



DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

Santiago, RM

**DIAGNÓSTICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
RED NACIONAL DE ALERTA DE EVENTOS
HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS**

S.I.T. N° 481 de 2021

ETAPA IV

TOMO III REGIÓN DE ANTOFAGASTA

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

INRHED SPA- EMERGE INGENIERÍA

Santiago, Octubre 2021

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefe de Unidad de Hidrología
Ingeniero Civil, Sr. Luis Alberto Moreno

Inspector Fiscal
Geógrafo, Sr. Rodrigo Sáez

INRHED SPA

Reynaldo Payano Almánzar
Jefe de Estudio
Ingeniero Civil, Hidrólogo PhD

Profesionales:

Ingeniero de Proyecto Jorge Andrés Smith Irazábal
Economista Jean Maldonado
Especialista Geomensura, Carlos Castro
Ingeniero de Proyecto, Carla Bravo
Ingeniero Civil, Alexander Fuentealba
Sociólogo Andrés Santander

Tabla de Contenido General

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
2.	METODOLOGÍA.....	4
3.	RED HIDROMÉTRICA CRÍTICA FINAL	7
3.1	ESTACIONES CRÍTICAS FINALES	10
3.2	ESTACIONES NUEVAS.....	12
3.3	ESTACIONES DE APOYO	12
4.	PLAN DE ACCIÓN RED HIDROMÉTRICA	14
4.1	VALORIZACIÓN DE LA RED	14
4.2	IDENTIFICACIÓN DE BRECHAS.....	15
4.2.1	Estaciones meteorológicas.....	15
4.2.2	Estaciones fluviométricas	17
4.3	EVALUACIÓN DE COSTOS	19
4.3.1	Estaciones meteorológicas.....	20
4.3.2	Estaciones fluviométricas	20
4.3.3	Costo total	21
5.	PLAN DE ACCIÓN RED PIEZOMÉTRICA	22
5.1	IDENTIFICACIÓN LUGAR DE POZOS.....	22
5.2	EVALUACIÓN DE COSTOS	25
6.	CONCLUSIONES	26
6.1	DISPONIBILIDAD DE DATOS.....	26
6.2	EVENTOS EXTREMOS	26
6.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL.....	27
6.4	RED HIDROMÉTRICA FINAL	27
6.5	RED PIEZOMÉTRICA.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 DIAGRAMA ETAPA I: SELECCIÓN DE ESTACIONES CRÍTICAS PRELIMINARES.....	4
FIGURA 2.2 DIAGRAMA ETAPA II: REVISIÓN ESTACIONES CRÍTICAS SELECCIONADAS	5
FIGURA 2.3 DIAGRAMA ETAPA III: SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	5
FIGURA 2.4 DIAGRAMA ETAPA IV: PLAN DE ACCIÓN.....	6
FIGURA 2.5 DIAGRAMA METODOLOGÍA ANÁLISIS CRÍTICO RED PIEZOMÉTRICA	6
FIGURA 3.1 RED HIDROMÉTRICA CRÍTICA FINAL.....	8
FIGURA 5.1 UBICACIÓN POZOS PROPUESTOS, REGIÓN DE ANTOFAGASTA.....	24

Índice de Tablas

TABLA 4.1 VALOR DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CRÍTICAS RED METROPOLITANA	14
TABLA 4.2 BRECHAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CRÍTICAS, REGIÓN DE ANTOFAGASTA	16
TABLA 4.3 BRECHAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CRÍTICAS, REGIÓN DE ANTOFAGASTA	18
TABLA 4.4 FACTOR ELEVACIÓN	19
TABLA 4.5 FACTOR DE ACCESIBILIDAD	19
TABLA 4.6 FACTOR TAMAÑO ESTACIÓN	19
TABLA 4.7 CAUDALES ASOCIADOS A UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS	20
TABLA 4.8 COSTO PLAN DE ACCIÓN ESTACIONES METEOROLÓGICAS	20
TABLA 4.9 COSTOS PLAN DE ACCIÓN ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS	21
TABLA 5.1 CANTIDAD DE POZOS PROPUESTOS	23

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA), ha encargado el estudio “**Diagnóstico para la implementación de Red Nacional de Alerta de Eventos Hidrometeorológicos Extremos**”. DGA-MOP ID 1019-22-LQ21” a la UTP INRHED SPA – EMERGE INGENIERÍA, con el objetivo de diagnosticar de forma interdisciplinaria el estado de la Red Hidrométrica de las Macro Zonas Norte y Centro Norte del país y establecer medidas de infraestructura necesarias para dar cobertura a las debilidades críticas de la red de monitoreo hidrométrico con enfoque en la protección civil, y la gestión temprana de riesgos naturales. Lo anterior enfocado a futuro para la elaboración de una red de alerta.

El estudio comprende cuatro etapas, cada una de ellas complementa e integra nuevos antecedentes con la finalidad de desarrollar un producto integrado que entregue cumplimiento a lo exigido en las bases técnicas y propuesta metodológica de las consultoras.

