



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXOS

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Sr. Juan Carlos García Pérez de Arce, Arquitecto

Director General de Aguas

Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo, Ingeniero Civil en Industrias Forestales

Jefa (S) División Estudios y Planificación

Sra. Andrea Osses Vargas, Ingeniero Civil

Inspector Fiscal

Sr. Sebastián Menares Lira, Geólogo

Inspectores Fiscales Subrogantes

Sr. Maximiliano Bolados Arratia, Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Sr. Javier Vidal Reyes, Ingeniero Agrónomo

Consultora

Jefe de Proyecto

Sr. Claudio Reyes Hurtado, Ingeniero Forestal

Especialistas y Profesionales

Sr. Eugenio Celedón Cariola, Ingeniero Civil

Sr. Eugenio Celedón Correa, Ingeniero Civil

Sr. Alejandro Rodríguez Lazcano, Ingeniero Civil

Sra. Vanessa Mancisidor Univaso, Periodista

Sr. Víctor Gómez Coa, Geógrafo

Sra. Karina Aguilera Casanueva, Bióloga

Sra. Virginia Carter Gamberini, Geógrafa PhD

Sr. Marcial Valenzuela Celis, Ingeniero Forestal

Sr. Diego Carpentier Nazal, Ingeniero Civil

Sr. Diego Niklitschek Flores, Ingeniero Civil

Sr. Sebastián Carvajal Marambio, Geólogo

Sra. Yumisleidys Sánchez Sánchez, Geóloga

Sra. Camila Contreras Suazo, Ingeniera Civil

Sra. Carolina Varas Valiente, Relacionadora Pública

Sr. Cristián Jordán Díaz, Ingeniero Forestal PhD

Sr. Simón France Lanas, Sociólogo



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO A ABREVIATURAS

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



SIGLA	DETALLE
AGRIMED	Centro de Agricultura y Medio Ambiente
AGROMET	Red Agroclimática Nacional
APR	Agua potable rural
AQT	Aquaterra
ASICENT	Asociación de Industriales del Centro
BNA	Banco Nacional del Agua
CA	Código de Aguas
CAS	Comunidades de Aguas Subterráneas
CCD	Con Contacto Directo
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
CITRA	Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología
CNR	Comisión Nacional de Riego
CO2	Dióxido de Carbono
CODEFF	Comité Nacional Pro-Defensa de la Flora y Fauna
CONADI	Corporación Nacional de Desarrollo Indígena
CONAF	Corporación Nacional Forestal
COOP	Cooperativa
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
CPA	Catastro Público de Aguas
CR2	Center for Climate and Resilience Research
DAA	Derechos de Aprovechamiento de Aguas
DARH	Departamento de Administración de Recursos Hídricos
DB	Demanda bruta
DGA	Dirección General de Aguas
DH	Demanda hídrica
DN	Demanda neta
DOH	Dirección de Obras Hidráulicas
Dw	Capacidad de agua en zona profunda
ET	Evapotranspiración anual
ETO	Evapotranspiración de referencia
Etc	Evapotranspiración de cultivo
GORE	Gobierno Regional
IEB	Instituto de Ecología y Biodiversidad
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático



SIGLA	DETALLE
JDV	Junta de Vigilancia
Kc	Coeficiente de cultivo
Kd	Conductividad de la zona profunda
Ks	Conductividad de la zona de raíces
MBN	Ministerio de Bienes Nacionales
MCG	Modelo de Circulación General
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
MOP	Ministerio de Obras Públicas
NMP	Número más Probable
NO	Noroeste
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODEPA	Oficina de Estudios y Políticas Agrarias
OMM	Organización Mundial de Meteorología
OUs	Organizaciones de Usuarios del Agua
P	Precipitación media anual
Pp	Precipitación
PRI	Plan Regulador Intercomunal
PRICOST	Plan Regulador Intercomunal Costero
Q	Caudal
RAPP	Red de Áreas Protegidas Privadas
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
RETC	Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
RN	Reserva Nacional
RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía
SAG	Servicio Agrícola y Ganadero
SCD	Sin Contacto Directo
SEA	Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SERNATUR	Servicio Nacional de Turismo
SHAC	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común
SIFAC	Sistema Informático de Facturación y Contabilidad
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINIA	Sistema Nacional de Información Ambiental
SISS	Superintendencia de Servicios Sanitarios



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

SIGLA	DETALLE
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
SNIA	Sistema Nacional de Información del Agua
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUBDERE	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
Sw	Capacidad de agua en zona de raíces
VMF	Visual Modflow Flex 6.1
WEAP	Water Evaluation and Planning System
ZR	Zona de Riego



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO B REFERENCIAS

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



Índice del Anexo B. Referencias

	PÁGINA
1. Artículo técnico	2
2. Base de Datos	2
3. Catastro	4
4. Estudio a informe técnico	5
5. Plan, política, programa	7
6. Presentación	8
7. Tesis	9



1. ARTÍCULO TÉCNICO

- Aldunce, P., & Gonzalez, M. (2009). Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile. Santiago de Chile: Fundación para la Innovación Agraria, FIA Ministerio de Agricultura.
- Araucanía Cuenta (2019). Extracción del pompón y depredación de humedales en Chiloé.
- BRS, 2011. La lectoescritura inicial en América Latina y el Caribe: mapeo y análisis de actores clave. United States Agency for International Development, USAID.
- Díaz et al. 2005. Guía para el conocimiento de la flora de Turberas y Pomponales de la Isla Grande de Chiloé.
- Gacitúa, Peña Peña, & Acuña Bravo (2020). Características de los suelos utilizados para la producción agropecuaria en la Provincia de Chiloé. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA.
- FAO (2006). Boletín 56 para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo
- Fernández, B., & Gironás, J. (2021). Droughts. In B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (pp. 173-187). Cham: Springer International Publishing.
- Gálvez, Nicolás; Infante, José; Fernández, Adrián; Díaz, Jesús; Petracca, Lisanne. (2021) Land use intensification coupled with free-roaming dogs as potential defaunation drivers of mesocarnivores in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*.
- Leví (2019). Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática. Senda Darwin.
- Neira, E. e Iturriaga, C., 2008. Utilización residencial de leña como combustible en la ciudad de Puerto Montt. *Bosque Nativo* 43: 3-8.
- Neira, E. y Bertín, R. A., 2009. Hábitos del uso de la leña en Castro, Isla de Chiloé. *Bosque Nativo* 45: 3-8.
- Núñez, T. y Yajure, J.A. (2022). Parcelaciones de terreno: un fenómeno al alza que amenaza los ecosistemas rurales del sur de Chile. <https://laderasur.com/articulo/parcelaciones-de-terreno-un-fenomeno-al-alza-que-amenaza-los-ecosistemas-rurales-del-sur-de-chile/>
- Quezada, P. J. (2019). Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática. Senda Darwin.
- Zegers et al. 2006. Impacto ecológico y social de la explotación de pomponales y turberas de Sphagnum en la Isla Grande de Chiloé. Zegers, G., J. Larraín, J. Díaz y J. Armesto.

2. BASE DE DATOS

- Biblioteca Digital SAG. Obtenido de http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/anexo_A/aluminio.pdf



-
- Biblioteca Digital SAG 2. Obtenido de http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/anexo_A/molibdeno.pdf
 - Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (2020). Cambio climático: Los riesgos que enfrenta la acuicultura nacional.
 - Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2 (2021). Explorador Precipitaciones - Modelo CR2MET.
 - CIREN. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile. (Pub. CIREN N°139). Centro de Información de Recursos Naturales.
 - CIREN. 2012. Estado actual de los Suelos de la Región de Coquimbo Uso y Degradación, Propuesta de implementación, capacitación y actualización de sistemas de información comunal para la toma de decisiones (SIG) en la región de Coquimbo.
 - CLIMATE-DATA.ORG (2021). Clima Castro Chile. Disponible en <https://es.climate-data.org/america-del-sur/chile/x-region-de-los-lagos/castro-876100/>
 - Comisión Nacional de Riego (CNR). 2022. Base de datos de proyectos pagados por Ley 18.450, 2007/22.
 - CONADI, 2020. Estadísticas sociales indígenas. CORPORACIÓN NACIONAL INDIGENA CONADI. Unidad de Estudios.
 - Custodio & Llamas. (1996). Hidrología Subterránea.
 - DOH (2021). Listado de Sistemas de Agua Potable Rural en Chile. Disponible en repositorio de datos abiertos centralizado del Estado. <https://datos.gob.cl/dataset>
 - DGA (1986). Mapa Hidrogeológico Nacional 1986
 - Ilustre Municipalidad de Ancud (2021). Descripción Geográfica – Climática. Ilustre Municipalidad de Ancud.
 - Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). 2022. Base de datos de subsidios para proyectos de riego.
 - Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). 2022. Base de datos de apoyos frente a emergencias agrícolas por sequía.
 - Instituto Nacional de Estadísticas. 2012. Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012. Instituto Nacional de Estadísticas. Chile.
 - Lenntech. Obtenido de <https://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/sar/riesgo-sodio-en-regadios.htm#:~:text=Peligro%20del%20sodio%20en%20aguas%20de%20regad%C3%A1do&text=El%20exceso%20de%20iones%20de,poros%20que%20conforman%20el%20suelo.> (sitio web)
 - Ministerio de Desarrollo Social y Familia. 2019. Encuesta CASEN 2017. Disponible en: <http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/index.php>
 - Ministerio del Medio Ambiente. (2022). Informe del Estado del Medioambiente 2020, Gobierno de Chile.
 - Ministerio de Obras Públicas (2021). Buscador de Fichas de Proyectos. Ministerio de Obras Públicas.
-



-
- Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico (2021). Ministerio de Obras Públicas.
 - Portal Terreno (2021). Estudio Primer Semestre 2021. Ventas y compras predios agrícolas. <https://www.portalterreno.com/estudio-portalterreno-2021>
 - Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del Ministerio del Medio Ambiente, 2021
 - Sernageomin. (2003). Obtenido de <http://www.ipgp.fr/~dechabal/Geol-millon.pdf>
 - Sistema Nacional Integrado de Monitoreo y Evaluación de Ecosistemas Forestales (SIMEF). 2019. Capas de Información Geográfica de Cambio de Uso de la Tierra, Cambios Uso de la Tierra. Proyecto GCP/ CHI/032/GFF, ejecutado con el apoyo del Fondo para el Medio ambiente (GEF), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y el Estado Chileno. <https://simef.minagri.gob.cl/descargas>
 - SRK Consulting Chile SA. (2012). Obtenido de <https://snifa.sma.gob.cl/General/DescargarInformeSeguimiento/124267> (documento sitio web).
 - Superintendencia de Servicios Sanitarios (2019). Plantas de Tratamiento de la Región de Los Lagos. Superintendencia de Servicios Sanitarios SISS.
 - UNEP (s.f.). Proporción de masas de agua con buena calidad del agua ambiental. Iniciativa de Monitoreo Integrado de ONU-Agua. <https://communities.unep.org/display/sdg632/SDG+6.3.2+Home>.

3. CATASTRO

- CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (2013). Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile para la Región de Los Lagos.
- DGA (2021). Información del Catastro Público de Aguas, en el Registro Público de DAA y el Registro Público de Organización de Usuarios. Dirección General de Aguas DGA.
- DGA (2021). Estudios y Publicaciones, Mapoteca Digital. Dirección General de Aguas. <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>
- IDE (2016). Catastros de Uso de Suelo y Vegetación. Infraestructura de Uso de Suelo y Vegetación. IDE.
- INE (2007). VII Censo Agropecuario y Forestal 2007, Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
- INE (2017). XIX Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda o Censo de Población y Vivienda 2017. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile
- Plataforma Inventario de Humedales de Chiloé, (2021). Plataforma Inventario de Humedales de Chiloé. Humedales de Chiloé.



4. ESTUDIO A INFORME TÉCNICO

- Alarcón et al. (2015). Exploración hidrogeológica-geofísica mediante CSAMT (Audio Magneto Telúrica con fuente controlada) del acuífero confinado de Dalcahue, Chiloé. Informe.
- Aldunce & Gonzalez, 2009. Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile.
- Arias D., Echeverri O., Hoyos F. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. Hemeroteca Nacional Universitaria (revista), Colombia.
- Bannister, Jan, 2018. Tepuales. Tesoro de Chiloé y la Patagonia Insular. Instituto Forestal, Chile. p. 74
- Biblioteca Digital SAG. (s.f.). Obtenido de http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/pdf_aguas/anexo_A/aluminio.pdf
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In Geophysical Research Abstracts (Vol. 20).
- CEDEUS-DGA (2020). Implementation of SDG Indicator 6.3.2 in Chile: Proportion of Bodies of Water with Good Ambient Water Quality. CEDEUS Technical Report, Santiago, Chile
- CNR (2017). Diagnóstico para desarrollar plan de riego en región de Los Lagos. H2Cuenca Consultores.
- CNR (2019). Diagnóstico y propuestas para proyectos de riego ERNC, pequeña agricultura, Los Lagos. Informe.
- CNUCLD. 1994. Convención de Naciones de Lucha contra la Desertificación
- CONAF (2016). Programa de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación, la Degradación de las Tierras y la Sequía PANCD-Chile 2016-2030.
- Cossio, C. & F. Valenzuela (2021). "Guía para el Desarrollo de Iniciativas a Escala Territorial (IET)". Santiago, Chile. Proyecto MMA / GEF-PNUD Comunidades Mediterráneas Sostenibles.
- DGA (2006). Análisis y Determinación de Caudales de Reserva para Abastecimiento de la Población y Usos de Interés Nacional. Dirección General de Aguas, AC Ingenieros Ltda.
- DGA (2006). Protección y Manejo Sustentable de Humedales Integrados a la Cuenca Hidrográfica. Comisión Nacional de Medio Ambiente. Centro de Ecología Aplicada Ltda.
- DGA (2008). Determinación de Reservas de Aguas Superficiales de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 147 Bis inciso 3 de la ley 20.017 de 2005 que modifica el Código de Aguas: Caudales de Reserva para abastecimiento de la Población y usos de interés Nacional. Dirección General de Aguas, Aquaterra Ingenieros Ltda.
- DGA (2009). Determinación de Caudales Ecológicos en Cuencas con Fauna Íctica Nativa y en Estado de Conservación. Dirección General de Aguas. Centro de Ecología Aplicada Ltda.



-
- DGA (2010). Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos. Dirección General de Aguas. Aquaterra Ingenieros Ltda.
 - DGA (2014a). Estimación Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. Dirección General de Aguas DARH-DGA.
 - DGA (2014b). Análisis Crítico de la Red de Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas de la DGA 2014 Dirección General de Aguas DGA. Infraestructura y Ecología S.A.
 - DGA (2017b). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Unión Temporal de Proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros Ltda.
 - DGA (2017a). Actualización del Balance Hídrico Nacional/ Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica de Chile.
 - DGA (2019b). Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Escenarios de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. DICTUC-SEI
 - DGA (2019a). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Austral, Realizado por Universidad de Chile, SIT-441 2019. Dirección General de Agua.
 - DGA (2020a). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas del parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, Realizado por Universidad de Chile, SIT-444 2019.
 - DGA (2020b). Estimación de la Recarga de Aguas Subterráneas y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común en las Islas de la Región de Los Lagos. Dirección General de Aguas.
 - Donoso-Barros R (1966) Reptiles de Chile. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
 - Duhart, P., McDonough, M., Muñoz, J., Martin, M. & Villeneuve, M. 2001. El Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30' 42°00'S). Implicancias en la evolución del margen suroccidental de Gondwana. Rev. geol. Chile, v.28
 - Eólica Tablaruca S.A. 2017. Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Parque Eólico Tablaruca.
 - ESSAL (2016). Actualización de Planes de Desarrollo concesiones de Agua Potable y Alcantarillado Servidas Localizadas en Ancud, Castro, Cochi, Achao, Quellón Dalcahue, Empresa de Servicios Sanitarios de los Lagos ESSAL S.A.
 - Fernández, B., & Gironás, 2021. Water Resources of Chile. Capitulo: Droughts.
 - Gajardo, Rodolfo (1994). La vegetación natural de Chile: clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria.
 - Hucke-Gaete et al. 2006. Conservación Marina en el sur de Chile. Hucke-Gaete, R., Viddi, F. y M. Bello Hucke-Gaete et al. Hucke-Gaete, R., Viddi, F. y M. Bello
-



-
- INFOR. 2021. Investigación sobre el consumo de leña en la Región de Los Lagos. <https://observatoriobes.infor.cl/investigacion-muestra-un-aumento-en-el-consumo-de-leña-de-eucalipto-en-la-region-de-los-lagos/>
 - Iriarte 2008. Mamíferos de Chile
 - Luebert, F., y Pliscoff, P. (2018). Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Editorial universitaria.
 - Martínez, D. y González, G. (2004). Las Aves de Chile - Nueva Guía de Campo. Ediciones del Naturalista
 - Matteucci Sd & M Silva. 2005. Selección De Métricas De Configuración Espacial Para la Regionalización de un territorio antropizado. *Geofocus*, 5: 180-202.
 - McFarland M. et al. (1984). Texas Water. Obtenido de <https://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/I5451sironandman.pdf>
 - Ministerio de Medio Ambiente (2016). Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva. Rovira, J y J. Herreros.
 - Municipalidad de Ancud. (2021). Estudio hidrogeológico para las localidades rurales de Recta Chacao y Butamanga, comuna de Ancud. Informe.
 - NASA JPL. (2020). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001
 - Osorio, M. y Oyarce, N. (2010). Análisis socioeconómico de la desertificación en la Región de Coquimbo. <https://riat.utralca.cl/index.php/test/article/download/182/51>
 - Sernageomin. (2012). Modelo hidroestratigráfico del acuífero periglacial del Pleistoceno-Holoceno de Chiloé, entre Dalcahue y Chonchi, Región de Los Lagos, Chile. Informe.
 - Silva (2020). Análisis geodemográfico para las grandes ciudades de Chiloé. Pedro Pablo Silva Antilef.
 - Smith-Ramírez y Pliscoff 2008. Propuesta de sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad en la Provincia de Chiloé.
 - Villagrán (2002). Flora y vegetación del Parque Nacional Chiloé: Guía de excursión Botánica por la cordillera de Piuché. Carolina Villagrán Moraga.
 - Tischendorf, L. 2001. Can landscape indices predict ecological processes consistently?, *Landscape Ecology*, 16, 3, pp. 235-254
 - Wilson, A. M., & Jetz, W. (2016a). Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. *PLoS Biology*, 14(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002415>

5. PLAN, POLÍTICA, PROGRAMA

- Dirección General de Aguas (DGA) (2022). Resolución 1.331 Exenta, deja sin efecto la resolución D.G.A. N° 1.674 (exenta), de 12 de Junio de 2012, y establece criterios que



determinan el carácter de severa sequía, de conformidad a lo dispuesto en el artículo 314 del Código de Aguas.

- Gobernación Provincial de Chiloé (2015). Estrategia de Recursos Hídricos Provincia de Chiloé. Gobernación Provincial de Chiloé.
- Gobernación Provincial de Chiloé (2016). Estrategia de Desarrollo Provincial El Chiloé que Queremos. Gobernación Provincial de Chiloé.
- Gobierno Regional de Los Lagos (2021). Plan de Desarrollo Para Zonas de Rezago en materia social Región de Los Lagos, Territorios Insulares y Aislados del Mar Interior de Chiloé. Gobierno Regional de Los Lagos.
- Ilustre Municipalidad de Dalcahue (2017). Actualización PLADECO Dalcahue. Ilustre Municipalidad de Dalcahue.
- Ilustre Municipalidad de Castro (2017). Plan de Desarrollo Comunal de Castro (2018-2022). Ilustre Municipalidad de Castro. ICZP. CONSULTORES
- Ilustre Municipalidad de Curaco de Vélez (2018). Actualización del Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de Curaco de Vélez, Chiloé. Ilustre Municipalidad de Curaco de Vélez. Trafal Consultores
- Ilustre Municipalidad de Puqueldón (2018). Plan Regulador Comunal de Puqueldón. Ilustre Municipalidad de Puqueldón.
- Ilustre Municipalidad de Chonchi (2018). Plan de Desarrollo Comunal, PLADECO 2018-2025, Municipalidad de Chonchi. Ilustre Municipalidad de Chonchi. SOVAL Consultores
- Ilustre Municipalidad de Ancud (2019). ACTUALIZACIÓN PLAN DE DESARROLLO COMUNAL 2018-2026 (PLADECO) COMUNA DE ANCUD. Ilustre Municipalidad de Ancud.
- Ilustre Municipalidad de Quinchao (2019). Estudios Previos Plan Regulador Comunal de Quinchao, Provincia de Chiloé, Región de Los Lagos. Ilustre Municipalidad de Quinchao. TERRITORIO Y CIUDAD Consultores
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI) (2021). Resolución Exenta 309 de 2021. Aprueba Plan Nacional Operativo de Emergencia del Ministerio de Agricultura.
- SUBDERE, 2021. Plan De Desarrollo Para Zona De Rezago En Materia Social Territorios Insulares y Aislados Del Mar Interior De Chiloé Región De Los Lagos. Subsecretaria de Desarrollo Regional. Gobierno Regional de los Lagos División de Planificación y Desarrollo Regional

6. PRESENTACIÓN

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2021). Clima y vegetación Región de Los Lagos. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile, Servicios Climáticos (2021). Índices de Cambio Climático. Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos.



-
- Ministerio de Medio Ambiente (2021). Evaluación Ambiental Estratégica. Ministerio de Medio Ambiente.
 - Montaña, A. (s.f). Perdida de bosque en la Isla de Chiloé.
 - Soto D. (2021). Industria salmonera debe considerar riesgos climáticos y capacidad de carga de los ecosistemas para ser más sustentable. Doris Soto, El Heraldo Austral
 - Universidad Los Lagos (2014). Perdida de bosque en la Isla de Chiloé.

7. TESIS

- Aguirre (2019). Desarrollo de un Modelo Conceptual Socio-Ecológico de los Cambios de Uso de Suelo de la Isla Grande de Chiloé en las Últimas Dos Décadas. Franco Ignacio Caprioli Aguirre. Universidad de Chile
- Pávez M, C. (2012). Transformaciones Territoriales y Socioeconómicas del Sector Pesquero de Chiloé: Salmonicultura y Nuevos Pescadores. Camila Francisca Pavés Moreno.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO C GLOSARIO

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



Anexo C - Glosario

Acuífero: Un acuífero es el conjunto de rocas que permiten la permeabilidad del agua y la pueden acumular en sus poros o grietas. A esta agua retenida en las estructuras rocosas se la conoce como agua subterránea y puede llegar a presentar manifestaciones de hasta dos millones de kilómetros cuadrados de tamaño.

Área Silvestre Protegida: Según la UICN, un área protegida es “un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados”. Según la legislación chilena, corresponde al ambiente natural, terrestre, o acuático, perteneciente al Estado y que éste protege y maneja conforme a las siguientes categorías: Reservas de Regiones Vírgenes, Parques Nacionales, Monumentos Naturales y Reservas Nacionales.

Cambio climático: Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

Conductividad Eléctrica: La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo para conducir una corriente eléctrica. La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él y es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica del material. Es lo contrario a la resistencia eléctrica.

Cuenca: Es el área o superficie drenada por un río principal y sus afluentes. Se expresa en km².

Demanda Bruta: Coeficiente entre la demanda neta del cultivo y la eficiencia de riego.

Demanda Hídrica: Cantidad de agua que requiere un cultivo para producir los rendimientos esperados.



Demanda Neta: Cantidad de agua que requiere un cultivo para producir los rendimientos esperados, luego de descontar la precipitación efectiva.

Distrito Censal: División administrativa utilizada en el censo agropecuario del 2007.

Eficiencia de Riego: Relación entre el volumen de agua captado por las raíces de las plantas y el volumen aplicado en el riego.

Encuesta Nacional de Empleo: La Encuesta Nacional de Empleo es un instrumento que nos permite conocer la situación de trabajo que tienen las personas que viven en Chile, por ejemplo: cuántas personas están trabajando actualmente, cuántas están desocupadas, etc. El resultado principal de la encuesta es la tasa de desocupación del país.

Escasez Hídrica: La escasez hídrica es un término complejo porque involucra procesos hidrológicos, meteorológicos y también los usos que se le da al agua (Zambrano-Bigiarini, 2019 a y b). Para determinar si una zona está afectada por escasez hídrica, es necesario conocer el funcionamiento de los principales procesos hidrológicos que ocurren a nivel de las cuencas, y cuantificar la oferta y la demanda de agua dulce.

Feldespatos: Los feldespatos son un grupo de minerales formados por silicatos dobles de aluminio y de calcio, sodio, potasio, algunas veces de bario o mezclas de esas bases. Es de la familia de los tectosilicatos.

Gases de Efecto Invernadero: Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Además, la atmósfera contiene cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógeno, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, y contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, N₂O y CH₄, el Protocolo de Kyoto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

Geofísica: La geofísica es una ciencia derivada de la geología que trata del estudio de las propiedades físicas de la Tierra. Comprende aspectos como la investigación de la composición interna del planeta, el flujo de calor proveniente del interior de la Tierra, la fuerza de la gravedad que forma el campo gravitacional, la fuerza magnética de atracción, ejercida por un magneto ideal en el interior de la Tierra que crea el campo geomagnético, y la propagación de las ondas sísmicas a través de las rocas de la corteza terrestre. La geofísica contribuye a una ubicación adecuada de obras civiles y en la prevención de desastres naturales, asimismo permite optimizar procesos de exploración y extracción de minerales, agua y energía.



Glacis: Un glacis es un plano inclinado de débil pendiente, menor a 10° , y recubierto por material detrítico. En su parte superior ocurren procesos de arroyada en surcos del tipo rill wash, y en su parte media e inferior arroyada en manto del tipo sheet flood. Los glacis son excelentes acuíferos naturales, como en la Pampa del Tamarugal en la cual hubo comunidades agrícolas en la época prehispánica cuya base cultural era la distribución de agua mediante canales y acequias. Un pedimento o glacis rocoso, es un plano inclinado labrado directamente en la roca fundamental de tipo cristalino, y que está ligeramente cubierto de material disgregado.

Gravimetría: Método de análisis cuantitativo que permite saber la cantidad de un componente en una sustancia haciendo que éste reaccione con un reactivo y obtenga un compuesto estable, generalmente mediante la formación de un precipitado. Se filtra, se seca y finalmente se pesa, para después determinar el porcentaje del componente en la sustancia inicial.

Inundaciones: Las grandes precipitaciones elevan el nivel de los ríos hasta superar la capacidad del cauce, provocando inundaciones que afectan la infraestructura urbana, agrícola y vial. En la sierra predominan las inundaciones rápidas por desborde de ríos andinos caracterizados por fuertes pendientes y flujos hiperconcentrados. Se ha observado una fuerte vinculación entre el fenómeno El Niño y las inundaciones. El incremento del nivel de los ríos se produce en el último trimestre del año y alcanza su valor máximo a mediados del primer trimestre. Las inundaciones, pueden producirse por la reducción de la sección transversal del río, por colmatación, cambios abruptos en la dirección del flujo de las aguas e invasión de la llanura de inundación del río.

Lixiviación: Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis. Este proceso se aplica a las rocas que contienen minerales oxidados, ya que éstos son fácilmente atacables por los ácidos.

Llanura Deposicional: Llanuras deposicionales, formadas por la deposición de materiales dejados por agentes como el viento, ríos, olas y glaciares. Su fertilidad y relevancia económica depende principalmente del tipo de sedimentos depositados.

Materias Primas: Una materia prima es todo bien que es transformado durante un proceso de producción hasta convertirse en un bien de consumo.

Modelo Hidrológico: En un modelo matemático que representa una 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos ayudan a tomar decisiones en materia de hidrología. Se requieren información de entrada (inputs). Las salidas (outputs), dependerán de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento



Modelo Hidrogeológico: Modelo que permite definir las principales características de un acuífero. Su elaboración requiere de una revisión detallada de la información disponible, labores de terreno y estudios básicos. Sus resultados se resumen en: la geometría del/los acuíferos, caracterización geológica del sistema, caracterización hidrológica del área, las unidades hidrogeológicas más importantes, el tipo de acuífero o acuíferos, los parámetros hidrogeológicos fundamentales del sistema, la piezometría (sentido del flujo), la hidroquímica, las entradas y salidas de agua del sistema, balance hídrico general.

Neógeno: Período geológico que es el segundo y último de la era cenozoica y sigue al período paleógeno; se extiende desde hace unos 25 millones de años hasta hace unos 2 millones de años.

Nodo: Punto de control correspondiente al cierre de la subcuenca.

Pediaplano: Un pediaplano es una planicie que resulta de la yuxtaposición de varios pedimentos. La formación de un pedimento se debe a procesos de erosión y transporte de materiales en manto o sheet flood, por el cual la lámina de agua se esparce como un flujo turbulento. A esto se agrega la arroyada difusa del tipo rill wash, a través de pequeños canalículos anastomosados. También la coalescencia de grandes conos de deyección contribuye a la formación de glaciares y pedimentos.

Piso Vegetacional: El concepto de Piso de Vegetación se define como espacios caracterizados por un conjunto de comunidades vegetales con una fisionomía y unas especies dominantes asociadas a un piso bioclimático específico.

Plan Regulador Comunal: Es un instrumento de planificación territorial que contiene un conjunto de disposiciones sobre adecuadas condiciones de edificación, y espacios urbanos y de comodidad en la relación funcional entre las zonas habitacionales, de trabajo, equipamiento y esparcimiento (Artículo 41 LGUC).

Planta Desaladora: Una planta desaladora o planta desalinizadora es una instalación que convierte el agua salada del mar (o salobre) en agua apta para el consumo humano, así como para usos industriales y de regadío.

Precipitación Efectiva: Parte de las precipitaciones que se infiltra en el suelo y permanece a disposición de las raíces de las plantas.

Proceso de Consulta Indígena: La consulta a los pueblos indígenas es un mecanismo de participación basado en el Diálogo entre el Estado y los pueblos indígenas; ante todo es un derecho de los pueblos indígenas y un deber del Estado que proviene del Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo (OIT) sobre Pueblos Indígenas y Tribales en Países Independientes, que surge cada vez que se adoptan medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarlos directamente.



Régimen Fluvial: Es la alimentación de un río, la fuente de alimentación puede ser de origen pluvial, si se abastece de las lluvias; de régimen nivoso, por derretimiento de las nieves; o de régimen mixto, lluvia y derretimiento de nieve.

Regresión Lineal: El objetivo de un modelo de regresión es tratar de explicar la relación que existe entre una variable dependiente (variable respuesta) Y un conjunto de variables independientes (variables explicativas). La regresión lineal es un campo de estudio que enfatiza la relación estadística entre dos variables continuas conocidas como variables de predicción y respuesta.

Remociones en Masa (deslizamientos): Pueden producirse a causa de diversos factores como inestabilidad de taludes, sismo y deforestación, pero en la mayoría de los casos están combinados con la presencia de agua, producida por las precipitaciones de agua que saturan los suelos y debilitan su resistencia, lo cual si se encuentran condiciones estructurales favorables, como pendientes fuertes o deforestación, pueden dar lugar al deslizamiento del terreno. Los deslizamientos producen catástrofes pero sus consecuencias pueden ser muy graves si se ve afectada la población, o bien, si los daños se producen en las infraestructuras hidráulicas, en la infraestructura vial, o, si se produce la pérdida de cultivos y terrenos agrícolas. (Hauser, 1993 y 2000).

Rocas Intrusivas: Cuando la solidificación del magma se produce en el seno de la litósfera, la roca resultante se denomina plutónica o intrusiva; si el enfriamiento se produce, al menos en parte, en la superficie o a escasa profundidad, la roca resultante se denomina volcánica o extrusiva y estos, a su vez, se subdividen en familias a partir de las diferentes texturas, asociaciones minerales y modo de ocurrencia. Las formas que adoptan los cuerpos ígneos durante su cristalización delimitan diferentes estructuras ígneas.

Rocas Metamórficas: Las rocas metamórficas (del griego meta, cambio, y morphe, forma, "cambio de forma") resultan de la transformación de rocas preexistentes que han sufrido ajustes estructurales y mineralógicos bajo ciertas condiciones físicas o químicas, o una combinación de ambas, como son la temperatura, la presión y/o la actividad química de los fluidos agentes del metamorfismo. Estos ajustes, impuestos comúnmente bajo la superficie, transforman la roca original sin que pierda su estado sólido generando una roca metamórfica. La roca generada depende de la composición y textura de la roca original, de los agentes del metamorfismo, así como del tiempo en que la roca original estuvo sometida a los efectos del llamado proceso metamórfico. Por la naturaleza de su origen puede haber una gradación completa entre las rocas metamórficas y las ígneas o sedimentarias de las que se formaron. El estudio de estas rocas provee información muy valiosa acerca de procesos geológicos que ocurrieron dentro de la Tierra y sobre su variación a través del tiempo.

Rocas Sedimentarias: Las rocas sedimentarias (del latín sedimentum, asentamiento) se forman por la precipitación y acumulación de materia mineral de una solución o por la compactación de restos vegetales y/o animales que se consolidan en rocas duras. Los



sedimentos son depositados, una capa sobre la otra, en la superficie de la litósfera a temperaturas y presiones relativamente bajas y pueden estar integrados por fragmentos de roca preexistentes de diferentes tamaños, minerales resistentes, restos de organismos y productos de reacciones químicas o de evaporación.

Sequías: Con carácter general, se puede considerar como la insuficiente disponibilidad de agua en una región, por un periodo prolongado, para satisfacer las necesidades del recurso hídrico en la zona. No obstante, puede enfocarse desde distintos aspectos y así se puede considerar la sequía meteorológica, agronómica o hidrológica, según la duración y efectos de la misma. La sequía produce importantes efectos para la salud pública, el medio ambiente y los sistemas productivos dependientes del agua y ha causado la pérdida de vidas humanas, el deterioro ambiental, incrementando incluso la posibilidad de incendios forestales y la destrucción de campos y cultivos, además de reducirse la producción hidroeléctrica.

Servicios Ecosistémicos: Corresponden a aquellos servicios que resultan del propio funcionamiento de los ecosistemas y que son de utilidad para el bienestar de la sociedad. Son ejemplos de ello la producción de agua limpia, la formación de suelo, la regulación del clima por parte de los bosques, la polinización, etc.

Shapefile: Formato que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas.

Stakeholders: Público o grupo de interés.

Tranque de Relave: El agua que se ha utilizado en el proceso de concentración de cobre y, en general, en todo el proceso productivo, no puede ser vertida a las corrientes naturales porque tiene contaminantes. Esta agua industrial se lleva a los tranques de relave donde lentamente los contaminantes se van depositando en el fondo y el agua se va limpiando hasta hacerla utilizable por los seres vivos.

Surgencia: Ascenso a la superficie de masas de agua profundas -que son frías y ricas en nutrientes-, debido al movimiento de aguas superficiales mar adentro.

TEM: Es un método que emplea la inducción de un campo electromagnético para poder estimar propiedades eléctricas del subsuelo.

Tundra: Terreno abierto y llano, de clima muy frío y subsuelo helado, faltar de vegetación arbórea, con suelo cubierto de musgos y líquenes y pantanoso en muchos sitios.

Unidad Hidrogeológica: Por unidad hidrogeológica se entiende uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua.

Zona de Riego: Zonificación que representa las áreas de riego en el programa WEAP.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO D FIGURAS

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



1 Antecedentes generales

En la versión digital de este Anexo se presentan las figuras incluidas en el informe final, y en los anexos H e I.

Las figuras se incluyen en formato digital (.JPEG) en carpetas específicas. Incluye:

- INFORME FINAL. Detalle de figuras. Formato digital
- ANEXO H. Detalle de figuras. Formato digital
- ANEXO I. Detalle de figuras. Formato digital



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO E ANTECEDENTES RECOPIRADOS

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022

1 ANTECEDENTES RECOPIADOS

N°	Autor	Año	Título
1	Dirección General de Aguas	1986	Mapa Hidrogeológico Nacional
2	Gajardo	1994	La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica
3	Carolina Villagrán Moraga.	2002	Flora y vegetación del Parque Nacional Chiloé: guía de excursión Botánica por la cordillera de Piuché
4	Díaz, R., J. Larraín y G. Zegers	2005	Guía para el conocimiento de la flora de Turberas y Pomponales de la Isla Grande de Chiloé
5	Dirección General de Aguas	2006	Análisis y Determinación de Caudales de Reserva para Abastecimiento de la Población y Usos de Interés Nacional
6	Dirección General de Aguas	2006	Protección y Manejo Sustentable de Humedales Integrados a la Cuenca Hidrográfica
7	Hucke-Gaete, R., Viddi, F. y M. Bello	2006	Conservación Marina en el sur de Chile
8	Zegers, G., J. Larraín, J. Díaz y J. Armesto	2006	Impacto ecológico y social de la explotación de pomponales y turberas de Sphagnum en la Isla Grande de Chiloé
9	Instituto Nacional de Estadísticas de Chile	2007	VII Censo Agropecuario y Forestal
10	Dirección General de Aguas	2008	Determinación de Reservas de Aguas Superficiales de acuerdo a lo dispuesto en el artículo 147 Bis inciso 3 de la ley 20.017 de 2005 que modifica el Código de Aguas: Caudales de Reserva para abastecimiento de la Población y usos de interés Nacional
11	Iriarte, A.	2008	Mamíferos de Chile
12	Smith-Ramírez y Pliscoff	2008	Propuesta de sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad en la Provincia de Chiloé
13	Dirección General de Aguas	2009	Determinación de Caudales Ecológicos en Cuencas con Fauna Íctica Nativa y en Estado de Conservación
14	Dirección General de Aguas	2010	Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos
15	United States Agency for International Development, USAID	2011	La lectoescritura inicial en América Latina y el Caribe: mapeo y análisis de actores clave
16	Camila Francisca Pavéz Moreno	2012	TRANSFORMACIONES TERRITORIALES Y SOCIO-ECONÓMICAS DEL SECTOR PESQUERO DE CHILOÉ: SALMONICULTURA Y NUEVOS PESCADORES

N°	Autor	Año	Título
17	Dirección General de Aguas	2014a	Estimación Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos
18	Dirección General de Aguas	2014b	Análisis Crítico de la Red de Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas de la DGA
19	Gobernación Provincial de Chiloé	2015	Estrategia de Recursos Hídricos Provincia de Chiloé
20	Ilustre Municipalidad de Curaco de Veléz	2015	Actualización del Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) de Curaco de Vélez, Chiloé
21	Gobernación Provincial de Chiloé	2016	Estrategia de Desarrollo Provincial El Chiloé que Queremos
22	Infraestructura de Uso de Suelo y Vegetación	2016	Catastros de Uso de Suelo y Vegetación
23	Rovira, J y J. Herreros	2016	Clasificación de ecosistemas marinos chilenos de la zona económica exclusiva
24	Comisión Nacional de Riego	2017	Diagnóstico para desarrollar plan de riego en región de Los Lagos
25	Dirección General de Aguas	2017a	Actualización del Balance Hídrico Nacional/ Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación;
26	Dirección General de Aguas	2017b	Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación
27	Eólica Tablaruca S.A.	2017	Estudio de Impacto Ambiental (EIA) Parque Eólico Tablaruca
28	Ilustre Municipalidad de Castro	2017	Plan de Desarrollo Comunal de Castro (2018-2022)
29	Luebert y Pliscoff	2017	Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile
30	Ilustre Municipalidad de Chonchi	2018	Plan de Desarrollo Comunal, PLADECO 2018-2025, Municipalidad de Chonchi
31	Ilustre Municipalidad de Dalcahue	2018	Actualización PLADECO Dalcahue
32	Ilustre Municipalidad de Puqueldón	2018	Plan Regulador Comunal de Puqueldón

N°	Autor	Año	Título
33	ARAUCANÍA CUENTA	2019	Extracción del pompón y depredación de humedales en Chiloé
34	Dirección General de Aguas	2019a	Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Austral, Realizado por Universidad de Chile, SIT-441 2019
35	Dirección General de Aguas	2019b	Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Escenarios de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos
36	Franco Ignacio Capriroli Aguirre	2019	Desarrollo de un Modelo Conceptual Socio-Ecológico de los Cambios de Uso de Suelo de la Isla Grande de Chiloé en las Últimas Dos Décadas
37	Ilustre Municipalidad de Ancud	2019	ACTUALIZACIÓN PLAN DE DESARROLLO COMUNAL 2018-2026 (PLADECO) COMUNA DE ANCUD
38	Ilustre Municipalidad de Quinchao	2019	Estudios Previos Plan Rregulador Comunal de Quinchao, Provincia de Chiloé, Región de Los Lagos
39	Jorge Pérez Quezada	2019	Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática
40	Paula Leví	2019	Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática
41	Superintendencia de Servicios Sanitarios	2019	Plantas de Tratamiento de la Región de Los Lagos
42	Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia	2020	Cambio climático: los riesgos que enfrenta la acuicultura nacional
43	CORPORACIÓN NACIONAL INDIGENA	2020	estadísticas sociales indígenas
44	Dirección General de Aguas	2020a	Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, Realizado por Universidad de Chile, SIT-444 2019
45	Dirección General de Aguas	2020b	Estimación de la Recarga de Aguas Subterráneas y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común en las Islas de la Región de Los Lagos
46	Erika Vistoso Gacitúa; Gabriel Peña Peña, e Ivette Acuña Bravo	2020	Características de los suelos utilizados para la producción agropecuaria en la Provincia de Chiloé
47	Ilustre Municipalidad de Chonchi	2020	Actualización Plan Regulador Comunal De Chonchi Y Plano De Detalle

N°	Autor	Año	Título
48	Pedro Pablo Silva Antilef	2020	Análisis geodemográfico para las grandes ciudades de Chiloé
49	Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia	2021	Explorador Precipitaciones -Modelo CR2MET
50	Dirección General de Aguas	2021	Información del Catastro Público de Aguas, en el Registro Público de DAA y el Registro Público de Organización de Usuarios
51	Doris Soto	2021	Industria salmonera debe considerar riesgos climáticos y capacidad de carga de los ecosistemas para ser más sustentable
52	Gobierno Regional de Los Lagos	2021	Plan de Desarrollo Para Zonas de Rezago en materia social Región de Los Lagos, Territorios Insulares y Aislados del Mar Interior de Chiloé
53	Ilustre Municipalidad de Ancud	2021	Descripción Geográfica - Climática
54	DOH	2021	Listado de Sistemas de Agua Potable Rural en Chile
55	Subsecretaría de Desarrollo Regional	2021	Plan De Desarrollo Para Zona De Rezago En Materia Social Territorios Insulares Y Aislados Del Mar Interior De Chiloé Región De Los Lagos
56	Biblioteca del Congreso Nacional de Chile	(s.f.)	Clima y vegetación Región de Los Lagos
57	Dirección General De Aeronáutica Civil Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos	(s.f.)	Índices de Cambio Climático
58	Humedales de Chiloé	(s.f.)	Plataforma Inventario de Humedales de Chiloé
59	Ministerio de Medio Ambiente	(s.f.)	Evaluación Ambiental Estratégica
60	Ministerio de Obras Públicas	(s.f.)	Observatorio de la Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico
61	Ministerio de Obras Públicas	(s.f.)	Buscador de Fichas de Proyectos
62	ESSAL	2016	Actualización de Planes de Desarrollo concesiones de Agua Potable y Alcantarillado Servidas Localizadas en Ancud, Castro, Cochi, Achao, Quelló Dalcahue
63	FAO	2006	Boletín 56 para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo

N°	Autor	Año	Título
64	RECT	2021	Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del Ministerio del Medio Ambiente, 2021
65	Gacitúa et al.	2020	Características de los suelos utilizados para la producción agropecuaria en la Provincia de Chiloé
66	Aguirre	2019	Desarrollo de un Modelo Conceptual Socio-Ecológico de los Cambios de Uso de Suelo de la Isla Grande de Chiloé en las Últimas Dos Décadas. Franco Ignacio Caprioli Aguirre
67	CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL	2013	Catastro de Usos de suelo y vegetación de la Región de Los Lagos
68	Sistema Nacional Integrado de Monitoreo y Evaluación de Ecosistemas Forestales	2019	Capas de Información Geográfica de Cambio de Uso de la Tierra, Cambios Uso de la Tierra.
69	Centro de Información de Recursos Naturales	2010	Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile.
70	PORTAL TERRENO	2021	Estudio Primer Semestre Ventas y Compras predios agrícolas
71	Tamara Núñez & Jesus Alberto Yajure	2022	Parcelaciones de terreno: un fenómeno al alza que amenaza los ecosistemas rurales del sur de Chile
72	Gálvez, Nicolás; Infante, José; Fernández, Adrián; Díaz, Jesús; Petracca, Lisanne	2021	Land use intensification coupled with free-roaming dogs as potential defaunation drivers of mesocarnivores in agricultural landscapes. Journal of Applied Ecology.
73	Matteucci Sd & M Silva. 2005	2005	Selección De Métricas De Configuración Espacial Para la Regionalización de un territorio antropizado
74	Tischendorf, L	2001	Can landscape indices predict ecological processes consistently?,
75	CIREN	2012	Estado actual de los Suelos de la Región de Coquimbo Uso y Degradación, Propuesta de implementación, capacitación y actualización de sistemas de información comunal para la toma de decisiones (SIG) en la región de Coquimbo.
76	María Isabel Osorio Carvajal, Nicole Oyarce Vásquez	2010	Análisis socioeconómico de la desertificación
77	Jazmine Hormazábal Henríquez	2006	DEGRADACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL BOSQUE NATIVO, EN EL NORESTE DE LA ISLA GRANDE DE CHILOÉ, X REGIÓN.
78	Neira, E. e Iturriaga, C., 2008	2008	Utilización residencial de leña como combustible en la ciudad de Puerto Montt. Bosque Nativo

N°	Autor	Año	Título
79	INFOR	2021	Investigación sobre el consumo de leña en la Región de Los Lagos
80	Jan Bannister	2018	Tepuales. Tesoro de Chiloé y la Patagonia Insular
81	Alvaro Montaña	(s.f.)	Perdida de bosque en la Isla de Chiloé
82	Universidad Los Lagos	(s.f.)	Perdida de bosque en la Isla de Chiloé
83	INE	2012	Resultados Preliminares Censo de Población y Vivienda 2012
84	Neira, E. y Bertín, R. A	2009	Hábitos del uso de la leña en Castro, Isla de Chiloé.
85	CONAF	2016	Programa de Acción Nacional de Lucha Contra la Desertificación, la Degradación de las Tierras y la Sequía PANCD-Chile 2016-2030.
86	Ministerio de Medio Ambiente	2022	Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile 2022
87	Convención de Naciones de Lucha contra la Desertificación	1994	Convención de Naciones de Lucha contra la Desertificación
88	Gobernación Provincial de Chiloé	2015	El Chile que Queremos, Estrategia de Recursos Hídricos Provincia de Chiloé
89	Dirección General de Aguas	2021	Estudios y Publicaciones, Mapoteca Digital. Dirección General de Aguas
90	INE	2017	XIX Censo Nacional de Población y VIII de Vivienda o Censo de Población y Vivienda 2017
91	PEDRO PABLO SILVA ANTILEF	2020	Análisis geodemográfico para las grandes ciudades de Chiloé.
92	Gobierno Regional de Los Lagos	2021	Plan de Desarrollo Para Zonas de Rezago en materia social Región de Los Lagos, Territorios Insulares y Aislados del Mar Interior de Chiloé
93	Ministerio de Desarrollo Social	2019	Resultados y analisis sobre la encuesta CASEN 2017
94	CLIMATE DATA	2021	Clima Castro Chile
95	Doris Soto	2021	Industria salmonera debe considerar riesgos climáticos y capacidad de carga de los ecosistemas para ser más sustentable
96	Quezada, P. J.	2019	Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática. Senda Darwin.
97	Centro de Estudio y Conservación del Patrimonio Natural	(s.f.)	Parcelación Destruye el Territorio
98	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	2016	Guía Metodológica para Determinar el Caudal Ambiental para Centrales Hidroeléctricas

N°	Autor	Año	Título
99	Iniciativa de Monitoreo Integrado de ONU-Agua	(s.f.)	Proporción de masas de agua con buena calidad del agua ambiental
100	Ministerio de Agricultura	2021	Resolución Exenta 309 de 2021. Aprueba Plan Nacional Operativo de Emergencia del Ministerio de Agricultura.
101	Aldunce & Gonzalez	2009	Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile.
102	Fernández, B., & Gironás, J.	2021	Water Resources of Chile. Capitulo: Droughts.
103	CEDEUS-DGA	2020	Implementation of SDG Indicator 6.3.2 in Chile: Proportion of Bodies of Water with Good Ambient Water Quality
104	Paula Levi Díaz	2019	Turberas: la necesidad de proteger estos singulares humedales para que ayuden a mitigar la crisis climática
105	Duhart, P., McDonough, M., Muñoz, J., Martin, M. & Villeneuve, M.	2001	Complejo Metamórfico Bahía Mansa en la cordillera de la Costa del centro-sur de Chile (39°30' 42°00'S). Implicancias en la evolución del margen suroccidental de Gondwana
106	Carolina Villagrán Moraga	2002	Flora y vegetación del Parque Nacional Chiloé: Guía de excursión Botánica por la cordillera de Piuché
107	Camila Francisca Pavés Moreno.	2012	Transformaciones Territoriales y Socioeconómicas del Sector Pesquero de Chiloé: Salmonicultura y Nuevos Pescadores



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO F ASPECTOS METODOLÓGICOS DEL PLAN

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



ÍNDICE

Página

<u>1. CONSUMO DE AGUA POTABLE URBANA</u>	1-7
1.1. Fuentes utilizadas	1-7
1.2. Población adoptada	1-8
1.3. Consumo y producción.....	1-8
1.4. Validación de la estimación	1-9
1.5. Restitución por tratamiento	1-9
1.6. Resultados Consumo de Agua Potable Urbana.....	1-9
<u>2. CONSUMO DE AGUA POTABLE RURAL</u>	2-9
2.1. Fuentes utilizadas	2-9
2.2. Población adoptada	2-10
2.3. Consumo y producción.....	2-11
2.4. Resultados Consumo de Agua Potable rural	2-11
<u>3. CONSUMO DE AGUA POR USO AGRÍCOLA</u>	3-11
3.1. Antecedentes y fuentes.....	3-11
3.2. Metodología cálculo de la superficie	3-12
3.3. Resultados Consumo de Agua por uso Agrícola	3-16
<u>4. CONSUMO DE AGUA POR USO INDUSTRIAL</u>	4-16
4.1. Fuentes utilizadas	4-17
4.2. Metodología demanda actual	4-17
4.3. Metodología demanda futura	4-19
<u>5. ESTIMACIÓN DE RESERVA MÍNIMA AMBIENTAL</u>	5-19
5.1. Fuentes utilizadas	5-20
5.2. Metodología.....	5-20
5.3. Metodología Caudal ecológico	5-21
5.4. Aspectos específicos de la cuenca	5-22
<u>6. DEMANDA FORESTAL</u>	6-23
6.1. Uso productivo.....	6-23
6.1.1. Fuentes Utilizadas	6-23
6.1.2. Metodología	6-24
<u>7. USO NO PRODUCTIVO</u>	7-24
7.1. Fuentes utilizadas	7-24
7.2. Metodología.....	7-25



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

Apéndices

Apéndice F2 Calculo de las Demandas



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN



1. CONSUMO DE AGUA POTABLE URBANA

En Chile, el 99,7% de la población está cubierto por empresas sanitarias (SISS, 2020). En las Cuencas de estudio existe 1 empresa sanitaria abasteciendo centros urbanos: Aguas del Valle (grupo ESVAL). Según el último censo de Población y Vivienda (INE, 2017) la tendencia muestra un aumento de la población urbana respecto a la población rural (INE, 2020), considerando este criterio como tendencia de consumo. Según indicó la OECD en 2012, que los países en desarrollo como Chile tengan un aumento demográfico y económico repercutiría directamente en el consumo de agua potable urbana.

En este apartado se especifica el cálculo de la **demanda de agua potable urbana** suministrada por las concesionarias dentro del área del estudio, dejando el consumo de agua potable rural para el siguiente apartado.

1.1. Fuentes utilizadas

La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) es la institución normativa y fiscalizadora de las empresas sanitarias que prestan los servicios de agua potable y alcantarillado. Estas empresas son entidades de servicio en formato de concesionaria por un período de tiempo estipulado. Por otra parte, la SISS tiene atribuciones respecto al servicio de agua potable en: otorgar concesión de servicios sanitarios, fijación de tarifas por los servicios (agua potable y alcantarillado) y fiscalización de la normativa vigente.

En relación con lo anterior, se dispone de la siguiente información de la SISS:

- Planes de desarrollo de concesiones vigentes y anexos., en adelante "PD".
- Ficha de antecedentes técnicos (FAT)
- Georreferenciación de plantas sondajes y otros
- PR027001- Registros del Sistema de Facturación Clientes Regulados, Clientes no regulados (52 BIS) y Coberturas (SIFAC II),
- PR018001. Producción de agua de las fuentes

Adicionalmente, la empresa concesionaria. puso a disposición la siguiente información:

- Ubicación y naturaleza de la captación
- Volúmenes históricos captadas por localidad 2009-2020
- Porcentajes de pérdidas por localidad
- Volumen facturado por localidad
- Volumen tratado y *bypass*
- Registro histórico de niveles

Por último, se consideran los datos de Población del INE para los años 1992, 2002, 2017, en adelante "Censos".

1.2. Población adoptada

La demanda para consumo humano está directamente relacionada la población abastecida. Para la estimación de la demanda de agua potable urbana en el presente estudio se fija la población actual (2021) y se estima la población histórica y a futura. En los PD de cada sistema se presenta la población abastecida, y la estimación del crecimiento de la población a abastecer hasta 2032. Adicionalmente el INE presenta el censo de los años 1992, 2002, 2017 por localidad. Con estos antecedentes se realiza un escenario de población base de 1985-2060, cuyo año base, 2021, esta definido por el PD. Para completar el periodo histórico y proyectado se hacen las siguientes consideraciones:

Periodo histórico: se considera la tendencia lineal definida por los Censos 1992, 2002, 2017

Periodo proyectado: Para la población proyectada se realizan dos escenarios a evaluar, el primero considera la tendencia de los Censos y la segundo la tendencia incluida por el PD. Finalmente se adoptará como escenario base el mas desfavorable para asegurar el abastecimiento, es decir aquel con mayor tasa de crecimiento.

1.3. Consumo y producción

Con una población fijada desde 1985-2060, se consideran los factores de dotación (l/hab/día) y porcentaje de pérdidas según los datos ofrecidos por los PD.

$$\text{Consumo APU}_{\text{año } n} = \text{Población}_{\text{año } n} \times \text{Dotación} \times \frac{365}{10^9}$$

$$\text{Producción APU}_{\text{año } n} = \frac{\text{Consumo}_{\text{año } n}}{1 - \text{ANF}}$$

Donde;

Producción APU, producción en hm³/año

Consumo APU, consumo en hm³/año

Población, en Número de habitantes

Dotación, en l/habitante/día

ANF, Porcentaje de Agua no factura (%)



1.4. Validación de la estimación

El **SIFAC II**¹ concentra la información que entregan las empresas sanitarias a la SISS respecto a los clientes regulados, clientes no regulados (52 Bis 2) y otros. Dentro de esa información, se entrega el **volumen consumido (m³/mes)**, y **volumen producido (m³/mes)** por localidad y fecha.

Las sanitarias tienen clientes de tipo **residencial, industrial, comercial, institucional y otros**. Por lo tanto, los resultados de esta demanda consideran aquellos usos de agua que estén registrados en la red urbana. Dicha información se consolida para obtener un volumen consumido y producido por localidad anual (**m³/año**).

Dichos antecedentes son comparados con la estimación considerará para cada sistema. En el caso que los datos tengan un error alto, se reconsidera la estimación poblacional base.

1.5. Restitución por tratamiento

La restitución de agua post tratamiento de aguas servidas según los Planes de Desarrollo de las empresas sanitarias está definido en un 80% respecto al agua consumida.

1.6. Resultados Consumo de Agua Potable Urbana

Para visualizar los resultados ver Anexo F2 APU.

2. CONSUMO DE AGUA POTABLE RURAL

En este apartado se calcula la estimación de la demanda hídrica para el consumo de agua en el sector rural por sistemas de agua potable rural (APR) ahora denominados Sistemas de Saneamiento Rural (SSR) por la Ley N°20.998 de Servicios Sanitarios Rurales, que entró en vigor el 20 de noviembre del 2021. Por lo tanto, ahora los APR serán Servicios Sanitarios Rurales e, independientemente de su origen, estarán bajo la tutela del Ministerio de Obras Públicas.

2.1. Fuentes utilizadas

Los sistemas de SSR son comités o cooperativas rurales gestionados por la propia comunidad para prestar servicios de agua potable y saneamiento rural en zonas declaradas no urbanas y fuera del área de concesionarias sanitarias.

¹ Formulario SISS PR027001



Estos sistemas, en general, funcionan en base a financiamiento público a través de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), gobiernos regionales o municipios. Principalmente, están dentro del programa APR de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), y por lo tanto disponen de asesoramiento técnico.

Las Direcciones de Obras Hidráulicas en cada región disponen de un catastro de SSR con información básica que los caracteriza. Esta información dispone de los siguientes contenidos:

- ID APR -SSR
- Región, provincia y comuna
- Coordenadas UTM
- Tipo de servicio (comité o cooperativa)
- Nombre APR
- N° de arranques
- Tipo de APR (concentrada o semiconcentrada)
- Tipo de Fuente
- Beneficiarios/as estimado/as
- Producción de la captación (l/s)
- Niveles estáticos y dinámicos
- Otros

Esta información es sistematizada por las sanitarias y entregada a la SISS mediante el formulario PR039001.

Finalmente, se considera la información de los censos de población y vivienda realizados por el INE en los años 1992, 2002 y 2017, para el cálculo de la proyección de la demanda.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el cálculo.

2.2. Población adoptada

Según los antecedentes recibidos, para cada SSR se fija un número de arranques, una densidad de habitantes por cada arranque y finalmente una población abastecida. Por lo tanto, con dicha información se fija el año base (2021) para la estimación de la población histórica y a futuro. Para completar el periodo histórico y proyectado se hacen las siguientes consideraciones:

Periodo histórico: La tasa decrecimiento anual es definida por los Censos 1992, 2002, 2017 para población rural por comuna.

Periodo proyectado: Para calcular la seria poblacional hasta 2060 se considera una tasa de crecimiento según los censos 2002 y 2017, sin embargo, si dicha tasa

es <1% se mantiene en dicho porcentaje según Manual de proyectos de Agua Potable Rural de la DOH (versión julio 2019).

2.3. Consumo y producción

Para el cálculo se realiza las siguientes consideraciones:

- La dotación es de 140 l/hab/día (DOH,2019) en los años de funcionamiento del SSR, los años anteriores se considera 50 l/habitante/día (OMS).
- Se considera un porcentaje de pérdidas de 20% (DOH,2019)
-

La **demanda bruta de SSR** se determina como el volumen registrado de consumo, año 2019, multiplicado por el coeficiente de pérdidas del sistema.

$$\text{Producción o Demanda bruta SSR} = \frac{\text{Consumo SSR}}{1 - \text{Pérdidas}(\%)} = \frac{\text{Población} \times \text{Dotación}}{1 - \text{Pérdidas}(\%)}$$

Donde;

Población: Serie de población

Pérdidas=20%

Dotación =140 l/Hab/día

2.4. Resultados Consumo de Agua Potable rural

Para visualizar los resultados ver Anexo F2 SSR

3. CONSUMO DE AGUA POR USO AGRÍCOLA

3.1. Antecedentes y fuentes

Las demandas hídricas del sector agrícola son obtenidas en base a los datos y antecedentes disponibles:

- Censo agropecuario (1976, 1997 y 2007), Instituto Nacional de Estadística (INE, 1976-1997-2007): Superficie agrícola por distrito y grupo de cultivo perteneciente a la cuenca, para los años 1976, 1997 y 2007.
- Catastro frutícola CIREN, proyecciones en base a estadísticas de ODEPA. Superficie agrícola proyectada a los años 2015, 2020, 2030 y 2040.

- Publicación FAO, boletín 56 (FAO, 2006) para la determinación de las necesidades de riego: Coeficiente de cultivo por grupo de cultivo
- Manual Técnico de presentación de proyectos de obras de tecnificación de riego, Comisión Nacional de Riego, Santiago, Chile, 2015 (CNR, 2015): Eficiencias de riego estimadas para los años 2015, 2020, 2030 y 2040.
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, S.I.T.419, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017. (DGA, 2017a): Metodologías y resultados.
- Entrevistas con usuarios del agua de la cuenca
- Adicionalmente, los datos de precipitación real mensual son presentados para cada distrito censal, es decir, para cada división administrativa utilizada en el censo agropecuario del 2007, esto debido a que los cultivos y superficie de riego son calculados de acuerdo a esa división. La precipitación real es presentada desde 1985 al 2018, y obtenida desde *Center for Climate and Resilience Research* (CR2).

La precipitación por distrito para el periodo histórico y futuro (1985-2050), es calculada a partir de la precipitación obtenida en el modelo de cambio climático CCSM4 (modelo de cambio climático más favorable).

3.2. Metodología cálculo de la superficie

Los últimos datos censales de la superficie de riego son del año 2007, esta información es complementada con el catastro frutícola de ODEPA, y recientemente la DGA realizó un estudio denominado "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile" en el año 2017. Finalmente, como fuente de información, se considera la experiencia de las Juntas de Vigilancia y otros usuarios de la cuenca.

Censo agropecuario del año 2007

El censo agropecuario señala la superficie bajo riego a nivel censal para toda la cuenca para cada año por tipo de cultivo.

Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile (DGA, 2017)

Este estudio realizado por la Dirección General de Aguas en el año 2017 determinó la demanda de riego sobre la base de los antecedentes aportados por el Censo Agropecuario

y Forestal del año 2007, considerando los cultivos declarados por los usuarios en las preguntas 23 a la 83 del cuestionario. Es así como para el año 2007, se consideró una superficie regada y destinó el resto de los cultivos a secano, estimando una demanda agrícola por este concepto.

En este caso, se considera solo aquellas superficies con una seguridad de riego mayor, sin incluir aquellos cultivos o siembras con seguridades de riego variables.

Demanda Neta y Bruta

La demanda hídrica es obtenida a partir de la multiplicación entre la evapotranspiración de referencia (disponible para cada distrito) y el coeficiente de cultivo para cada grupo de cultivos, obteniéndose un resultado en mm/mes, el cual finalmente lo expresaremos en m³/ha. Este procedimiento se hace para cada mes, año y grupo de cultivo.

$$ETc \left(\frac{mm}{mes} \right) = ETo \left(\frac{mm}{mes} \right) \times Kc$$
$$ETc \left(\frac{m^3}{ha} \text{ mensual} \right) = ETc \left(\frac{L}{m^2} \right) \times \frac{10000}{1000}$$

Donde:

ETc= Evapotranspiración de cultivo

ETo= Evapotranspiración de referencia

Kc= Coeficiente de cultivo

Luego, la demanda hídrica de cada mes es obtenida al considerar la superficie ocupada por cada grupo de cultivo en el respectivo distrito:

$$DH (m^3 \text{ mensuales}) = ETc \left(\frac{m^3}{ha} \text{ mensual} \right) \times \text{superficie (ha)}$$

Donde:

DH= Demanda Hídrica

La precipitación efectiva es calculada según la precipitación mensual acumulada, usando la fórmula de la metodología de Blaney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibáñez el año 1986. Es en base a los tres modelos de precipitación que se están trabajando, que para cada año hay tres escenarios de demanda.

$$Pp \text{ efectiva} \left(\frac{mm}{mes} \right) = -0,0015 \times (pp \text{ real} \left(\frac{mm}{mes} \right))^2 + 0,9981 \times pp \text{ real} \left(\frac{mm}{mes} \right) - 4,4574$$

Donde:

Pp= Precipitación (CR2)

Para el cálculo de la demanda neta mensual, se le resta la precipitación efectiva a la demanda hídrica mensual (igualando las unidades en metros cúbicos):

$$DN (m^3 \text{ mensuales}) = DH (m^3 \text{ mensuales}) - Pp \text{ efectiva} \left(\frac{mm}{mes} \right) \times 10 \times superficie (ha)$$

Donde:

DN= Demanda Neta

DH= Demanda Hídrica

Pp= Precipitación

La demanda bruta es obtenida al dividir la demanda neta por el porcentaje de eficiencia de riego para cada año y distrito:

$$DB (m^3 \text{ mensuales}) = \frac{DN (m^3 \text{ mensuales})}{\% \text{ eficiencia de riego}}$$

Donde:

DB= Demanda Bruta

DN= Demanda Neta

Finalmente, la demanda también se representó en hm³.

$$Demanda (hm^3 \text{ mensuales}) = \frac{Demanda (m^3 \text{ mensuales})}{1000000}$$

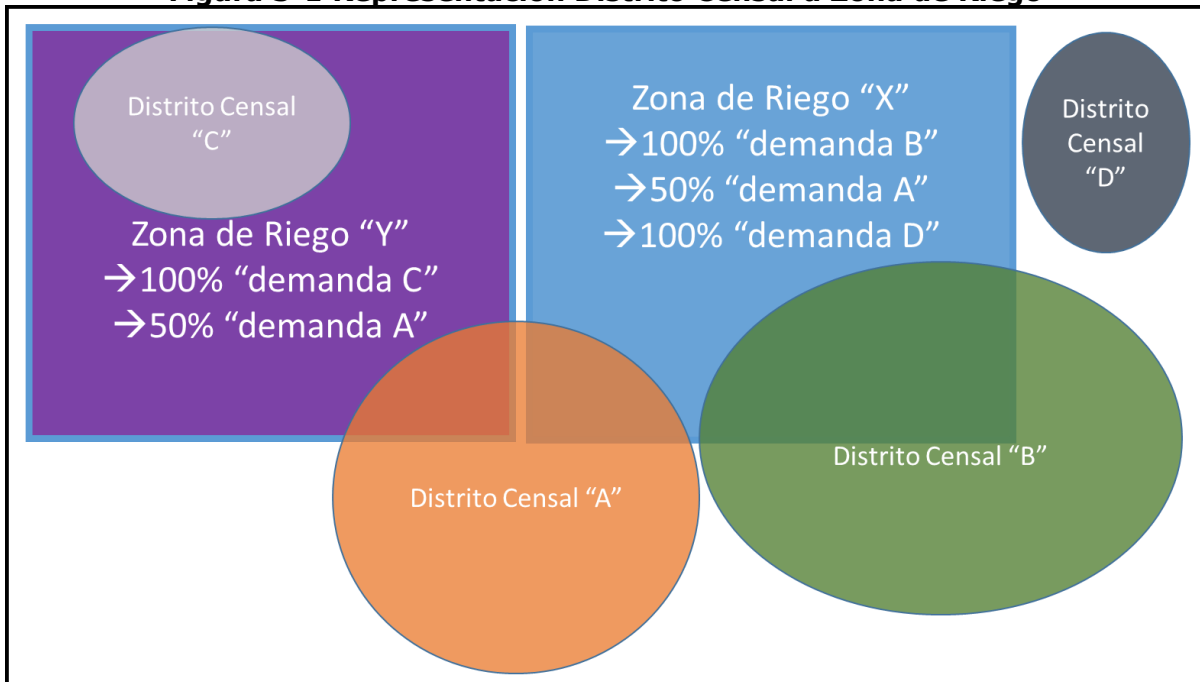
Para representar la demanda agrícola en las **Zonas de Riego (ZR)** que representan el área bajo riego en el programa WEAP, se utiliza la demanda neta en m³. Por lo tanto, para distribuir dicha demanda se hace el cruce de la capa de distritos censales con la capa de Zonas de Riego, para así obtener el porcentaje que ocupan los distritos en las zonas de riego y pasar la información desde una unidad a la otra, sin que quede alguna fracción de la demanda fuera de las ZR (Ver Anexo H).

A partir de ello, como resultado final se obtiene la **Estimación de la demanda de agua para Riego en las Zonas de Riego para cada mes y año (1985-2018)**. Este cálculo se hace de igual forma para los escenarios de cambio climático comentados para un período de años entre 1985-2050.

Del mismo modo, las eficiencias de riego son calculadas con la información levantada del registro del Censo Agrícola (INE, 1997, 2007) generando una tendencia lineal entre dichos años. Para el período 2008-2020, se realizó una tendencia respecto a los proyectos tecnificado por Ley de Riego (Apéndice F2).

La demanda calculada (por WEAP) para los distritos censales es traspasada a las Zonas de Riego de acuerdo al porcentaje del distrito que está dentro de la ZR. Para los casos en que parte del distrito no coincide con ZR, la demanda es dividida proporcionalmente en la o las ZR que sí coinciden con el distrito. Si es que el distrito no coincide con ninguna ZR, la demanda es traspasada a la ZR más cercana. Finalmente se ajusta a la información actualizada del estudio CNR (2021), para disponer un total de superficie de riego.

Figura 3-1 Representación Distrito Censal a Zona de Riego



Fuente: Elaboración propia, de acuerdo a metodología de Zonas de Riego.

De acuerdo a la figura anterior, el distrito censal "A" ocupa dos porciones iguales en las ZR "X" e "Y", por lo que una mitad de la demanda va a la "ZR X" y la otra a la "ZR Y". El distrito censal "C" está ubicado en su totalidad en la "ZR Y", por lo que la totalidad de su demanda es traspasada a esta ZR. En cuanto al distrito censal "B", solo una porción está ubicada en la ZR "X", y el resto del distrito no interseca ninguna ZR, por lo tanto la totalidad de la demanda va a la ZR "X". Por último, el distrito censal "D" no se interseca con ZR, por lo que la totalidad de su demanda es traspasada a la ZR más cercana, es decir, a la "ZR X".

La eficiencia de riego se calcula según los datos del Censo 2007 ya actualizado al 2020 según los datos superficies bonificadas por ley de Riego (Datos Abiertos CNR²). Con la superficie por método de riego y la Tabla 3-1 de eficiencia según método de aplicación de riego, se calcula de eficiencia para las zonas de riego.

Tabla 3-1. Eficiencia de Riego por método de riego

Método de riego	Eficiencia (CNR, 2015)	Eficiencia considerada en PEGH
Tendido	35%	40%
Surco	45%	
Otro tradicional	60%	
Aspersión	75%	75%
Carrete o pivote	75%	
Micro aspersión y microjet	85%	90%
Goteo o cinta	90%	
Rural 4.0	--	95%

Fuente: CNR,2015.

3.3. Resultados Consumo de Agua por uso Agrícola

Para visualizar los resultados ver Anexo F2 AGR

4. CONSUMO DE AGUA POR USO INDUSTRIAL

La demanda industrial no permite hacer cálculos directos de una fuente concreta, esta metodología aborda un cálculo indirecto según otros parámetros como el caudal reportado en los riles de las plantas.

² <https://datos.cnr.gob.cl/>

4.1. Fuentes utilizadas

Para determinar la demanda por uso industrial se utiliza principalmente los antecedentes disponibles en el estudio "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. S.I.T. N° 419 (DGA, 2017), y se actualizó la base de datos necesaria:

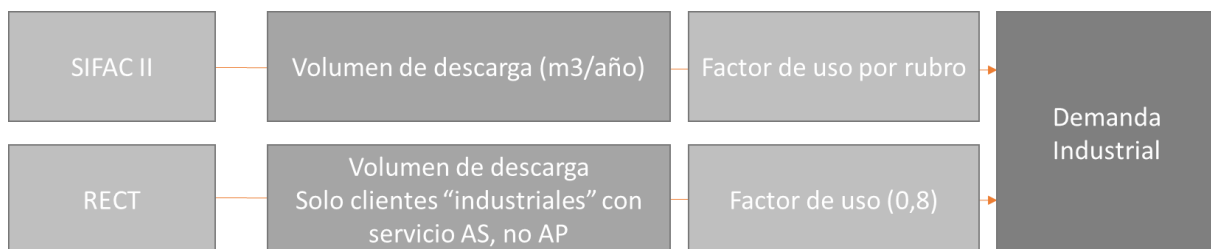
- SIFAC II (SISS,2020)
- Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)
- PIB industria manufacturera a nivel regional

El SIFAC nos permite conocer la facturación ($m^3/año$) del agua potable urbana y aguas servidas de los clientes conectados. Como la demanda de las industrias suministrada por las sanitarias se calculó en el apartado de Consumo de Agua Potable Urbana, esta demanda no se considera en el presente punto, es decir solo se considerarán las empresas conectadas únicamente al servicio de alcantarillado.

Por otra parte el RECT proporciona el caudal (m^3/s) reportado en este seguimiento de la SMA.

4.2. Metodología demanda actual

En concordancia con lo anterior, se tomarán dos fuentes de información para el cálculo de la demanda, según el siguiente flujo.



RECT:

Se calculan los afluentes a escala anual desde el caudal ($m^3/día$) aportado en el RECT. El dato original es caudal diario por cada mes, por lo tanto se considera un valor de 22 de producción para todos los meses del año, si no se reporta alguna fecha se toma el promedio de los datos consolidados.

Finalmente, para obtener la demanda se multiplica el volumen desechado por un factor de uso (DGA, 2017). Este factor viendo dado según el tipo de actividad, los cuales se presentan en la **Tabla 4-1**.

Tabla 4-1 Factor de uso (Efluente/demanda). Consumo Industrial

Sector Industrial	Factor de uso (Efluente/Demanda)
Comida	0,902
Bebidas y tabaco	0,735
Fábricas textiles	0,941
Productos textiles	0,857
Madera	0,664
Papel	0,969
Petróleo y carbón	0,900
Productos químicos	0,705
Plásticos y gomas	0,835
Minerales no metálicos	0,655
Metales primarios	0,842
Metales fabricados	0,972
Maquinaria	0,938
Equipo de transporte	0,938
Misceláneo	0,714
Otros	0,750

Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile. S.I.T. N° 419

SIFAC II:

Como se ha comentado anteriormente, se tomarán los valores de volumen reportados de aquellos clientes que están conectados a la red sanitaria, pero no se abastecen de agua potable urbana.

Este valor se multiplicará por un factor de 0,8 para obtener el valor del volumen demandado para este tipo de clientes.

4.3. Metodología demanda futura

En base a la metodología presentada en el informe “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile”, S.I.T. N° 419, se aplica la metodología para estimar la demanda futura industrial.

Se proyectó la demanda según la estimación del PIB de 2020-2050, es decir la evolución de la demanda hídrica sectorial varía interanualmente de forma proporcional al PIB, según lo proyectado (DGA, 2017).

5. ESTIMACIÓN DE RESERVA MÍNIMA AMBIENTAL

El establecimiento de reservas mínimas ambientales se puede asociarse tanto a los ecosistemas terrestres como a los ecosistemas acuáticos de la cuenca. Desde un punto de vista metodológico se busca determinar el caudal ecológico asociado a las estaciones fluviométricas existentes y las reservas ambientales aplica a las zonas de protección, siendo:

- Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE): Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Monumentos Naturales. Administrados por: Corporación Nacional Forestal (CONAF).
- Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica (SPDB): Áreas con oportunidad de emprender acciones de protección, privilegiándose aquellos que reúnen características ecosistémicas relevantes junto con consideraciones sociales y culturales. Surgen de un trabajo participativo regional, donde se identificaron estos sitios.
- Sitios Ramsar. Corresponden a aquellos humedales que han sido declarados de importancia a través de un tratado intergubernamental denominado Convención sobre los Humedales, aprobado el 2 de febrero de 1971 en la ciudad iraní de Ramsar.

Para obtener la reserva mínima ambiental o de protección ambiental, se toma en consideración los resultados y metodología del informe DGA (2017), SIT N°419, estudio denominado “Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile.

5.1. Fuentes utilizadas

Las principales fuentes utilizadas para el cálculo de la reserva mínima ambiental son:

- La base de información utilizada para identificar las áreas de protección SNASPE, Sitios Prioritarios para la Conservación de la Diversidad Biológica y Sitios Ramsar, en todas las regiones del país, corresponde a:
 - <https://rsis.ramsar.org/es/ris/2361>
 - <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/chi179366.pdf>
 - <https://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-bosque-fray-jorge/>
 - <http://bdrnap.mma.gob.cl/buscador-rnap/#/busqueda?p=1255>
- ✓ Mapoteca de la DGA, Unidad SIG, actualizada al año 2022.
- Las estadísticas de caudales medios mensuales fueron obtenidas de las estaciones fluviométricas de la web de la DGA (<https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>)
- Metodología y resultados DGA 2017- SIT N°419 "Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile.

