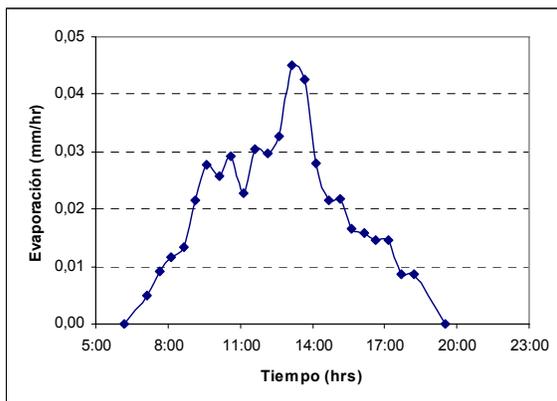
AI.1.1 Zona 1



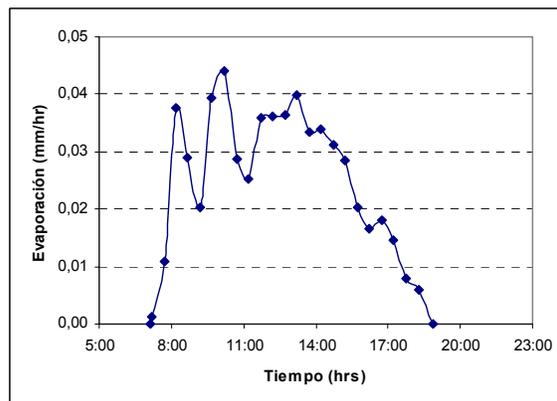
H1D1



H2D2

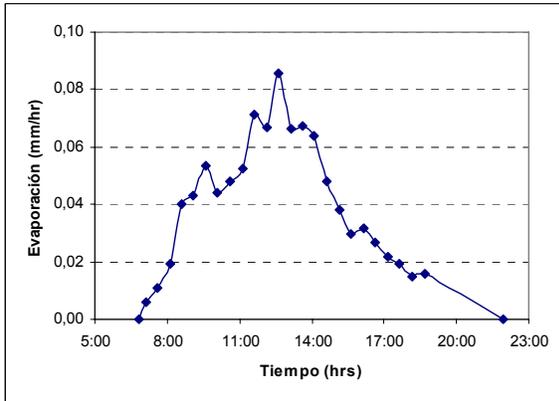


H3D1

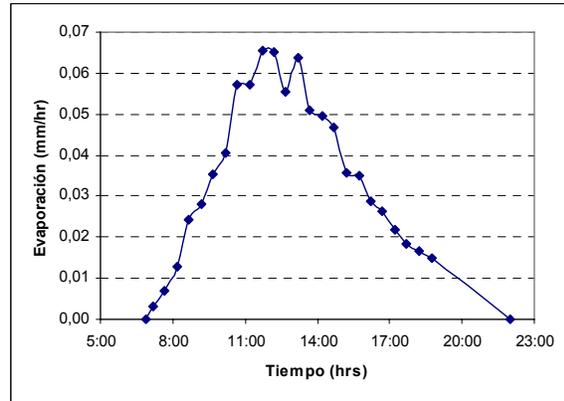


H4D2

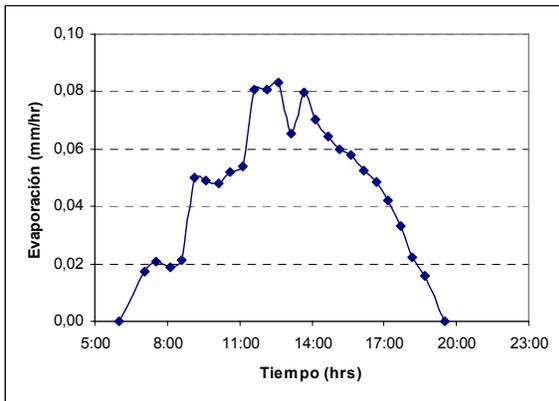
AI.1.2 Zona 2



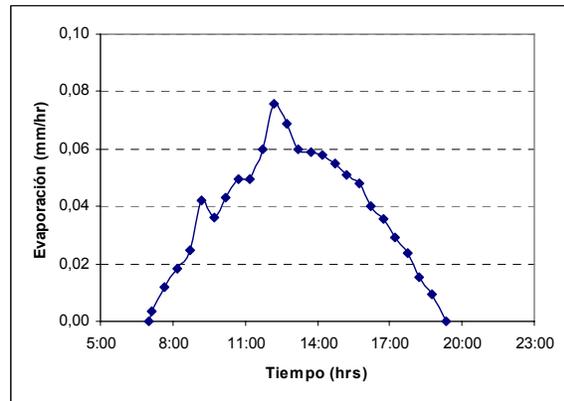
H5D1



H6D2

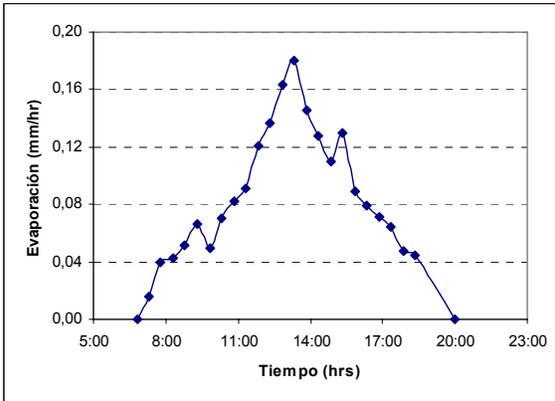


H7D1

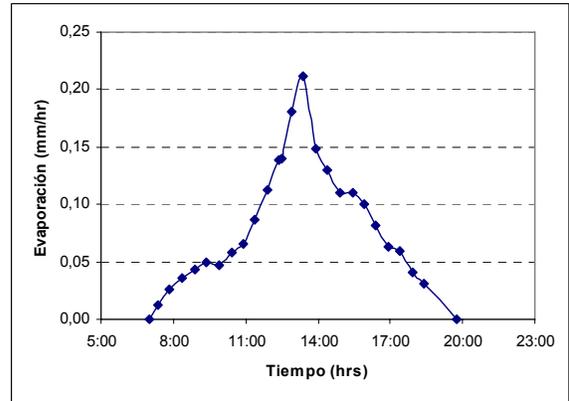


H8D2

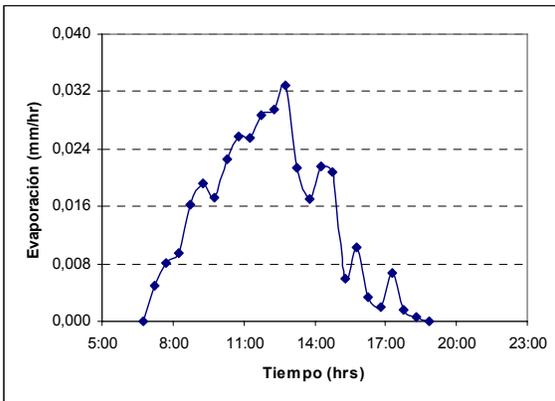
AI.1.3 Zona 3



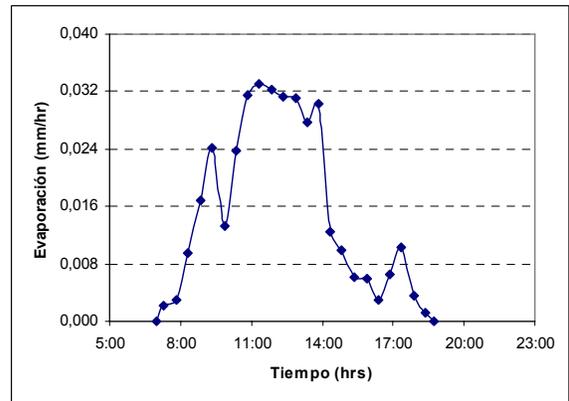
H9D1



H10D2

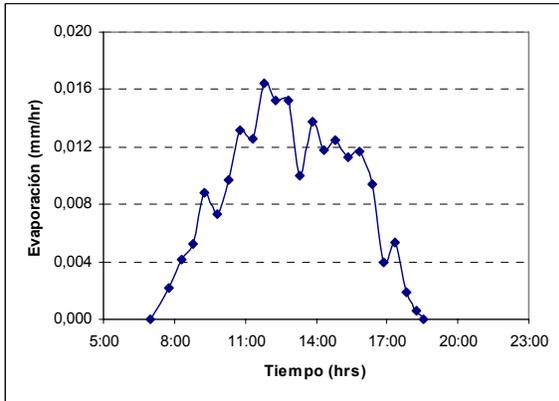


H11D1

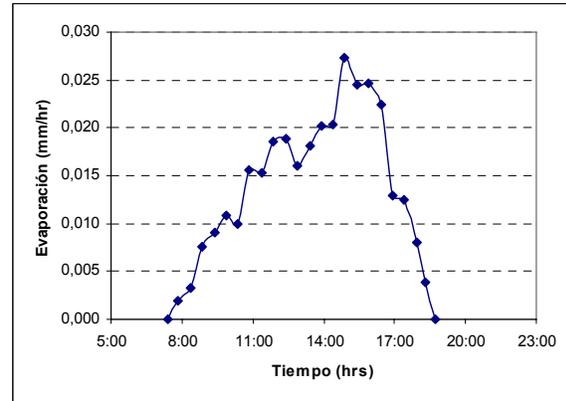


H12D2

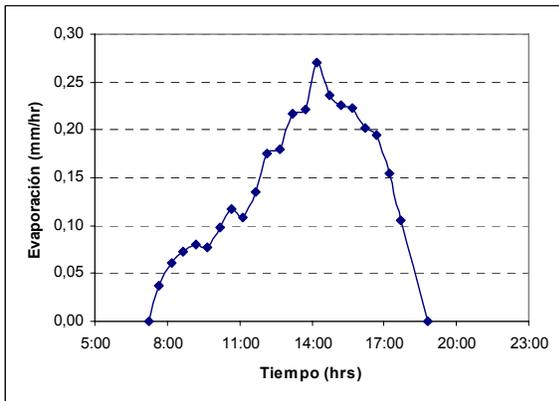
AI.1.4 Zona 4



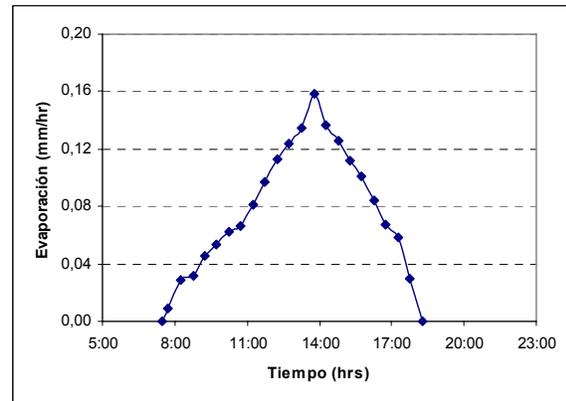
H13D1



H14D2



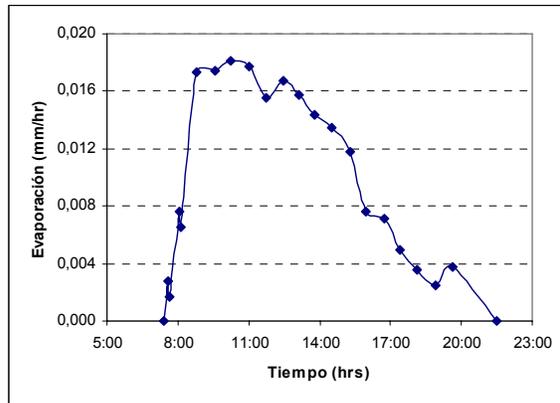
H15D1



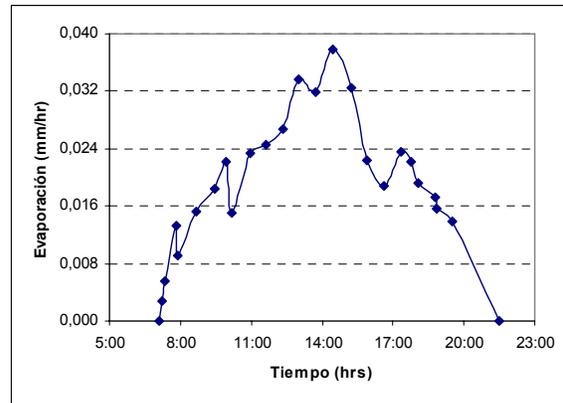
H16D2

AI.2 Región II de Antofagasta

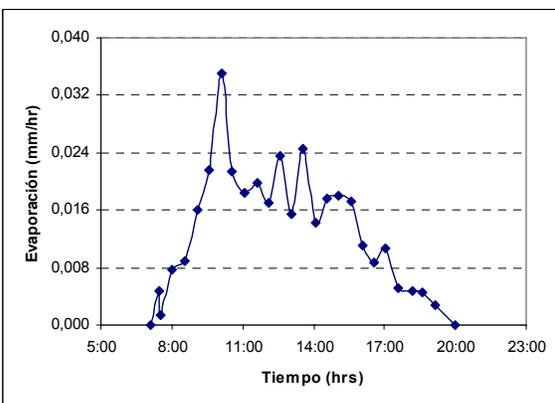
AI.2.1 Zona 5



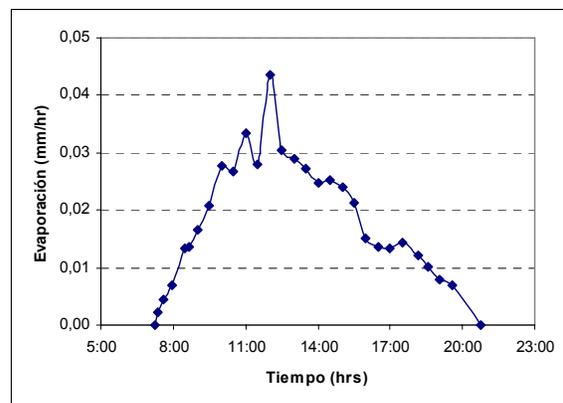
T1D1



T2D2

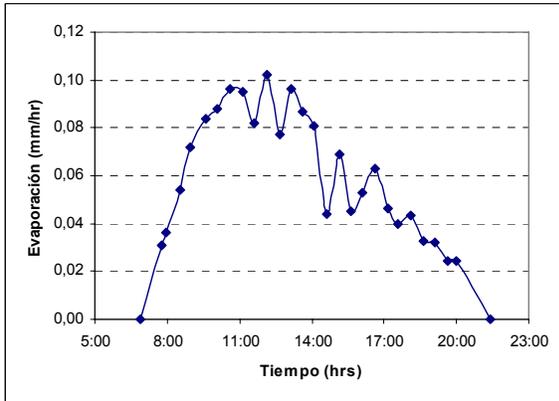


T3D1

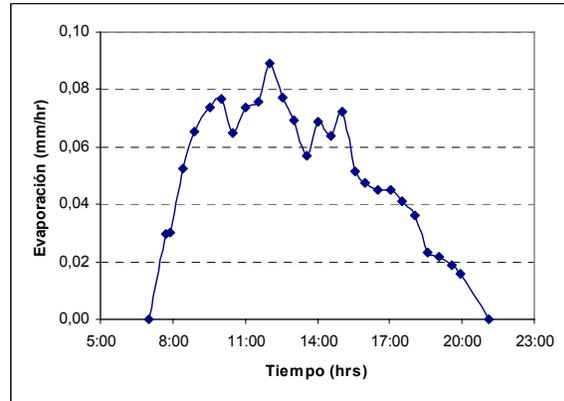


T4D2

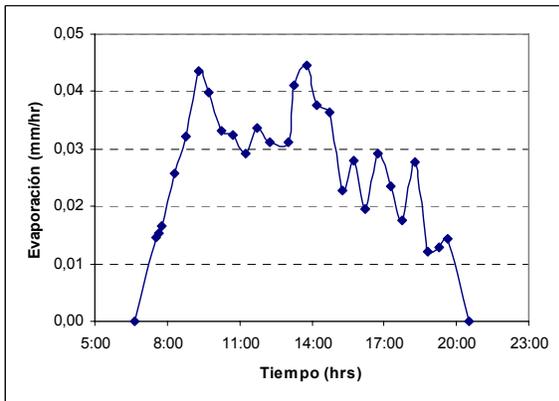
AI.2.2 Zona 6



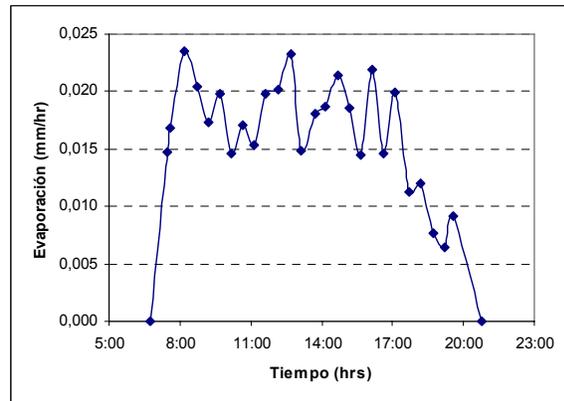
T6D1



T7D2

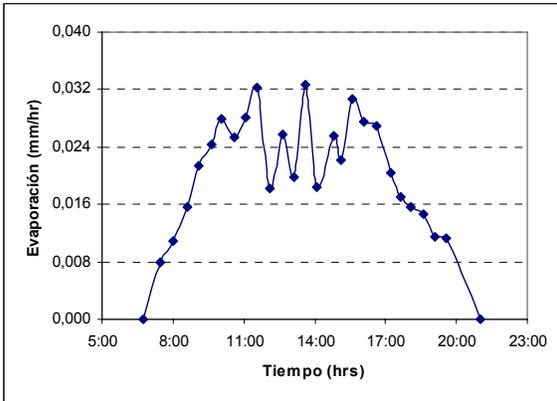


T8D3

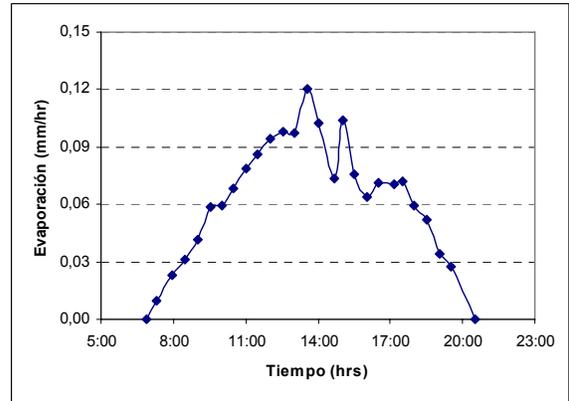


T9D4

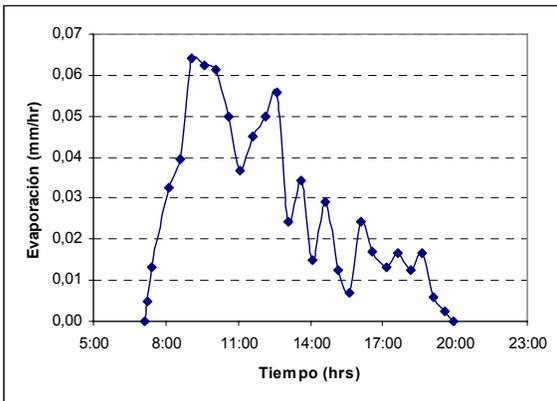
AI.2.3 Zona 7



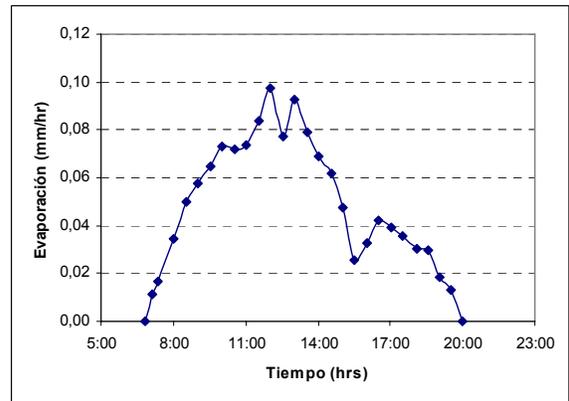
L1D1



L2D2

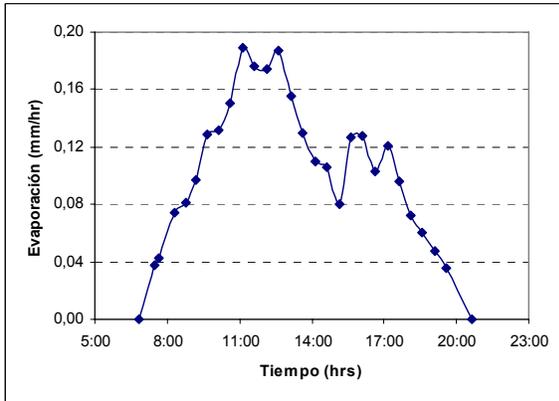


L3D1

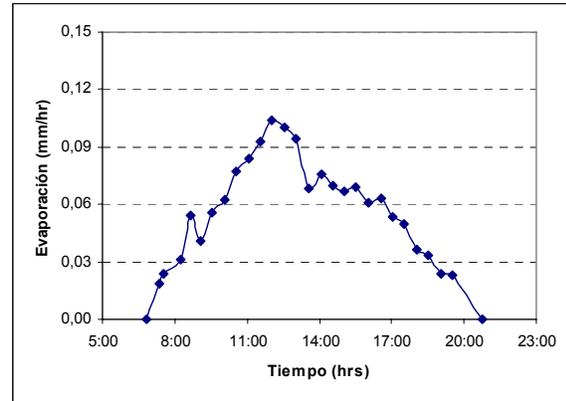


L4D2

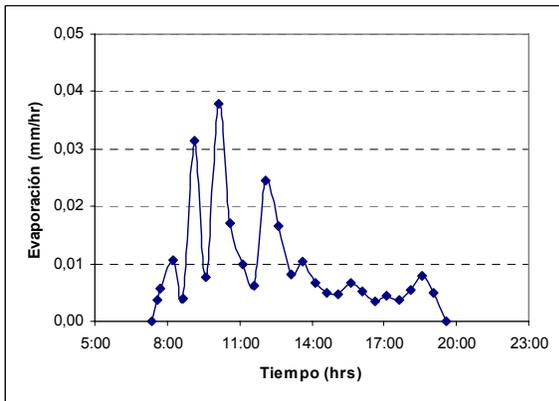
AI.2.4 Zona 8



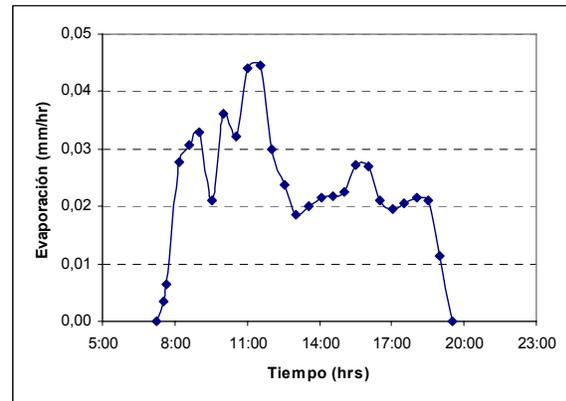
A1D1



A2D2



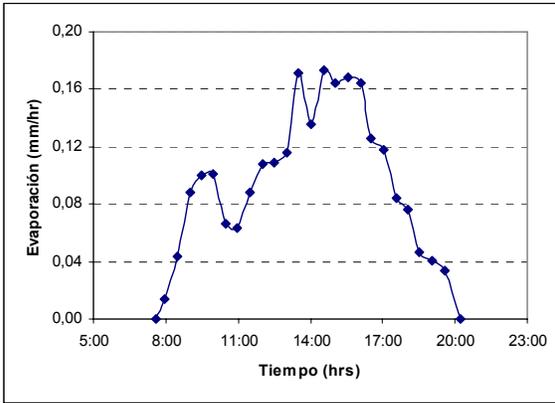
A3D1



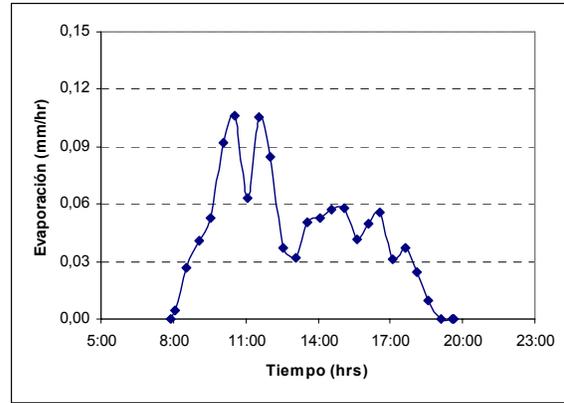
A4D2

AI.3 Región III de Copiapó

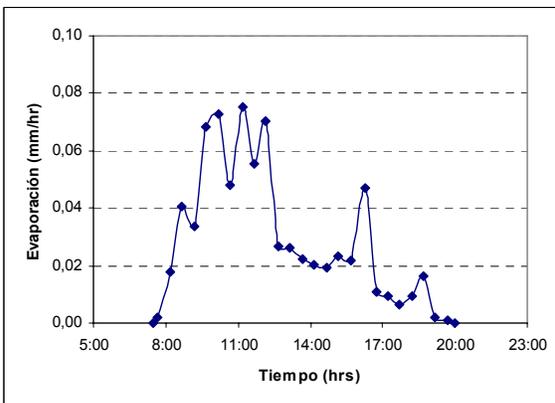
AI.3.1 Zona 9



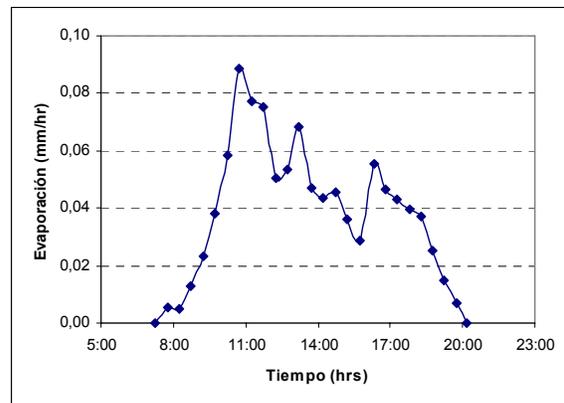
P1D1



P2D2

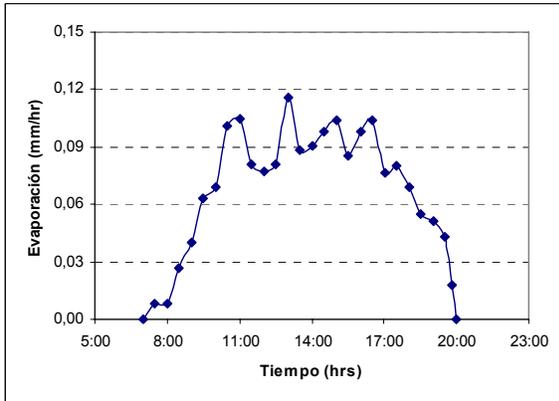


P3D1

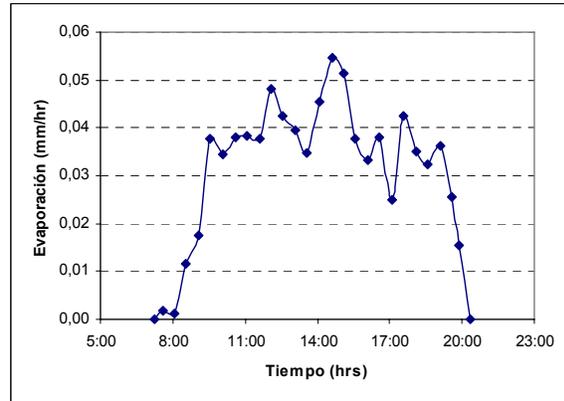


P4D1

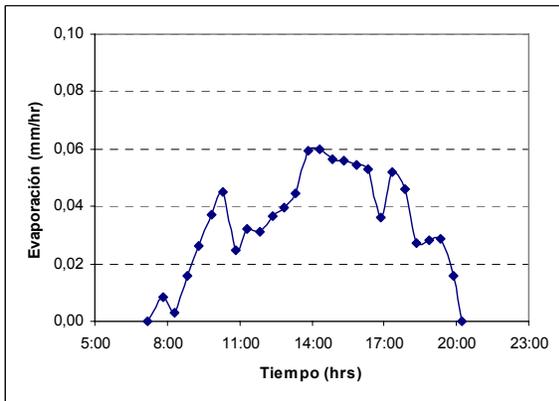
AI.3.2 Zona 10



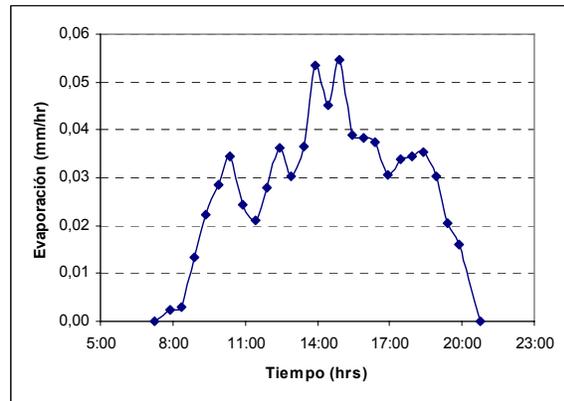
P5D1



P6D2

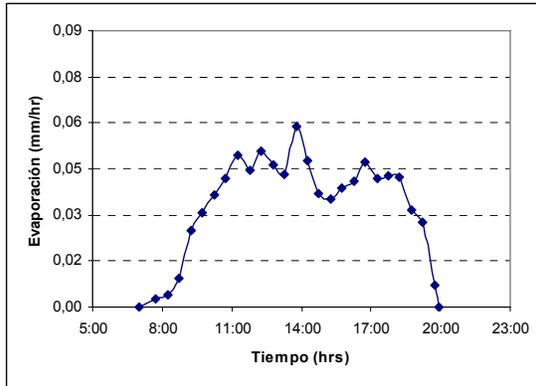


P7D1

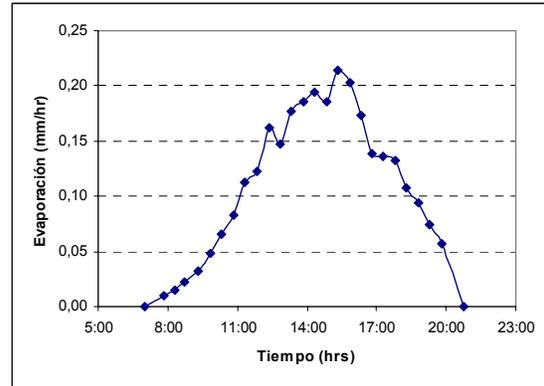


P8D2

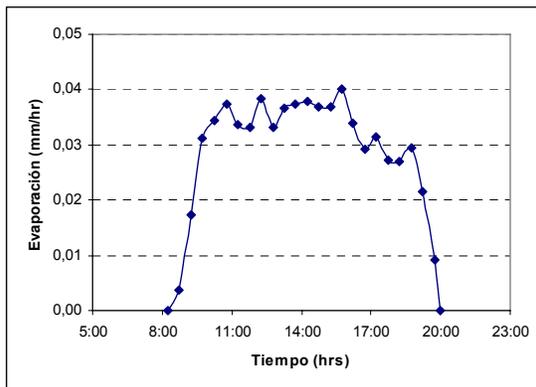
AI.3.3 Zona 11



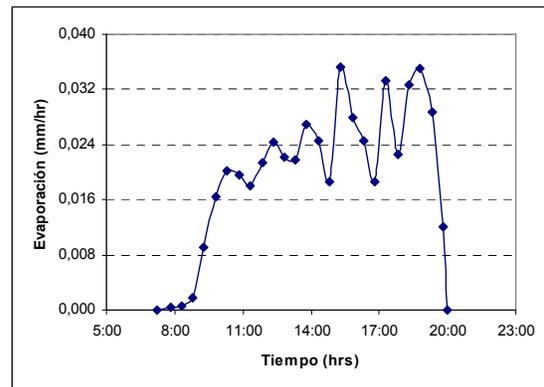
M1D1