El presente informe corresponde a la etapa final del proyecto, que incluye el desarrollo de las etapas I, II, III y IV. A su vez este informe se encuentra dividido en tomos por cada región en estudio y ordenados de norte a sur, los cuales son los siguientes:

- Tomo I. Informe Red Arica y Parinacota
- Tomo II. Informe Red Tarapacá
- Tomo III. Informe Red Antofagasta
- Tomo IV. Informe Red Atacama
- Tomo V. Informe Red Coquimbo
- Tomo VI. Informe Red Valparaíso
- Tomo VII. Informe Red Metropolitana

A continuación, se presenta el Tomo III correspondiente a la Red de la Región de Antofagasta, enfocado en los siguientes temas principales:

- Recopilación y análisis de antecedentes
- Evaluación y diagnóstico del estado actual de la red hidrométrica de la región
- Reunión con los Jefes Regionales de hidrología
- Visitas a terreno

- Análisis estadístico y de calidad de la red hidrométrica
- Determinación de estaciones críticas
- Fichas diagnóstico de las estaciones críticas
- Evaluación y diagnóstico del estado actual de la red piezométrica
- Plan de acción
- Archivos SIG generados

Siendo la finalidad de este informe poder entregar todos los antecedentes necesarios para poder contar con una red robusta pensando en la protección civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Diagnosticar de forma interdisciplinaria el estado de la Red Hidrométrica de las Macro Zonas Norte y Centro Norte del país y establecer las medidas de infraestructuras necesarias para dar cobertura a las debilidades críticas de la red de monitoreo hidrométrico con enfoque en la protección civil y la gestión temprana de riesgos naturales.

Diagnosticar de forma interdisciplinaria el estado de la Red Piezométrica de las Macro Zonas Norte y Centro Norte del país, estableciendo mejoras en aumentar la red de monitoreo con enfoque en los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común que se encuentren en categoría de prohibición y restricción.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1- Revisar y recopilar los antecedentes bibliográficos que permitan conocer estudios de carácter similar, así como también adquirir nuevos conocimientos respecto a la zona de estudio.
- 2- Realizar visitas a terreno que permitan conocer el estado actual de la red hidrométrica.
- 3- Elaborar fichas de las estaciones visitadas, que reflejen los problemas generales de la red hidrométrica.
- 4- Definir estaciones críticas preliminares y nuevas para la protección civil, la gestión de desastres y la gestión integrada de recursos hídricos.

- 5- Determinar tiempos de concentración de las estaciones criticas preliminares y nuevas.
- 6- Realizar visitas a terreno a las estaciones criticas preliminares, que permitan conocer el estado de estas estaciones.
- 7- Elaborar fichas de las estaciones criticas finales visitadas, que reflejen los problemas de cada estación.
- 8- Validar las estaciones hidrométricas determinadas como críticas preliminares, dando paso a la clasificación de estaciones críticas finales.
- 9- Efectuar una revisión de los registros estadísticos que permita establecer relaciones entre el registro de precipitación máxima, el caudal máximo instantáneo y eventos extremos ocurrido en las zonas de estudio.
- 10-Definir una estación meteorológica estándar.
- 11-Determinar las brechas y realizar una evaluación económica, entre la estación meteorológica estándar y las estaciones definidas como criticas finales.
- 12-Definir una estación fluviométrica estándar.
- 13-Determinar las brechas y realizar una evaluación económica, entre la estación fluviométrica estándar y las estaciones definidas como criticas finales.
- 14-Realizar un análisis crítico de la red piezométrica con la finalidad de obtener un diagnóstico panorámico, estableciendo posibles mejoras relativas a aumentar la red de monitoreo para enfrentar eventos extremos de sequía.

2. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta la metodología para el desarrollo del presente estudio. La metodología se divide en 4 etapas: 1) Selección de estaciones críticas preliminares, 2) Revisión de las estaciones críticas seleccionadas, 3) Generación del SIG y 4) Plan de Acción. La Figura 2.1, Figura 2.2, Figura 2.3 y Figura 2.4 muestran un diagrama conceptual de las Etapas I, II, III y IV, respectivamente.

Etapa I: Selección de estaciones críticas preliminares

1. Recopilación y revisión antecedentes
2. Diagnóstico de la red hidrométrica
3. Reuniones con los Jefes Regionales de Hidrología
4. Estaciones protocolo DGA - ONEMI
5. Visitas a terreno N°1
6. Selección estaciones críticas preliminares
7. Población vulnerable
8. Tiempo de concentración