5.2. Metodología

Según la revisión de información, se define los puntos a estudiar el caudal de reserva mínima ambiental o protección ambiental, definido por la suma del caudal ecológico más el de reserva por interés nacional, que es la sección comprendida entre el caudal ecológico y el 20% de probabilidad de excedencia. La metodología se presenta esquemáticamente en la siguiente figura:

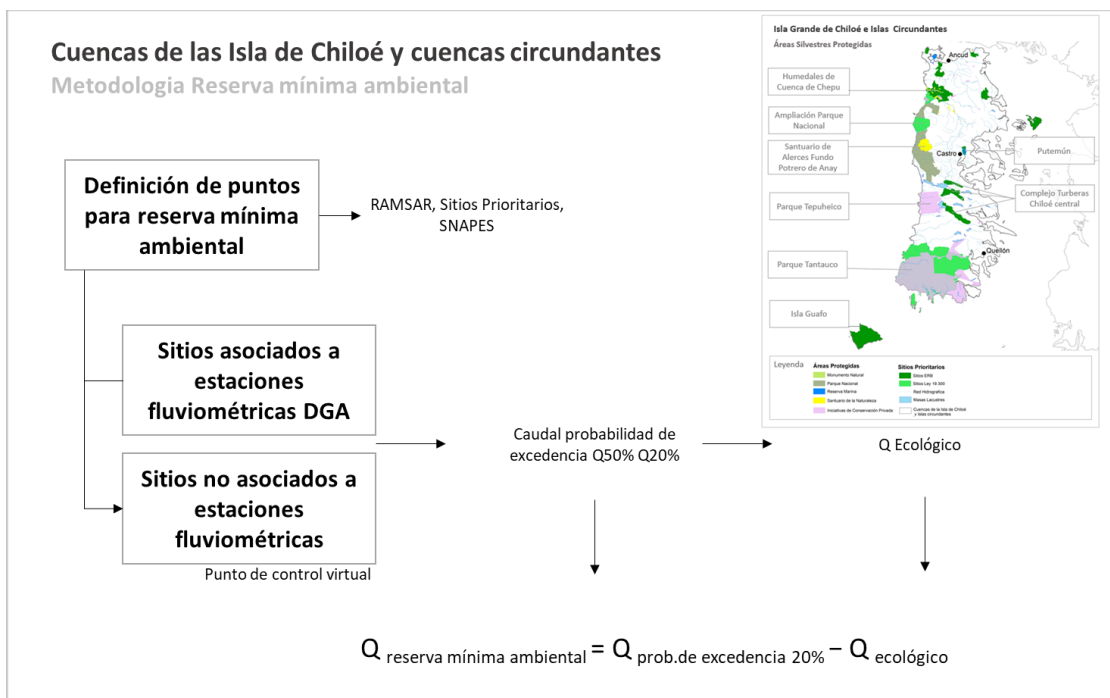


Figura 5-1 Metodología reserva mínima ambiental

5.3. Metodología Caudal ecológico

La metodología utilizada para calcular caudal ecológico se obtiene de la revisión de fuentes de información generadas y validadas por DGA. Destaca la revisión del estudio "Actualización Informe Evaluación de los Recursos Hídricos superficiales de la cuenca del Río Maule Región del Maule" (DGA, 2016). Este documento utilizó algunos criterios que se deben precisar: para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo, considerando como fórmula de cálculo el criterio del diez por ciento del caudal medio anual, se considerará el cincuenta por ciento del caudal de probabilidad de excedencia de noventa y cinco por ciento, para cada mes, con las restricciones siguientes:

- i. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es menor al diez por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo para ese mes será el diez por ciento del caudal medio anual.
- ii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al diez por ciento del caudal medio anual y menor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico

mínimo será el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia.

- iii. Para aquellos meses, en los cuales el cincuenta por ciento del caudal con noventa y cinco por ciento de probabilidad de excedencia es mayor al veinte por ciento del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el veinte por ciento del caudal medio anual.”

Para determinar los caudales medios en fuentes sin registros fluviométricos, se utilizó la siguiente fórmula:

$$Q_1 = \frac{A_1}{A_2} \times Q_2$$

Donde:

Q1 = Caudal medio de la cuenca en estudio.

Q2 = Caudal medio de la cuenca base.

A1 = Área de la cuenca en estudio.

A2 = Área de la cuenca base.

Para lo anterior las cuencas vecinas deben tener características similares.

Así, los caudales ecológicos determinados en este estudio, es decir, que no estaban determinados previamente, se obtuvieron mediante uno de los siguientes criterios (el más limitante):

- Caudal ecológico = 10% del caudal medio anual
- Caudal ecológico = 50% del caudal mínimo del estiaje del año (con 95% de probabilidad de excedencia)

5.4. Aspectos específicos de la cuenca

Finalmente, los puntos considerados para la determinación de la reserva mínima ambiental son:

Tabla 5-1 Sitios de reserva mínima ambiental

Tipo de protección	Nombre sitio	Cauce/Lago	Estación Fluviométrica o Nivel
Masa de agua	Río Grande en San Pedro	Río Grande	10904001-0
Masa de agua	Río Vilcún en Belbén	Río Vilcún	10903001-5
Humedal	Circuito de humedales Pudeto	Laguna de Patinar Reg. Pudeto	No existe
Humedal	Río Chepu	Río Chepu	No existe
Humedal	Sistema Huillinco - Cucao	Lago Huillinco - Cucao	No existe
Humedal	Humedal Gamboa	Río Gamboa	No existe
Humedal	Humedal Ten Ten	Estero Ten Ten	No existe
Humedal	Laguna Chaiguata	Laguna Chaiguata	No existe
Humedal	Humedal Estero Quellón	Estero Quellón	No existe

Fuente: Elaboración propia

6. DEMANDA FORESTAL

La metodología y revisión de resultados ser realizo con el informe DGA (2017).

6.1. Uso productivo

6.1.1. Fuentes Utilizadas

Las fuentes utilizadas son las siguientes:

- Catastro de Uso de Suelos y Vegetacional de CONAF, actualización 2013
- Isoyetas del estudio "Balance Hídrico de Chile" (DGA, 1987) [Se actualizará según modelo en desarrollo]
- Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale de Zhang et al. (2001).
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, S.I.T.419, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017. (DGA, 2017a): Metodologías y resultados.

6.1.2. Metodología

- Identificación de superficie forestal según Catastro de uso de Suelo de CONAF
- Asignación de precipitación anual por distrito censal según Balance Hídrico [En actualización]
- Modelo Zhang et al (2001): Relación precipitación media anual y evapotranspiración anual, se obtiene valores de evapotranspiración
- Calculo de la demanda hídrica forestal

$$Demanda = \sum (ET_i \times A_i \times 10)$$

Donde:

ET= Evapotranspiración asociada a una i-esima subcuenca (mm/año)

A Superficie j-esima de plantación forestal en una subcuenca analizada

7. USO NO PRODUCTIVO

7.1. Fuentes utilizadas

Las fuentes utilizadas son las siguientes:

- Catastro de Uso de Suelos y Vegetacional de CONAF, actualización 2013
- Isoyetas del estudio "Balance Hídrico de Chile" (DGA, 1987) [Se actualizará según modelo en desarrollo]
- Mapoteca DGA (2021), y Ministerios de Medio Ambiente, archivos georreferenciados: SNAPES, Sitios de Conservación de la Diversidad biológica y Sitios Ramsar
- Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale de Zhang et al. (2001).
- Coeficientes de cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (FAO, 2006).
- Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras, y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile, S.I.T.419, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, 2017. (DGA, 2017a): Metodologías y resultados.



7.2. Metodología

- Determinación de áreas de uso no productivo según Catastro de Usos del Suelo y Vegetación de la Corporación Nacional Forestal (CONAF)
 - Bosque: Bosque Nativo, Bosque Mixto
 - Humedales: Marismas herbáceas, Ñadis herbáceos y arbustivos, otros terrenos húmedos, bofedales, turberas, vegas, vegetación en ríos
- Metodología para el cálculo de la demanda según:
 - Bosques: modelo Zhang
 - Humedales: Evapotranspiración de referencia según coeficiente de cultivo



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

**ANEXO G
SIG**

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



TABLA DE CONTENIDO

1. PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	1-4
1.1. PRESENTACIÓN	1-4
1.2. CONSIDERACIONES GENERALES Y ALCANCES DEL SIG	1-4
1.2.1. SOFTWARE Y VERSIÓN UTILIZADA	1-5
1.2.2. OBJETIVOS Y MODO DE USO DEL SOFTWARE	1-6
ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN PRESENTADA.....	1-6
1.2.3. FUENTE PROCEDENCIA DE ARCHIVOS	1-6
1.2.4. SALIDA DE LA INFORMACIÓN: CREACIÓN DE MAPAS, CARTAS Y FIGURAS ..	1-7
1.3. ESQUEMA DE PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	1-7
1.3.1. ARCHIVOS GDB.....	1-8
1.4. RUTA ACCESO AL DIRECTORIO SIG	1-10



1. PROYECTO SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

1.1. Presentación

El siguiente documento comprende la descripción de todos los productos y procesos cartográficos propios de un SIG, asociados a los resultados obtenidos del análisis de información hídrica de la cuenca del área de estudio, en el marco del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la Isla de Chiloé e Islas circundantes, de la Dirección General de Aguas (DGA).

En específico el Proyecto SIG, contiene los resultados del diagnóstico y procesamiento de información hídrica de toda la cuenca: aguas superficiales y aguas subterráneas; además de la caracterización de variables como zonas de protección ambiental, subcuencas, entre otras. El fin es lograr un análisis acabado entre las diferentes unidades territoriales y las variables asociadas a la gestión hídrica.

Finalmente, para llegar a una representación más simplificada se realiza la elaboración de *Infografías*, representación cartográfica que permite la visualización simple de aquello que se quiera mostrar al lector sin la complejidad cartográfica.

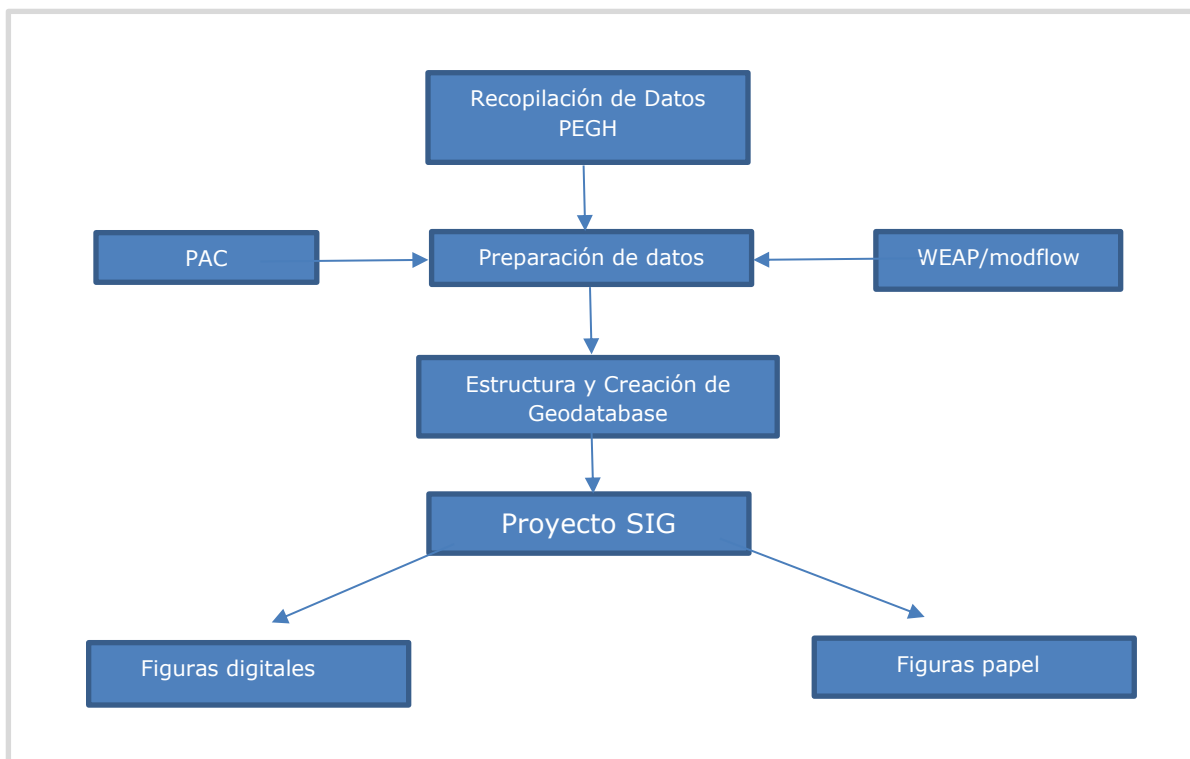
1.2. Consideraciones Generales y Alcances del SIG

El Estudio SIG considera las siguientes etapas:

- Reuniones de coordinación a nivel Consultoría interna, como también, con la contraparte técnica de la Dirección General de Aguas, con el fin de definir los alcances y recomendaciones.
- Recopilación y sistematización de los resultados del proyecto.
- Creación de árbol de directorios y ordenamiento de los resultados obtenidos desde las diferentes áreas.
- Estructuración del proyecto SIG para compatibilidad con ArcGIS v10.2 y la generación de geodatabases.
- Creación de los formatos *.mxd propios de proyectos ArcGIS, elaboración de cartografía en tamaño carta, además de sus formatos de salida y visualización *.jpg y *.pdf.
- Presentación de resultados en formato digital y formato impreso (si es requerido por el mandante) para el proyecto.

- Creación de infografías para el Plan Estratégico.

La siguiente figura esquematiza los procedimientos SIG detallados anteriormente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-1 Procedimientos SIG utilizados en el estudio

1.2.1. Software y versión utilizada

Por requerimiento de la DGA, los trabajos son realizados en ArcGIS versión 10.2. La generación, análisis y entrega de la información corresponden "feature class" insertos dentro de cada "Datasets" estructurando toda la información geográfica recopilada al interior de la geodatabase.



1.2.2. Objetivos y modo de uso del Software

La información espacial generada cumple la labor de acompañar gráficamente los informes para una mejor comprensión del lector.

Los usuarios tendrán acceso a la información de esta consultoría a partir de la Base de Datos Espacial entregada y clasificada en temáticas (Carta Base, DGA, Plan) y las Cartografías en formato PDF Y JPG.

Sistema de Referencia Espacial

Todos los *"feature class"* pertenecientes a la geodatabase, son homogeneizados y transformados al sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM), Datum WGS 84, Huso 18.

Estructura de la información presentada

La base de datos SIG está organizada en un sistema de carpetas temáticas o data sets, la información se almacena de acuerdo con categorías. El detalle con la estructura del directorio, subdirectorio y *"feature class"* se define en el punto 1.2.3.

1.2.3. Fuente procedencia de archivos

Los archivos utilizados para la generación de información territorial dentro del proyecto tienen distintas fuentes de origen.

En Dataset Carta Base, corresponden *"feature class"* de límites regionales, provinciales, comunales y división político-administrativa pertenecientes generalmente a información cartográfica del IGM.

En Dataset DGA, los archivos allí colocados corresponden a la Dirección General de Aguas.

En Dataset PLAN, contiene toda la información nueva generada para el estudio.

Hay que indicar que los archivos Raster en su mayoría son producidos a partir de elaboraciones del consultor.



1.2.4. Salida de la Información: creación de mapas, cartas y figuras

Todos estos archivos *Feature Class* dentro de la Geodatabase, son editados y normalizados para su óptimo despliegue cartográfico por el equipo DGA.

Los elementos anexos de un mapa, ya sean tablas, gráficos u otros, son utilizados con el fin de complementar la información entregada en éste estudio, su diseño será revisado con el fin de evitar algún tipo de saturación en el layout.

La configuración del tamaño de salida de mapas y figuras derivados de los archivos *.mxd y layouts correspondientes se entregan en los siguientes tamaños:

- Carta o tamaño menor, para mapas o figuras insertos en el informe

Todos los mapas y figuras de salida entregados en este estudio tendrán una resolución de 300 DPI.

1.3. Esquema de Presentación del Proyecto

Se considera una carpeta SIG, la cual organiza la información con el fin de acceder a todos los contenidos sin que el usuario se confunda, considerando la gran variedad de tópicos que involucra la generación de resultados.

A continuación, se describen aquellos elementos SIG, los cuales permiten organizar la información de manera correcta:

1. **Proyectos:** se encuentran en archivos *.mxd asociados a las distintas variables dentro del área de estudio, las figuras se dividen en 3 grupos:
 - a. Figuras resumen Ejecutivo
 - b. Modelo Subterráneo y Superficial (Modelación WEAP)
 - c. PAC
 - d. Iniciativas del Plan



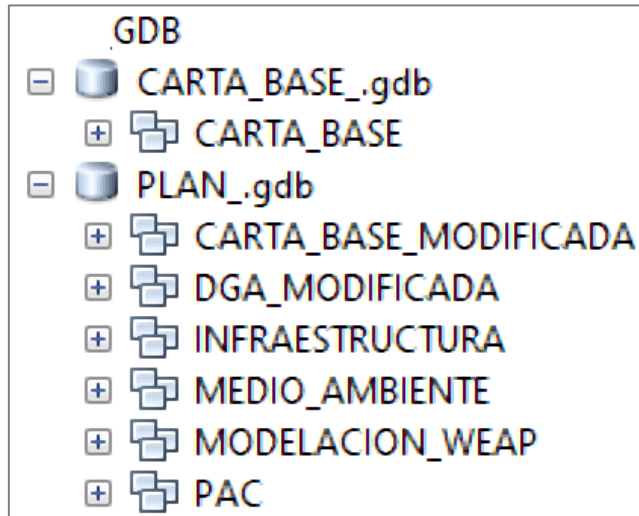
-
2. **Mapas, Planos y/o Figuras:** Exportaciones en formato *.jpg, y *.pdf de los proyectos *.mxd, presentando la misma estructura que el punto anterior:
 - a. Figuras resumen Ejecutivo
 - b. Modelo Subterráneo y Superficial (Modelación WEAP)
 - c. PAC
 - d. Iniciativas del Plan

 3. **Archivos GDB:** Geodatabase o Base de datos espacial contiene los archivos vectoriales asociados al proyecto SIG, será la información que el usuario final podrá manejar y representar cartográficamente. Se presentan 7 dataset temáticos que agrupan diversos feature class para el correcto entendimiento y representación. En el numeral 1.3.1, se presenta el detalle de esta información.

 4. **Diccionario de capas:** Adicionalmente se adjunta un archivo en formato Excel, registro que entrega información detallada de la estructura de la GDB, como también de cada una de las capas de información (Feature Class) contenidas en esta base datos SIG

1.3.1. Archivos GDB

El proyecto se presenta en una Geodatabase organizada en tres Dataset (Figura 1-2), donde se distribuye la información geoespacial, tanto para el desarrollo de la cartografía, cartas y figuras, como así también el almacenamiento de los archivos necesarios para la creación de los proyectos mxd. La organización de la Geodatabase se muestra en la siguiente figura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-2 Estructura Geodatabase



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1-3 Estructura Carpetas SIG



1.4. Ruta acceso al Directorio SIG

Se adjunta la ruta de acceso al directorio SIG utilizado en el proyecto. Este material puede ser encontrado en la versión digital del informe.

C:\PEGH_CHILOE\3_GDB\PLAN_.gdb

Como recomendación es necesario alojar las carpetas; 1. Proyectos MXD, 2. Figuras y 3. GDB, en el directorio "C:\ de la computadora de destino, de esta forma los proyectos MXD no perderán las rutas de conexión (ruta relativa) a cada feature Class alojado en la GDB.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO H MODELOS HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022

Índice del Anexo H.

1	INTRODUCCIÓN.....	13
2	SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO	14
3	MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA	21
3.1	Modelo Hidrológico Conceptual Superficial	21
3.2	Modelo Hidrológico Conceptual Subterráneo	23
3.2.1	Capa límite de relleno sedimentario	25
3.2.2	Campañas geofísicas.....	26
3.2.3	Interpretación Hidroquímica.....	42
3.2.4	Unidades hidrogeológicas	67
3.2.5	Basamento	78
3.2.6	Sectorización de los Acuíferos	83
3.2.7	Propiedades Hidrogeológicas	86
3.2.8	Nivel Estático de las Aguas Subterráneas.....	96
3.2.9	Caudales entre Sectores Acuíferos	99
3.2.10	Pozos y Captaciones.....	102
3.2.11	Condiciones de borde	104
3.2.12	Análisis sobre dinámica hidrogeológica global de la cuenca	106
3.2.13	Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos	110
3.2.14	Modelo MODFLOW.....	111
4	MODELO NUMÉRICO DE AGUAS SUPERFICIALES.....	115
4.1	Cauces Superficiales	116
4.2	Subcuencas Superficiales.....	119
4.3	Forzantes Meteorológicas.....	125
4.3.1	Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico	125
4.3.2	Forzantes Meteorológicas para el Periodo Proyectado	131
4.4	Demanda de Agua Potable Urbana	139
4.5	Demanda de Agua Potable Rural.....	141
4.6	Demanda de Agua para Uso Industrial	145
4.7	Demanda de Agua para Uso Agrícola.....	147
4.8	Demanda de Agua para Uso Forestal.....	147
4.9	Embalses.....	147



4.10	Centrales Hidroeléctricas	147
4.11	Sectores Acuíferos	147
4.12	Resumen Esquemático Modelo WEAP	149
4.13	Parámetros y Factores de Ajuste	152
4.14	Calibración del Modelo.....	157
4.15	Oferta de la fuente	161
4.16	Balance Hídrico	165
	4.16.1 Balance Hídrico Superficial	165
	4.16.2 Balance Hídrico subterráneo.....	167
4.17	Escenarios de gestión.....	170
	4.17.1 Definición de Escenarios	170
	4.17.2 Evaluación de los resultados de los Escenarios de Gestión.....	173
	4.17.3 Conclusiones de los resultados de los escenarios de gestión	185
5	BRECHAS	186
6	MATERIAL COMPLEMENTARIO.....	190

Índice de Figuras

- Figura 3-1: Modelo conceptual superficial cuencas de las islas de Chiloé y circundantes
- Figura 3-2 Zona acuífera en las cuencas de islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-3 Ubicación de campañas geofísicas e hidroquímica.
- Figura 3-4 Conductividad eléctrica y pH para las aguas analizadas en el área de estudio.
- Figura 3-5 Clasificación de la conductividad eléctrica en estaciones analizadas según norma NCh 1333
- Figura 3-6 Clasificación de dureza en estaciones analizadas según OMS.
- Figura 3-7 Concentración de los iones mayoritarios según Diagrama de Stiff en muestras hidroquímicas del área de estudio.
- Figura 3-8 Comparación del sodio porcentual en las muestras analizadas.
- Figura 3-9 Comparación del contenido de hierro en las muestras analizadas.
- Figura 3-10 Comparación de estaciones según norma NCh 409.
- Figura 3-11 Unidades hidrogeológicas en superficie.
- Figura 3-12 Ubicación perfiles hidrogeológicos en el área de estudio.
- Figura 3-13 Profundidad de basamento en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-14 Zonas de levantamiento y Zonas con brecha de información en el área de estudio
- Figura 3-15 Sectores acuíferos de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-16 Permeabilidad en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-17 Zonas más permeables y Zonas con brechas de información en el área de estudio.
- Figura 3-18 Coeficiente de almacenamiento en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-19 Coeficiente de infiltración en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-20 Cota del nivel estático en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.
- Figura 3-21 Perfiles para calcular los caudales entre sectores acuíferos en área de estudio
- Figura 3-22 Ubicación de derechos subterráneos otorgados en la cuenca.
- Figura 3-23 Condiciones de borde del área de estudio.
-



Figura 3-24 Modelo conceptual subterráneo de las islas Chiloé y circundantes.

Figura 4-1: Cauces incluidos en la modelación WEAP

Figura 4-2 Cauces de unificaciones costeras incluidos en la modelación WEAP

Figura 4-3 Subcuencas consideradas para la modelación WEAP.

Figura 4-4 Bandas de elevación y subcuencas consideradas para la modelación hidrológica WEAP

Figura 4-5: Uso de suelos y subcuencas consideradas para la modelación hidrológica WEAP

Figura 4-6: Resultados validación estaciones de precipitación y modelo CR2MET V2.0

Figura 4-7: Resultados validación estaciones meteorológica y modelo CR2MET v2.0.

Figura 4-8 Resultados validación Precipitación con modelos GCM.

Figura 4-9 Resultados validación Temperatura con modelos GCM.

Figura 4-10 Resultados validación de precipitación acumulada con modelos GCM.

Figura 4-11 Localidades consideradas en la modelación hidrológica

Figura 4-12 Ubicación de los puntos de extracción de aguas subterráneas de las SSR

Figura 4-13 División de las subcuencas por sectores y pendiente para la parametrización de la calibración

Figura 4-14: Ubicación de las estaciones fluviométricas en la cuenca

Figura 5-1 Zonas propuestas para la instalación de nuevas estaciones pluviométricas



Índice de Ilustraciones

Ilustración 3-1 Perfiles de gravedad & elevación en algunos sectores de Chiloé.....	28
Ilustración 3-2 Perfiles con datos gravimétricos 2022 (rojo) y 2018 (azul).	29
Ilustración 3-3 Mapas de Profundidad [m] y Elevación [msnm] de basamento en Chiloé.	31
Ilustración 3-4 Escala de resistividad para interpretar perfiles de prospección TEM y rangos de cada Unidad Geoeléctrica.	33
Ilustración 3-5 Resistividad interpolada & profundidad en comuna Ancud.....	34
Ilustración 3-6 Ubicación en planta de secciones TEM analizadas en zona norte.	35
Ilustración 3-7 Resistividad interpolada & profundidad al este de comuna Quemchi.	37
Ilustración 3-8 Resistividad interpolada & profundidad al este de comuna Dalcahue.	38
Ilustración 3-9 Resistividad interpolada & profundidad en zona central.	39
Ilustración 3-10 Ubicación en planta de secciones TEM analizadas en zona sur.	40
Ilustración 3-11 Resistividad interpolada & profundidad en Queilén.	41
Ilustración 3-12 Diagrama de Piper para las aguas analizadas en el área de estudio.	49
Ilustración 3-13 Representación de muestras duplicadas en diagrama Schöeller-Berkaloff en el área estudiada.....	53
Ilustración 3-14 Relación de TDS con aniones y cationes según Diagrama de Gibbs.....	54
Ilustración 3-15 Diagramas binarios de elementos mayoritarios versus TDS (SDT) para las muestras de aguas analizadas.	55
Ilustración 3-16 Diagramas de Wilcox para las muestras de aguas analizadas.	56
Ilustración 3-17 Diagrama binario con relación NO ₃ versus SDT (TDS) en las muestras analizadas.	60
Ilustración 3-18 Perfil hidrogeológico A-A' en el área de estudio.....	71
Ilustración 3-19 Perfil hidrogeológico B-B' en el área de estudio.....	72
Ilustración 3-20 Perfil hidrogeológico C-C' en el área de estudio.	73
Ilustración 3-21 Perfil hidrogeológico D-D' en el área de estudio.	74



Ilustración 3-22 Perfil hidrogeológico E-E' en el área de estudio.	75
Ilustración 3-23 Perfil hidrogeológico F-F' en el área de estudio.	76
Ilustración 3-24 Representación geoespacial del acuífero en el área de estudio.	77
Ilustración 3-25 Detalle de las zonas más profundas del acuífero en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.	81
Ilustración 3-26 Representación de área transversal del flujo pasante por un perfil	102
Ilustración 3-27 Grilla numérica con celdas 200x200 obtenida en Visual Modflow Flex para el área de estudio.	114
Ilustración 4-1 Esquema de modelación de WEAP	115
Ilustración 4-2 Precipitación para modelos GCM en las cuencas de la isla de Chiloé y circundantes	132
Ilustración 4-3 Temperatura para modelos GCM en las cuencas de la isla de Chiloé y circundantes	132
Ilustración 4-4 Valores de KGE comparación estaciones pluviométricas con GCM.	136
Ilustración 4-5 Valores de KGE comparación estaciones de temperatura con GCM.	136
Ilustración 4-6 Resultado de validación precipitación acumulada para modelos GCM.	137
Ilustración 4-7: Para la estación Río Vilcún en Bel-Ben: (a) Gráfico de las series de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de los promedios de los caudales observados y simulados en cada mes	159
Ilustración 4-8: Para la estación Río Grande en San Pedro: (a) Gráfico de las series de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de los promedios de los caudales observados y simulados en cada mes	160
Ilustración 4-9 : Variación de usos de suelos considerados en la modelación entre el año 2014 y 2060.	171
Ilustración 4-10 Análisis de satisfacción de abastecimiento sector urbano. Volumen de brecha anual Loc_Ancud 2022-2060 (hm ³ /año)	4-181
Ilustración 4-11 Análisis de satisfacción de abastecimiento sector urbano. Volumen de brecha anual Loc_Castro y Loc_Quellón años 2055-2060 (hm ³ /año)	4-182



Ilustración 4-12: Caudal en los cauces que abastecen las captaciones APU de Quellón y Ancud (m³/s).
..... 4-182



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN



Índice de Tablas

Tabla 3-1- Error del Balance Iónico (EBI) para todas las muestras estudiadas.	42
Tabla 3-2 Elementos minoritarios que exceden los límites en algunas muestras de aguas del área estudiada.....	63
Tabla 3-3 Propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas.	69
Tabla 3-4 - Datos para el cálculo de permeabilidad según correlación lineal.....	86
Tabla 3-5 Relación entre curvas de nivel estático y dirección de los flujos	101
Tabla 3-6 Flujos en las condiciones de borde.	104
Tabla 4-1: Cauces superficiales incluidos en la modelación WEAP	116
Tabla 4-2: Estaciones consideradas en la validación	127
Tabla 4-3 Rango de resultados de parámetros de eficiencia	128
Tabla 4-4 Modelos global de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático.....	131
Tabla 4-5:Agrupación de SSR consideradas en la modelación WEAP	142
Tabla 4-6 Demanda industrial considerada en la modelación WEAP	146
Tabla 4-7. Sectores acuíferos definidos para la cuenca en estudio y volúmenes	149
Tabla 4-8 Resumen esquemático del modelo WEAP	149
Tabla 4-9 Factores de "Key assumptions" para calibrar parámetros	153
Tabla 4-10: Factores según pendiente	154
Tabla 4-11: Factores según uso de suelo	154
Tabla 4-12: Factores de ajuste por sector	155
Tabla 4-13: Factor Kc con variación mensual según uso de suelo	155
Tabla 4-14: Valores de KGE entre caudales simulados y observados obtenidos en las estaciones fluviométricas.....	157
Tabla 4-15 Recarga de los SHAC para el periodo histórico y actual	162
Tabla 4-16 Volumen húmedo de los SHAC para el periodo histórico y actual	163



Tabla 4-17 Recarga de los SHAC para el periodo actual y proyectado	164
Tabla 4-18 Volumen húmedo de los SHAC. Periodo actual y proyectado.....	164
Tabla 4-19. Balance hídrico superficial en Chiloé. Entradas y salidas del sistema. Periodo histórico y actual hm ³ /año	166
Tabla 4-20 Balance hídrico de aguas superficiales, período proyectado	166
Tabla 4-21 Balance hídrico subterráneo, escenario base hm ³ /año. Histórico (P1) y Actual (P2) 4-	168
Tabla 4-22 Balance hídrico subterráneo para periodo proyectado. Periodo histórico (P1) y proyectado (P2)	4-169
Tabla 4-23 Tasas de crecimiento poblacional intensificado consideradas en el escenario de gestión desde el año 2021 en adelante	172
Tabla 4-24 Resumen de las medidas tomadas en el escenario de tranques de acumulación de aguas lluvia	173
Tabla 4-25 Resultados Escenarios. Balance Superficial (hm ³ /año)	174
Tabla 4-26 Resultados Balance Superficial Escenario E1 Cambio de uso de Suelo (hm ³ /año)	177
Tabla 4-27 Resultados Balance Superficial Escenario E2 Aumento Poblacional (hm ³ /año)	178
Tabla 4-28 Resultados Balance Superficial Escenario E3 Tranques de Acumulación (hm ³ /año)	179
Tabla 4-29 Caudales afluentes a los principales humedales de la zona de estudio en el periodo actual y en la década 2050-2059 proyectada en todos los escenarios. Valores en hm ³ /año.....	184
Tabla 4-30 Conclusiones de los resultados de los escenarios de gestión	185
Tabla 6-1: Contenido de la carpeta WEAP Área del modelo WEAP.....	193



Apéndices

Anexo H-1. Modelo Conceptual Subterráneo

- Modelo_conceptualSUB_Modflow
- Documentos de apoyo (“Archivos complementarios”, “Gravimetría”, “Hidroquímica”, “Minutas de etapa de diseño de campañas”, “TEM”)
- Anexo H-1 Caracterización hidrogeológica_PEGH Chiloé

Anexo H-2. Modelo Superficial WEAP

- WEAP_Chiloe_V4

Anexo H-3. Material WEAP

- Material asociado a la Transferencia de Capacidades en Modelación Hidrológica desarrollada en el marco de este estudio.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN



1 INTRODUCCIÓN

En el presente anexo se detalla todo lo referente a la modelación superficial y subterránea de las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes, tanto en el ámbito conceptual como en el numérico.

En primera instancia, se presenta una recopilación de estudios realizados previamente en la zona de interés y que incluyen trabajos de **caracterización hidrológica** e **hidrogeológica** de la zona de estudio y los sectores aledaños.

Como parte del **modelo conceptual superficial**, se incorpora una caracterización de manera simple de la cuenca, esta incluye los cauces, masas lacustres e islas principales. Además, se incluye la variación de la precipitación y temperatura media anual, los principales usos de suelos y la distribución de su elevación. Por su parte, **el modelo conceptual subterráneo** se divide en una serie de subcapítulos, con el fin de individualizar y explicar en detalle cada una de las propiedades hidrogeológicas y geográficas que lo componen, y que podrían ser incluidas en un futuro modelo numérico subterráneo. Tales propiedades corresponden a niveles estáticos, sectorización de los acuíferos, profundidad del basamento, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, entre otras.

El modelo numérico se desarrolla en la plataforma WEAP (**Water Evaluation And Planning System**). Este software permite la modelación tanto superficial como subterránea de la cuenca, aunque se especializa en la componente superficial. Se ha estructurado el modelo considerando las subcuencas superficiales delimitadas mediante herramientas SIG y subdivididas en bandas de elevación y usos de suelo, además de los principales cauces. Para la información de entrada al modelo WEAP, se seleccionaron distintos modelos para la extracción de series de tiempo de forzantes meteorológicas, los cuales, en el caso de la precipitación y temperatura, fueron validados con observaciones de estaciones cercanas.

WEAP es una plataforma que se caracteriza por entregar una gran variedad de herramientas que permiten evaluar medidas para la gestión de recursos hídricos en la cuenca, considerando no solo aquellos aspectos que corresponden a la representación de la hidrología natural en la cuenca, sino que también aquellas actividades antrópicas llevadas a cabo por los actores presentes en la zona y que corresponden a un aspecto importante en el balance hídrico de la zona de estudio; actividades tales como consumo sanitario en localidades y labores industriales. Una vez representada la cuenca en estudio en WEAP, tanto en su componente superficial como subterránea, y mediante la utilización de proyecciones de forzantes meteorológicas que consideran efectos de cambio climático (resultados de modelos de circulación general, MCG), es posible evaluar la situación de la cuenca con un horizonte temporal hasta el año 2060, que permita cuantificar y dimensionar las necesidades hídricas a futuro y proponer medidas para su mitigación.



2 SITUACIÓN ACTUAL DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA ZONA DE ESTUDIO

Luego de un proceso de investigación del estado del arte, se pudo constatar que no existen trabajos respecto a modelación hidrológica en la zona de estudio. No obstante, y tal como lo estipula la oferta técnica del equipo consultor, se decide mostrar de manera resumida los estudios que podrían significar un apoyo para el trabajo de modelación de este proyecto. Una breve descripción de cada uno de ellos, con su respectiva utilidad potencial, se muestran a continuación.

- **Geomorphology, Stratigraphy, and Radiocarbon Chronology of Llanquihue Drift in the Area of the Southern Lake District, Seno Reloncaví, and Isla Grande de Chiloé, Chile (Denton et al., 1999).**

Este estudio explora la geomorfología, estratigrafía y cronología de radiocarbono presentes en la isla grande de Chiloé y otras áreas aledañas. Relacionado a la modelación hidrológica, la información expuesta en el estudio podría servir como referencia para caracterizar los parámetros hidrogeológicos de la cuenca, se podrían estimar magnitudes de parámetros como la conductividad hidráulica, al menos desde el punto de vista morfológico y de nomenclatura.

- **Análisis y Determinación de Caudales de Reserva para Abastecimiento de la Población y Usos de Interés Nacional (DGA, 2006).**

Este estudio impulsado por la Dirección General de Aguas y desarrollado por la consultora AC Ingenieros Consultores Ltda., tuvo por objetivo identificar fuentes de recursos de aguas tanto superficiales como subterráneas, sobre las cuales pudiesen aplicarse denegaciones parciales a peticiones de derechos de aprovechamiento de agua, facultades presidenciales incorporadas a través de la ley N°20.017 que modifica al Código de Aguas de 1997. Esto con el fin de preservar tanto el abastecimiento de agua de la población, como el uso del recurso hídrico en circunstancias de interés nacional y excepcionales.

En cuanto a la potencial utilidad para la modelación hidrológica, este estudio menciona las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes en el contexto de posible afectación de su sector turístico y de protección ambiental ante potenciales otorgamientos de derechos no consuntivos en la zona. Es decir, entrega información general respecto a sectores de preservación en relación con este uso del recurso hídrico.

- **Protección y Manejo Sustentable de Humedales Integrados a la Cuenca Hidrográfica (CONAMA, 2006).**

Los humedales son considerados dentro de los ecosistemas más importantes del planeta. Esto debido a sus múltiples funciones ecosistémicas, tales como el ciclaje de nutrientes,



retención de sedimentos, control de inundaciones y, proveer de un hábitat para la vida silvestre. Por estas razones, es de gran importancia la conservación y cuidado de estos cuerpos ante actividades antrópicas. Una herramienta que facilita su manejo es el desarrollo de un sistema de clasificación para distintos ecotipos existentes. Dicha clasificación permite generar un orden de estos ecosistemas según la prioridad de conservación, lo cual da pie a eventuales planes de manejo.

El objetivo de este estudio fue elaborar una metodología para la conservación desde el punto de vista ecológico y social de humedales integrados a cuencas hidrográficas. Dicha metodología se compuso de varias partes, entre las que se destaca el levantamiento de información existente de humedales, la cuantificación y evaluación de posibles amenazas asociadas a estos cuerpos.

En particular, las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes cuenta con la presencia de humedales, denominados "ñadis", sobre los cuales se deposita la conocida "turba magallánica" o también como "campañas". En el presente estudio existe información respecto a la información ambiental utilizada para la definición de los ecotipos de la región de los Lagos, tales como pendiente, índice de aridez, permeabilidad, entre otras.

- **Determinación de Reservas de Aguas Superficiales de acuerdo a lo dispuesto en el artículo 147 Bis inciso 3 de la ley 20.017 de 2005 que modifica el Código de Aguas: Caudales de Reserva para abastecimiento de la Población y usos de interés Nacional (DGA, 2008).**

Este estudio impulsado por la Dirección General de Aguas (DGA) y realizado por la Consultora Aquaterra Ingenieros Ltda., tuvo por objetivo determinar la demanda de recursos hídricos para reserva de aguas superficiales a partir del abastecimiento de agua potable, riego y caudal ecológico. Con relación a usos del recurso para áreas silvestres protegidas y sitios prioritarios de conservación de la diversidad biológica, se definieron únicamente lineamientos metodológicos y, para el caso de uso turístico, solamente de metodologías de determinación. Es decir, no se cuantificaron los caudales asociados.

Para la modelación hidrológica, este estudio no posee información que pueda utilizarse como "input" o valores de entrada debido a que no se analiza la zona insular de la región de los Lagos y sus cuencas correspondientes. Sin embargo, la metodología propuesta relacionada con la determinación de la reserva de recurso hídrico asociado al turismo y preservación del medioambiente podría ser tomada en cuenta al momento de construir la modelación.

- **Determinación de Caudales Ecológicos en Cuencas con Fauna Íctica Nativa y en Estado de Conservación (DGA, 2009).**

Este estudio impulsado por la Dirección General de Aguas y elaborado por el Centro de Ecología Aplicada Ltda., tuvo como objetivo trabajar en la preservación de la fauna íctica



(perteneciente o relacionado con los peces) presente en ciertas cuencas, a través de la determinación de los caudales ecológicos asociados a los distintos escenarios de cada una de ellas. La obtención de dicho caudal se logra a partir de la aplicación de una metodología específica, la cual posee ciertas etapas, tales como la identificación y validación de las áreas de importancia ambiental (AIA), determinación de umbrales ambientales por cada AIA, entre otros.

Para el caso específico de modelación hidrológica de las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes, el estudio podría servir como referencia de metodología para la obtención de dicho caudal ecológico, debido a que el estudio no se estima dicho flujo en esta cuenca.

▪ **Análisis de Metodología y Determinación de Caudales de Reserva Turísticos (DGA, 2010).**

El turismo es de relevancia nacional debido a su importancia para nuestro país en términos generales de desarrollo. Es uno de los ejes estratégicos de progreso de Chile definido por la CORFO, lo que da cuenta de su importancia y de su alta demanda a nivel mundial. Por este motivo, un modelo que tenga características sustentables, capaz de integrar conceptos como paisaje y patrimonio, es de vital importancia para la preservación de todos los componentes de desarrollo del país.

La calidad de la integración de dichos conceptos o ejes estructurantes del turismo, entendidos desde la perspectiva cultural – ambiental, son esenciales para la determinación o establecimiento de caudales de reserva de interés nacional para fines turísticos. Generalmente, territorios que cuentan con cuencas hídricas importantes, atraen no solo actividades turísticas, sino que también de desarrollo económico, lo que provoca potenciales presiones desde el rubro inmobiliario, industrial, entre otros. Esto coloca al recurso hídrico frente a un riesgo de agotamiento, por contaminación o disminución de caudales, o también por la contaminación de los ejes estructurantes, tales como el paisaje. El estudio de dichas presiones más las potencialidades como recurso turístico de un curso de agua particular, permitirá determinar la vocación de la cuenca y como consecuencia aportar a la mantención de sus valores intrínsecos.

Este estudio impulsado por la Dirección General de Aguas y realizado por la consultora Aquaterra Ingenieros Ltda., tuvo como objetivo formular una metodología versátil y que lograra dar cuenta de la diversidad biológica, hidrográfica y sociocultural para la cuantificación de los caudales asociados al uso turístico, a fin de reservar los flujos de este tipo. Dicha metodología se validó a través de la aplicación a cuencas seleccionadas, dentro de las cuales no se encuentra la correspondiente a este estudio, por lo que la información que podría ser de eventual utilidad guarda relación con las características de la metodología aplicada.



▪ **Modelo hidroestratigráfico del Acuífero Periglacial del Pleistoceno-Holoceno de Chiloé, entre Dalcahue y Chonchi, Región de Los Lagos, Chile (SERNAGEOMIN, 2012).**

Este estudio realizado por la oficina técnica del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), en el marco del estudio "Geología para el Ordenamiento Territorial, Área Castro", consistió en la determinación de un modelo hidroestratigráfico consistente en diez unidades hidroestratigráficas (UH) definidas a partir de recopilación de información técnica asociada a pozos y el marco geológico de la zona en estudio, comprendida en los poblados de Dalcahue y Chonchi.

La determinación de cada UH presente en el sector y su correlación con los niveles estáticos registrados en los pozos del sector, permitió tener un esquema de la situación espacial, territorial y de condiciones piezométricas, además de poseer una noción de los parámetros hidrogeológicos de cada una de ellas, tales como su transmisividad. En relación con la modelación hidrológica, se destaca que la distribución espacial de las distintas UH y el rango de ciertos parámetros hidrogeológicas expuestos en este estudio podrían ser de utilidad para dicha etapa del proyecto.

▪ **Estimación Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (DGA, 2014a).**

Este estudio impulsado por la DGA y ejecutado por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) fue realizado con los objetivos de delimitar y definir los Sectores Hidrogeológicos De Aprovechamiento Común (SHAC) de las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. El objetivo de este estudio es determinar el potencial de explotación sustentable de cada uno de ellos, a partir de una estimación preliminar y genérica de la recarga de sus aguas subterráneas, junto a los derechos de extracción subterráneos aprobados a la fecha.

Para efectos de la modelación hidrológica, este estudio podría ser de utilidad para tener una noción aproximada de la magnitud de las reservas subterráneas presentes en los acuíferos de la isla grande de Chiloé, lo cual constituye una información valiosa al momento de tomar decisiones de gestión del recurso hídrico, tomando en cuenta la necesidad de actualizar la cantidad de derechos otorgado en la cuenca desde la fecha de publicación del estudio a la actualidad.

▪ **Análisis Crítico de la Red de Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas de la DGA (DGA, 2014b).**

La vulnerabilidad de los sistemas hidrográficos chilenos, en relación con las extracciones, cercanía de sus cuerpos a zonas costeras y libertad o semi confinamiento de algunos de



sus acuíferos, determinan la importancia de contar con datos sistemáticos que permitan evaluaciones precisas y detalladas del alcance de los problemas de contaminación de cada sistema, con el objetivo de lograr una correcta gestión de estos recursos hídricos. En este sentido, existe una red de monitoreo de calidad de aguas superficiales y subterráneas, controlada y ejecutada por el Laboratorio Ambiental, ente perteneciente al Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, cuyo propósito es el de caracterizar la calidad del recurso hídrico. Debido a que los impactos y presiones sobre el recurso son factores que cambian en forma y magnitud, tanto a nivel espacial como temporal, se vuelve necesaria la evaluación periódica y análisis crítico de la efectividad de esta red.

Este estudio impulsado por la DGA desde el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos y realizado por Infraestructura y Ecología S.A., tuvo como objetivos principales realizar un diagnóstico de la Red de Calidad de Aguas actual hasta la fecha, a partir de un análisis estadístico de las series de datos de monitoreo y características actuales del territorio nacional a nivel de cuencas hidrográficas y una propuesta de reformulación de dicha Red.

En cuanto al aporte de este estudio para la modelación hidrológica, se destaca que el trabajo contiene informes y mapas por cada una de las cuencas definidas por el Banco Nacional de Agua (BNA), dentro de las cuales se encuentra la de las islas de Chiloé y circundantes. De ellos se puede extraer información respecto a la ubicación y características de los puntos de monitoreo de la calidad del agua superficial, zonas de presión, captaciones de agua potable, entre otros. Dicha información podría ser útil para el proceso de modelación.

▪ **Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017a).**

Este estudio realizado de manera conjunta entre la Universidad de Chile y la Pontificia Universidad Católica de Chile, tuvo por objetivo actualizar al balance hídrico anterior del año 1983-1987. Esta vez incorporando nuevos registros y fuentes de información, ponderando la no estacionariedad del almacenamiento ante los cambios constantes en las condiciones climáticas.

La modelación hidrológica desarrollada en este estudio se aplica a 4 cuencas representativas (río Loa, Maipo, Imperial y Aysén), cuyos parámetros de entrada tales como las características de las cuencas y las forzantes meteorológicas, se determinan a partir de estudios anteriores, mediciones en terreno y procesos de regionalización estadística de información, obteniendo magnitudes medias mensuales de dichas forzantes (precipitación y temperaturas extremas). Lo último podría ser de utilidad para el desarrollo de la modelación hidrológica correspondiente a este plan, a modo de tener una noción básica y general de la evolución del contexto climático en la cuenca de Chiloé.

▪ **Estimación de la Demanda Actual, Proyecciones Futuras y Caracterización de la Calidad de los Recursos Hídricos en Chile (DGA, 2017b).**

El estudio realizado por la unión temporal de proveedores Hídrica Consultores SPA y Aquaterra Ingenieros LTDA publicado en el año 2017 a solicitud de la Dirección General de Aguas (DGA), tuvo como objetivo principal realizar una estimación de la demanda de agua actual y proyectada para décadas futuras (2030 y 2040) en términos de sus distintos usos (agua potable, agrícola, minero, industrial, hidroeléctrico, forestal, turístico y acuícola) y caracterizar la calidad de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos a nivel de cuencas y subcuencas a lo largo de todo el país. En este sentido, el trabajo realizado buscó actualizar tanto el último estudio de demandas (2007) como el de calidad de aguas disponible en el Banco Nacional de Aguas (BNA), incorporando a la red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA, otras fuentes de información, tales como APR, líneas base SEIA, monitoreos SEIA, entre otros.

El trabajo logró realizar proyecciones de demanda con una cantidad importante de información en un gran número de tipos de uso (agua potable urbana y rural, agrícola, minero, entre otros), además de presentar mejoras metodológicas en desmedro de estudios anteriores (particularmente con el Atlas DGA 2016), brindando mayor robustez y representatividad a sus resultados.

En cuanto a la utilidad del estudio para la modelación hidrológica, se destaca que este posee información actual y proyectada confiable respecto a la demanda de agua en las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes asociada a sus diversos usos, lo cual podría ser de gran importancia al momento de estimar el margen existente entre la oferta del recurso hídrico y la cantidad de agua que se necesita para abastecer cada uno de los distintos usos de esta. En relación con la calidad de aguas, el estudio no contempla un análisis en esta cuenca.

▪ **Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Austral (DGA, 2019a).**

El objetivo de este estudio fue aplicar la metodología de la Actualización del Balance Hídrico (DGA, 2017a) a las cuencas entre la región del Biobío y parte norte de la región de Aysén.

Este estudio utilizó la metodología corregida en la actualización del balance hídrico para macrozonas norte y centro (DGA, 2018), que incluyó automatizar la calibración de parámetros, incorporar métodos de transferencia de parámetros para píxeles en cuencas muy intervenidas y considerar el aporte glaciario a la estimación de caudales. Además, en esta etapa se añadieron nuevas correcciones a las ya nombradas y se actualizó el producto CR2MET de precipitaciones. Por otro lado, se obtuvieron forzantes asociadas a cuatro GCM en el escenario RCP 8.5, entre los años 2030 y 2060. Estos últimos resultados, junto con los flujos hidrológicos emanados de la aplicación de la modelación, podrían ser de utilidad para el presente plan, en términos de entregar una noción general de las magnitudes de



los distintos flujos de agua que se producen en la cuenca, así como también servir como fuente de información respecto a otros parámetros, tales como delimitación de cuencas y conductividades hidráulicas, entre otros.

- **Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Escenarios de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos (DGA, 2019b).**

El estudio realizado de manera conjunta entre DICTUC S.A. y SEI, se desarrolló en el contexto de la iniciativa del Plan Nacional de Recursos Hídricos, cuyo objetivo es elaborar e implementar un instrumento estratégico de planificación de carácter indicativo que oriente las políticas nacionales, planes y programas relacionados directa o indirectamente con el agua en una visión conjunta de los recursos hídricos en el corto, mediano y largo plazo. Fue realizado, para funcionar de manera complementaria con los planes estratégicos que se desarrollarán para cada una de las cuencas hidrográficas de los ríos de Chile, entre los que se encuentran las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes.

El objetivo principal del estudio fue generar, a partir del modelo desarrollado en él, insumos claves para el desarrollo de la modelación de estos planes, debido a que deben pasar por un proceso de ajustes y recalibración. Para el caso particular de las cuencas de la isla de Chiloé y circundantes, sirve como referencia, dado que no se modela esta cuenca en el trabajo.

- **Estimación de la Recarga de Aguas Subterráneas y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común en las Islas de la Región de Los Lagos (DGA, 2020b).**

Este estudio realizado impulsado por la DGA y realizado por el DARH, tuvo por objetivo ampliar la estimación de la recarga de aguas subterráneas y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común ejecutada en la isla grande de Chiloé hacia el resto de las islas presentes en la región de Los Lagos, entre las cuales se encuentran las islas circundantes de la cuenca de este estudio. El estudio aplicó la misma metodología que en el trabajo SDT N°359, con la diferencia de que en este caso no se incluyen los derechos subterráneos otorgados a la fecha.

Al igual que para el caso anterior, este estudio posee la potencial utilidad de servir como referencia respecto a las magnitudes de la recarga de aguas subterráneas en las islas circundantes de la cuenca, en particular donde existan derechos de extracción vigentes y en trámite.



3 MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CUENCA

El modelo conceptual de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes se realiza caracterizando superficial y subterráneamente la zona de estudio. De esta manera, se incluye la identificación de las distintas componentes y demandas de agua principales, se describen las particularidades de las entradas y salidas de agua, en otros aspectos de relevancia.

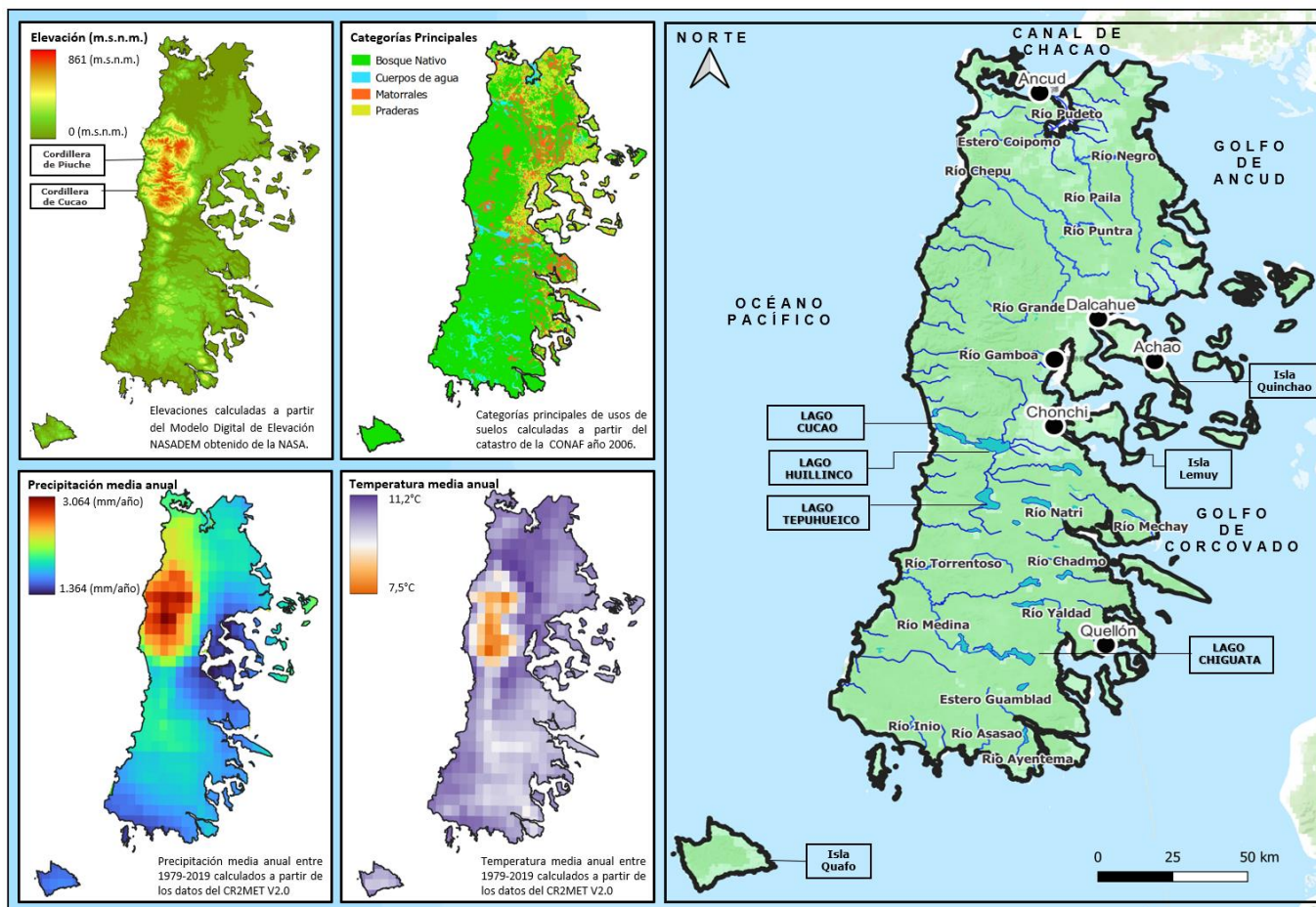
3.1 Modelo Hidrológico Conceptual Superficial

En la Figura 3-1 se puede visualizar una interpretación del modelo conceptual superficial de la cuenca. A modo general, las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes cuenta con cursos de agua superficial que drenan parte importante del terreno de la isla grande del archipiélago, y en menor medida en las islas circundantes. Respecto a su sistema de origen pueden dividirse en ríos de origen cordillerano, con afluente mixto o sólo proveniente de los suelos. Su drenaje puede ser hacia el océano Pacífico principalmente por el oeste de la cuenca y hacia el canal de Chacao, golfo de Ancud y golfo de Corcovado por el este.

De forma más detallada, en el sector oeste de la cuenca, el norte se caracteriza por un relieve montañoso formado por la cordillera de Piuchue y la cordillera de Cucao. El cauce principal de este sector corresponde al río Chepu, el cual nace en la confluencia de los ríos Putra, río Grande y río Butalcura. Mientras que el sector sur, se caracteriza por un relieve de cerros aislados, compuesto por pequeñas lagunas como los lagos Cucao, Huillinco y Tepuhueico, además de una menor presencia de ríos en comparación a la zona anteriormente descrita, entre los que resaltan el río Torrentoso y Medina.

En el sector este de la cuenca el norte se caracteriza por drenar hacia el canal de Chacao y el golfo de Ancud principalmente. Hacia el canal de Chacao drena fundamentalmente la cuenca del río Pudeto, nutrido por diversos cauces entre los cuales destacan por su magnitud el estero de Coipomo, el río Negro y río Paila. Estos cauces nacen en el cordón de cerros formado por los Altos de Tantauco y de Pindapulli. Respecto al drenaje hacia el Golfo de Ancud, existen pequeños cursos que nacen de pequeños lomajes o cerros menores. Entre los cuerpos apreciables se encuentra el río Colu, el cual emana del lago Popetan. Mientras que el sector sur cuenca se caracteriza por drenar hacia el golfo de corcovado y presenta cursos pequeños, dentro de los cuales destaca los ríos Gamboa, Natri, Chadmo y Yaldad en el sector centro y hacia la zona más austral del golfo resaltan los ríos Inio, Asasao y Ayentema.

Además de la isla grande de Chiloé, existen diversas islas que la circundan, las cuales se concentran principalmente en el golfo de Corcovado. Entre ellas destaca las islas al este de Quemchi, la isla Quinchao, la isla Lemuy y la isla Guafo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-1: Modelo conceptual superficial cuencas de las islas de Chiloé y circundantes

3.2 Modelo Hidrológico Conceptual Subterráneo

El **modelo hidrológico conceptual subterráneo** de una cuenca se elabora considerando e interpretando un paquete de información que permita comprender el funcionamiento hidrogeológico del sector en estudio. Se cuenta con antecedentes de mediciones gravimétricas, lo que ha proporcionado tener un acercamiento a la forma que tiene la geometría del basamento en la isla grande de Chiloé. La información que reportan algunos expedientes subterráneos confirma la profundidad del lecho rocoso que reporta la gravimetría en esos puntos. Estas mediciones gravimétricas se han complementado con las campañas geofísicas (gravimetría y TEM) realizadas como parte del presente plan.

La modelación hidrogeológica conceptual permite visualizar las distintas capas subterráneas obtenidas que son representativas de los recursos hídricos. La definición de las geoelectricas, dadas a partir de la interpretación de los perfiles geofísicos TEM con apoyo de la gravimetría que señala el basamento, permite especificar las unidades hidrogeológicas que la caracterizan. Toda esta información en conjunto con lo que ofrecen mapas bases de geomorfología y geología, y los generados de profundidad de basamento, permeabilidad, cota de nivel estático y condiciones de borde, favorecen la comprensión del funcionamiento hidrogeológico del objeto en estudio.

La zona modelada está ubicada en las coordenadas UTM que se extienden por el norte (512204 E; 5375987 N) y (660718 E; 5375087 N) y por el sur (512204 E; 5162966 N) y (661319 E; 5162966 N). referidas con datum WGS 84 y huso18S. La zona acuífera de las cuencas se distribuye con mayor extensión en el sector oriente, y siguiendo los cauces angostos que nacen en la cordillera de la costa. Se ha identificado distintas unidades en superficie asociadas a depósitos morrénicos, fluvio-glaciales y glacialacustres generados durante las glaciaciones Llanquihue, Santa María y río Llico de edad reciente. También existen depósitos jóvenes tipo litoral, aluvial, coluvial y de remoción en masa. Se suman secuencias sedimentarias litorales-fluviales y masivas-transgresivas-plataformales con una formación previa, característicos de una mayor consolidación (Anexo H-1: epígrafe 2).

Las profundidades del basamento varían entre 0 y superan puntualmente los 1000 [m] al noreste del área de estudio, visualizándose 5 sectores con una profundidad importante con promedios mayores a los 420 [m]. Esto se ve reflejado en la Figura 3-13 y Figura 3-14.

Las permeabilidades que se han identificado se encuentran en el rango entre 0 y 50 [m/día]. Los sectores más conductivos se registran puntualmente al oriente de la isla grande, como se destaca en la Figura 3-16 y Figura 3-17. Las cotas de los niveles estáticos son más superficiales hacia la costa, niveles que se elevan hacia la cordillera de la costa, con intervalos entre 0 y 300 [msnm] como se indica en la Figura 3-20. El flujo subterráneo tiene dirección preferente desde la cordillera hacia todo el borde costero en su condición de isla.



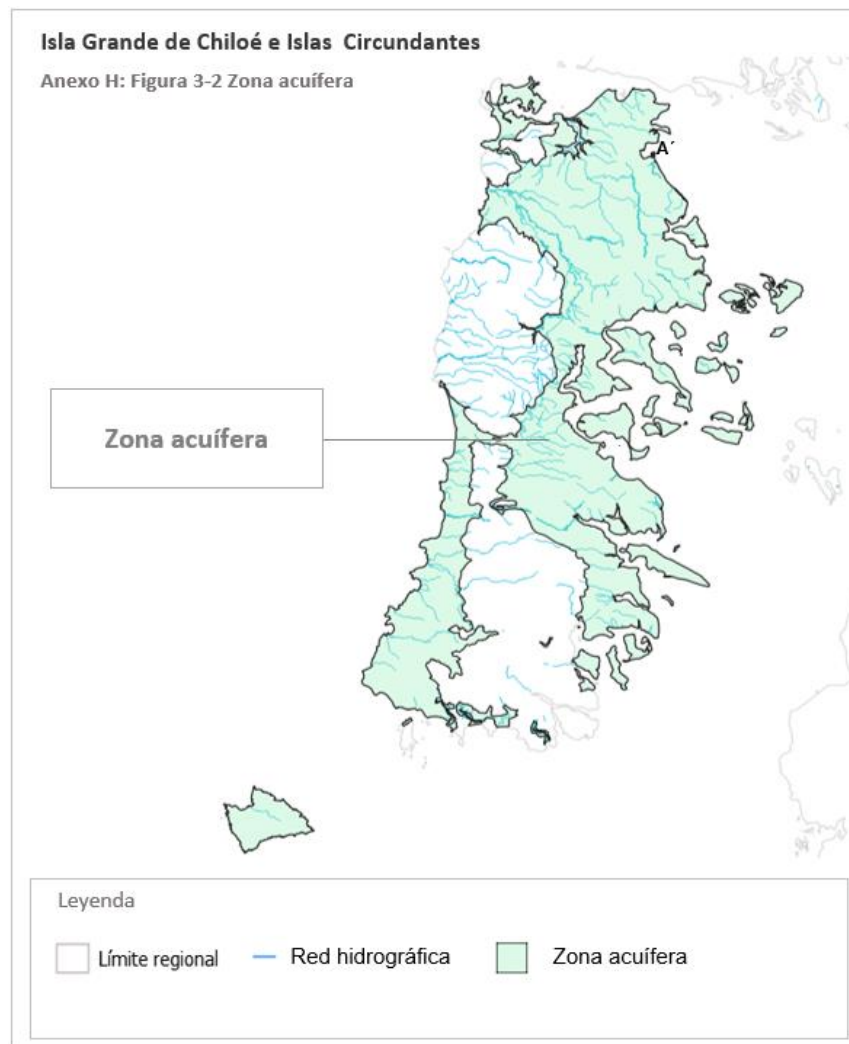
De acuerdo con la geología definida por Sernageomin en las cartas geológicas 1:1.000.000 (2003) y representada en el Anexo H-1 (epígrafe 2), existen formaciones sedimentarias que se extienden al lado este de la isla, incluyendo a las islas circundantes, con depósitos no consolidados del Pleistoceno-Holoceno y de distintas características e interés hidrogeológico. Al norte y noroeste se identifican en superficie secuencias volcánicas que datan del Oligoceno- Mioceno. En el sector poniente prevalecen las rocas metamórficas del Paleozoico-Triásico que representan a la cordillera de la costa como un cordón alargado desde el río Chepu hasta el sur, definidas como las rocas más antiguas de la zona, las que a su vez fueron intruidas de forma puntual por rocas ígneas que datan del Eoceno (granodioríticas, tonalitas, dioritas cuarcíferas). Además, afloran en distintos sectores sedimentos cenozoicos litorales-fluviales y marinos más consolidados.

Las fallas geológicas que se representan están vinculadas a los esfuerzos tectónicos a los que ha estado sometido el cordón montañoso (cordillera de la costa).

A continuación, se realiza la descripción de las campañas geofísicas realizadas, así como el procesamiento que ha permitido generar el modelo conceptual subterráneo de las cuencas en estudio, y las distintas capas que lo componen.

3.2.1 Capa límite de relleno sedimentario

La construcción del modelo subterráneo, parte de la generación de la capa que identifica el límite entre el relleno sedimentario y donde aflora el basamento, denominada como capa límite de relleno sedimentario o zona acuífera (Figura 3-2). Este sector comprende las zonas más perspectivas para almacenar el reservorio subterráneo, con propiedades de importancia como la permeabilidad y resistividad, que permiten caracterizar a los sectores acuíferos existentes.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-2 Zona acuífera en las cuencas de islas Chiloé y circundantes.

3.2.2 Campañas geofísicas

Las campañas geofísicas se han desarrollado con la finalidad de caracterizar la zona acuífera definida. Se ha llevado a cabo un levantamiento de información en terreno que comprende campañas geofísicas de gravimetría y prospección TEM, y una campaña hidroquímica en base a muestras de aguas subterráneas tomadas en pozos profundos de la zona. El objetivo de estas es poder conocer de manera suficiente las características y funcionamiento del acuífero de la zona, determinar la geometría de los embalses subterráneos, su composición, y constantes elásticas de las unidades hidrogeológicas, además de la presencia de agua y el nivel estático de estas. De esta manera, se contribuye a la caracterización hidrogeológica del área estudiada.

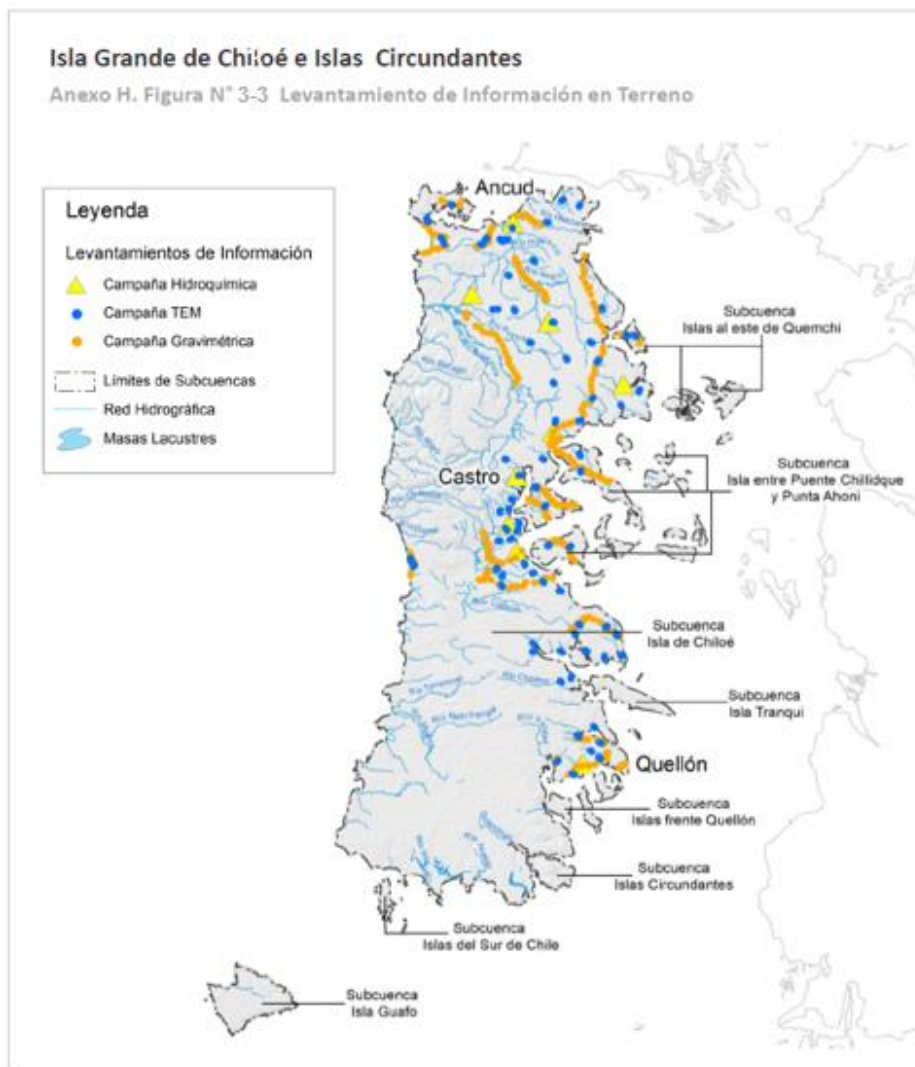
En las islas Chiloé y circundantes se han desarrollado las tres campañas de terreno descritas por bases (geofísicas de gravimetría y prospección TEM e hidroquímica). El objetivo puntual de cada campaña se describe a continuación:

La **campaña gravimétrica** consiste en medir la gravedad en distintos puntos de la superficie del terreno, en este levantamiento se determina la variación de gravedad (positiva o negativa) en distintas estaciones con respecto a una estación de referencia. Con esta metodología es posible estimar la profundidad del basamento y definir la geometría de los límites subterráneos del acuífero en la zona estudiada. En la Figura 3-3 se observan las 300 estaciones contempladas en la campaña gravimétrica.

En el caso de este plan estratégico, las mediciones gravimétricas realizadas en terreno complementan las mediciones anteriores realizadas en el estudio (CNR, 2019), con un alcance y distribución que incluyen a 3 islas de menor extensión. Como resultado de las mediciones realizadas en terreno se han generado 27 perfiles, el resultado de cada uno de estos perfiles se registra en detalle en la carpeta Documentos de apoyo del apéndice H-1 (Gravimetría).

La **campaña de prospección TEM o método de Transiente Electromagnético** consiste en la emisión de un pulso de corriente de frecuencia variable a través del subsuelo, en diferentes estaciones TEM. Este pulso genera un campo electromagnético primario que, si se encuentra con un cuerpo conductor, genera un campo electromagnético secundario. Una unidad receptora detecta ambos campos, y con la geometría de los circuitos emisores y receptores, y el procesamiento de datos, se obtiene un modelo de capas con valores de resistividad eléctrica en profundidad. Con esto, se determinan aproximaciones de la geometría, la estratigrafía, la presencia de agua en el acuífero y a qué profundidad aproximada se encuentra el nivel estático de las aguas. En la Figura 3-3 se observan la ubicación de los 152 puntos TEM, considerando la morfología, geología, hidrogeología y las vías de acceso en el territorio ha sido posible ubicar estos 152 puntos distribuido en 73 perfiles TEM a lo largo de la cuenca. Para más detalle de la campaña, ver la carpeta de Documentos de apoyo del apéndice H-1 (TEM).

Como parte de la caracterización hidrogeológica, se ha realizado una **campaña de catastro y muestreo hidroquímico** de las aguas subterráneas en 9 pozos de la zona de estudio (1 con muestra repetida). A través de este análisis se busca conocer su **calidad** según las normas NCh 409 y 1333.



Fuente: Elaboración propia

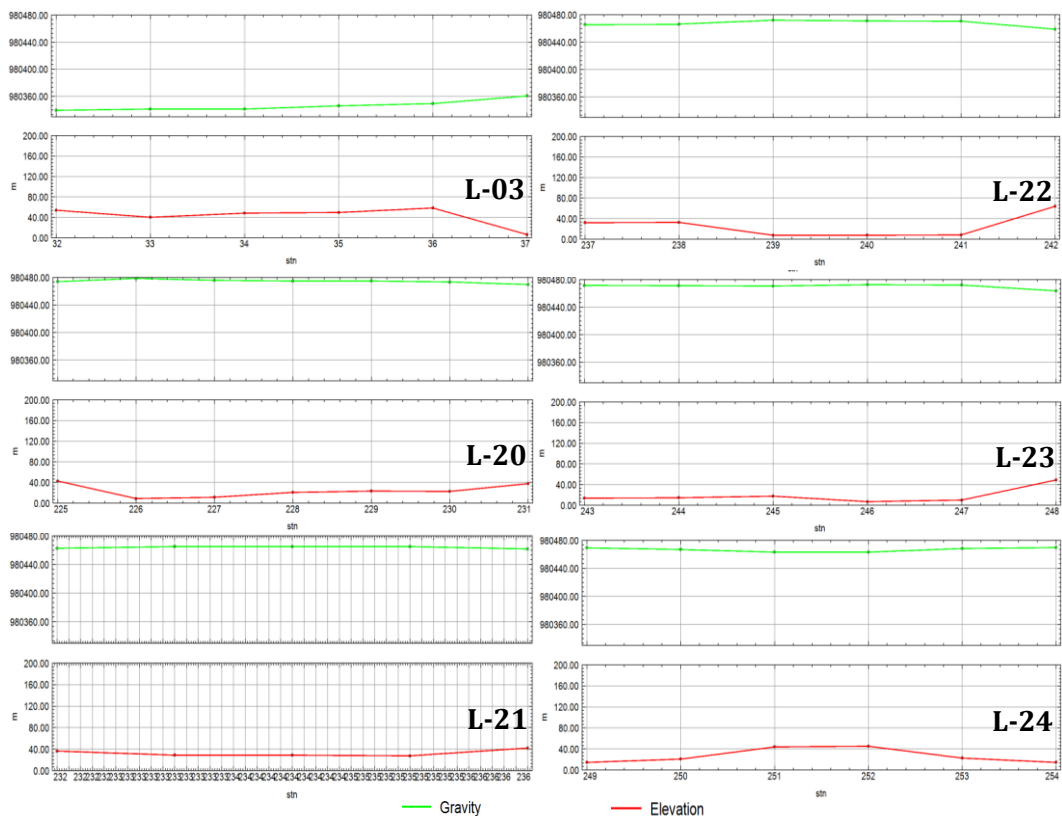
Figura 3-3 Ubicación de campañas geofísicas e hidroquímica.

En la Figura 3-3 se muestra la ubicación de estas muestras. Para más detalle de la campaña ver carpeta Documentos de apoyo del apéndice H-1 (Hidroquímica). Cabe destacar que en esta carpeta (Documentos de apoyo) se incluyen las mediciones obtenidas en las campañas

descritas (carpetas Gravimetría, TEM e Hidroquímica), mientras que en la carpeta “Minutas de etapa de diseño de campañas”, se incluyen a detalle los diseños de las distintas campañas; respecto a esto, se destaca que lo llevado a cabo finalmente en las campañas, puede distar ligeramente a lo diseñado producto de modificaciones propias durante las campañas en terreno.