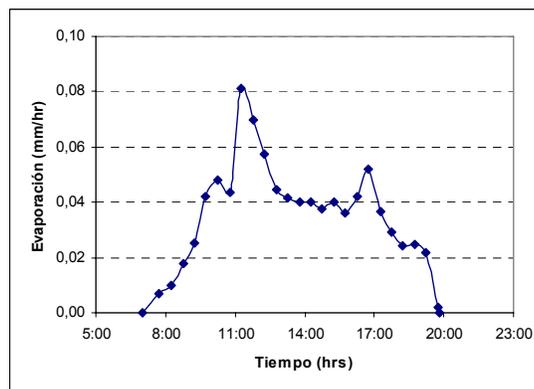
M2D2



M3D1

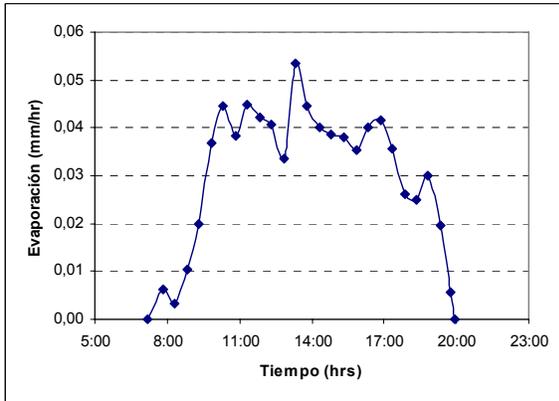


M4D2

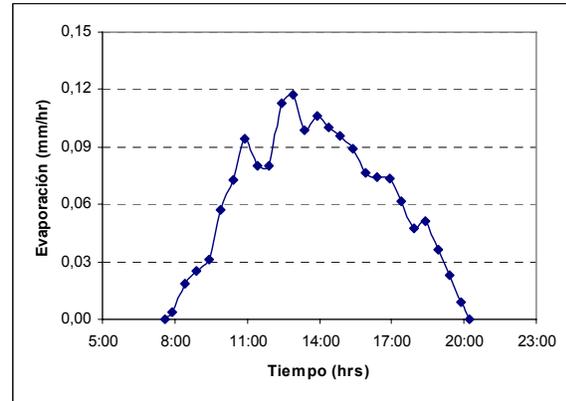


M9D1

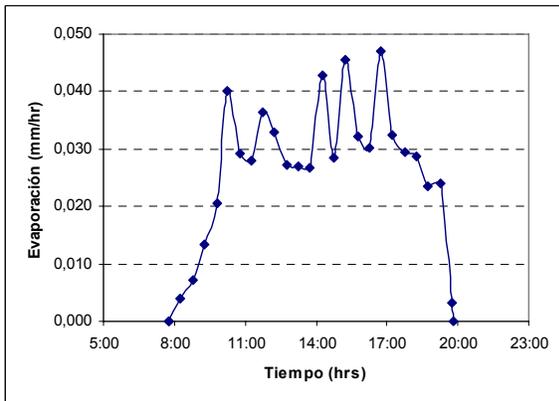
AI.3.4 Zona 12



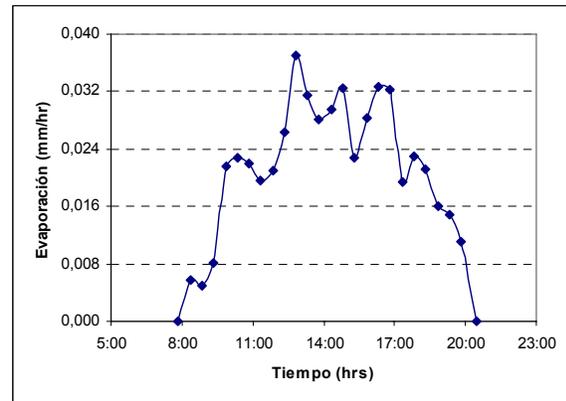
M5D1



M6D2



M7D1



M8D2

ANEXO II
“Resultados Análisis de Suelos”

ANEXO II RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELOS

AI.4 Región I de Tarapacá



División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

CORRELATIVO GENERAL **805218**

2.0. RESULTADOS

2.1. Granulometría por tamizado según Manual de Carretera 8.102 LNV 105-86

Muestra		H1-D1	H2-D2	H3-D1	H4-D2
OTE N°		9022	9022	9022	9022
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	19.01.09	19.01.09	19.01.09	19.01.09
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25				
¾"	20		100		
3/8"	9.5	100	98	100	100
#4	4.75	97	85	99	98
#8	2.36	86	80	94	93
#16	1.18	63	62	83	80
#30	0.60	38	43	68	64
#50	0.30	14	25	54	50
#100	0.150	7	17	41	37
#200	0.075	5	14	30	24

Muestra		H5-D1	H6-D2	H7-D1	H8-D2
OTE N°		9022	9022	9022	9022
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	19.01.09	19.01.09	19.01.09	19.01.09
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25				100
¾"	20		100		99
3/8"	9.5	100	99	100	96
#4	4.75	95	96	98	88
#8	2.36	87	87	92	85
#16	1.18	77	77	81	75
#30	0.60	68	67	70	64
#50	0.30	60	60	60	56
#100	0.150	48	51	48	48
#200	0.075	34	40	30	36



División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

CORRELATIVO GENERAL **805218**

Muestra		H9-D1	H10-D2	H11-D1	H12-D2
OTE N°		9022	9022	9022	9022
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)		19.01.09	19.01.09	19.01.09	19.01.09
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25				
¾"	20	100			
3/8"	9.5	99	100	100	
#4	4.75	95	97	98	100
#8	2.36	93	91	92	96
#16	1.18	83	78	81	86
#30	0.60	69	62	67	76
#50	0.30	55	49	55	65
#100	0.150	44	39	46	55
#200	0.075	37	33	39	46

Muestra		H13-D1	H14-D2	H15-D1	H16-D2
OTE N°		9022	9022	9022	9022
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)		19.01.09	19.01.09	19.01.09	19.01.09
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25	100			
¾"	20	99	100	100	
3/8"	9.5	94	99	93	100
#4	4.75	86	94	86	98
#8	2.36	83	89	80	94
#16	1.18	71	76	70	81
#30	0.60	52	54	51	51
#50	0.30	32	29	27	19