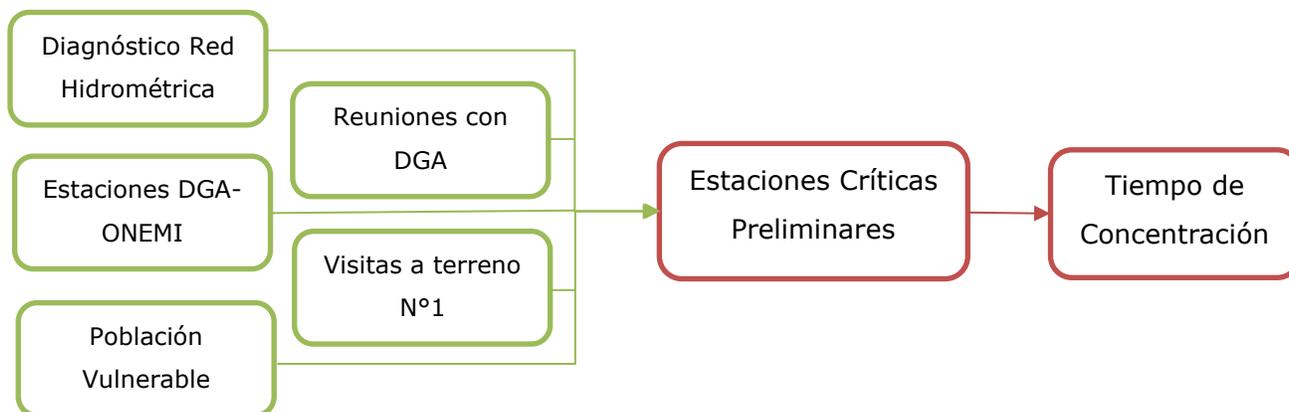


Figura 2.1 Diagrama Etapa I: Selección de estaciones críticas preliminares

Etapa II: Revisión de estaciones críticas seleccionadas

9. Análisis estadístico y calidad de la red
10. Reunión de validación con los Jefes Regionales de Hidrología
11. Visita a terreno N°2
12. Propuesta final estaciones críticas
13. Fichas estaciones críticas
14. Conclusiones

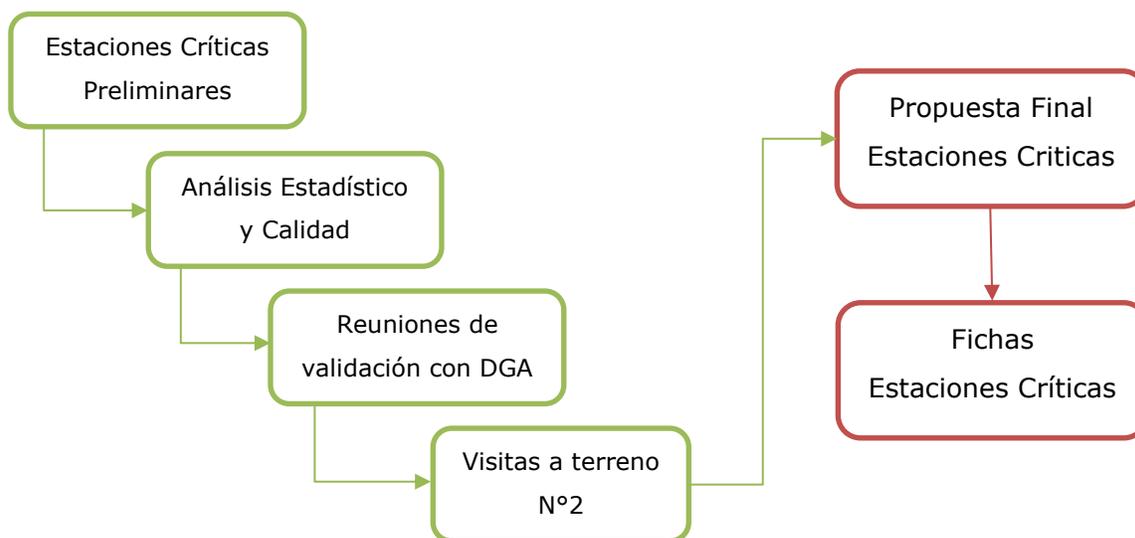


Figura 2.2 Diagrama Etapa II: revisión estaciones críticas seleccionadas

Etapa III: Generación del Sistema de Información Geográfica (SIG)

15. Entrega de información para Geodatabases o shape files



Figura 2.3 Diagrama Etapa III: Sistema de Información Geográfica

Etapa IV: Plan de Acción

16. Estaciones críticas finales
17. Definición de estación estándar
18. Identificación de brechas
19. Evaluación de costos



Figura 2.4 Diagrama Etapa IV: Plan de Acción

Paralelamente, en la Figura 2.5 se presenta la metodología del análisis crítico de la red piezométrica.

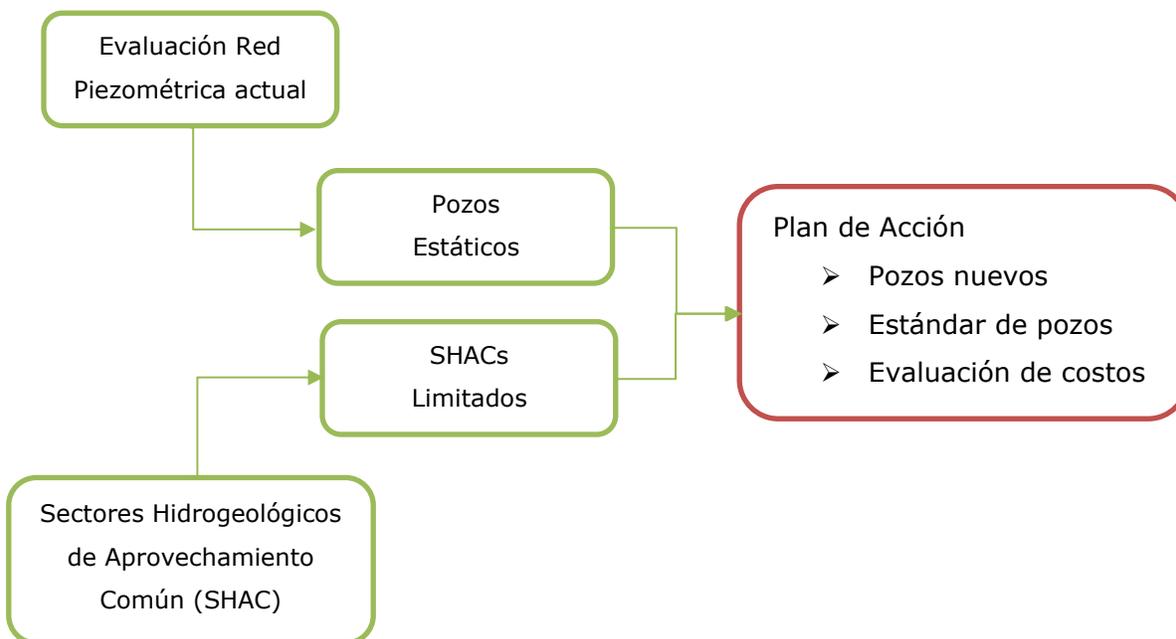


Figura 2.5 Diagrama metodología análisis crítico Red Piezométrica

3. RED HIDROMÉTRICA CRÍTICA FINAL

Como resultado de los análisis expuestos entre los capítulos 4 y 11 del informe final del estudio, se llegó a la lista de estaciones que componen la red hidrométrica final.