3.2.2.1 Interpretación campaña gravimétrica

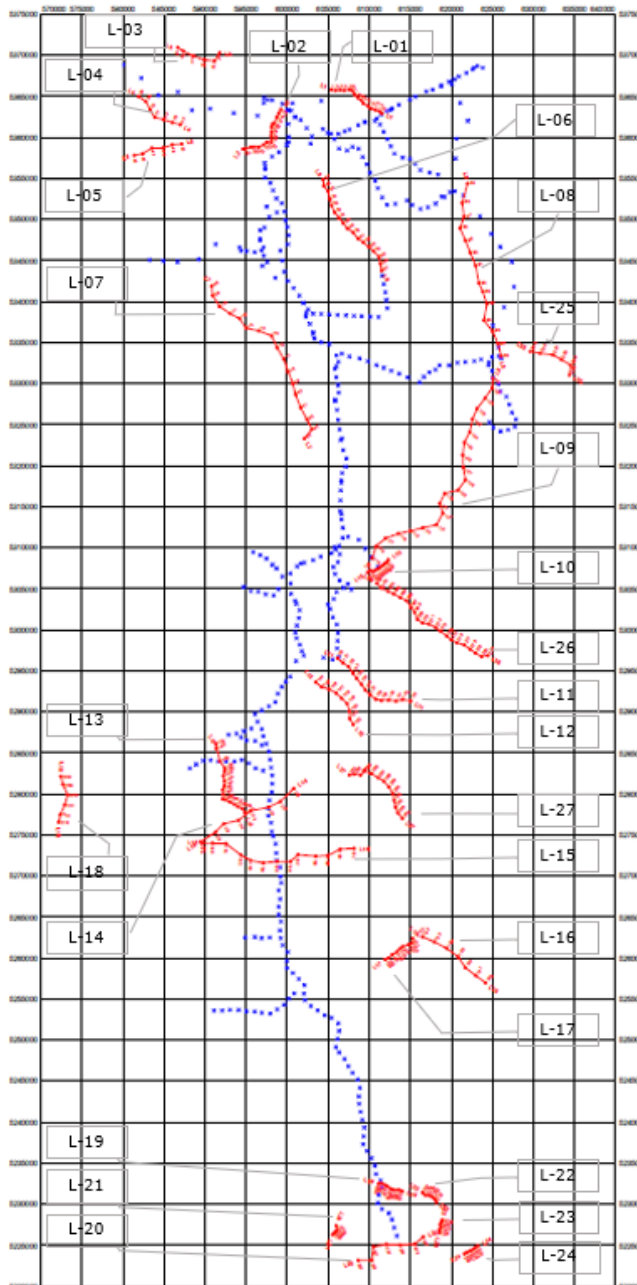
Como resultado de las mediciones realizadas en terreno, se puede observar que los menores valores de gravedad se registran al norte de la isla, destaca específicamente en el **sector de Guabún**, y están asociados al perfil L-03 con elevaciones que no superan los 60 [msnm]. Sin embargo, los valores de gravedad se incrementan hacia la costa en el sector de la comuna de Castro, y al sur de la isla con mayor notoriedad. La gravedad más elevada se identifica en las estaciones gravimétricas de los perfiles 20 al 24, concentrados en la comuna de Quellón (Ilustración 3-1).



Fuente: Colaboración de Geodatos.

Ilustración 3-1 Perfiles de gravedad & elevación en algunos sectores de Chiloé.

Los perfiles de gravedad restantes (Ilustración 3-2) se incluyen en el Anexo H-1 (epígrafe 2.2.3), y forman parte de los "Apéndices" del presente anexo.



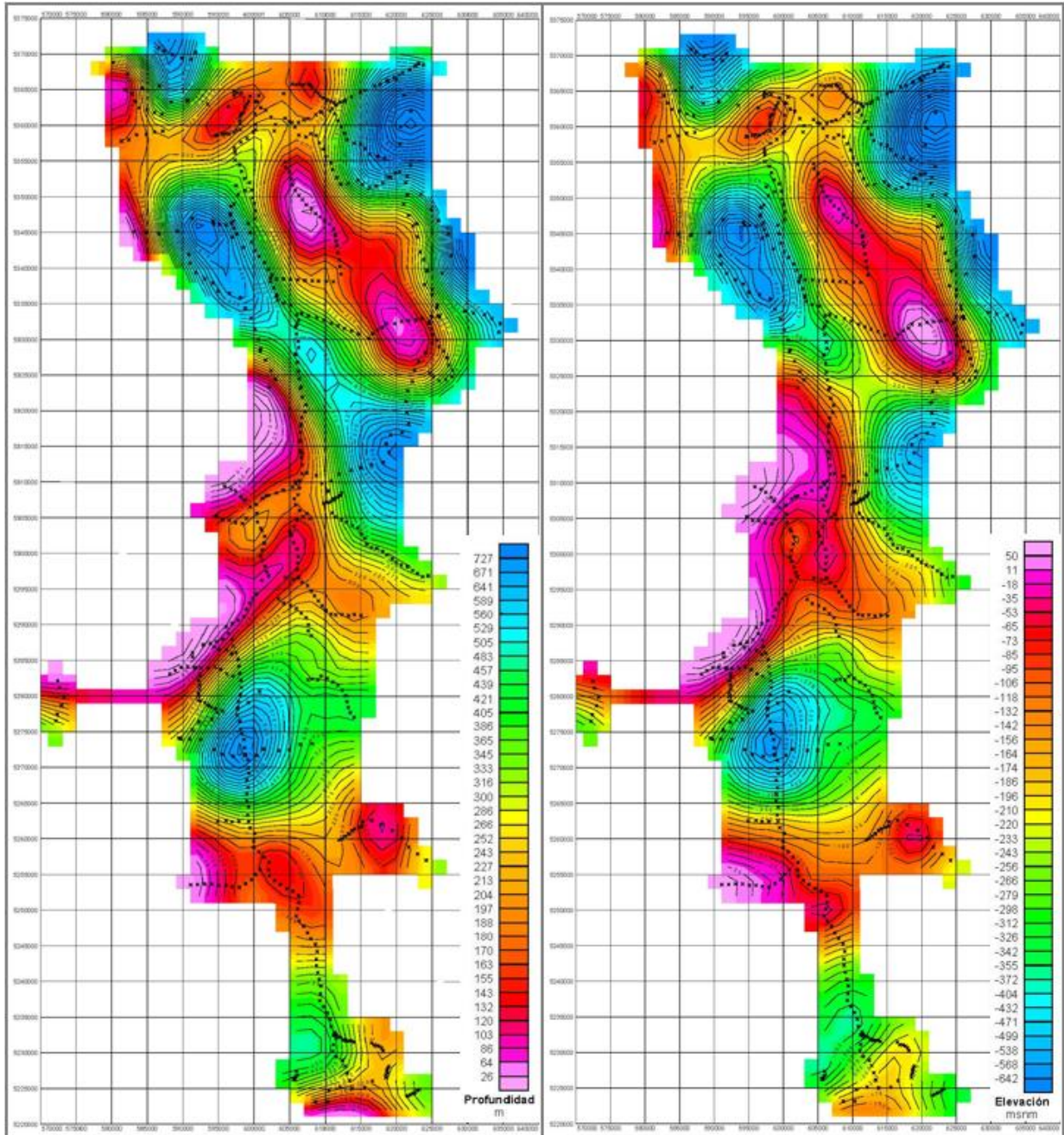
Fuente: Colaboración de Geodatos.

Ilustración 3-2 Perfiles con datos gravimétricos 2022 (rojo) y 2018 (azul).



Las distintas correcciones que requieren las mediciones gravimétricas han permitido visualizar las zonas de mayor profundidad y elevación de basamento (Ilustración 3-3). Las mediciones gravimétricas realizadas para este plan en conjunto con las resultantes de un estudio anterior (CNR, 2019), han permitido generar mapas de profundidad de basamento [m] y elevación del basamento [msnm]. Dentro de los resultados se destacan las mayores profundidades y elevación de basamento en distintos sectores del área estudiada con profundidades que superan los 700 [m]. De esta manera, pueden visualizarse elevadas profundidades en la mitad norte de la cuenca hacia el sector oriente desde Chacao (puntos con más de 900 [m] de profundidad) hasta parte de Quemchi. También, destacan importantes profundidades al norte-poniente del área de estudio (este de Guabún y Quetalmahue), hacia el sector de Puntra (al norte de la cordillera de la costa) de forma alargada hacia Dalcahue (inclinación noroeste-noreste), así como, en la zona central al sur de Chonchi. Las profundidades del basamento se asocian con sus elevaciones en ambos mapas temáticos donde han sido representados.

Si bien los resultados son bastante representativos para el presente estudio debido a que se consideran las mediciones gravimétricas preexistentes (CNR, 2019), estas han de ser complementadas considerando en detalle la información de expedientes de pozos que contengan estratigrafía e indiquen una perforación hasta la roca, así como los resultados de los estudios con el método geofísico de prospección transiente electromagnético (TEM). Toda esta información permite la generación de una capa de puntos que caracterice de forma más detallada los sectores que no contaron con mediciones geofísicas para definir la geometría del acuífero. Dicho ítem se aborda en detalle posteriormente (3.2.5).



Fuente: Colaboración de Geodatos.

Ilustración 3-3 Mapas de Profundidad [m] y Elevación [msnm] de basamento en Chiloé.

3.2.2.2 Interpretación campaña TEM

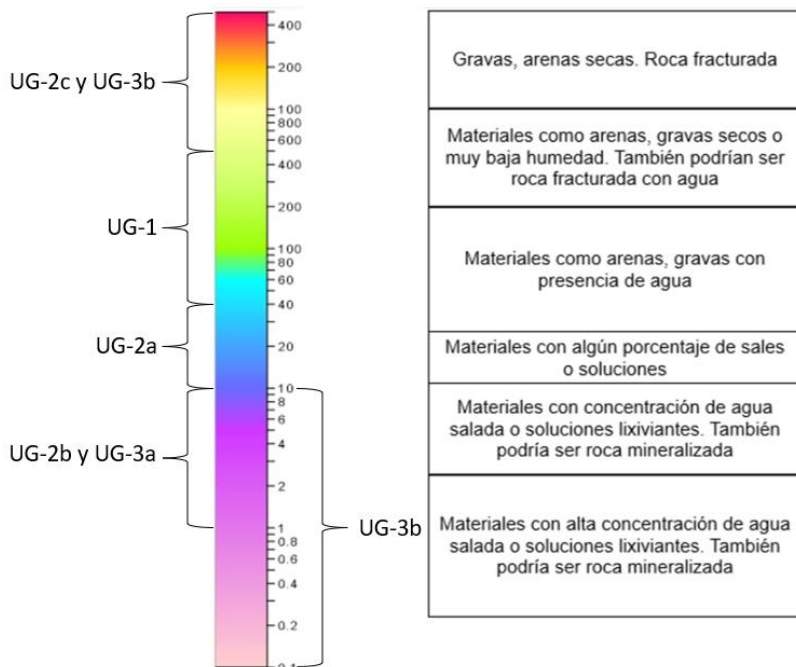
El procesamiento de las mediciones ha permitido realizar la interpretación de las litologías que caracterizan al subsuelo medido con este método geofísico, definiéndose unidades geoelectricas asociadas a unidades hidrogeológicas (ver Documentos de apoyo, carpetas "TEM" y "Archivos complementarios" del Apéndice H-1). A partir de esta interpretación basada en una escala de resistividades (Ilustración 3-4), se puede identificar con los rangos de resistividades las unidades hidrogeológicas y su geometría. De esta forma, se puede identificar cuáles son las capas que podrían indicar saturación y permeabilidad (5 a 500 [ohm/m]) tomando como base la tabla de resistividades de literatura (Arias, 2012) y, por tanto, zona acuífera.

De esta manera, se logra identificar el espesor aproximado de la capa acuífera y la profundidad del nivel estático, lo cual permite crear una data que genera por capas la permeabilidad promedio mediante la identificación de la profundidad del nivel estático. Esta información permite generar las capas de **permeabilidad, cota del nivel estático** y los **coeficientes de almacenamiento e infiltración**, las que son parte de las interpretaciones requeridas para desarrollar el **modelo conceptual subterráneo**.

Los perfiles se representan en el Apéndice H-1 (Documentos de apoyo carpeta "TEM", Perfiles TEM_resistividad_Chiloé.ppt). Su interpretación en conjunto con el apoyo de las mediciones gravimétricas ha permitido visualizar la geometría del basamento de la cuenca, la morfología y composición del acuífero, y la existencia de recursos hídricos subterráneos. Así, se han definido 6 unidades geoelectricas de acuerdo con sus propiedades físicas (Ilustración 3-4). La interpretación por perfil se desglosa en el documento "Interpretación TEM_UnidadesHG.pdf" en el Apéndice Anexo H: H-1, carpeta Archivos complementarios.

En el área de estudio se han clasificado distintas unidades geoelectricas dadas sus resistividades y permeabilidades asociadas a los tipos de materiales, como se describe a continuación:

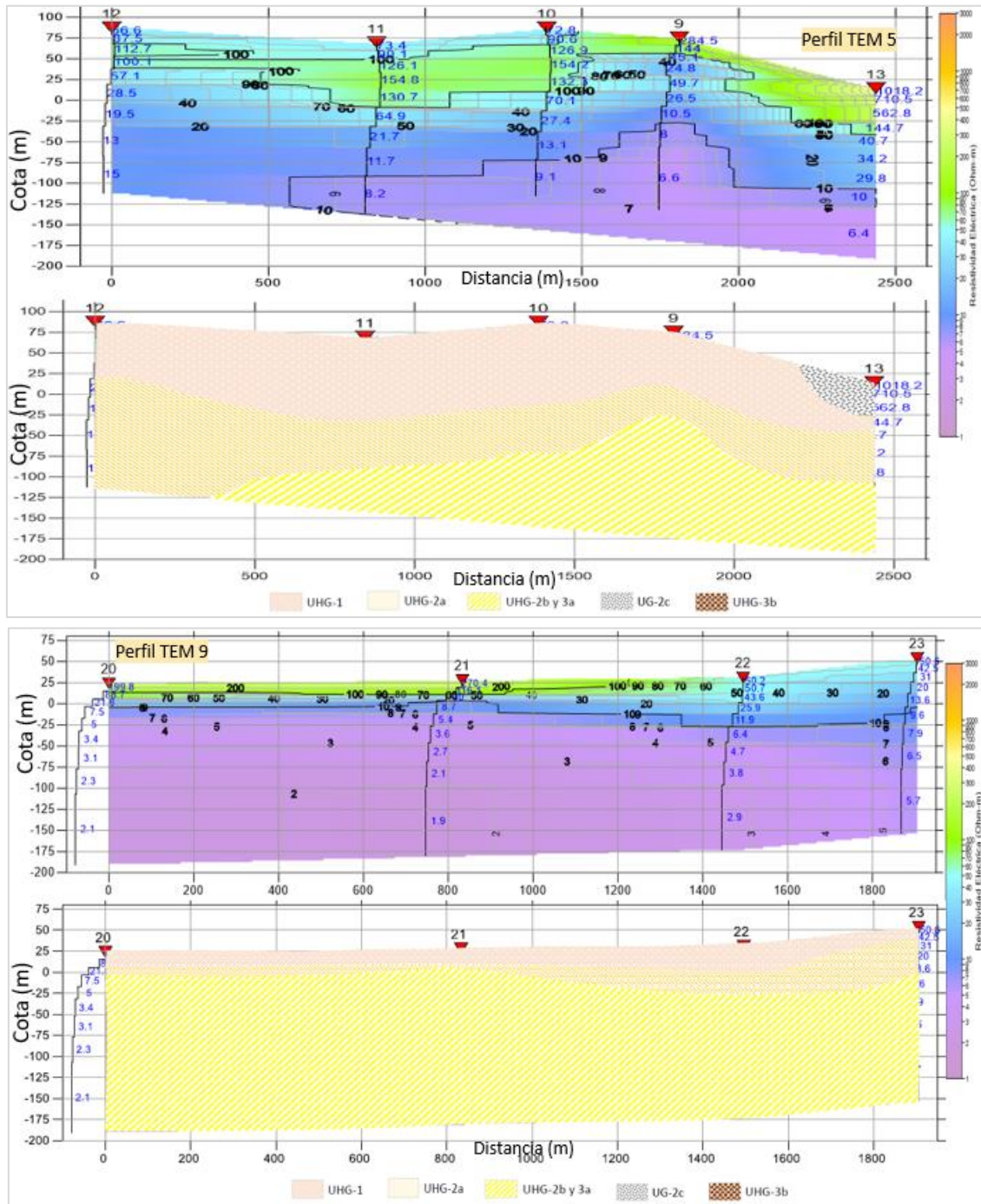
- **UG-1:** sedimentos no consolidados con permeabilidades entre 0,001-0,3 [cm/s], resistividades que fluctúan entre los 40 y 500 [ohm-m]
- **UG-2a:** sedimentos consolidados con permeabilidades entre 0,000001-0,001 [cm/s], resistividades que fluctúan entre los 10 y 40 [ohm-m]
- **UG-2b** y **UG-3a:** materiales de alta salinidad (UHG-2b) y arcillas (UHG-3a), baja a nula permeabilidad (0,0000000001-0,000001 [cm/s]), muy baja resistividad (1-10 [ohm-m])
- **UG 2c:** materiales de alta resistividad asociadas a gravas no saturadas y estratos ferrosos. Estos aparecen en capas superficiales y subsuperficiales e indican altas resistividades (>500 [ohm-m]).
- **UG-3b:** rocas del basamento, muy baja a nula permeabilidad, y las resistividades pueden variar, siendo muy bajas (<10 [ohm-m]) o muy altas (>500 [ohm-m]).



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-4 Escala de resistividad para interpretar perfiles de prospección TEM y rangos de cada Unidad Geoeléctrica.

Se han seleccionado algunas secciones de las estaciones TEM medidas para su interpretación en el marco de este informe. De esta forma, la sección del perfil TEM 5 representa a las formaciones litológicas existentes en el subsuelo del sector Pupelde (Ilustración 3-5). El punto TEM 13 fue medido con mayor cercanía a la costa y denota mayor resistividad en la capa superior de alrededor de 42,5 [m] de espesor (Apéndice H-1, Documentos de apoyo carpeta "TEM": Resistividad y espesor medidas_stationTEM.xlsx, y carpeta "Archivos complementarios"), esto puede estar asociado a un estrato ferroso que esté influyendo en la lectura del TEM, o gravas no saturadas que reflejan esta elevada resistividad, como se explica en literatura (Arias D., 2012). Debajo de esta aparece una capa permeable que va disminuyendo su resistividad a medida que aumenta la profundidad. Esta capa permeable se levanta y distingue superficialmente en el resto de los puntos medidos del perfil, puntos ubicados al oeste de este sector en la isla.

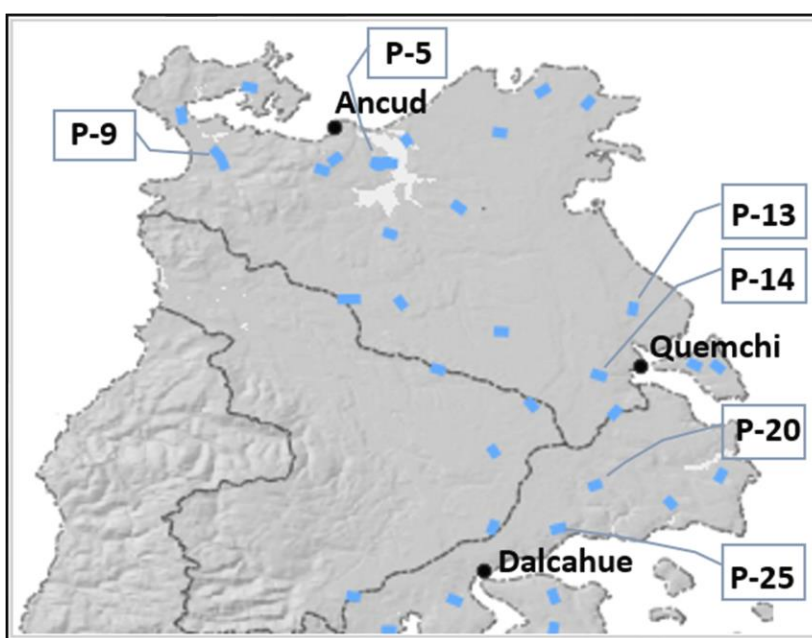


Fuente: Elaborado por Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-5 Resistividad interpolada & profundidad en comuna Ancud.

Las capas inferiores se asocian a litologías características de bajas resistividades con alta mineralización o contenido de sales. Se considera la hipótesis que este grado de salinización en las capas profundas puede estar asociado al período de formación geológica de la isla, lo que se visualiza en todos los perfiles TEM medidos durante la campaña de terreno.

En la Ilustración 3-6 se muestra la ubicación en planta de los perfiles 5, 9, 13, 14, 20 y 25 ubicados en la mitad norte de la isla grande.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-6 Ubicación en planta de secciones TEM analizadas en zona norte.

El perfil TEM 9 está ubicado en el sector Traiguén al noroeste de la isla grande (Ilustración 3-5). Presenta una capa de mayor permeabilidad en 2 de los puntos medidos al norte de la sección (20 y 21). Las resistividades revelan una disminución en las capas ubicadas en los puntos TEM 22 y 23 desde la superficie. En general, la capa permeable medida en punto TEM 20 presenta poco espesor (41 [m] aproximadamente), la que se incrementa hacia el punto TEM 23 (próximo a los 208 [m]).

En la zona de Quemchi se realizaron mediciones en distintos puntos. Próximo a la zona costera se distingue un aumento de la resistividad en superficie, se considera pueden ser gravas no saturadas (punto TEM 31). Sin embargo, hacia el interior de la isla (punto 30) se denota una capa menos resistiva y más permeable, la cual subyace a la capa superior

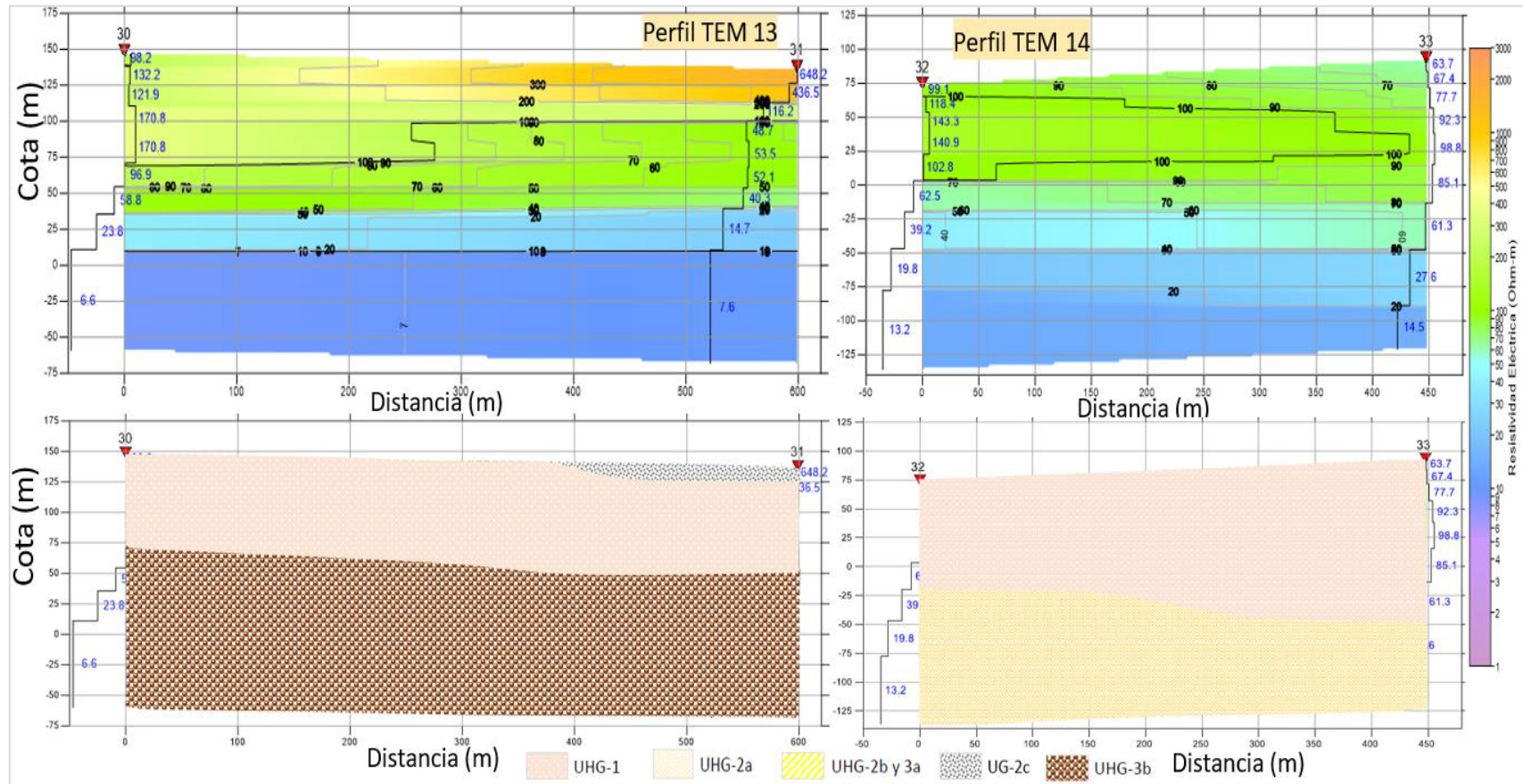


que se observa al este de la sección 13. Al norte del perfil 13 se realizaron las mediciones de los puntos 32y 33 (Perfil 14).

En estos puntos las resistividades son relativamente homogéneas en la sección, que indican zona permeable en el sector medido (Ilustración 3-7).

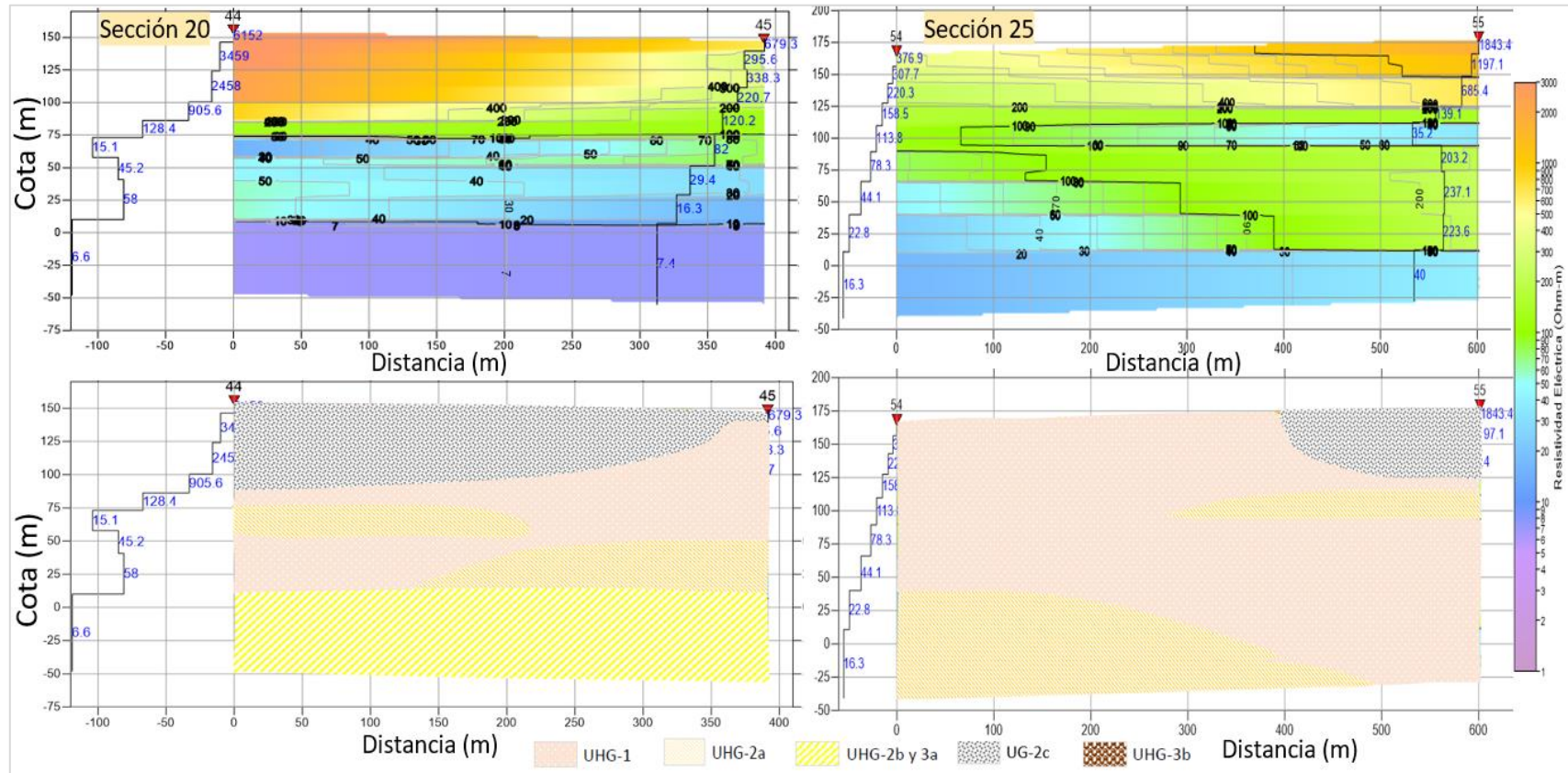
En la comuna de Dalcahue se ubican varias secciones, tales como los perfiles TEM 20 y 25, donde se destacan litologías más resistivas en superficie (Ilustración 3-8). En el perfil 20 se visualiza el espesor más resistivo (aproximadamente 70 [m]) a mayor cota, resistividad que disminuye en profundidad y hacia el este de la sección.

En la sección 25 se destacan capas de elevadas resistividades hacia el punto 55 de unos 50 [m] de espesor. Sin embargo, estas resistividades van disminuyendo a medida que aumenta la profundidad, definiéndose capas permeables. Las capas medidas de resistividad en el punto 54 permiten identificar espesores con distintos grados de permeabilidad. Las altas resistividades pueden estar asociadas a gravas no saturadas o estratos ferrosos que alteran la medición TEM de este tipo de material (Ilustración 3-8).



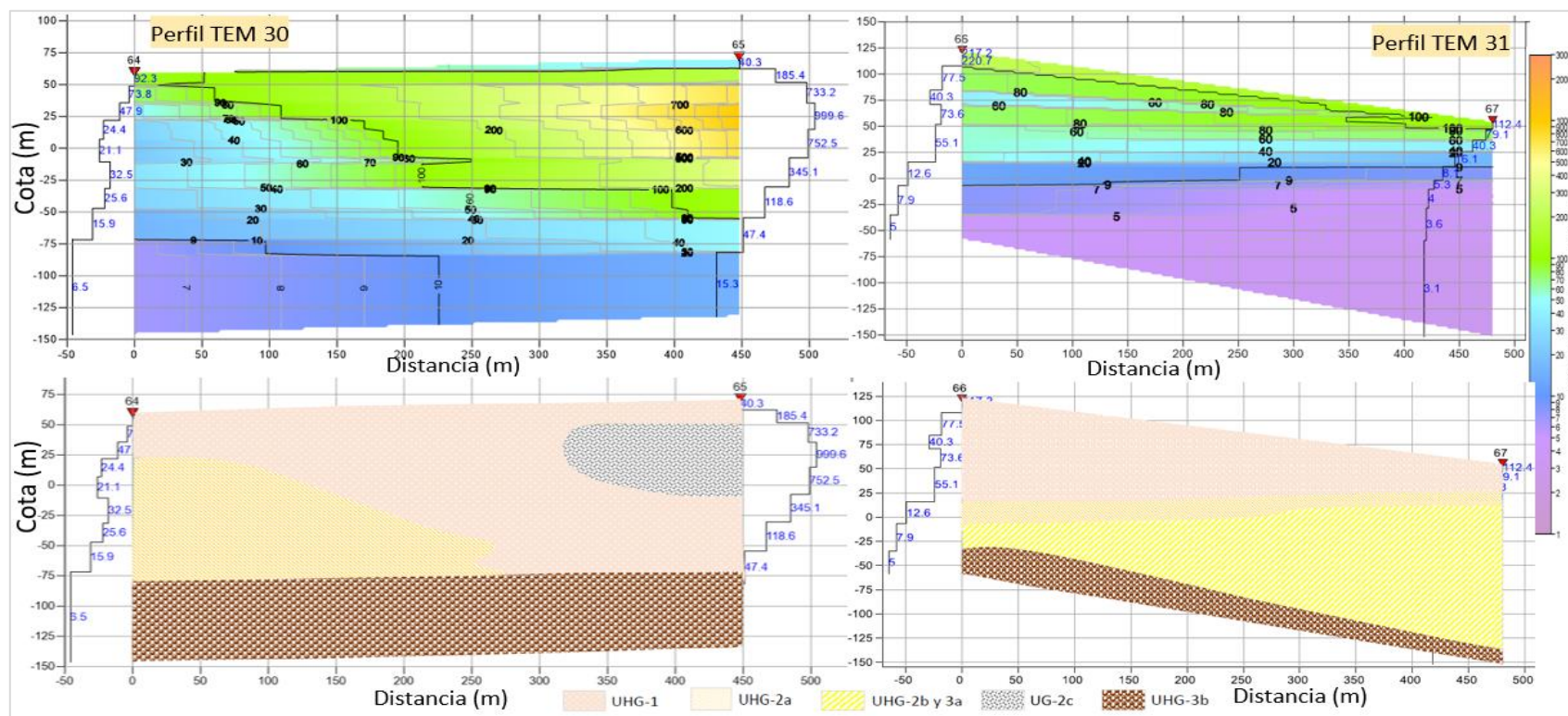
. Fuente: Modificado de Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-7 Resistividad interpolada & profundidad al este de comuna Quemchi.



Fuente: Modificado de Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-8 Resistividad interpolada & profundidad al este de comuna Dalcahue.



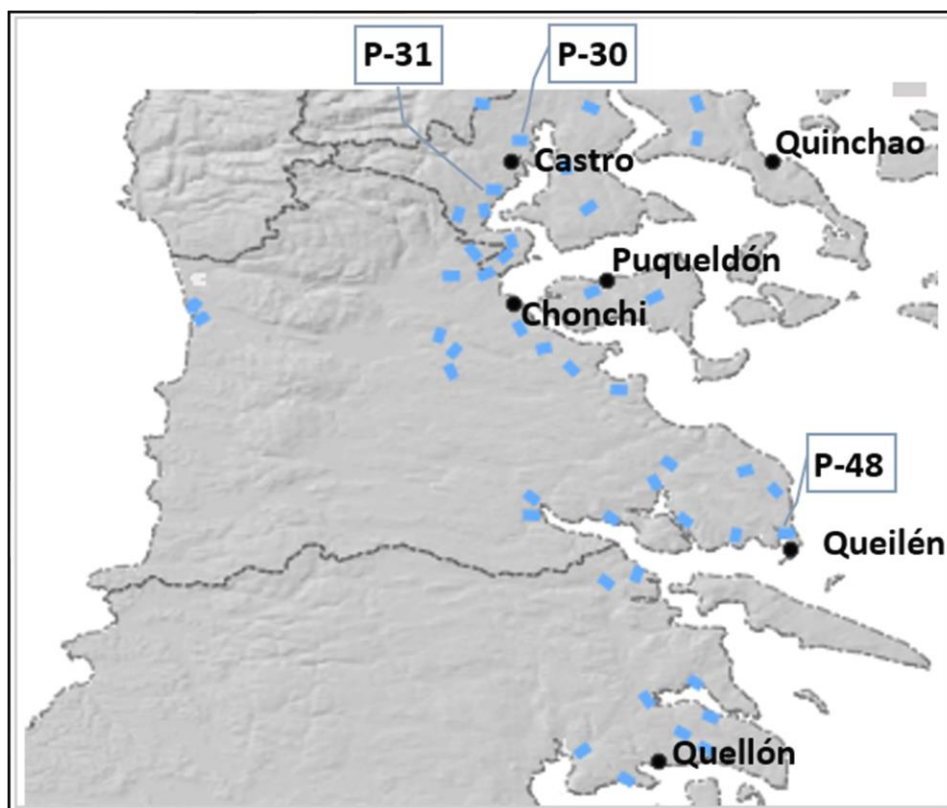
Fuente: Modificado de Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-9 Resistividad interpolada & profundidad en zona central.

Al norte de la zona urbana de Castro se puede identificar la cercanía a la superficie de una capa muy resistiva de unos 60 [m] de espesor en el punto TEM 65 (Ilustración 3-9), el cual se encuentra más cercano a las rocas de mayor antigüedad en la isla. La medición en el punto 64 destaca capas con distintos grados de permeabilidad.

En el perfil 31 se visualiza el cambio brusco de pendiente desde el punto 67 que se encuentra más cercano a la costa. Las capas de resistividad se pueden asociar a distintos rangos de conductividad en profundidad, y la zona más permeable se identifica al oeste de la sección, así como una capa muy salina en las capas inferiores, con su mayor espesor hacia el este.

En la Ilustración 3-10 se muestra la ubicación en planta de los perfiles 30, 31 y 48, ubicados en la mitad sur de la isla grande.

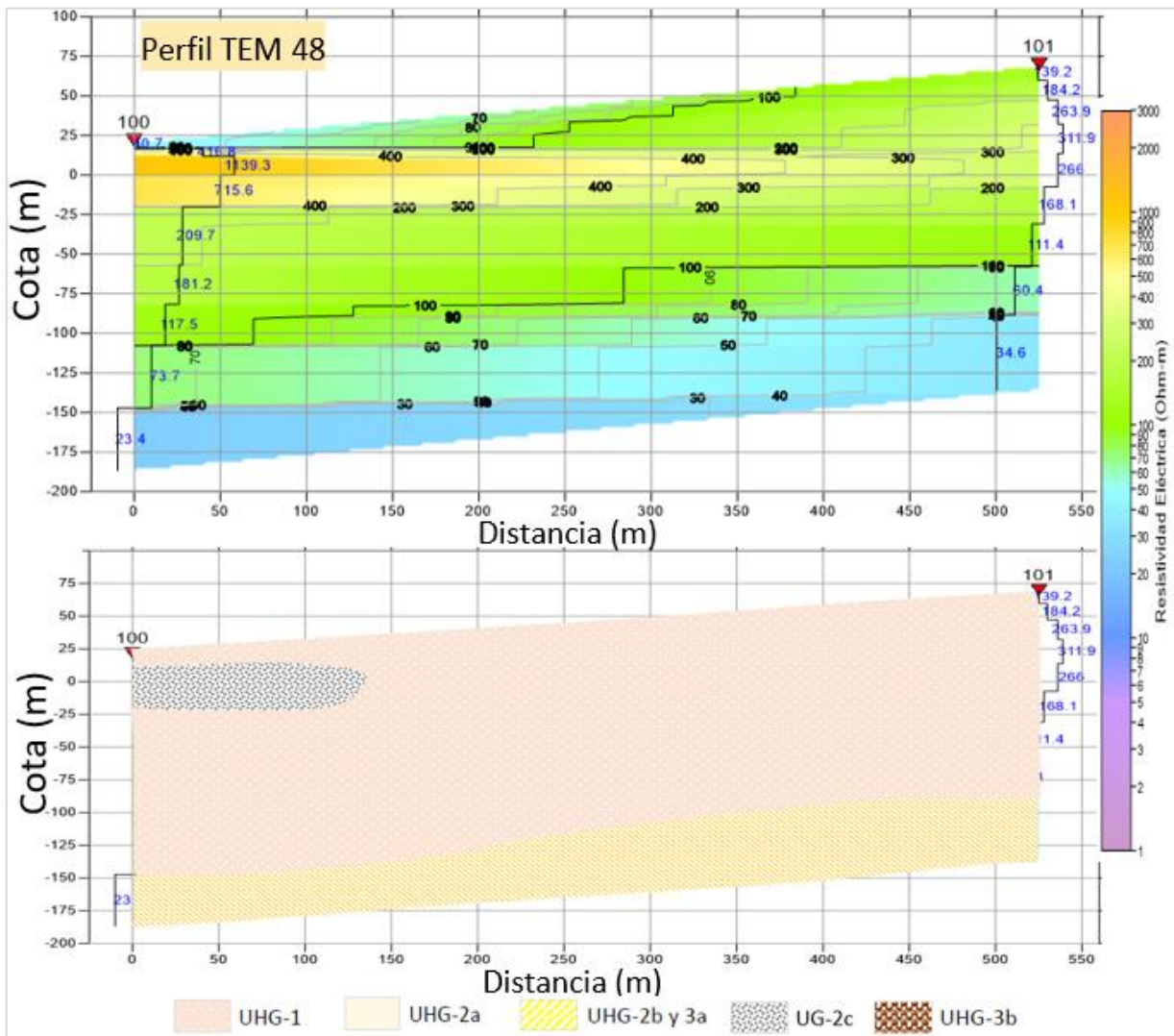


Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-10 Ubicación en planta de secciones TEM analizadas en zona sur.

La medición al norte de Queilén indica capa de resistividad en punto muy cercano a la zona costera refleja la cercanía a la costa del punto 100 (Ilustración 3-11), por lo que la zona

acuífera debe estar a una profundidad mayor a los 45 [m]. Se identifica un lente litológico más resistivo, que puede indicar la existencia de contenido ferroso. En el punto 101, los valores de resistividad indican litologías permeables en todo el espesor medido.



Fuente: Modificado de Terra Pacific Solutions SpA

Ilustración 3-11 Resistividad interpolada & profundidad en Quilén.

La interpretación de las unidades geoelectricas de todos los perfiles TEM asociando unidades hidrogeológicas se adjunta en el Apéndice del Anexo H (ruta carpetas: H-1/ Documentos de apoyo / Archivos complementarios "Interpretación TEM_UnidadesHG.pdf").

3.2.3 Interpretación Hidroquímica

Para el análisis hidrogeoquímico de las aguas en la zona de estudio, se tomaron 10 muestras de aguas subterráneas en 9 lugares de la isla grande de Chiloé (con una muestra duplicada). La gran mayoría de estos lugares corresponden a pozos de servicios sanitarios rurales o a pozos de la empresa ESSAL, no obstante que típicamente las aguas extraídas de estos lugares es posteriormente potabilizada, en cada uno de los lugares se tuvo la precaución de tomar muestras desde el mismo acuífero (en los casos que hubo oportunidad de acceder al acuífero a través de los pozos) o desde despiches en el sistema, situados aguas arriba de cualquier intervención generada en las aguas, una vez que se dejara abierto un momento este despiche para lograr obtener una muestra representativa de las aguas del acuífero.

El catastro y muestreo hidroquímico de 9 pozos profundos en la isla grande de Chiloé ha permitido establecer la caracterización hidrogeoquímica de sus aguas de acuerdo con la composición de sus iones mayoritarios, considerando las normas NCh 409 y NCh 1333, para consumo humano y riego, respectivamente.

3.2.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Después de validar los resultados entregados por laboratorio, a través del cálculo del Error del Balance Iónico (EBI [%]) se ha definido un error admisible en las 10 muestras tomadas durante la campaña ($1,38 < \text{EBI} < 9,8$). El detalle de dicho cálculo puede ser consultado en el Anexo H-1 en el epígrafe 2.4.2.1. En la tabla siguiente se incluyen los datos medidos en laboratorio de pH y conductividad eléctrica, además del resultado del EBI.

Tabla 3-1- Error del Balance Iónico (EBI) para todas las muestras estudiadas.

Muestras	pH laboratorio	pH terreno	Conductividad (C.E.) laboratorio	Conductividad (C.E.) en terreno	EBI
			μS/cm	μS/cm	%
APR Curamó	7,8	6,88	325	340	1,9
Pozo Municipalidad Ancud	7,81	7,21	182	194	-1,38
Pozo Municipalidad Ancud	7,82	7,20	181	192	-1,66
APR Coipomó	7,45	7,03	133	113	3,08
Pozo Municipalidad Quemchi	7,32	7,5	283	336	-9,8
Sondaje 2091 ESSAL Dalcahue	7,86	7,1	160	168	-3,15
Sondaje 2110 ESSAL Castro	7,71	6,99	226	221	-7,49
APR Rauco Alto	7,73	7,39	88,1	92	-5,49
Sondaje 2088 ESSAL Chonchi	7,88	7,59	117	122	-3,32
Sondaje 2104 ESSAL Quellón	8,1	7,52	194	206	-1,82

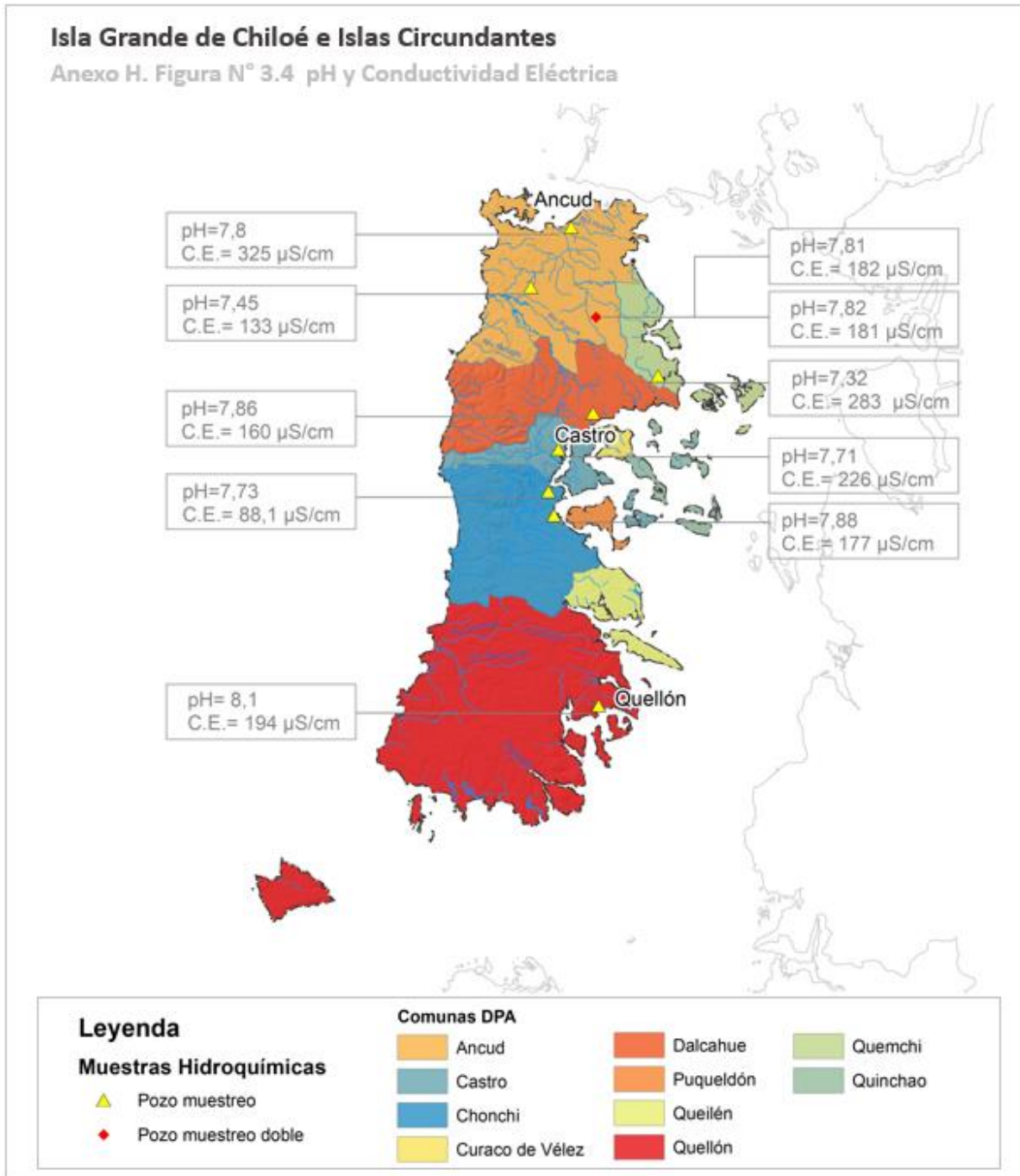
Fuente: Elaboración propia



De esta manera, es posible analizar los distintos parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio y terreno. Entre los parámetros físicos a evaluar, se consideran el **pH**, la **conductividad eléctrica** [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y la **dureza** magnésica y cálcica.

En la Figura 3-4 se muestran los valores de los parámetros analizados en tabla de acuerdo con las mediciones realizadas en laboratorio.

Para la interpretación hidroquímica se visualizan los resultados generados en distintos diagramas representativos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-4 Conductividad eléctrica y pH para las aguas analizadas en el área de estudio.

Los parámetros físicos son analizados a continuación:

- **pH**

Con la medición del **pH** se indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en una disolución, determinándose la acidez o alcalinidad de esta. Para calcular el pH, se considera la concentración efectiva con la ecuación siguiente:

$$\text{pH} = -\text{Log} (a_{H^+})$$

Las moléculas de agua se disocian cuando no hay solutos en ella, resultando un agua neutra con $\text{pH}=7$, pero al disolverse los solutos cambia el equilibrio (acidez-alcalinidad).

En general, el pH (medido en laboratorio) de las muestras estudiadas se comporta neutro para las 9 muestras ($7,32 < \text{pH} < 8,1$). El agua más alcalina se encuentra en el pozo muestreado en Quellón ($\text{pH}=8,1$), al sur de la cuenca, y con más bajo contenido de pH se ha medido en el pozo de la Municipalidad de Quemchi, el cual aún no está en explotación y presenta valores superiores a la norma establecida de agua potable de los elementos hierro y manganeso, y para la norma de riego se suman a estos el aluminio y el molibdeno (Figura 3-4 y Tabla 3-2).

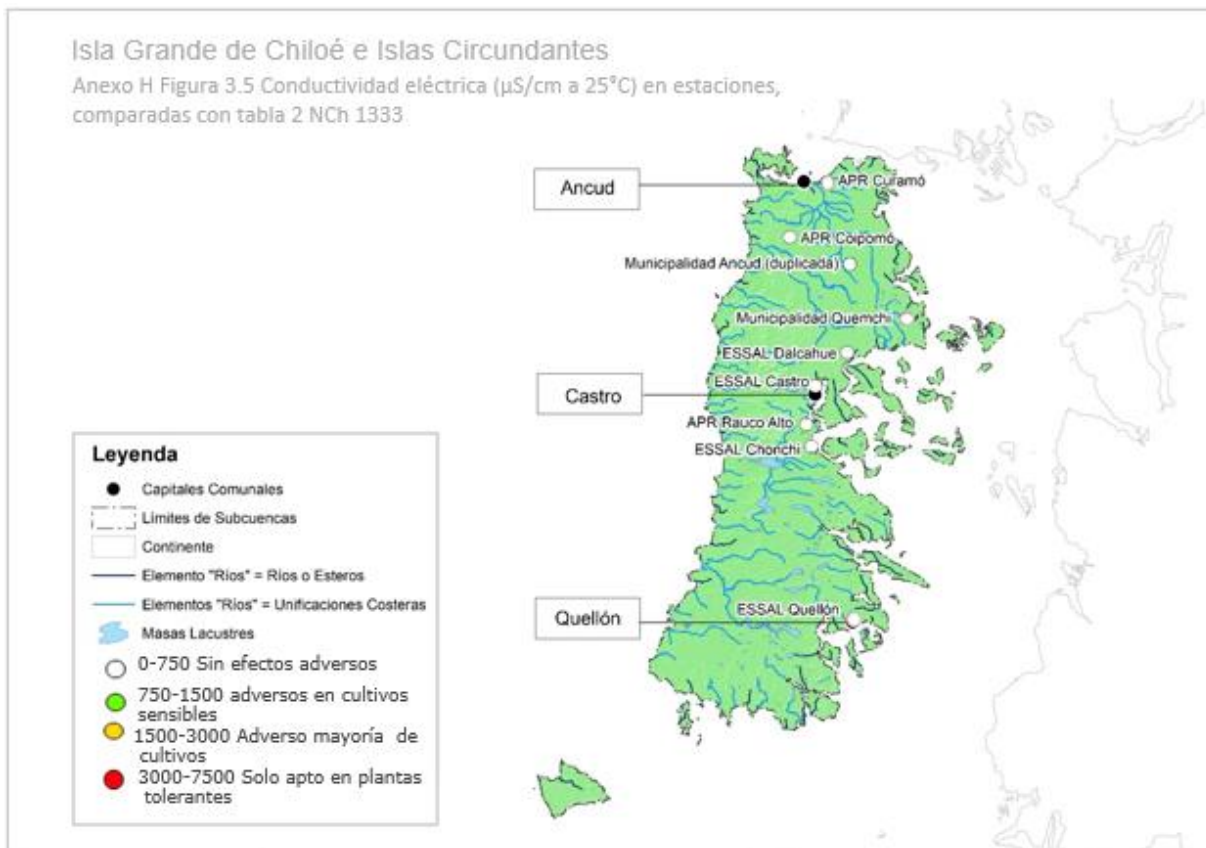
- **Conductividad Eléctrica**

La **conductividad eléctrica** (CE) es la capacidad que tiene un material o sustancia para dejar pasar la corriente eléctrica a través de sus partículas. Este parámetro permite indicar la mineralización que cualitativamente tiene el agua. Su valor varía con la temperatura y es una medida indirecta de la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT).

Los resultados del análisis del muestreo hidroquímico por laboratorio indican que las aguas de los 9 pozos son dulces según su conductividad eléctrica, ya que todos los resultados son inferiores a $750 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]$, como lo muestra la Tabla 3-1, la Figura 3-4 y Figura 3-5.

Dentro del rango de valores que arrojan los análisis, el valor más elevado se asocia al pozo ubicado en la APR Curamó ($325 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]$), el cual posee la menor elevación. Este pozo es de los ubicados con mayor cercanía con respecto al nivel del mar y su nivel estático se encuentra alrededor de los $11 \text{ } [\text{m}]$. En general, los pozos más cercanos a la costa indican los valores más altos (Pozos: Municipalidad Quemchi y ESSAL Castro).

El menor valor de conductividad se registra en el pozo de la APR Rauco Alto ($88,1 \text{ } [\mu\text{S}/\text{cm}]$) donde existe una profundidad del nivel estático de $79 \text{ } [\text{m}]$ aproximadamente. Los valores de profundidad y nivel estático de los pozos muestreados pueden ser revisados en el epígrafe 2.4.1 del Anexo H-1.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-5 Clasificación de la conductividad eléctrica en estaciones analizadas según norma NCh 1333

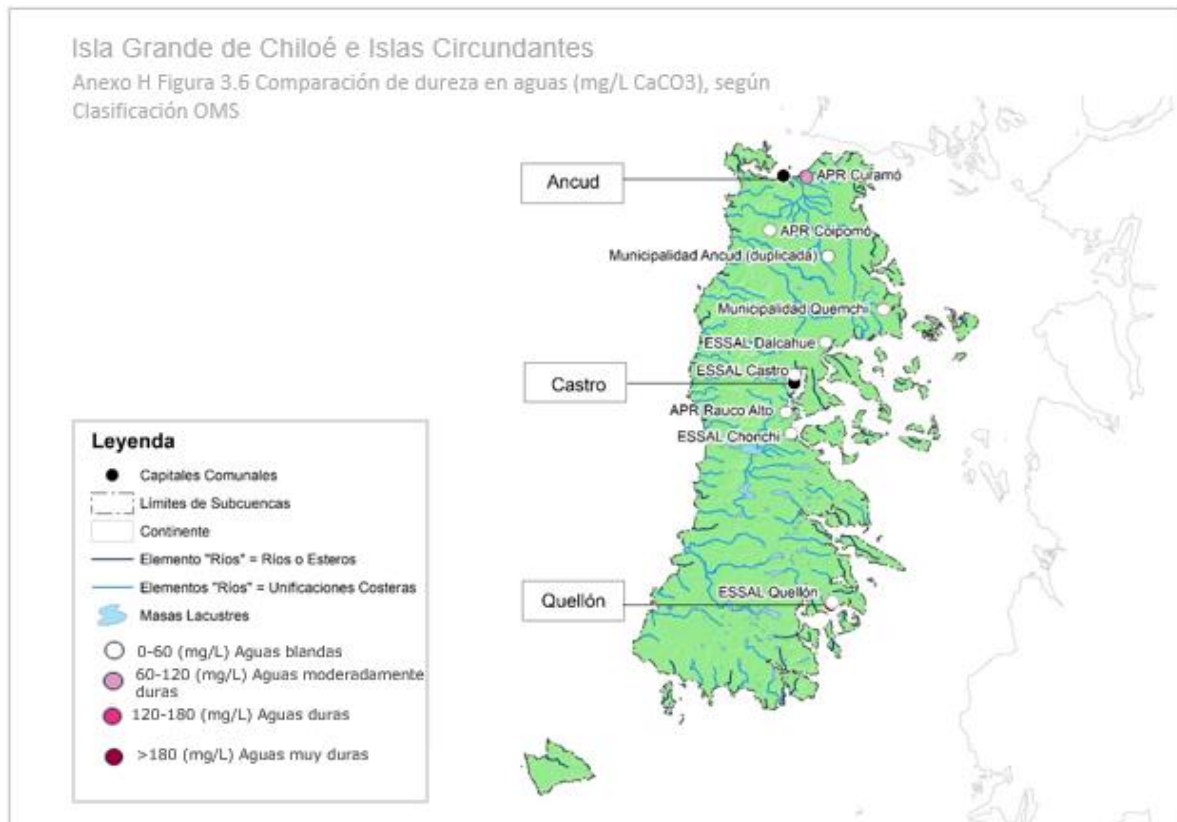
- **Dureza en el agua**

La **dureza magnésica y cálcica** se reportan en conjunto como alcalinidad total de CaCO_3 . La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha definido 4 tipos de dureza: las aguas blandas se encuentran entre 0 y 60 [$\text{mg}/\text{L CaCO}_3$], las aguas moderadamente duras se encuentran entre 60 y 120 [$\text{mg}/\text{L CaCO}_3$], las aguas duras se encuentran entre 120-180 [$\text{mg}/\text{L CaCO}_3$] y las aguas muy duras se encuentran por encima de los 180 [$\text{mg}/\text{L de CaCO}_3$].

La comparación de las estaciones analizadas se ilustra en la Figura 3-6.

De las 10 muestras estudiadas 9 presentan durezas blandas, y solo una, la muestra 1 de APR Curamó, tiene dureza moderadamente dura. En general, las aguas tienen excelente

calidad de dureza y sus concentraciones de CaCO_3 no son suficientes para afectar al sabor del agua o causar incrustaciones en tuberías.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-6 Clasificación de dureza en estaciones analizadas según OMS.

3.2.3.1.1 Diagramas hidrogeoquímicos

Los diagramas hidrogeoquímicos favorecen la interpretación de las muestras de aguas estudiadas pues grafican las características de estas aguas de forma sintetizada según el medio por el cual circularon. Para ello se realiza la representación de los iones mayoritarios, y de acuerdo con el diagrama a representar es la unidad de medida a ocupar. Para el presente estudio se han generado los siguientes diagramas: **Piper**, **Stiff**, **Schöeller-Berkaloff**, **Gibbs** y **Binarios**. Los diagramas se han elaborado al procesar los datos en el programa Diagrammes, a excepción del diagrama de Gibbs que se ha generado en excel.

a. Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es uno de los diagramas más utilizados para representar los resultados de distintos análisis simultáneamente, permitiendo que las aguas geoquímicamente similares queden agrupadas en áreas definidas. Este diagrama está compuesto de 2 triángulos equiláteros en su base, que a su vez son proyectados en un rombo central (Ilustración 3-12), con los valores en [%]. El rombo del diagrama permite identificar la relación agua-roca de las muestras.

Para el sector estudiado (Ilustración 3-12), todas las muestras de aguas se caracterizan por ser **cloruradas sulfatadas-cálcicas magnésicas**, ya que se ubican en la sección superior del rombo. De acuerdo con sus concentraciones en [mg/L] son aguas de buena calidad, los iones mayoritarios se encuentran muy por debajo del límite según normas para uso potable y riego.

En el caso del ion sodio (en su expresión porcentual) existen tres muestras de aguas que exceden levemente el límite permitido para riego (35 [%]). Las muestras de aguas que indicarían cierta restricción de uso para el riego se encuentran en los pozos: APR Rauco Alto (Na [%] = 37,2), y los pozos de ESSAL en las localidades de Chonchi (Na [%] = 36,4) y Quellón (Na [%] = 35,9).

$$Na \text{ (porcentual)} = \left(\frac{Na}{\sum Na + Ca + Mg + K} \right) * 100$$

donde:

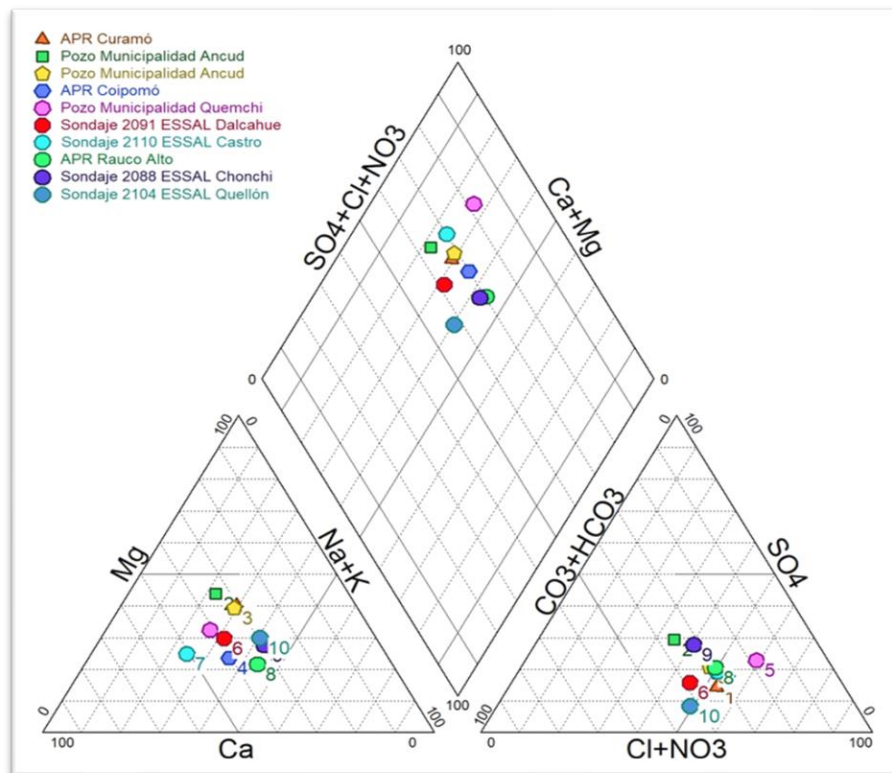
Cationes: Ca, Mg, Na y K se expresan en [meq/L].

De acuerdo con la norma para riego (NCh 1333) existe restricción con el contenido de sodio porcentual (>35 [%]). El exceso de iones de sodio desplaza al calcio (Ca) y al magnesio (Mg), provocando la dispersión y desagregación del suelo, transformándose en un suelo duro y compacto en condiciones secas, reduciendo la infiltración del agua y aire a través de los poros que conforman el suelo¹. Para los cultivos puede provocar una germinación lenta y desigual de la semilla, marchitamiento repentino y retraso del crecimiento². Las muestras de aguas de las 3 estaciones que superan el valor indicado, llegan a alcanzar el 37,2 [%] de sodio porcentual.

¹ Revisado en <https://www.lenntech.es/aplicaciones/riego/sar/riesgo-sodio-en-regadios.htm#:~:text=Peligro%20del%20sodio%20en%20aguas%20de%20regad%C3%ADo&text=El%20exceso%20de%20iones%20de,poros%20que%20conforman%20el%20suelo>

² Revisado en: <https://www.fertibox.net/single-post/sodio-agricultura>

De acuerdo con la ubicación de las muestras en el rombo del diagrama son aguas cloruradas-sulfatadas cálcicas-magnésicas, indicando ser suelos más alcalinos que el agua. En general, el que sean clasificadas las aguas como cloruradas sulfatadas, no son un índice de mala calidad, ya que estaría dado por cuán elevada es la concentración de ion cloruro en el agua (excede NCh 409 > 400 [mg/L] de Cl^- y NCh 1333 > 200 [mg/L] de Cl^-).



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-12 Diagrama de Piper para las aguas analizadas en el área de estudio.

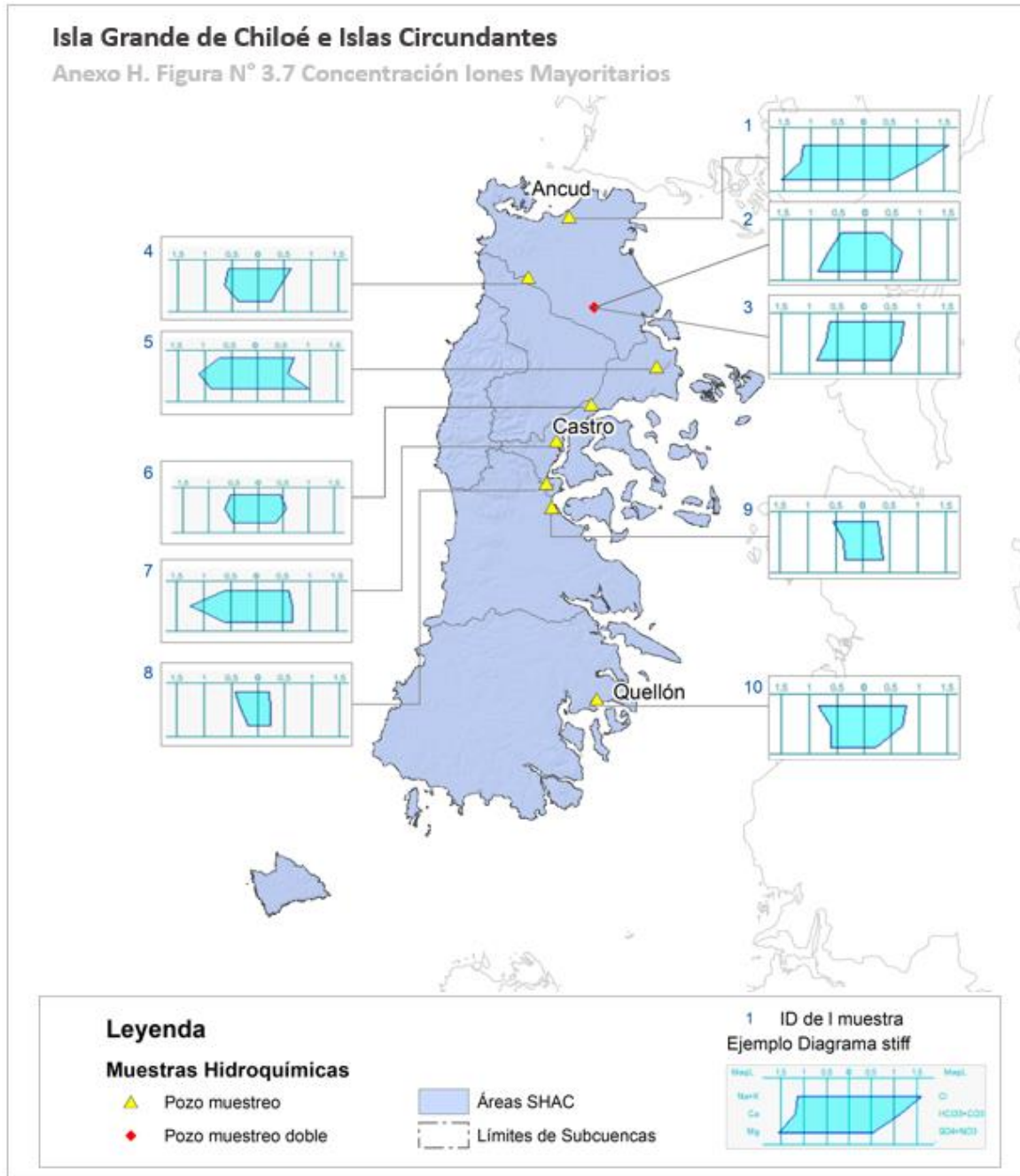
La muestra de agua tomada en el pozo de la APR Curamó indica una relación entre su contenido de cloruro, su conductividad eléctrica, la elevación a la que se encuentra el pozo con respecto al nivel del mar, y su cercanía a este, donde el nivel estático fue detectado alrededor de los 11 [m] de profundidad. De esta manera, se infiere un origen del agua de este pozo (por su cercanía a la costa) a partir del lavado de terrenos de origen marino, considerando que es una isla que dada su formación geológica estuvo sumergida bajo el mar.



b. Diagrama de Stiff

Este diagrama permite visualizar los elementos mayores presentes en una muestra de agua, expresados en [meq/L], siendo posible determinar variaciones espaciales o temporales de 1 o más muestras de aguas. Dada su representatividad, se realiza el análisis de los elementos mayoritarios que tipifica a cada pozo muestreado (Figura 3-7).

Los resultados de laboratorio para los pozos muestreados indican que al norte predominan las aguas cloruradas – magnésicas. La muestra duplicada refleja diferencia en la concentración de iones mayoritarios, sin embargo, esto no incide en la calidad de sus aguas.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-7 Concentración de los iones mayoritarios según Diagrama de Stiff en muestras hidroquímicas del área de estudio.



Existe una coherencia entre las muestras de aguas de pozos con ubicación cercana a la costa, donde destaca un mayor contenido de sales (sulfatadas o bicarbonatadas).

Las concentraciones de sales que arrojan los análisis reflejan que no afectan la calidad de las aguas. La muestra con mayor contenido de cloruro se asocia al pozo de la APR Curamó, con muy baja elevación con respecto al nivel del mar, baja profundidad del nivel estático y gran cercanía a la costa. Sin embargo, como es similar la concentración del ion hidrocarbonato en la misma agua, permite que su calidad sea superior.

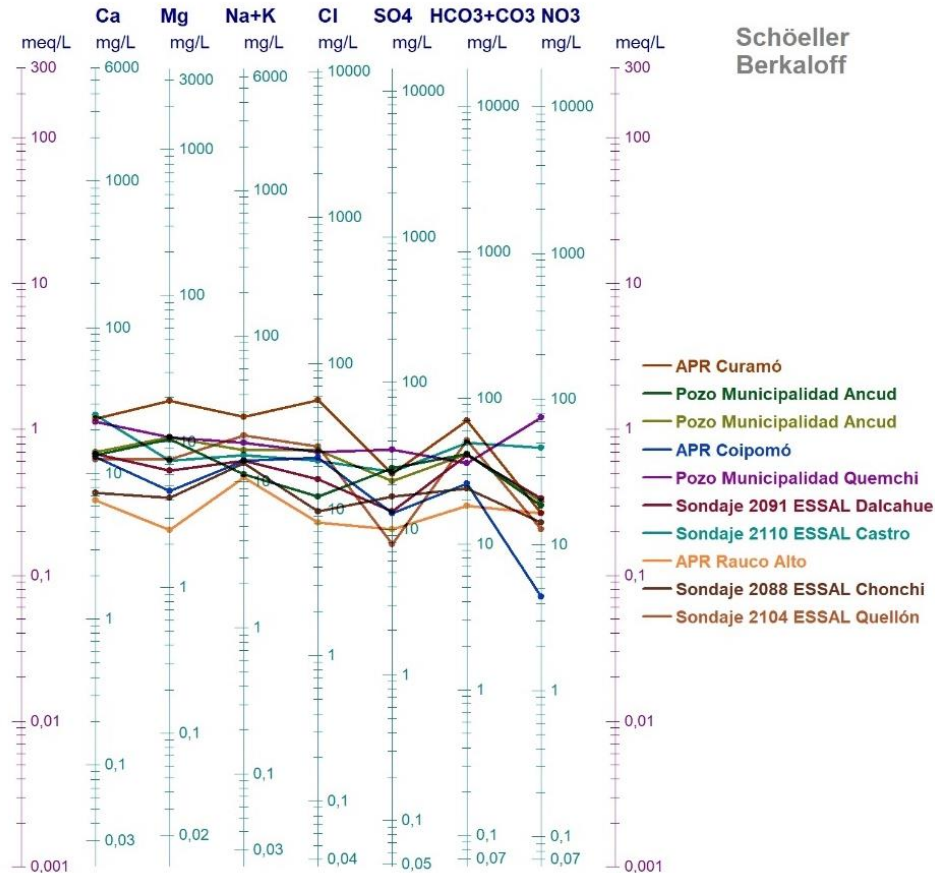
Las muestras de los tres pozos ubicados en la zona sur son sulfatadas – sódicas (Muestras 8 (Rauco Alto) y 9 (Chonchi)) y cloruradas – sódicas (Muestra 10, en Quellón); las concentraciones de sales no afectan su calidad. En general, las aguas muestreadas en pozos de distintos sectores en Chiloé son de buena calidad para consumo humano y riego.

Los informes resultantes de los análisis de laboratorio pueden ser consultados en detalle en los Documentos de apoyo del Apéndice H-1 (carpeta "Hidroquímica").

c. Diagrama Schöeller-Berkaloff

Este diagrama, al igual que Stiff, visualiza a los iones mayoritarios de las muestras. Sin embargo, permite una comparación más directa entre muestras puesto que se grafica en rectas verticales paralelas de igual espaciamento. Se ocupan escalas logarítmicas considerando los valores en [ppm] o [meq/L]. A partir de dicho diagrama se logra ver la evolución de las aguas en un mismo punto con mediciones sucesivas en un determinado tiempo.

El análisis resultante a partir de este diagrama es limitado debido a tener un solo período de muestreo, pero al menos permite comparar los iones que se encuentran en mayor concentración en las muestras repetidas. En general, predominan los mismos cationes y aniones en concentraciones similares [mg/L], solo difieren levemente las concentraciones de $\text{Na}^+\text{+K}^+$ y Cl^- que tienden a aumentar en estaciones cercanas a la costa (Ilustración 3-13).



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-13 Representación de muestras duplicadas en diagrama Schöeller-Berkaloff en el área estudiada.

En general, las muestras indican concentraciones adecuadas de iones mayoritarios para uso potable y riego, a excepción de la muestra 5 (Municipalidad de Quemchi) que excede la concentración de nitratos.

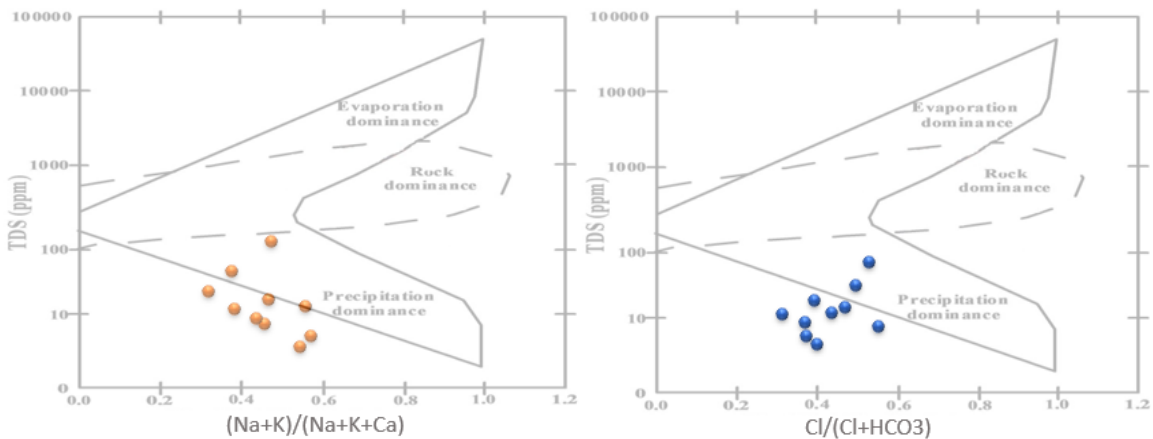
d. Diagrama de Gibbs

Para determinar los principales procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas, se ocupa el **diagrama de Gibbs**. Posee tres zonas asociadas a los procesos de evaporación, interacción agua-roca y precipitación atmosférica, que indican los posibles orígenes de los iones en las muestras. En el mismo se grafica la concentración de los Sólidos

Disueltos Totales (SDT) en el eje vertical en función de la relación para cationes o aniones, según se muestra en las fórmulas siguientes:

$$\frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{+2}} \text{ o } \frac{Cl^-}{Cl^- + HCO_3^-}$$

Los datos del diagrama de Gibbs (Ilustración 3-14) reflejan que la química de las aguas subterráneas está representada por procesos de precipitación característicos de aguas con baja conductividad, como las muestras analizadas. Los posibles orígenes de aguas dominadas por procesos de precipitación están asociados a iones desplazados por escorrentía y acuíferos donde la recarga es por agua-lluvia principalmente.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-14 Relación de TDS con aniones y cationes según Diagrama de Gibbs.

Los valores de Sólidos Disueltos Totales (TDS) son bajos, y eso está dado por ser aguas muy limpias. Las muestras que poseen mayor concentración de TDS pertenecen a la muestra 1 (pozo APR Curamó TDS=225 [mg/L]) y 5 (pozo Municipalidad de Quemchi TDS=178 [mg/L]), con el registro de las mayores conductividades.

e. Diagramas binarios

Los **diagramas binarios** permiten relacionar la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) con cada uno de los iones mayoritarios analizados en el área de estudio (Ilustración 3-15).