#100	0.150	18	12	11	9
#200	0.075	14	7	5	7

Página 3 de 5

IG-2009-0037

Proy. 2009-0033 (Salar del Huasco)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl



División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

CORRELATIVO GENERAL **805218**

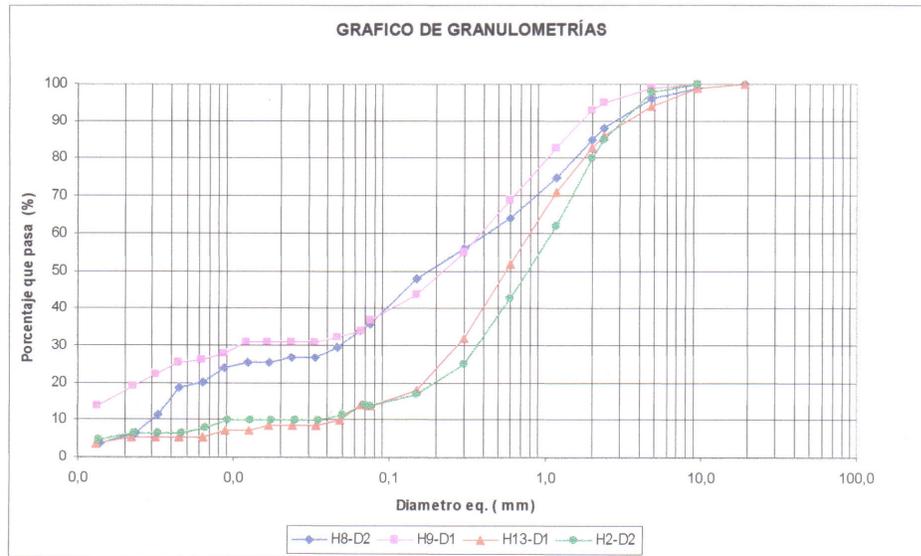
2.2 Granulometría por sedimentación según ASTM D 422

TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS								
SOLICITANTE	DICTUC S.A. – ÁREA DE ANÁLISIS DE AGUA Y RESIDUOS INDUSTRIALES LÍQUIDOS							
ATENCIÓN	JUAN EDUARDO JOHNSON							
PROYECTO	SALAR DEL HUASCO							
ENSAYO DE RESULTADOS DE DISTRIBUCION GRANULOMETRICA POR SEDIMENTACION								
MUESTRA	H8-D2		H9-D1		H13-D1		H2-D2	
GS	2,56		2,56		2,73		2,58	
	Diametro eq. mm	Porcentaje que pasa	Diametro eq. mm	Porcentaje que pasa	Diametro eq. mm	Porcentaje que pasa	Diametro eq. mm	Porcentaje que pasa
	19,0	100	19,0		19,0	100	19,0	
	9,50	99	9,50	100	9,50	99	9,50	100
	4,75	96	4,75	99	4,75	94	4,75	98
	2,36	88	2,36	95	2,36	86	2,36	85
	2,00	85	2,00	93	2,00	83	2,00	80
	1,18	75	1,18	83	1,18	71	1,18	62
	0,600	64	0,600	69	0,600	52	0,600	43
	0,300	56	0,300	55	0,300	32	0,300	25
	0,150	48	0,150	44	0,150	18	0,150	17
	0,075	36	0,075	37	0,075	14	0,075	14
	0,065	34	0,066	34	0,067	14	0,070	14
	0,047	30	0,047	32	0,048	10	0,050	12
	0,033	27	0,033	31	0,034	9	0,035	10
	0,024	27	0,024	31	0,024	9	0,025	10
	0,017	25	0,017	31	0,017	9	0,018	10
	0,012	25	0,012	31	0,012	7	0,013	10
	0,009	24	0,009	28	0,009	7	0,009	10
	0,006	20	0,006	26	0,006	5	0,007	8
	0,004	19	0,004	25	0,004	5	0,005	7
	0,003	12	0,003	22	0,003	5	0,003	7
	0,002	7	0,002	19	0,002	5	0,002	7
	0,001	4	0,001	14	0,001	4	0,001	5

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl

2.3. Curvas Granulométricas




Ing. Ramón Lobos Aravena
 Gerente de Área
 Ingeniería Geotécnica

RLA/VB

"La información contenida en el presente informe o certificado constituye el resultado de un ensayo, calibración o inspección técnica especificada acotado únicamente a las piezas, partes, instrumentos, patrones o procesos analizados, lo que en ningún caso permite al solicitante afirmar que sus productos han sido certificados por DICTUC ni reproducir total o parcialmente el logo, nombre o marca registrada de DICTUC, salvo que exista una autorización previa y por escrito de DICTUC".