- Estaciones fluviométricas
 - Río Loa en salida embalse Conchi
 - Río Salado en sifón Ayquina
 - Río Loa en Angostura
 - Río San Pedro en Cuchabrachi
- Estaciones meteorológicas
 - El Tatio
 - Sierra Gorda
 - Toconao Quebrada 1
 - Aguas Verdes
- Estación meteorológica nueva
 - Camino a salar de Pajonales
- Estaciones de apoyo
 - Río Loa antes represa Lequena
 - Río Salado antes junta Curti

La Figura 3.1 muestra la configuración final de la red hidrométrica crítica.

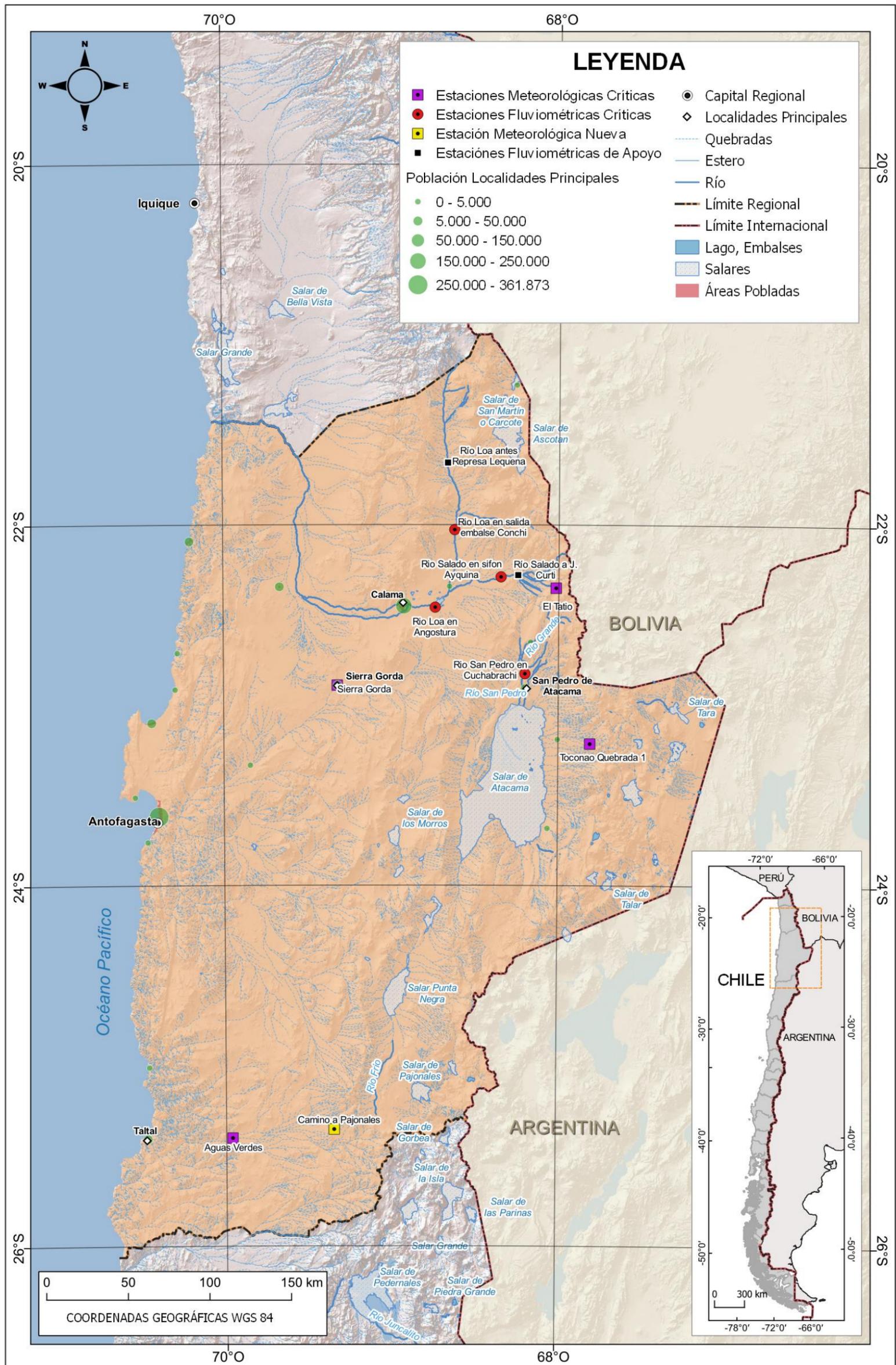


Figura 3.1 Red hidrométrica crítica final

Las características generales de las estaciones críticas en su estado actual son las siguientes.