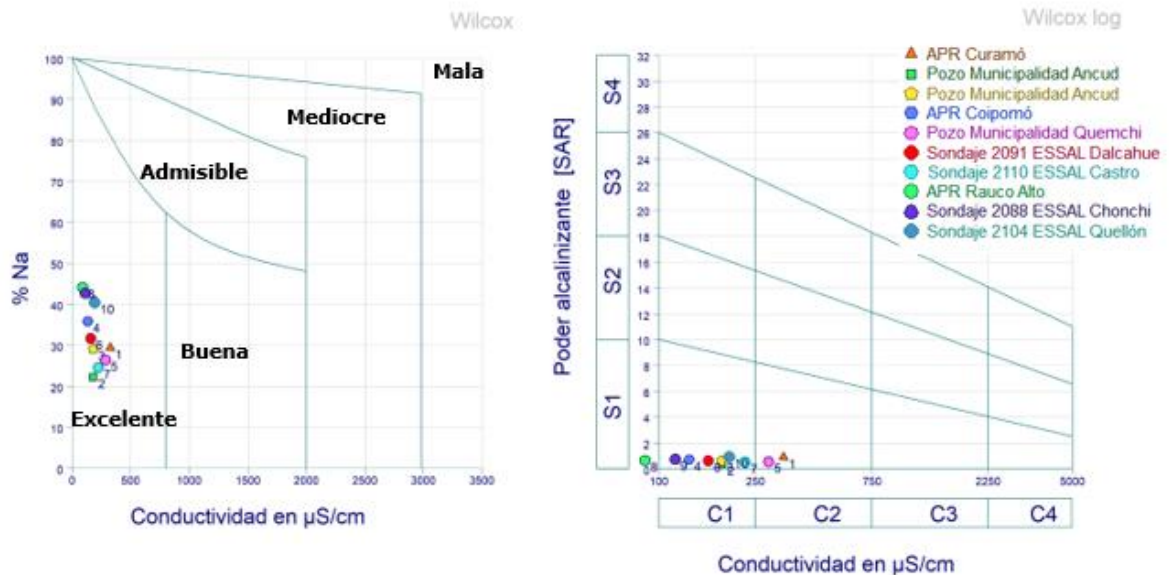
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-15 Diagramas binarios de elementos mayoritarios versus TDS (SDT) para las muestras de aguas analizadas.

En general, todas las muestras estudiadas en la cuenca considerando los TDS son de buena calidad (Ilustración 3-15), sus concentraciones están muy por debajo de los límites permitidos considerando consumo humano (<1500 [mg/L]) y riego (<500 [mg/L]). La muestra que refleja mayor concentración de TDS para los iones evaluados es la ubicada en el pozo de la APR Curamó (225 [mg/L]), al norte de la isla grande. De esta manera, no existiría ningún efecto perjudicial para la salud humana o para el riego de distintos tipos de cultivos relacionados con la concentración de iones mayoritarios.

f. Diagramas de Wilcox

El **diagrama de Wilcox** ilustra la correlación entre la razón absorción de sodio y conductividad eléctrica para clasificar la peligrosidad del agua de riego sobre cultivos y suelos. La Ilustración 3-16a ilustra la calificación del agua desde excelente a buena, buena a permisible, permisible a mediocre, y mediocre a mala; mientras que en la Ilustración 3-16b se muestra el diagrama logarítmico utilizado para delimitar los límites entre clases de salinidad (C1 - C4) y sodio (S1 - S4).



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-16 Diagramas de Wilcox para las muestras de aguas analizadas.

Las muestras de aguas subterráneas analizadas se encuentran en las secciones de relación conductividad y sodio más bajos (C1 y S1), indicando que las aguas tienen excelente calidad para su uso en cultivos y no se aprecian efectos nocivos asociados a la salinidad del agua. Sin embargo, se debe considerar el efecto de la concentración de metales para dar una conclusión más completa.

- **Iones mayoritarios**

Se realiza el análisis de los iones mayoritarios presentes en las muestras de aguas estudiadas según la visualización en el diagrama de Stiff. Entre ellos se encuentran los aniones: cloruro, sulfato, bicarbonato y nitrato; así como los cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio.

- a. Cloruros y sodio**

Los elementos cloruros y sodio debido a su estrecha relación permiten ser analizados en conjunto. Estos pueden ser aportados por terrenos de origen marino, el aporte de aguas congénitas, las lluvias en zonas costeras y la mezcla con agua de mar (Custodio & Llamas, 1983). Los cloruros pueden repercutir por sí solos en el crecimiento de plantas en concentraciones muy altas, y suelen asociar a altos niveles de sodio (Eaton, 1942; Eaton, 1942).

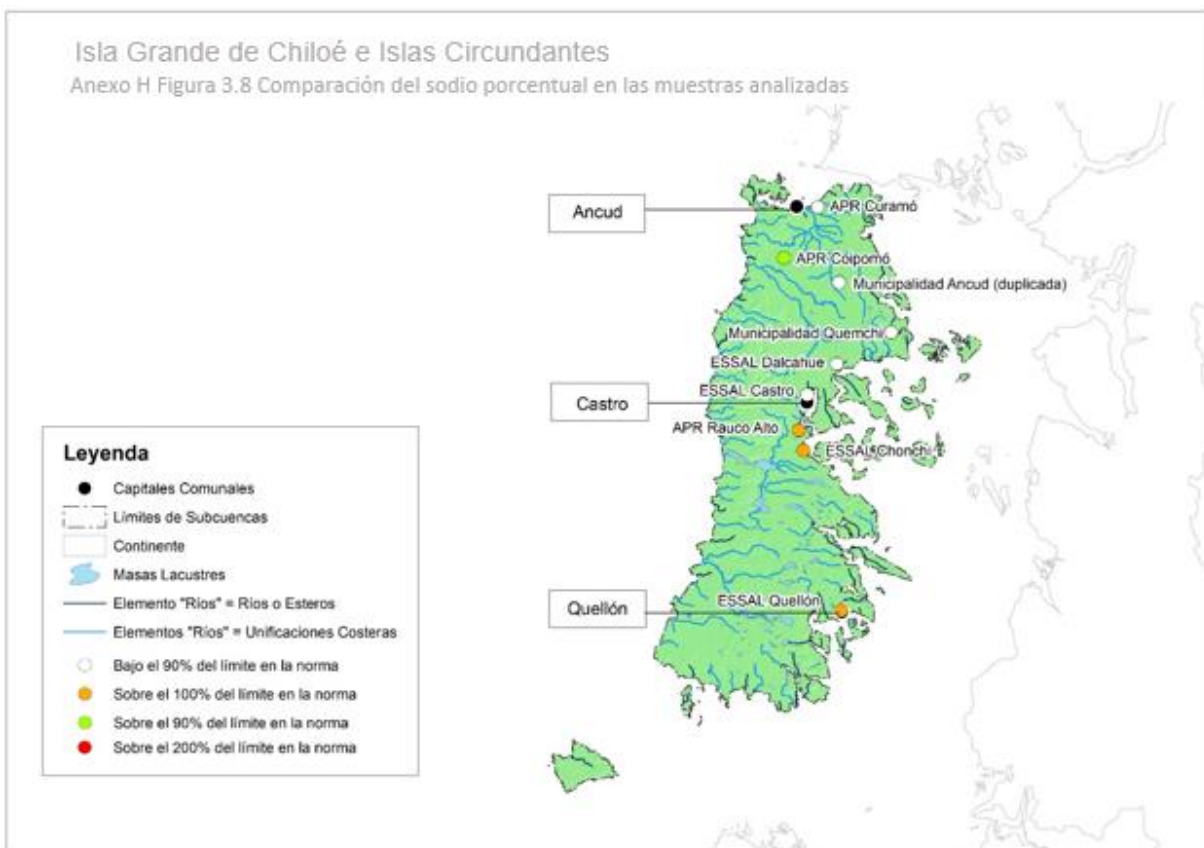
El sodio también puede ser introducido por la presencia de silicatos en el terreno. En exceso, el sodio está asociado a problemas a la salud como la hipertensión. En cultivos puede disminuir el desarrollo vegetal, causándoles toxicidad con la aparición de manchas necróticas, provocar quemaduras en las hojas, y limitar el crecimiento de las hojas por reducir la permeabilidad del suelo (Evanglou, 1998).

Las normas chilenas indican que las aguas deben poseer concentración de cloruro de 400 [mg/L] para que sean aptas para el consumo humano y 200 [mg/L] para efectos de riego. Las 10 muestras de aguas analizadas indican que están en el rango permitido para ambos fines, por lo que no existiría restricción al respecto (Figura 3-7). El pozo de la APR Curamó es el que posee la mayor concentración de este ion (56,5 [mg/L]).

El sodio en [mg/L] no presenta restricción para su uso según las normas 409 y 1333. Sin embargo, para riego se indica restricción del sodio porcentual cuando el agua refleja una concentración mayor al 35 [%]. Considerando este criterio, las muestras que resultan con limitante para su uso en riego, entendiendo que depende del tipo de cultivos, son las muestras 8 (Pozo APR Rauco Alto, $\text{Na}^+ = 37,2$ [%]), 9 (Pozo ESSAL Chonchi, $\text{Na}^+ = 36,5$ [%]), y 10 (Pozo ESSAL Quellón, $\text{Na}^+ = 35,9$ [%]), que superan levemente el sodio porcentual permitido. En la Figura 3-8 se pueden observar las concentraciones del sodio

porcentual para las 10 muestras de aguas estudiadas, destacando en naranja las muestras que superan la norma.

No obstante, en los diagramas de Wilcox presentados en la Ilustración 3-16, se indica que todas las muestras poseen excelente calidad de aguas para cultivos sin ocasionar daños en la mayoría de los tipos de suelos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-8 Comparación del sodio porcentual en las muestras analizadas.

b. Sulfatos

El origen del sulfato resulta del lavado de terrenos formados en condiciones de gran aridez o ambiente marino, la oxidación de sulfuros de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias; la disolución del yeso, la anhidrita y terrenos yesíferos; la concentración en el suelo de agua de lluvia. También de las actividades urbanas, industriales y en ocasiones agrícolas

pueden aportar cantidades importantes. Además, es afectado por la reducción de sulfatos (Custodio & Llamas, 1996).

Las muestras estudiadas revelan una concentración de sulfatos acorde a las normas establecidas que permiten su uso para consumo humano y riego (Figura 3-7). Los valores que arrojan los análisis de laboratorio se encuentran entre los 7,82 y 35 [mg/L], muy distantes del límite de restricción (NCh 409 > 500 [mg/L] y NCh 1333 > 250 [mg/L]). La muestra de agua M-5 del pozo perteneciente a la Municipalidad de Quemchi es la que indica mayor contenido de sulfatos. Estos resultados indican buena calidad de las aguas conforme al anión analizado.

c. Bicarbonatos

Custodio y Llamas (1996) indica que su origen procede de la disolución de CO₂ atmosférico o del suelo, la disolución de calizas y dolomías ayudada por el CO₂ y/o ácidos naturales (húmicos, oxidación de sulfuros, etc.); la hidrólisis de silicatos ayudada por el CO₂. Si en el acuífero no existen aportes de CO₂ (reducción de sulfatos, reducción de hierro y aportes magmáticos) el contenido en carbono disuelto (CO₂ + CO₃H⁻ + CO₃⁼) permanece constante y muchas veces puede suponerse que el contenido en CO₃H⁻ es casi constante ya que es el ion dominante. Son fácilmente precipitables por concentración por cambio en la presión parcial de CO₂ o por efecto de ion común.

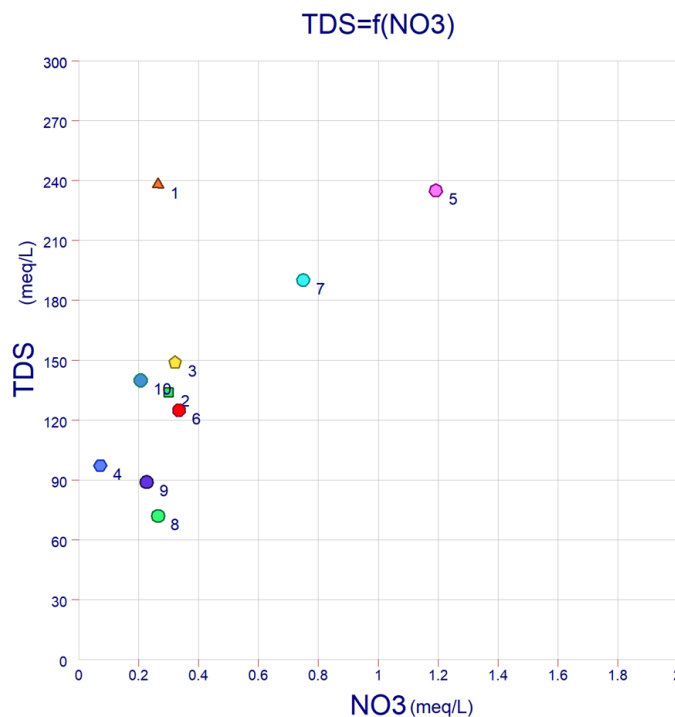
Las normas chilenas 409 y 1333 no indican concentraciones de bicarbonatos en el agua que indiquen perjuicio a la salud humana ni para efectos de riego. Generalmente las aguas con mayor concentración de dicho anión son las de mejor calidad, con preferencia de los cationes Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺. Los rangos de este anión en las aguas estudiadas en Chiloé se encuentran entre los 15,2 y 70 [mg/L]. La mayor concentración de bicarbonatos en [mg/L] se registra en el pozo de la APR Curamó, al norte de la cuenca. Sin embargo, de acuerdo con el diagrama de Stiff (expresado en [meq/L]) este ion indica mayor predominio en las muestras 2 (Pozo Municipalidad de Ancud), 6 (Pozo ESSAL Dalcahue), 7 (Pozo ESSAL Castro) y 8 (APR Rauco Alto) (Figura 3-7).

d. Nitratos

Según Custodio y Llamas (1976) se indica que este ion procede de procesos de nitrificación naturales (legumbres); descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera; abonos agrícolas; en pequeña proporción del agua de lluvia. Muy raramente del lavado de ciertos minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos. Muy localmente del desarrollo de pozos con explosivos. Su origen no es siempre claro. Es relativamente estable, pero puede ser fijado a veces por el terreno o ser reducido a N₂ o NH₄ en ambientes reductores. Muchas veces es un indicador de

contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre.

El anión nitrato (NO_3^-) indica restricción para consumo humano (NCh 409 > 50 [mg/L]). El análisis de laboratorio a las 10 muestras de aguas tomadas en 9 pozos de la isla Chiloé indica que solo la muestra 5 excede los límites permitidos. El rango determinado en las distintas muestras refleja valores entre 4,43 y 73,98 [mg/L], con su mayor valor en la muestra 5 (Estación Pozo Municipalidad de Quemchi). Por tanto, las aguas de los pozos muestreados reflejan buena calidad de acuerdo con la concentración de nitrato presente en ellas a excepción de la muestra 5 (Ilustración 3-17).



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-17 Diagrama binario con relación NO_3 versus SDT (TDS) en las muestras analizadas.

e. Calcio

Custodio y Llamas (1996) describen al ion calcio que este procede de la disolución de calizas, dolomías, yeso y anhidrita; ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos; la disolución de cemento calcáreo de muchas rocas, concentración del agua de lluvia. Está

frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio $\text{CO}_2 - \text{CO}_3\text{H}^-$. Puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.

El catión calcio indica concentraciones entre 6,56 y 25,01 [mg/L] en las muestras sujetas a análisis de laboratorio. Las normas chilenas para efecto de consumo humano y riego no establecen límites de restricción para su uso (Figura 3-7).

f. Magnesio

Custodio y Llamas (1996) refieren la procedencia del ion magnesio a partir de la disolución de dolomías y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferromagnésicos; localmente del lavado de rocas evaporitas magnésicas (carnalita, kaiserita, etc.); mezcla con agua de mar; contaminación industrial y minera. Aunque se disuelve lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando este se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

Conforme a la Norma Chilena 409, el catión magnesio indica un límite para su uso con fines de consumo humano, el no exceder los 125 [mg/L]. En las muestras de aguas analizadas se detectaron concentraciones de magnesio que oscilan entre los 2,49 y 19,01 [mg/L], por lo cual indican buena calidad considerando este elemento (Figura 3-7). El valor más elevado se detecta en la muestra 1 del pozo APR Curamó al norte de la isla grande.

g. Potasio

Argumentan Custodio y Llamas (1996) que el potasio procede del ataque de ortosa y otros silicatos (micas, arcillas, etc.); localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.); en pequeña cantidad de aportes del agua de lluvia. En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos). Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que la razón K/Na es mucho menor que 1, excepto en aguas muy diluidas, en las que ese valor puede llegar a ser 1.

El catión potasio (K^+) presenta bajas concentraciones en las muestras estudiadas, no superan los 4,86 [mg/L]. Las normas chilenas que establecen los límites de restricción para determinados elementos contenidos en las aguas (409 y 1333), no indican esta excepción para el contenido de potasio. De esta manera, todas las aguas muestreadas son de buena calidad (Figura 3-7).



- **Iones minoritarios**

El agua contiene en sí a todos los elementos químicos, los cuales varían de acuerdo con sus concentraciones en mayoritarios (concentraciones mayores a 1 [mg/L]: Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-), minoritarios (concentraciones menores a 1 [mg/L]) y elementos trazas (cantidades muy pequeñas difíciles de cuantificar en concentraciones de [$\mu\text{g/L}$]).

Las muestras de aguas analizadas en pozos de la isla grande Chiloé indican la existencia de concentraciones que superan el límite permitido de algunos elementos minoritarios según las Normas Chilenas 409 y 1333. Los elementos que exceden los límites son el aluminio, hierro, manganeso y molibdeno, y se encuentran en 3 muestras de aguas (Tabla 3-2).

Aluminio

El **aluminio** (Al) es muy difícil de introducir en solución acuosa y queda fuertemente retenido en arcillas. En pH alcalino suele encontrarse como $\text{Al}_2\text{O}_4^{-2}$ o Al_2OH^- y suele aportar en alcalinidad y es inofensivo (Custodio & Llamas, 1983). En ambientes ácidos ($\text{pH} < 5$) incrementa su solubilidad, y el aluminio puede volverse tóxico en especies acuáticas y terrestres, razón por la cual la concentración de este elemento es de preocupación en cultivos (Silva&Matos, 2016). Bibliografía reporta casos en que la exposición de altos niveles de aluminio es un parámetro limitante para la germinación de semillas, desarrollo de brotes e inhibición de acciones enzimáticas que pueden conducir a déficits nutricionales.

Solo la muestra de la Municipalidad de Quemchi presentó altos niveles de aluminio, con 12,82 [mg/L], sobrepasando los límites de la norma NCh 1333 en un 250 [%]. La concentración de aluminio no se encuentra regulada por la norma NCh 409. Sin embargo, como el pH de esta muestra de agua es ligeramente básico (Tabla 3-2), el contenido de aluminio presente no debe incidir negativamente con fines de riego. Cuando el pH es ácido ($\text{pH} < 5$) las altas concentraciones de aluminio resultan tóxicas para el buen crecimiento de las plantas (Biblioteca Digital SAG).

Tabla 3-2 Elementos minoritarios que exceden los límites en algunas muestras de aguas del área estudiada.

Iones Minoritarios					
ID	Nombre muestra	Al	Fe	Mn	Mo
1	APR Curamó	0,015	2,24	0,405	< 0,005
2	Municipalidad Ancud 1	< 0,01	0,096	0,001	< 0,005
3	Municipalidad Ancud 2	0,026	0,102	< 0,001	< 0,005
4	APR Coipomó	0,046	< 0,02	< 0,001	< 0,005
5	Municipalidad Quemchi	12,82	37,08	0,453	0,023
6	Sondaje 2091 (ESSAL Dalcahue)	0,033	< 0,02	< 0,001	< 0,005
7	Sondaje 2110 (ESSAL Castro)	< 0,01	< 0,02	< 0,001	< 0,005
8	APR Rauco Alto	< 0,01	< 0,02	< 0,001	< 0,005
9	Sondaje 2088 (ESSAL Chonchi)	0,025	< 0,02	0,002	< 0,005
10	Sondaje 2104 (ESSAL Quellón)	0,024	1,26	0,21	< 0,005

Nota: Celda celeste superan NCh 409, celda verde superan NCh 1333 y celda naranja superan ambas.

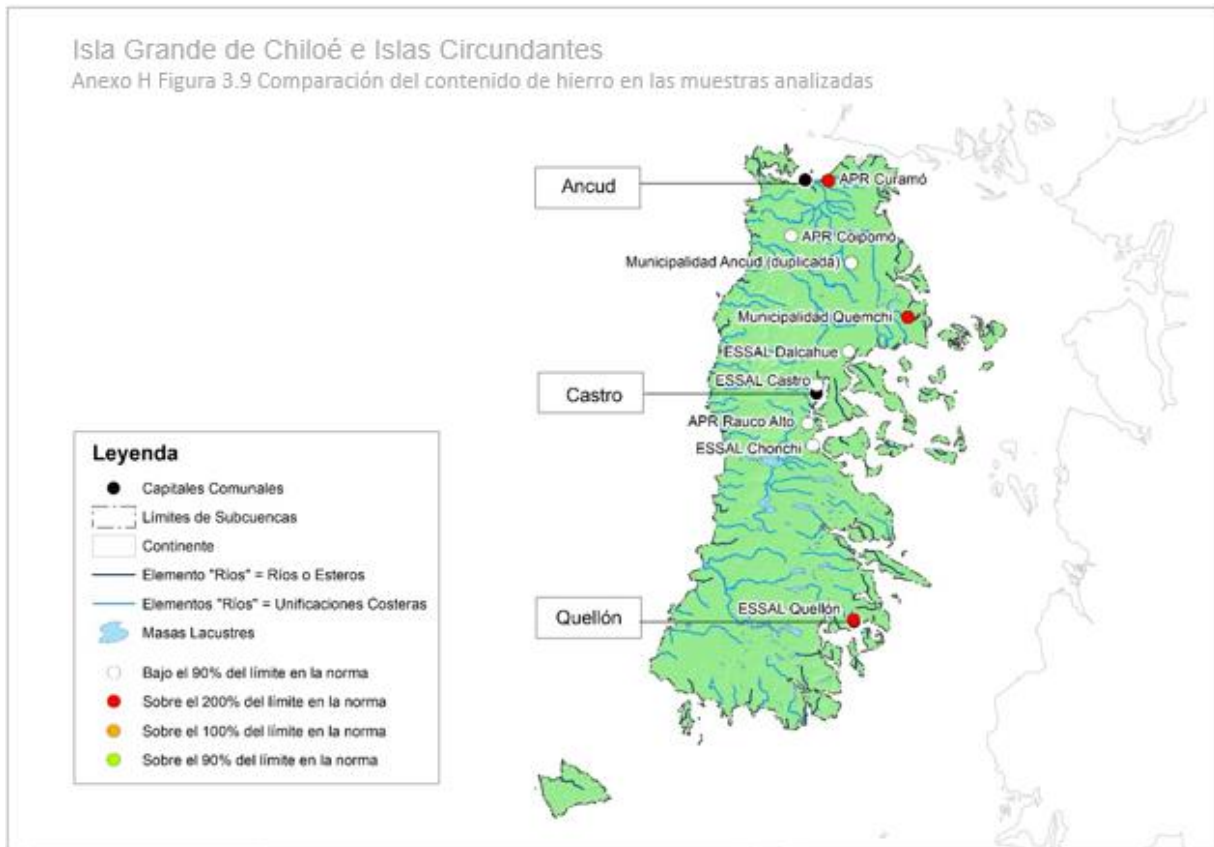
Fuente: Elaboración propia.

Hierro

El **hierro** (Fe) en sistemas acuáticos proviene de la mayoría de las rocas. Puede presentarse en estado de valencia Fe^{+2} o Fe^{+3} , su estabilidad depende del pH. En aguas subterráneas se encuentra principalmente como hidróxido ferroso ($Fe(OH)_2$) y tiende a precipitar en pH superiores a 8 formando complejos orgánicos o por actividad microbiana (Custodio & Llamas, 1983). Más de 5 [ppm] pueden ser tóxicos para plantas. La contaminación de hierro suele dar sabores indeseables al agua y causar manchas en ropas lavadas con ella (Custodio & Llamas, 1983; Evanglou, 1998).

La toxicidad por consumo de hierro y sus compuestos es rara, incluso suplementos de hierro con 30 [mg/día] han sido recomendado a mujeres embarazadas. Bibliografía sugiere que en adultos es aceptable consumir dosis diarias de entre 25-75 [mg/día], pero habría toxicidad si se forma el complejo *sulfato ferroso* ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) en dosis continuas desde 300 [mg] en infantes, y para adultos, desde 2 [g] (EPA, 1984).

El hierro es uno de los parámetros que registra las concentraciones más altas en los resultados de las muestras (Figura 3-9).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9 Comparación del contenido de hierro en las muestras analizadas.

De acuerdo a los resultados de laboratorio las estaciones afectadas por hierro son: Municipalidad de Quemchi que arroja un máximo de 37 [mg/L], seguido por APR Curamó (2.24 [mg/L]) y ESSAL Quellón (1.26 [mg/L]). Las concentraciones de estas estaciones sobrepasan tanto la norma NCh 1333, como la NCh 409, por lo que son de esperarse efectos tóxicos para cultivos y afecciones sobre el sabor y uso del agua.

Manganeso

El **manganeso** (Mn) proviene de forma natural como óxidos, carbonatos y silicatos del suelo. Puede provenir en menor medida por parte de residuos de baterías, o industrias asociadas al acero. Este elemento se puede acumular en granos, legumbres, nueces y frutas. En concentraciones mayores a 0,1 [mg/L] el manganeso otorga un sabor indeseable



al agua, favorece el crecimiento de bacterias y puede causar manchas cafés al lavar la ropa. En plantas puede ocasionar efectos similares al sodio causando manchas necróticas en cultivos (EPA, 2004; McFarland M. et al, 1984).

Tres muestras arrojaron concentraciones por sobre los 0,2 [mg/L] de manganeso, las que causarían afecciones sobre el sabor del agua y daños en cultivos según lo sugerido en bibliografía. Las estaciones afectadas (Municipalidad de Quemchi, APR Curamó y ESSAL Quellón) sobrepasan los límites establecidos en la norma NCh 409 ($Mn > 0,1$ [mg/L]) y NCh 1333 ($Mn > 0,2$ [mg/L]), como se destaca en la Tabla 3-2.

Molibdeno

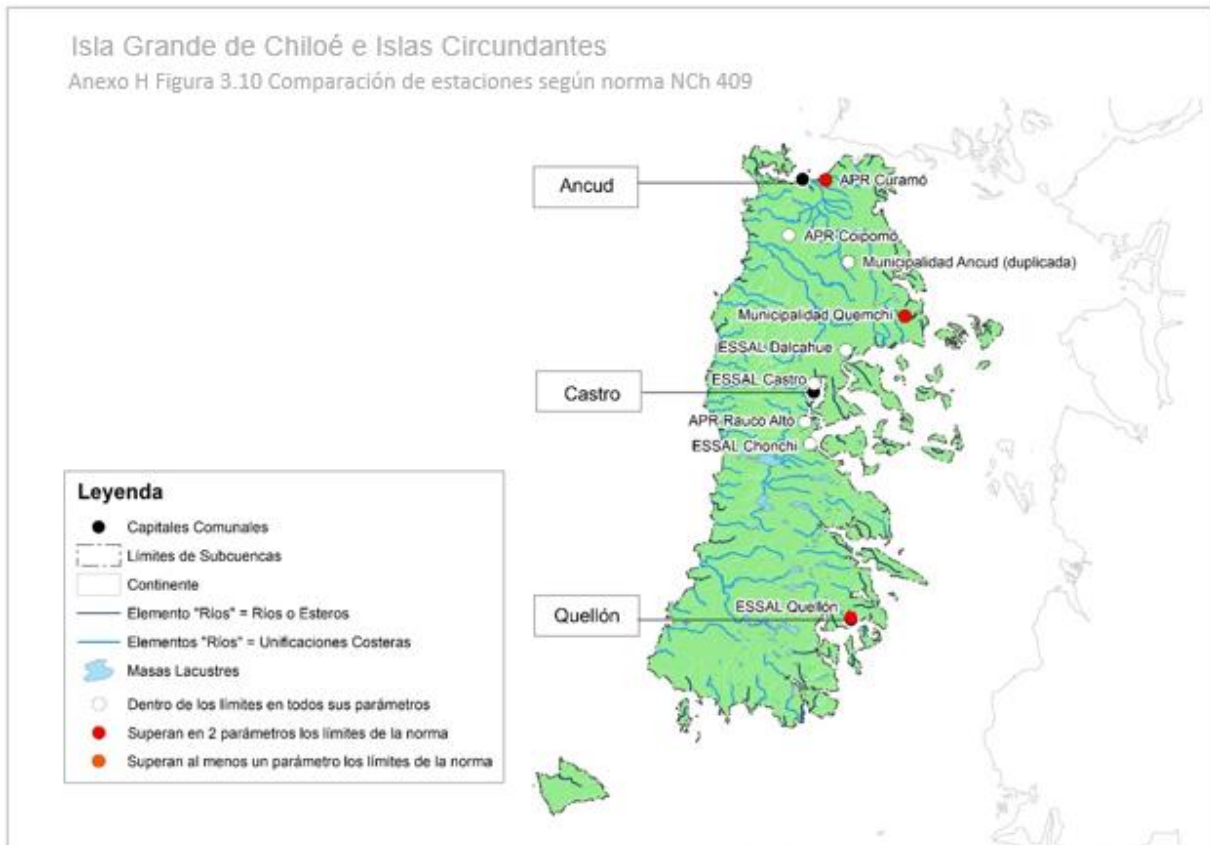
El **molibdeno** (Mo) es un componente traza natural de otros minerales, no se le encuentra como metal libre, pero puede llegar a la cuenca por meteorización de suelos. En solución acuosa se libera rápidamente como ion. Causa reducción en el funcionamiento del sistema renal y daños al hígado en mayores concentraciones. Bibliografía indica que no hay suficiente información para determinar si es cancerígeno (ATSDR, 2020).

En plantas el molibdeno es un micronutriente esencial absorbido solo en fracción soluble. La mayoría de las plantas suelen acumular entre 0,03 y 0,15 [mg/Kg], pero algunas leguminosas como la alfalfa podrían acumular más de 2 [mg/Kg]. La toxicidad es rara, pero podría ocurrir en plantas destinadas al consumo debido a la acumulación de molibdeno y sus efectos en la salud. La absorción de este elemento se ve disminuida en suelos con alto contenido de sulfatos (Zbinden, 2011).

Según literatura (Biblioteca Digital SAG 2), no afecta en el crecimiento de las plantas, pero puede ser tóxico a los animales rumiantes que se alimenten de dichas plantas. La muestra de la estación Municipalidad de Quemchi (M-5) es la única que sobrepasa los límites de la norma NCh 1333. Por otro lado, el Mo no se encuentra regularizado dentro de la norma NCh 409.

Conclusión respecto a la norma NCh 409

La Figura 3-10 ilustra las 10 muestras analizadas. Solo 3 estaciones presentan mala calidad de aguas y superan la norma NCh 409 en hierro y manganeso, que son parámetros asociados a afecciones organolépticas del agua (olor, sabor y color) y no causan toxicidad en personas para las concentraciones encontradas. Por otro lado, la dureza del agua en las muestras estudiadas se encuentra en concentraciones apropiadas para su consumo en todas las muestras.



Fuente: Elaboración propia

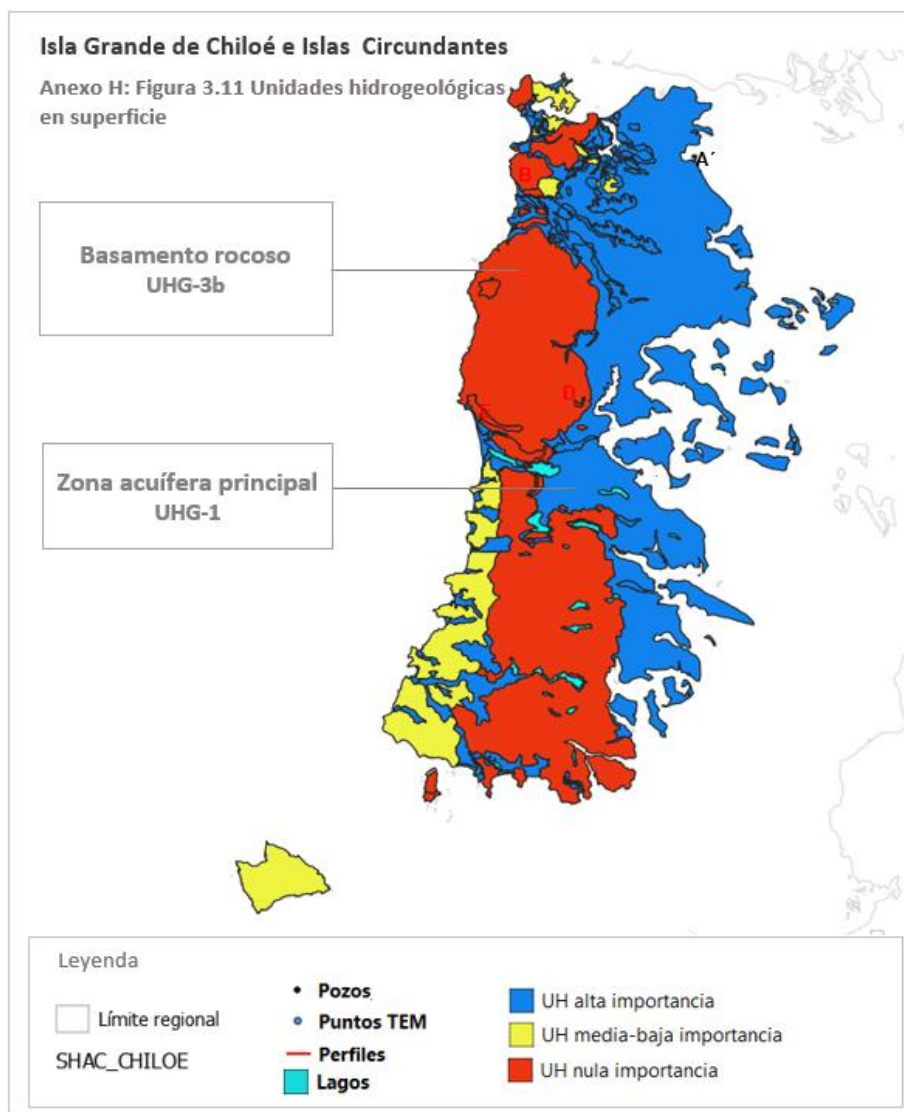
Figura 3-10 Comparación de estaciones según norma NCh 409.

Conclusión respecto a la norma NCh 1333

Respecto al uso del agua para el cultivo, según la bibliografía estudiada, 3 estaciones presentan concentraciones peligrosas para su uso sobre cultivos, asociado a la reducción de germinación y desarrollo de los brotes de cultivos. Estas 3 estaciones, APR Curamó, Municipalidad de Quemchi y ESSAL Quellón sobrepasan los límites de la norma NCh 1333. Por otro lado, la conductividad y el sodio porcentual se encuentra en calidad adecuada para su uso como cultivos y sin ocasionar daños por la presencia de sales en el agua.

3.2.4 Unidades hidrogeológicas

En cada estación TEM medida durante la campaña se entrega información sobre las resistividades eléctricas de los materiales estudiados en el subsuelo. En el apartado 3.2.2.2 se describen las 6 unidades geoelectricas definidas (UG-1, UG-2a, UG-2b, UG-2c, UG-3a y UG-3b), de acuerdo a las propiedades físicas de resistividad y permeabilidad que las caracterizan.



Fuente: Elaboración propia basado en Sernageomin (2003)

Figura 3-11 Unidades hidrogeológicas en superficie.

Se han determinado 3 unidades hidrogeológicas (UHG) en superficie (Figura 3-11), tomando como referencia la descripción de las distintas formaciones geológicas según Sernageomin (2003). De esta manera, se ha considerado de *alta importancia hidrogeológica* a aquellas litologías de formación reciente y composición de sedimentos no consolidados. Las litologías de *media a baja importancia hidrogeológica*, que están relacionadas con las secuencias sedimentarias consolidadas. Como UHG de *nula importancia hidrogeológica* se distinguen los complejos volcánicos de Ancud, rocas intrusivas del Eoceno y a los metamórficos que datan del Paleozoico-Triásico.

Tomando en cuenta la clasificación en unidades geoeléctricas y unidades hidrogeológicas en superficie, se han identificado en Chiloé 6 **unidades hidrogeológicas** principales, de acuerdo con sus características geológicas y propiedades hidrogeológicas. Estas son descritas como sigue:

- **UHG-1:** es una capa de alta importancia hidrogeológica, asociada a sedimentos no consolidados de buena permeabilidad y resistividades que oscilan entre los 40-500 [ohm-m] de distinto espesor (según estratigrafía de pozos supera los 70 [m]). Se estima que es la unidad de mayor rendimiento dada su permeabilidad (0,001 – 0,3 [cm/s]), con caudales concedidos superiores a los 5 [L/s].

- **UHG-2:** se subdivide en tipos **UHG-2a, UHG-2b y UHG-2c**, se compone de sedimentos consolidados (roca sedimentaria, no basamento) de media importancia hidrogeológica, representativos de permeabilidades medias a bajas. La diferencia entre la UHG-2a y UHG-2b está dada en que, en el caso de UHG-2b, esta contiene mayor concentración de sales que la UHG-2a, situación que se ha identificado en los perfiles geofísicos TEM como capas en profundidad de muy baja resistividad (1 a 10 [ohm-m]), lo que visibiliza la alta salinidad de los estratos inferiores. En términos de espesor, se estima que son mayores los espesores de sedimentos típicos de la UHG-2b (mayor a 100 [m]), mientras que la unidad UHG-2a se presenta en los sondajes en forma de estratos de poco espesor, pero en algunos sectores costeros puede alcanzar los 50 [m]. El rendimiento de esta unidad es medio, entendiendo el tipo de sedimentos que la componen.

Se debe destacar que en superficie y estratos subsuperficiales se identifican algunos sectores con altas resistividades que se asocian a gravas no saturadas y a estratos con contenido ferroso (muchas vertientes poseen un agua anaranjada) que pueden estar influyendo en la lectura de los TEM, elevando la resistividad del material. A este tipo de material se le identifica como UHG-2c, de bajo interés hidrogeológico y resistividad superior a 500[ohm-m].

- **UHG-3:** se reconocen unidades impermeables asociadas a estratos arcillosos (**UHG-3a**) y rocas del basamento (**UHG-3b**), muestras de muy baja a nula permeabilidad (<0,000001 [cm/s]) y resistividades variables, muy bajas para las arcillas y elevadas para las rocas metamórficas, volcánicas e intrusivas. Las arcillas se presentan en forma de

estratos lenticulares de poco espesor, aproximadamente 10 a 15 [m]. El rendimiento de esta unidad es muy bajo o nulo, ya que son litologías impermeables. El basamento rocoso en general es de espesor no definido.

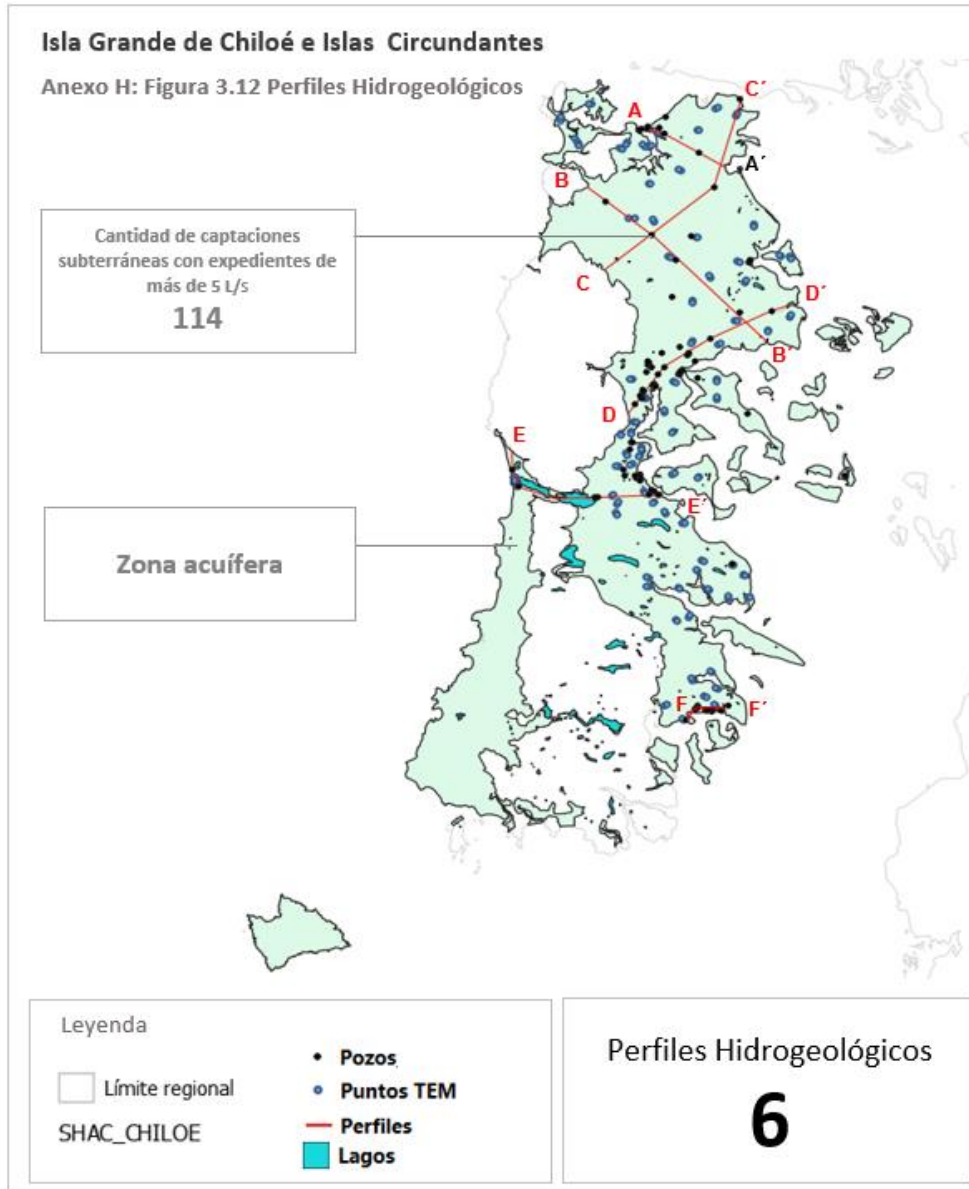
En la Tabla 3-3 se resumen las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas identificadas en el área de estudio.

Tabla 3-3 Propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas.

Tipo unidad hidrogeológica	Resistividad [ohm-m]	Permeabilidad [m/s]	Espesor aprox. [m]	Transmisividad [m ² /s]	Coef. Almac. (%)
UHG-1	40 - 500	$10^{-5} - 3 \times 10^{-3}$	70	$7 \times 10^{-4} - 0,21$	16
UHG-2a	10 - 40.	$10^{-8} - 10^{-5}$	50	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$	10
UHG-2b	1 - 10	$10^{-12} - 10^{-8}$	100	$10^{-10} - 10^{-6}$	7
UHG-2c	>500	-	10 - 50	-	-
UHG-3a	1 - 10	$10^{-12} - 10^{-8}$	10 - 15	$<1,5 \times 10^{-7}$	7
UHG-3b	<10 y >500	$<10^{-8}$ y $>3 \times 10^{-3}$	No definido	No definido	0

Fuente: Elaboración propia basada en (Arias D., 2012) y (Coduto, 1999)

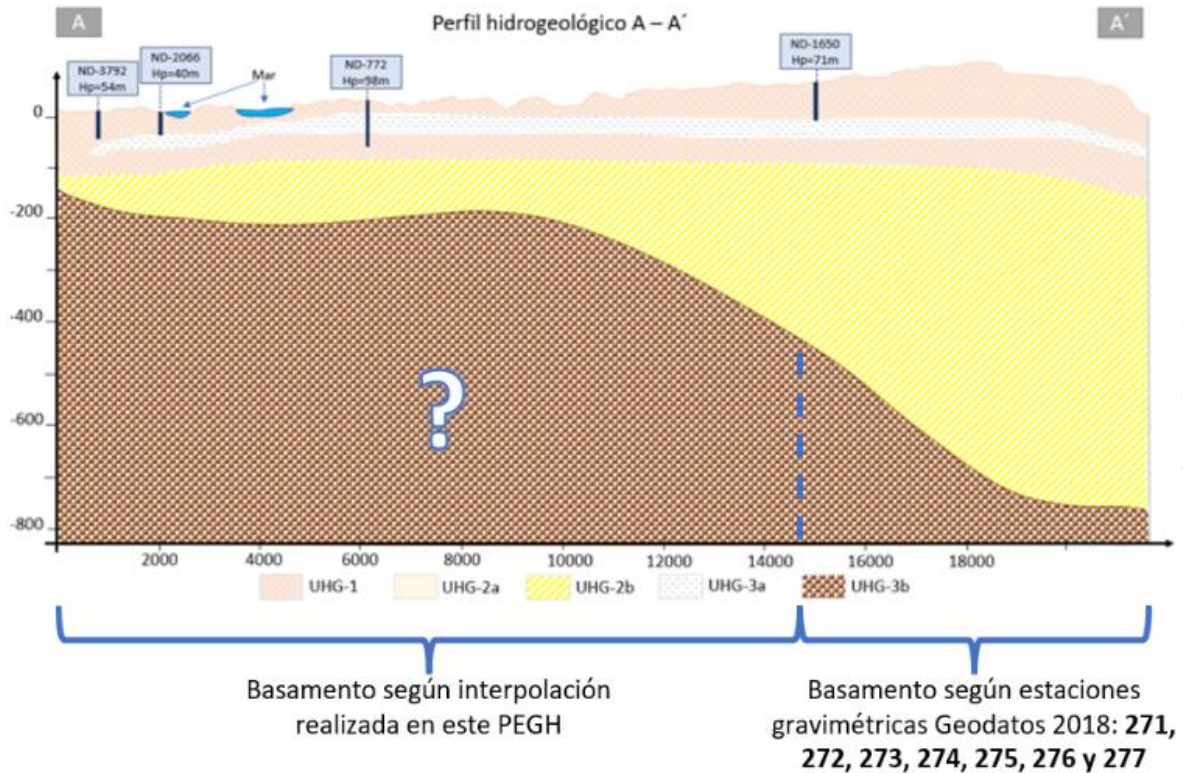
A partir de la definición de unidades hidrogeológicas se han construido **6 perfiles hidrogeológicos** en sectores de interés para tener una visualización aproximada de dichas unidades en la vertical. Estos se han confeccionado tomando como base principal la información que aporta la estratigrafía de pozos y los resultados de las campañas geofísicas. La ubicación de los distintos perfiles se puede observar en la Figura 3-12.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-12 Ubicación perfiles hidrogeológicos en el área de estudio.

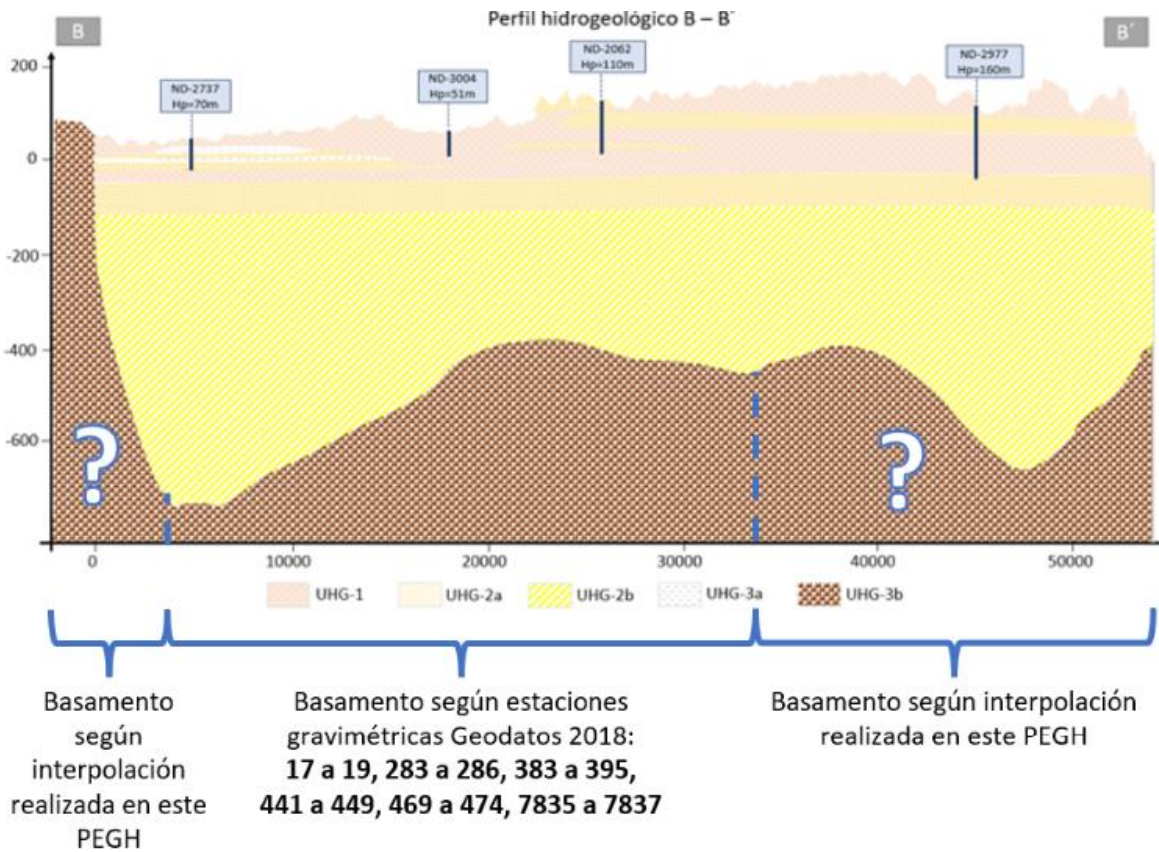
El perfil A-A' (Ilustración 3-18) describe como se profundiza el basamento e incrementa el espesor del relleno sedimentario desde la costa norte en Ancud hasta Linao, con dirección noroeste-sureste, reflejando hacia Linao una zona acuífera de alto interés.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-18 Perfil hidrogeológico A-A' en el área de estudio.

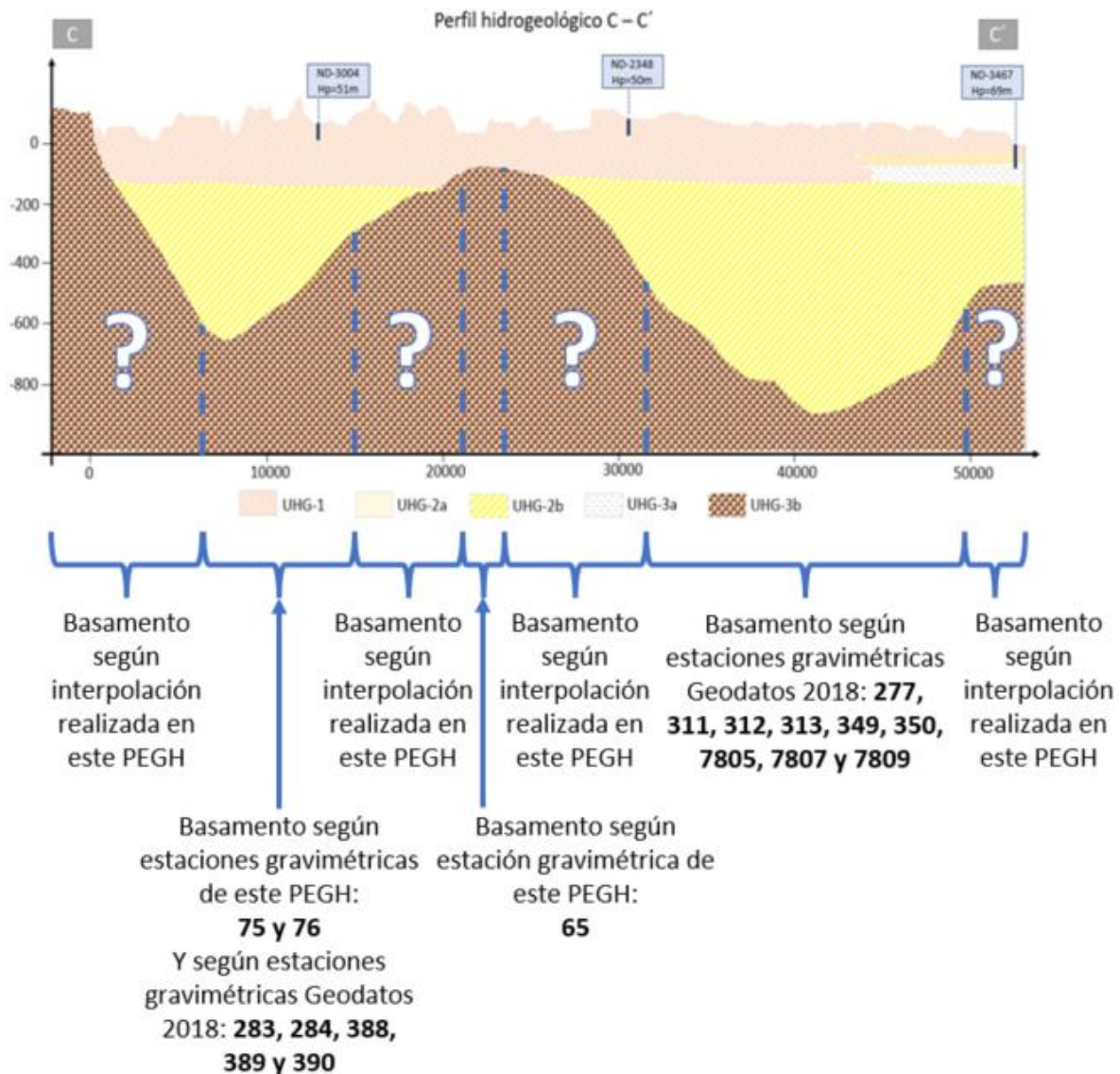
Con la misma dirección que el perfil A-A'2, el perfil B-B' (Ilustración 3-19) se indica desde las localidades Chepu hacia Dalcahue, donde se revela la sinuosidad del basamento a lo largo del perfil, indicando las zonas acuíferas de más interés de requerirse explotar el recurso subterráneo. Sin embargo, es necesario considerar que a mayor profundidad es probable el agua vaya disminuyendo su calidad debido al contenido salino en los estratos más profundos.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-19 Perfil hidrogeológico B-B' en el área de estudio.

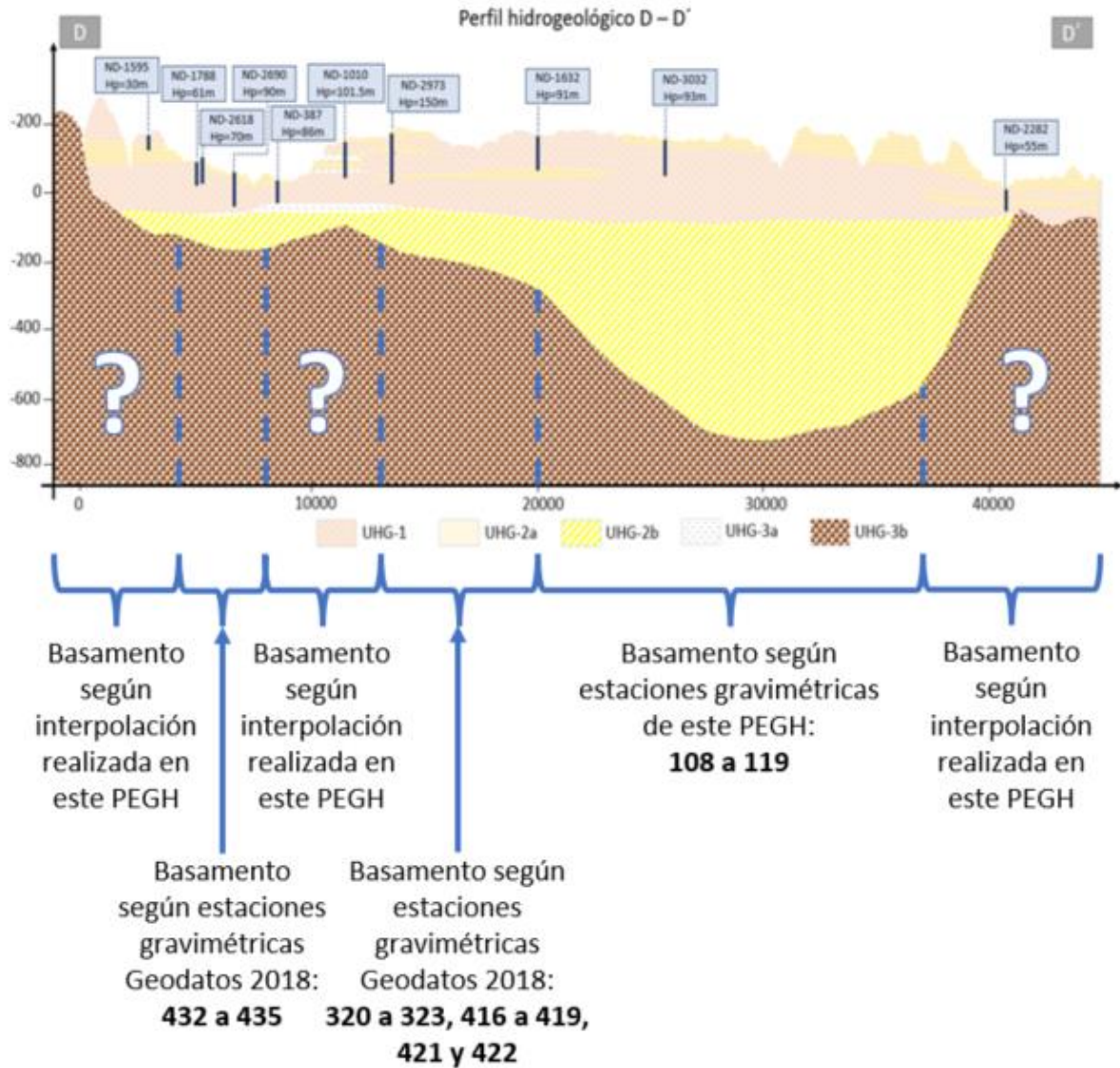
Se ha definido un perfil C-C' (Ilustración 3-20) desde la cordillera de la costa en el sector de Puntra hasta Chacao, con el objetivo de caracterizar en otra dirección la zona acuífera de Ancud con dirección suroeste-noreste. La gravimetría destaca la geología de la zona, mostrando un basamento que permite la formación de hoyas acuíferas profundas, superando los 800 [m] de espesor de relleno sedimentario.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-20 Perfil hidrogeológico C-C' en el área de estudio.

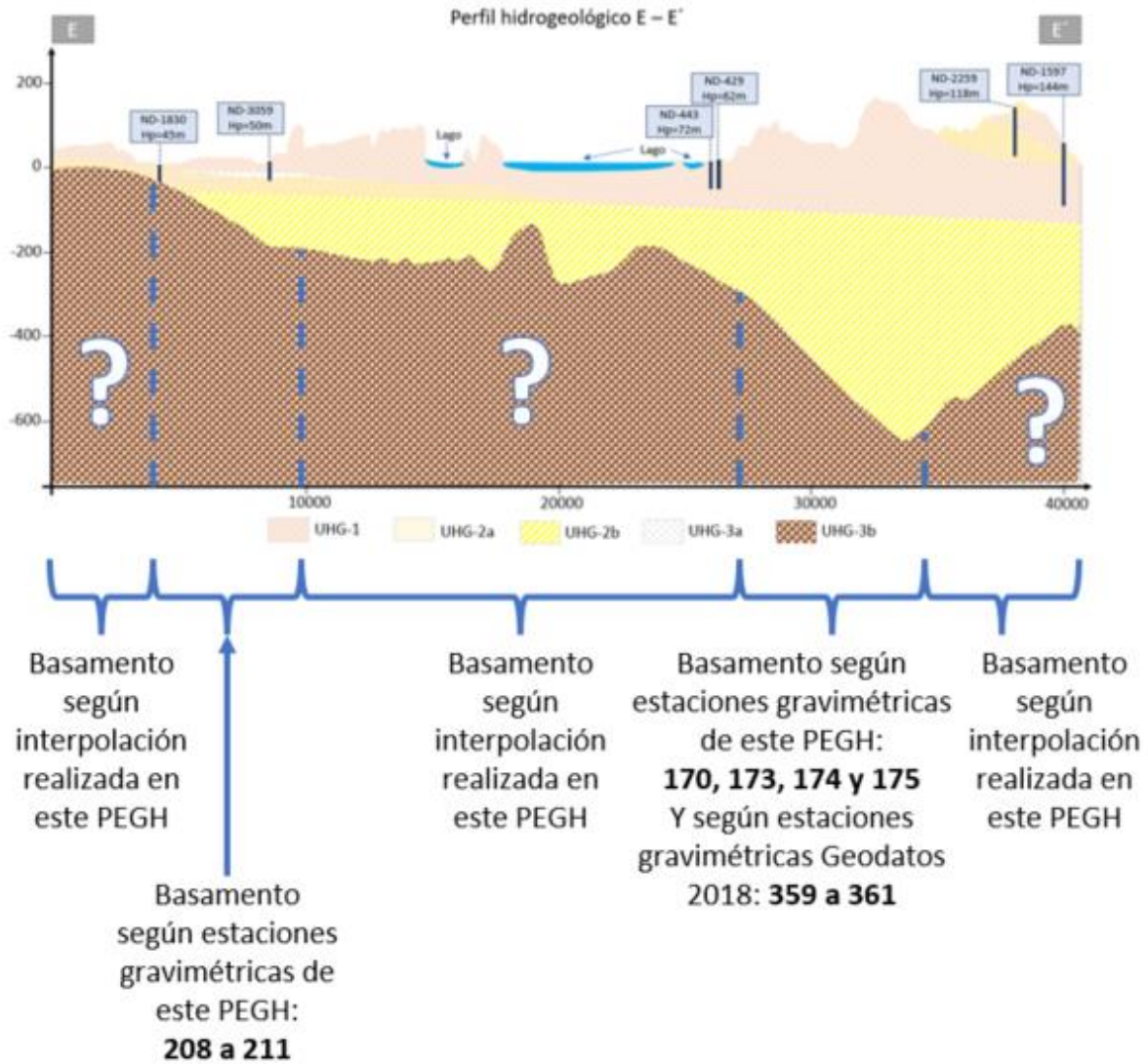
Con unidades de distinta composición se muestra el perfil D-D' (Ilustración 3-21) en el sector Castro-Dalcahue. Dada la proximidad de la localidad de Castro a la cordillera de la costa, existe un menor espesor de los estratos hidrogeológicamente importantes, sin embargo, el basamento se profundiza notablemente hacia Dalcahue, superando los 600 [m] de sedimentos consolidados y no consolidados.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-21 Perfil hidrogeológico D-D' en el área de estudio.

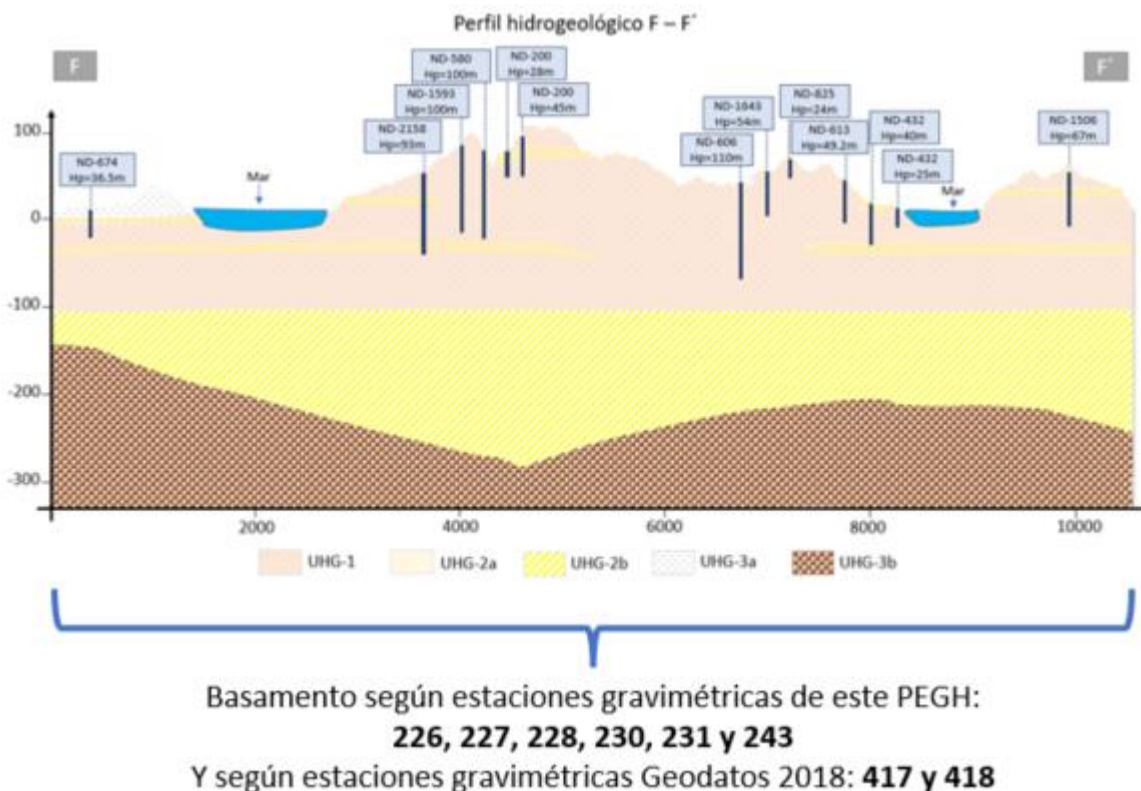
Otro sector importante hidrogeológicamente se visualiza en el territorio de Chonchi. Se ha definido un perfil E-E' con dirección oeste-este (Ilustración 3-22). Se identifica un potente espesor sedimentario de aproximadamente 600 [m] puntualmente hacia el este, característico de litologías con alta y media-baja importancia hidrogeológica.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-22 Perfil hidrogeológico E-E' en el área de estudio.

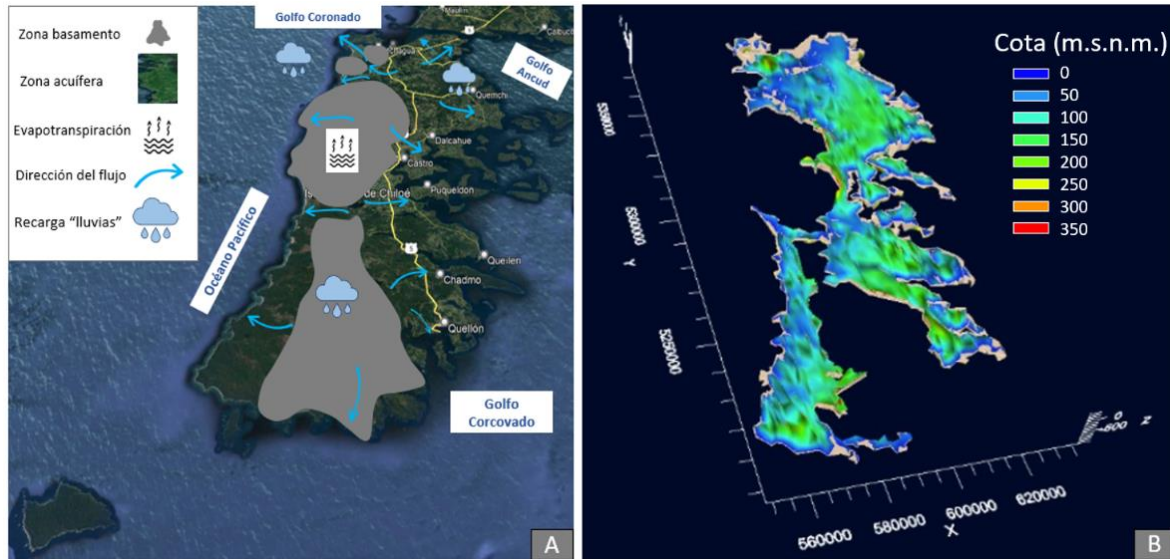
Dado que en Quellón hay varios sondajes que permiten caracterizar los estratos en profundidad, se ha marcado el perfil F-F' con dirección aproximada oeste-este (Ilustración 3-23). De esta manera, se refleja un basamento un poco más elevado, con espesores sedimentarios que superan los 250 [m] con unidades de alta importancia seccionada por lentes que representan sedimentos más consolidados.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-23 Perfil hidrogeológico F-F' en el área de estudio.

En síntesis, la información relevante obtenida en terreno, su procesamiento e interpretación, la estratigrafía de varios sondajes, y la comprensión hidrodinámica superficial y subterránea del área de estudio, ha permitido realizar un acercamiento al funcionamiento hidrogeológico del área de estudio dada la dinámica regional y local. Muestra de ello se indica también en la siguiente ilustración, mostrando en planta el comportamiento sintetizado del ciclo hidrológico (Ilustración 3-24 A). Esto se ve reflejado en perfiles hidrogeológicos contruidos, con sectores acuíferos profundos con capacidad de almacenar los recursos hídricos que percolan hasta los estratos profundos.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-24 Representación geoespacial del acuífero en el área de estudio.

Se adjunta la visualización 3D de la zona acuífera con las unidades hidrogeológicas que han sido definidas conforme a las características del área de estudio (Ilustración 3-24 B). Destaca el espesor del estrato de la unidad hidrogeológica de alta salinización (ver ilustraciones anteriores), que se estima por interpretación de los perfiles TEM con muy baja resistividad en general en toda el área de estudio. Se puede establecer que el acuífero total de Chiloé es característico de una primera capa asociada a la unidad hidrogeológica de alta importancia hidrogeológica, en ocasiones sobreyacida por capas de media a nula importancia hidrogeológica dada la estratigrafía y aspectos geoelectrónicos de los distintos materiales del relleno sedimentario. Los estratos asociados a la unidad hidrogeológica de media-baja importancia, en general es de poco espesor, pero puede puntualmente ser mayor. El basamento rocoso de la isla de Chiloé y circundantes en general se encuentran a gran profundidad, pero hay sectores donde este se encuentra más cercano a la superficie. Se requiere contar con más estudios para definir con más precisión las características dinámicas del acuífero.

3.2.5 Basamento

La generación de la capa de profundidad de basamento implica varios pasos previos. Se generan varias capas que complementan la obtención de una interpolación más acertada de acuerdo con las características de cada sector. Primeramente, es necesario definir el perímetro del límite entre el basamento y la zona acuífera, o contacto acuífero-basamento. Los datos de estudios geofísicos de años precedentes (CNR, 2019), la información estratigráfica que incluyen parte de los expedientes de pozos (Base de datos DGA), así como, una red de puntos auxiliares distribuidos en distintos puntos de la cuenca, que incluyen los bordes, cerros, límites en el sector costero y puntos en el mar.

El perímetro del contacto entre el basamento y la zona acuífera es una capa de polígonos realizada minuciosamente, tomando como base los mapas geológicos (1:1.000.000) e hidrogeológico, así como la imagen satelital. Después es complementada con la información que reportan estudios geofísicos precedentes y los asociados al presente plan, como forma de reflejar con mayor precisión donde se ubica la zona acuífera de la cuenca.

La información que reportan los pozos y los estudios geofísicos para esta cuenca que tiene una extensión de alrededor de 9096 [Km²] son insuficientes para generar una interpolación acertada de las capas subterráneas. Por este motivo se han creado varias capas con el objetivo de tener una representación hidrogeológica adecuada. Los puntos auxiliares están distribuidos entre los puntos medidos en estaciones gravimétricas, además de los pozos. Un método empleado en sectores acuíferos angostos es el conocido **método de las transectas**, el cual consiste en hacer transectas perpendiculares a la dirección del valle, estimando la profundidad a la que se encuentra el basamento de forma proporcional a algún valor de un punto cercano que sea más fidedigno. En zonas abiertas se definen los puntos promediando los valores que se observen de mediciones gravimétricas, junto con la información de si existen pozos cercanos que su profundidad (expediente) indique que llegan a roca. Se consideran los resultados de los perfiles TEM en caso de que sean validados al comparar con el registro de alguna estación gravimétrica o pozo.

Se ubican puntos de borde en el límite entre el basamento y la zona acuífera, así como en los cerros, con un valor -10 m de profundidad, para un mejor procesamiento durante la interpolación. En el borde costero se agregan puntos con un valor mayor de profundidad (alrededor de 50 [m]) considerando los valores que indican las estaciones gravimétricas más cercanas. De esta manera se complementarían las profundidades del basamento estimada en los puntos externos de mar (-100 [m]) con el objetivo de interpolar de mejor manera toda la costa del área estudiada, donde se pueden agregar hasta 3 perfiles con los valores que se interpretan puede existir de profundidad en cada sector costero.

Después de realizar todo este detallado proceso, en la tabla de atributos de cada capa se le indican las coordenadas (**x**, **y**) en el sistema de proyección correspondiente (WGS 84/UTM zona 18S) y se exportan en formato .csv, las que posteriormente son incluidas en



un solo archivo. De esta manera, este nuevo archivo contiene la información de la gravimetría, el dato de la profundidad de los pozos donde la perforación llegó a la roca, y sumado a ello, toda la data de puntos complementarios creados.

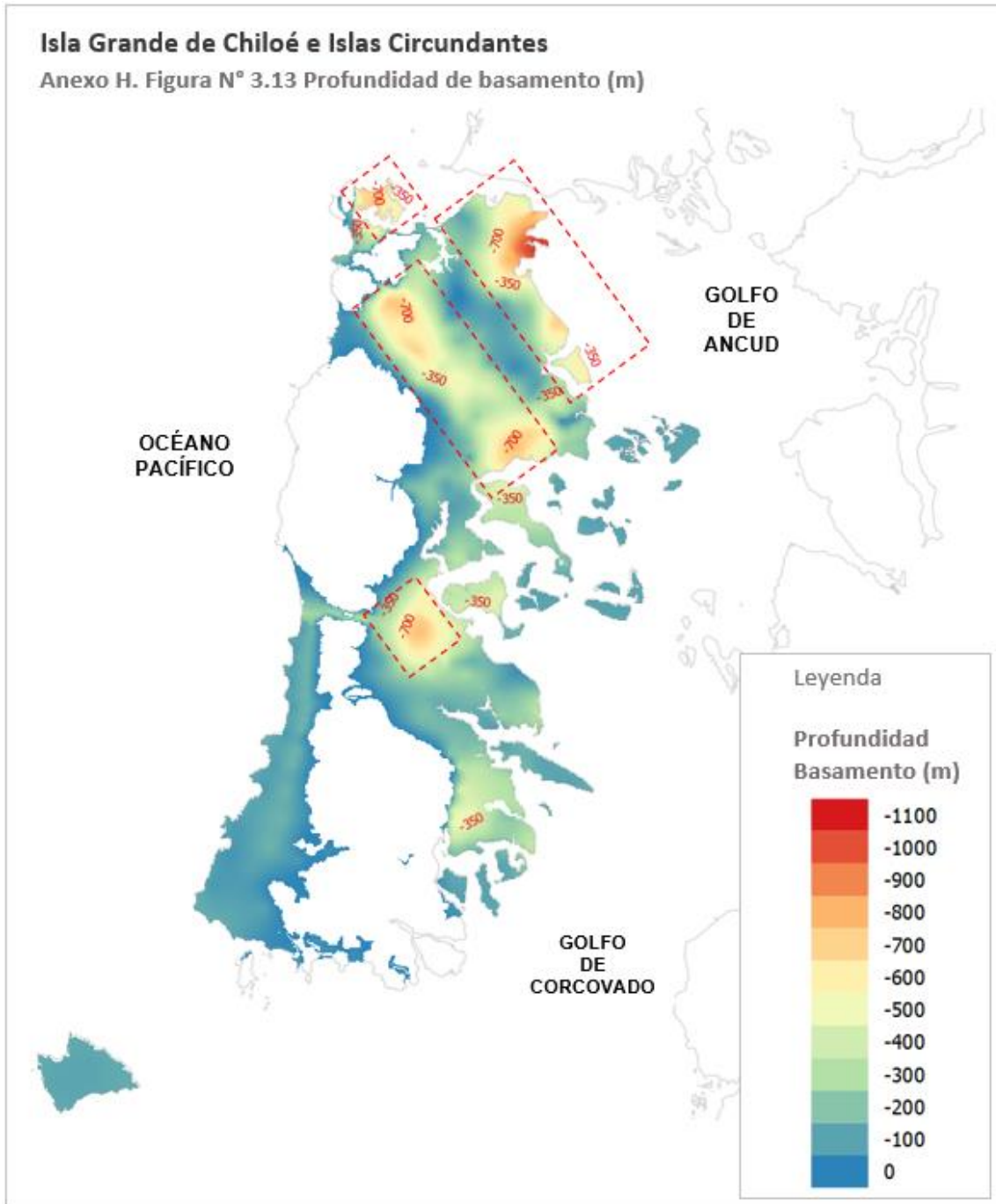
Este archivo unificado es cargado al Surfer en la opción Grid/Data, donde se indican las coordenadas y la variable a interpolar. Se establecen los mínimos y máximos de las coordenadas y se indica un espaciamiento de 10 m para una mejor representación de las zonas acuíferas angostas. Realizando el paso de la interpolación se obtiene un ráster de profundidad del basamento. Esta capa ráster es añadida al QGIS, verificándose la conexión del acuífero en toda su extensión. Cuando esta conexión no resulta, debe ser revisado el sector en análisis, añadir los puntos auxiliares necesarios, recalcular las coordenadas y nuevamente realizar el proceso de unificar el archivo e interpolar en Surfer, para la obtención de la capa que más represente la morfología del basamento.