AI.5 Región II de Antofagasta



759741
División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

1.1 RESULTADOS

Granulometría según Manual de Carretera LNV 105-86

Muestra		AC1-D1	AC2-D2	AC3-D1	AC4-D2
OTE N°		8350	8350	8350	8350
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)					
	Fecha	23.01.08	23.01.08	23.01.08	23.01.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25				
¾"	20	100	100	100	100
3/8"	9.5	97	95	98	96
#4	4.75	91	86	90	85
#8	2.36	89	75	78	74
#16	1.18	76	64	65	62
#30	0.60	65	48	49	47
#50	0.30	42	21	28	24
#100	0.150	17	6	11	7
#200	0.075	10	3	7	3

Muestra		LA1-D1	LA2-D2	LA3-D1	LA4-D2
OTE N°		8350	8350	8350	8350
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)					
	Fecha	23.01.08	23.01.08	23.01.08	23.01.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25				
¾"	20			100	
3/8"	9.5	100	100	95	100
#4	4.75	97	97	88	98
#8	2.36	91	91	81	94
#16	1.18	85	81	77	90
#30	0.60	78	62	73	84
#50	0.30	65	34	67	74
#100	0.150	44	23	58	55
#200	0.075	35	20	51	48

Página 2 de 6

IG2008-231

Pr.2008-59 (Altiplano II Región)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl



759741

División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

Muestra	T1-D1	TU2-D2	TU3-D1	T4-D2
OTE N°	8350	8350	8350	8350
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	23.01.08	23.01.08	23.01.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)		
1"	25			
3/4"	20	100	100	100
3/8"	9.5	96	93	91
#4	4.75	88	86	81
#8	2.36	76	75	71
#16	1.18	63	63	58
#30	0.60	48	51	46
#50	0.30	27	34	27
#100	0.150	13	14	11
#200	0.075	9	8	6

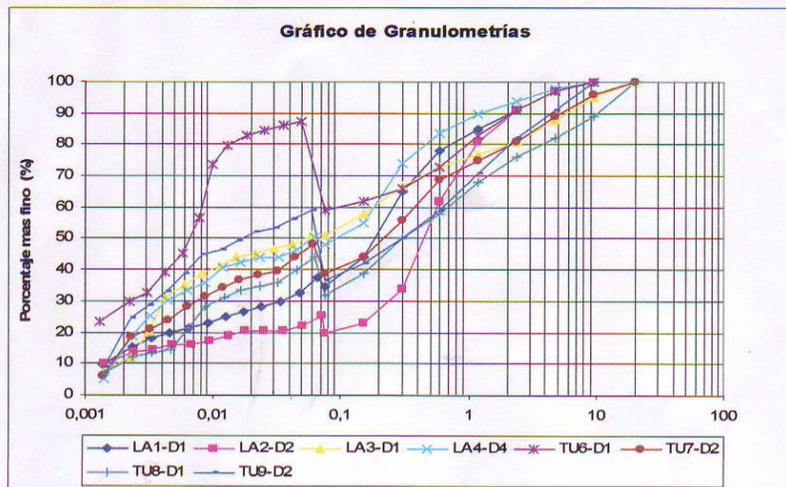
Muestra	TU6-D1	TU7-D2	TU8-D1	TU9-D2
OTE N°	8350	8350	8350	8350
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	23.01.08	23.01.08	23.01.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)		
1"	25			
3/4"	20		100	100
3/8"	9.5	100	96	89
#4	4.75	97	89	82
#8	2.36	91	81	76
#16	1.18	83	75	68
#30	0.60	73	69	58
#50	0.30	66	56	50
#100	0.150	62	44	39
#200	0.075	59	39	32

1.2 Granulometría según ASTM D 422

TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS								
SOLICITANTE	INGENIERIA HIDRAULICA							
ATENCION								
ENSAYO DE RESULTADOS DE DISTRIBUCION GRANULOMETRICA POR SEDIMENTACION								
MUESTRA	LA1-D1		LA2-D2		LA3-D1		LA4-D4	
GS	2,51		2,45		2,57		2,49	
	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino
	0,066	38	0,071	26	0,059	51	0,064	51
	0,048	33	0,051	22	0,043	48	0,046	46
	0,034	30	0,036	21	0,030	47	0,033	44
	0,024	28	0,026	21	0,022	45	0,023	44
	0,017	27	0,018	21	0,015	44	0,016	42
	0,013	25	0,013	19	0,011	41	0,012	41
	0,009	23	0,009	18	0,008	39	0,009	36
	0,006	22	0,007	16	0,006	35	0,006	34
	0,005	20	0,005	16	0,004	31	0,004	30
	0,003	18	0,003	15	0,003	20	0,003	26
	0,002	15	0,002	14	0,002	12	0,002	19
	0,001	10	0,001	10	0,001	7	0,001	5
MUESTRA	TU6-D1		TU7-D2		TU8-D1		TU9-D2	
GS	2,57		2,54		2,52		2,49	
	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino
	0,050	88	0,061	48	0,062	44	0,059	59
	0,036	86	0,044	44	0,045	40	0,042	56
	0,025	85	0,032	40	0,033	36	0,031	54
	0,018	83	0,023	38	0,023	35	0,022	52
	0,013	80	0,016	37	0,016	34	0,016	49
	0,010	74	0,012	34	0,012	31	0,012	47
	0,008	57	0,009	31	0,009	28	0,008	45
	0,006	45	0,006	28	0,006	21	0,006	39
	0,004	39	0,004	24	0,005	15	0,004	33
	0,003	33	0,003	21	0,003	13	0,003	29
	0,002	30	0,002	18	0,002	12	0,002	25
	0,001	24	0,001	6	0,001	7	0,001	9

Observación:

No se conoce el comportamiento de las sales frente a la sustancia química utilizada en el ensayo Tripolifosfato sódico, utilizado en el ensayo de Granulometría por Sedimentación.



1.3 RESULTADOS

1.3.1 ENSAYO DE SALES SOLUBLES

Los ensayos se realizaron por el Área de Resistencia de Materiales – Resmat de DICTUC S.A. Los resultados fueron informados en el Documento N° 740882 y N° 740883 de fecha 18 de febrero de 2008.

Procedimientos

"Manual de Carreteras, Volumen N° 8, sección 8.202.14"

Muestra	Sales Solubles (%)
LA4-D1	17.5
TU6-D1	20.4

Observación: Ensayo realizado con material que pasa tamiz N° 4 (5 mm).

Ing. Ramón Lobos Aravena
Gerente de Área
Ingeniería Geotécnica

RLA/VBO

FI-E.02-AIG

LA INFORMACION CONTENIDA EN EL PRESENTE INFORME O CERTIFICADO CONSTITUYE EL RESULTADO DE UN ENSAYO, CALIBRACION O INSPECCION TECNICA ESPECIFICA ACOTADO UNICAMENTE A LAS PIEZAS, PARTES, INSTRUMENTOS O PATRONES O PROCESOS ANALIZADOS, LO QUE EN NINGUN CASO PERMITE AL SOLICITANTE AFIRMAR QUE SUS PRODUCTOS HAN SIDO "CERTIFICADOS POR DICTUC", NI REPRODUCIR EN NINGUNA FORMA EL LOGO, NOMBRE O MARCA REGISTRADA DE DICTUC, SALVO QUE EXISTA UNA AUTORIZACION PREVIA Y POR ESCRITO DE DICTUC.

Página 5 de 6

IG2008-231

Pr.2008-59 (Altiplano II Region)

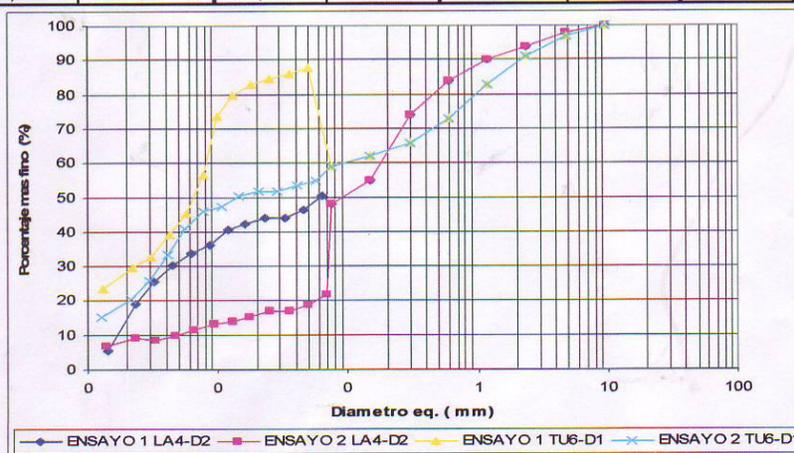
DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl

2.0 ANEXO

Después de la realización de los ensayos de sales solubles a dos muestras encargadas por cliente, identificadas como LA4-D2 y TU6-D1 se decide realizar nuevamente el ensayo de Granulometría por sedimentación, ya que se consideran estar limpias de sales entregando diferencias en los resultados.

ENSAYO 1 LA4-D2		ENSAYO 2 LA4-D2		ENSAYO 1 TU6-D1		ENSAYO 2 TU6-D1	
GS	2,49	GS	2,57	GS	2,57	GS	2,71
Diametro eq. mm	Porcentaje % que pasa						
25		25		25		25	
20		20		20		20	
9,5	100	9,5	100	9,5	100	9,5	100
4,75	98	4,75	98	4,75	97	4,75	97
2,36	94	2,36	94	2,36	91	2,36	91
1,18	90	1,18	90	1,18	83	1,18	83
0,600	84	0,600	84	0,600	73	0,600	73
0,300	74	0,300	74	0,300	66	0,300	66
0,150	55	0,150	55	0,150	62	0,150	62
0,075	48	0,075	48	0,075	59	0,075	59
0,064	51	0,070	22	0,050	88	0,057	55
0,046	46	0,050	19	0,036	86	0,041	53
0,033	44	0,036	17	0,025	85	0,029	52
0,023	44	0,025	17	0,018	83	0,021	52
0,016	42	0,018	15	0,013	80	0,015	50
0,012	41	0,013	14	0,010	74	0,011	47
0,009	36	0,009	13	0,008	57	0,008	46
0,006	34	0,007	12	0,006	45	0,006	41
0,004	30	0,005	10	0,004	39	0,004	33
0,003	26	0,003	8	0,003	33	0,003	26
0,002	19	0,002	9	0,002	30	0,002	21
0,001	5	0,001	7	0,001	24	0,001	15



AI.6 Región III de Atacama



765135

División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica1.1 RESULTADOS
Granulometría según Manual de Carretera LNV 105-86

Muestra	AT	M1-D1	M2-D2	M3-D1
OTE N°	8549	8549	8549	8549
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	17.04.08	17.04.08	14.04.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)		
1"	25	100	100	
3/4"	20	96	95	100
3/8"	9.5	100	87	90
#4	4.75	99	81	81
#8	2.36	99	75	73
#10	2.00	99	74	71
#16	1.18	97	70	64
#30	0.60	87	64	56
#50	0.30	62	47	42
#100	0.150	22	26	26
#200	0.075	8	20	21

Muestra	M4-D2	M5-D1	M6-D2	M7-D1
OTE N°	8549	8549	8549	8549
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	17.04.08	17.04.08	14.04.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)		
1"	25		100	100
3/4"	20	100	100	96
3/8"	9.5	98	97	90
#4	4.75	96	90	81
#8	2.36	94	81	74
#10	2.00	94	78	72
#16	1.18	93	69	67
#30	0.60	89	59	63
#50	0.30	78	37	58
#100	0.150	61	18	45
#200	0.075	52	5	35

Muestra	M8-D2	M9-D1	P1-D1	P2
OTE N°	8549	8549	8549	8549
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)	Fecha	17.04.08	17.04.08	14.04.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)		
1"	25			
3/4"	20	100	100	
3/8"	9.5	93	96	
#4	4.75	83	91	
#8	2.36	71	86	
#10	2.00	68	84	100
#16	1.18	59	79	99
#30	0.60	52	72	97
#50	0.30	44	58	94
#100	0.150	30	40	66
#200	0.075	20	34	44

Página 2 de 5
IG2008-505
Pr.2008-154 (MINSAL)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl



765135

División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

Muestra		P3-D1	P4-D2	P5-D1	P6-D2
OTE N°		8549	8549	8549	8549
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)					
	Fecha	17.04.08	17.04.08	14.04.08	17.04.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)			
1"	25		100		100
¾"	20		97	100	95
3/8"	9.5		96	98	91
#4	4.75		94	90	87
#8	2.36		93	81	82
#10	2.00		93	79	81
#16	1.18		89	71	77
#30	0.60	100	83	62	70
#50	0.30	98	77	48	49
#100	0.150	74	66	26	16
#200	0.075	52	58	15	9

Muestra		P7-D1	P8-D2
OTE N°		8549	8549
GRANULOMETRÍA (LNV 105-86)			
	Fecha	17.04.08	17.04.08
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Porcentaje que Pasa (%)	
1"	25		
¾"	20	100	100
3/8"	9.5	91	93
#4	4.75	83	82
#8	2.36	73	71
#10	2.00	70	69
#16	1.18	63	60
#30	0.60	54	51
#50	0.30	40	35
#100	0.150	19	16
#200	0.075	12	9



Ing. Ramón Lobos Aravena
Gerente de Área
Ingeniería Geotécnica

RLA/VBO

FI-E.02-AIG

LA INFORMACION CONTENIDA EN EL PRESENTE INFORME O CERTIFICADO CONSTITUYE EL RESULTADO DE UN ENSAYO, CALIBRACION O INSPECCION TECNICA ESPECIFICA ACOTADO UNICAMENTE A LAS PIEZAS, PARTES, INSTRUMENTOS O PATRONES O PROCESOS ANALIZADOS, LO QUE EN NINGUN CASO PERMITE AL SOLICITANTE AFIRMAR QUE SUS PRODUCTOS HAN SIDO "CERTIFICADOS POR DICTUC", NI REPRODUCIR EN NINGUNA FORMA EL LOGO, NOMBRE O MARCA REGISTRADA DE DICTUC, SALVO QUE EXISTA UNA AUTORIZACION PREVIA Y POR ESCRITO DE DICTUC.