- **Estadística general:** De las estaciones seleccionadas 5 poseen más de 38 años válidos y 1 estación (Río Loa en Angostura) 3 años válidos. Sobre las precipitaciones, la instrumentación es más reciente, con estadística de entre 0 (Toconao Quebrada 1) y 32 años válidos (Aguas Verdes).
- **Obras existentes y deficiencias:**
 - **Acceso:** Las estaciones tienen un acceso complejo, por la distancia a la que están de los centros poblados, sobre todo si se comienza el viaje en Antofagasta. Otro factor importante es la altitud, todas las estaciones fluviométricas seleccionadas están emplazadas por sobre los 2.500 msnm, llegando hasta alrededor de 3.300 msnm (Río Loa antes represa Lequena). Las estaciones meteorológicas se ubican desde los 1.600 msnm (Sierra Gorda) hasta cerca de 4.000 msnm (Toconao Quebrada 1).
 - **Emplazamiento:** De las estaciones seleccionadas 2 (Río Loa en salida embalse Conchi y río Salado en sifón Ayquina) están correctamente emplazadas frente al cauce. En cuanto a las estaciones Río Loa antes represa Lequena y Río Salado antes junta Curti tienen un mal posicionamiento. Las estaciones Río Loa en Angostura y Río San Pedro en Cuchabrachi no fueron visitadas por lo que no se tiene mayores antecedentes.
 - **Estructura:** De las estaciones seleccionadas 2 (Río Loa en salida embalse Conchi y río Salado en sifón Ayquina) tienen una estructura regular con algunos detalles Río Loa antes represa Lequena y Río Salado antes junta Curti tienen una mala estructura, como la primera que tiene una sección muy pequeña, y la segunda que tiene un asentamiento de la losa. Las estaciones Río Loa en Angostura y Río San Pedro en Cuchabrachi no fueron visitadas por lo que no se tiene mayores antecedentes.
 - **Instrumentación:** Las estaciones Río Loa en salida embalse Conchi, Río Salado en sifón Ayquina y Río Loa antes represa Lequena poseen una buena instrumentación, correctamente instalada. La estación Río Salado antes junta Curti no está funcionando, por lo que se considera el estado de instrumentación como malo. Las estaciones Río Loa en Angostura y Río

San Pedro en Cuchabrachi no fueron visitadas por lo que no se tiene mayores antecedentes.

- **Otros:** Un problema recurrente en las estaciones de la región es el embancamiento por sedimentos que llegan generalmente finos que se depositan y en tiempos de crecidas rocas más grandes. Cerca de los centros poblados existen problemas de vandalismo, como la estación Río Loa en Angostura, que aún no ha sido reparada.
- **Población vulnerable:** Dentro de la población vulnerable que se alertaría se cuentan las comunas y localidades de: Calama, Taltal, San Pedro de Atacama, Sierra Gorda, Peine, San Francisco de Chiu-Chiu, Baquedano, Toconao, Caspana, Río Grande y Toconce, alertando a un total de 205.115 habitantes.
- **Diagnóstico final:** Las estaciones seleccionadas lograrían alertar a una gran cantidad de población que sería susceptible a eventos hidrometeorológicos extremos. Sin embargo, las estaciones deben mejorar detalles como: las estructuras antiguas y deficientes, ubicación de los instrumentos y cierres para dar seguridad a la estación completa.

3.1 Estaciones Críticas Finales

A continuación, se presentan las características principales y falencias de las estaciones críticas seleccionadas.

1. **Río Loa en salida embalse Conchi:** Esta estación es parte del protocolo DGA-ONEMI, por lo que se seleccionó preliminarmente como crítica. Tomando en cuenta la capa shape de localidades y en imágenes satelitales es posible distinguir la población vulnerable en San Francisco de Chiu-Chiu, luego más abajo sigue la estación fluviométrica río Loa en Angostura y finalmente la ciudad de Calama. Esta estación queda aguas abajo del embalse Conchi, cuerpo de agua que regula el cauce natural del río, pero de todas maneras se han registrado grandes crecidas, esto va a depender del estado de la capacidad del embalse. En la visita a terreno se observa que la estación tiene buenas dimensiones, pero posee muros delgados que podrían fallar en una crecida grande. A pesar de todo esto, se considera que la estación entrega información valiosa para generar una alerta por crecidas generadas en la parte alta de la cuenca del río Loa.