La capa final de profundidad de basamento en las islas Chiloé y circundantes se puede observar en la Figura 3-13.

En las cuencas de estudio destacan varias zonas con acuíferos profundos (líneas discontinuas en Figura 3-13), que puntualmente tienen un alcance mayor a los 700 [m], incluso superando los 1000 [m] de profundidad, indicando grandes reservorios con acumulación de agua. Estos sectores de interés están ubicados preferentemente al norte y oriente de la zona acuífera, resaltando el área septentrional del área de estudio, que han sido respaldadas por mediciones gravimétricas de precisión.

En la Ilustración 3-25 se detallan las zonas más profundas y por tanto más importantes del basamento en la isla grande de Chiloé. La profundización más notable se registra en el sector norte-noreste donde se ubican las localidades de Chacao y Manao, pertenecientes a la comuna Ancud. También se visualiza la existencia de embalses subterráneos de gran dimensión con alcances puntuales que superan los 700 [m] de profundidad, en las localidades Quetalmahue (al norte poniente de Ancud), Casas Viejas hacia Puntra y Dalcahue (zona central de la mitad norte de la zona acuífera), así como Chonchi, que se ubica al oriente del lago Huillinco.

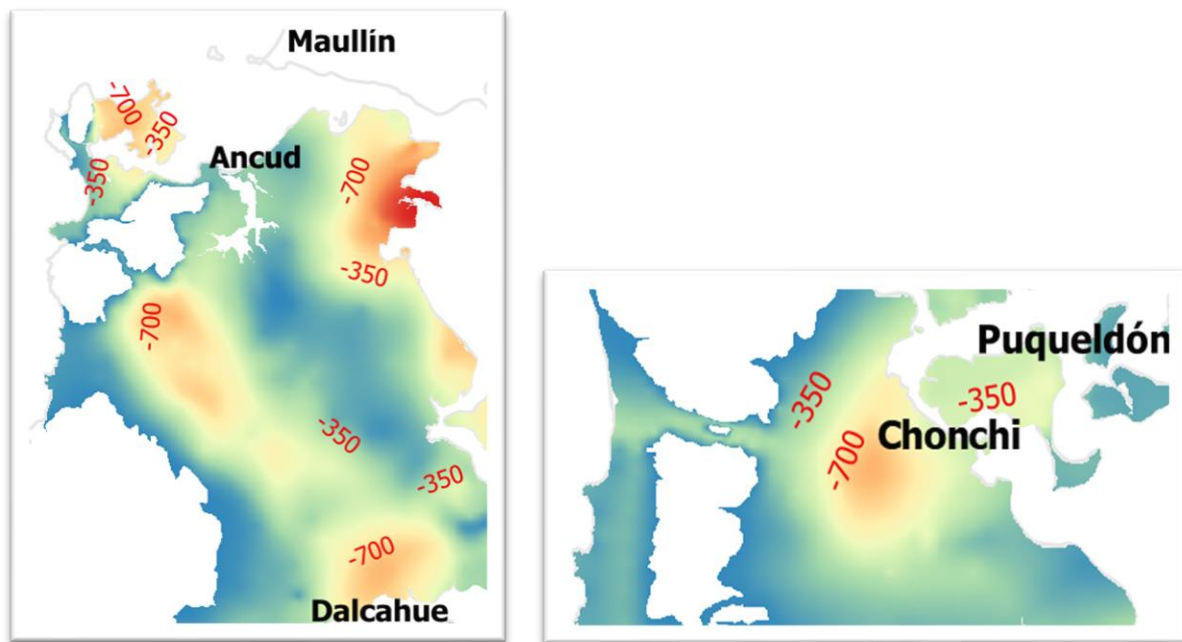
Estos grandes espesores de sedimentos asociados a profundidades superficiales de la napa subterránea reflejan el alcance de la capacidad de almacenamiento del acuífero, y por tanto su volumen húmedo. Esta información permite una mejor ubicación de pozos profundos para sectores donde la disponibilidad del recurso resulte disminuida.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-13 Profundidad de basamento en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

De la capa de profundidad de basamento se distingue que parte de los sectores más profundos se ubican en zonas costeras (Quetalmahue, Chacao-Manao, Quemchi, Dalcahue y Chonchi). Sin embargo, existe otra zona importante que supera los 700 [m], la cual se profundiza al norte del macizo que constituye la cordillera de la costa (sector Casas Viejas - Chepu - Puntra) (Ilustración 3-25).



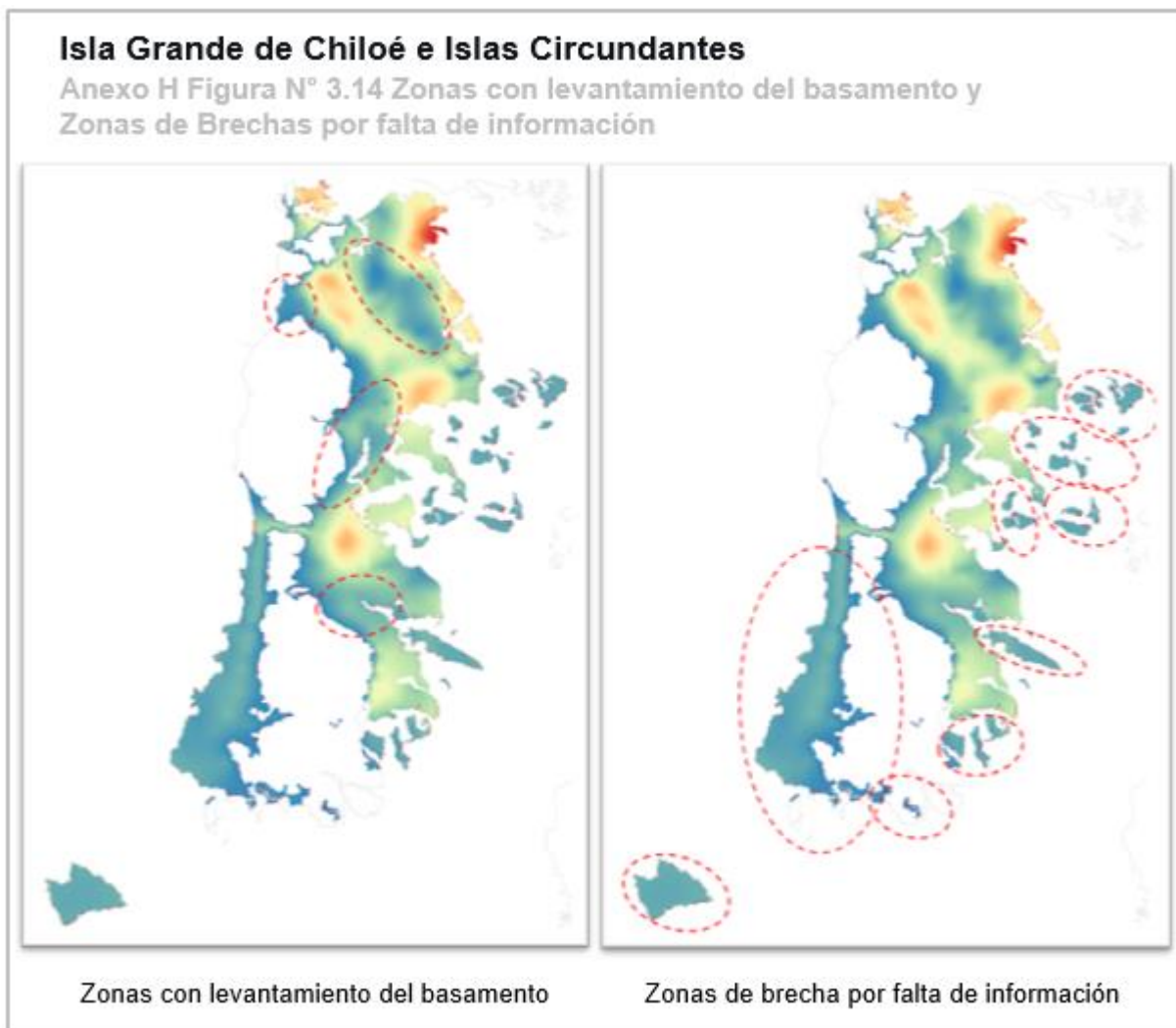
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3-25 Detalle de las zonas más profundas del acuífero en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes

La principal recarga acuífera en Chiloé proviene de la pluviometría, aunque en los últimos años los períodos de sequía han incidido negativamente. Por la forma de la superficie del terreno todas las aguas (superficiales o subterráneas) van a desembocar al mar, por lo que el tiempo de residencia de las aguas en el acuífero se infiere que es corto.

En la Figura 3-14 (imagen izquierda), se destacan al oriente con líneas discontinuas algunos sectores donde se observa un levantamiento del piso del acuífero (tonos azules), reflejando un menor volumen húmedo donde se almacena el vital recurso. La primera zona se ubica al norte con dirección noroeste-sureste al interior de la comuna de Ancud, la segunda zona se levanta con dirección noreste-suroeste en la comuna de Castro y la tercera se encuentra

entre las comunas Chonchi y Quellón. Como parte del sector poniente se observa al noroeste, área de Chepu, que de igual manera se levanta el basamento, próximo a donde se visualiza que aflora el macizo cordillerano costero.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-14 Zonas de levantamiento y Zonas con brecha de información en el área de estudio

Es necesario acotar que hay zonas con brechas de información, destacadas con líneas rojas discontinuas en la Figura 3-14 (imagen derecha), pues no cuentan con estudios que permitan conocer el alcance de la profundidad del basamento. Dichas zonas se asocian a

las islas circundantes donde no se realizaron estudios geofísicos (con excepción de Cauahue, Quinchao y Lemuy), así como todo el sector sur-poniente que se ubica a continuación de la localidad de Cucao, ya que no existe acceso vial y es un parque nacional.

Las islas circundantes definidas como brechas que están ubicadas al este y sur de la isla grande, no poseen una población significativa, y para definir la profundidad de basamento se ha tomado de referencia una profundidad fija asociada a las mediciones realizadas más hacia el oriente. Al sur de Cucao, nos existe red vial que permita el acceso a la zona, es por ello que considerando la imagen satelital en Google Earth, se han definido profundidades variables de acuerdo a las características del relieve (cauces y cerros) y cotas existentes.

3.2.6 Sectorización de los Acuíferos

A partir de las capas de profundidad de basamento y división de los Sectores de Aprovechamiento Común (SHAC), además de identificar las zonas más profundas del embalse subterráneo, se han definido los sectores acuíferos para las cuencas de las islas Chiloé y circundantes. En total se generaron 44 sectores acuíferos (Figura 3-15).

La cantidad de sectores acuíferos está dada debido a que las islas circundantes constituyen individualmente un SHAC, y como parte de zona acuífera de la isla grande se identifican 8 sectores que presentan las mayores dimensiones. Estos se nombran como: Ancud (1 y 2), Castro, Chepu, Piuchén, Huillinco (1 y 2) y Quellón.

Es preciso indicar que se ha subdividido el SHAC de Ancud, debido al enlace angosto que este presenta hacia el oeste, con dirección a Quetalmahue y también en un estrecho que se forma al norte. También, se ha subdividido el SHAC Huillinco sectorizando el área con estudio (Huillinco_2) de la que no posee información (Huillinco_1). De esta manera, se pueden individualizar en distintas áreas el reservorio subterráneo, para favorecer un mejor cálculo de flujos subterráneos y conocer la dirección preferente de estos. Este cálculo se realiza en el límite más estrecho donde se divide los sectores acuíferos, y considerando las capas de profundidad de basamento y nivel estático se define el área del acuífero, para después asociar en fórmula matemática la permeabilidad promedio en ese límite definido, el largo del perfil perpendicular y la diferencia de gradiente a partir de la cota del nivel estático aguas arriba en el límite establecido.

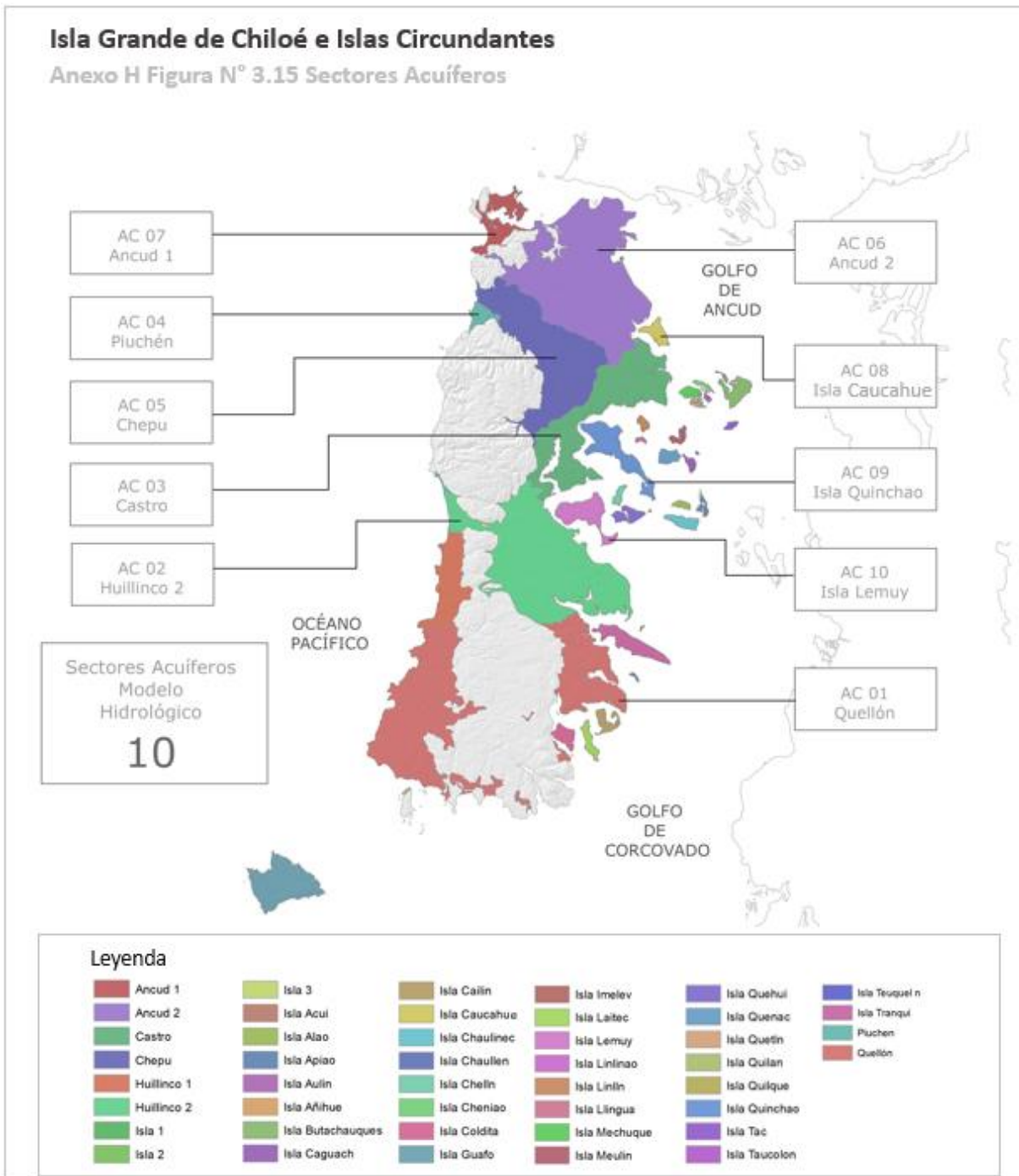
Los sectores acuíferos asociados a las mayores profundidades del basamento son Ancud_1, Ancud_2, Chepu, Castro y Huillinco_2 (Figura 3-13 e Ilustración 3-25).

Entre las islas circundantes donde el techo del basamento resulta de gran interés encontramos a Cauahue, Quinchao y Lemuy. Estas islas contaron con mediciones geofísicas, lo cual evidencia el espesor acuífero existente.



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

Finalmente, precisar que para la Modelación Hidrológica se han considerado solo 10 sectores acuíferos, 7 sectores pertenecen a la isla grande y 3 a las islas circundantes que cuentan con mediciones geofísicas (AC_01 Quellón, AC_02 Huillinco2, AC_03 Castro, AC_04 Piuchén, AC_05 Chepu, AC_06 Ancud2, AC_07 Ancud1, AC_08 Isla Caucahue, AC_09 Isla Quinchao y AC_10 Isla Lemuy).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-15 Sectores acuíferos de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

3.2.7 Propiedades Hidrogeológicas

El funcionamiento hidrogeológico de una cuenca puede ser conocido a través del comportamiento de distintas propiedades hidrogeológicas. Tal es el caso de la permeabilidad o conductividad, coeficiente de almacenamiento y coeficiente de infiltración.

La capa de **permeabilidad** se ha construido a partir de la interpretación de los perfiles TEM que fueron medidos en las campañas de terreno. Entendiendo que el método geofísico de prospección TEM comparado al gravimétrico es menos preciso, se toma como capa de base la profundidad de basamento con el objetivo de validar las profundidades que pudiera alcanzar la zona acuífera.

Los datos de este parámetro se generan de forma cuantitativa, donde se asocian rangos de resistividad eléctrica [ohm/m] a rangos de permeabilidad [cm/s] de materiales con distinta composición (gravas, arenas gruesas, arenas medias, arenas finas, limos y arcillas) (Arias D., 2012; Coduto, 1999). Se consideran valores iniciales y finales de resistividad y permeabilidad para cada tipo de material y se establece un cálculo lineal de pendiente e intercepto (Tabla 3-4).

Tabla 3-4 - Datos para el cálculo de permeabilidad según correlación lineal.

Material	Resistividad [Ohm-m]	K [cm/s]	K _i	K _s	R _i	R _s	Pendiente	Intercepto
Arenas gruesas y/o presencia de Gravas	250 a 500	0,1 a 0,3	0,1	0,3	250	500	0,0008	-0,1
Arenas medias	150 a 250	0,05 a 0,1	0,05	1	150	250	0,0005	-0.025
Arenas finas	100 a 150	0,01 a 0,5	0,01	0,05	100	150	0,0008	-0,07
Arenas muy finas	40 a 100	0,0001 a 0,01	0,001	0,01	40	100	0,00015	-0,005
Limos	10 a 40	0,000001 a 0,0001	0,000001	0,001	10	40	0,0000333	-0,000332
Arcillas	1 a 10	0,0000000001 a 0,000001	1E-10	0,000001	1	10	1,111E-07	-1,11E-07

Fuente: Elaboración propia basada en (Arias D., 2012) y (Coduto, 1999)

$$K(R) = K_i + (R - R_i) \cdot \frac{K_s - K_i}{R_s - R_i} \quad \text{correlación lineal}$$

Donde:

- K_i : Permeabilidad inicial [cm/s]
 K_s : Permeabilidad final [cm/s]
 R_i : Resistividad inicial [Ω -m]
 R_s : Resistividad final [Ω -m]
 R : Resistividad [Ω -m]
 $K(R)$: Permeabilidad en función de R [cm/s]

Estos cálculos previos generan la base para determinar los valores de las permeabilidades por cada capa en sentido vertical del perfil interpretado (73 perfiles en total que comprenden las 152 estaciones o puntos TEM). Se impone una condición matemática con la función 'SI. CONJUNTO' que asocia los valores obtenidos de pendiente e intercepto de la fórmula lineal, discretizando de un valor de resistividad eléctrica se obtiene la permeabilidad de la capa analizada. Con ese método se pueden conocer las permeabilidades de todas las capas verticales de las estaciones TEM. Con la sumatoria de los espesores de las capas, se genera el espesor total en una estación TEM, e identificando la cota del nivel estático en el perfil de resistividad, así como su profundidad, permite la obtención del espesor húmedo en cada punto TEM, para finalmente obtener mediante fórmula la permeabilidad promedio [cm/s] por estación TEM y convertir su valor a la unidad de medida en que se ha de interpolar la capa [m/día].

$$K = \frac{\Sigma (K1*H1)+(K2*H2)+\dots+(Kn*Hn)}{Hs}$$

Donde:

- K permeabilidad promedio [cm/s]
 $K1, K2, \dots, Kn$ permeabilidad de cada capa vertical en una estación TEM [cm/s]
 $H1, H2, \dots, Hn$ espesor de cada capa vertical en una estación TEM [m]
 Hs espesor saturado en perfil vertical de cada estación TEM [m]

Un dato importante que es considerado es la permeabilidad que arrojan los cálculos de los parámetros que ofrecen expedientes de pozos que indican pruebas de bombeo para un nivel constante. Para ello se ha ocupado la metodología del cálculo de transmisividad de Meyer (Brown R.H. et al., 1963).

El paso siguiente, es generar una red de puntos auxiliares que favorezcan una interpolación más real de los sectores donde no contamos con información de geofísica ni pruebas de bombeo. Un método ocupado es definir según las permeabilidades que indican las formaciones geológicas más cercanas que caractericen a esas áreas, indicando mejores permeabilidades hacia los cauces. También se deben indicar puntos auxiliares alrededor de la costa para que se genere una buena interpolación de la capa en zonas costeras.

Seguido a ello, se establecen los atributos de coordenadas para todos los puntos auxiliares, se exporta a .csv y se genera otra data en fomato .csv que indique por columnas la información de las coordenadas y permeabilidades de las 152 estaciones TEM, los pozos de bombeo y los puntos auxiliares. Estos datos unificados son cargados al grid del Surfer, se indican los datos **X**, **Y** y **K**, estableciendo los valores máximos y mínimos y en espaciamiento un poco menos conservador que el ocupado para la capa de profundidad de basamento, que posteriormente genera la interpolación de la capa de permeabilidad. De resultar una interpolación que no sea satisfactoria, se procede a revisar la data de puntos utilizada, y definir si es necesario densificar la cantidad de puntos auxiliares para mejorar la interpolación.

Las conductividades que se registran en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes se muestran en la capa de permeabilidad de la Figura 3-16 y varían en el rango de 0,01 y 49,5 [m/día].

La geología de la zona acuífera es importante analizarla al interpretar la capa de permeabilidades. Las formaciones que poseen sedimentos con menor conductividad son reflejo de una mayor compactación, que puede estar dado por su edad geológica y por estar sometido a procesos tectónicos que hayan favorecido la disminución de su porosidad. Sin embargo, las permeabilidades elevadas indican zonas con materiales más conductivos, porosos y transmisibles que favorecen un fácil movimiento del flujo subterráneo a través de ellos.

Se destacan las mayores permeabilidades hacia el oriente de la isla grande, que alcanzan puntualmente los 49 [m/día] en sectores costeros donde se visualizan tonos grises más intensos (Figura 3-17), reflejando la existencia de formaciones geológicas gravosas y arenosas que permiten una mejor circulación del agua a través de sus poros. Sin embargo, al poniente se observan permeabilidades más bajas, como indicativo de litologías con menor permeabilidad, porosidad y capacidad de transmisividad de fluidos a través de estos sedimentos.

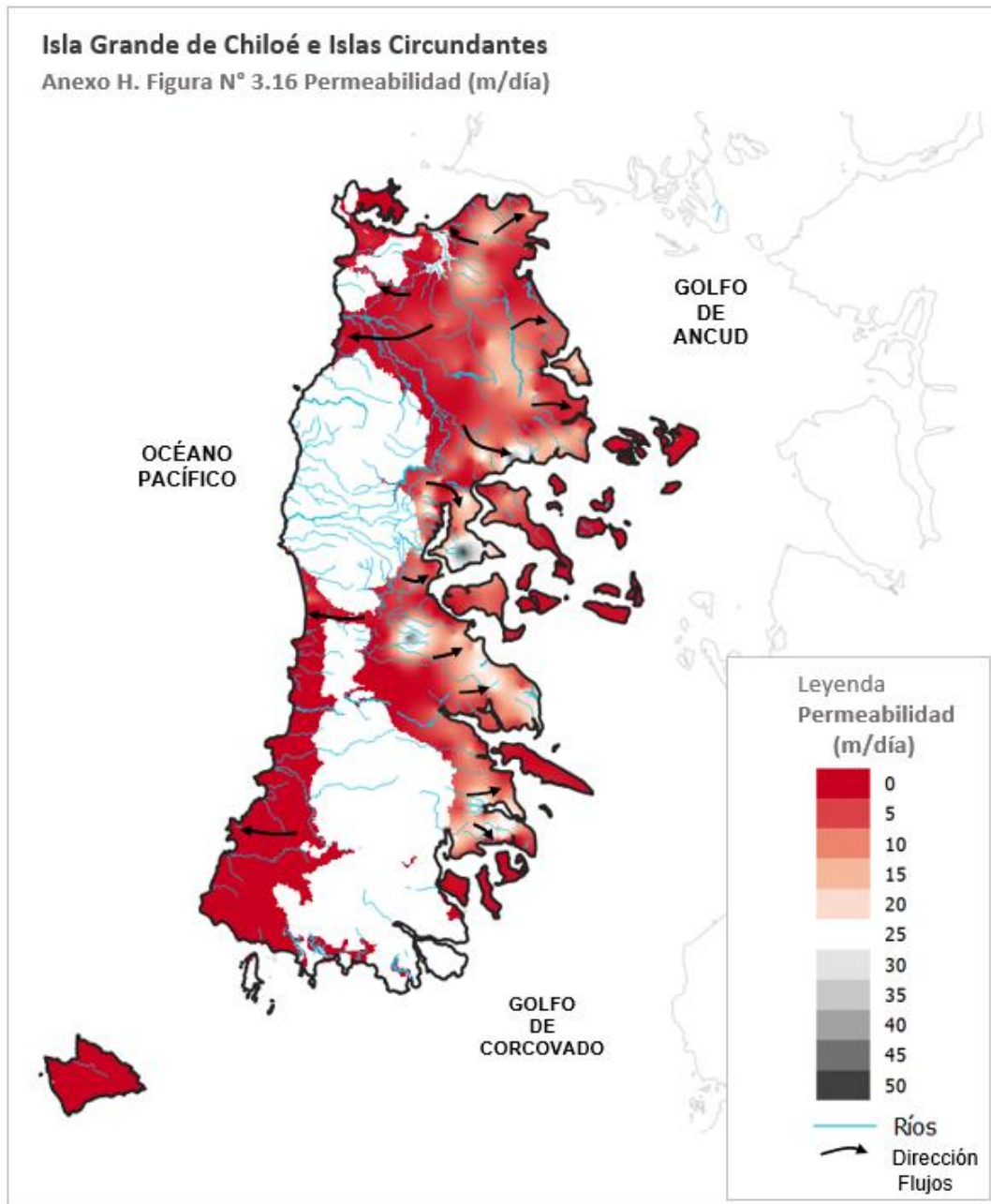
A lo largo de la cuenca se destaca un incremento de las conductividades hacia los cauces de los ríos, y Chiloé cuenta con una densa red hidrográfica (Figura 3-16 y Figura 3-17). Las altas permeabilidades están dadas por el proceso natural de abrasión que va provocando a su paso el flujo superficial. De esta manera, se va provocando un aumento de la porosidad



en las rocas que conforman el lecho del cauce, que permiten que las aguas circulen y percolen de mejor manera hacia los estratos más profundos donde se encuentra el acuífero.

Las islas circundantes que formaron parte de las campañas de terreno (Caucahue, Quinchao y Lemuy) son características de conductividades promedios que según la escala de colores de la leyenda alcanzan valores bajos a intermedios. Son permeabilidades representativas de materiales más finos y medios en general, pero que igual favorecen el tránsito del flujo subterráneo.

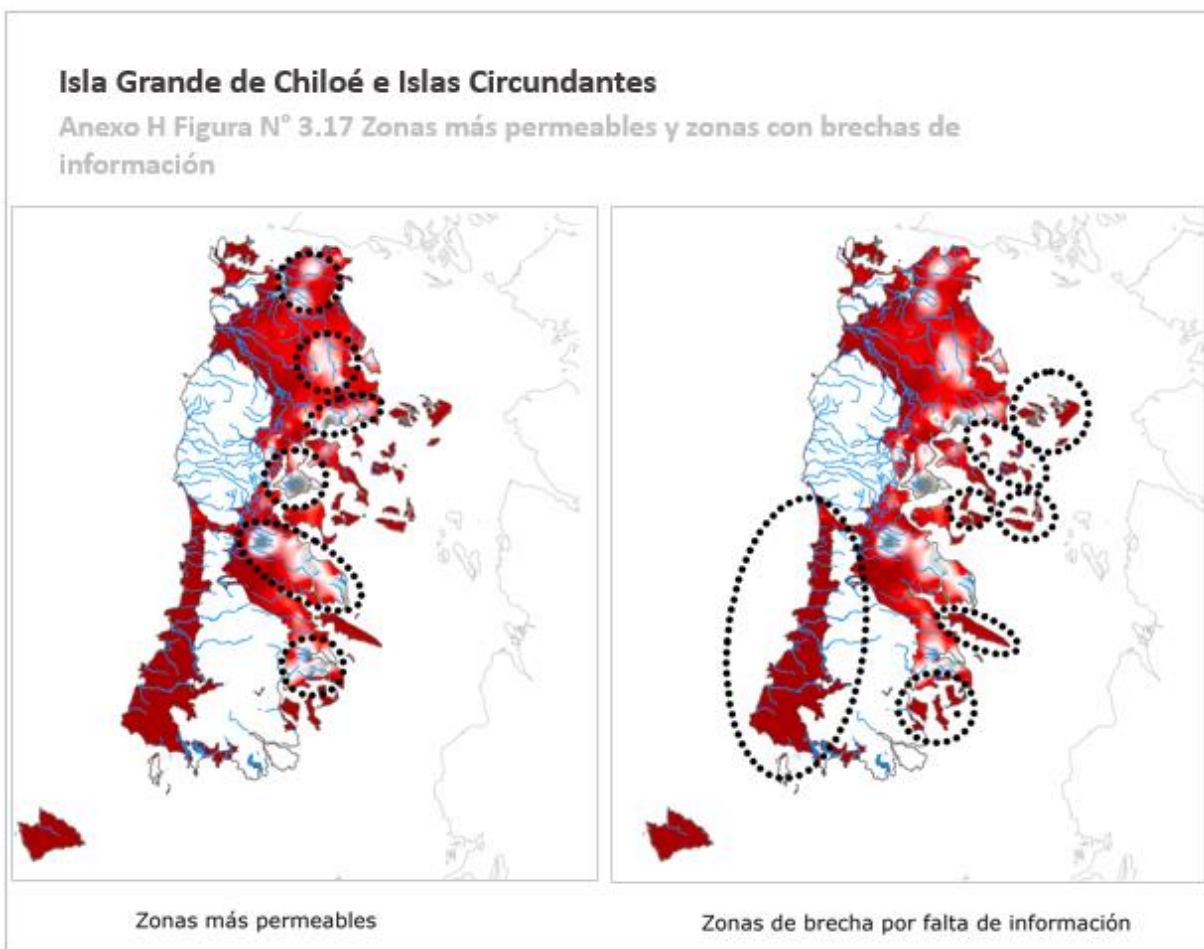
Se definieron zonas con brechas de información (Figura 3-17 (imagen derecha)), debido a la inexistencia de estudios anteriores que arrojaran datos medibles que indicaran la permeabilidad existente. Estas zonas se asocian a las islas circundantes que no cuentan con estudios geofísicos (con excepción de las islas Caucahue, Quinchao y Lemuy), así como la zona ubicada al sur de Cucao al sur poniente de la isla grande. Las permeabilidades indicadas se basaron en la información que arrojaban las mediciones en las litologías cercanas de la misma formación geológica.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-16 Permeabilidad en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

Se definen las direcciones principales del flujo subterráneo, mostrando distintas direcciones que relacionan la forma acampanada de los niveles estáticos en la isla.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-17 Zonas más permeables y Zonas con brechas de información en el área de estudio.

A partir de la capa de permeabilidad pueden conocerse los "coeficientes de almacenamiento e infiltración" de un área estudiada, y es un parámetro considerado para generar los cálculos de flujos subterráneos entre sectores acuíferos según fórmula de Darcy (Custodio & Llamas, 1996). Seguidamente se desglosa como se han obtenido estos coeficientes, que constituyen inputs para los cálculos de los volúmenes de los distintos sectores acuíferos.

El **coeficiente de almacenamiento** se obtiene a partir de la capa de permeabilidad (conductividad). A partir de la función *Raster Calculator* se puede transformar una propiedad hidrogeológica **X** en otra **Y**, de esta manera se establece una fórmula donde se considera el valor límite inferior y rango del coeficiente de almacenamiento, que a su vez



son asociados a los valores mínimos y máximos del raster de permeabilidad obtenido, tal como se muestra en la fórmula siguiente:

$$\text{Coeficiente almacenamiento} = \frac{Y1 + m (X - X0)}{(X1 - X0)}$$

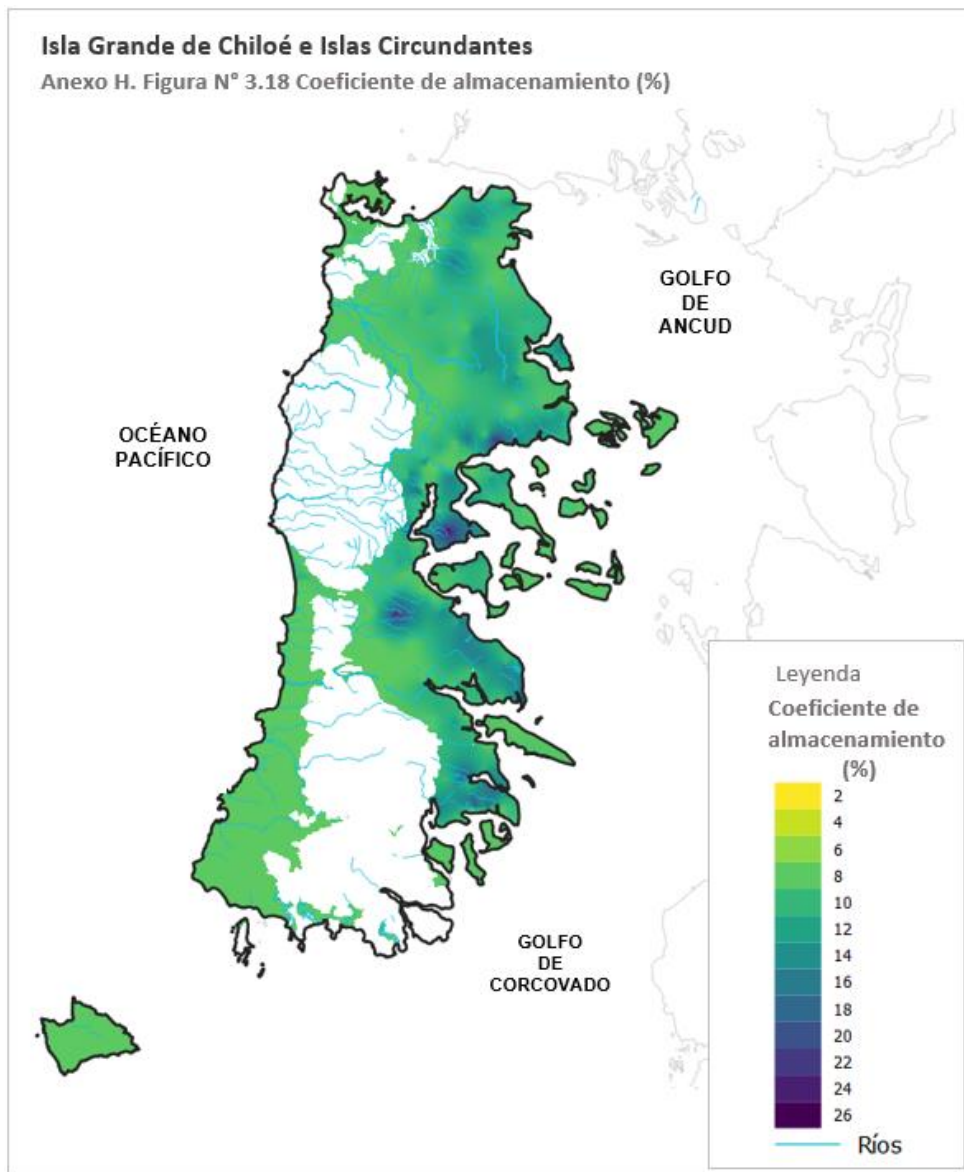
Donde:

- Y1 valor límite inferior de la propiedad Y
- X raster de la propiedad X
- X0 valor límite inferior de la propiedad X
- X1 valor límite superior de la propiedad X
- m rango de la propiedad Y

El coeficiente de almacenamiento en Chiloé se representa en la Figura 3-18.

Como se puede visualizar en la figura, los porcentajes de almacenamiento guardan relación con el comportamiento de las conductividades de las distintas formaciones geológicas que conforman a la zona acuífera del área de estudio. Los mayores porcentajes de almacenamiento se ubican donde los estratos acuíferos son más conductivos.

En algunos casos, coeficientes de almacenamiento elevados coinciden con zonas profundas del basamento, zonas muy conductivas y de mayor, ejemplo de ello son los sectores de Dalcahue, Chonchi y Quellón. Estos sectores se ubican cercanos a la costa oriente de la isla grande.



Fuente: Elaboración propia

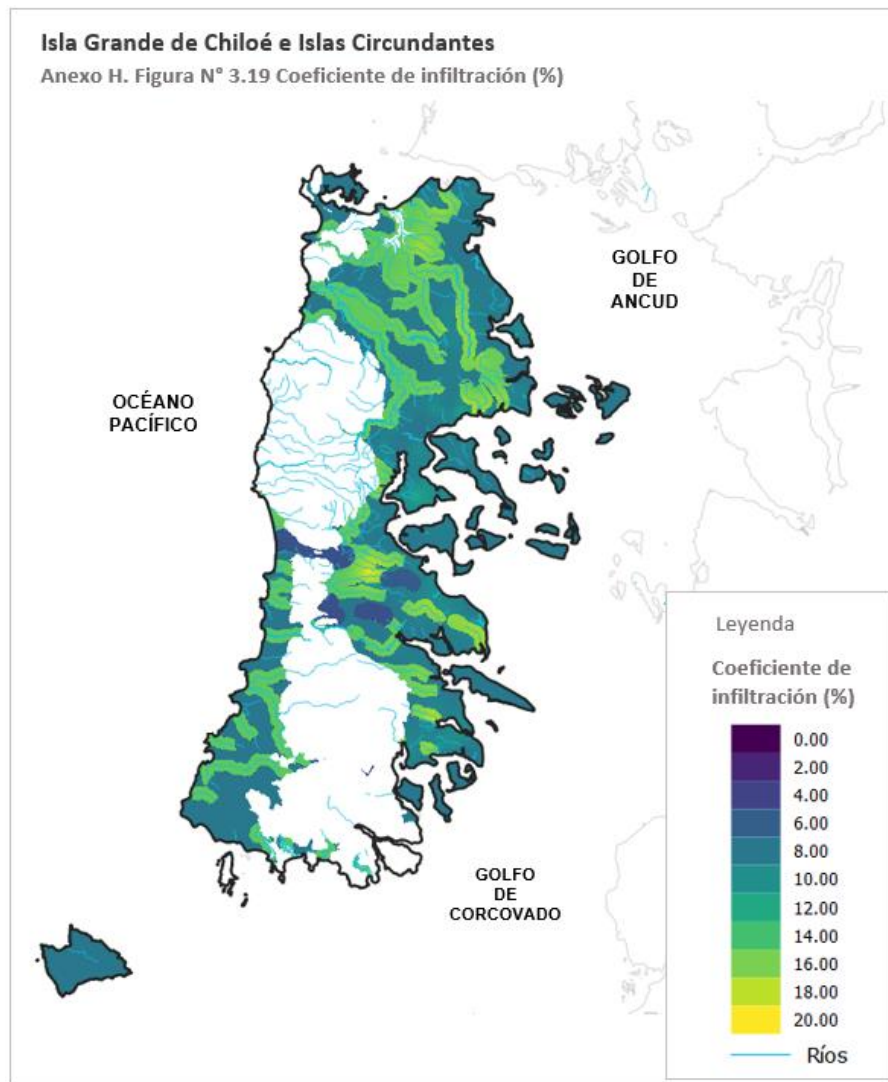
Figura 3-18 Coeficiente de almacenamiento en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

El **coeficiente de infiltración** es otra propiedad hidrogeológica que también se obtiene a partir de la capa de permeabilidad (conductividad).

Los valores de coeficiente de infiltración son estimados a partir de la capa de conductividades hidráulicas de los primeros metros donde tiene lugar la infiltración, las



propiedades del suelo asociados a la información de la geología local, la geomorfología de la zona y pendientes locales, que son las variables que impactan principalmente la relación precipitación – escorrentía y definen los valores relativos del coeficiente de infiltración y que se utilizan al aplicar el Método Racional para la determinación de la recarga. Paralelamente, se han considerado las características del lecho filtrante asociado a cada sector acuífero, los porcentajes de infiltración definidos son cauces 15 a 20 [%], lagos 5 a 8 [%] y terrazas 8 a 12 [%]. Para ello, se realiza una regresión lineal donde al valor más alto de permeabilidad se le asigna el máximo coeficiente de infiltración (0,20) y al menor valor de permeabilidad se le asigna el mínimo coeficiente de infiltración estipulado para la cuenca (0,05). En la Figura 3-19 se presenta la distribución del coeficiente de infiltración elaborada para la cuenca.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-19 Coeficiente de infiltración en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

De acuerdo a los intervalos de porcentajes de infiltración definidos, se definen tres zonas principales que caracterizan la zona acuífera. Han sido considerados los cauces y lagos principales, ya que Chiloé cuenta con una densa red hidrográfica y cantidad de lagos, donde los de menor área no son representativos.

Septentrionalmente destacan los mayores porcentajes de infiltración, pues está constituida por diversos cauces y áreas de terrazas que los rodean. En el sector central entre Cucao y



Chonchi predominan los lagos identificados como: Huillinco, Cucao y Tarahuín, a los cuales drenan los ríos cercanos; por tanto, la infiltración asociada es menor. La zona sur es representativa de distintos porcentajes de infiltración, puntualmente disminuye hacia sectores donde se ubican las masas lacustres y van aumentando conforme a la forma que adquiere la superficie del terreno, hacia zonas planas como las terrazas, o en cambios bruscos de pendientes donde se han formado los cauces.

El porcentaje del coeficiente de infiltración está relacionado con otras propiedades hidrogeológicas como la conductividad, porosidad y transmisibilidad de un estrato acuífero, así como con la composición geológica de las formaciones asociadas.

3.2.8 Nivel Estático de las Aguas Subterráneas

La capa de nivel estático de las aguas subterráneas se ha construido tomando como base el nivel estático que indica el catastro de pozos muestreados por hidroquímica, así como otros pozos a los que tuvimos acceso para medir niveles. Se ha considerado la profundidad de nivel estático que registran los expedientes de los derechos subterráneos en la isla. Otro dato importante es la interpretación de los 73 perfiles geofísicos medidos en terreno con el método transiente electromagnético (TEM) (ver resultados en los Apéndices del Anexo H-1, carpeta TEM). La profundidad de basamento estimada por gravimetría se toma como referencia al estimar el nivel estático en una estación TEM, ya que es más preciso el resultado dado por el método gravimétrico.

De acuerdo a los perfiles de resistividad resultantes de las mediciones en terreno, junto a la data que especifica en cada estación TEM el espesor y resistividad de cada capa en profundidad, se puede definir el espesor total y saturado de cada punto TEM. Según los intervalos de resistividad asociados a rangos de permeabilidad definidos para cada material se puede identificar aproximadamente donde se ubica la profundidad del nivel estático, y con la cota (Z) de superficie se calcula la cota de nivel estático de las aguas subterráneas.

Después se requiere generar una red de puntos auxiliares (profundidad de nivel estático) en sectores desprovistos de mediciones TEM y pozos con el objetivo de facilitar una mejor interpolación. Se deben definir puntos hacia la costa donde su profundidad disminuya, entendiendo que en el mar el nivel estático es 0. A la tabla de atributos de la capa de puntos se le deben agregar columnas que indiquen las coordenadas de cada punto. Con esta data y el Modelo Digital del Terreno (DEM) se determina la cota del terreno (Z) en cada punto añadido, mediante el cruce de información que permite la herramienta *Point Sampling Tool*. Así, se puede calcular la cota del nivel estático [msnm] a partir de la diferencia entre la Z y la profundidad de la napa subterránea [m].

Para el proceso de interpolación en Surfer, se ocupa el método de interpolación Krigging, grid que al ser generado puede acotarse al área de estudio en el proyecto QGIS.

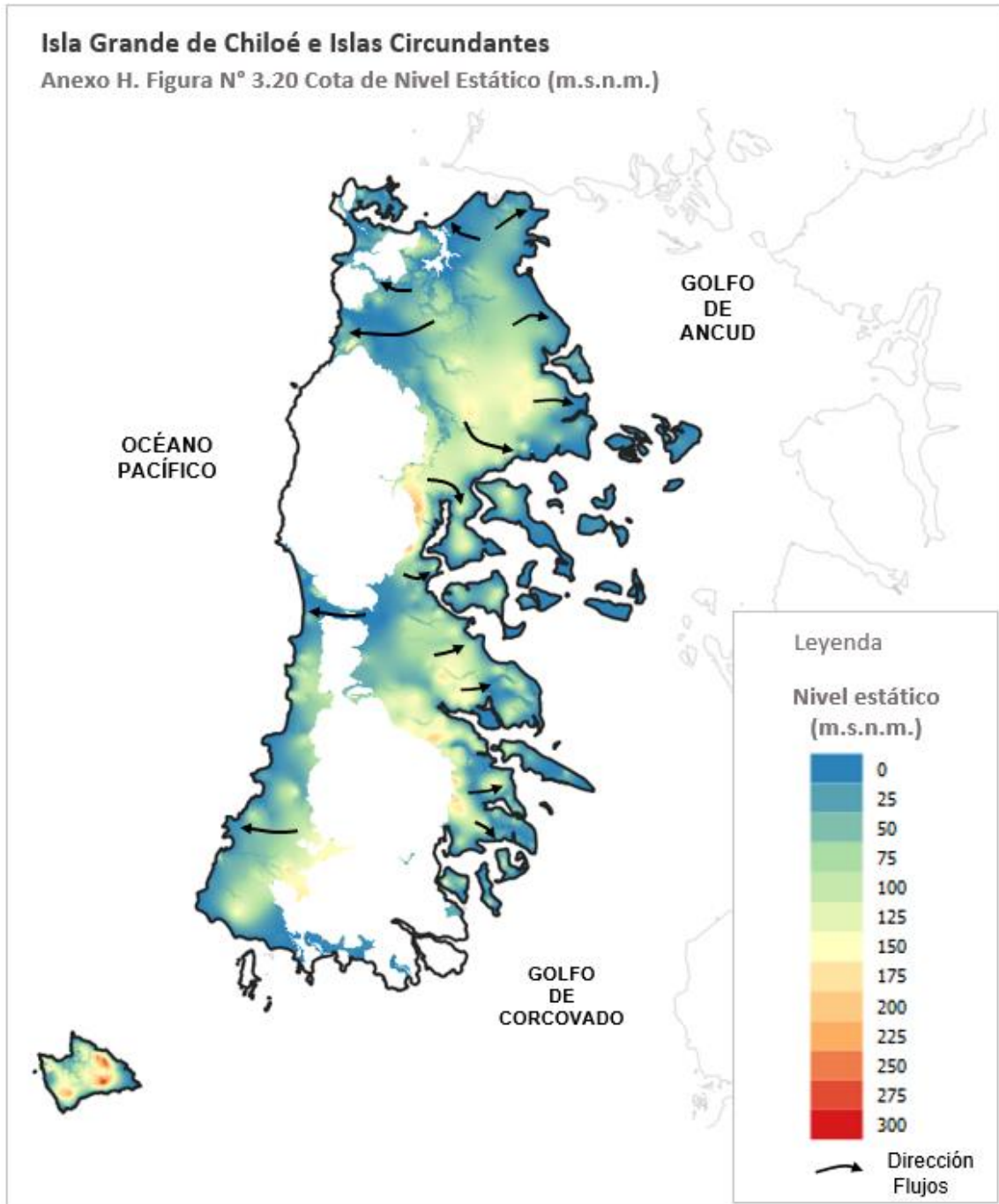


Chiloé es una isla característica de una superficie muy ondulada, dada por su formación en tiempo geológico y la densa red hidrográfica con la que cuenta; motivo por el que fue necesario aplicar una fórmula de ajuste a la versión final del raster obtenido, ya que en algunos sectores el método de interpolación no era suficiente para estimar la cota del nivel estático donde había diferencias abruptas en los cauces.

La capa de cota del nivel estático de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes obtenida se observa en la Figura 3-20.

Las cotas del nivel estático tienen un alcance de los 290 [msnm] en sectores donde la superficie de la zona acuífera es más elevada. La napa subterránea en las islas adquiere una forma acampanada como índice del comportamiento de los flujos, con cotas más superficiales hacia el borde costero, y que se va profundizando a medida que se interna hacia las cotas más elevadas de la superficie del terreno.

La recarga de la napa subterránea es favorecida por la pluviometría que es característica de la zona. En tiempos lluviosos tiende a subir la cota del nivel de flujo subterráneo por la recarga que recibe a través del proceso de percolación, y a su vez, cuando son temporadas más secas el nivel estático disminuye.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-20 Cota del nivel estático en las cuencas de las islas Chiloé y circundantes.

En general, se han definido niveles estáticos superficiales, inferiores a los 20 [m] de profundidad, sin embargo, la napa subterránea se profundiza hacia el centro-norte de la cuenca en sectores como Castro, Dalcahue y noroeste de Quemchi, con un alcance entre los 35 y cerca de 90 [m] de profundidad. Se ha constatado durante la campaña de hidroquímica, que en el sector Rauco Alto (al norte de Chonchi) los niveles freáticos se profundizan a los 77 [m]. Al este de Quellón (sur de la isla grande) se registran expedientes con niveles estáticos variables (registros puntuales con nivel estático superior a 50 [m]), donde a más cercanía a la costa estos van disminuyendo.

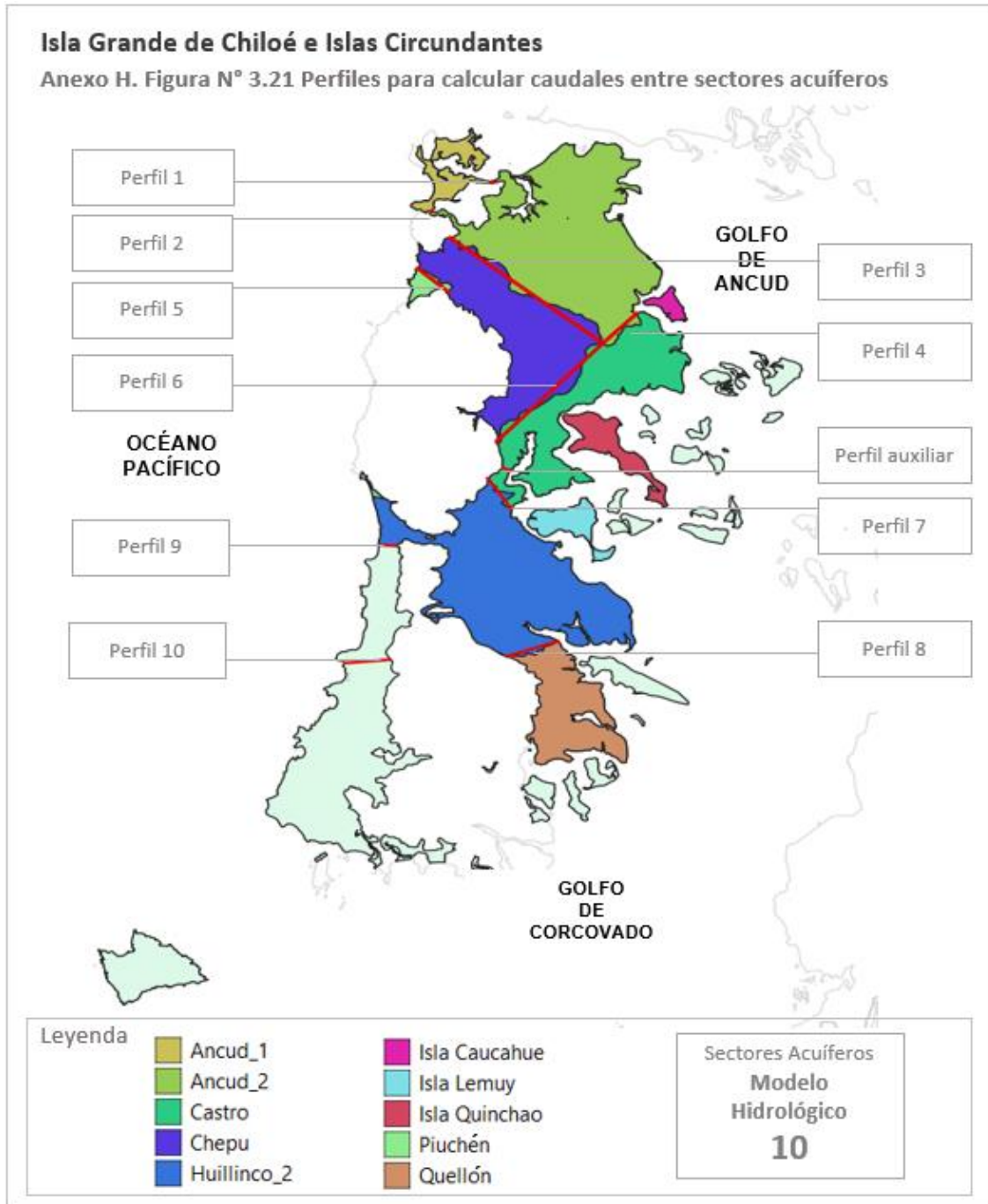
Una de las características que distingue al flujo subterráneo, es que en general tiene un movimiento aguas arriba hacia aguas abajo. Chiloé por su condición de isla, el flujo subterráneo adquiere una forma cóncava (Figura 3-20).

Generalmente, en el sector oriente de la cuenca los flujos subterráneos se mueven hacia al oriente influenciados por la topografía del medio, y en el sector poniente los flujos descargan al océano Pacífico. Al norte y al sur de las islas también se forma una descarga del flujo subterráneo con el movimiento aguas abajo. Estos sentidos del flujo se fundamentan a través de los cálculos realizados en las conexiones entre los sectores acuíferos definidos. De esta manera, se infiere la descarga continua de los distintos sectores acuíferos que son recargados a través de la pluviometría que recibe anualmente el territorio isleño.

3.2.9 Caudales entre Sectores Acuíferos

La estimación de los caudales entre los sectores acuíferos definidos en la cuenca, se ha realizado considerando el método de Darcy. Para ello se han dibujado 10 perfiles en los límites entre dichos sectores, para así poder estimar sobre estos, el caudal pasante a través de la sección evaluada. La herramienta *Terrain profile* en QGIS permite extraer, dentro del perfil seleccionado, los datos de las capas ráster de profundidad de basamento, cotas del modelo de elevación digital *DEM*, cota de nivel estático y permeabilidad (Figura 3-21).

Se considera que la dirección de los flujos entre los sectores acuíferos es perpendicular a las líneas equipotenciales de nivel estático. De acuerdo con esta afirmación, se ha desarrollado un análisis previo y determinar la relación de los flujos subterráneos pasantes entre los sectores acuíferos y las cotas del nivel estático en los perfiles divisorios entre estos sectores. En aquellos perfiles donde la dirección de flujo es paralela a las líneas equipotenciales del nivel estático, se define un caudal de 0 [L/s] ya que para el área de estudio este comportamiento indica que los flujos tienen dirección preferente hacia el mar, por lo que no existe flujo entre sectores acuíferos, como se observa en la Tabla 3-5.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-21 Perfiles para calcular los caudales entre sectores acuíferos en área de estudio

Como se indica en la tabla siguiente, los perfiles 9 y 10 corresponden a zonas con brecha de información, por lo cual no se han desarrollado los cálculos de flujos pasantes.

Cuando se realizan cálculos entre sectores acuíferos donde el límite es de gran extensión, se sugiere reevaluar por WEAP los cálculos entre esos sectores acuíferos en caso de no arrojar resultados apropiados a lo que se estima según las características del sector.

Tabla 3-5 Relación entre curvas de nivel estático y dirección de los flujos

Nombre perfil	Sectores acuíferos que divide	Ubicación de curvas de nivel estático equipotenciales con respecto a línea divisoria entre sectores acuíferos	Caudal
1	AC_6 / AC_7	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
2	AC_6 / AC_7	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
3	AC_5 / AC_6	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
4	AC_3 / AC_6	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
5	AC_4 / AC_5	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
6	AC_3 / AC_5	Paralelo	Definido por Ley de Darcy
7	AC_2 / AC_3	Perpendicular	0
7	AC_2 / AC_3	Perpendicular	0
8	AC_1 / AC_2	Perpendicular	0
9	Zona brecha	Zona brecha	Zona brecha
10	Zona brecha	Zona brecha	Zona brecha

Fuente: Elaboración propia

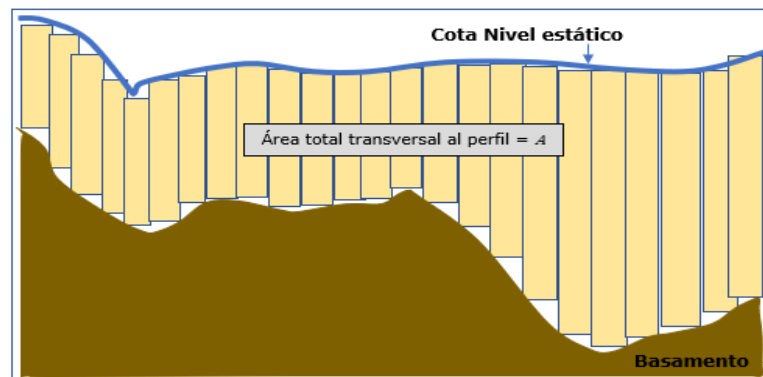
Para aquellos perfiles donde se ha definido que es posible realizar los cálculos según la Ley de Darcy, la fórmula a considerar es la siguiente:

$$Q = -A \cdot k \cdot \frac{(h - h_0)}{L}$$

donde:

- Q : caudal entre sectores acuíferos [m^3/d]
- A : área total transversal al perfil que se forma en profundidad entre la cota del nivel estático y la profundidad de basamento [m^2] (Ilustración 3-26)
- k : permeabilidad promedio del perfil [m/d]
- h_0 : cota de nivel estático mayor [$msnm$]

h : cota de nivel estático menor [msnm]
 L : largo de sección paralela al flujo [m]



Nota: El área total transversal al perfil es todo aquel sector entre el basamento y el nivel estático, que correspondería al sector donde fluye el agua subterránea.

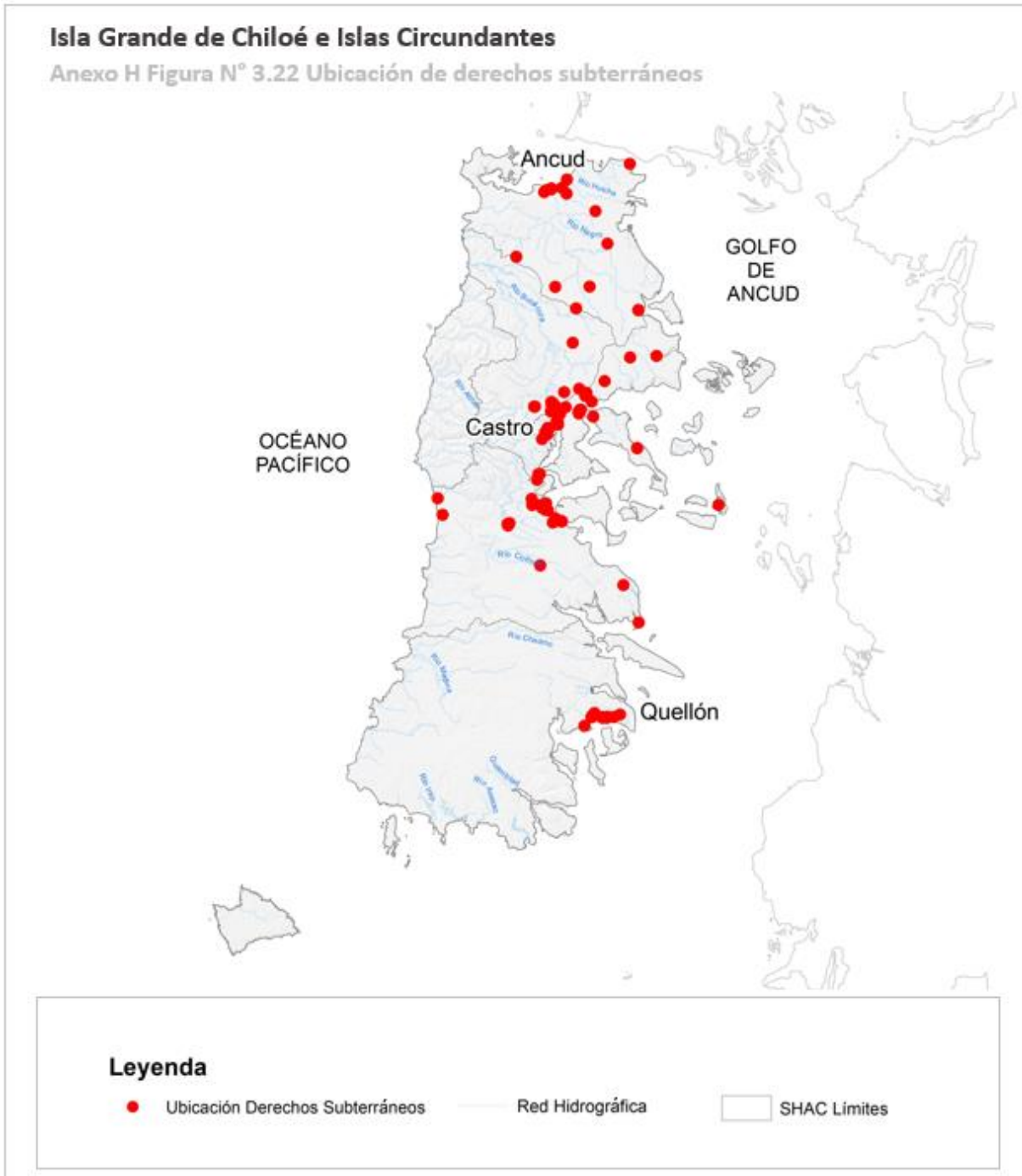
Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 3-26 Representación de área transversal del flujo pasante por un perfil

3.2.10 Pozos y Captaciones

Según la información de derechos de agua concedidos por la DGA, se ha realizado un catastro donde se concluye que existen **114 derechos subterráneos** otorgados en la cuenca que poseen un **caudal mayor a 5 [L/s]**. Del total de estos derechos, 100 incluyen registro de estratigrafía en sus expedientes. La ubicación de estas extracciones se muestra en la Figura 3-22. Se incluyen en el catastro los **14** pozos en estado operativo que forman parte de la Sanitaria ESSAL.

El catastro con toda la información relevante de cada sondaje, se adjunta en detalle en documento Excel como parte del Apéndice del presente anexo (ruta de carpeta: H-1/Documentos de apoyo/Archivos complementarios).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-22 Ubicación de derechos subterráneos otorgados en la cuenca.

3.2.11 Condiciones de borde

En las islas Chiloé y circundantes existe una zona acuífera con un alcance superior a la del área total de la cuenca. La **condición de borde** que prevalece dada su extensión es la asociada con el **mar**, excepto aquellos sectores donde su perímetro limita con afloramiento del substrato rocoso (basamento) asociados principalmente a la cordillera de la costa. Otra condición de borde definida son las **masas lacustres**. En especial, se consideran aquellos lagos de mayor extensión que forman parte de la zona acuífera, díganse los lagos denominados: Natri, Tepuhueico, Tarahuín, Huillinco y Cucao. La **recarga** es otra condición de borde definida, a partir de la relación existente entre el coeficiente de infiltración (tomando en cuenta la información de geología local, geomorfología y propiedades del suelo.) y las precipitaciones históricas promedio en cada sector de la cuenca. Los **ríos** son otra condición de borde definida, y en Chiloé existe una densa red hidrográfica de extensiones distintas.

Se han realizado los cálculos para definir los flujos entre sectores acuíferos y condiciones de borde. La condición de borde con el mar es de larga extensión, dada su condición de isla. La metodología de cálculo se indica en el epígrafe 3.2.9. generándose distintos valores de flujos definidos entre sectores acuíferos y condiciones de borde, los cuales son visualizados en la Tabla 3-6.

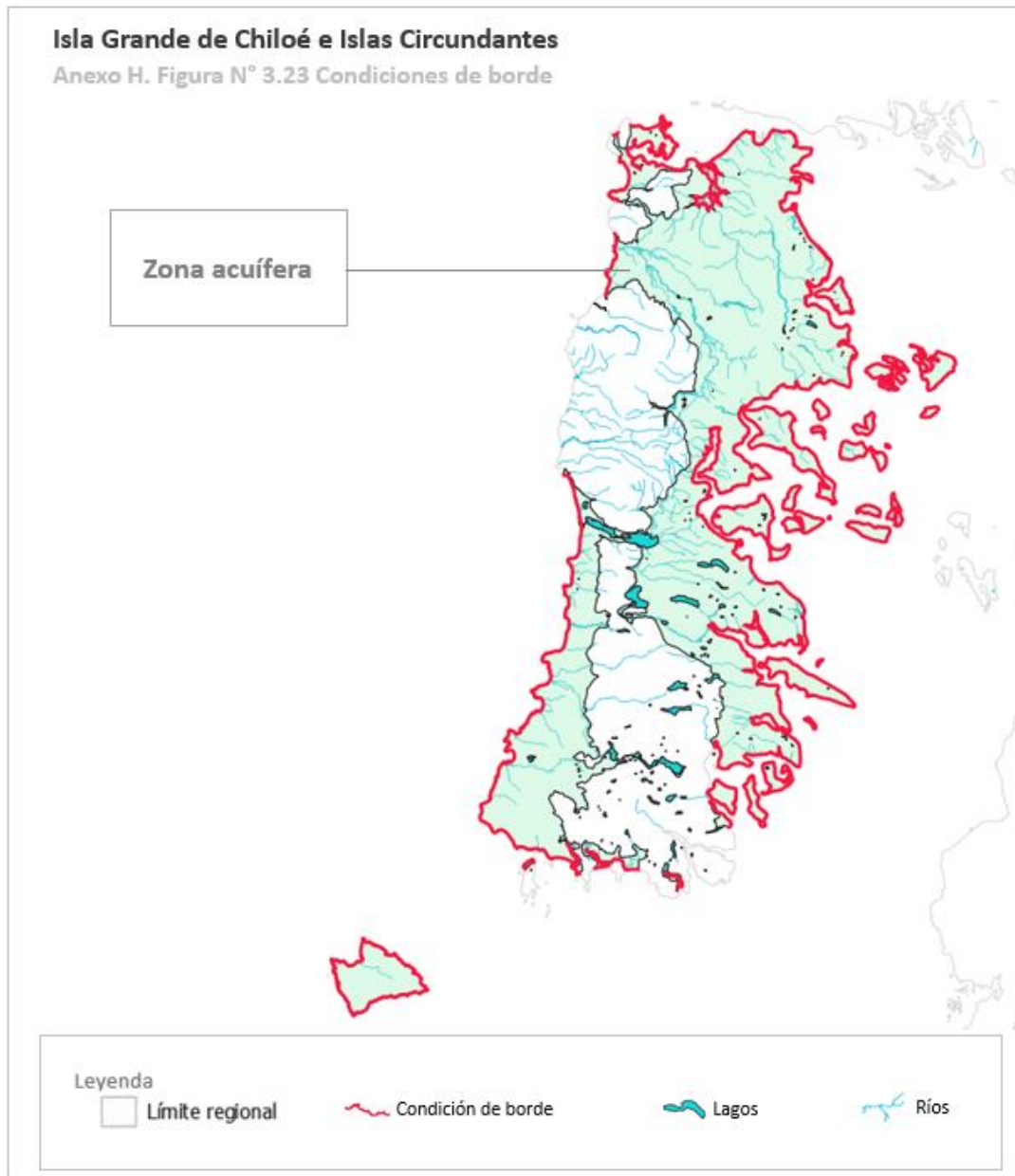
Los flujos más elevados se corresponden con los sectores acuíferos considerados en la modelación hidrológica definidos como 2, 3 y 5, los cuales limitan con el mar interior al oriente de la isla grande.

Tabla 3-6 Flujos en las condiciones de borde.

Nombre condición de borde	Sector Acuífero que divide	Valor del flujo [Hm ³ /año]
MAR_ESTE	AC_01 a MAR_ESTE	38,0
	AC_02 a MAR_ESTE	100,2
	AC_03 a MAR_ESTE	112,3
	AC_05 a MAR_ESTE	138,4
	AC_06 a MAR_ESTE	8,4
	AC_08 a MAR_ESTE	3,1
	AC_09 a MAR_ESTE	8,8
	AC_10 a MAR_ESTE	6,5
MAR_OESTE	AC_02 a MAR_OESTE	13,10437167
	AC_04 a MAR_OESTE	0,155759733
	AC_05 a MAR_OESTE	20,728422
	AC_07 a MAR_OESTE	31,33306833

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de borde definidas con el concepto de ríos, lagos y hacia el mar, son representadas en la Figura 3-23. Además, todas las condiciones, incluida la recarga forman parte del modelo conceptual subterráneo generado en Visual Modflow Flex, como parte del modelo conceptual subterráneo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-23 Condiciones de borde del área de estudio.

3.2.12 Análisis sobre dinámica hidrogeológica global de la cuenca

La morfología de las cuencas de las islas de Chiloé y circundantes es característica de dos macroformas importantes: la cordillera de la costa y las planicies fluviomarinas. Las mayores altitudes alcanzan los 850 [msnm] asociados a la cordillera de Piuché que se extiende hasta el sur de la isla, donde se han formado lagos de distinta extensión debido a que la red de drenaje no es zona acuífera. Hacia el oriente se identifican áreas de gran extensión asociadas a las planicies litorales. La isla es representativa de ecosistemas naturales de importancia hidrológica por sus sectores de humedales, varios de los cuales se consideran áreas protegidas.

Chiloé es una isla con un origen sumergido bajo las aguas del océano Pacífico, que luego fue levantándose por efecto de la tectónica que domina la región. Geológicamente está representada por un basamento metamórfico costero que data del período Paleozoico-Triásico, el que se observa extendido de norte a sur en casi todo el sector occidental. La formación de cuerpos intrusivos estuvo dada en el Eoceno al noroeste de Ancud, seguido de procesos magmáticos en el Oligoceno Superior y Mioceno Inferior. Los procesos sedimentarios que se registran corresponden a distintos períodos de depositación durante el Cenozoico. Las secuencias sedimentarias marinas del Mioceno (Formación Lacui y Estratos Chonchi y Cucao), los depósitos no consolidados del Pleistoceno en Ancud, Castro, Quellón e islas interiores (materiales morrénicos y glaciales de las glaciaciones Llanquihue, Santa María y Río Llico), y los depósitos recientes (aluviales, coluviales, de remoción en masa, y en menor proporción fluvio-glaciales, deláticos, litorales o indiferenciados) identificados al extremo sur y centro-norte.

La zona acuífera en Chiloé se caracteriza por espesores importantes de sedimentos acumulados en tiempo geológico principalmente en el sector oriente de la isla grande además de las circundantes. Entre las peculiaridades de sus terrazas destacan los descensos paulatinos como en Quellón, pero también las cotas abruptas visualizadas en Quellón.

El agua subterránea adquiere una forma acampanada dada la singularidad de la isla, que durante la etapa de sequía disminuyen los valores más altos. El drenaje de la cuenca es hacia la costa conforme a las características de los flujos de cada sector, marcado por la red hidrográfica y forma de la superficie del terreno existentes. Las zonas de flujos están conectadas en forma ovalada al cauce, particularidad que se observa por la geometría del acuífero desde Puntra diagonalmente en dirección sureste a Dalcahue-Quemchi-islas circundantes Quinchao y Lemuy, banda que después se direcciona al sector de Chonchi, y luego se conecta a los lagos Huillínco y Cucao hasta desembocar al océano Pacífico. El área de estudio tiene la particularidad de tener ríos que escurren todo el año dada su pluviometría, con mayor caudal en invierno y menor durante el verano, pero que podrían secarse en algunos casos en tiempos de sequía.



La geometría del acuífero a través de la capa de profundidad de basamento indica zonas muy profundas que revelan volúmenes húmedos de importante extensión en las cuencas de estudio. Las zonas de mayor interés dada su profundidad de basamento se registran en los sectores Quetalmahue, Chacao-Quemchi, diagonalmente desde el noreste de Chepu a Puntra hacia Dalcahue, Chonchi y en menor medida Quellón, con profundidades medidas (gravimetría) que se encuentran alrededor de los 300 y 900 [m]. Estas profundidades están relacionadas con buenas permeabilidades y niveles estáticos con cotas más superficiales o profundas de acuerdo a la singularidad de cada zona en sí.

Chiloé en su zona acuífera tiene contacto con el mar en casi todo el largo de su extensión, a excepción de cuando la cordillera de la costa y rocas ígneas en Ancud afloran hasta el borde costero, específicamente al norte, oeste y puntualmente sur de la isla. De esta manera, su condición de borde con límite en el mar es de gran longitud. También se considera como condición de borde a los lagos de mayor extensión que forman parte de la zona acuífera (Huillinco-Cucao, Natri, Tarahuín y Tepuhueico), los ríos principales de la densa red hidrográfica existente, así como la recarga dada por la relación de la precipitación promedio de la cuenca y el coeficiente de infiltración, este último, considerando los intervalos que tipifican a los cauces, lagos y terrazas.

En Chiloé, por las características de la isla y su área de gran extensión, se definieron los perfiles TEM distribuidos en toda la cuenca con el objetivo de tener una representación más global de la cuenca. Dado esto, se definieron solo 3 perfiles que incluyen más de 2 estaciones. Se ha definido por las mediciones capas de muy baja resistividad que se estima está asociada a una alta salinidad, esto se puede observar en el perfil 61 ubicado en Cucao (consultar "Interpretación TEM_UnidadesHG.pdf" en ruta de carpeta Apéndices Anexo H/H-1/Archivos complementarios), donde se observa puede existir incidencia de la cuña salina. Esto mismo se muestra en distintos sectores costeros, como en perfiles 3, 5, 17, etc. Dado esto se destaca la hidrogeoquímica de la cuenca, influenciada grandemente por la formación geológica de la isla grande y circundantes.

De los pozos muestreados en campaña hidroquímica no se tiene registro de muestreos anteriores, por lo cual no se pudo realizar una comparación al respecto. No obstante, la calidad en general de las aguas es buena para los fines de consumo humano y riego, solo algunos elementos superan las normas chilenas, lo cual se aborda en detalle en el epígrafe 3.2.3. La relación con cuencas cercanas y recarga por resultados de isotopía no procede realizarse, entendiendo que por la condición de isla no aplica desarrollar ese tipo de estudio.