Página 3 de 5
IG2008-505
Pr.2008-154 (MINSAL)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl

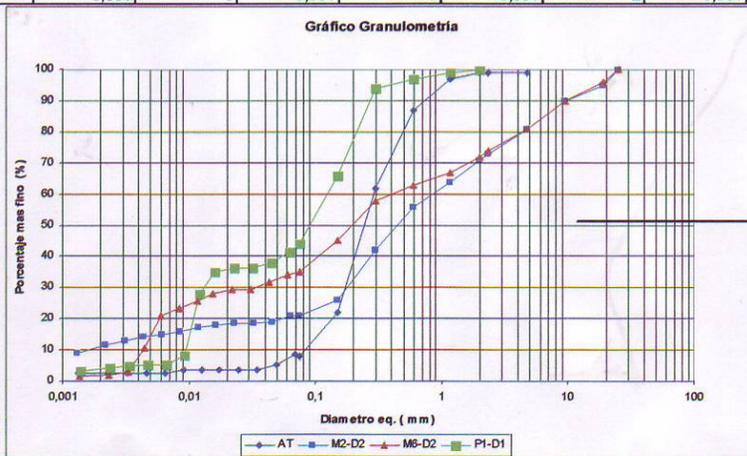
765135



División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

1.2 Granulometría según ASTM D 422

TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS								
SOLICITANTE	HIDRAULICA DICTUC							
ATENCION	JUAN EDUARDO JOHNSON							
ENSAYO DE RESULTADOS DE DISTRIBUCION GRANULOMETRICA POR SEDIMENTACION								
MUESTRA	AT		M2-D2		M6-D2		P1-D1	
Fecha	21,04,08		23,04,08		23,04,08		23,04,08	
GS	2,86		2,84		2,82		2,74	
	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino	Diametro eq. mm	Porcentaje mas fino
	25		25	100	25	100		
	19		19	95	19	96		
	9,5		9,5	90	9,5	90		
	4,75	99	4,75	81	4,75	81	4,75	
	2,36	99	2,36	73	2,36	74	2,36	
	2,00	99	2,00	71	2,00	72	2,00	100
	1,18	97	1,18	64	1,18	67	1,18	99
	0,600	87	0,600	56	0,600	63	0,600	97
	0,300	62	0,300	42	0,300	58	0,300	94
	0,150	22	0,150	26	0,150	45	0,150	66
	0,075	8	0,075	21	0,075	35	0,075	44
	0,069	9	0,065	21	0,061	34	0,064	42
	0,050	5	0,046	19	0,043	32	0,046	38
	0,035	4	0,033	19	0,031	29	0,032	37
	0,025	4	0,023	19	0,022	29	0,023	37
	0,018	4	0,016	18	0,016	28	0,016	35
	0,013	4	0,012	18	0,012	26	0,012	28
	0,009	4	0,009	16	0,008	23	0,009	8
	0,007	3	0,006	15	0,006	21	0,007	5
	0,005	3	0,004	14	0,004	11	0,005	5
	0,003	3	0,003	13	0,003	3	0,003	5
	0,002	3	0,002	12	0,002	2	0,002	4
	0,001	3	0,001	9	0,001	2	0,001	3



Página 4 de 5
IG2008-505
Pr.2008-154 (MINSAL)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

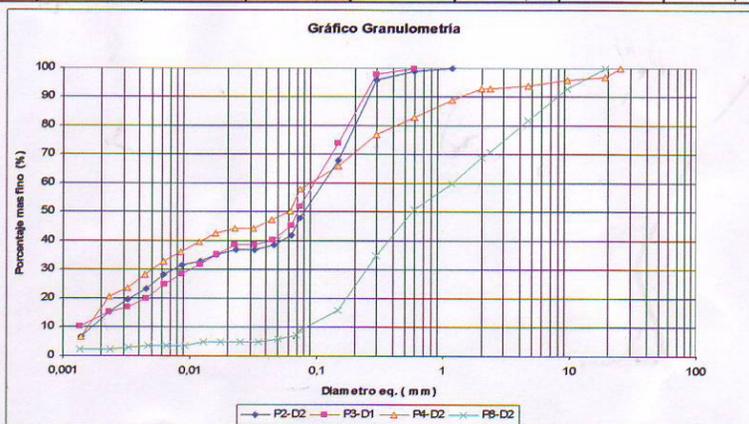
Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl



765135

División Ingeniería Estructural y Geotécnica
Área Ingeniería Geotécnica

TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS								
SOLICITANT	HIDRAULICA DICTUC							
ATENCION	JUAN EDUARDO JOHNSON							
ENSAYO DE RESULTADOS DE DISTRIBUCION GRANULOMETRICA POR SEDIMENTACION								
MUESTRA	P2-D2		P3-D1		P4-D2		P8-D2	
Fecha	23,04,08		21,04,08		21,04,08		21,04,08	
GS	2,69		2,69		2,63		2,77	
	Diametro eq.	Porcentaje	Diametro eq.	Porcentaje	Diametro eq.	Porcentaje	Diametro eq.	Porcentaje
	mm	mas fino	mm	mas fino	mm	mas fino	mm	mas fino
	25		25		25	100		
	19		19		19	97	19	100
	9,5		9,5		9,5	96	9,5	93
	4,75		4,75		4,75	94	4,75	82
	2,36		2,36		2,36	93	2,36	71
	2,00		2,00		2,00	93	2,00	69
	1,18	100	1,18		1,18	89	1,18	60
	0,600	99	0,600	100	0,600	83	0,600	51
	0,300	96	0,300	98	0,300	77	0,300	35
	0,150	68	0,150	74	0,150	66	0,150	16
	0,075	48	0,075	52	0,075	58	0,075	9
	0,065	42	0,064	45	0,063	50	0,071	7
	0,046	39	0,046	40	0,045	47	0,050	6
	0,033	37	0,033	39	0,032	44	0,036	5
	0,023	37	0,023	39	0,023	44	0,025	5
	0,017	35	0,017	35	0,016	43	0,018	5
	0,012	33	0,012	32	0,012	40	0,013	5
	0,009	32	0,009	29	0,009	36	0,009	4
	0,006	28	0,006	25	0,006	33	0,007	4
	0,005	23	0,005	20	0,004	28	0,005	4
	0,003	20	0,003	17	0,003	24	0,003	3
	0,002	15	0,002	15	0,002	21	0,002	2
	0,001	7	0,001	10	0,001	7	0,001	2



Página 5 de 5
IG2008-505
Pr.2008-154 (MINSAL)

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago - Chile / Fono: (56-2) 354 4215 - 354 4208 / Fax: (56-2) 553 2268
e-mail: ingeot@ing.puc.cl / www.dictuc.cl

ANEXO III
“Evaporación de Tanque”

ANEXO III EVAPORACIÓN DE TANQUE

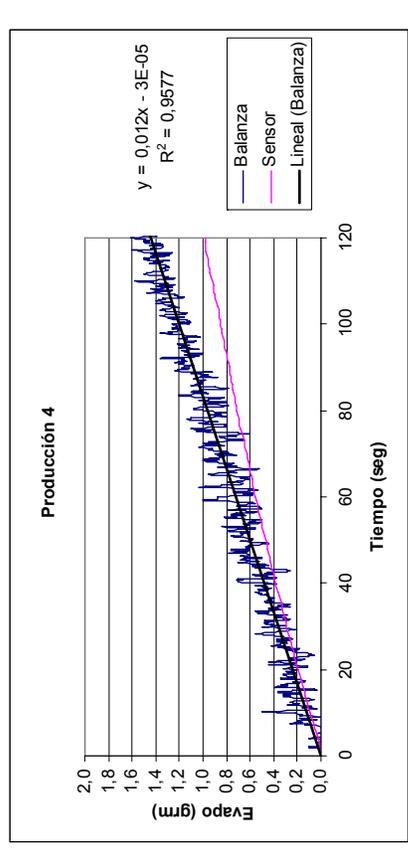
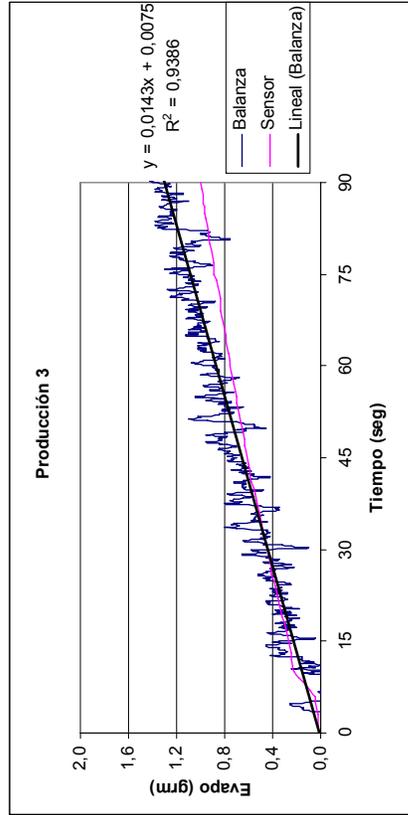
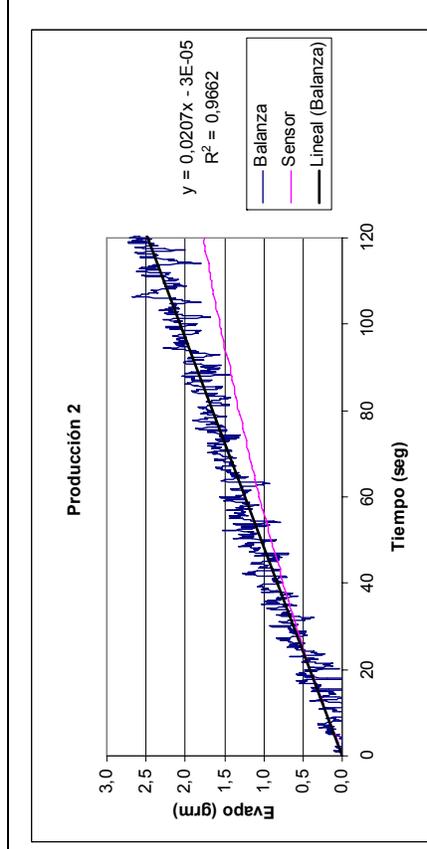
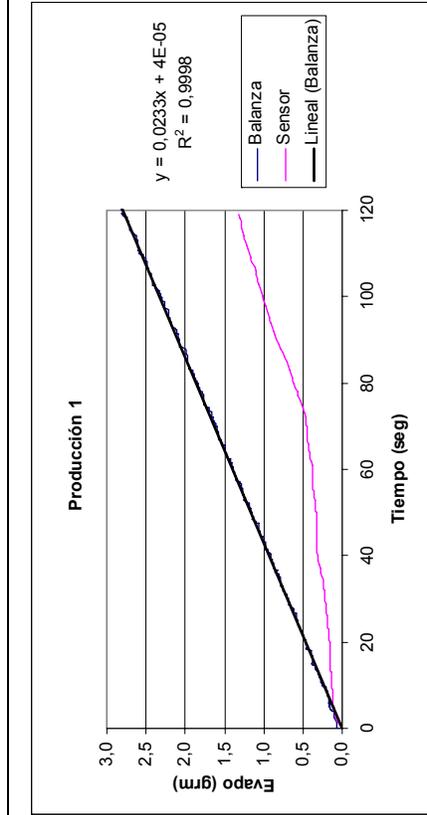
Código	Nombre	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Evapo. (mm/día)	Años registro
		Este	Norte			
01201003-6	Lluta	424.127	8.009.643	3.248	5,7	17
01001005-5	Caquena	478.832	8.004.246	4.400	4,3	11
01202009-0	Pacollo	448.878	7.991.283	4.400	4,3	10
01020014-8	Cotacotani	475.323	7.989.490	4.500	5,2	30
01020017-2	Parinacota (ex endesa)	471.800	7.987.641	4.390	4,5	21
01202010-4	Putre	440.075	7.987.569	3.530	5,6	24
01010010-0	Chungará Ajata	482.378	7.983.966	4.570	4,2	23
01010007-0	Chungará Retén	487.668	7.978.438	4.570	5,2	10
01310022-5	Aeródromo el Buitre	360.996	7.953.962	30	7,3	22
01310019-5	Azapa	382.124	7.952.260	350	7,0	33
01410012-1	Codpa	420.979	7.917.420	1.800	5,3	40
01502006-7	Cuya	377.307	7.882.139	120	6,6	13
01730018-0	Lagunillas (pampa lirima)	515.706	7.805.083	3.940	5,5	25
01740002-9	Cerro Colorado	479.082	7.784.789	2.630	7,4	11
01050007-9	Coyacagua	517.429	7.782.949	3.990	6,1	44
01700010-1	Huara en Fuerte Baquedano	421.599	7.775.403	1.000	8,8	13
01080001-3	Ujina	536.384	7.681.472	4.200	5,5	11
02020001-4	Cebollar	568.241	7.618.807	3.730	7,8	15
02101003-0	Lequena	535.139	7.605.268	3.320	7,6	25
02103007-4	San Pedro de Conchi	548.875	7.574.445	3.217	10	19
02103008-2	Parshall n2	549.805	7.573.477	3.318	10,8	39
02103009-0	Ojos San Pedro	568.440	7.568.716	3.800	6,4	17
02104009-6	Conchi Muro Embalse	538.960	7.565.092	3.010	8,2	13
02104005-8	Conchi Embalse	539.003	7.564.490	3.010	9,5	38
02103010-4	Inacaliri	596.588	7.564.208	4.100	6,4	23
02105016-4	Linzor	600.913	7.541.763	4.096	5,4	34
02105015-6	Turi	571.634	7.539.949	3.070	8,5	11
02105017-2	Toconce	586.111	7.537.991	3.350	6,6	33
02105018-0	Ayquina	570.227	7.536.538	3.031	9,6	15
02105021-0	Caspana	581.581	7.529.879	3.260	6,4	35
02104010-k	Chiu-chiu	536.440	7.529.250	2.524	6,7	33
02105022-9	El Tatio	601.729	7.526.160	4.320	4,5	13
02112009-k	Coya Sur	435.924	7.523.433	1.290	10	19