2. **Río Salado en sifón Ayquina:** Esta estación es parte del protocolo DGA-ONEMI, por lo que se seleccionó preliminarmente como crítica. Tomando en cuenta la capa shape de localidades y en imágenes satelitales no se observaron poblaciones que sean vulnerables hasta la siguiente estación fluviométrica (río Loa en Angostura). Sin embargo, esta es la última estación de la cuenca del río Salado, por lo que da información valiosa sobre una crecida proveniente desde este lado. En la visita a terreno se observaron problemas como flujo subterráneo por debajo de la losa, que fueron reparados en trabajos posteriores. Además se evidencia en terreno que las crecidas llegan hasta los 6 m de altura, pasando muy por encima de la estación, lo que hace necesario un rediseño de la estación para un periodo de retorno más alto.
3. **Río Loa en Angostura:** Esta estación es la última antes de la ciudad de Calama, está a una distancia tal, que significa un tiempo de respuesta de 1,4 horas. La estación fue instalada en el año 2012 y estuvo vigente hasta el 2017. Actualmente se encuentra fuera de operación y ha sido vandalizada. La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.
4. **Río San Pedro en Cuchabrachi:** Esta estación está ubicada aguas arriba de la localidad de San Pedro de Atacama, por el río San Pedro, está a una distancia tal que significa un tiempo de respuesta de 0,9 horas. La estación tiene 52 años válidos, pero actualmente se encuentra fuera de operación (desde 2015). La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.
5. **El Tatio (Meteorológica):** Esta estación está ubicada en la cabecera de la cuenca del río Salado. Actualmente está vigente, y daría estimaciones de crecidas para las localidades de Toconce (2,8 horas tiempo de concentración), Caspana (2,6 horas), Río Grande (3,7 horas) y San Pedro de Atacama (6,5 horas). La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.
6. **Sierra Gorda (Meteorológica):** Esta estación está ubicada en la parte media de la Quebrada de Caracoles. Actualmente está vigente, y daría estimaciones de crecidas para las localidades de Sierra Gorda y Baquedano, con tiempos de concentración de 6,4 y 23 horas, respectivamente. La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.

7. **Toconao Quebrada 1 (Meteorológica):** Esta estación está ubicada en una parte alta de las quebradas aportantes al Salar de Atacama, cerca del poblado de Toconao. Actualmente está vigente, y daría una estimación de la crecida sobre las localidades de Toconao y Peine, con tiempos de concentración de 6 y 4 horas, respectivamente. La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.
8. **Aguas Verdes (Meteorológica):** Esta estación está ubicada en la parte media de la Quebrada de Taltal. Actualmente no está vigente, y daría una estimación de la crecida sobre la ciudad de Taltal, con 22 horas de tiempo de concentración. La estación no pudo ser visitada, por lo que no se disponen de mayores antecedentes sobre su estado.

3.2 Estaciones Nuevas

En los análisis anteriores se identificó una zona con falta de datos para generar alertas a la población vulnerable. En esta zona se propuso la instalación de un pluviómetro para poder estimar una crecida con un cierto tiempo de anticipación.

En el caso de la Región de Antofagasta se propone la instalación de una estación meteorológica nuevas.

- Camino a salar de Pajonales

3.3 Estaciones de Apoyo

En los análisis se definieron estaciones de apoyo, que son estaciones que los Jefes Regionales de Hidrología consideran importantes para el correcto monitoreo de eventos hidroclicmáticos importantes, pero que por su ubicación, muy cercana a la población en la mayoría de los casos, fueron descartadas como críticas. Las estaciones de apoyo en la región son las siguientes.

1. **Río Loa antes represa Lequena (Estación de Apoyo):** Esta estación es parte del protocolo DGA-ONEMI, por lo que se seleccionó preliminarmente como crítica. Tomando en cuenta la capa shape de localidades y en imágenes satelitales no existen localidades vulnerables aguas abajo hasta la siguiente estación fluviométrica del río. Otra cosa observada en terreno es que la estación sólo

cuenta con un canal de estiaje, no mide crecidas, por lo que la estación queda inundada fácilmente. Es posible ver los gaviones en mal estado que dan un indicio del diseño de la estación para pequeños periodos de retorno.

2. **Río Salado antes junta Curti (Estación de Apoyo)**: Esta estación es parte del protocolo DGA-ONEMI, por lo que se seleccionó preliminarmente como crítica. Tomando en cuenta la capa shape de localidades y en imágenes satelitales no existen localidades vulnerables aguas abajo hasta la siguiente estación fluviométrica del río. Esta estación no se encuentra operativa y en terreno se observó que presenta una sección de aforo deficiente, con la losa asentada y una sección con estructuras que no corresponden a una sección de aforo.

4. PLAN DE ACCIÓN RED HIDROMÉTRICA

En la sección 13.1 del informe final se establecieron las especificaciones técnicas de las estaciones fluviométricas y meteorológicas estándar de la red hidrométrica crítica. En base a estas definiciones se identificaron las brechas entre las estaciones pertenecientes a la red crítica y las estaciones estándar. A continuación, se muestran los resultados de las brechas y la evaluación de costos del plan de acción.

4.1 Valorización de la Red

La valorización de la red corresponde a una estimación de los costos de una red totalmente nueva a los precios actuales. Para realizar la valorización se utilizaron licitaciones históricas. Se clasificaron las estaciones de acuerdo a su caudal de 50 años de periodo de retorno en estaciones pequeñas, medianas, grandes con losa y grandes sin losa. Además se inflató el precio por un factor que pondera la accesibilidad de la estación para llegar a un valor final de la estación de la red. La Tabla 4.1 muestra el valor de las estaciones fluviométricas perteneciente a la red Antofagasta, sumando un total de \$1.022 millones de pesos. En el **Anexo 11** se incluyen los cálculos de la estimación de los precios. Al incluir los precios de las 5 estaciones meteorológicas (2 con pluviómetro tipo disdrómetro y 3 con pluviómetro tipo *tippinbucket*, el presupuesto asciende a **\$1.094 millones de pesos**.