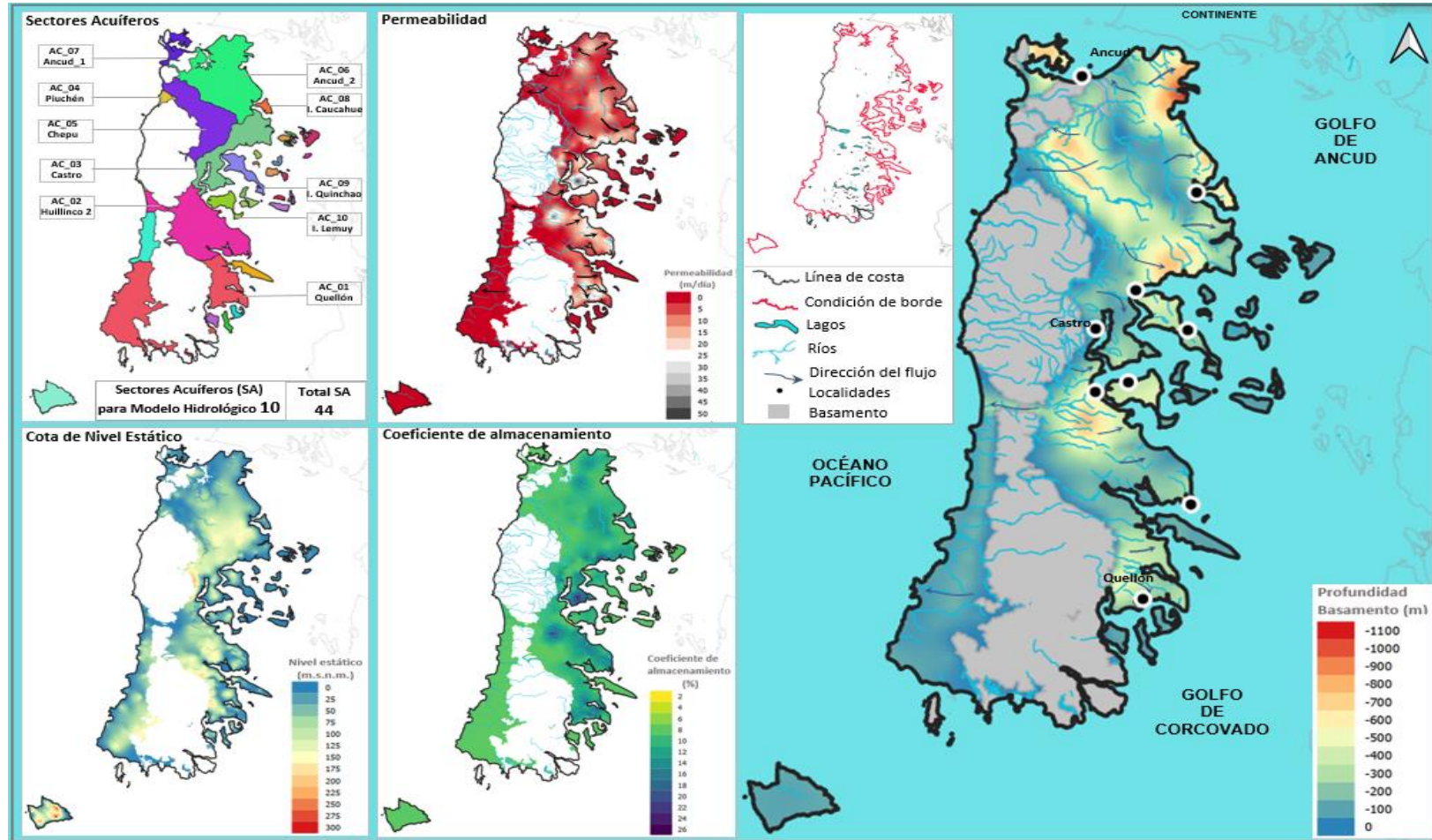
En la Figura 3-24 se visualiza el resumen del modelo conceptual subterráneo de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes. Se destacan las características hidrogeológicas de la zona acuífera, estableciéndose la relación entre la profundidad de basamento como lecho del embalse subterráneo, y las particularidades del volumen húmedo que puede albergar el



acuífero, dado en el comportamiento del nivel estático, las permeabilidades, así como, los coeficientes de almacenamiento e infiltración en cada sector acuífero.

De los derechos subterráneos otorgados a lo largo del territorio (Apéndice Anexo H: H-1, carpeta "Archivos complementarios"), un importante porcentaje de estos están ubicados en el sector norte de la zona acuífera, como área de mayor extensión asociada a grandes profundidades del piso del acuífero. Las profundidades de los pozos son variables, con un mayor alcance en metros en los sectores de Castro y Quellón.

Se han definido las condiciones de borde y las direcciones de flujo existentes entre las conexiones de los distintos sectores acuíferos. Cada capa que compone el modelo conceptual subterráneo ha sido detallada en epígrafes anteriores (construcción e interpretación).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-24 Modelo conceptual subterráneo de las islas Chiloé y circundantes.

3.2.13 Criterios de Sustentabilidad de Acuíferos

En general, los criterios de sustentabilidad de acuíferos definidos por la Dirección General de Aguas tienen como objetivo establecer caudales máximos de explotación posibles para cada sector acuífero, a partir de la evaluación de los descensos de nivel de estos, cambios en la interferencia río acuífero (relacionado a los recursos superficiales ya comprometidos), el grado de satisfacción de la demanda de agua subterránea y la existencia y cantidad de pozos secos. En esta línea, el uso de estos criterios está sujeto a la evaluación de recursos hídricos mediante modelos numéricos.

De esta manera, a juicio del consultor, para evaluar adecuadamente los criterios de sustentabilidad del acuífero se requiere un modelo que, apoyado en información hídrica observada en terreno de manera prolongada y sistemática, permita realizar simulaciones de la evolución temporal de los volúmenes de stock en el acuífero y también de los niveles de las aguas subterráneas a lo largo y ancho de la zona de estudio. Adicionalmente, se requiere de un modelo que simule de forma apropiada la dinámica de la interacción entre ríos y acuíferos. De esta forma, se requiere de un modelo integrado que simule aguas superficiales, aguas subterráneas y la interacción entre ellas, considerando para ello un modelo distribuido de aguas subterráneas, como podría ser MODFLOW, que de paso a la evaluación de los puntos antes mencionados.

De esta forma, dado que en el desarrollo del actual PEGH se ha construido un modelo hidrológico en WEAP orientado principalmente a la modelación de aguas superficiales, se propone la construcción a futuro de un modelo integrado WEAP-MODFLOW que entregará la capacidad de modelación de aquellos aspectos subterráneos mencionados (evolución del stock de agua en el acuífero, evolución de los niveles de aguas subterráneas en el espacio y evaluación de la interacción río-acuífero). Sin embargo, para la construcción acertada de este modelo integrado primero es necesario robustecer la cantidad de información hídrica disponible observada en la cuenca; en particular con pozos de observación, que no existen en la actualidad en la zona. Sin esta información hidrométrica no será posible darle un sentido de realidad al modelo integrado elaborado y no se podrá verificar si el modelo reproduce la realidad de la cuenca y su balance hídrico.

En síntesis, para la correcta evaluación de los criterios de sustentabilidad es necesaria la construcción de un modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas, que considere un modelo hidrogeológico distribuido y para lo cual podría ser considerado un modelo acoplado WEAP-MODFLOW. Sin embargo, para la construcción de este modelo es necesario contar también con información hidrométrica en la cuenca, con estadísticas de estaciones fluviométricas en los cauces superficiales y pozos de observación de niveles estáticos. Esta estadística hidrométrica debe ser lo más sistemática y continua posible, y debe abarcar una extensión temporal mínima de 5 años (idealmente 10 años o más) con estaciones estratégicamente situadas en la cuenca. A esta información hidrométrica también se le podría

sumar la estimación de constantes elásticas del acuífero obtenidas en pruebas de bombeo, que podrían dar un apoyo más firme para la caracterización del acuífero en la modelación numérica subterránea.

3.2.14 Modelo MODFLOW

El modelo conceptual subterráneo de las cuencas de las islas Chiloé y circundantes según bases técnicas debe ser representado en el software Visual Modflow Flex versión 7.0. Su utilización requiere el uso de licencia.

Para la construcción del modelo conceptual se deben seguir varios pasos sin los cuales no es posible continuar la creación del modelo. Se deben preparar previamente los archivos a utilizar. Los archivos tipo raster deben convertirse a la extensión Golden Software ASCII Grid (*.grd, GRD), es el caso de las capas DEM (superficie del terreno), profundidad de basamento (convertir a cota de basamento primero), cota de nivel estático, permeabilidad, coeficientes de almacenamiento e infiltración. También se deben tener definidas las capas vectoriales como el área de estudio suavizada (no puede tener zonas desconectadas ni muy angostas las conexiones, suavizar de ser así), las condiciones de borde (mar, ríos, lagos, recarga) y el área de basamento.

3.2.14.1 Creación del proyecto e importación de datos

Primeramente, se debe crear un nuevo proyecto, indicando el nombre (sin espacios ni tildes), ruta a guardar, y el sistema de coordenadas del área de estudio. Seguidamente se comienza el proceso de importar datos de acuerdo al tipo, los vectoriales como es el caso de los archivos zona acuífera, área basamento y lagos son tipo boundary, pero la red hidrográfica y condición de borde del mar se categorizan como polilíneas. En el caso de los raster se definen como superficie.

3.2.14.2 Definir el modelo conceptual

El "modelo conceptual" se define activando la capa shape de la zona acuífera (suavizada), se indica nombre al modelo y en Model Area se inserta con la flecha la capa con un click y se guarda. El área a modelar debe ser lo más simple y suavizada posible para que el software lo pueda cargar.

3.2.14.3 Definir la estructura del modelo

La estructura del modelo se define añadiendo la cantidad de horizontes que concuerden con las capas subterráneas cargadas. Las capas tipo raster se van subiendo en orden comenzando con la capa de la superficie o DEM, seguido la cota del nivel estático y finalmente la cota del basamento. Se procede a cambiar los nombres de las capas y el tipo en la columna derecha. Cuando resultan 2 horizontes en la estructura del modelo, la capa superior se clasifica como

erosional porque está en superficie, la capa intermedia se ha definido conformable y el basamento rocoso o capa más profunda se clasifica como base. El próximo paso es agregar las superficies que corresponden a cada horizonte según el orden dado.

3.2.14.4 Definir las propiedades de las zonas estructurales

Se definen las propiedades de las zonas estructurales del modelo. Marcando cada zona en el explorador del modelo (cuadro inferior izquierdo), dar un click en la flecha que indica la zona estructural. Cambiar el nombre e indicar los valores si son constantes o método superficie cuando se ocupan los datos de una capa raster **.grd**. De esta manera se realiza con las 3 propiedades que se indican, como son: conductividad (permeabilidad), almacenamiento y niveles iniciales. Para el área de estudio se cuenta con las capas de permeabilidad, coeficiente de almacenamiento (S_y – rendimiento específico) y almacenamiento específico (S_s), y para los niveles iniciales se han considerado 10 [m]. Se debe guardar cada zona estructural.

3.2.14.5 Condiciones de borde

Se selecciona el próximo paso. En este caso se establecen las distintas condiciones de borde, dígase el mar, los ríos, los lagos y la recarga.

La condición de borde **“mar”** se clasifica como *nivel constante*, se le indica el nombre, se conecta con el dominio del modelo **“top”** y seleccionar la data asociada, en este caso la condición de borde del mar.

Se realiza un procedimiento similar con la condición de borde **“lagos”**, pero se deben indicar según cotas el stage y el bottom. El stage se refiere a la superficie del terreno, y el bottom se define a través de la diferencia entre la superficie y el fondo del lago. Acotar que se escogieron los lagos de mayor extensión para el modelo conceptual subterráneo, al igual que los ríos, ya que Chiloé tiene muchos lagos y ríos a lo largo de su extensión.

Otra condición de borde son los **“ríos”**, son cargados con la clasificación de ríos, se debe indicar nombre, conectar el dominio como **“top”** y seleccionar la capa shape asociada. Se requieren datos como el stage del río (se genera una capa con la calculadora raster, restando el raster DEM – 0,02 [m] y se convierte a grid como los demás raster), el bottom (se refiere al lecho del río, con calculadora raster se indica DEM–1 [m] y convertir a grid), espesor del lecho del río (riverbed thickness) se indica 0,5; el ancho del río (river width) se impone como 10, la conductividad del lecho del río (riverbed conductivity) se indica 1. Estos datos se aplican a todos los ríos, entendiendo que Chiloé tiene una densa red hidrográfica. Estos valores se indican según experiencia del equipo consultor, ya que no se cuenta con la información de la cuenca.

La última condición de borde definida es la **“recarga”**. Primero se requiere la obtención de un raster que represente el comportamiento del coeficiente de infiltración en los cauces, lagos y terrazas, como parte de la zona acuífera. Esta capa unificada debe multiplicarse por la capa

de precipitaciones promedios en toda la cuenca (información extraída de un NETCDF donde se registran las precipitaciones históricas de todo el territorio). El raster obtenido es convertido a grid y es el utilizado para definir la condición de borde asociada a recarga. Se indica nombre, dominio del modelo "top" y se carga la superficie obtenida anteriormente. Se deja por defecto la profundidad de estanqueidad (ponding depth).

Otro ítem que complementa el paso para definir las condiciones de borde, son los **"pozos de bombeo"** y observación. Para Chiloé se elaboró un archivo .csv donde se incluyen columnas con los distintos datos requeridos para definir los pozos de bombeo, dígame, el identificador de pantalla (screen ID) donde se indica 1 a todos los pozos del archivo, las coordenadas, número del pozo, elevación (Z [msnm]), well bottom (que es la diferencia entre la elevación y la profundidad del pozo), la profundidad del pozo, el identificador de la superficie (Screen top Z), el identificador de la profundidad del pozo con respecto a la superficie (Screen bottom Z), la tasa de bombeo (Pumping rate [m³/s]) que siempre se pone como valor negativo entendiendo que es un caudal que se extrae del pozo y las fechas de comienzo y finalización de la prueba de bombeo (pueden indicarse la cantidad de días que demoró la prueba de bombeo o indicar la fecha de inicio y fin de la prueba de bombeo). Otro dato que puede ser opcional agregar es el número del expediente y nombre del pozo. Importante es no dejar ninguna celda sin datos, para que el archivo pueda cargarlo completamente el software.

3.2.14.6 Seleccionar el tipo de grilla

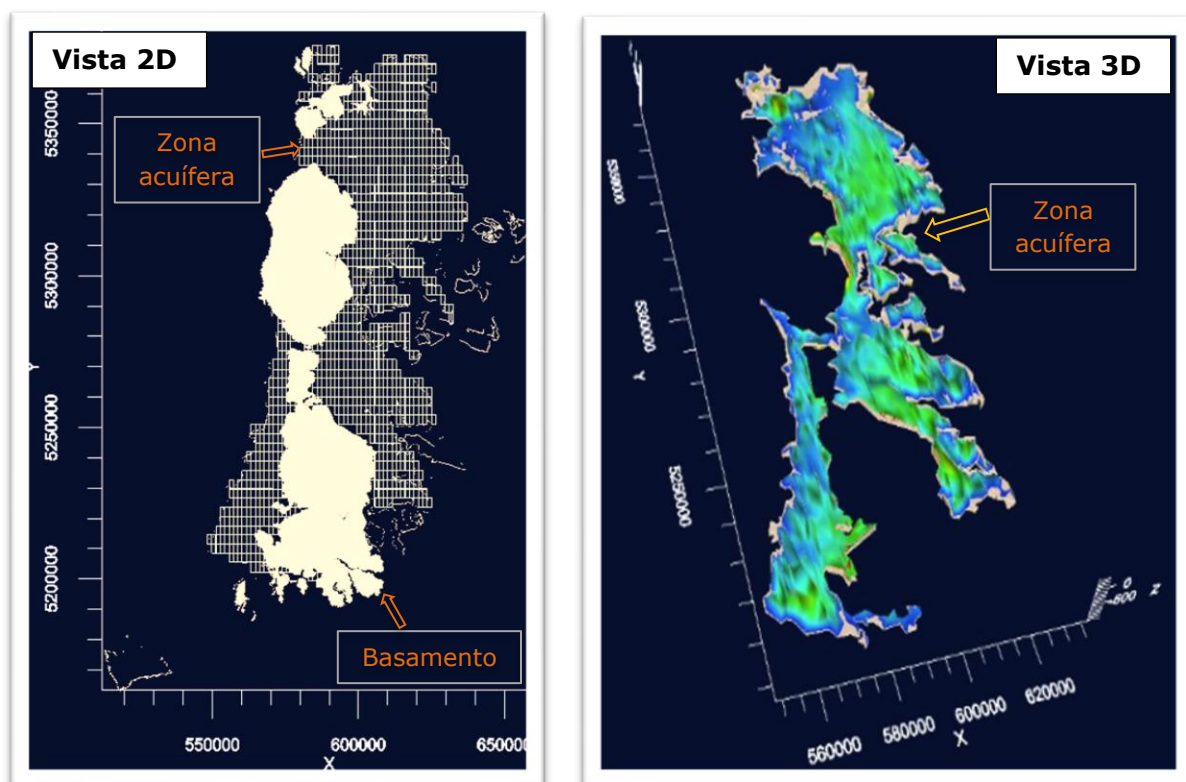
En este caso, se selecciona la **"grilla con diferencias finitas"**. Se le indica un tamaño con celdas de 200 x 200 para toda la cuenca. Destacar que hubo sectores al norte (Ancud) que al suavizar la capa de la zona acuífera al ser muy angostos se requirió incluir el basamento para que pudiese ser reconocido por el Modflow. Para descartar esas zonas se considera la capa vectorial de la zona de basamento, que fue importada inicialmente, y se van desactivando individualmente, por líneas o polígonos las áreas que no son acuíferas

En la Ilustración 3-27 se resume todo el proceso para construir el modelo conceptual subterráneo en las islas Chiloé y circundantes, el cual finaliza con una grilla numérica del área que está conectada (celdas), así como su basamento, que permite visualizar la forma de la cuenca en su vista 2D. En la imagen derecha se destaca la zona acuífera en su vista 3D.

En el caso estudiado, como existen varias islas circundantes las cuales tienen brecha de estudio se ha definido realizar una conexión en la capa del área suavizada del sector de estudio con las islas Caucahue, Quinchao y Lemuy, dado que son las que incluyen información geofísica.

Con la generación del modelo en 3D, y la relación de los resultados del muestreo hidroquímico se puede concluir que los embalses subterráneos en la isla grande de Chiloé e islas circundantes poseen como principal fuente de recarga las lluvias que percolan a través de la los estratos aluviales que conforman la superficie de la zona acuífera. Estos volúmenes

descargan hacia el mar. Existe un régimen pluvial de alta intensidad que permite la recarga superficial durante todo el año a través de sus cauces, aunque en los últimos años las precipitaciones han reflejado disminución. Las principales recargas a los acuíferos se deben a precipitaciones, ríos e infiltraciones provenientes de los esteros principales. Con los resultados del muestreo hidroquímico se destaca la buena calidad de las aguas para el abastecimiento humano, sin embargo, considerando los resultados de las mediciones geofísicas, se ha definido una capa de alta salinidad que se visualiza en todos los perfiles TEM desarrollados. Esta particularidad debe ser tomada en consideración al realizar sondajes profundos para utilizar el recurso con fines de consumo o riego, entendiendo que la concentración de sales puede ser más de la permitida según las normas NCh 409 y NCh 1333.



Fuente: Elaboración propia

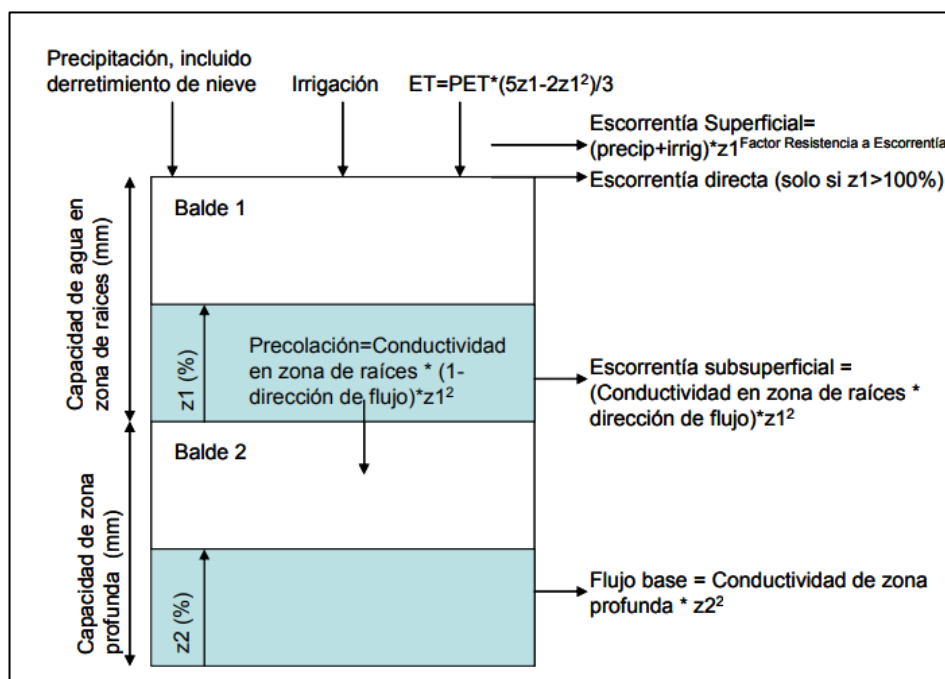
Ilustración 3-27 Grilla numérica con celdas 200x200 obtenida en Visual Modflow Flex para el área de estudio.

De esta manera, concluye el proceso de construcción del modelo conceptual subterráneo para las cuencas de las islas Chiloé y circundantes, el cual puede ser consultado en el Apéndice H-1 (carpeta "Modelo_ConceptualSUB_Modflow").

4 MODELO NUMÉRICO DE AGUAS SUPERFICIALES

A continuación, se describen en detalle la manera en que se ha construido el modelo numérico y cómo se ha ingresado la información en el programa WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). El software WEAP es una herramienta orientada a la modelación y gestión de los recursos hídricos tanto superficial como subterránea de las cuencas.

WEAP representa las unidades hidrológicas como dos baldes, uno en la zona superficial de las raíces y otro en la zona profunda (ver Ilustración 4-1), en cada uno de estos baldes suceden distintos procesos hidrológicos como escorrentía, percolación, evapotranspiración, los cuales involucran una serie de parámetros que se deben calibrar.



Fuente: Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile (2009)

Ilustración 4-1 Esquema de modelación de WEAP

A continuación, se detallan cada uno de los componentes considerados en la modelación WEAP. Adicionalmente a lo comentado en estos capítulos, en el Anexo H-3 se incluye el material asociado a la Transferencia de Capacidades en Modelación Hidrológica desarrollada en el marco de este estudio

4.1 Cauces Superficiales

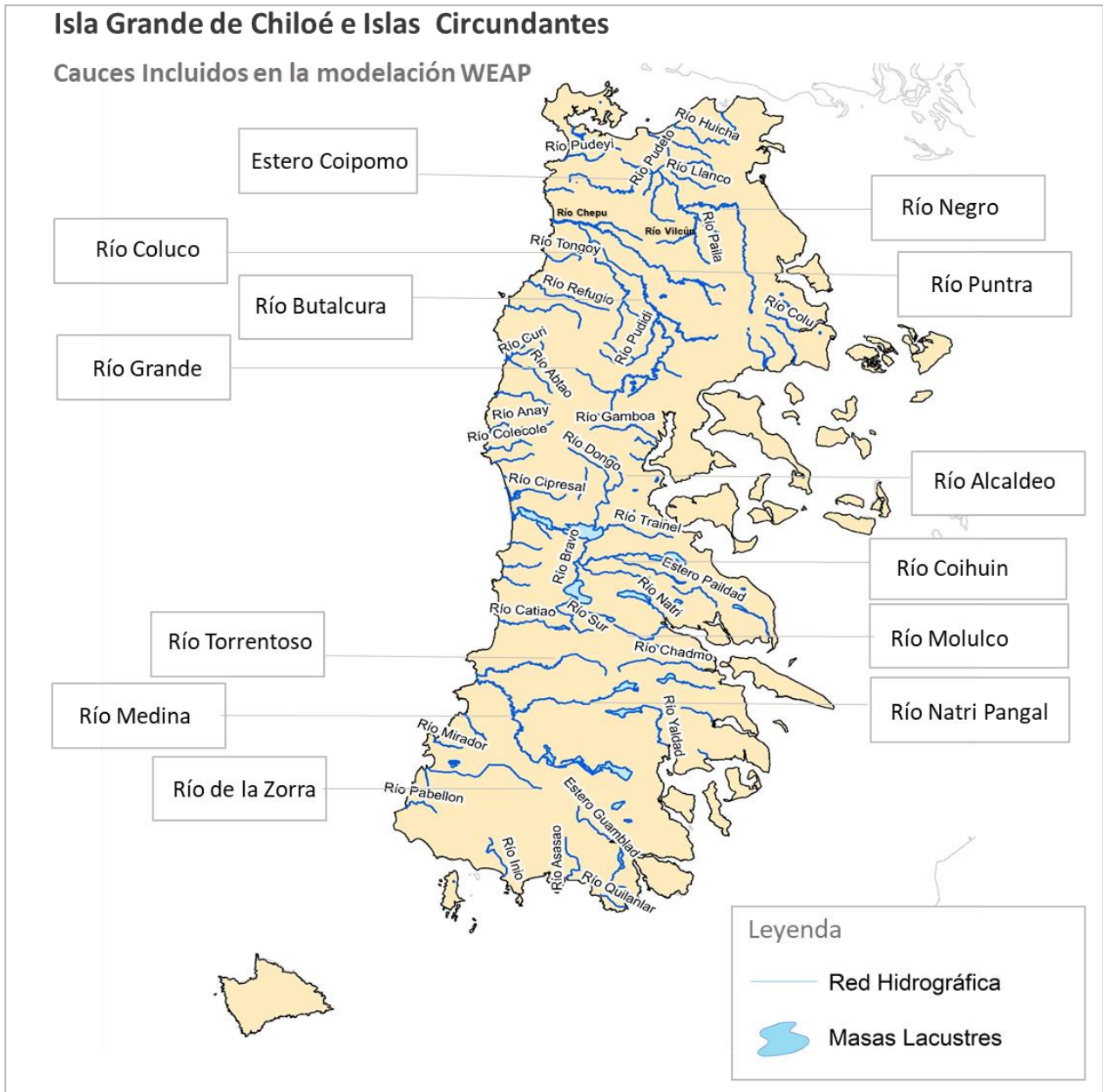
Los cauces se ingresan al modelo WEAP como un elemento "río", que corresponden a elementos lineales a los que se realizan aportes y extracciones de caudal desde otros elementos de WEAP que representan en la modelación: subcuencas, canales, sitios de demanda, entre otros. Son 76 cauces considerados en la modelación, 73 de ellos se identifican en la Tabla 4-1 y se observan espacialmente en la Figura 4-1. Cabe mencionar, que los cauces que no poseen nombre han sido nombrados como "Esteros sin nombre". Los otros 3 corresponden a la entrada de Mar en el sector norte de la cuenca, el cauce que engloba la cuenca del lago Cucao y el cauce del lago Huillinco.

Considerando que la cuenca posee una serie de pequeñas zonas colindantes con el mar, cuyas quebradas poseen un tamaño poco relevante para los objetivos de esta modelación. Estas quebradas o cauces han sido agrupados en elementos "río" llamados **unificaciones costeras**. Como lo indica el nombre, estas quebradas costeras unificadas representan a todas aquellas pequeñas quebradas que en la realidad sí existen pero que no se justifica su modelación individual. Las 56 unificaciones costeras consideradas en la modelación se observan en la Figura 4-2.

Tabla 4-1: Cauces superficiales incluidos en la modelación WEAP

Nombre Elementos "River" en WEAP					
1	Río Abtao	26	Río Grande 02	51	Río Yaldad
2	Río Aguas Muertas	27	Río Guyunden	52	Río Trainel
3	Río Alcaldeo	28	Río Huenocoihue	53	Río Quilanlar
4	Río Anay	29	Río Huicha	54	Río Refugio
5	Río Asasao	30	Río Huillinco	55	Río San Antonio
6	Río Ayentema	31	Río Inio	56	Río San Juan Oriente
7	Río Bravo	32	Río Llanco	57	Río San Juan Poniente
8	Río Butalcura	33	Río Llicaldad	58	Río Tarahuín
9	Río Catiao	34	Río Mañío	59	Río Tocoihue
10	Río Chadmo	35	Río Mechai	60	Río Tongoy
11	Río Chaiquil	36	Río Medina	61	Río Torrentoso
12	Río Chepu	37	Río Metalqui	62	Estero Paildad
13	Río Cipresal	38	Río Mirador	63	Estero Quilchitue
14	Río Coihuin	39	Río Molulco	64	Estero Coipomo
15	Río Colecole	40	Río Nango	65	Estero Cudehue
16	Río Colu	41	Río Natri	66	Estero Cunao
17	Río Coquiao	42	Río Natri Pangal	67	Estero Guamblad
18	Río Cumpillen	43	Río Negro	68	Estero Lechagua
19	Río Curi	44	Río Negro o Pulpito	69	Estero Mechaico
20	Río de la Zorra	45	Río Pabellon	70	Estero Sin Nombre 01
21	Río de Las Mercedes	46	Río Paila	71	Estero Sin Nombre 02
22	Río Denal	47	Río Vilcún	72	Estero Sin Nombre 03
23	Río Duhatao	48	Río Pudeyi	73	Estero Sin Nombre 04
24	Río Gamboa	49	Río Pumol		
25	Río Grande	50	Río Puntra		

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia

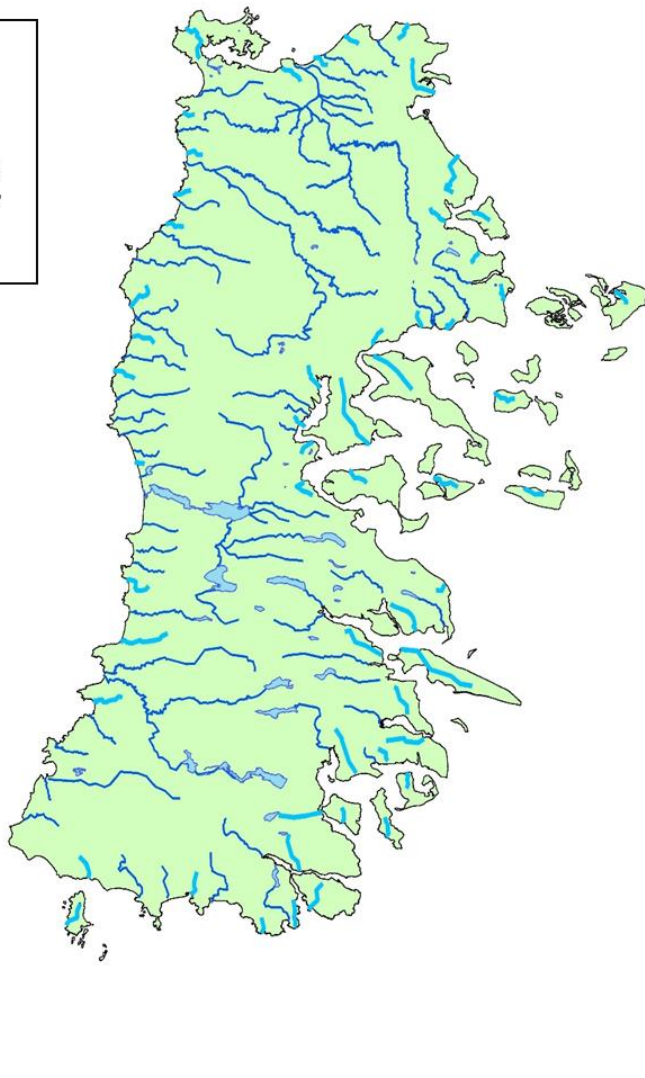
Figura 4-1: Cauces incluidos en la modelación WEAP

Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes





Unificaciones Costeras

56

Quebradas denominadas
“Unificaciones Costeras”
En la modelación WEAP



Leyenda

	Perímetro Cuenca		Elemento “Río” = Ríos o esteros
	Masas Lacustres		Elemento “Río” = Unificaciones Costeras

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-2 Cauces de unificaciones costeras incluidos en la modelación WEAP

4.2 Subcuencas Superficiales

Para efectos de modelación y con el objetivo de generar una representación de la cuenca que esté alineada con los requerimientos del desarrollo del presente plan de gestión, la cuenca de estudio ha sido subdividida en 136 subcuencas más pequeñas. Los criterios para realizar esta delimitación están basados en reproducir las subcuencas definidas por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) de la Dirección General de Aguas, considerando además la presencia de estaciones fluviométricas y los cuerpos lacustres que presentaban una superficie mayor a 7 [Km²].

En WEAP, las subcuencas han sido representada por elementos Unidad Hidrológica o *Catchment*, que corresponde a un elemento diseñado para representar subcuencas modeladas por WEAP. Luego de recibir la información de forzantes meteorológicas, es dentro de estos elementos donde se realiza la simulación de distintos procesos hidrológicos naturales, tales como evapotranspiración, infiltración, escorrentías superficial y subsuperficial, proceso de acumulación y derretimiento de nieve, entre otros.

El proceso de delimitación de las subcuencas se ha realizado por medio de herramientas SIG a través de procesamiento de modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés), el cual fue extraído de la NASADEM a una resolución de 30 [m] (NASA JPL, 2020). La nomenclatura de cada una de las subcuencas depende de su origen y su ubicación. Las cuencas de cabecera se nombran con el prefijo "AN" de aporte natural (cuencas de cabecera, que no reciben aporte superficial desde otras cuencas), las cuencas laterales "CL" que sí reciben aporte desde otras cuencas, y las cuencas costeras unificadas "CU", que corresponden a la unión de varias subcuencas costeras de tamaño reducido. La creación de las cuencas costeras unificadas obedece a la necesidad de poder representar zonas, en el que tanto sus cauces como sus áreas abarcan extensiones pequeñas en comparación a la zona de estudio. Cada una de las 13 subcuencas puede verse en la Figura 4-3.

En cada una de estas subcuencas se ha realizado una subdivisión en base a bandas de elevación y, a su vez, éstas han sido subdivididas nuevamente por usos de suelo. Las bandas de elevación tomadas son mencionadas a continuación y han sido establecidas en la cuenca del Rapel a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) obtenido del NASADEM (NASA JPL, 2020). En la Figura 4-4 se puede ver la cuenca de las islas de Chiloé y las bandas de elevación que son consideradas, en ellas se puede observar que existen 9 bandas de elevación distanciadas cada 100 [msnm].

- Elevaciones entre 0 y 100 [msnm]
- Elevaciones entre 100 y 200 [msnm]
- Elevaciones entre 200 y 300 [msnm]
- Elevaciones entre 300 y 400 [msnm]
- Elevaciones entre 400 y 500 [msnm]
- Elevaciones entre 500 y 600 [msnm]
- Elevaciones entre 600 y 700 [msnm]

- Elevaciones entre 700 y 800 [msnm]
- Elevaciones entre 800 y 900 [msnm]

Luego, las superficies de estas bandas de elevación de cada subcuenca son clasificadas de acuerdo con los usos de suelo, cuyas categorías, que han sido obtenidas y procesadas del estudio Catastro de uso de suelo y recursos vegetacionales del año 1997, 2006 y 2014 (CONAF, 1997; CONAF, 2006; CONAF, 2014). Los usos de suelos considerados son mencionados a continuación y en la Figura 4-5 se pueden apreciar su distribución espacial en la cuenca.

- Área desprovista de vegetación
- Área urbana
- Bosques nativos
- Plantaciones
- Cuerpos de agua
- Humedales
- Terrenos agrícolas
- Matorrales
- Praderas

De esta manera, las unidades de respuesta hidrológica del modelo superficial quedan definidas por un uso de suelo dentro de una banda de elevación en una subcuenca. Dentro de estas unidades de respuesta hidrológica se realiza una simulación de los procesos hidrológicos ocurridos en ellas, la que es realizada utilizando el método de humedad del suelo incorporado en WEAP. Dentro de este método de WEAP se estiman flujos de evapotranspiración, y dado que éste corresponde a un flujo que viaja desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, y que por lo tanto representa una pérdida de agua para la cuenca hidrológica que no se dirige a algún elemento de ésta (como cauces superficiales o acuíferos subterráneos), la evapotranspiración es registrada por WEAP sin ser dirigida a algún otro elemento en particular del modelo. Para la estimación de la evapotranspiración, el método de humedad del suelo utiliza la siguiente ecuación:

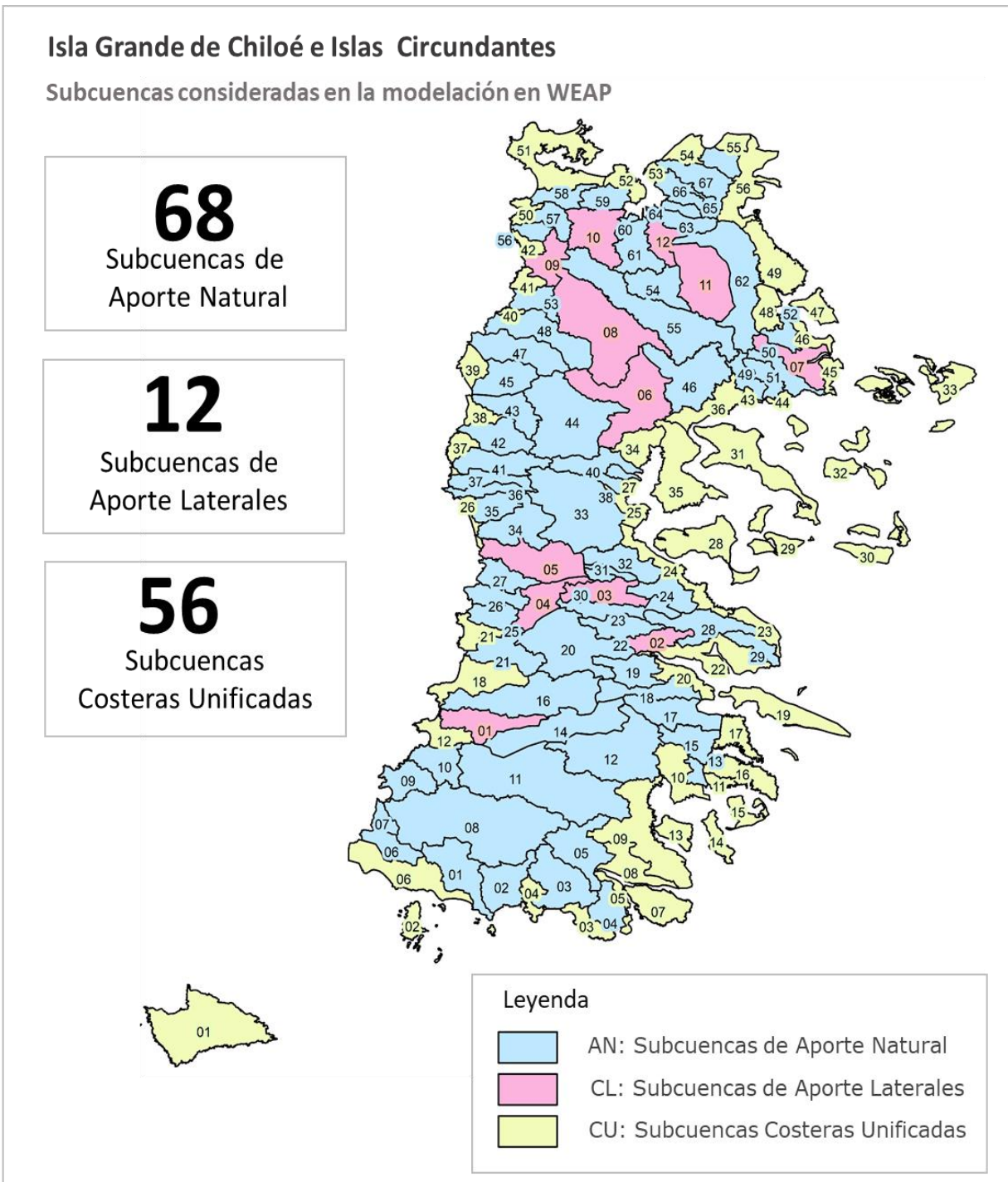
$$ET[SC, BE, US, m] = Kc[US, m] \cdot ET_0[SC, BE, US, m] \cdot \left(\frac{5 \cdot z_1[SC, BE, US, m] - 2 \cdot z_1[SC, BE, US, m]^2}{3} \right)$$

donde:

- $ET[SC, BE, US, m]$: Evapotranspiración en el uso de suelo US en la banda de elevación BE en la subcuenca SC en el mes m, [mm/mes]
- $Kc[US, m]$: Coeficiente de cultivo del uso de suelo US en el mes m, (adimensional)



$ET_0[SC, BE, US, m]$: Evapotranspiración de referencia del uso de suelo US en la banda de elevación BE en la subcuenca SC en el mes m, [mm/mes] calculado a partir del método de Penman-Monteith.
$z_1[SC, BE, US, m]$: Cantidad de agua en la zona de raíces (primeros horizontes del suelo), (fracción de 1)

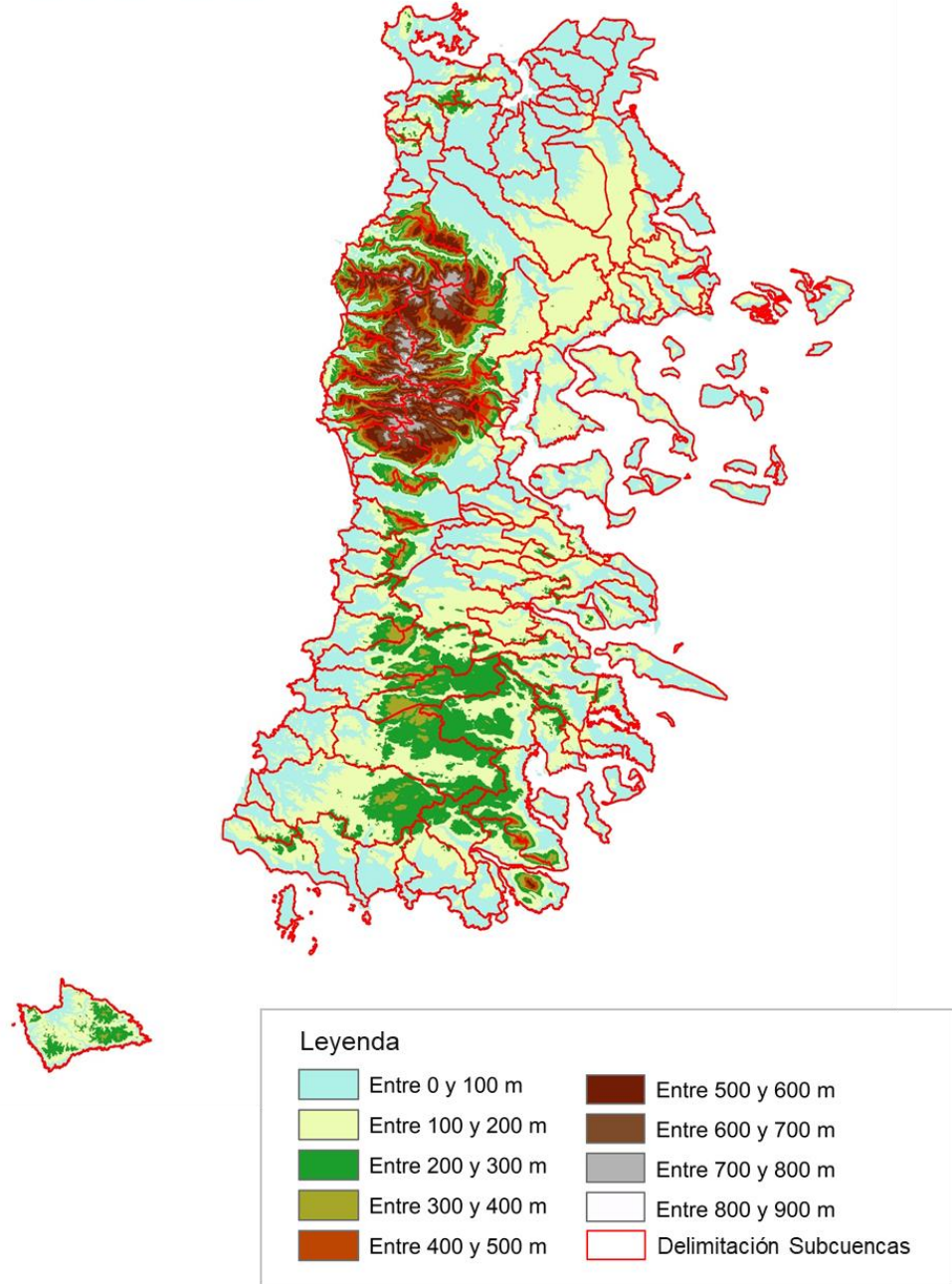


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-3 Subcuencas consideradas para la modelación WEAP.

Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes

Bandas de elevación consideradas en la modelación en WEAP

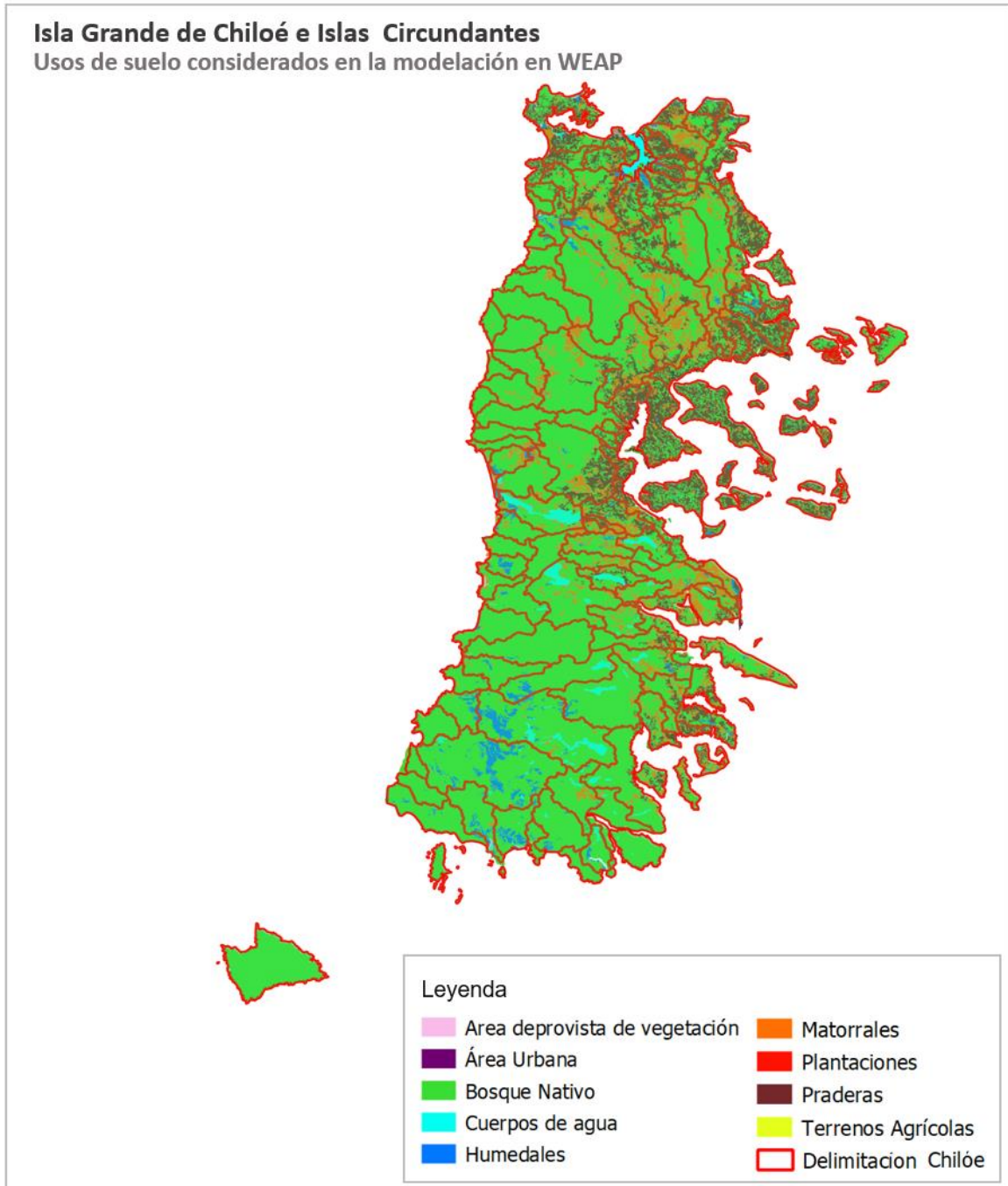


Fuente: Elaboración propia a partir del NASADEM (NASA JPL, 2020)

Figura 4-4 Bandas de elevación y subcuencas consideradas para la modelación hidrológica WEAP

Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes

Usos de suelo considerados en la modelación en WEAP



Fuente: Elaboración propia a partir de los Catastros vegetacionales (CONAF,2006)

Figura 4-5: Uso de suelos y subcuencas consideradas para la modelación hidrológica WEAP

4.3 Forzantes Meteorológicas

Las forzantes meteorológicas consideradas en la modelación corresponden a precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad. Cada una de estas forzantes son incluidas a partir de productos grillados en un paso de tiempo mensual para cada una de las divisiones de subcuenca y bandas de elevación incluidas en el modelo WEAP.

4.3.1 Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico

El escenario *Reference* ("referencia") corresponde al escenario histórico o base sobre el cual se construyen los futuros escenarios, y es el escenario usado para la calibración. Para la modelación, se consideró un período histórico desde el año 1985 al 2019 y una escala de paso mensual.

4.3.1.1 Fuentes de Obtención de Forzantes Meteorológicas para el Periodo Histórico (1985-2019)

- **Precipitación:** Información a nivel mensual que abarca desde 1979 a 2019. Obtenida desde el producto CR2MET v2.0 que corresponde a un producto en una grilla rectangular de 0,05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental. Desarrollado por el *Center for Climate and Resilience Research* "CR2" (Boisier et al., 2018).
- **Temperatura:** Al igual que la precipitación, la temperatura es obtenida del producto CR2MET v2.0, que incluye información de temperaturas mensuales (medias y extremas) desde 1979 a 2019 en un producto grillado con celdas de 0,05° latitud-longitud para el territorio de Chile continental. Desarrollado por el *Center for Climate and Resilience Research* "CR2" (Boisier et al., 2018)
- **Humedad Relativa:** Información obtenida a partir de los datos utilizados en el estudio: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019a y DGA, 2020a). Esta información corresponde a valores de humedad relativa tri horarios desde 1985 a 2015, que abarca desde la cuenca del río Itata, hasta la cuenca del río Palena y río Aysén. Estos datos, disponibles en formato de grilla con celdas de 0,05° latitud-longitud, son agregados a nivel mensual para su uso en el modelo.
- **Velocidad del Viento:** Al igual que la humedad relativa, esta información es obtenida a partir de los datos utilizados en el estudio: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte

Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019a y DGA, 2020a). Esta información corresponde a valores de velocidad del viento tri horarios, desde 1985 a 2015, que abarca desde la cuenca del río Itata, hasta la cuenca del río Palena y río Aysén. Estos datos, disponibles en formato de grilla con celdas de 0,05° latitud-longitud, son agregados a nivel mensual para su uso en el modelo.

- **Fracción de Nubosidad:** Se obtuvo del proyecto EarthEnv 1.0, el cual entrega 15 años de observaciones de nubes derivadas de la teledetección dos veces al día (MODIS AQUA y TERRA) con una resolución de 1 [Km]. Los valores ingresados corresponden a la media mensual climatológica durante el 2000-2015 (Wilson & Jetz, 2016a).

Cada una de estas forzantes meteorológicas son cruzadas con las bandas de elevación de las subcuencas. De esta manera, se obtienen valores de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad para cada banda de elevación de cada subcuenca en todos los meses de modelación.

4.3.1.2 Validación de Modelos Meteorológicos de Precipitación y Temperatura

Previo a la modelación, se realiza una validación de los modelos de precipitación y temperatura, donde se comparan sus valores simulados con estadísticas derivadas de estaciones cercanas a la cuenca de estudio. Además, se calculan tres parámetros de eficiencia para cuantificar la bondad del ajuste

En esta sección se presenta la evaluación de ajuste entre el producto CR2MET v2.0 y las mediciones de las estaciones presentes en la cuenca. Para ello, se calcula el KGE, el NSE y el R^2 como índice de desempeño y con ello se puede dar cuenta del grado de ajuste entre observaciones y las simulaciones del producto CR2MET V2.0, además se observa cómo se distribuye espacialmente la mayor representatividad de las simulaciones del producto.

- **Validación del Modelo de Precipitación y Temperatura**

La precipitación y temperatura mensual del CR2MET v2.0 se compara con la información registrada en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Las estaciones utilizadas para validar estas forzantes se presentan en la Tabla 4-2, indicando el código de la estación, a qué entidad pertenece (DGA es Dirección General de Aguas; DMC es Dirección Meteorológica de Chile y IEB es el Instituto de Ecología y Biodiversidad) y las variables medidas en cada estación (PP es Precipitación y T2M es Temperatura del aire).

Tabla 4-2: Estaciones consideradas en la validación

Nombre estación	Código estación	Fuente	Variable
Cucao	10906004	DGA	PP
Castro 1	10901002	DGA	PP y T2M
Ancud 1	10903003	DGA	PP
Chepu	10904005	DGA	PP
Quellón	10902002	DGA	PP
Chonchi	10901003	DGA	PP y T2M
Quemchi	10900001	DGA	PP
Mocopulli Ad.	420014	DMC	PP Y T2M
Quellón Ad.	430001	DMC	PP Y T2M
Ancud Liceo Agrícola	410026	DMC	T2M
Senda Darwin		IEB	PP Y T2M

Fuente: Elaboración propia

Para validar los modelos meteorológicos de precipitación y temperatura, se comparan con los datos observados en las estaciones meteorológicas. Con los resultados de los modelos meteorológicos en los puntos donde se ubican las estaciones. Se consideran tres parámetros de eficiencia, cuyos rangos de resultados se presentan en la Tabla 4-3.

▪ **Eficiencia de Kling-Gupta (KGE):**

$$KGE = 1 - \sqrt{\left((r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right)^2 \right)}$$

donde:

r = coeficiente de correlación lineal entre datos observados y simulados

σ_{sim} = desviación estándar datos simulados, [mm/mes]

σ_{obs} = desviación estándar datos observados, [mm/mes]

μ_{sim} = promedio datos simulados, [mm/mes]

μ_{obs} = promedio datos observados, [mm/mes]

▪ **Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE):**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{sim}(t) - Pp_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})^2}$$

▪ **Coficiente de determinación R^2 :**

$$R^2 = \frac{(\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})(Pp_{sim}(t) - \overline{Pp_{sim}}))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{obs}(t) - \overline{Pp_{obs}})^2 \sum_{t=1}^{t=T} (Pp_{sim}(t) - \overline{Pp_{sim}})^2}$$

donde:

T = número total de pasos de tiempo

$Pp_{sim}(t)$ = precipitación simulada en tiempo "t", [mm/mes]

$Pp_{obs}(t)$ = precipitación observada en tiempo "t", [mm/mes]

$\overline{Pp_{obs}}$ = promedio de la precipitación observada, [mm/mes]

$\overline{Pp_{sim}}$ = promedio de la precipitación simulada, [mm/mes].

Tabla 4-3 Rango de resultados de parámetros de eficiencia

Clasificación	KGE	NSE	R ²
Insuficiente	<0,5	<0,5	<0,25
Satisfactorio	0,5 – 0,65	0,5 – 0,65	0,25 – 0,5
Bueno	0,65 - 0,75	0,65 - 0,75	0,5 - 0,75
Muy bueno	>0,75	>0,75	>0,75
Fuente	(Hossain,2019)	(Barbosa,J.; Fernández, A.; Lima, A. & Assis, L., 2019)	(Ku-Cheng, K. & Ming-Shyan, H., 2020)

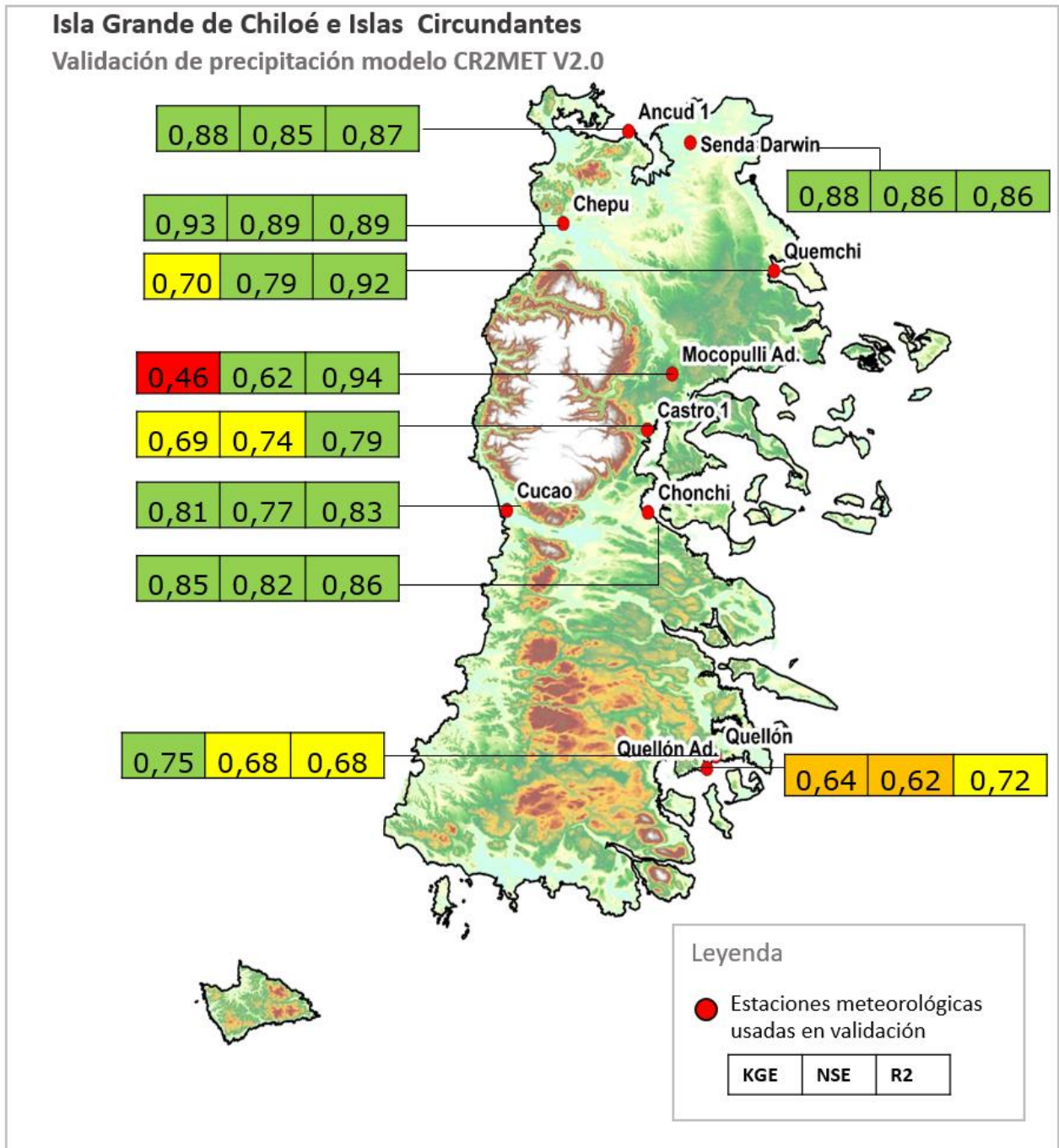
Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la validación de la precipitación con el modelo CR2MET v2.0 se observan en la Figura 4-6, donde cada estación presenta el resultado de KGE, NSE y R² (en dicho orden), categorizado según el color de su resultado. Mientras que la validación de la temperatura se observa en la Figura 4-7.

Los resultados de la validación de la precipitación con el modelo CR2MET V2.0 (Figura 4-6) en general presentan buenos resultados. En el sector norte Ancud y Chepu presentan buenas correlaciones, siendo la estación de Chepu la que presenta el mayor valor de KGE con un valor de 0,93. Más en la cordillera la estación Mocopulli Ad. es la estación que presenta el KGE más bajo KGE, pero el mayor R², lo cual se interpreta como una buena correlación, pero como diferencias importantes en los valores medios simulados. Continuando con las estaciones Cucao y Chonchi igual presentan un buen ajuste, siendo por el sector del sur de la cuenca la estación de Quellón Ad. la que presenta un menor ajuste, con un KGE de 0,64 y un R² de 0,72. Del análisis de la Figura 4-7 la mayoría de las estaciones presentan un buen desempeño de bondad de ajuste, presentando la mayoría un KGE mayor a 0,7.

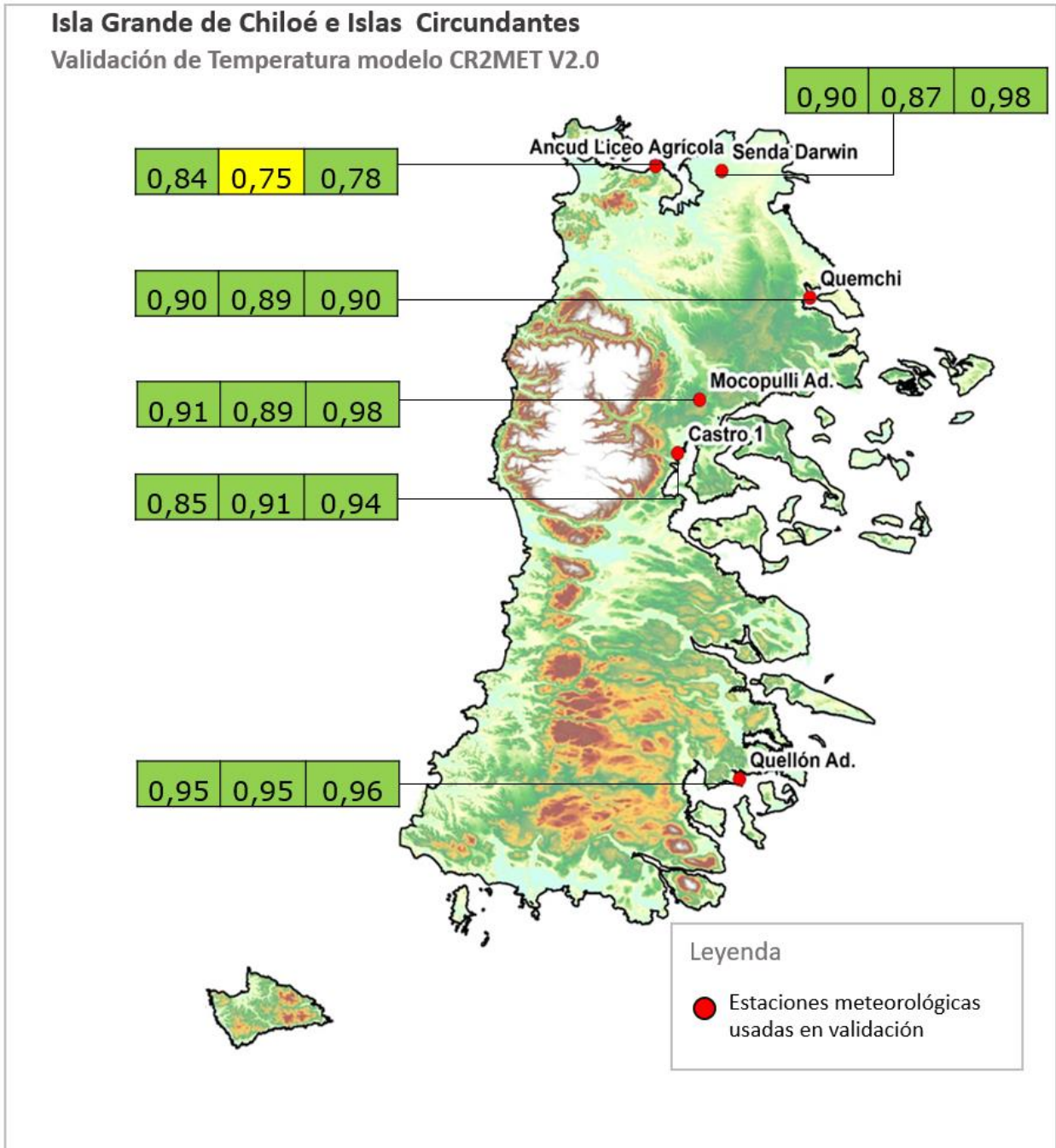
A nivel de temperatura, la mayoría de las estaciones también presentan una correlación alta, por lo que el ciclo anual de temperatura es bien representado (Figura 4-7). Lo anterior se ve reflejado en los valores altos de KGE y NSE (> 0,85). Más en detalle la estación que presenta mejores índices de desempeño es Quellón Ad. con un KGE de 0,95.

Como resultado del análisis de los índices observados y al observar que tanto para precipitación y temperatura se presenta una buena correlación con el producto CR2MET V2.0, se decide usar este producto en el periodo histórico de modelación (abril de 1985 a marzo de 2019), para estas forzantes meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CR2MET V2.0 (Boisier et al., 2018)

Figura 4-6: Resultados validación estaciones de precipitación y modelo CR2MET V2.0



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CR2MET V2.0 (Boisier et al., 2018)

Figura 4-7: Resultados validación estaciones meteorológica y modelo CR2MET v2.0.

4.3.2 Forzantes Meteorológicas para el Periodo Proyectado

4.3.2.1 Fuentes de Obtención de Forzantes Meteorológicas para el Periodo Proyectado

Para el período proyectado se consideran las mismas 5 forzantes meteorológicas que para el período histórico. En el caso de la velocidad del viento, la fracción de nubosidad y la humedad relativa, se utiliza una extensión de las series históricas, considerado el promedio mensual de cada variable para extender la serie. Distinto es el caso de la precipitación y temperatura, para las cuales se elige un modelo GCM (modelos globales de clima acoplados, por sus siglas en inglés) producto de una validación con las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca.

Los GCM permiten evaluar escenarios de clima futuros, utilizando supuestos como concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera y forzantes naturales y antrópicas. Para la modelación, se evaluaron 4 modelos GCM para los productos grillados de precipitación y temperatura. Estos modelos fueron obtenidos de la Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral (DGA, 2019a) y todos están elaborados tomando como base el escenario RCP 8.5, que representa el escenario más pesimista de los planteados dentro en el marco del CMIP5 (Tabla 4-4).

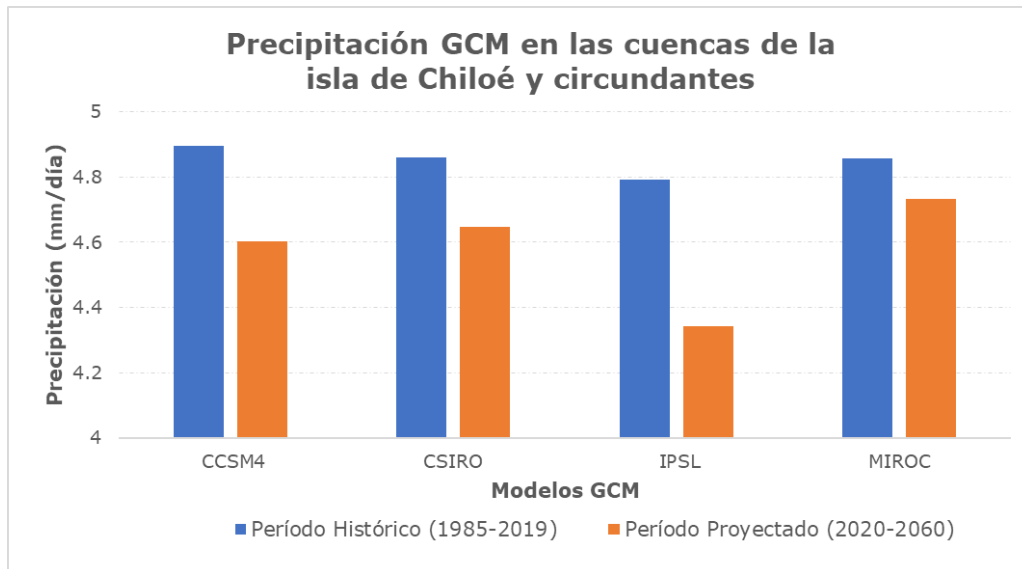
Tabla 4-4 Modelos global de clima seleccionados para representar las proyecciones de cambio climático.

Modelo	Institución	Sensibilidad
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence, Australia.	Baja Extrema
CCSM4	National Center for Atmospheric Research, USA.	Baja Moderada
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies, Japan.	Alta Moderada
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France.	Alta Extrema

Fuente: DGA (2019a)

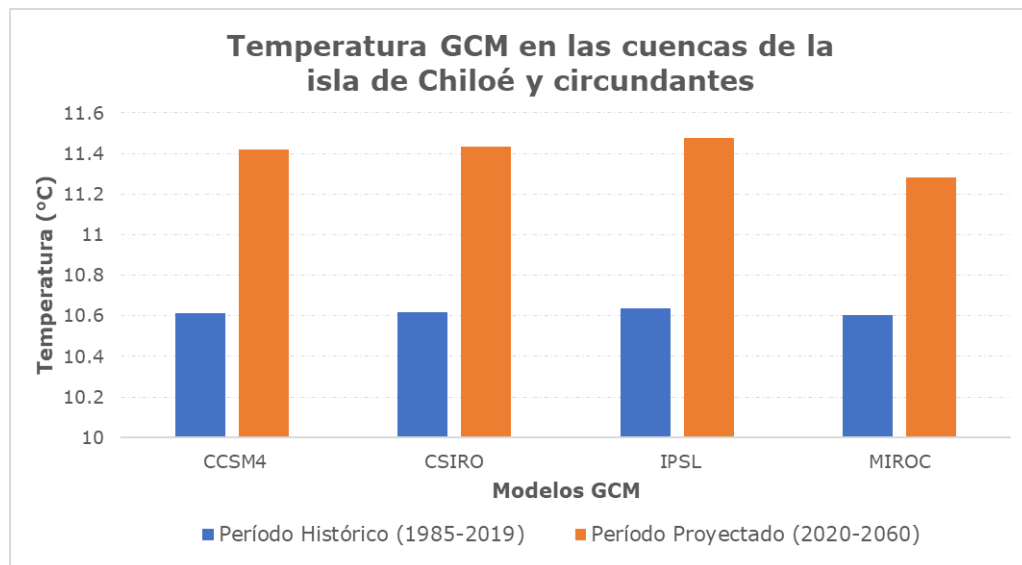
Un resumen de la variación de la precipitación y la temperatura para los 4 modelos considerados se presenta en la Ilustración 4-2 e Ilustración 4-3 para la zona de estudio. En el caso de la precipitación se observa que, para los 4 modelos la precipitación disminuye en el periodo proyectado. Es el modelo IPSL que presenta una mayor disminución con 164 [mm/año], mientras que en el modelo que menos se presenta una disminución es MIROC con 44 [mm/año]. Por otra parte, la temperatura aumenta aproximadamente 1 [°C] en cada

modelo, siendo MIROC el modelo que presenta un menor aumento de 0,7 [°C] y el IPSL el mayor incremento de 0,9 [°C].



Fuente: elaboración propia basado en DGA, 2019a

Ilustración 4-2 Precipitación para modelos GCM en las cuencas de la isla de Chiloé y circundantes



Fuente: elaboración propia basado en DGA, 2019a

Ilustración 4-3 Temperatura para modelos GCM en las cuencas de la isla de Chiloé y circundantes

4.3.2.2 Validación de Modelos Meteorológicos para el Período Proyectado

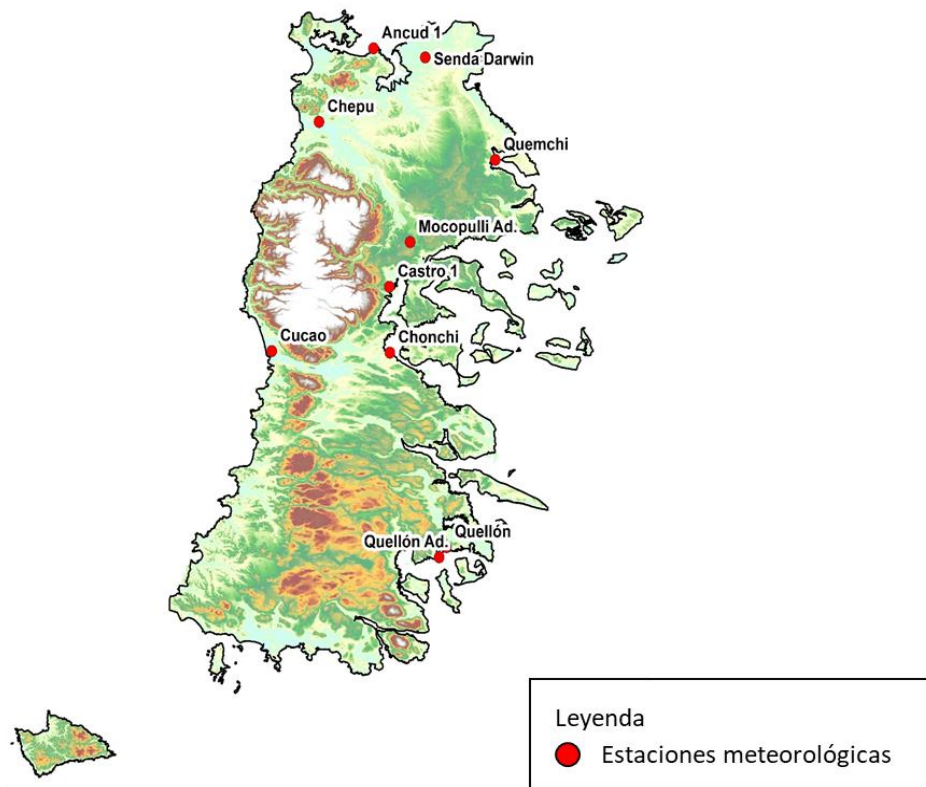
Para validar los modelos meteorológicos de precipitación y temperatura, se compara los modelos GCM con las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca a través de los índices de desempeño de Kling-Gupta (KGE), Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Coeficiente de determinación (R^2). Los resultados para cada modelo se observan en la Figura 4-8 y Figura 4-9 para la zona de estudio; cabe destacar que los datos considerados de las estaciones meteorológicas a comparar son sólo los datos que estén dentro del periodo histórico de modelación (1985-2019).

De los 4 GCM utilizados en el balance hídrico y su validación con las estaciones meteorológicas consideradas para validar la precipitación, destacan con mejor desempeño según el índice KGE, las estaciones ubicadas en Ancud 1, Chonchi y Senda Darwin. En todos los casos, los modelos con los mejores desempeños se asocian a los modelos CCSM4 y MIROC, y en el caso de la estación meteorológica de Chonchi, también indica una buena respuesta el modelo CSIRO. Los cálculos del coeficiente de determinación (R^2) poseen un mejor ajuste, siendo Ancud 1, Chepu, Chonchi, Mocopulli Ad. y Senda Darwin los que mejor correlación presentan. Los mejores desempeños de correlación se asocian a los modelos CCSM4, CSIRO y MIROC (Figura 4-8).

Las estaciones meteorológicas con resultados para el análisis de la temperatura en la cuenca de la isla Chiloé son 6 (Quemchi, Castro 1, Senda Darwin, Mocopulli Ad., Quellón Ad. y Ancud Liceo Agrícola). Los modelos analizados indican altos índices de desempeño Kling-Gupta para todas las estaciones en análisis, dados en el intervalo entre el 0,68 y 0,89. Es la estación Quellón Ad. la que mejor ajuste presenta para los 4 GCM, presentando correlaciones y bondad de ajuste $> 0,80$. En el caso de los cálculos desarrollados para definir la eficiencia (NSE), los índices más elevados destacan en la estación Castro 1. ($NSE > 0,81$). También existen estaciones donde la eficiencia es importante, pero fluctúa en un intervalo mayor ($0,65 < NSE < 0,82$). No obstante, la eficiencia disminuye notoriamente en las estaciones para modelos específicos, entendiéndose en este caso la estación Senda Darwin (CCSM4 y IPSL) y la estación Ancud Liceo Agrícola, donde solo existe un aumento de la eficiencia aplicando el modelo CCSM4 (Figura 4-9).

Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes

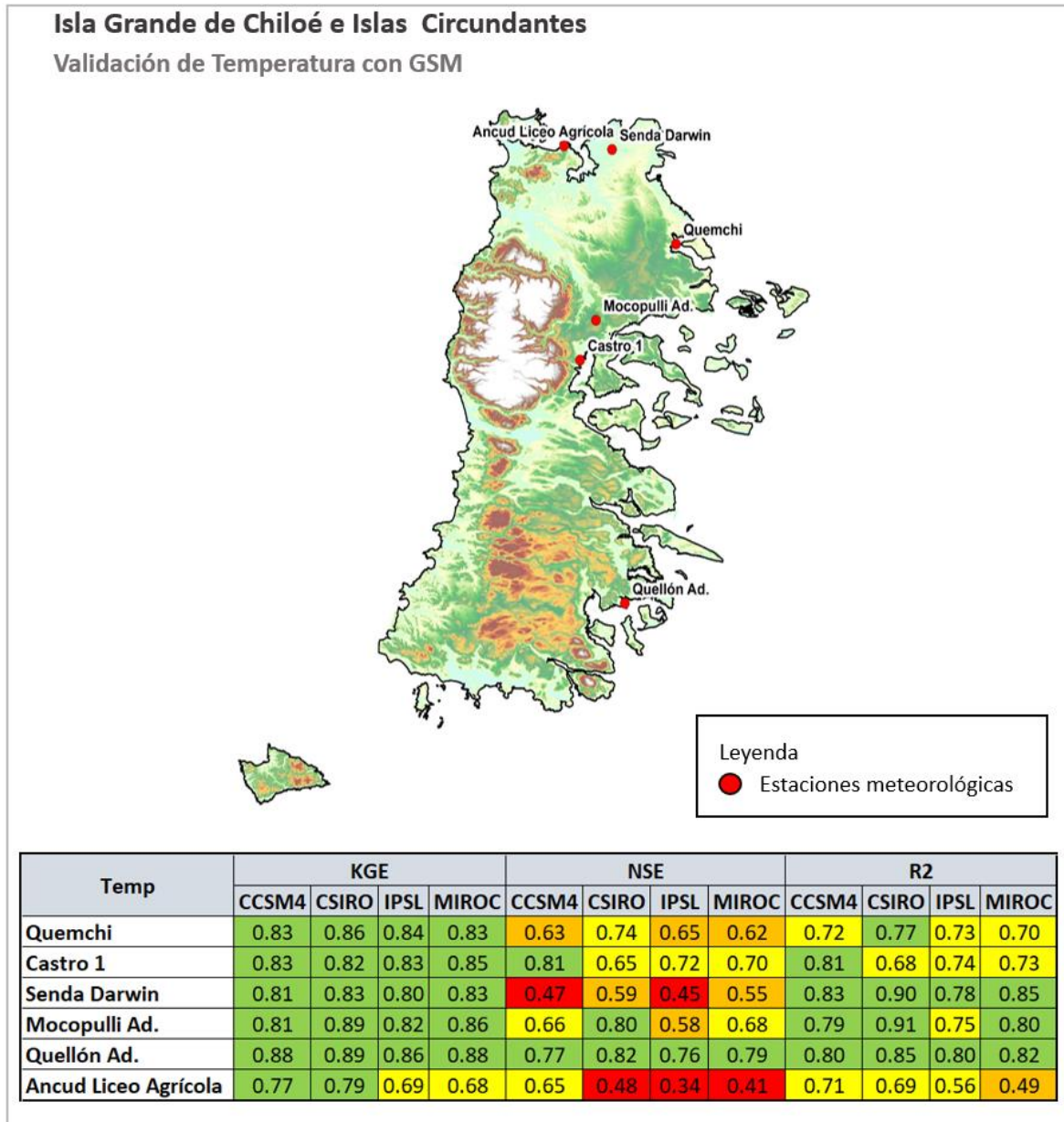
Validación de precipitación con GSM



PP	KGE				NSE				R2			
	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Ancud 1	0.51	0.50	0.43	0.50	0.24	0.24	0.08	0.19	0.38	0.37	0.28	0.35
Chepu	0.45	0.44	0.37	0.45	0.09	0.12	-0.04	0.08	0.35	0.39	0.31	0.39
Quemchi	0.38	0.33	0.28	0.37	0.08	0.06	-0.06	0.06	0.28	0.27	0.22	0.29
Castro 1	0.38	0.45	0.39	0.41	0.20	0.26	0.09	0.12	0.30	0.34	0.23	0.24
Cucao	0.40	0.39	0.30	0.41	-0.05	-0.05	-0.28	-0.15	0.20	0.20	0.12	0.20
Chonchi	0.52	0.54	0.50	0.56	-0.07	0.11	0.01	0.09	0.31	0.29	0.25	0.33
Quellón	0.38	0.40	0.34	0.42	-0.06	-0.04	-0.24	-0.10	0.17	0.18	0.12	0.19
Mocopulli Ad.	0.41	0.34	0.24	0.28	0.28	0.23	0.09	0.09	0.41	0.41	0.36	0.26
Quellón Ad.	0.40	0.39	0.31	0.36	0.13	0.12	-0.12	0.01	0.22	0.21	0.12	0.17
Senda Darwin	0.53	0.48	0.47	0.50	0.14	0.15	0.14	0.17	0.32	0.33	0.35	0.35

Fuente: Elaboración propia

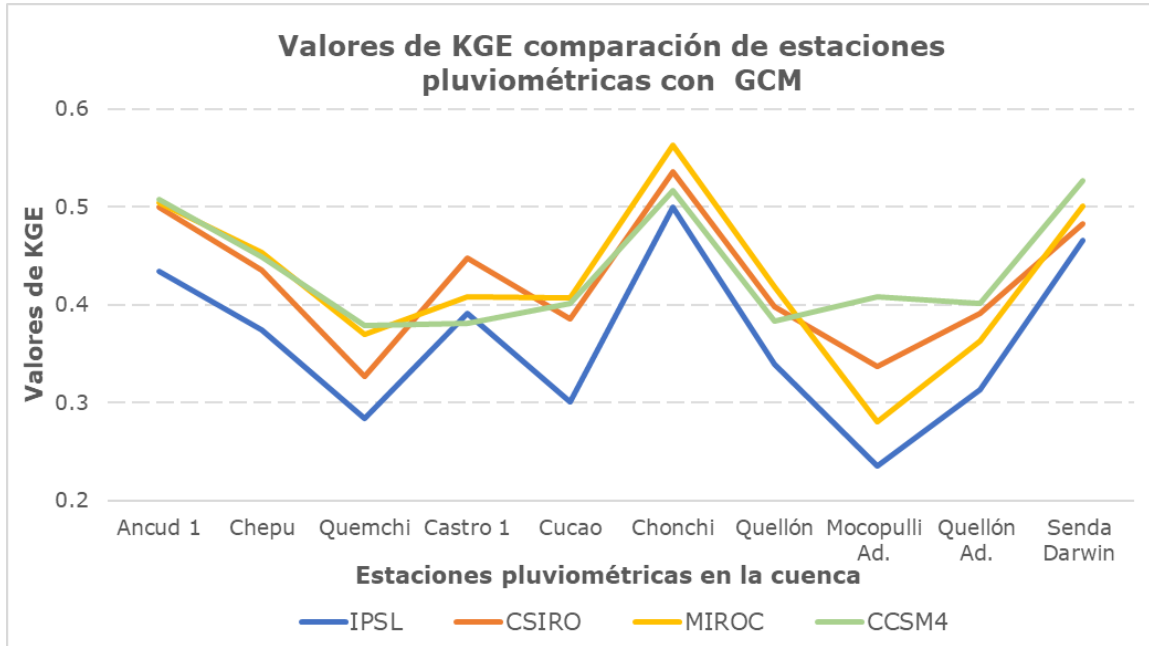
Figura 4-8 Resultados validación Precipitación con modelos GCM.



Fuente: Elaboración propia

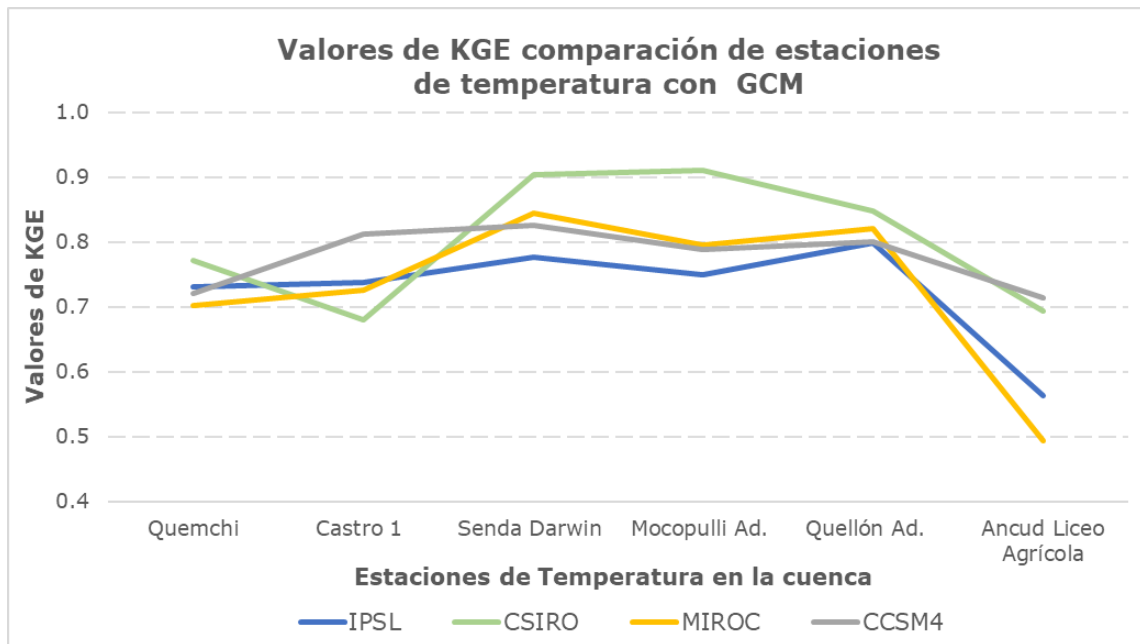
Figura 4-9 Resultados validación Temperatura con modelos GCM.

El resultado de KGE tanto para la validación de la precipitación y temperatura con los modelos GCM se puede observar en el gráfico Ilustración 4-4 e Ilustración 4-5. En estos gráficos se muestra la información de forma resumida.



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4-4 Valores de KGE comparación estaciones pluviométricas con GCM.



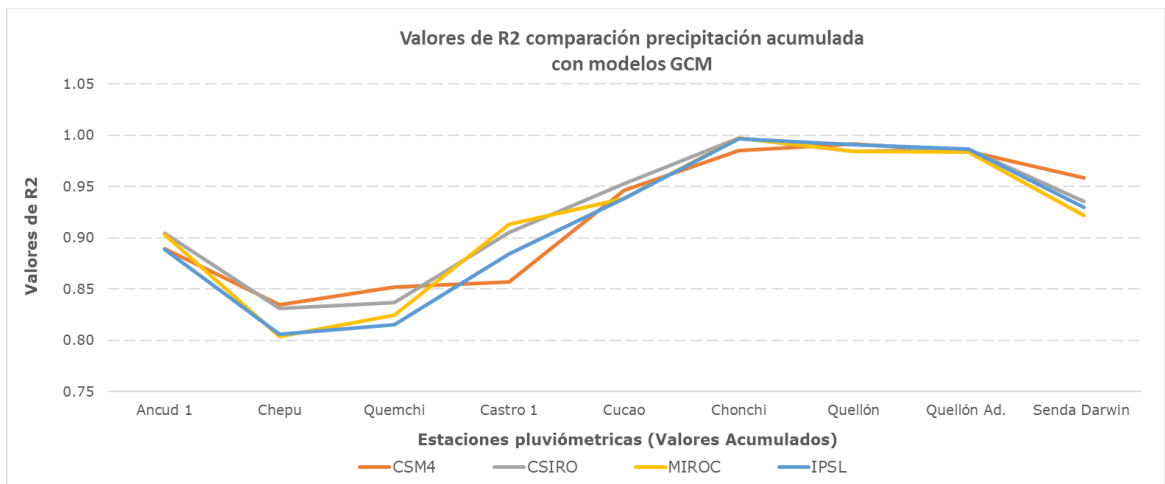
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4-5 Valores de KGE comparación estaciones de temperatura con GCM.

Como se puede apreciar en los gráficos (Ilustración 4-4 e Ilustración 4-5), para el caso de la precipitación los modelos presentan un ajuste más bien parecido, son los modelos CCSM4, MIROC y CSIRO los que mejor KGE presentan, con promedios de 0,44, 0,43 y 0,42 respectivamente, versus un 0,36 del modelo IPSL. En el caso de la temperatura los modelos presentan un mejor desempeño con KGE en promedio de 0,8; siendo el modelo IPSL el que presenta peor desempeño.

Como se puede observar los resultados de la validación son parecidos para los modelos CCSM4, MIROC y CSIRO. Por lo anterior, se realiza un análisis adicional de precipitación acumulada. Este análisis, se lleva a cabo comparando las precipitaciones acumuladas en cada estación con la precipitación acumulada en el mismo período (1985 a 2019) para cada modelo, para los días en que tanto la estación como el modelo tienen dato. A las series de precipitación acumulada se les calculó el coeficiente R^2 de dispersión estadística, que representa qué tan acercados o alejados se encuentran los pares de puntos de precipitación acumulada con respecto a una recta de pendiente 1 (línea de igualdad, que indicaría que ambas series son idénticas).

A modo de resumen, en la Ilustración 4-6 y Figura 4-10 se presentan los resultados de R^2 para la precipitación acumulada en todas las estaciones y todos los modelos. Cabe destacar, que para este cálculo no se consideró la estación Mocopulli Ad. puesto que presenta sólo 6 años de información. Se observa en general, que los modelos CCSM4 y MIROC resultan en mejores ajustes con respecto a los datos observados, con un R^2 promedio de 0,92. Se observa que la comparación de la precipitación acumulada presenta bajo grado de ajuste en Chepu y Quemchi para cada uno de los escenarios, pero aún así se presenta un gran grado de ajuste con $R^2 > 0,80$.

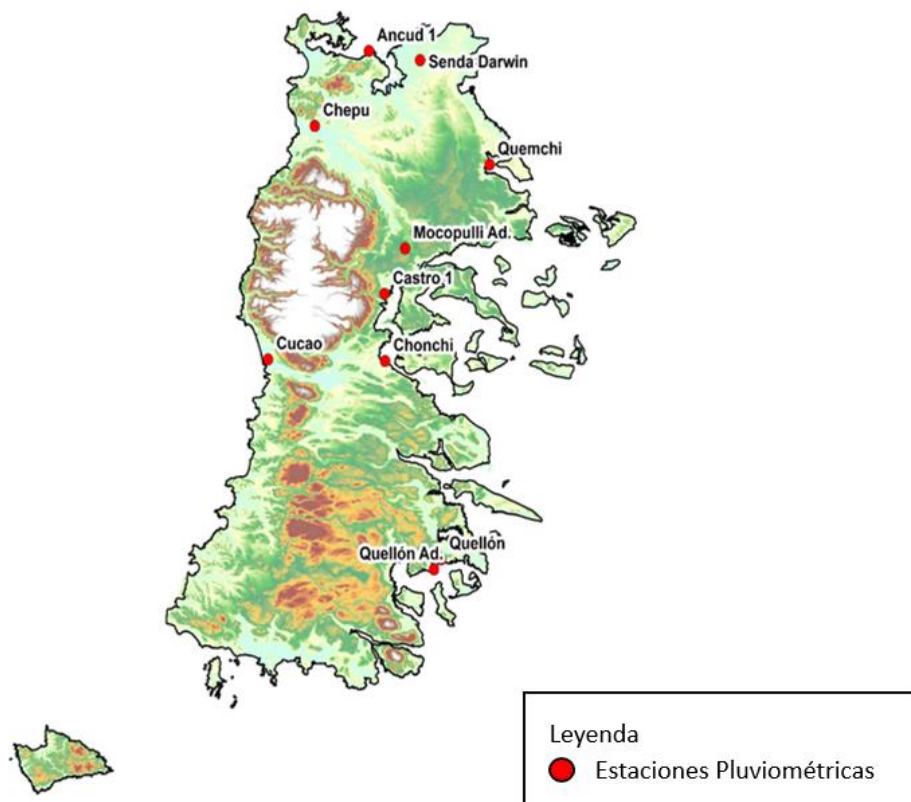


Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4-6 Resultado de validación precipitación acumulada para modelos GCM.

Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes

Validación de precipitación acumulada con GSM



PP	R2			
	CSM4	CSIRO	MIROC	IPSL
Ancud 1	0.89	0.90	0.90	0.89
Chepu	0.83	0.83	0.80	0.81
Quemchi	0.85	0.84	0.82	0.82
Castro 1	0.86	0.91	0.91	0.88
Cucao	0.95	0.95	0.94	0.94
Chonchi	0.98	1.00	1.00	1.00
Quellon	0.99	0.98	0.98	0.99
Quellon Ad.	0.98	0.99	0.98	0.99
Senda Darwin	0.96	0.94	0.92	0.93

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-10 Resultados validación de precipitación acumulada con modelos GCM.



Si se comparan los modelos (Ilustración 4-6) sin considerar las estaciones que presentan peores resultados (Chepu y Quemchi) se obtiene que el modelo MIROC presenta un mejor ajuste con un R^2 de 0,95. Por lo que, para la modelación es el GCM "MIROC-ESM" el utilizado para los valores proyectados hacia el 2060 de precipitación y temperatura.

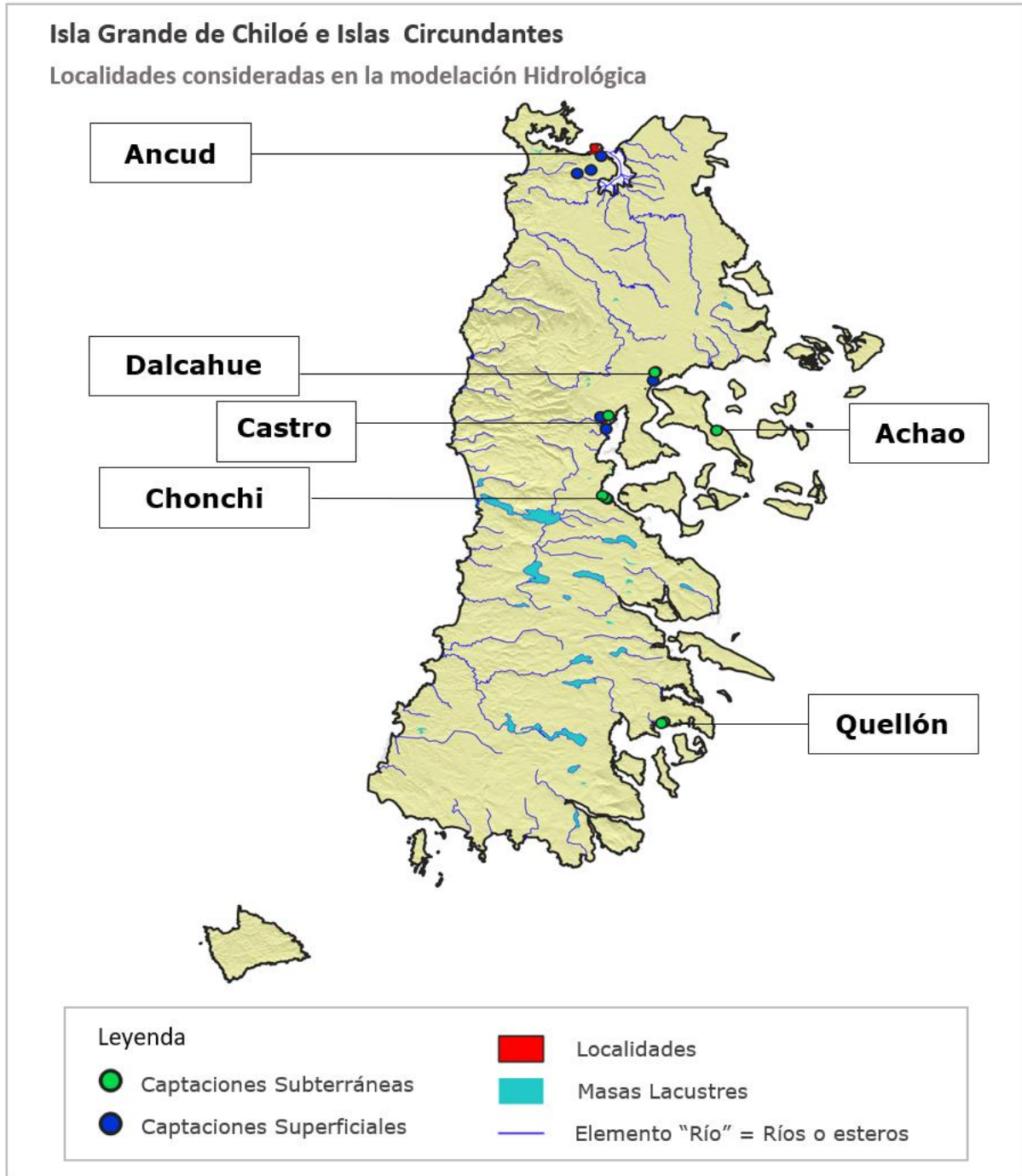
4.4 Demanda de Agua Potable Urbana

En la modelación hidrológica se han tomado en cuenta las principales localidades de la cuenca, dentro de las que se consideran las siguientes:

- Castro
- Chonchi
- Achao
- Ancud
- Quellón
- Dalcahue

La ubicación de cada una de estas localidades se presenta en la Figura 4-11 y han sido incluidas en el modelo WEAP a través de elementos **Sitio de Demanda**. Cada sitio de demanda de agua potable urbana posee obras de abastecimiento para cubrir la demanda asociada a su localidad, siendo su demanda de agua estimada usando proyecciones de población y la dotación de cada localidad (Para más detalle ver Anexo F-1 Sección 2).

Todos los Sitios de Demanda extraen aguas desde sus respectivas fuentes, consumen una porción de ésta, y el resto es restituido a los cauces superficiales en los puntos de devolución de las plantas de tratamiento de aguas servidas. Casi la totalidad de estas localidades cuentan con abastecimiento procedente desde aguas superficiales y subterráneas (se abastece prioritariamente desde su fuente superficial y como segunda opción de su fuente subterránea), a excepción de Chonchi que se abastece subterráneamente y Ancud que se abastece puramente superficialmente. En la Figura 4-11 se puede visualizar la ubicación de cada uno de estos puntos de captación, las obras mencionadas corresponden a 23 pozos y sondajes repartidos para las 6 localidades. Estas obras de abastecimientos se desglosan en el archivo **Captaciones_APU_En_Operación** incorporado en la carpeta del modelo. Cabe destacar que se ha asumido para todas las localidades un consumo igual a 20 [%].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-11 Localidades consideradas en la modelación hidrológica

4.5 Demanda de Agua Potable Rural

Adicionalmente a las localidades urbanas, también son incluidas las localidades que corresponden a Servicio Sanitario Rural (SSR). En la cuenca existen 104 localidades, que en su totalidad son abastecidos desde fuentes de aguas subterráneas.

Dada la gran cantidad de sistemas APR en la cuenca, en el modelo éstos han sido unificados por sector acuífero, es decir, dado que las localidades se distribuyen en 8 sectores acuíferos, se han creado 8 elementos que agrupan los sistemas APR presentes en cada sector acuífero: SSR_AC_01, SSR_AC_02, SSR_AC_03, SSR_AC_05, SSR_AC_06, SSR_AC_07, SSR_AC_09 y SSR_AC_10. Para el caso de las localidades que se encuentran en las islas circundantes donde no se incluyeron sectores acuíferos, estas extraen agua directamente de los cauces superficiales (SSR_CU_29, SSR_CU_30, SSR_CU_32 y SSR_CU_33). En la Tabla 4-5 se puede visualizar en que sitio de demanda quedo englobado cada una de las localidades.

Estos sistemas SSR agrupados han sido considerados en el modelo WEAP por medio de elementos **Sitio de Demanda**, considerando el método en que el modelo calcula la demanda de agua estimada usando usando proyecciones de población y la dotación de cada localidad (Para más detalle ver Anexo F-1 Sección 2, carpeta SSR). Todos los Sitios de Demanda extraen aguas desde sus respectivas fuentes, consumen una porción de ésta, y el resto no consumido se devuelve hacia el acuífero mediante infiltración. En la Figura 4-12 se puede visualizar la ubicación de cada uno de estos puntos de captación, las obras mencionadas corresponden a 104 pozos y sondaje. Estas obras de abastecimientos se desglosan en el archivo Captaciones_SSR.xlsx incorporado en la carpeta del modelo. Cabe destacar que se ha asumido para todas las localidades un consumo igual a 20 [%].

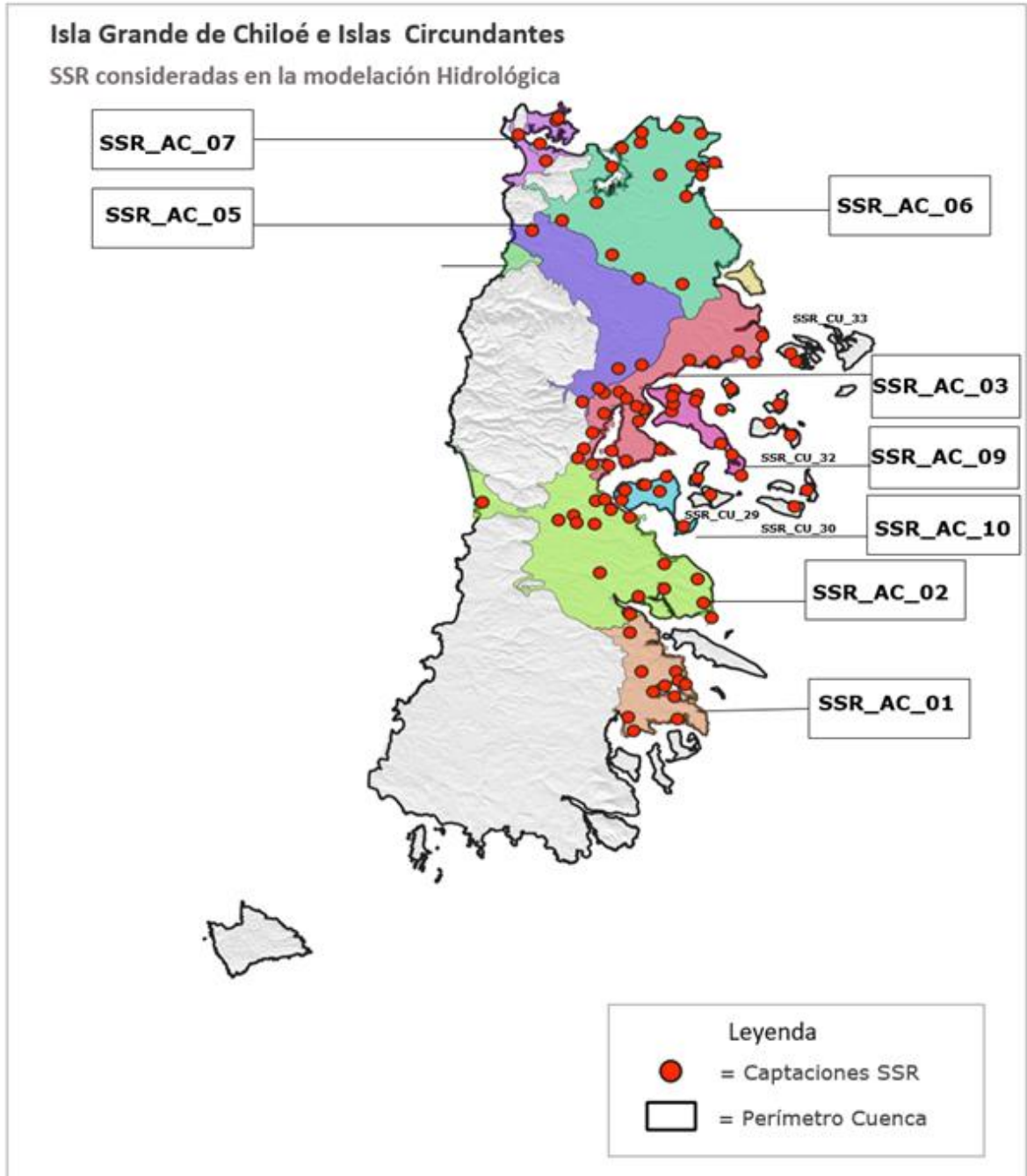
Por último, a pesar de que los sistemas APR han sido agrupados en elementos **Sitio de Demanda**, se han creado subdivisiones (ramales o "branches") dentro de estos elementos, en que se individualizan los sistemas APR. Dentro del sector acuífero SSR_AC_01 existen 11 sistemas APR, por lo que el **Sitio de Demanda** SSR_AC_01 tiene 11 ramales o "branches" para individualizarlos; análogamente se han estructurado los **Sitios de Demanda** de las otras localidades.

Tabla 4-5: Agrupación de SSR consideradas en la modelación WEAP

Nombre Oficial SSR	Sitio Demanda WEAP
Comité De Agua Potable Chadmo Central	SSR_AC_01
Comité Agua Potable Trincao	SSR_AC_01
Comité Agua Potable Rural De Auchac	SSR_AC_01
Comité Agua Potable Rural Coinco	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Curanué	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Rural Villa Corcovado San Antonio Y Oqueldán	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Rural De Santa Rosa Y Candelaria	SSR_AC_01
Comité Agua Potable Rural De Yaldad	SSR_AC_01
Comité Agua Potable Rural Aguas Claras	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Rural Agua Fresca	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Rural Quilen	SSR_AC_01
Comité De Agua Potable Rural Lago Natri	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural De Cucao	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural Huillinco	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural Queilen	SSR_AC_02
Comité Agua Potable Rural De Río Mapa	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Del Sector De Pureo	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural De Pucatue	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural De Tara	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural Teupa	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Leibun- Aituy	SSR_AC_02
Comité de Agua Rural Los Tres Nonuco	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Quilipulli-Romazal	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Villa Ohiggins	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Contuy	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Ñida	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Río Lolle	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Pindaco-Quitripulli	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural De Alcaldeo de rauco	SSR_AC_02
Comité de Agua Potable Rural Agoni Alto	SSR_AC_02
Comité De Agua Potable Rural Los Arrayanes De Calen San Juan	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De La Estancia	SSR_AC_03
Comité Agua Potable Llau Llau - Ten Ten	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural Nercón - Los Aromos Y Gamboa Alto	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De Pid Pid	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De Putemún	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural Rilán	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De San José	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De Quetalco	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural Tenaún	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural Tocoihue-Tenaún Alto	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural Quicaví Unidad Vecinal N°15	SSR_AC_03
Comité Para El Progreso De Nalhuitad	SSR_AC_03
Comité Pro Agua Potable Quinched Tauco	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rauco Alto	SSR_AC_03
Comité de Agua Potable Rural La Esperanza	SSR_AC_03
Comité de Agua Tey Alto	SSR_AC_03
Comité de Agua Potable Rural Yutui	SSR_AC_03
Comité de Agua Potable Rural Quilquico Norte	SSR_AC_03
Comité De Agua Potable Rural De La Chacra	SSR_AC_05
Comité De Agua Rural De Piruquina	SSR_AC_05
Comité De Agua Potable Rural De Mocopulli	SSR_AC_05

Nombre Oficial SSR	Sitio Demanda WEAP
Comité De Agua Potable Rural Degañ	SSR_AC_05
Comité De Agua Potable Rural Chepu - Anguay	SSR_AC_05
Comité De Agua Potable Rural Ñiucho	SSR_AC_05
Comité de Agua Potable Rural Coipomó	SSR_AC_05
Comité De Agua Potable Rural El Quilar	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural Caulín	SSR_AC_06
Ilustre Municipalidad De Ancud (Chacao)	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural De Chaquihual	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural De Coñimo	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Bahia Linao	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural De Manao	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural Pupelde Bajo La Playa	SSR_AC_06
Comité Agua Potable Lliuco Unidad Vecinal 6 Quemchi	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural Pugueñun - Pihuio	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural De Curamó	SSR_AC_06
Comité Pro-Agua Potable Sector Coquiao	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Punta Chilen	SSR_AC_06
Comité de Agua Potable Rural Huelden- Lamecura	SSR_AC_06
Comité de Agua Potable Rural Huicha	SSR_AC_06
Comité de Agua Potable Rural Tantauco	SSR_AC_06
Comité De Agua Potable Rural De Quetalmahue	SSR_AC_07
comité Agua Potable Rural Pilluco	SSR_AC_07
Comité Pro-Agua Potable Sector Calle	SSR_AC_07
Comité de Agua Guaplacuy	SSR_AC_07
Comité de Agua Potable Rural De Ducan	SSR_AC_07
Comité De Agua Potable Rural Putique Unido	SSR_AC_09
Comité De Agua Potable Curaco De Velez	SSR_AC_09
Comité De Agua Potable Rural Miramar	SSR_AC_09
Comité De Agua Quinchao Unido	SSR_AC_09
Comité De Agua Rural Ampliado De Huyar Alto	SSR_AC_09
Junta de Vecinos N°7 Bernardo OHiggins	SSR_AC_09
Comité de Agua Potable Rural Los Alamos	SSR_AC_09
Comité de Agua La Amistad de Chequian	SSR_AC_09
Comité de Agua Potable Rural Quetro-Diañ	SSR_AC_09
Comité De Agua Acheuque	SSR_AC_10
Comité De Agua Potable Rural Aldachildo	SSR_AC_10
Comité Agua Potable Rural De Ichuac	SSR_AC_10
Comité De Agua Potable Rural De San Agustin Y Liucura	SSR_AC_10
Comité Agua Potable Rural Puqueldón	SSR_AC_10
Comité De Agua Potable Rural Chulchuy	SSR_AC_10
Comité de Agua Potable Rural Detif	SSR_AC_10
Comité De Agua Potable Rural Chelín Y Huechuchelín	SSR_CU_29
Comité De Agua Los Angeles - Castro (Isla Quehui)	SSR_CU_29
Comité De Agua Potable Rural Isla Apiao	SSR_CU_30
Comité de Agua Capilla Antigua Los Tres sectores I. Chaulinec	SSR_CU_30
Comité De Agua Potable Rural Pihuel Centro Quenac	SSR_CU_32
Comité De Agua Potable La Villa Llingua	SSR_CU_32
Comité De Agua Potable Rural Isla Lin Lin	SSR_CU_32
Comité De Agua Potable Rural Isla Caguach	SSR_CU_32
Comité de Agua Potable Rural Isla Meulín.	SSR_CU_32
Comité De Agua Potable Rural Isla Añihue	SSR_CU_33
Comité Agua Potable Rural Mechuque	SSR_CU_33

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-12 Ubicación de los puntos de extracción de aguas subterráneas de las SSR



4.6 Demanda de Agua para Uso Industrial

En las cuencas de las islas Chiloé y circundantes la demanda industrial engloba un total de 47,63 [Hm³/año]. Las principales plantas industriales pertenecen al rubro de la piscicultura y son las siguientes: Salmones TECMAR S.A. (Piscicultura en el río Trainel), SALMOPROCESOS S.A, Cultivos Marinos Chiloé (Tocoihue), Compañía Salmonífera Dalcahue Ltda. (Piscicultura Quillaico, Dalcahue), AQUACHILE (Piscicultura AUCAR) y INVERMAR S.A. (Piscicultura río Claro, Dalcahue).

Dado que son 41 puntos de captación de demanda industrial, en el modelo éstos han sido unificados por sector acuífero, es decir, dado que las industrias se distribuyen en 5 sectores acuíferos, se han creado 5 elementos que agrupan las industrias presentes: IND_Ancud, IND_Castro, IND_Chepu, IND_Huillinco y IND_Quellón. Estas industrias agrupadas han sido consideradas en el modelo WEAP por medio de elementos **Sitio de Demanda**, considerando como demanda los valores entregados en la **Tabla 4-6**. Todos los Sitios de Demanda extraen aguas desde sus respectivas fuentes, consumen una porción de ésta, y el resto no consumido se devuelve al cauce más cercano. Estas obras de abastecimientos se desglosan en el archivo Captaciones_Industrias.xlsx incorporado en la carpeta Industrias del modelo. Cabe destacar que se ha asumido para todas las localidades un consumo igual a 20 [%].

Tabla 4-6 Demanda industrial considerada en la modelación WEAP

Razón Social	Planta	Demanda Hídrica [m3/año]	Sitio Demanda WEAP
Aquachile S.A.	Aquachile (Piscicultura Aucar)	4.095.346	IND_Ancud
Sociedad agro lácteos de Chiloé S.A.	Sociedad agro lácteos de Chiloé S.A.	8.978	IND_Ancud
Salmones Aucar Limitada	Salmones Aucar	554.805	IND_Ancud
Mainstream Chile S.A.	Planta Quemchi Prosal	181.622	IND_Ancud
Soc. pesquera Silgar Ltda.	Sociedad pesquera Silgar Ltda.	1.888	IND_Ancud
Cermaq Chile S.A.	Planta Ancud	240.959	IND_Ancud
Inmuebles Cataluña Ltda.	Inmuebles Cataluña.	22.770	IND_Ancud
Algas marinas S.A	Algamar planta Ancud	1.737	IND_Ancud
Cultivos marinos Chiloé Ltda.	Cultivos marinos Chiloé (Tocoihue)	7.167.402	IND_Castro
Compañía salmonífera Dalcahue Ltda.	Salmonífera Dalcahue Ltda.	4.392.861	IND_Castro
Salmones Antártica S.A.	Salmones Antártica S.A (Pisc. Astillero)	38.468	IND_Castro
Invermar S.A.	Invermar S.A. (Pisc. río claro Dalcahue)	3.859.011	IND_Castro
Alimentos técnicos S.A.	Alitec S.A.	43.235	IND_Castro
Invertec Seafood S.A.	Invertec seafood S.A. (Castro)	3.767	IND_Castro
Salmones Tecmar S.A.	Salmones Tecmar (Chonchi)	27.310	IND_Castro
Blue Shell S.A.	Blue Shell S.A.	656.244	IND_Castro
Sociedad comercial e industrial Agromar Ltda.	Pesquera Agromar	23.978	IND_Castro
Procesadora Huenocoihue Spa.	Planta proceso Huenocoihue	72.301	IND_Castro
Cermaq Chile S.A.	Planta Dalcahue	82.230	IND_Castro
Pesca y cultivos Don Jorge Ltda	Pesca y cultivos Don Jorge Ltda.	6.123	IND_Castro
Camanchaca cultivos sur S.A.	Rauco	950.763	IND_Castro
Sociedad Najar Ltda.	Sociedad najar Ltda. (Dalcahue)	10.900	IND_Chepu
Salmones Antártica S.A.	Salmones Antártica S.A. (Pisc. Río Alcaldeo)	44.449	IND_Huillinco
Sociedad Fernando y Suarez Ltda.	Sociedad ferrando y Suarez Ltda.	48.969	IND_Huillinco
Aqua Chiloé Ltda.	Aqua Chiloé Ltda.	1.017	IND_Huillinco
Salmones Tecmar S.A.	Salmones Tecmar (Pisc. Río Trainel)	13.837.823	IND_Huillinco
Campomar Spa	Campomar S.A.	143	IND_Huillinco
Toralla sociedad anónima	Toralla S.A.	267.345	IND_Huillinco
Salmones Antártica S.A.	Salmones Antártica S.A.	86.161	IND_Huillinco
Antarfood S.A.	Planta proceso Antarfood	145.535	IND_Huillinco
Salmoprosesos S.A.	Salmoprosesos S.A.	8.657.474	IND_Huillinco
Procesadora Huenocoihue spa	Planta Guafo	28.989	IND_Huillinco
St. Andrews Smoky Delicacies S.A.	St. Andrews	342.407	IND_Huillinco
Exportadora los fiordos limitada	Planta de proceso Quellón	718.732	IND_Quellón
Salmones pacific star S.A.	Planta de proceso	217.590	IND_Quellón
Salmones caolín S.A.	Planta proceso caolín	127.611	IND_Quellón
Río dulce s a	Río dulce s.a.	117.241	IND_Quellón
Pesquera Deep Sea Food S.A.	Pesquera Deep Sea Food S.A.	50.351	IND_Quellón
Yadran Quellón S.A.	Yadran Quellón	305.905	IND_Quellón
Surproceso S.A.	Surproceso S.A.	184.754	IND_Quellón

Fuente: RETC (2021)



4.7 Demanda de Agua para Uso Agrícola

Desde el punto de vista de la modelación hidrológica para la elaboración de un plan estratégico de gestión hídrica, no existe una demanda de agua importante generada por la actividad agrícola presente en la cuenca. Los terrenos agrícolas son incluidos en los usos de suelos en donde representan sólo 0.3 [Km²] en el área total de la cuenca (CONAF, 2014).

4.8 Demanda de Agua para Uso Forestal

Desde el punto de vista de la modelación hidrológica para la elaboración de un plan estratégico de gestión hídrica, no existe una demanda de agua importante generada por la actividad forestal presente en la cuenca. Las plantaciones forestales son incluidas en los usos de suelos en donde representan sólo 2.4 [Km²] en el área total de la cuenca (CONAF, 2014).

4.9 Embalses

Desde el punto de vista de la modelación hidrológica para la elaboración de un plan estratégico de gestión hídrica, es relevante el tranque Pudeto, que se ubica al sur de la localidad de Ancud. Este tranque tiene una capacidad de 400.000 m³ y es utilizado para el abastecimiento de agua potable de Ancud.

Este tranque es incluido en la modelación WEAP a través de un elemento **Embalse** con capacidad de almacenamiento de 400.000 m³, desde el cual nace un elemento **Conducción** que abastece al **Sitio de Demanda LOC_ANCUD** (que representa a la localidad de Ancud en WEAP).

Otros embalses (tranques Quellón y Castro) son incluidos también en la modelación WEAP, pero no corresponden a embalses que actualmente estén en funcionamiento, sino que son embalses probados en los escenarios de gestión de este estudio.

4.10 Centrales Hidroeléctricas

No existen centrales hidroeléctricas en la cuenca.

4.11 Sectores Acuíferos

Para la modelación en WEAP, el acuífero ha sido considerado a través de 10 elementos Aguas Subterráneas, cada uno de los cuales representa uno de los sectores acuíferos mencionados en el apartado 3.2.6 Sectorización de los Acuíferos . Como se mencionó en aquella sección del informe, esos sectores acuíferos fueron definidos tomando en consideración los SHAC vigentes en la cuenca que, a pesar de que corresponden a límites que dificultan la estimación de los flujos subterráneos, es necesario tomarlos como los volúmenes de control para el



análisis de aguas subterráneas por razones administrativas de la DGA. En la Figura 3-15 se presentaron los 10 sectores acuíferos mencionados.

Gracias a las campañas de gravimetría y prospección TEM realizadas en el presente estudio, ha sido posible contar con información más certera sobre las características que posee el acuífero en la cuenca de estudio. Toda la información levantada, junto con su análisis e interpretación, es presentada en detalle en el apartado 3.2. Modelo Hidrológico Conceptual Subterráneo.

Cada uno de los 10 sectores acuíferos son representados en el modelo WEAP mediante elementos Aguas Subterráneas ("*groundwater*"), a los que se les asigna su capacidad para almacenar. Adicionalmente, se imponen flujos subterráneos entre elementos Aguas Subterráneas que se obtienen bajo el supuesto de que el caudal subterráneo descargado por el sector acuífero es directamente proporcional al volumen de agua almacenado en aquel sector acuífero. Este corresponde a un supuesto realizado en vista de que la cuenca no cuenta con un monitoreo de aguas subterráneas que sea sistemático y que entregue información sobre la cual basarse. Escrito matemáticamente, el supuesto corresponde a:

$$Q(t) = CK \cdot V(t - 1)$$

Donde $Q(t)$ es el caudal efluente del sector acuífero en el mes t , $V(t - 1)$ es el volumen de agua presente en el sector acuífero en el mes anterior al mes en curso (por limitación de WEAP, solo se permite utilizar valores calculados en meses anteriores) y CK es un coeficiente de proporcionalidad, calibrado de tal manera que la evolución del volumen acuífero en el tiempo sea relativamente estable.

El volumen húmedo fue definido como el espacio entre el basamento y el nivel estático del sector acuífero de la cuenca, multiplicado por el coeficiente de almacenamiento. Por otro lado, se entiende por capacidad de almacenamiento al espacio entre el basamento y la cota *DEM* (el espacio que virtualmente podía ocupar el agua subterránea), también multiplicado por el coeficiente de almacenamiento. Los valores consideradores se encuentran en la Tabla 4-7 y su inclusión en la modelación se encuentra en el *Key Assumptions* "Acuífero".

Tabla 4-7. Sectores acuíferos definidos para la cuenca en estudio y volúmenes

Sector Acuífero /SHAC	Capacidad de almacenamiento o volumen disponible [Hm3]	Volumen húmedo [Hm3]
AC_01 Quellón	9.471	7.906
AC_02 Huillinco 2	25.994	21.956
AC_03 Castro	21.006	17.345
AC_04 Piuchén	133	85
AC_05 Chepu	17.515	16.111
AC_06 Ancud_2	36.453	33.958
AC_07 Ancud_1	3.812	3.630
AC_08 Isla Caucahue	1.965	1.829
AC_09 Isla Quinchao	3.659	2.750
AC_10 Isla Lemuy	3.332	2.899


Fuente: SHAC DGA y elaboración propia.

Los sectores acuíferos que destacan con mayor capacidad de almacenamiento y a su vez el volumen húmedo, son Ancud_2, Huillinco 2, Castro y Chepu. De esta manera, son sectores a tomarse en consideración de presentarse escenarios donde exista dificultad para el abastecimiento de agua, en especial para consumo humano, definiéndose sondajes donde el basamento también indique profundidad y los niveles estáticos se correspondan para un buen aprovechamiento del vital recurso subterráneo.









4.12 Resumen Esquemático Modelo WEAP

A continuación, en la Tabla 4-8, se presenta un resumen esquemático del modelo WEAP.

Tabla 4-8 Resumen esquemático del modelo WEAP

Elemento (español - inglés)	Simbología	Elementos en el modelo		
Río - River		Estero_Coipomo	Rio_Huenocoihue	Entrada_Mar
		Estero_Cudehue	Rio_Huicha	Estero_Sin_Nombre_01
		Estero_Cunao	Rio_Huillinco	Estero_Sin_Nombre_02
		Estero_Guamblad	Rio_Inio	Estero_Sin_Nombre_03
		Estero_Lechagua	Rio_Llanco	Estero_Sin_Nombre_04
		Estero_Mechaico	Rio_Llicaldad	Unificacion_Costera_36
		Estero_Paildad	Rio_Manio	Unificacion_Costeras_01
		Estero_Quilchitue	Rio_Mechai	Unificacion_Costeras_02
		Rio_Abtao	Rio_Medina	Unificacion_Costeras_03
		Rio_Aguas_Muertas	Rio_Metalqui	Unificacion_Costeras_04
		Rio_Alcaldeo	Rio_Mirador	Unificacion_Costeras_05
		Rio_Anay	Rio_Molulco	Unificacion_Costeras_06
		Rio_Asasao	Rio_Nango	Unificacion_Costeras_07
		Rio_Ayentema	Rio_Natri	Unificacion_Costeras_08
		Rio_Bravo	Rio_Natri_Pangal	Unificacion_Costeras_09

Elemento (español - inglés)	Simbología	Elementos en el modelo		
		Rio_Butalcura	Rio_Negro	Unificacion_Costeras_10
		Rio_Catiao	Rio_Negro_o_Pulpito	Unificacion_Costeras_11
		Rio_Chadmo	Rio_Pabellon	Unificacion_Costeras_12
		Rio_Chaiquil	Rio_Paila	Unificacion_Costeras_13
		Rio_Chepu	Rio_Pudeyi	Unificacion_Costeras_14
		Rio_Cipresal	Rio_Pumol	Unificacion_Costeras_15
		Rio_Coihuin	Rio_Puntra	Unificacion_Costeras_16
		Rio_Colecole	Rio_Quilanlar	Unificacion_Costeras_17
		Rio_Colu	Rio_Refugio	Unificacion_Costeras_18
		Rio_Coquiiao	Rio_San_Antonio	Unificacion_Costeras_19
		Rio_Cumpillen	Rio_San_Juan_Oriente	Unificacion_Costeras_20
		Rio_Curi	Rio_San_Juan_Poniente	Unificacion_Costeras_21
		Rio_de_la_Zorra	Rio_Tarahuin	Unificacion_Costeras_22
		Rio_de_Las_Mercedes	Rio_Tocoihue	Unificacion_Costeras_23
		Rio_Denal	Rio_Tongoy	Unificacion_Costeras_24
		Rio_Duhatao	Rio_Torrentoso	Unificacion_Costeras_25
		Rio_Gamboa	Rio_Trainel	Unificacion_Costeras_26
		Rio_Grande	Rio_Vilcun	Unificacion_Costeras_27
		Rio_Grande_02	Rio_Yaldad	Unificacion_Costeras_28
		Rio_Guyunden	Lago_Cucao	Unificacion_Costeras_29
		Rio_Guyunden	Lago_Huillinco	Unificacion_Costeras_30

Elemento (español - inglés)	Simbología	Elementos en el modelo
Reservorio- Reservoir		Tranque_Castro Tranque_Quellón
Agua subterránea - Groundwater		AC_01 AC_07 AC_02 AC_08 AC_03 AC_09 AC_04 AC_10 AC_05 MAR_OESTE AC_06 MAR_ESTE
Sitio de demanda - Demand site		Localidades APU: LOC_ANCUD LOC_CHONCHI LOC_CASTRO LOC_QUELLON LOC_ACHAO LOC_DALCAHUE Localidades SSR SSR_AC_01 SSR_AC_09 SSR_AC_02 SSR_AC_10 SSR_AC_03 SSR_CU_29 SSR_AC_05 SSR_CU_30 SSR_AC_06 SSR_CU_32 SSR_AC_07 SSR_CU_33 Industrias IND_Ancud IND_Huillinco IND_Castro IND_Quellón IND_Chepu
Unidad hidrológica - Catchment		Cuencas de aporte natural: AN_01 a AN_68 Cuencas laterales: CL_01 a CL_12 Cuencas Costeras Unificadas: CU_01 a CU_56
Escorrentía/Infiltración - Runoff/infiltration		Entre Unidades hidrológicas y sectores acuíferos
Flujo de retorno - Return flow		Desde localidades y SSR hacia el mar, sectores acuíferos y/o cauces superficiales
Link de transmisión - Transmission Link		Desde las fuentes de abastecimiento hacia los sitios de demanda
Streamflow Gauge - Estación Fluviométricas		Río Grande en San Pedro Río Vilcún en Bel-Ben

Fuente: Elaboración propia

4.13 Parámetros y Factores de Ajuste

Como ya se ha mencionado anteriormente, las unidades de respuesta hidrológica creadas en el modelo corresponden a categorías de usos de suelo, dentro de bandas de elevación, dentro de subcuencas en la zona de estudio. Estas subcuencas han sido representadas en WEAP a través de elementos **Unidad Hidrológica**, a las que se les ha adicionado subdivisiones para agregar las bandas de elevación, para luego incluir en esas bandas subsubdivisiones que representen los usos de suelo. En el Método de Humedad del Suelo, estas unidades de respuesta hidrológica son esquematizadas por WEAP a través de 2 "baldes", tal como se presenta en la Ilustración 4-1. En estos baldes, a partir de diferentes relaciones, WEAP estima flujos de agua en diferentes estados de la materia que permiten calcular un balance de aguas dentro de las unidades de respuesta hidrológica.

En este contexto, para el modelo del presente PEGH, se han considerado como parámetros a calibrar las siguientes magnitudes:

- Coeficiente de Cultivo [Kc]
- Capacidad de Agua en Zona de Raíces [mm] (Sw)
- Capacidad de Agua en Zona Profunda [mm] (Dw)
- Factor de Resistencia a la Escorrentía (-) (RRF)
- Conductividad de la zona radicular [mm/mes] (Ks)
- Conductividad Profunda [mm/mes] (Kd)
- Dirección Preferencial del Flujo (o/1) (f)
- Z1 Inicial [%] (Z1 inicial)
- Z2 inicial [%] (Z2 inicial)

No obstante, se debe tener presente que en el caso de las Unidades Hidrológicas conectadas a elementos Aguas Subterráneas, el balde 2 es reemplazado por el elemento Aguas Subterráneas, y por lo tanto los parámetros del balde 2 no participan en la modelación (son los casos de Unidades Hidrológicas conectadas a elementos Aguas Subterráneas).

Teniendo todo esto en cuenta, se ha decidido estructurar los valores de estos parámetros entendiendo conceptualmente que algunos de ellos varían entre un tipo de uso de suelo y otro, y también dependiendo de la pendiente del terreno. Para esto, los valores de los parámetros se establecen a partir de la multiplicación de un factor que depende del uso de suelo (Factor por Uso de Suelo) por uno de pendiente (Factor por Pendiente). Por último, estos factores a su vez son multiplicados por un Factor de Ajuste, que es un valor que es variado durante la calibración del modelo. No todos los parámetros tienen Factor por Uso de Suelo y Factor por Pendiente, sino que se ha definido conceptualmente caso a caso tal como se presenta en la Figura 4-13. En la Tabla 4-9 se puede visualizar cada uno de los parámetros y de acuerdo con que factor se encuentra relacionado.

Tabla 4-9 Factores de “Key assumptions” para calibrar parámetros

Sigla	Nombre	Factor Por Pendiente	Factor por Uso de Suelo	Factor de Ajuste (Sector)
Kc	Coeficiente de cultivo		X	X
Sw	Capacidad de agua en zona de raíces	X	X	X
Dw	Capacidad de agua en zona profunda	X		X
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía	X	X	X
Ks	Conductividad en zona de raíces	X	X	X
Kd	Conductividad en zona profunda	X		X
f	Dirección de flujo	X		X
Z ₁ inicial	% de almacenamiento primer balde		X	

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, por ejemplo, el Kc está definido por:

$$K_c = \text{Factor por Uso de Suelo} \cdot \text{Factor de Ajuste}$$

Mientras que el Sw queda definido por:

$$S_w = \text{Factor por Uso de Suelo} \cdot \text{Factor por Pendiente} \cdot \text{Factor de Ajuste}$$

En la Figura 4-13 se muestra la división según pendientes y también los sectores de cada subcuenca. Para agilizar el proceso de calibración, se definen factores asociados a la pendiente, uso de suelo y sector de cada subcuenca, que multiplican los parámetros y se pueden fácilmente modificar en la sección de **“Key assumptions” o supuestos claves**, hasta obtener los valores que mejor ajuste entregan al modelo.

Los factores utilizados se observan en las Tabla 4-10 a Tabla 4-12. De manera inicial estos valores se toman como referencia desde estudios anteriores realizados a en el territorio chileno, específicamente el Plan Estratégico de la Cuenca del Maule (DGA, 2020).

Para el Factor por Pendiente se clasifica las bandas de elevación según presentara una pendiente Muy Baja, Baja, Media, Alta o Muy Alta. La clasificación se realizó a partir de una capa de elevación de la cuenca, de cual se calcula un mapa de pendientes. La clasificación según pendientes para cada parámetro se indica a continuación

Factor por pendiente Muy Baja	→	Entre 0° y 4°
Factor por pendiente Baja	→	Entre 4° y 8°
Factor por pendiente Media	→	Entre 8° y 12°
Factor por pendiente Alta	→	Entre 12° y 16°
Factor por pendiente Muy Alta	→	>16°

Para el Factor de Uso de Suelo se subdividen los parámetros de acuerdo a las categorías de

usos de suelos utilizados en la modelación WEAP. La clasificación según uso de suelo para cada parámetro se indica a continuación:

- Área desprovista de vegetación
- Área urbana
- Bosques nativos
- Plantaciones
- Cuerpos de agua
- Humedales
- Terrenos agrícolas
- Matorrales
- Pradera

Para el Factor de Ajuste según Sector se subdivide las subcuencas si pertenecen a **cordillera** o al sector de **valle**; a su vez se hace una segunda clasificación si estas categorías pertenecen o no al sector con acuífero. La clasificación se realiza interceptando las subcuencas con la capa de geología de la cuenca y la capa de profundidad del basamento. La clasificación según Sector para cada parámetro se indica a continuación:

- Cordillera
- Valle acuífero
- Valle sin acuífero

Tabla 4-10: Factores según pendiente

Factores de pendiente	Dw	Kd	Ks	RRF	Sw	f
Muy Alta	1.500	43.460	5,0	0,5	0,75	0,90
Alta	2.000	43.460	2,5	0,6	0,80	0,90
Moderada	3.000	65.185	2,0	0,7	0,85	0,85
Baja	4.500	86.915	1,2	0,8	0,90	0,80
Muy baja	5.000	86.915	1,0	1,0	1,00	0,80

Fuente: Elaboración propia basado en DGA, 2020 y Corfo 2009

Tabla 4-11: Factores según uso de suelo

Factores de uso de suelo	Kc	Sw	RRF	Ks	Z1 inicial
Área desprovista de Vegetación	Valor Mensual	150	1,6	650	15
Área Urbana		150	3,0	650	10
Bosque Nativo		750	4,0	650	20
Plantaciones		750	4,0	650	20
Cuerpos de agua		120	0,1	780	100
Humedales		750	3,0	650	25
Terrenos Agrícolas		350	4,0	650	20
Matorrales		560	2,0	650	25
Praderas		560	2,0	650	25

Fuente: Elaboración propia basado en DGA, 2020 y Corfo 2009

Tabla 4-12: Factores de ajuste por sector

Factores de Ajuste	Kc	Sw	Dw	RRF	Ks	Kd	f
Sector este	1,1	1,5	3,3	0,1	6,5	0,2	1,1
Sector suroeste	1,3	0,3	0,5	0,2	0,5	0,1	0,7
Sector noroeste	1,2	1	1	1,0	2,0	0,2	1

Fuente: Elaboración propia basado en DGA, 2020 y Corfo 2009

Para la parametrización del coeficiente de cultivo (Kc) se utilizó la metodología propuesta por Hunink et al. (2017), quienes utilizan el índice normalizado de vegetación (NDVI) para calcular el coeficiente. El NDVI se obtuvo de imágenes MODIS desde al año 2000 al 2020 y se calcularon promedios medios mensuales para cada uno de los usos de suelos. En la Tabla 4-13 se puede visualizar los valores de Kc utilizados en la modelación WEAP.

Tabla 4-13: Factor Kc con variación mensual según uso de suelo

MES	Área Urbana	Bosque Nativo	Cuerpos de agua	Terrenos Agrícolas	Humedales	Matorrales	Plantaciones	Praderas	Área desprovista de vegetación
ENE	0,81	0,95	0,89	1,00	0,87	0,97	0,82	0,94	0,91
FEB	0,74	0,96	0,91	0,97	0,89	0,96	0,72	0,88	0,90
MAR	0,77	0,99	0,96	0,98	0,94	0,98	0,74	0,89	0,92
ABRI	0,81	0,99	0,96	0,98	0,94	0,98	0,82	0,92	0,92
MAY	0,81	0,99	0,96	0,92	0,96	0,98	0,84	0,92	0,92
JUN	0,78	0,97	0,93	0,86	0,94	0,94	0,79	0,88	0,88
JUL	0,76	0,97	0,93	0,87	0,93	0,93	0,72	0,85	0,89
AGO	0,74	0,96	0,93	0,82	0,90	0,91	0,73	0,83	0,87
SEP	0,77	0,94	0,90	0,82	0,86	0,89	0,72	0,84	0,87
OCT	0,80	0,92	0,87	0,90	0,84	0,90	0,79	0,90	0,87
NOV	0,85	0,92	0,87	1,00	0,85	0,93	0,88	0,97	0,91
DIC	0,86	0,93	0,88	1,01	0,85	0,96	0,89	0,98	0,91

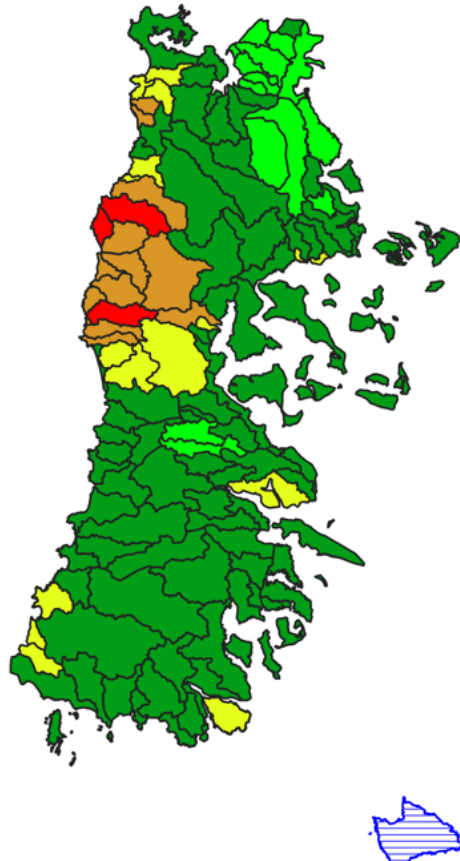
Fuente: Elaboración propia a partir de NDVI MODIS.

Estas estimaciones de coeficientes de cultivo tienen asociadas incertidumbres propias de ser realizadas indirectamente a través de índices NDVI, y están disponibles a ser mejoradas una vez que se cuente con más estudios y mayor conocimiento de coeficientes de cultivos en superficies como bosque nativo, praderas, áreas desprovistas de vegetación, etc.

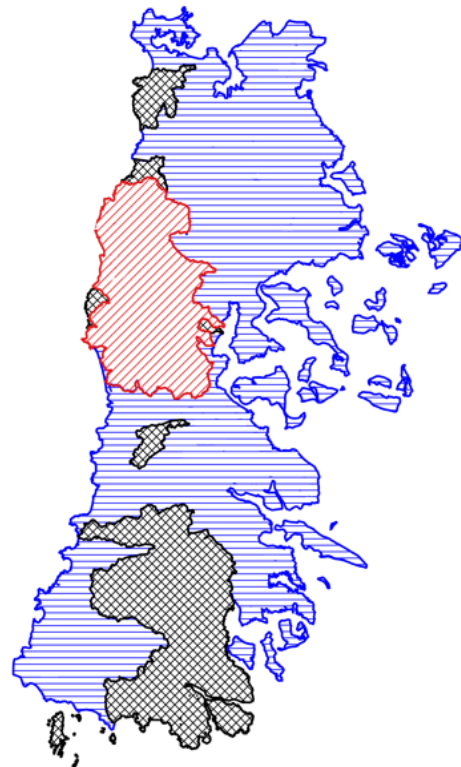
Isla Grande de Chiloé e Islas Circundantes

Factor por Pendiente y Factor por Sector para la calibración

Factor por Pendiente



Factor por Sector



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-13 División de las subcuencas por sectores y pendiente para la parametrización de la calibración

4.14 Calibración del Modelo

Para la calibración desde el punto de vista de las aguas superficiales se realiza una comparación de los caudales simulados en los cauces respecto a los caudales observados en estaciones fluviométricas presentes en la cuenca. Para la comparación de caudales superficiales se han tomado en cuenta las siguientes estaciones fluviométricas presentes en la cuenca:

- Río Grande en San Pedro : (Código BNA: 10904001-0)
- Río Vilcún en Bel-Ben : (Código BNA: 10903001-5)

Para establecer la calidad del ajuste obtenido entre caudales observados y simulados se ha considerado la eficiencia de Kling-Gupta (KGE, por sus siglas en inglés), que es calculada de la siguiente manera:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

donde:

- r : Coeficiente de correlación entre caudales simulados y observados
- σ_{sim} : Desviación estándar de los caudales simulados
- σ_{obs} : Desviación estándar de los caudales observados
- μ_{sim} : Promedio de los caudales simulados
- μ_{obs} : Promedio de los caudales observados

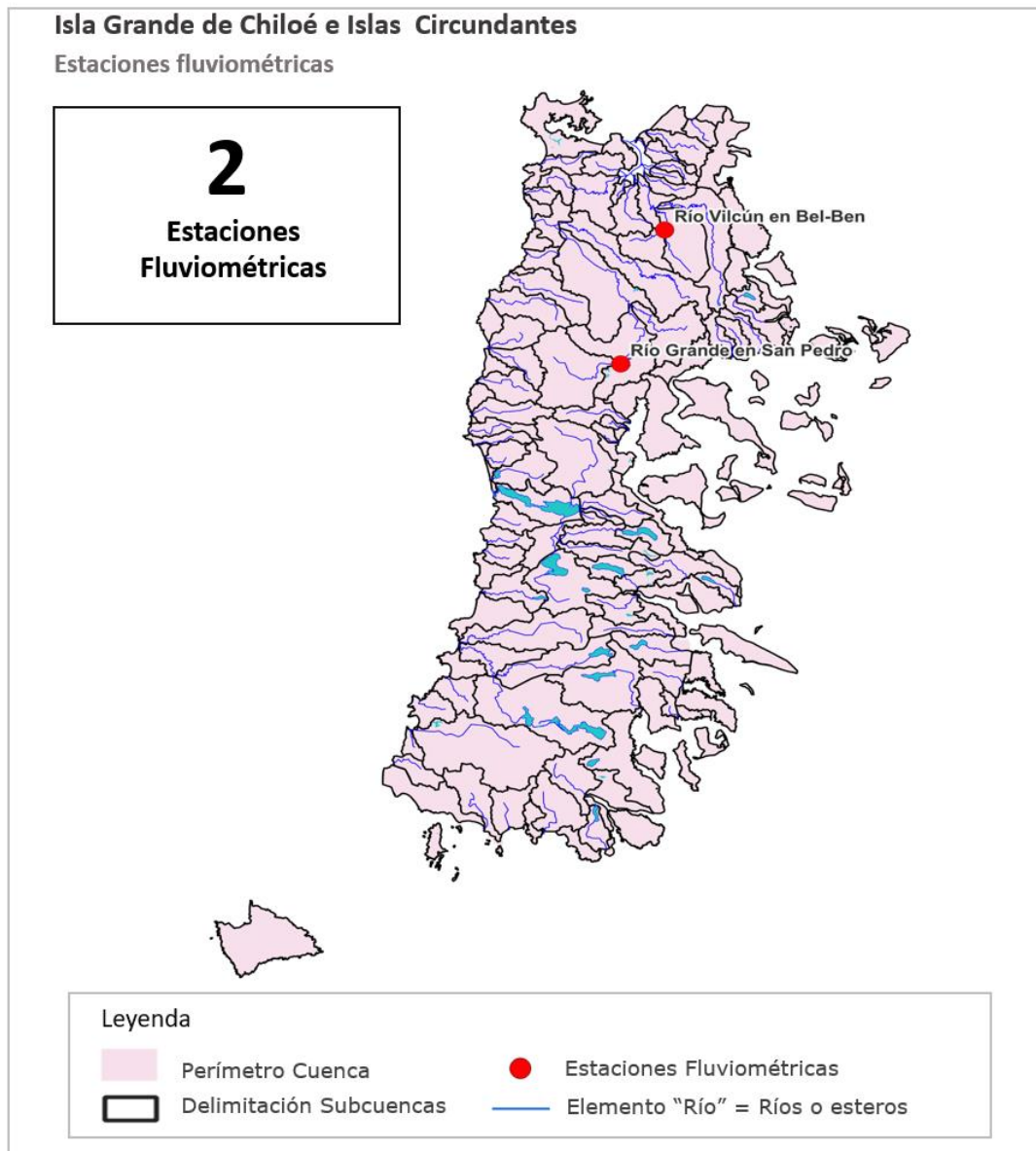
Los valores de KGE obtenidos en las estaciones se presentan en la Tabla 4-14.

Tabla 4-14: Valores de KGE entre caudales simulados y observados obtenidos en las estaciones fluviométricas.

Estación Fluviométrica	KGE
Río Grande en San Pedro	0,40
Río Vilcún en Bel-Ben	0,75

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la Ilustración 4-7 y Ilustración 4-8 se presentan gráficos comparativos entre las series de caudales simulados y observados en las estaciones, tanto de series continuas para todo el periodo de calibración (abril de 1985 a marzo del 2020), como para valores promedio de cada mes en aquel periodo.

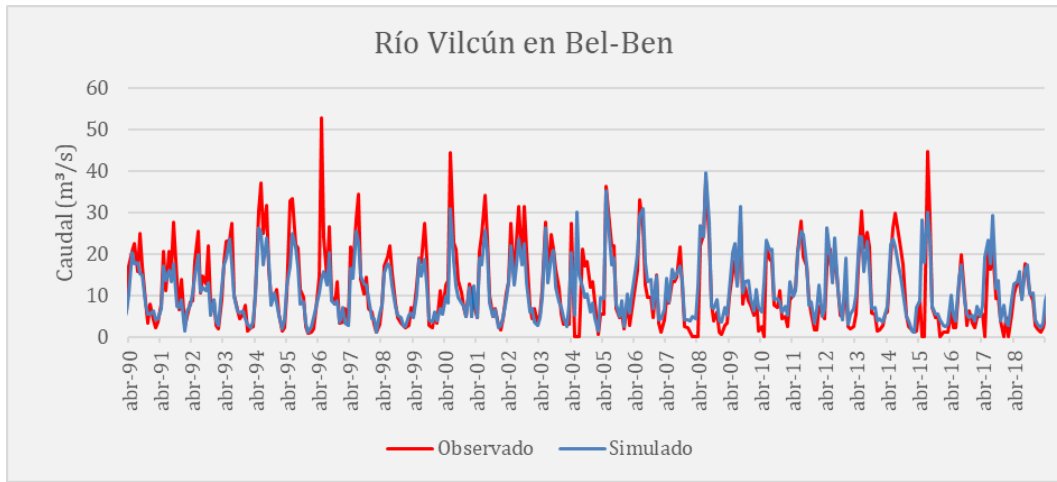


Fuente: Elaboración propia

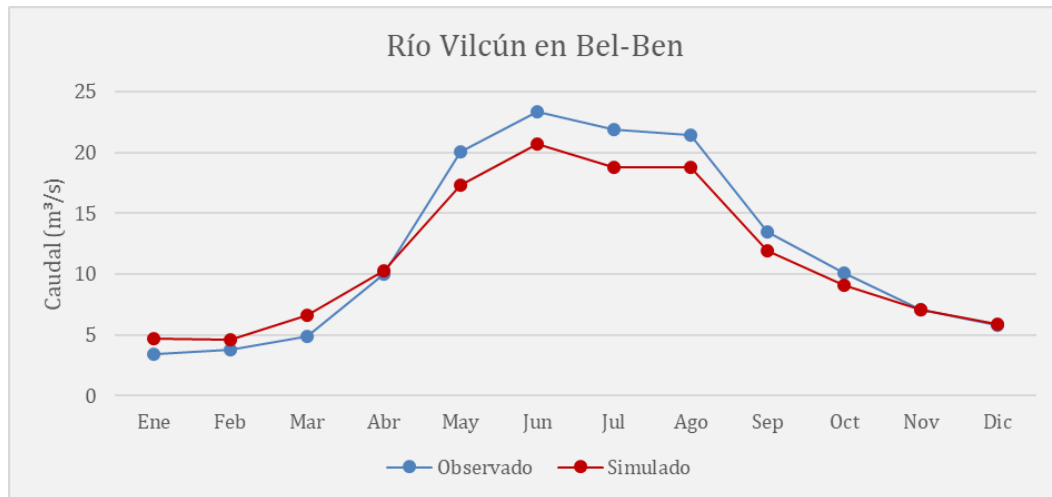
Figura 4-14: Ubicación de las estaciones fluviométricas en la cuenca

De esta manera, en la estación "Río Vilcún en Bel-Ben" (ubicada en comuna Ancud) presenta un buen grado de ajuste con un KGE de 0,75. En ella se destacan los mayores caudales observados de las series continuas históricas en los años hidrológicos 1996, 2000 y 2015, donde se superan los 40 [m³/s]. Las series de datos históricos simulados en general presentan una subestimación de caudales, no obstante, de forma puntual se observan algunos años

hidrológicos donde las simulaciones superan los caudales observados (línea azul Ilustración 4-7 a). En la misma figura, se pueden visualizar en el gráfico "b" los caudales mensuales promedios observados y simulados, y para ambas representaciones los mayores caudales promedios se registran en los meses de mayo hasta agosto, asociados con el periodo más lluvioso que se produce durante el parte del otoño y el invierno.



(a)

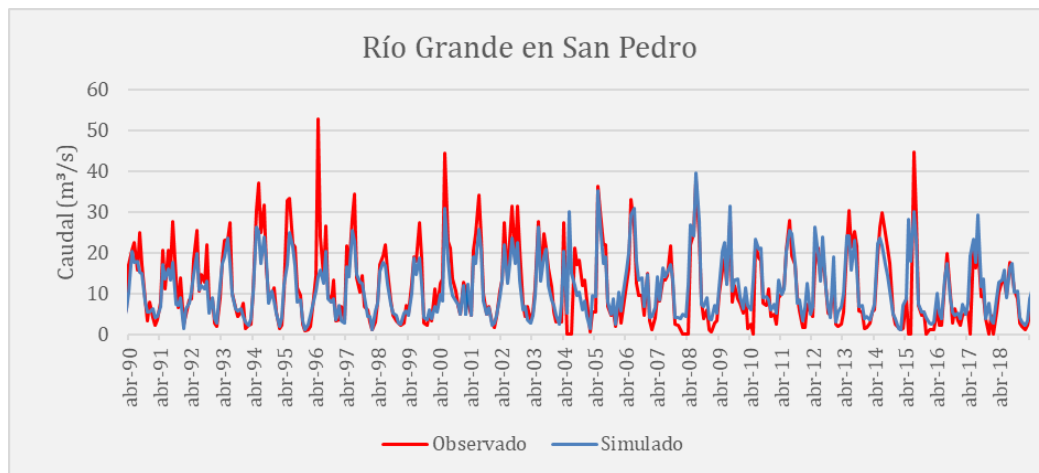


(b)

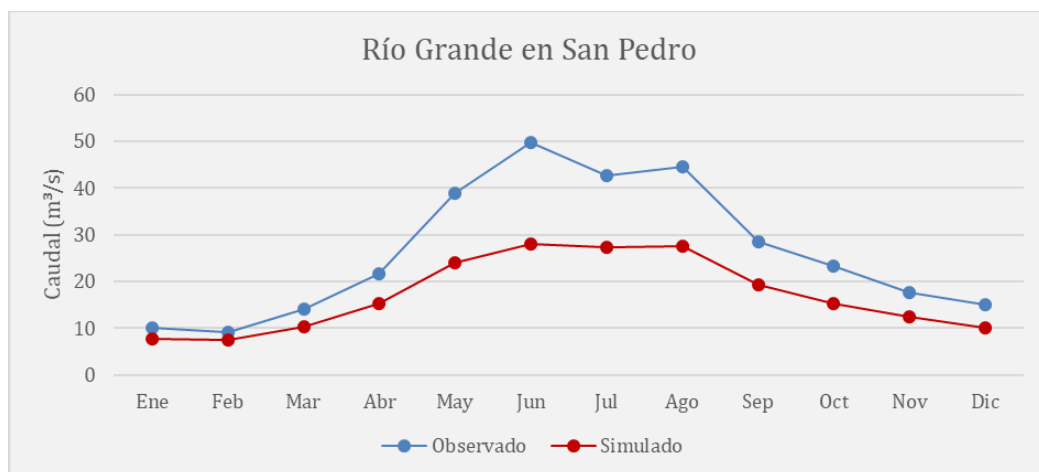
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4-7: Para la estación Río Vilcún en Bel-Ben: (a) Gráfico de las series de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de los promedios de los caudales observados y simulados en cada mes

Por otra parte, a continuación se representan los gráficos comparativos de la estación Río Grande en San Pedro, la cual se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Castro. En esta estación los mayores caudales observados corresponden con los mismos años hidrológicos de la estación anterior (1996, 2000 y 2015) con 45 [m³/s]. De la Tabla 4-14 se visualiza que esta estación presenta un bajo grado de ajuste entre los caudales simulados y observados con valor de KGE de 0,40.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 4-8: Para la estación Río Grande en San Pedro: (a) Gráfico de las series de caudales observados y simulados; (b) Gráfico de los promedios de los caudales observados y simulados en cada mes

En ambas estaciones se puede apreciar una subestimación de los caudales, aunque en distintas medidas. En esta línea, por ejemplo, en la cuenca que tributa hacia la estación río Grande en San Pedro se aprecian valores de precipitación inconsistentes con un balance de agua compuesto de precipitación (entrada), el caudal observado en la estación y la evapotranspiración (salidas). En este contexto, la estación presentó un caudal medio anual de 27 [m³/s], valor equivalente a 4.150 [mm/año] y superior a los montos de precipitación estimados por CR2MET v2.0 para la cuenca señalada de 2.600 [mm/año]. Esta subestimación se le atribuye a una subestimación de la precipitación en el producto CR2MET v2.0 en la zona de estudio. Si bien es cierto que en el apartado 4.3.1.2 se ve que la validación de la precipitación de este producto entrega excelentes resultados, también es cierto que solo se pudo realizar esa validación solo en estaciones meteorológicas costeras que no logran capturar posibles variaciones de la precipitación con la altura del terreno. Para resolver esta falencia, es necesario corregir de algún modo el producto CR2MET v2.0 a partir de estadísticas observadas en estaciones meteorológicas situadas más hacia el interior de la isla grande de Chiloé; situación que primeramente requiere la instalación de estas estaciones en la zona.