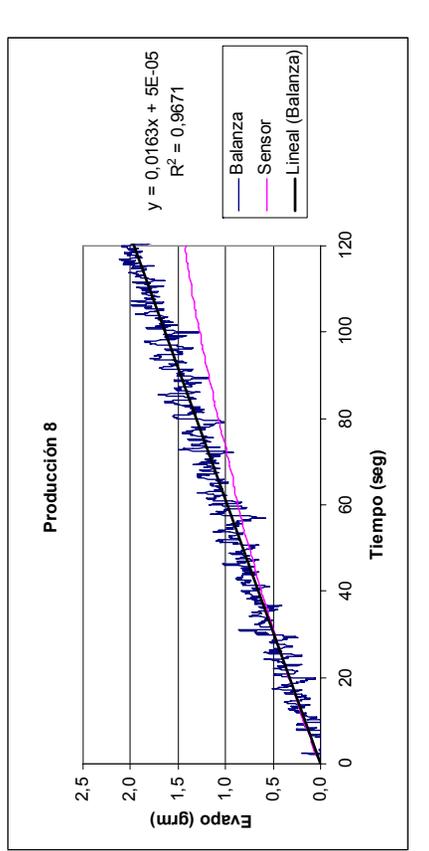
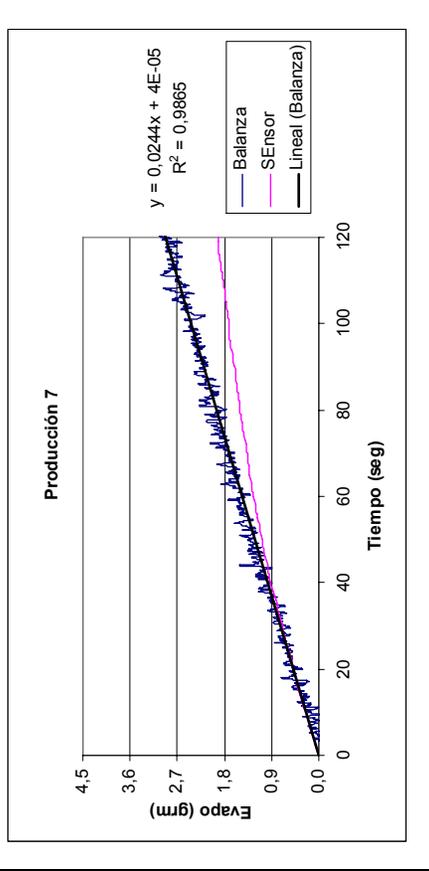
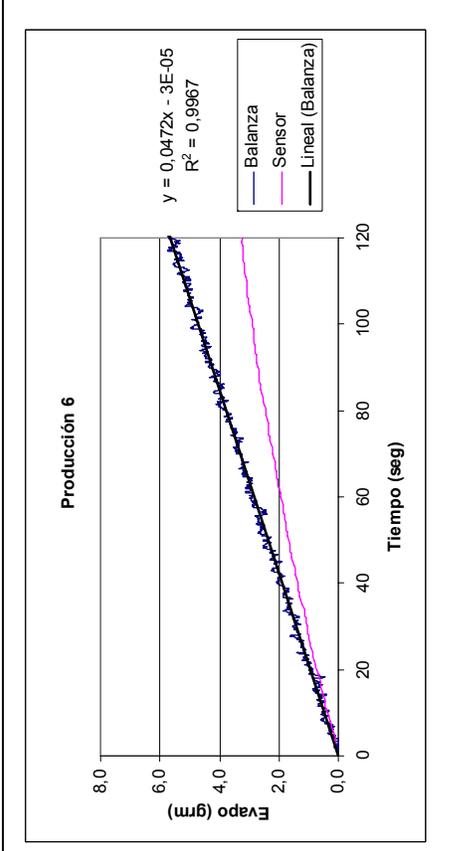
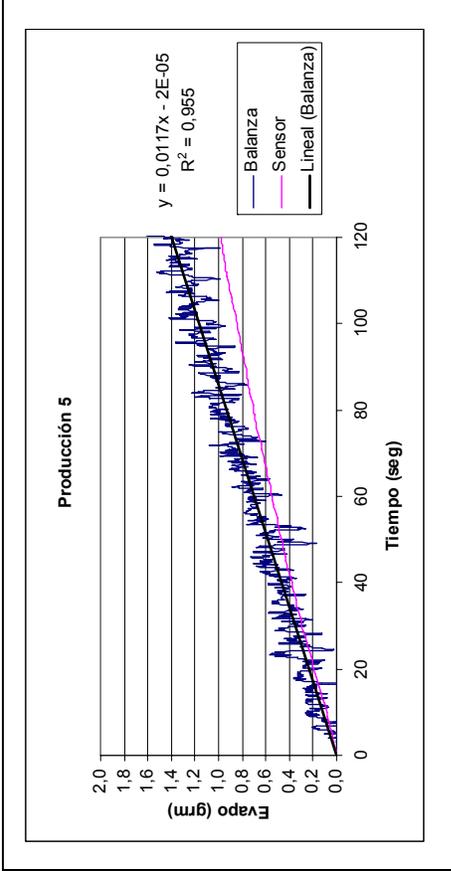
Código	Nombre	Coordenadas UTM		Altitud (msnm)	Evapo. (mm/día)	Años registro
		Este	Norte			
02110013-7	Calama	509.841	7.517.409	2.260	9,3	27
02510006-9	San Pedro de Atacama	582.197	7.466.520	2.450	8,3	27
02500016-1	Toconao Experimental	602.581	7.435.191	2.430	9,8	33
02710002-3	Baquesano	414.749	7.419.946	1.032	10,2	13
02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251	8,7	25
02710003-1	Antofagasta	358.725	7.389.982	50	5	10
02500020-k	Peine	595.346	7.381.030	2.480	9,3	34
02942001-7	Aguas Verdes	403.389	7.190.650	1.600	10,5	21
03450004-5	Copiapó	368.152	6.970.357	370	4,6	17
03430007-0	Los Loros	391.670	6.920.731	950	8	44
03430006-2	Lautaro Embalse	401.640	6.906.043	1.110	7,9	39
03701001-4	Canto del Agua	311.782	6.884.651	250	4,1	22
03414002-2	Iglesia Colorada	414.913	6.883.987	1.950	10,9	15
03826003-0	Huasco Bajo	285.477	6.848.780	90	2,6	14
03823004-2	La Compañía (vallenar)	323.375	6.837.931	410	4,3	15
03820004-6	Santa Juana	338.558	6.827.716	570	5,4	43
03806002-3	El Transito	375.142	6.805.665	1.150	8,8	15
03815004-9	San Felix	357.494	6.799.168	1.200	5,8	15
03802005-6	Conay	387.794	6.794.590	1.500	7,5	23

ANEXO IV
“Calibración del Domo”

ANEXO IV CALIBRACIÓN DEL DOMO

IV.1 Domo 1 Campaña 1





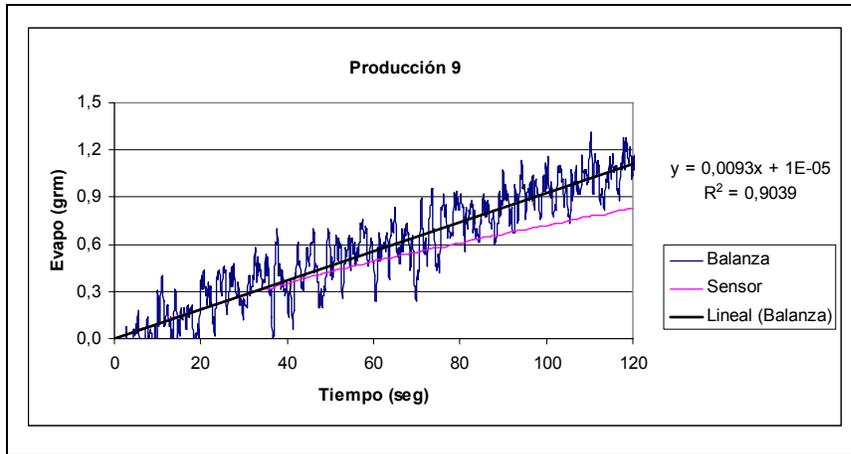
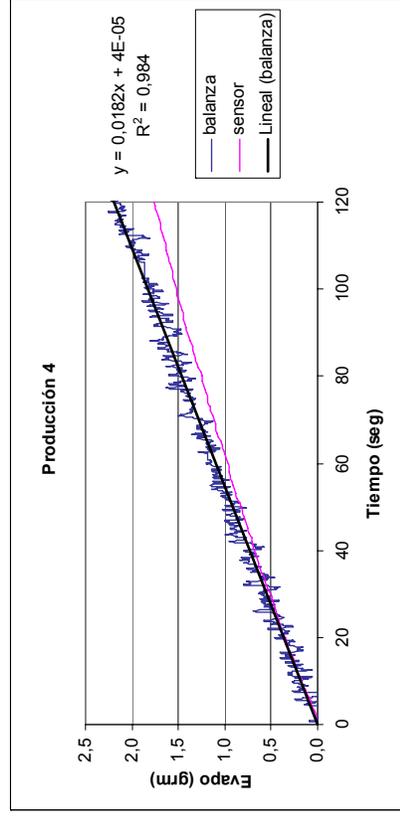
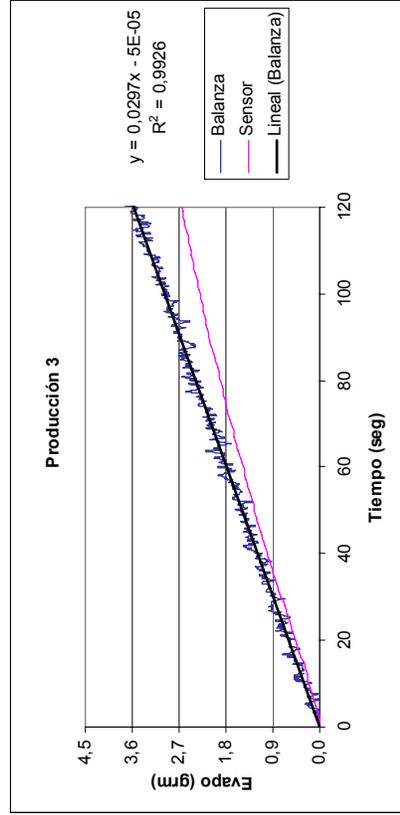
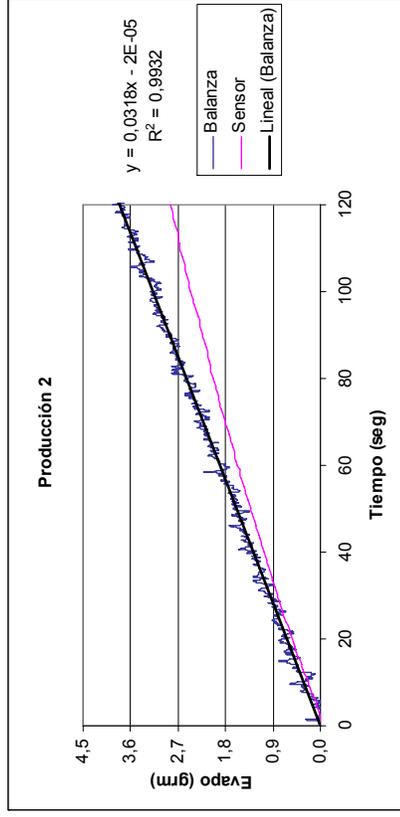
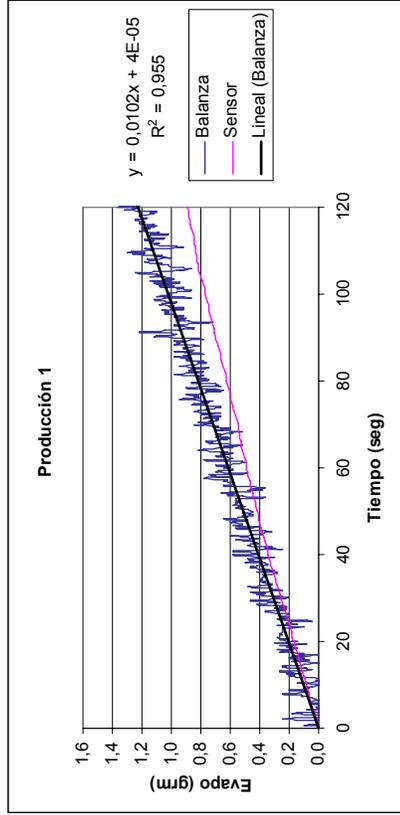
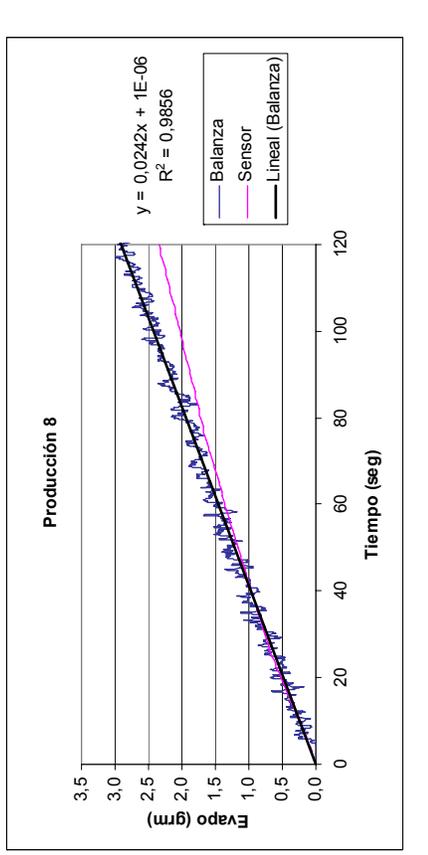
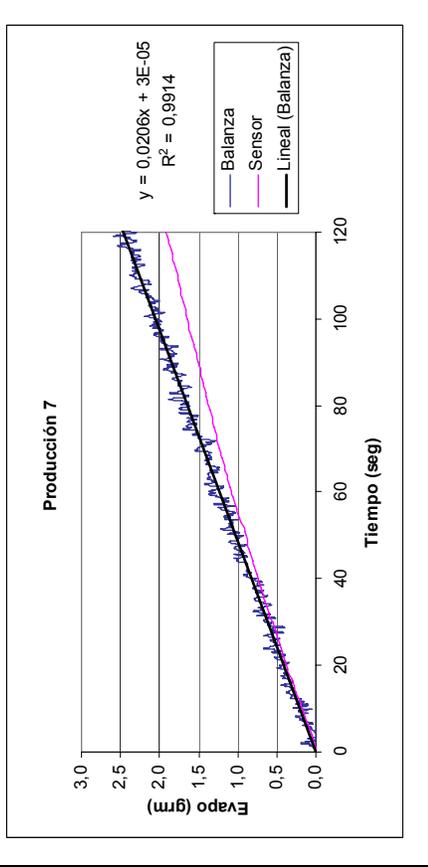
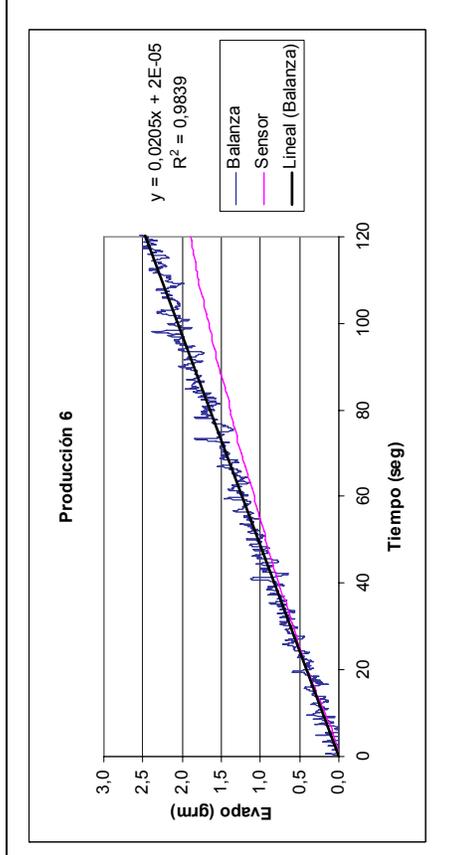
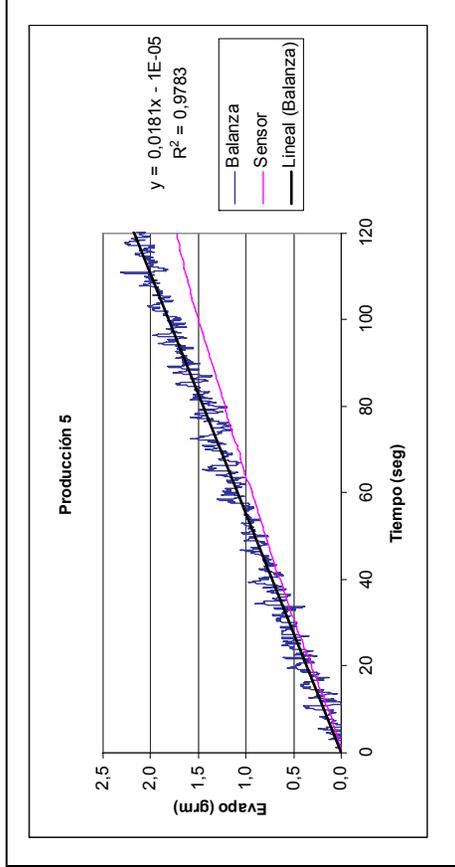