Tabla 4.1 Valor de las estaciones fluviométricas críticas Red Metropolitana

Código BNA	Nombre	Q T=50 (m ³ /s)	Clasificación	Factor	Precio
02104002-9	Río Loa en salida embalse Conchi	28,07	Pequeña	1.5	\$ 83.815.614
0251001-8	Río San Pedro en Cuchabrachi	71,23	Mediana	1.5	\$ 188.167.629
02110031-5	Río Loa en Angostura	61,15	Grande Con Losa	1.1	\$ 165.771.056
02105002-4	Río Salado en sifón Ayquina	168,59	Grande Con Losa	1	\$ 584.393.902
Total					\$ 1.022.148.201

Cabe decir que en la estación Río Loa en Angostura se estimó un caudal de 50 años de periodo de retorno de 61 m³/s, que se clasifica a la estación como pequeña, sin embargo el río hacia aguas arriba recibe como afluente al río Salado, con un caudal de 169 m³/s, para 50 años de periodo de retorno, por lo que se decidió clasificar a la estación como grande con losa.

4.2 Identificación de Brechas

La identificación de las brechas es un análisis de los ítems estructurales, instrumentales y/o diseño que le faltan a cada estación para alcanzar el estándar definido en la sección 13.1 del informe final.

4.2.1 Estaciones meteorológicas

La Tabla 4.2 muestra las brechas identificadas de las estaciones meteorológicas seleccionadas, en base a los antecedentes disponibles. Cabe decir que por la elevación de las estaciones El Tatio y Toconao Quebrada 1, se recomendó un pluviómetro tipo disdrómetro, usado en zonas de transición entre precipitación líquida y sólida.

Tabla 4.2 Brechas estaciones meteorológicas críticas, Región de Antofagasta

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD					
			Estación Estándar	El Tatio	Toconao Quebrada 1	Sierra Gorda	Aguas Verdes	Nueva Pajonales
1	ESTRUCTURA							
1.1	Instalación de Faena	un	1	1	0	1	1	1
1.2	Limpieza y Despeje del Terreno	un	1	1	0	1	1	1
1.3	Pollos de hormigón H-25	un	6	6	0	6	6	6
1.4	Torre Meteorológica 4 m (incluye soporte de instrumentos)	un	1	1	0	1	1	1
1.6	Pintura	un	1	1	0	1	1	1
1.7	Cerco Perimetral 3,0X3,0m	gl	1	1	0	1	1	1
1.8	Letrero de Identificación de la Estación	gl	1	1	1	1	1	1
1.9	Letrero de Peligro	gl	1	1	1	1	1	1
1.1	Letrero de Zona de inundación y Vía de Evacuación**	gl	1					
2	INSTRUMENTAL							
2.1	Plataforma Satelital (incluye transmisor + datalogger y antena)	un	1	0	0	0	1	1
2.2	Panel Solar 40W	un	1	0	0	0	1	1
2.3	Batería 55AH	un	1	0	0	0	1	1
2.4	Sensor Precipitación /Disdrómetro, con 10 m de cable	un	0	1	1	0	0	0
2.5	Pluviómetro modelo RG1(400), con 10 m de cable	un	1	0	0	1	1	1
2.6	Sensor de Temperatura y Humedad	un	1	1	1	1	1	1
2.7	Caseta tipo DGA	un	1	1	1	1	1	1

4.2.2 Estaciones fluviométricas

La Tabla 4.3 muestra las brechas identificadas en la selección de estaciones fluviométricas críticas, en base a los antecedentes disponibles. Cabe mencionar que las estaciones Río Loa en salida embalse Conchi y Río Salado en sifón Ayquina están a una altitud de alrededor de 3.000 msnm, por lo que se consideró un pluviómetro tipo disdrómetro, usado para zonas de transición. Otro aspecto por destacar es que las estaciones Río Loa en Angostura y Río San Pedro en Cuchabrachi no pudieron ser visitadas y no se cuenta con mayores antecedentes, por lo que se considera una implementación completa como estación estándar. En todos los casos se considera la reutilización del instrumental que se encuentra en buenas condiciones y cumple con el estándar requerido.

Tabla 4.3 Brechas estaciones fluviométricas críticas, Región de Antofagasta

ITEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD				
			Estación Estándar	Río Loa salida embalse Conchi	Río Salado en sifón Ayquina	Río Loa en Angostura	Río San Pedro en Cuchabrachi
1	CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURA						
1.1	Instalación de Faena	un	1	1	1	1	1
1.2	Limpieza y Despeje del Terreno	un	1	1	1	1	1
1.3	Desembanque y Encauzamiento	un	1	1	1	1	1
1.4	Enrocado de Protección	un	1	1	1	1	1
1.5	Gaviones (1,0x1,0m+fundación 1,5x0,5m)	gl	1	1	1	1	1
1.6	Construcción de Sección de Aforo	gl	1	1	1	1	1
1.7	Muros Estructurales (Ambas riberas)	gl	2	2	2	2	2
1.8	Estructura para Instalación del Sensor de Nivel	gl	1	1	1	1	1
1.9	Carro de Aforo (incluye cable, soporte, base concreto y torre para el carro)	un	1	0	0	1	1
1.10	Escalines de acceso a la regla limnimétrica	un	1	1	1	1	1
1.11	Pollos de hormigón H-25	un	5	5	5	5	5
1.12	Cerco Perimetral 3,0m x 3,0m	gl	1	1	1	1	1
1.13	Caseta DGA	un	1	0	0	1	1
1.14	Torre Meteorológica 4 m (incluye soporte de instrumentos)	un	1	0	0	1	1
1.15	Pintura General de Estructuras	gl	1	1	1	1	1
1.16	Letreros de Identificación de la Estación	gl	1	0	0	1	1
1.17	Letrero Peligro	gl	1	0	0	1	1
1.18	Letrero de Zona de inundación y Vía de Evacuación**	gl	1			1	1
2	INSTRUMENTAL						
2.1	Fluviométrica						
2.1.1	Sensor de nivel (con 10 m de cable autocompensado)	un	1	0	0	1	1
2.1.2	Regla Limnimétrica	un	1	1	1	1	1
2.2	Meteorológica						
2.2.1	Sensor Precipitación /Disdrómetro, con 10 m de cable	un	0	1	1	0	0
2.2.2	Pluviómetro modelo RG1(400), con 10 m de cable	un	1	0	0	1	1
2.2.3	Sensor de Temperatura y Humedad	un	1	0	0	1	1
2.3	Estación						
2.3.1	Batería 55AH	un	1	0	0	1	1
2.3.2	Plataforma Satelital (incluye transmisor + datalogger y antena)	un	1	0	0	1	1
2.3.3	Panel Solar 40W	un	1	0	0	1	1
3	DISEÑO						
3.1	Diseño de Estación Fluviométrica (incluye planos y memorias de cálculo)	gl	1	1	1	1	1