4.15 Oferta de la fuente

Para la caracterización de la oferta subterránea, se utiliza la Recarga [hm³/año] y el Volumen o Stock de los acuíferos [hm³] tomando como volumen de control los SHAC que existen en la cuenca. Se debe tener presente que los valores de recarga y volumen que se presentan provienen desde la modelación WEAP. De todas formas, ambos parámetros obtenidos desde la modelación se simulan tomando en consideración los resultados obtenidos del modelo conceptual subterráneo de tal forma que ambos modelos desarrollados en este estudio tengan coherencia (superficial y subterráneo conceptual). En el epígrafe 4.11 Sectores Acuíferos se incluyen los valores de volúmenes en el acuífero que se consideraron de input desde el modelo conceptual subterráneo hacia la modelación superficial en WEAP.

Respecto a la recarga, tal como se describe en el apartado 4.13 los parámetros del modelo WEAP están estructurados en base a factores que buscan reflejar efectos de diferentes usos de suelo en la cuenca y pendientes topográficas. En el caso particular de la recarga calculada por WEAP, son de especial relevancia los parámetros de preferencia de dirección del flujo, conductividad de la zona de raíces y capacidad de la zona de raíces. Estos parámetros han sido calibrados apoyándose en los caudales observados en la estación fluviométrica Río Vilcún en Bel-Ben.

En esta línea, dado el hecho de que el modelo no incluye una modelación subterránea sofisticada (como podría ser un modelo MODFLOW), estos valores podrían ser mejor estimados en un estudio futuro que sí contemple una modelación subterránea más especializada. Como componentes importantes en el análisis, se tiene que por ejemplo el modelo construido en esta oportunidad no contempla recarga proveniente desde cauces superficiales o que, como se detalla en el Anexo H, los flujos entre SHAC corresponden a

estimaciones gruesas y generales. De esta forma, estos valores deben ser tomados y considerados con el cuidado necesario al momento de la toma de decisiones.

4.15.1.1 Oferta periodo histórico

Con respecto a la recarga se observa que todos los otros SHAC presentan una disminución, siendo Ancud e isla Caucahué los que mayor disminuyen con un -5,3 [%] y -5,6 [%] respectivamente. De todos estos SHAC el que presenta menor variación es Quellón con una disminución de 1,1 [Hm³/año]. Para los volúmenes Quellón, Piuchén y Chepu presentan un aumento de un 0,7 [%], 2,8 [%] y 0,8 [%] respectivamente, mientras que Huillinco presenta una disminución del -0,6 [%]. Es importante señalar que **los valores de recarga son más confiables y se recomienda considerarlos en toma de decisiones por sobre los valores de volúmenes**, ya que están vinculados a la componente superficial que fue debidamente calibrada.

Tabla 4-15 Recarga de los SHAC para el periodo histórico y actual

SHAC	1990 -2019 hm ³ /año	Histórico	Actual
		1990-2014 hm ³ /año	2015- 2019 hm ³ /año
Quellón	43,1	43,3	42,2
Huillinco	118,6	119,2	115,6
Castro	49,5	49,8	47,6
Piuchén	11,3	11,3	10,9
Chepu	106,6	107,4	102,5
Ancud	156,3	157,7	149,3
Isla Caucahué	2,4	2,4	2,3
Isla Quinchao	8,9	9,0	8,6
Isla Lemuy	6,6	6,6	6,3
Total	503,2	506,7	485,3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-16 Volumen húmedo de los SHAC para el periodo histórico y actual

SHAC	1990 -2019 [hm ³ /año]	Histórico	Actual	2015-2019/1990-2014 [hm ³ /año]	
		1990 -2014 [hm ³ /año]	2015- 2019 [hm ³ /año]	Δ	Variación %
Quellón	8000,6	7991,2	8047,4	56,2	0,7%
Huillinco	21800,0	21822,1	21689,2	-132,9	-0,6%
Castro	17324,3	17328,5	17303,0	-25,5	-0,1%
Piuchén	107,2	106,7	109,6	3,0	2,8%
Chepu	16334,4	16312,0	16446,5	134,5	0,8%
Ancud	37521,3	37535,5	37450,3	-85,2	-0,2%
Isla Caucahu	1817,0	1818,5	1809,3	-9,2	-0,5%
Isla Quinchao	2753,1	2753,0	2753,8	0,8	0,0%
Isla Lemuy	2901,2	2901,1	2901,4	0,3	0,0%

Fuente: Elaboración propia

4.15.1.2 Oferta Proyectada

La oferta proyectada corresponde a los valores de recarga y volumen húmedo de cada SHAC para el periodo futuro bajo el modelo de cambio climático MIROC-ESM.

En la Tabla 4-17 se presenta la recarga media anual para el periodo proyectado y la comparación con el periodo actual. La recarga promedio presenta un aumento en la Isla Quinchao y la isla Lemuy con un 1,1 [%] y un 0,6 [%]. El SHAC que mayor disminución presenta es Ancud y Piuchén con un -20,7 [%] y -18,6 [%] respectivamente. Respecto al volumen húmedo el comportamiento es más bien parecido, siendo Piuchén el que más presenta disminución con un -21,7 [%]. Es importante señalar que **los valores de recarga son más confiables y se recomienda considerarlos en toma de decisiones por sobre los valores de volúmenes**, ya que están vinculados a la componente superficial que fue debidamente calibrada.

Tabla 4-17 Recarga de los SHAC para el periodo actual y proyectado

SHAC				2015-2019/ 2020-2059 hm3/año		2015-2019/ 2051-2059 hm3/año	
	2015- 2019 hm3/año	2020- 2059 hm3/año	2051- 2059 hm3/año	Δ	Variación %	Δ	Variación %
Quellón	42,2	41,7	41,9	-0,5	-1%	-0,3	-1%
Huillinco	115,6	106,9	107,6	-8,7	-8%	-8,0	-7%
Castro	47,6	47,8	48,3	0,3	1%	0,8	2%
Piuchén	10,9	7,8	7,9	-3,0	-28%	-3,0	-28%
Chepu	102,5	83,9	84,6	-18,6	-18%	-17,9	-17%
Ancud	149,3	128,6	129,1	-20,7	-14%	-20,3	-14%
Isla Caucahué	2,3	2,2	2,2	-0,1	-5%	-0,1	-5%
Isla Quinchao	8,6	9,7	9,7	1,1	13%	1,2	14%
Isla Lemuy	6,3	6,9	7,0	0,6	9%	0,6	10%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-18 Volumen húmedo de los SHAC. Periodo actual y proyectado

SHAC				2015-2019/ 2020-2059 [hm3/año]		2015-2019/ 2051-2059 [hm3/año]	
	2015- 2019 [hm3/año]	2020 - 2059 [hm3/año]	2051- 2059 [hm3/año]	Δ	Variación %	Δ	Variación %
Quellón	8047,4	8097,6	8109,3	50,2	0,6%	61,9	0,8%
Huillinco	21689,2	21328,8	21045,6	-360,4	-1,7%	-643,6	-3,0%
Castro	17303,0	17228,6	17156,8	-74,4	-0,4%	-146,2	-0,8%
Piuchén	109,6	85,8	77,8	-23,8	-21,7%	-31,9	-29,1%
Chepu	16446,5	16172,0	15930,7	-274,5	-1,7%	-515,8	-3,1%
Ancud	37450,3	36830,4	36350,8	-619,9	-1,7%	-1099,5	-2,9%
Isla Caucahu	1809,3	1791,9	1779,2	-17,4	-1,0%	-30,1	-1,7%
Isla Quinchao	2753,8	2771,0	2781,0	17,2	0,6%	27,1	1,0%
Isla Lemuy	2901,4	2910,3	2914,8	8,8	0,3%	13,3	0,5%

Fuente: Elaboración propia

4.16 Balance Hídrico

En el análisis del balance de aguas se considera periodos de tiempo según año hidrológico, estos pueden ser presentados por cuenca o SHAC según el balance hídrico superficial o subterráneo, respectivamente. Dicho el análisis definen los siguientes periodos de tiempo:

- Balance histórico: abril 1990- marzo 2015 (1990-2014).
- Balance actual: abril 2015- marzo 2020 (2015-2019).
- Balance histórico completo: abril 1990- marzo 2020 (1990-2019)
- Balance proyectado: abril 2021- marzo 2060 (2020-2059).

4.16.1 Balance Hídrico Superficial

El **balance hídrico superficial** considera los siguientes parámetros de entrada y salida:

- **Precipitación [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua caída en el periodo analizada dentro del área geográfica estudiada.
- **Otras entradas [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Aporte de agua al sistema superficial por retornos de uso de agua con procedencia subterránea (SSR, APU e Industrias)
- **Evapotranspiración [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Pérdida de agua de los cultivos, o masa vegetal, por transpiración y del suelo por evaporación.
- **Percolación [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua infiltrado al sistema de agua subterráneas (acuíferos), por precipitación natural o riego.
- **Escorrentamiento mar por cauces superficiales naturales [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua que desemboca en el mar desde los cauces superficiales.
- **Otras salidas [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** consumos netos de agua por uso industrial y potable de origen superficial.
- **ΔV [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Variaciones en el volumen de agua en el volumen de control. Corresponde a la diferencia entre el incremento y la disminución en la humedad del suelo.
- **Balance [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Diferencia entre salidas y entradas, dicho número debe tender a ser cero para un balance coherente.
- **Error de balance [%]:** Porcentaje del error del balance respecto a la precipitación

La Tabla 4-19 presenta la comparación de las entradas (precipitaciones, afloramientos y otros) y salidas (evapotranspiración, percolación, infiltración al acuífero y otros) dentro del balance hídrico superficial para el periodo histórico.

Tabla 4-19. Balance hídrico superficial en Chiloé. Entradas y salidas del sistema. Periodo histórico y actual hm³/año

Salidas y entradas	1990-2019	Histórico	Actual
	(hm ³ /año)	1990-2014 (hm ³ /año)	2015-2019 (hm ³ /año)
Entradas	16984	17038	16714
Precipitación	16943,6	16997,8	16672,5
Otras entradas	40,6	40,4	41,3
Salidas	16982	17037	16712
Evapotranspiración	2434,7	2433,4	2444,4
Percolación	503,2	506,7	485,3
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	14014,7	14067,2	13752,1
Otras salidas	29,4	29,2	30,7
Variación Humedad del suelo (ΔV)	2,2	1,7	1,2
Balance	0,0	0,0	0,0
Error %	0,00%	0,00%	0,00%

Fuente: Elaboración propia en bases a datos del modelo.

De la misma forma que en el punto anterior se genera un análisis del balance proyectado. Para el caso de aguas superficiales, los datos proyectados se presentan en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20 Balance hídrico de aguas superficiales, período proyectado

Salidas y entradas	2020-2059	2020-2029	2030-2039	2040-2049	2050-2059
	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)
Entradas	14842	15131	15163	14105	14970
Precipitación	14799,7	15089,0	15121,1	14062,2	14926,4
Otras entradas	42,5	41,9	42,2	42,7	43,2
Salidas	14851,3	15133,7	15180,0	14106,0	14985,4
Evapotranspiración	2289,8	2362,9	2310,2	2210,4	2275,5
Percolación	435,6	442,2	445,8	416,0	438,3
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	12093,6	12296,9	12391,9	11446,9	12238,6
Otras salidas	32,4	31,6	32,1	32,7	33,1
Variación Humedad del Suelo (ΔV)	-9,1	-2,8	-16,8	-1,0	-15,9
Balance	0,0	0,0	0,1	-0,1	0,1
Error %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia en base a datos del modelo.

4.16.2 Balance Hídrico subterráneo

El **Balance hídrico subterráneo** se obtiene a partir del modelo desarrollado en WEAP. De esta manera, en la Tabla 4-21 se presenta el desglose del balance subterráneo según las entradas y salidas en [$\text{hm}^3/\text{año}$] tomando como volúmenes de control los SHAC de la cuenca.

En este punto, es importante recalcar que, dado el hecho de que el modelo no incluye una modelación subterránea sofisticada (como podría ser un modelo MODFLOW), estos valores podrían ser mejor estimados en un estudio futuro que sí contemple una modelación subterránea más especializada. De esta forma, estos valores deben ser tomados y considerados con el cuidado necesario al momento de la toma de decisiones.

Los flujos tomados como participante de los balances subterráneos en los SHAC son:

- **Entradas APU-APR-Industrias [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua que, una vez que es utilizada por las localidades rurales, se devuelve a la cuenca y percola hacia el acuífero. Corresponde a un flujo que ingresa al SHAC.
- **Recarga desde cuencas [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua que corresponde a la porción percolada de la precipitación natural.
- **Salidas para SSR o APU o Industrias [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Volumen de agua subterránea extraído hacia la superficie para el abastecimiento de localidades urbanas, rurales o industrias. Corresponde a un caudal de salida del volumen de control.
- **Descarga hacia el mar u otros [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Caudal subterráneo que fluye desde el SHAC analizado hacia otros SHAC vecinos. Constituye un flujo de salida del volumen de control. Además, se considera el caudal subterráneo desembocado hacia el mar de forma natural.
- **Incremento [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Incrementos del volumen de agua almacenada en el volumen de control.
- **Disminución [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Disminuciones del volumen de agua almacenada en el volumen de control.
- **ΔV [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Variaciones en el volumen de agua en el volumen de control. Corresponde a la diferencia entre el incremento y la disminución en la humedad del suelo.
- **Balance [$\text{hm}^3/\text{año}$]:** Balance volumétrico aplicado sobre el volumen de control subterráneo (SHAC).
- **Error de balance [%]:** Porcentaje del error del balance, calculado como el resultado del balance ($I - Q - \Delta V$) dividido por la recarga ocurrida. Esto tiene como finalidad poner en contexto el valor obtenido en el balance y cuantificar el error obtenido en comparación con las magnitudes participantes del balance subterráneo.

En la Tabla 4-21 se presenta el desglose del balance subterráneo según las entradas y salidas en [$\text{hm}^3/\text{año}$] para el periodo histórico de la modelación. De igual forma en la Tabla 4-22 se presenta el balance subterráneo para el periodo proyectado.

Tabla 4-21 Balance hídrico subterráneo, escenario base hm³/año. Histórico (P1) y Actual (P2)

Salidas y entradas	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
	Quellón		Huillincó		Castro		Piuchén		Chepu		Ancud		Isla Caucahu		Isla Quinchao		Isla Lemuy	
Entradas [hm³/año]																		
Entradas (APU-APR-Industrias al mundo subterráneo)	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	0,9	0,0	0,0	0,3	0,3	0,5	0,5	0,0	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2
Recarga desde cuencas	43,3	42,2	119,2	115,6	49,8	47,6	11,3	10,9	107,4	102,5	157,7	149,3	2,4	2,3	9,0	8,6	6,6	6,3
Total	43,6	42,5	119,7	116,2	50,6	48,4	11,3	10,9	107,7	102,8	158,1	149,9	2,4	2,3	9,2	8,8	6,7	6,5
Salidas [hm³/año]																		
Extracciones (Salidas APU-APR-INDUSTRIAS desde el mundo subterráneo)	0,9	1,4	15,3	15,4	8,8	9,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,6	0,7	0,0	0,0	0,3	0,3	0,2	0,2
Descarga hacia el mar u otros	38,4	38,6	112,6	111,9	43,1	43,2	10,8	11,1	97,0	98,3	161,7	161,5	3,0	3,0	8,8	8,8	6,5	6,5
Total	39,2	40,0	127,9	127,3	51,9	52,2	10,8	11,1	97,4	98,6	162,2	162,2	3,0	3,0	9,1	9,1	6,7	6,7
Incremento almacenamiento	14,5	13,6	31,0	30,3	15,4	14,3	2,9	2,7	38,6	35,7	48,0	43,7	0,5	0,5	2,9	2,6	2,2	2,0
Decrecimiento almacenamiento	10,2	11,1	39,2	41,4	16,8	18,0	2,4	2,9	28,3	31,6	52,2	56,0	1,1	1,2	2,8	2,9	2,1	2,2
Cambio en almacenamiento humedad del suelo [hm³/año]	4,4	2,6	-8,2	-11,1	-1,3	-3,7	0,6	-0,2	10,3	4,2	-4,1	-12,4	-0,6	-0,7	0,1	-0,3	0,1	-0,2
Balance	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Error del balance (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-22 Balance hídrico subterráneo para periodo proyectado. Periodo histórico (P1) y proyectado (P2)

Salidas y entradas	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
	Quellón		Huillinco		Castro		Piuchén		Chepu		Ancud		Isla Caucahu		Isla Quinchao		Isla Lemuy	
Entradas [hm³/año]																		
Entradas (APU-APR-Industrias al mundo subterráneo)	0,3	0,5	0,5	0,9	0,7	1,3	0,0	0,0	0,3	0,4	0,5	0,8	0,0	0,0	0,2	0,3	0,1	0,2
Recarga desde cuencas	43,3	41,9	119,2	107,6	49,8	48,3	11,3	7,9	107,4	84,6	157,7	129,1	2,4	2,2	9,0	9,7	6,6	7,0
Total	43,6	42,4	119,7	108,5	50,6	49,6	11,3	7,9	107,7	85,0	158,1	129,8	2,4	2,2	9,2	10,1	6,7	7,2
Salidas [hm³/año]																		
Extracciones (Salidas APU-APR-INDUSTRIAS desde el mundo subterráneo)	0,9	2,7	15,3	15,8	8,8	9,5	0,0	0,0	0,3	0,6	0,6	1,0	0,0	0,0	0,3	0,4	0,2	0,3
Descarga hacia el mar u otros	38,4	38,9	112,6	108,6	43,1	44,3	10,8	7,8	97,0	98,0	161,7	157,0	3,0	3,0	8,8	8,9	6,5	6,5
Total	39,2	41,6	127,9	124,4	51,9	53,8	10,8	7,8	97,4	98,6	162,2	157,9	3,0	3,0	9,1	9,3	6,7	6,8
Incremento almacenamiento	14,5	14,8	31,0	31,3	15,4	16,4	2,9	2,6	38,6	28,0	48,0	37,2	0,5	0,5	2,9	3,9	2,2	2,7
Decrecimiento almacenamiento	10,2	13,9	39,2	47,3	16,8	20,6	2,4	2,5	28,3	41,5	52,2	65,3	1,1	1,3	2,8	3,1	2,1	2,4
Cambio en almacenamiento humedad del suelo[hm³/año]	4,4	0,8	-8,2	-16,0	-1,3	-4,2	0,6	0,0	10,3	-13,5	-4,1	-28,1	-0,6	-0,8	0,1	0,8	0,1	0,4
Balance	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Error del balance (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia

4.17 Escenarios de gestión

En las cuencas de las islas Chiloé y circundantes se han definido 3 escenarios de gestión, con el objetivo de reflejar la respuesta del sistema ante distintos escenarios de escasez hídrica. La propuesta de los escenarios visualiza las evaluaciones realizadas a lo largo del estudio junto a los distintos actores de la cuenca.

4.17.1 Definición de Escenarios

4.17.1.1 Escenario 1: Cambio de uso de suelo y sus efectos sobre el Balance Hídrico de la cuenca.

Este escenario involucra simular un cambio de uso del suelo donde se produce una pérdida radical del bosque nativo respecto de las coberturas actuales, con el propósito de evaluar la respuesta que da el modelo ante cambios de uso del suelo. Para aquello se simula una capa de uso de suelo al año 2060 de tal forma de incluir estas nuevas áreas de uso de suelo en la modelación WEAP y analizar la variación en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La capa creada tiene su origen en el Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile para Región de Los Lagos, desarrollado por CONAF, insumo a través del cual se obtiene el uso de uso definido para la situación actual, y sobre el cual se determinan las variaciones al año 2060. Tomando como base de información el catastro del año 2014 se determinó que para el año 2060 las superficies actualmente bajo alguna figura de protección e interés oficial mantendrían su superficie, mientras que en las áreas restantes es donde se generarían los cambios proyectados. En particular se mantendrá bosque nativo en las áreas protegidas actuales, mientras que el bosque nativo fuera de las áreas protegidas será reemplazado por áreas de uso agrícola. Respecto a esta capa cabe destacar que es una proyección simulada del equipo consultor y no necesariamente tiene relación con las demandas proyectadas en la cuenca.

En la Ilustración 4-9 se observa la variación en los usos de suelos, en donde se puede visualizar una disminución del bosque nativo de 3.336 [km²], de los matorrales de 202 [km²], de las praderas de 62 [km²] y un aumento en los terrenos agrícolas de 3.660 [km²]. En el caso de los humedales, la superficie de este uso de suelo se supone sin variaciones.

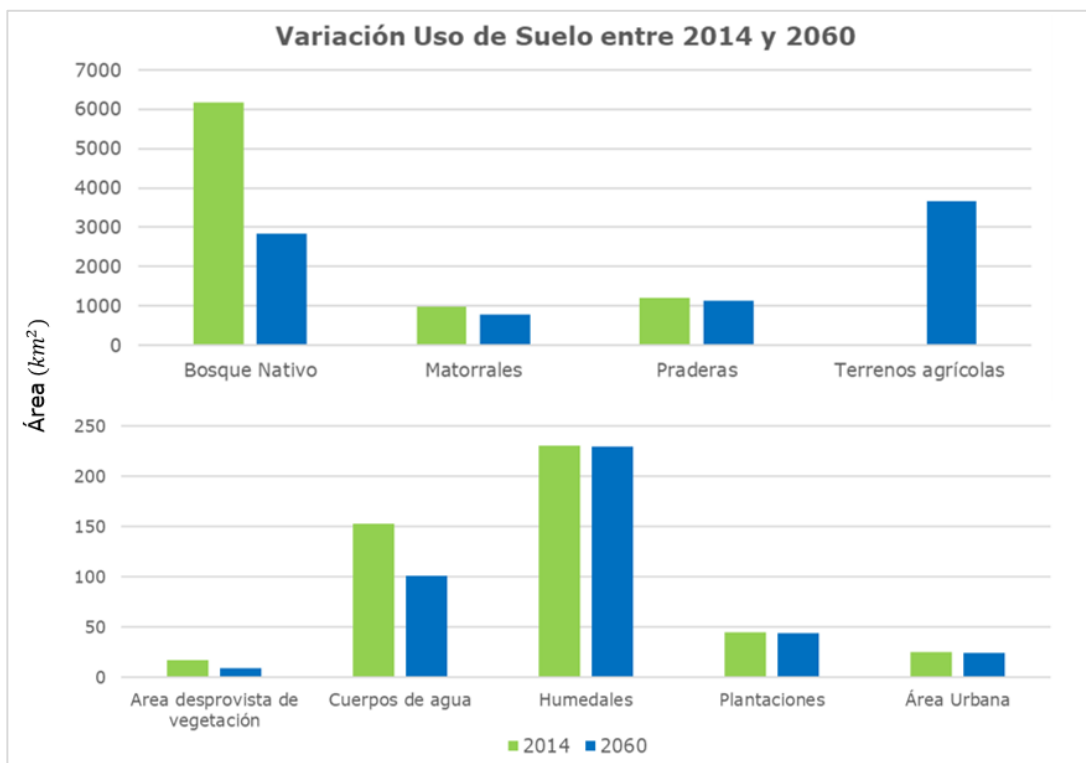


Ilustración 4-9 : Variación de usos de suelos considerados en la modelación entre el año 2014 y 2060.

4.17.1.2 Escenario 2: Aumento Poblacional

Dentro de los escenarios de gestión modelados se incluye uno de aumento poblacional intensificado en la cuenca. En este escenario, se considera que las poblaciones urbanas cuentan con tasas de crecimiento poblacional mayores a las aplicadas en el escenario base, por lo que la demanda de agua de uso sanitario en los centros urbanos aumenta acompañando el crecimiento poblacional intensificado. Este aumento intensificado es considerado desde el año 2021 en adelante; de esta manera, en este escenario, los años previos a 2021 consideran poblaciones urbanas iguales a las incluidas en el escenario base. Más en detalle, las tasas de crecimiento poblacional utilizadas en cada localidad urbana para este escenario, tanto para población base como para población flotante, son las presentadas en la Tabla 4-23.

La forma en se incluyó este escenario en la modelación es reemplazando el archivo .csv que le entrega al modelo la cantidad de población considerada en las localidades. Para más información sobre los habitantes proyectados, se puede visualizar en la carpeta de WEAP AREAS del modelo, específicamente en el archivo POB_Localidades_Escenario_Gestion.csv de la carpeta APU.

Tabla 4-23 Tasas de crecimiento poblacional intensificado consideradas en el escenario de gestión desde el año 2021 en adelante

Localidad	Tasa de crecimiento poblacional	Población Base Plan de Desarrollo	Población proyectada por escenario tendencial	Población proyectada por escenario exponencial
		2020	2060	2060
Ancud	2%	29.446	55.914	63.971
Achao	2%	3.196	3.246	7.489
Castro	2%	36.322	55.396	78.302
Chonchi	2%	3.717	3.781	8.678
Quellon	2%	24.454	45.639	53.488
Dalcahue	2%	4.365	4.488	10.200
Total		101.500	168.464	222.128

Fuente: Elaboración propia

En este escenario se tienen en cuenta las capacidades actuales de abastecimiento de las fuentes, sin contemplar ampliaciones de sus capacidades. De esta forma, los niveles de cobertura de las demandas urbanas comienzan a ser menores que 100 [%] desde el año hidrológico 2056 en las localidades de Quellón y Castro, llegando a coberturas de 91 [%].

4.17.1.3 Escenario 3: Tranques de acumulación de aguas lluvia

Este escenario de gestión considera tranques de acumulación de aguas lluvias como respaldo a fuentes naturales para el abastecimiento de agua potable de las localidades urbanas. La idea consiste en ampliar y/o crear nuevos tranques para las localidades que presentan brecha, por este motivo se crean 2 nuevos tranques (para Castro y para Quellón) y se amplía la capacidad del tranque Pudeto (para Ancud), puesto que son las localidades que frente a un aumento de la población intensificado presentan brecha al año 2060. Es importante resaltar que en este escenario no se considera el crecimiento poblacional tendencial del escenario base, sino que se toma en cuenta el crecimiento poblacional intensificado aplicado en el escenario de gestión 2 (ver apartado 4.17.1.2)

Los tranques nuevos incluidos corresponden al tranque **Castro** con una capacidad de regulación de 0,1 hm³ (entra en funcionamiento el año 2030) y al tranque **Quellón** con 0,3 hm³ (entra en funcionamiento el año 2055). Para la modelación se han incluido estos tranques a partir de un elemento **Embalse**. De esta forma, estos elementos acumulan agua en los meses de mayores caudales en los cauces, que posteriormente es utilizada en los meses de estiaje, donde más brecha existe en las localidades. De igual manera opera el tranque Pudeto que abastece a **Ancud**, que en este escenario de gestión se le aumenta su capacidad de 0,4 hm³ a 1,4 hm³ desde 2035 en adelante.

Por otra parte, las capacidades de las conducciones desde las fuentes de abastecimiento hacia estas localidades también se ven aumentadas. En el caso de **Castro**, la conducción desde el río Gamboa pasa de una capacidad de 200 L/s a 300 L/s a partir del año 2030. En **Quellón**, la capacidad de las conducciones desde sus fuentes superficiales pasa de 22 L/s a 142 L/s desde 2055 en adelante. Por último, en el caso de Ancud, la conducción desde el estero Mechaico se aumenta de 50 L/s a 270 L/s en la actualidad, mientras que la conducción desde el tranque Pudeto incrementa su capacidad de 75 L/s a 210 L/s en 2025. Un resumen de las medidas recientemente descritas para este escenario es presentado en la Tabla 4-24.

De esta manera, la cobertura en las localidades urbanas alcanza el 100% en todo el horizonte de modelación (hasta marzo de 2060).

Tabla 4-24 Resumen de las medidas tomadas en el escenario de tranques de acumulación de aguas lluvia

Localidad	Medida	Año de puesta en marcha
Castro	Creación de tranque Castro de 0,1 hm ³	2030
	Aumento de conducción desde río Gamboa en 100 L/s	2030
Quellón	Creación de tranque Quellón de 0,3 hm ³	2055
	Aumento de conducción desde fuentes superficiales en 120 L/s	2055
Ancud	Aumento de capacidad en tranque Pudeto de 0,4 hm ³ a 1,4 hm ³	2035
	Aumento de conducción desde estero Mechaico en 220 L/s	Actualidad
	Aumento de conducción desde tranque Pudeto en 135 L/s	2025

Fuente: Elaboración propia

4.17.2 Evaluación de los resultados de los Escenarios de Gestión

En la evaluación de los Escenarios de Gestión, se generan diferentes resultados para todos los escenarios, los que son comparados con el escenario "0" base o tendencial, en adelante "E0"; los escenarios de gestión de cambio en uso de suelo, aumento poblacional y tranques de acumulación de aguas lluvia, son mencionados en adelante como E1, E2 y E3, respectivamente. Los resultados analizados de los escenarios evalúan aspectos de estado de la cuenca, abastecimiento para consumo humano y evolución de la oferta en humedales.

Para realizar el análisis se considera un periodo fijo actual del E0 en el lapso entre los años hidrológicos 2015 y 2019. Los resultados de todos los escenarios en el periodo proyectado son comparados con lo obtenido en el periodo actual del escenario E0. De esta manera, en la Tabla 4-25 se presentan los resultados de balance superficial para los periodos mencionados, indicando valores de flujos de entrada y salida al ambiente superficial de la zona de estudio y comparando los montos obtenidos en la década 2050-2059 para todos los escenarios, con lo modelado para el periodo actual de 2015-2019. Mientras que en la Tabla 4-26, Tabla 4-27,

Tabla 4-28 se visualiza el balance superficial de forma más desglosada para el período proyectado en cada uno de los escenarios de gestión.

En este análisis, es importante tener en consideración que en el balance superficial se toma como volumen de control a todo el ambiente superficial de la zona de estudio, incluyendo solo los primeros horizontes del suelo (pero no el ambiente subterráneo de acuífero propiamente tal), y que, por ejemplo, todo caudal que sea elevado desde el acuífero (ambiente subterráneo) hacia la superficie (ambiente superficial) es considerado como un flujo de ingreso en el balance superficial.

Tabla 4-25 Resultados Escenarios. Balance Superficial (hm³/año)

Salidas entradas	2015-2019	2050-2059			
	E0	E0	E1	E2	E3
Entradas	16714	14970	14970	14972	14972
Precipitación	16672	14926	14926	14926	14926
Otras entradas (aguas subterráneas elevadas para uso sanitario e industrial)	41	43	43	46	46
Salidas	16712	14985	14983	14988	14988
Evapotranspiración	2444	2275	2172	2275	2275
Percolación	485	438	463	438	438
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	13752	12239	12315	12240	12237
Otras salidas (percolación desde APU y SSR, caudal consumido por sitios de demanda que no vuelven a la cuenca, etc.)	31	33	33	35	37
Variación Humedad del Suelo (ΔV)	1	-16	-13	-16	-16
Balance	0	0	-1	0	0
Error %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WEAP

En la Tabla 4-25, al comparar los resultados del escenario E1 con lo obtenido en el escenario E0, ambos en la década 2050-2059, se puede apreciar que, si bien los flujos de entrada son iguales en ambos casos (Precipitación y Otras Entradas), en el caso de E1 la Evapotranspiración desciende, la Percolación y la Salida al mar por cauces superficiales aumentan, mientras que la disminución en la Variación de la humedad del suelo es ligeramente menor. Esto se debe a que, como se ha comentado anteriormente (Epígrafe 4.13), en E1 se considera un reemplazo de superficies de bosque nativo por terrenos agrícolas y, tal como se indica en la estimación de los coeficientes de cultivo de los usos de suelo a través de la metodología propuesta por Hunink *et al.* (2017), globalmente los terrenos agrícolas presentan coeficientes de cultivo ligeramente menores a los de bosque nativo. De esta forma, en el escenario E1 la modelación entrega evapotranspiraciones a nivel anual menores que en el escenario E0. No obstante, es importante recalcar que, estas estimaciones

de coeficientes de cultivo tienen asociadas incertidumbres propias de ser realizadas indirectamente a través de índices NDVI en la metodología de Hunink *et al.* (2017), y están disponibles a ser mejorados una vez que se cuente con más estudios y mayor conocimiento de coeficientes de cultivos en superficies como bosque nativo. De esta forma, no se descarta que, a futuro, cuando se tengan más herramientas que puedan ser utilizadas para una estimación menos incierta de los coeficientes de cultivo, los resultados y conclusiones sean distintos a los mencionados en el presente estudio respecto al escenario de cambio de uso de suelo.

Por otra parte, otro hecho que ocurre en la modelación es que la capacidad de la zona de raíces (Sw) se reduce al pasar de bosque nativo a terreno agrícola (ver apartado 4.13), por lo que las zonas de raíces de aquellas superficies que en E0 son bosque nativo y en E1 son plantaciones forestales, disminuyen y tienden a estar más saturadas de agua a causa de esta disminución en su capacidad (incrementa Z1). Este incremento en Z1 se traduce en un aumento de la percolación y de la escorrentía subsuperficial (*Interflow* en WEAP), ya que ambas crecen junto con Z1 según lo incluido en el método de humedad del suelo de WEAP; razón por la cual incrementan los valores de percolación y salida al mar por cauces superficiales en la Tabla 4-25. Sin embargo, el aumento de la percolación y de la escorrentía subsuperficial no es lo suficientemente grande como para llevarse consigo toda el agua que dejó de ser evapotranspirada, por lo que finalmente se tiene que la disminución en la humedad del suelo en E1 es ligeramente menor a lo modelado en E0.

Posteriormente, si se realiza un análisis comparativo entre lo obtenido en E2 y E0 para la década 2050-2059, se aprecia que la precipitación es la misma, pero en E2 el flujo en **Otras Entradas** es mayor que en E0. Esto es debido a que el incremento intensificado de la población de E2 trae consigo un aumento de la extracción de aguas subterráneas desde APU, llevando recursos subterráneos hacia el ambiente superficial de la cuenca (aumenta **Otras Entradas**). Este aumento en la extracción de aguas subterráneas para su utilización en actividades sanitarias trae consigo un incremento del caudal que estas localidades finalmente disponen en cuerpos de agua superficiales, generando un aumento en **Salida al Mar por cauces superficiales**. Por otra parte, en E2 también se observa un aumento en **Otras Salidas** respecto a E0, que se ocasiona por el aumento del volumen consumido por las APU (agua tomada por las APU que no vuelve a la cuenca) a causa del crecimiento intensificado de la población. Las magnitudes de **Precipitación, Evapotranspiración, Percolación y Variación en la Humedad del Suelo** no tienen afectaciones a causa del incremento intensificado de la población en WEAP, por lo que no se ven cambios del E2 respecto al E0.

Por último, el escenario E3 presenta los mismos comportamientos esperados a causa del incremento intensificado de la población, con la diferencia de que se observa una disminución de la **Salida al Mar por cauces superficiales** y un aumento de **Otras Salidas** respecto a lo modelado en E0 (década 2050-2059). El primero de estos fenómenos tiene su origen en el hecho de que la inclusión de tranques de acumulación de aguas lluvia permite a las localidades

urbanas lograr una mayor extracción de aguas superficiales, generando una reducción en la escorrentía superficial y de los caudales que terminan siendo desembocados hacia el mar. El segundo de los fenómenos mencionados se debe a nuevamente un incremento en el volumen consumido por las APU (agua tomada por las APU que no vuelve a la cuenca) a causa del crecimiento intensificado de la población, que esta vez es mayor al ocurrido en E2. Tal como ocurre en E2, en E3 las magnitudes de **Precipitación, Evapotranspiración, Percolación y Variación en la Humedad del Suelo** no tienen afectaciones generadas por el escenario de gestión, por lo que no se ven cambios del E3 respecto al E0 en esas magnitudes.

De forma más detallada en la Tabla 4-26 se puede observar que al comparar las variables entre histórico y el período histórico proyectado el E1 presenta una disminución en la precipitación de -13 [%]. La evapotranspiración entre el período histórico y actual presenta diferencias insignificantes, pero al comparar el período histórico con el periodo proyectado se presentan variaciones de -9,5 [%], siendo el periodo donde más variación se presenta el año 2040-2049. La percolación y Salida Al Mar por cauces superficiales naturales igual presentan una disminución en el periodo histórico proyectado de -52 [Hm³/año] y -1.661 [Hm³/año] respectivamente al compararlo con el histórico.

Posteriormente, si analizamos los valores del E2 de forma más desglosada para cada una de las variables entre el periodo histórico proyectado y el histórico, en la Tabla 4-27 se puede observar que otras entradas (aguas subterráneas elevadas para uso sanitario e industrial) presentan un aumento de 6 [%]. Por otra parte, en E2 también se observa un aumento en Otras Salidas con una magnitud de 8 [%], este se ocasiona por el aumento del volumen consumido por las APU (agua tomada por las APU que no vuelve a la cuenca) a causa del crecimiento de la población. Las magnitudes de percolación y Salida Al Mar por cauces superficiales naturales presentan una disminución de -50 [Hm³/año] y -1.658 [Hm³/año] respectivamente entre el período histórico y el histórico proyectado. Por último, en la Tabla 4-28 el escenario E3 presenta variaciones similares a las esperadas a causa del incremento intensificado de la población, la principal variación entre el periodo histórico y el periodo histórico proyectado es un 11 [%] de aumento de otras Salidas (agua tomada por las APU que no vuelve a la cuenca) a causa del crecimiento intensificado de la población, que esta vez es mayor al ocurrido en E2.

Tabla 4-26 Resultados Balance Superficial Escenario E1 Cambio de uso de Suelo (hm³/año)

E1: Cambio de Uso de Suelo	Histórico	Actual	Histórico Proyectado	Proyectado			
				2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Salidas entradas	1990- 2014	2015- 2019	2020-2059	2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Entradas	17038	16714	14842	15131	15163	14105	14970
Precipitación	16998	16672	14800	15089	15121	14062	14926
Otras entradas (aguas subterráneas elevadas para uso sanitario e industrial)	40	41	43	42	42	43	43
Salidas	17037	16711	14851	15135	15178	14107	14983
Evapotranspiración	2328	2338	2189	2263	2206	2117	2172
Percolación	535	513	461	468	471	440	463
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	14144	13829	12168	12372	12469	11518	12315
Otras salidas (percolación desde APU y SSR, caudal consumido por sitios de demanda que no vuelven a la cuenca, etc.)	29	31	32	32	32	33	33
Variación Humedad del Suelo (ΔV)	1	3	-8	-3	-14	-2	-13
Balance	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
Error %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia en base a datos de modelación WEAP.

Tabla 4-27 Resultados Balance Superficial Escenario E2 Aumento Poblacional (hm³/año)

E2: Aumento Poblacional	Histórico	Actual	Histórico Proyectado	Proyectado			
				2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Salidas entradas	1990- 2014	2015- 2019	2020-2059	2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Entradas	17038	16714	14843	15131	15164	14106	14972
Precipitación	16998	16672	14800	15089	15121	14062	14926
Otras entradas (aguas subterráneas elevadas para uso sanitario e industrial)	40	41	44	42	43	44	46
Salidas	17037	16709	14852	15134	15181	14107	14988
Evapotranspiración	2433	2441	2290	2363	2310	2210	2275
Percolación	507	485	436	442	446	416	438
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	14067	13752	12094	12297	12392	11447	12239
Otras salidas (percolación desde APU y SSR, caudal consumido por sitios de demanda que no vuelven a la cuenca, etc.)	29	31	33	32	33	34	35
Variación Humedad del Suelo (ΔV)	2	5	-9	-3	-17	-1	-16
Balance	0	0	0	0	0	0	0
Error %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia en base a datos de modelación WEAP.

Tabla 4-28 Resultados Balance Superficial Escenario E3 Tranques de Acumulación (hm³/año)

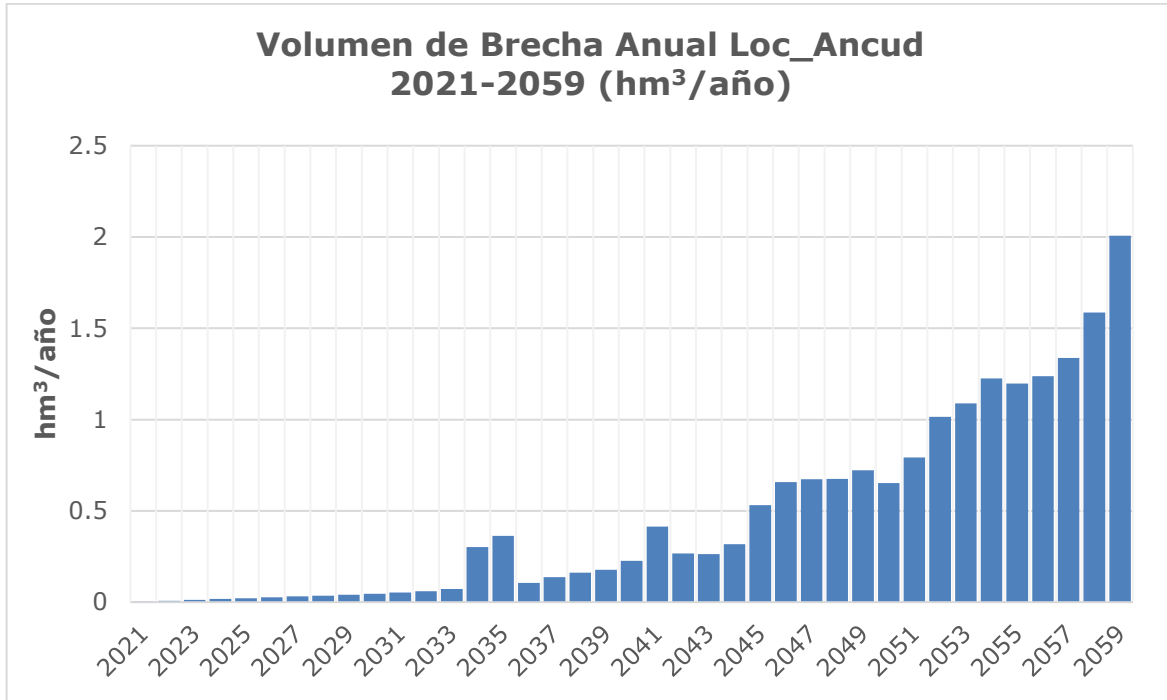
E3: Tranques de Acumulación	Histórico	Actual	Histórico Proyectado	Proyectado			
				2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Salidas entradas	1990- 2014	2015- 2019	2020-2059	2020- 2029	2030- 2039	2040- 2049	2050- 2059
Entradas	17038	16714	14843	15131	15164	14106	14972
Precipitación	16998	16672	14800	15089	15121	14062	14926
Otras entradas (aguas subterráneas elevadas para uso sanitario e industrial)	40	41	44	42	43	44	46
Salidas	17037	16709	14853	15134	15181	14107	14988
Evapotranspiración	2433	2441	2290	2363	2310	2210	2275
Percolación	507	485	436	442	446	416	438
Salida Al Mar por cauces superficiales naturales	14067	13752	12093	12297	12392	11447	12237
Otras salidas (percolación desde APU y SSR, caudal consumido por sitios de demanda que no vuelven a la cuenca, etc.)	29	31	34	32	33	34	37
Variación Humedad del Suelo (ΔV)	2	5	-9	-3	-17	-1	-16
Balance	0	0	0	0	0	0	0
Error %	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fuente: Elaboración propia en base a datos de modelación WEAP.



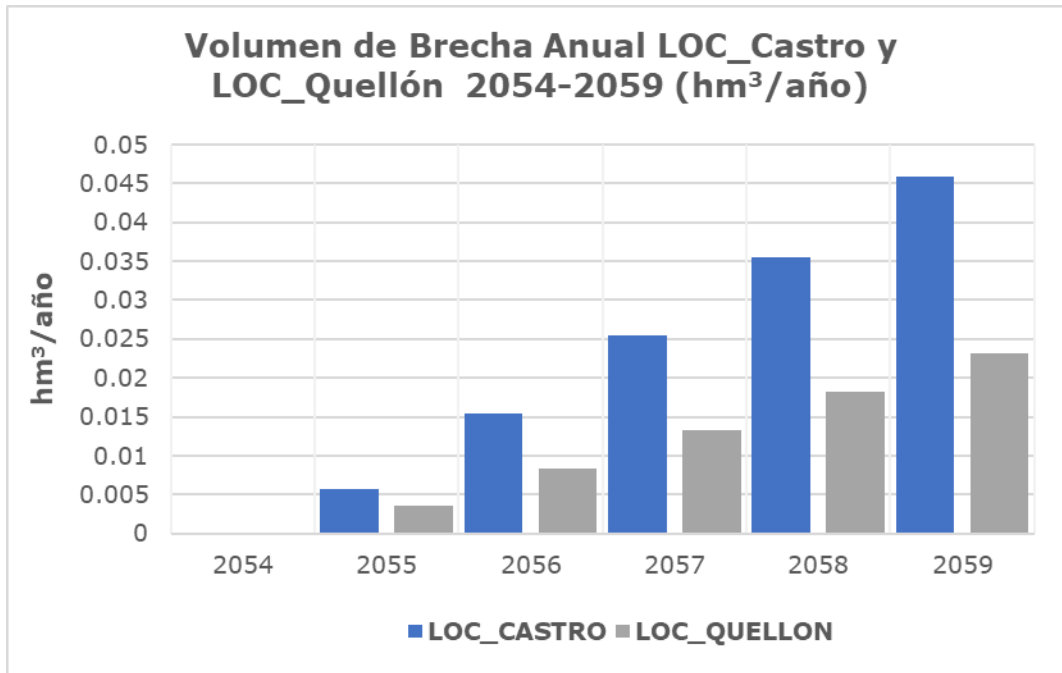
Respecto al análisis de abastecimiento para consumo humano en el sector urbano, en la Ilustración 4-10 e Ilustración 4-11 se presentan resultados de brecha anual para las localidades de Ancud, Castro y Quellón. Existe una brecha asociada al aumento poblacional en las localidades de Ancud, Castro y Quellón con una brecha máxima anual de 2,0; 0,05 y 0,02 hm³/año respectivamente. Esta brecha comienza a identificarse en el año hidrológico 2055 para las localidades de Castro y Quellón, por lo tanto, no se considera un problema a corto o mediano plazo para esas localidades. En cambio, en el caso de Ancud esta brecha empieza identificarse en la actualidad (2022), por ende, es un problema que las localidades pertinentes ya debería preocuparse.

El motivo por el cual se genera la brecha es que, frente al aumento en la población, las captaciones superficiales que alimentan a estas localidades llegan a su máxima capacidad. En el caso del APU Castro, este se abastece superficialmente de dos captaciones, la primera "río Gamboa" tiene una capacidad de 0,2 m³/s y la segunda captación "El Molino" de 0,03 m³/s. En la **Ilustración 4-12** se puede observar que caudal pasante por el cauce del río que abastece esta localidad es mayor a 0,42 m³/s y 0,10 m³/s para las captaciones de río Gamboa y El Molino respectivamente, por ende, la brecha no se produce por falta de flujo superficial. Para Quellón el motivo es el mismo, esta localidad se abastece de una captación en el estero Matadero de 0,022 m³/s de capacidad, mientras que en la **Ilustración 4-12** el flujo pasante en el cauce es mayor a 0,07 m³/s.



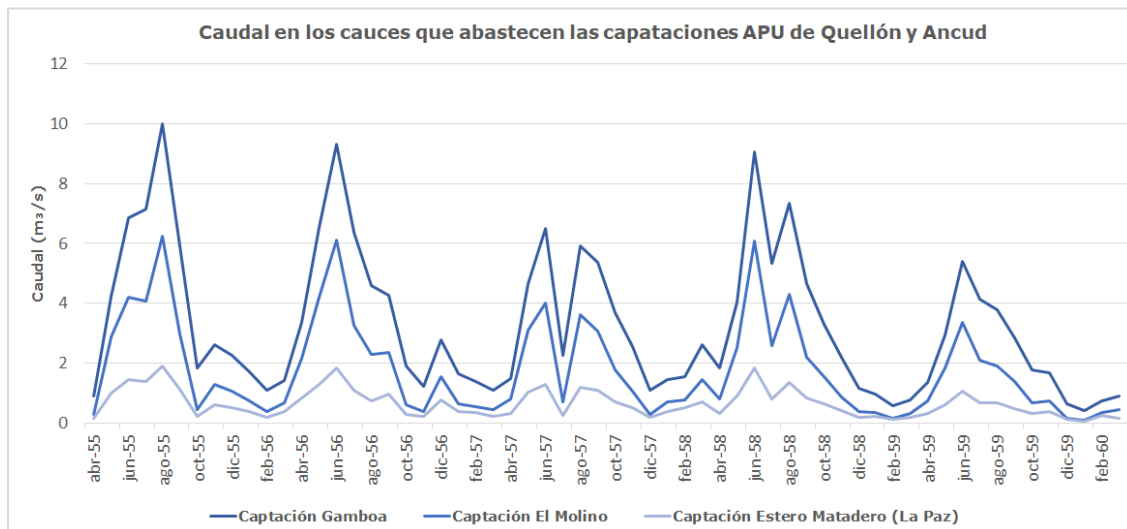
Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WEAP.

**Ilustración 4-10 Análisis de satisfacción de abastecimiento sector urbano.
 Volumen de brecha anual Loc_Ancud 2022-2060 (hm³/año)**



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WEAP.

Ilustración 4-11 Análisis de satisfacción de abastecimiento sector urbano. Volumen de brecha anual Loc_Castro y Loc_Quellón años 2055-2060 (hm³/año)



Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WEAP.

Ilustración 4-12: Caudal en los cauces que abastecen las captaciones APU de Quellón y Ancud (m³/s).



En el análisis de la oferta aportada a los humedales, en la Tabla 4-29 se presenta el volumen de agua modelado que es afluente a cada humedal analizado, tanto en el periodo actual del escenario base E0 (2015-2019), como en la década proyectada de 2050-2059 en los escenarios E0, E1, E2 y E3. Asimismo, se presentan las variaciones volumétricas y porcentuales de la oferta en la década 2050-2059 de todos los escenarios, respecto a la oferta en el escenario E0 en el periodo actual. Se puede ver que en todos los escenarios se presentan reducciones del caudal afluente a los humedales, con disminuciones que van desde el orden de -10%, hasta -21% en el caso de4l humedal laguna Quilo; solo el humedal estero Quellón figura con incrementos de 6% (8% en el caso de E1). Adicionalmente, se puede observar que en general la situación proyectada a la década 2050-2059 no presenta variaciones que sean de relevancia entre los escenarios, por lo que la modelación indica que los 3 escenarios de gestión modelados no entregan grandes diferencias en el caudal afluente a los humedales en comparación con el escenario E0. De todas maneras, es importante mencionar que en el modelo WEAP creado solo se evaluó este aspecto cuantificando los caudales afluentes a los humedales, dejando fuera de análisis otros factores importantes de estos cuerpos de agua, que deben ser tomados en cuenta y evaluados en un análisis específicamente enfocado a humedales.

Tabla 4-29 Caudales afluentes a los principales humedales de la zona de estudio en el periodo actual y en la década 2050-2059 proyectada en todos los escenarios. Valores en hm³/año.

Humedal	E0				E1			E2			E3		
	2015-2019	2050-2059	Δ. Hm ³ /año	Dif %	2050-2059	Δ. Hm ³ /año	Dif %	2050-2059	Δ. Hm ³ /año	Dif %	2050-2059	Δ. Hm ³ /año	Dif %
Lago Cucao	1215	1086	-129	-11%	1091	-124	-10%	1086	-129	-11%	1089	-126	-10%
Lago Huillinco	1044	936	-107	-10%	941	-103	-10%	936	-107	-10%	939	-104	-10%
Rio Chepu	1865	1504	-361	-19%	1512	-354	-19%	1504	-361	-19%	1510	-356	-19%
Humedal Gamboa	116	103	-14	-12%	103	-13	-11%	101	-15	-13%	101	-15	-13%
Humedal Estero Quellón	20	22	1	6%	22	2	8%	22	1	6%	22	1	6%
Laguna Chaiguata	486	429	-56	-12%	431	-54	-11%	429	-56	-12%	431	-55	-11%
Humedal Ten-Ten	12	11	-1	-10%	11	-1	-9%	11	-1	-8%	11	-1	-8%
Laguna Quilo	37	29	-8	-21%	29	-8	-21%	29	-8	-21%	29	-8	-21%
Circuito Humedales Pudeto Bajo	7	6	-1	-10%	6	-1	-9%	6	-1	-10%	6	-1	-10%

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del modelo WEAP

4.17.3 Conclusiones de los resultados de los escenarios de gestión

En la Tabla 4-30 se presentan las conclusiones generales de los escenarios de gestión analizados.

Tabla 4-30 Conclusiones de los resultados de los escenarios de gestión

Escenario	Objetivo	Conclusiones
E1 Cambio de Uso de Suelo	Evaluar la evolución de la cuenca desde el punto de vista hidrológico e hidrogeológico bajo el supuesto de que elimina la cobertura de bosque nativo no protegida	<p>Presenta un cambio en la escorrentía superficial, con un aumento de 6,2% respecto al E0 (comparación tomando década 2050-2059 para ambos escenarios). Este cambio es independiente a la precipitación, ya que esta es igual para todos los escenarios, y se debe principalmente a la reducción de la evapotranspiración relacionada a los coeficientes de cultivo estimados por metodología de Hunink <i>et al.</i> (2017).</p> <p>Este aumento en la escorrentía viene aparejado con un aumento en la percolación hacia el acuífero, ambos generados en la modelación por la reducción de la evapotranspiración y por el reflejo, en el modelo, de una menor capacidad del uso de suelo Plantación Agrícola para retener aguas en la zona de raíces de WEAP en comparación a la capacidad del Bosque Nativo.</p>
E2 Aumento poblacional	Evaluar la satisfacción de la demanda de agua para las personas bajo un supuesto de aumento acelerado de la población	<p>Existe una brecha asociada al aumento poblacional en las localidades de Ancud, Castro y Quellón con una brecha máxima anual de 2,0; 0,05 y 0,02 hm³/año respectivamente. Esta brecha comienza a identificarse en el año hidrológico 2055 para las localidades de Castro y Quellón, por lo tanto, no se considera un problema a corto o mediano plazo para esas localidades. En cambio, en el caso de Ancud esta brecha empieza identificarse en la actualidad (2022), por ende, es un problema que las localidades pertinentes ya debería preocuparse.</p>

Escenario	Objetivo	Conclusiones
E3 Tranques de Acumulación de Aguas Iluvia (Plan)	Evaluar la posibilidad de instalar tranques de acumulación de aguas lluvia para suplir brecha identificada en E2	Los tranques propuestos cumplen con el objetivo de reducir la brecha del E2 en las localidades de Castro y Quellón, en las que se alcanza una cobertura de 100% de sus demandas modeladas en todo el horizonte de modelación.

Fuente: Elaboración propia

5 BRECHAS

El presente estudio cuenta con una campaña de levantamiento de información en terreno, donde se tomó información de la cuenca a través de campañas de gravimetría, prospección TEM e hidroquímica. Si bien esta información resulta de gran utilidad para generar un conocimiento inicial y tener un entendimiento del acuífero a modo general, el cual es apoyado por la información incluida en estudios anteriores y la registrada en expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, se identifica aún una brecha de información hidrogeológica importante. Sin dudas la información recabada es de gran utilidad para la zona, sin embargo, todo esto podría complementarse incluyendo un monitoreo continuo y sistemático de los niveles de las aguas subterráneas en la cuenca a través de pozos de observación; esta medida entregaría datos de la evolución en el tiempo de los niveles de la napa durante periodos extensos de tiempo y en diferentes sitios del acuífero. Cabe recordar que en la actualidad no existen estaciones DGA de monitoreo de nivel de aguas subterráneas.

La inclusión de estaciones de medición de niveles de aguas subterráneas también ayudaría a poder reducir otra brecha existente en la modelación de la cuenca. En particular en la modelación numérica de la cuenca, como ha sido comentado anteriormente, si bien el modelo WEAP construido puede representar la componente subterránea de la cuenca, en realidad corresponde a una plataforma orientada a la modelación y gestión de las aguas superficiales de esta, y la modelación hidrogeológica que realiza es menos especializada. Por lo general, en acuíferos como el existente en la zona de estudio es modelado numéricamente por medio de otras herramientas, como por ejemplo Modflow. La utilización de esta herramienta tiene la ventaja de que, una vez construido un modelo en Modflow, WEAP tiene la capacidad de funcionar de forma acoplada con este, de manera de contar con un modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas que podría modelar de manera más sofisticada todas las componentes de la cuenca. Sin embargo, para la correcta construcción de este modelo numérico hidrogeológico, resulta de vital importancia contar con estadísticas extensas de medición de niveles de aguas subterráneas en variadas ubicaciones de la cuenca, para lo que serían de utilidad las estaciones mencionadas anteriormente. Es importante tener en consideración que este modelo hidrogeológico numérico necesita estadísticas que sean



extensas (se recomienda como mínimo 10 años y, en extremo, no menos que 5) y continuas, por lo que mientras antes se pongan en marcha, antes se podrá contar con aquella información.

Nuevamente relacionado a la brecha del modelo numérico WEAP para representar el aspecto subterráneo de la cuenca, en esta modelación se han incluido caudales subterráneos estimados a partir de la información disponible, que sin dudas pueden ser mejor estimados a partir del modelo hidrogeológico numérico especializado que fue mencionado anteriormente. Los caudales subterráneos entre sectores acuíferos tomados en esta modelación han sido definidos en base a supuestos, pero estas estimaciones corresponden solo a un acercamiento inicial en esa línea que puede ser mejorada en un modelo numérico hidrogeológico especializado. En aquel modelo numérico hidrogeológico también pueden ser calculados de mejor manera los flujos de recarga proveniente desde los cauces superficiales, que no fueron evaluados en esta oportunidad por no contar con la información suficiente y un modelo más robusto en esa línea.

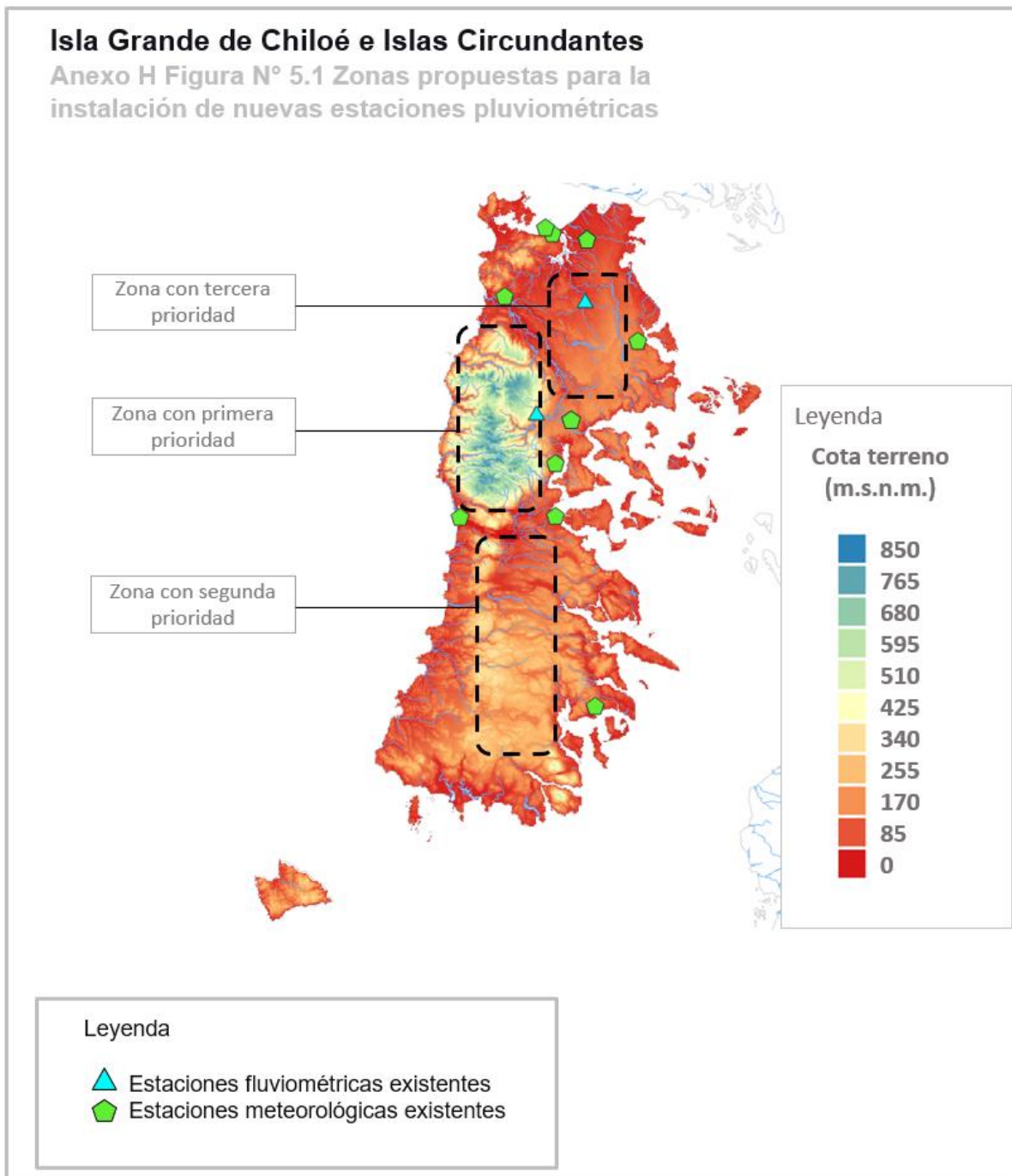
Por otra parte, desde el punto de vista de la caracterización de las temperaturas en la cuenca, esta solo cuenta con estaciones DGA y de la DMC que miden esta magnitud en la región este de la isla grande de Chiloé, sin monitoreo en el lado oeste de la isla. Nuevamente se identifica una brecha de información que finalmente se refleja como incertidumbre en la modelación de la cuenca.

De manera similar a lo anterior, respecto al registro fluviométrico en la cuenca, solo se cuenta con dos estaciones fluviométricas DGA; estas estaciones corresponden a Río Vilcún en Bel-Ben (código BNA: 10903001-5) y Río Grande en San Pedro (código BNA: 10904001-0), que se emplazan en el sector norte y centro de la cuenca. Reciben las aguas de cuencas que se extienden en aproximadamente 170 km² en el caso de Río Vilcún en Bel-Ben, y de 210 km² en el caso de Río Grande en San Pedro. Sin embargo, en este Anexo H se ha hecho un análisis reflejando magnitudes extrañas en las mediciones registradas en Río Grande en San Pedro, que no tienen sentido al comparar volumétricamente el caudal observado en la estación con las magnitudes de las precipitaciones estimadas en la cuenca que tributa a la estación. De esta manera, en términos de estaciones fluviométricas, la calibración desarrollada en este modelo WEAP se apoya solo en la estación Río Vilcún en Bel-Ben; situación que necesariamente deja una porción importante de la cuenca estudiada sin oportunidad de ser calibrada con datos fluviométricos, generándose una brecha importante en la modelación. De esta manera, se recomienda la revisión de la estación Río Grande en San Pedro para descartar posibles errores en su medición de caudales, así como también la implementación de estaciones en otras zonas de la cuenca, especialmente en la vertiente oeste de la isla grande de Chiloé y el sector sur de la misma. Al igual como fue mencionado en el caso de monitoreo de niveles de aguas subterráneas, respecto a la importancia de la extensión de la estadística observada para capturar satisfactoriamente lo ocurrido en la cuenca, en este caso también resulta relevante contar con estadísticas lo más extensas y completas posibles.

Por otra parte, existen zonas en las que no hay medición hidrométrica alguna en la cuenca. En ninguna de las islas circundantes existen estaciones hidrométricas DGA, tampoco en el sector



suroeste de la isla grande de Chiloé. Lo que genera una brecha de información hídrica que traspasa incertidumbre en la modelación realizada. Se recomienda implementar medición hídrica en aquellos lugares una vez que sea posible. En esta misma línea, conforme a lo mencionado en el apartado 4.14 de calibración del modelo, se cree que la ubicación de estaciones pluviométricas más hacia el interior de la isla grande de Chiloé podría ayudar a corregir una subestimación de precipitaciones que estaría generándose en CR2MET v2.0. Se cree que, dado que todas las estaciones pluviométricas se emplazan en la zona costera de la isla de Chiloé, el producto CR2MET v2.0 no lograría reproducir de manera satisfactoria una posible variación de las precipitaciones ocurridas en la isla con la altitud del terreno. De esta manera, en la Figura 5-1 se presentan en orden prioritario las zonas propuestas para la ubicación de estaciones pluviométricas que puedan ser de utilidad en la corrección del producto CR2MET v2.0 o de otros productos similares.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-1 Zonas propuestas para la instalación de nuevas estaciones pluviométricas

Por último, en las campañas de geofísica e hidroquímica desarrolladas en este estudio solo se tomaron mediciones en la isla grande de Chiloé y en las islas circundantes de Quinchao y Lemuy debido a la cantidad de recursos disponibles para ello en este estudio, por lo que todas las demás islas circundantes carecen de información en estas campañas. Tampoco hubo información que se pudiera levantar en el sector suroeste de la isla grande a causa de su difícil acceso. Esto nuevamente genera una brecha en la información hídrica que se refleja en la modelación hidrológica. Se recomienda realizar un levantamiento de información en aquellos lugares una vez que se cuente con los recursos suficientes y el acceso adecuado sea posible.

6 MATERIAL COMPLEMENTARIO

Contenido de los Apéndices del Anexo H

Apéndice H-1 (Información del **Modelo Conceptual Subterráneo**)

- Carpeta: Modelo conceptualSUB Modflow: en esta carpeta se incluyen los archivos que han sido generados por la modelación conceptual subterránea con el software “Visual Modflow Flex” versión 7.0.
- Documentos de apoyo (“Gravimetría”, “Hidroquímica”, “Minutas de etapa de diseño de campañas”, “TEM”):
 - Archivos complementarios: en esta carpeta se anexan documentos de interés, entre ellos un excel con el catastro de los derechos “Data_Derechos Subterráneos_Chiloé.xlsx” y el .pdf “Interpretación TEM_UnidadesHG”.
 - Gravimetría: se incluye un comprimido con la información del informe e información final entregados por la empresa subcontratada, el detalle de los anexos, figuras y fotos generados durante las distintas etapas de trabajo. A ello se suman archivos adicionales XYZ con los datos que se han obtenido durante las mediciones gravimétricas realizadas durante la campaña de terreno en 2022, así como, uno donde se incluyen las mediciones gravimétricas realizadas por dicha empresa previamente en 2018, que complementan este estudio. Se adjuntan distintos archivos con la ubicación de los perfiles (KML, PDF, XYZ), y PDF con reportes de avances, la anomalía de Bouguer y los mapas obtenidos. Se suma un comprimido con las fotos de los distintos mapas en formato JPG.
 - Hidroquímica: en esta carpeta se incluyen 2 carpetas, una donde se destacan los informes con los resultados de la campaña hidroquímica para las 10 muestras de aguas muestreadas de forma individual y también uno PDF con toda la información unificada. La otra carpeta indica la documentación generada por la empresa de topografía que definió la ubicación precisa de los pozos muestreados. En este apartado se adjuntan 4 archivos como: el informe final, el plano que registra la ubicación de los pozos en PDF y DWG, un kml que revela donde se encuentran los pozos muestreados.

- Minutas de etapa de diseño de campañas: esta carpeta contiene los distintos archivos que se exigen por bases para el diseño de las 3 campañas de terreno. En una carpeta están los asociados a las campañas geofísicas, con la minuta que desglosa todo el detalle para el diseño de esta etapa, así como 10 anexos que son requeridos porque se indica la ubicación en KML y .xlsx de las estaciones gravimétricas (Anexo N°1 y 2), estaciones en roca (Anexo N°3) y geofísicas TEM (Anexo N°6 y 7). También se adjuntan cálculos del error ponderado (Anexo N°4) y comparación de áreas de las campañas según lo propuesto por la DGA y lo sugerido por HDG con motivo de incrementar la cantidad de estaciones según bases (Anexo N°5). Finalmente, se puede consultar la carta Gantt en el Anexo N°9.
En otra carpeta se registran los archivos requeridos para que sea aprobada la campaña hidroquímica de terreno. Estos son: Anexo N°1. Muestreo hidroquímico.kml, Anexo N°2. CoordinadasPozos_Hidroquímica.xlsx, Anexo N°3. Carta_Gantt_Hidroquímica_PEGH Chiloé y circundantes.xlsx, Anexo N°4. Prevención de Accidentes y enfermedades profesionales.pdf, así como, la "Minuta de campaña hidroquímica Chiloé.pdf".
- TEM: en este espacio se registran informaciones asociadas a la campaña en terreno y gabinete de mediciones TEM. Archivos con las coordenadas de cada punto TEM por perfil medidos, un comprimido con los datos generados durante cada medición, un excel que acota todos los datos de resistividad y espesor medidas con las coordenadas asociadas a los puntos TEM en cada perfil. Los perfiles con escalas de colores que visualizan las resistividades de los materiales estudiados pueden ser consultados en un formato PPTX. Existe un comprimido que sintetiza toda la información procesada (Líneas Chiloé.rar) y el informe final generado de todo el trabajo realizado y los resultados obtenidos.
- Anexo H-1 Caracterización hidrogeológica PEGH Chiloé.docx: en este documento Word se recoge de forma sintetizada el levantamiento de información respectiva para el diseño de las campañas de terreno (gravimetría, TEM e hidroquímica). Se indican los resultados de las 3 campañas ejecutadas en terreno, los equipos utilizados en las mismas y los resultados obtenidos. Como parte del acápite de la campaña hidroquímica se incluyen los resultados del cálculo del Error del Balance Iónico (EBI), que indica la validez de los mismos y el nivel de confianza que refieren estos para su posterior interpretación.

Apéndice H-2 (**Modelo Superficial WEAP**)

- WEAP Chiloe V3.WEAP : Modelo WEAP.
- INFO_WEAP_AREA.xlsx : Información contenía en la carpeta WEAP AREA del modelo.



Apéndice H-3 (Transferencia de Capacidades en Modelación Hidrológica desarrollada en el marco de este estudio)

- Carpeta (1. Material WEAP): Contiene plantillas prototipos de las variables meteorológicas consideradas en la capacitación WEAP.
- PEGH_Capacitación Modelación
- Manual de Instalación WEAP
- Programación_PEGH Chiloé: Programación capacitaciones WEAP.
- Videos capacitación.

Contenido de la carpeta WEAP AREA del modelo WEAP.

Tabla 6-1: Contenido de la carpeta WEAP Área del modelo WEAP.

Carpeta	Nombre Archivo	Descripción
APU	Captaciones_APU_En_Operación.xlsx	Captaciones APU consideradas en la modelación WEAP, en la columna "Captación WEAP" se puede visualizar el elemento del cual extrae agua en la modelación superficial.
	POB_Localidades.csv	Número de habitantes considerados para las distintas localidades incluidas en la modelación para el escenario base
	POB_Localidades_Escenario_Gestion.csv	Número de habitantes considerados para las distintas localidades incluidas en la modelación período proyectado, específicamente en el escenario de gestión de Aumento de población
Caudales	Caudales_WEAP.csv	Caudales mensuales de las 2 estaciones fluviométricas que existen en la cuenca.
Forzantes meteorológicas	FN_WEAP.csv	Fracción de nubosidad promedio para las distintas bandas de elevación y subcuencas que existen en la cuenca
	HR_WEAP.csv	Humedad relativa promedio para las distintas bandas de elevación y subcuencas que existen en la cuenca
	Pp_WEAP.csv	Precipitación promedio para las distintas bandas de elevación y subcuencas que existen en la cuenca
	Temp_WEAP.csv	Temperatura promedio para las distintas bandas de elevación y subcuencas que existen en la cuenca
	W_WEAP.csv	Velocidad del viento promedio para las distintas bandas de elevación y subcuencas que existen en la cuenca
Industrias	Captaciones_Industrias.xlsx	Captaciones Industriales consideradas en la modelación WEAP, en la columna "Sitio de Demanda WEAP" se puede visualizar el elemento Sitio de demanda al cual está asociado cada captación
SIG	Captaciones_APU_En_Operación.shp	Captaciones APU consideradas en la modelación WEAP
	Captaciones_Industrias_Chiloe.shp	Captaciones Industrias consideradas en la modelación WEAP
	Delimitacion_PEGH_Chiloe.shp	Delimitación subcuencas WEAP
	DGA_Cuencas_DARH_v2.shp	Cuencas DARH que existen en la cuenca
	Humedales_Chiloe.shp	Humedales que existen en la cuenca
	Masas_Lacustres_Chiloe.shp	Principales masas lacustres en la cuenca
	Red_Hidrografica_Chiloe.shp	Cauces considerados en la modelación
	Sectorización_Acuifero.shp	Sectorización de acuíferos en la cuenca
Unificaciones_Costeras.shp	Cauces que corresponden a cuencas de unificaciones costeras	
SSR	Captaciones_SSR.xlsx	Captaciones de servicio sanitario rural consideradas en la modelación WEAP, en la columna "Sitio de Demanda WEAP" se puede visualizar el elemento Sitio de demanda al cual está asociado cada captación
	Pob_SSR.csv	Número de habitantes considerados para las distintas localidades SSR incluidas en la modelación para el escenario base
Uso_Suelo	Suelos_1997_HG.csv	Uso de suelos en las distintas subcuencas desglosado por banda de elevación según el catastro de CONAF 1997
	Suelos_2014_HG.csv	Uso de suelos en las distintas subcuencas desglosado por banda de elevación según el catastro de CONAF 2014
	Suelos_2060_HG.csv	Uso de suelos en las distintas subcuencas desglosado por banda de elevación según capa creada para el escenario de gestión de uso de suelo

Fuente: Elaboración propia



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO I PARTICIPACIÓN CIUDADANA

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar los siguientes documentos, referidos al proceso de participación ciudadana llevada a cabo en el desarrollo de este plan de gestión

ANEXO I.1. Participación Ciudadana

ANEXO I.2. Plan de Comunicación

ANEXO I.3. Plan de Participación Ciudadana y Plan de Medios

ANEXO I.4. Conversatorio de Mujeres

ANEXO I.5. Metodología de Participación Ciudadana



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO J PLAN ESTRATÉGICO

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar los siguientes documentos, referidos al proceso de participación ciudadana llevada a cabo en el desarrollo de este plan de gestión

ANEXO J.1. Listado de Iniciativas del Plan

ANEXO J.2. Fichas de Iniciativas

ANEXO J.3. Memoria de Cálculo de Iniciativas

ANEXO J.4. Caracterización de Servicios Sanitarios Rurales

ANEXO J.5. Memoria de Cálculo de Indicadores

ANEXO J.6. Evaluación Económica de Escenarios de Gestión

ANEXO J.7. Grupo Asesor

ANEXO J.8. Infografías



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS DE LAS ISLAS CHILOÉ Y CIRCUNDANTES

ANEXO K MINUTAS DE REUNIONES

**REALIZADO POR
HIDROGESTIÓN S.A.**

S.I.T. N° 507

SANTIAGO, DICIEMBRE DE 2022



Apéndices

En la versión digital de este informe se pueden encontrar los siguientes documentos, referidos a las minutas de las reuniones llevadas a cabo en el desarrollo de este plan de gestión

ANEXO K.1. Minutas de Coordinación

ANEXO K.2. Minutas de Reunión

ANEXO K.3. Talleres

ANEXO K.4. Respaldo de Reuniones