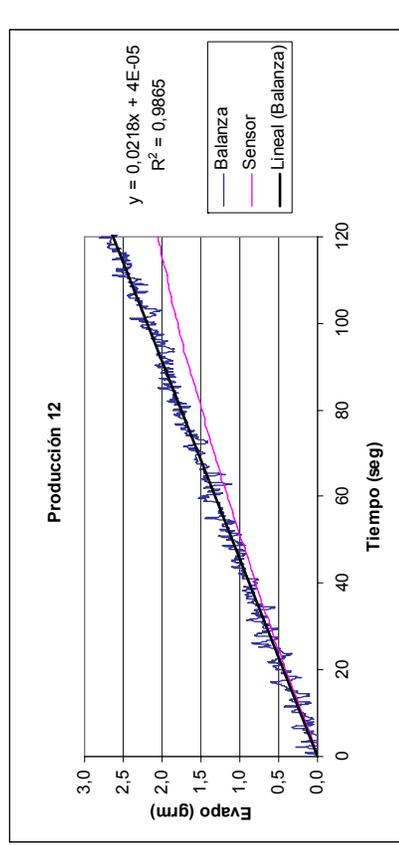
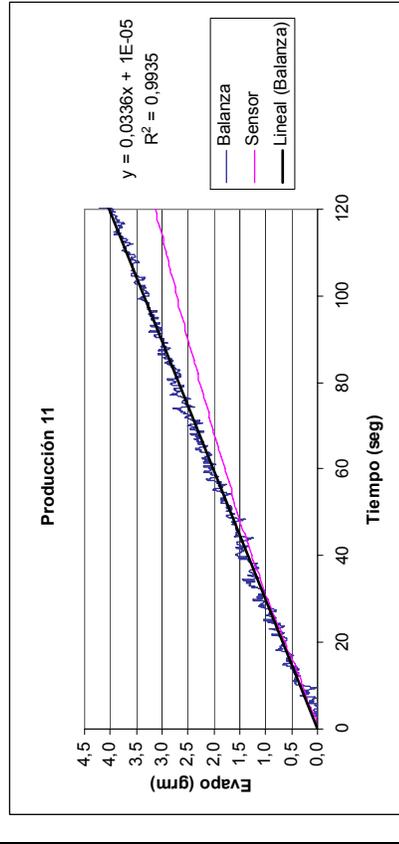
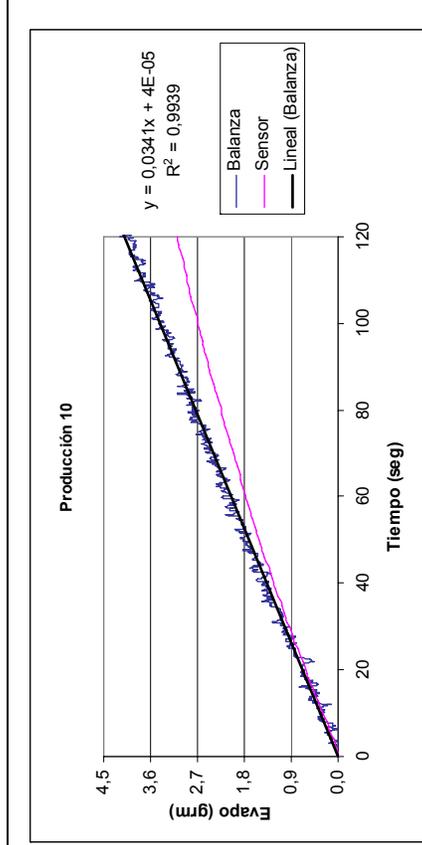
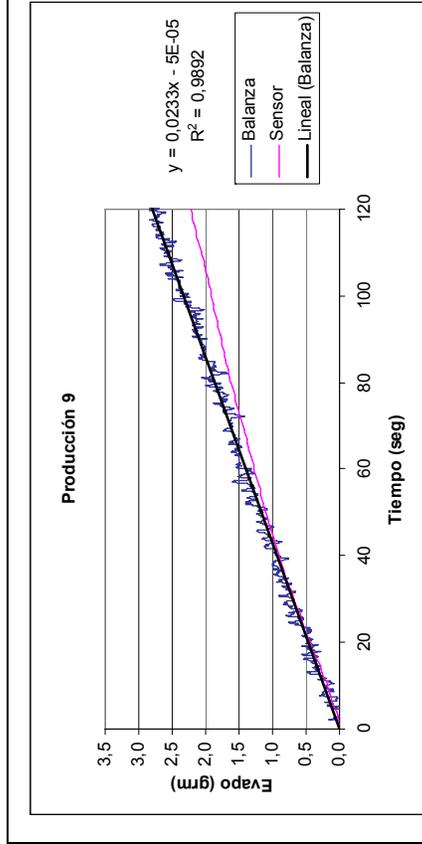
Tabla 8.1. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 1 campaña 1.

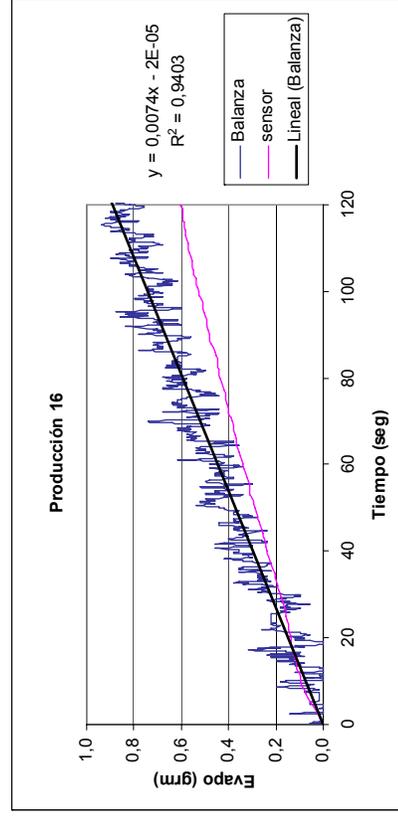
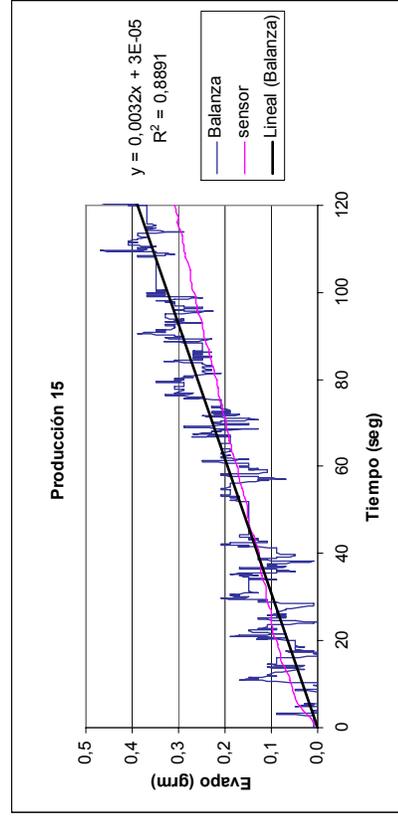
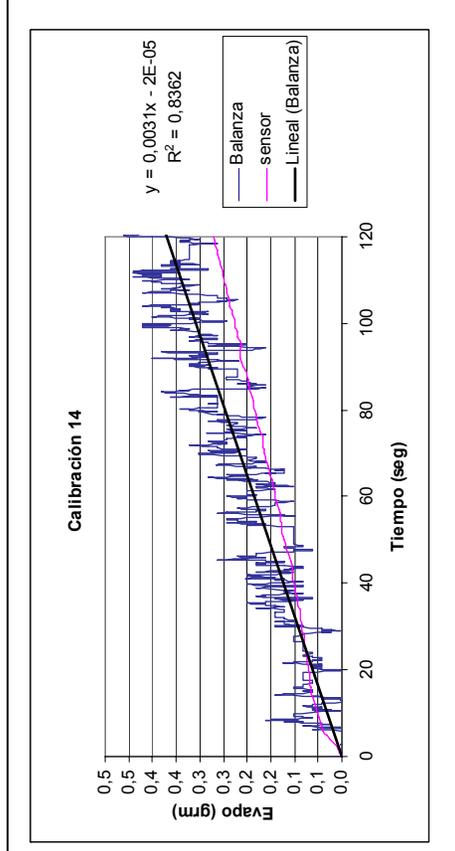
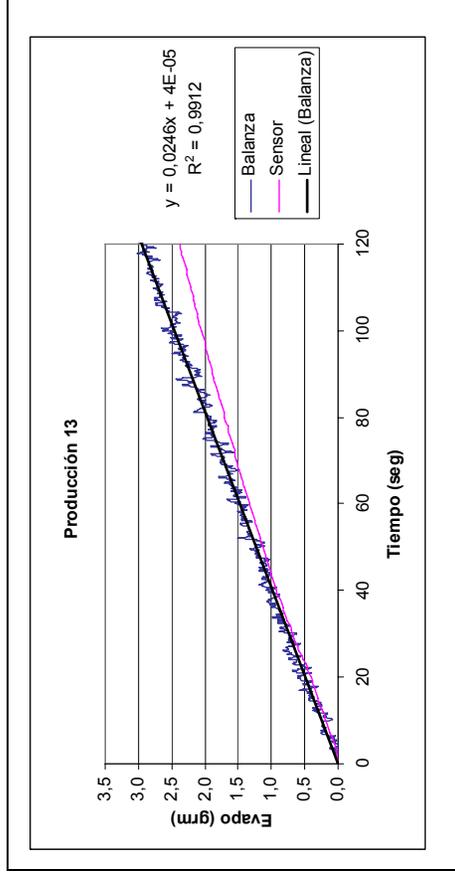
Med	Tasa Balanza	Tasa Sensor
1	0,0233	0,0242
2	0,0207	0,0218
3	0,0143	0,0130
4	0,0120	0,0106
5	0,0117	0,0110
6	0,0472	0,0417
7	0,0244	0,0267
8	0,0163	0,0177
9	0,0093	0,0101

IV.2 Domo 2 Campaña 1









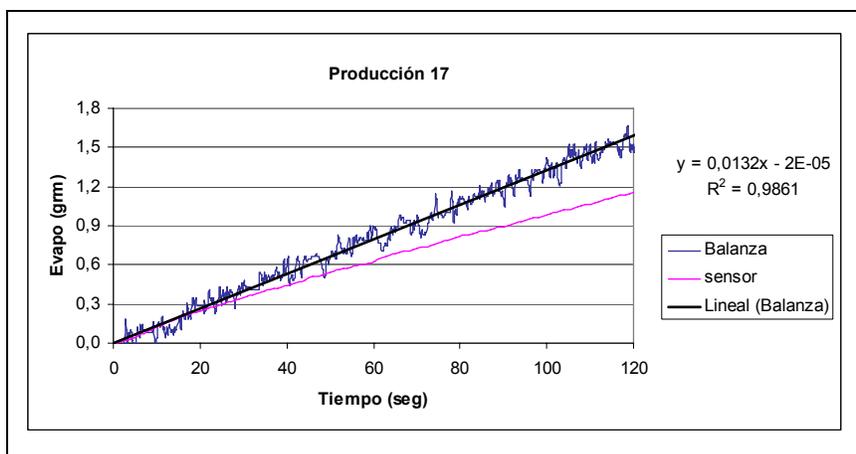
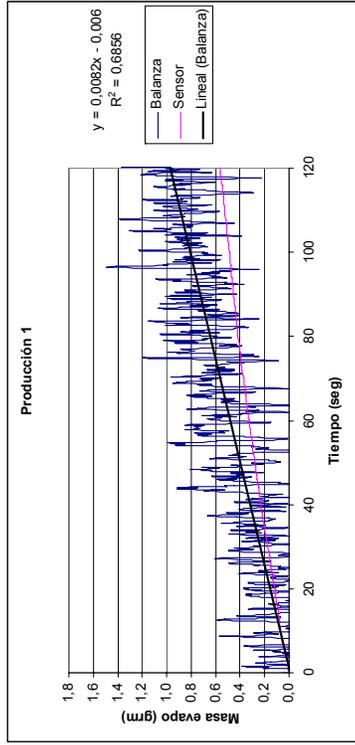


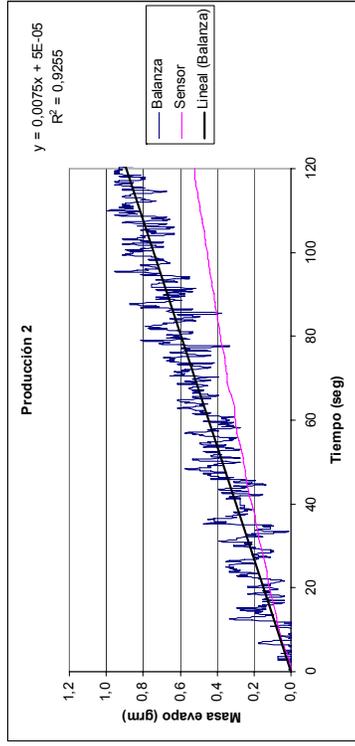
Tabla 8.2. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 2 campaña 1.

Med	Tasa Sensor	Tasa Balanza
1	0,0091	0,0102
2	0,0309	0,0318
3	0,0281	0,0297
4	0,0200	0,0182
5	0,0181	0,0181
6	0,0231	0,0205
7	0,0205	0,0206
8	0,0278	0,0242
9	0,0262	0,0233
10	0,0353	0,0341
11	0,0361	0,0336
12	0,0217	0,0218
13	0,0283	0,0246
14	0,0058	0,0031
15	0,0063	0,0032
16	0,0101	0,0074
17	0,0153	0,0132

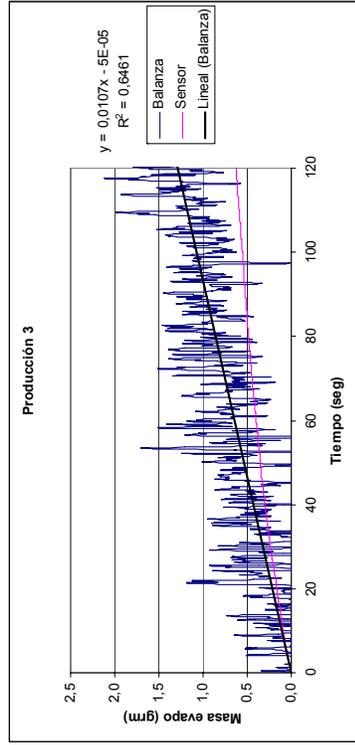
IV.3 Domo 1 Campaña 2



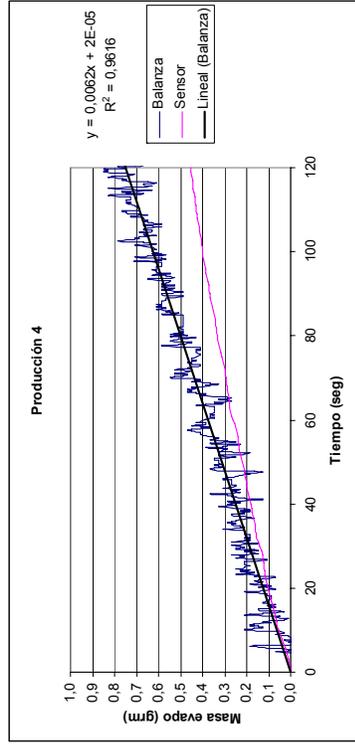
Viento: 2,5m/s, Corriente agua: 50V



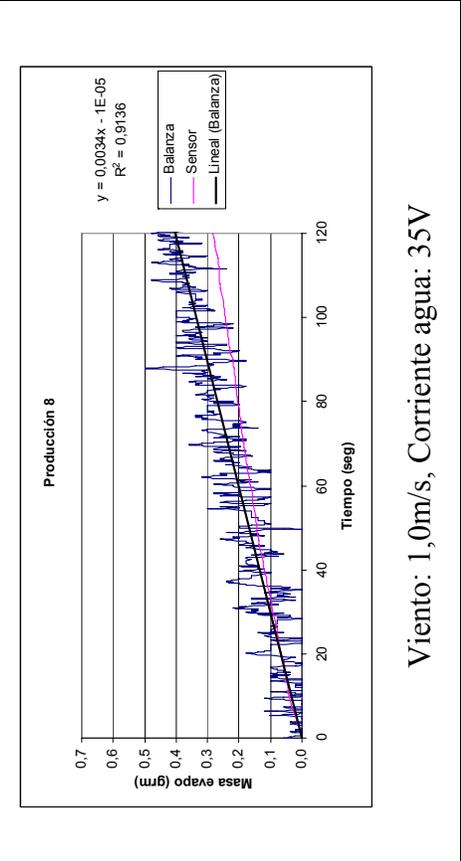
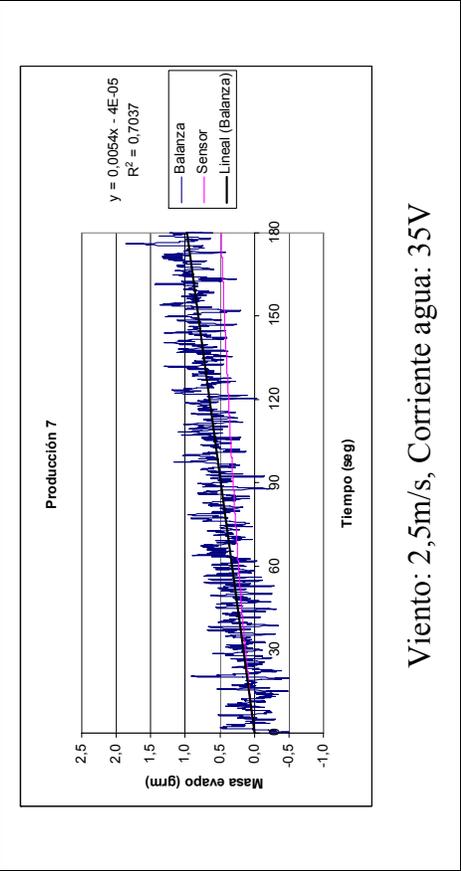
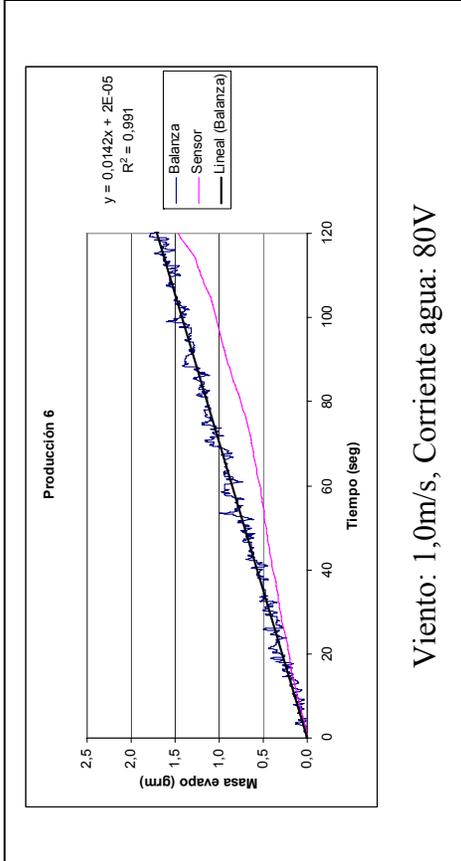
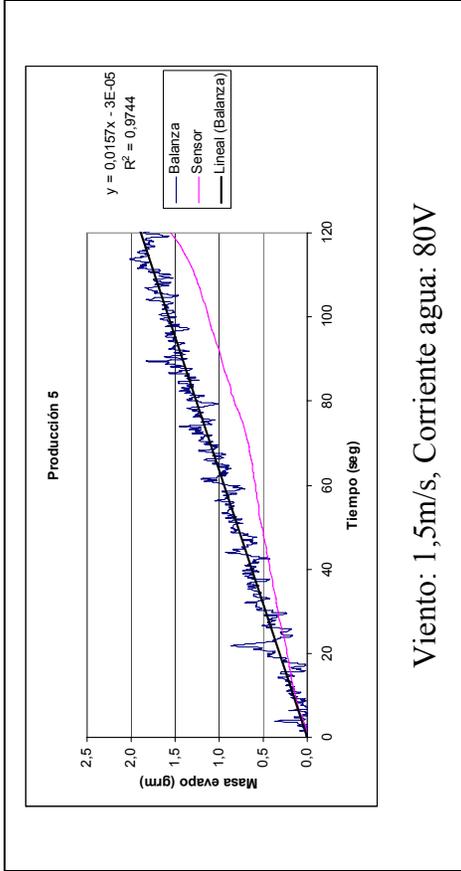
Viento: 1,5m/s, Corriente agua: 50V



Viento: 3,8m/s, Corriente agua: 50V



Viento: 1,0m/s, Corriente agua: 50V



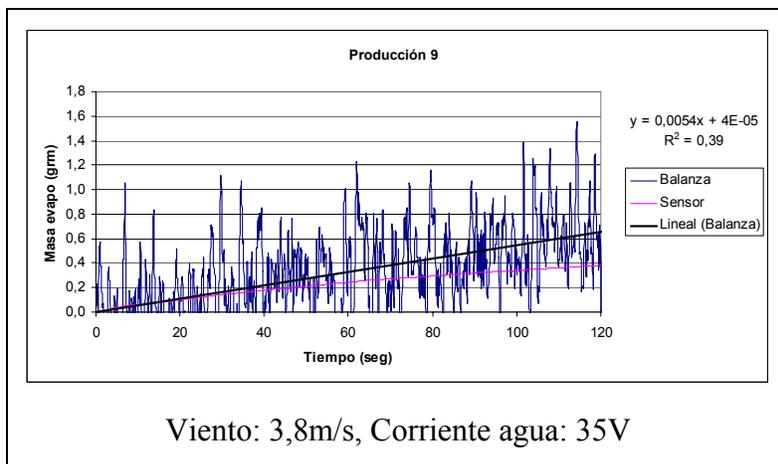
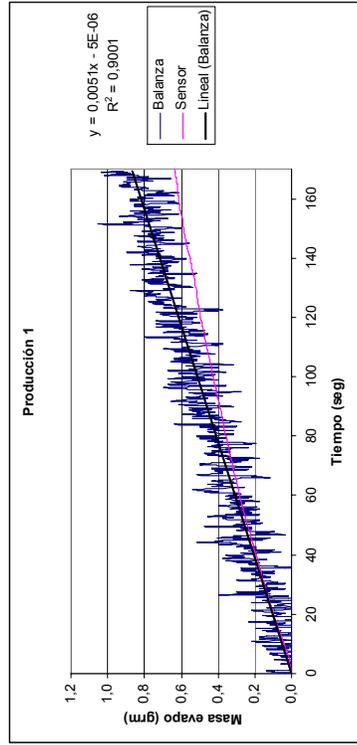


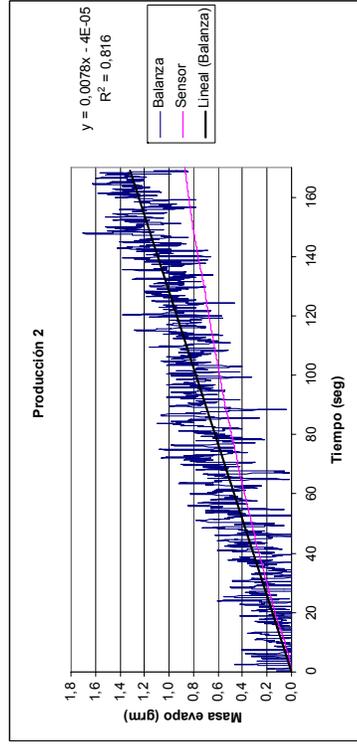
Tabla 8.3. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 1 campaña 2.

Med	Tasa Balanza	Tasa Sensor
1	0,0082	0,0076
2	0,0075	0,0075
3	0,0107	0,0100
4	0,0062	0,0068
5	0,0157	0,0154
6	0,0142	0,0125
7	0,0054	0,0055
8	0,0033	0,0045
9	0,0052	0,0070

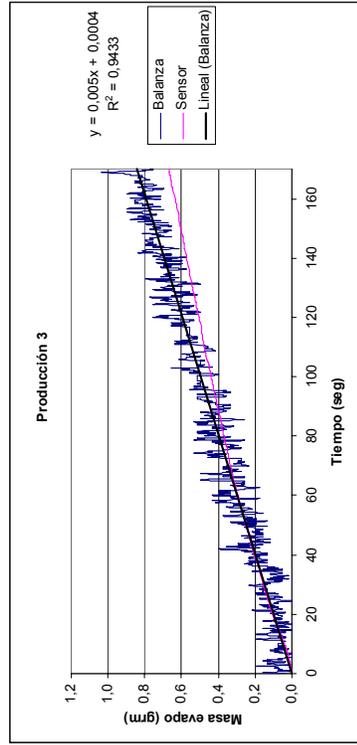
IV.4 Domo 2 Campaña 2



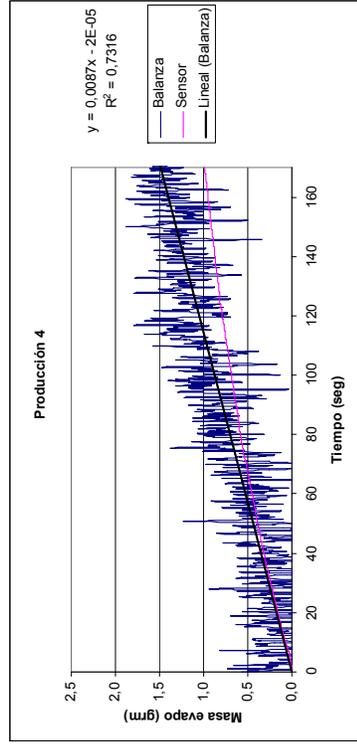
Viento: 1,9m/s, Corriente agua: 55V



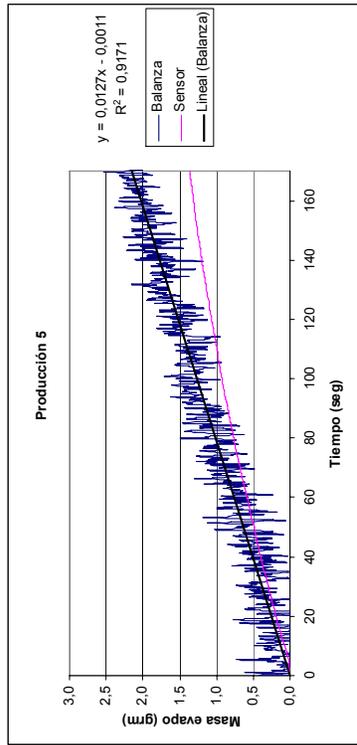
Viento: 2,8m/s, Corriente agua: 55V



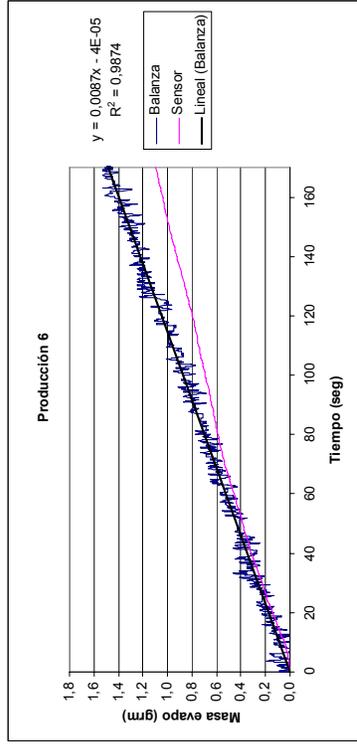
Viento: 2,2m/s, Corriente agua: 55V



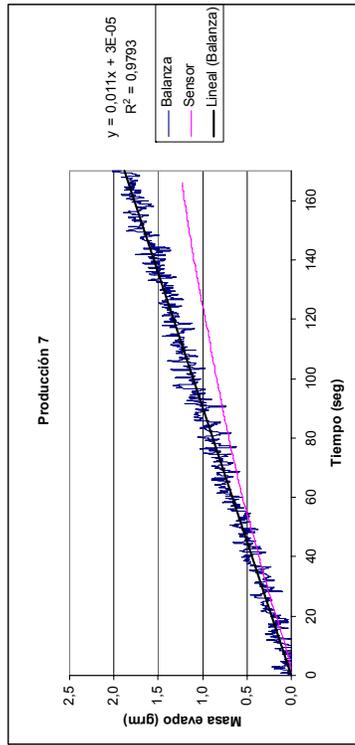
Viento: 4,0m/s, Corriente agua: 55V



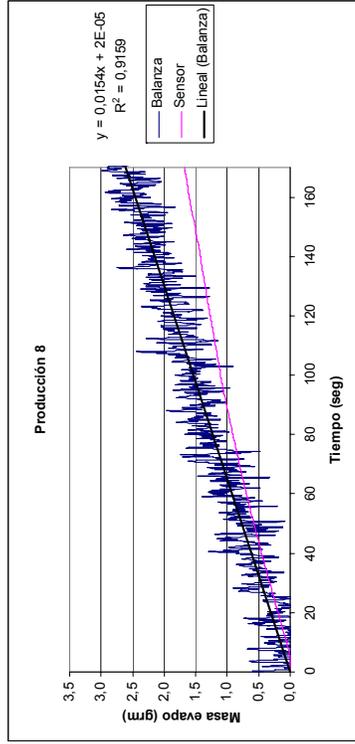
Viento: 2,8m/s, Corriente agua: 70V



Viento: 1,2m/s, Corriente agua: 70V



Viento: 1,9m/s, Corriente agua: 70V



Viento: 4,0m/s, Corriente agua: 70V

Tabla 8.4. Tasas de evaporación registradas en proceso de calibración Domo 2 campaña 2.

Med	Tasa Balanza	Tasa Sensor
1	0,0051	0,0062
2	0,0078	0,0079
3	0,0050	0,0061
4	0,0087	0,0097
5	0,0127	0,0120
6	0,0087	0,0099
7	0,0110	0,0109
8	0,0154	0,0133