4.3 Evaluación de Costos

A partir de las brechas identificadas y el presupuesto de las estaciones estándar presentados en la sección 13.1, se elaboraron los costos de cada estación de la red hidrométrica crítica.

Para la evaluación de los costos de la estructura se utiliza una metodología de ponderación mediante factores que consideran la elevación y la accesibilidad a la estación. La Tabla 4.4 muestra los factores de ponderación en base a la elevación, considerando que las dificultades de construcción se agravan a una elevación mayor a los 3.000 m.s.n.m. La Tabla 4.5 muestra los factores de accesibilidad considerados, este es un criterio subjetivo, basado en las observaciones en terreno y en la opinión del Jefe Regional de Hidrología de la DGA, mientras que la Tabla 4.6 muestra los factores asociados a los caudales con periodo de retorno de 50 años en el caso de las estaciones fluviométricas.

Tabla 4.4 Factor elevación

Elevación [m.s.n.m]	Factor
0 – 3.000	1
3.000 – 5.000	1,4

Tabla 4.5 Factor de accesibilidad

Accesibilidad	Factor
Buena	1
Regular	1,1 – 1,3
Mala	1,4 – 1,6

Tabla 4.6 Factor tamaño estación

Tipo Estación	Tamaño estación	Rango caudal T=50 [m ³ /s]	Factor
1	Pequeña	> 33	0,6
2	Mediana	33-100	1
3	Grande con losa	100-200	2
4	Grande sin losa	200 >	1,5

En la Tabla 4.7 se aprecian los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 50 años, de las estaciones críticas finales de esta región.

Tabla 4.7 Caudales asociados a un periodo de retorno de 50 años

Código BNA	Nombre	Q T=50 (m³/s)	Método	Tipo
02104002-9	Río Loa en salida embalse Conchi	28,07	Análisis de Frecuencias	1
0251001-8	Río San Pedro en Cuchabrachi	71,23	Fórmula Racional	2
02110031-5	Río Loa en Angostura	61,15	Fórmula Racional	3
02105002-4	Río Salado en sifón Ayquina	168,59	Análisis de Frecuencias	3

4.3.1 Estaciones meteorológicas

La Tabla 4.8 muestra los costos de la estandarización de las estaciones meteorológicas críticas. El plan de acción de este ítem asciende a un total de \$76,9 millones de pesos.

Tabla 4.8 Costo Plan de Acción estaciones meteorológicas

ITEM	DESCRIPCIÓN	El Tatio	Toconao Quebrada 1	Sierra Gorda	Aguas Verdes	Nueva Pajonales
1	ESTRUCTURA	\$ 5.065.799	\$ 156.000	\$ 5.065.799	\$ 5.065.799	\$ 5.065.799
2	INSTRUMENTAL	\$ 3.446.000	\$ 3.446.000	\$ 3.020.000	\$ 6.381.800	\$ 6.381.800
	TOTAL NETO	\$ 8.511.799	\$ 3.602.000	\$ 8.085.799	\$ 11.447.599	\$ 11.447.599
	Factor Elevación	x 1,5	x 1,5	x 1	x 1	x 1
	Factor Accesibilidad	x 1,4	x 1,5	x 1,1	x 1,3	x 1,3
	TOTAL NETO PONDERADO	\$ 17.874.778	\$ 8.104.500	\$ 8.894.379	\$ 14.881.879	\$ 14.881.879
	IVA (19%)	\$ 3.396.208	\$ 1.539.855	\$ 1.689.932	\$ 2.827.557	\$ 2.827.557
	TOTAL	\$ 21.270.986	\$ 9.644.355	\$ 10.584.311	\$ 17.709.436	\$ 17.709.436

4.3.2 Estaciones fluviométricas

La Tabla 4.9 muestra los costos del plan de acción de las brechas de las estaciones fluviométricas identificadas en la sección anterior. El plan de acción de las estaciones fluviométricas asciende a un total de \$494,1 millones de pesos. Las estaciones Río Loa en Angostura y Río San Pedro en Cuchabrachi fueron estimadas utilizando como base la estación estándar completa, dado que no se dispone de mayores antecedentes sobre su estado.

Tabla 4.9 Costos Plan de Acción estaciones fluviométricas

ITEM	DESCRIPCION	Río Loa en embalse Conchi	Río Salado en sifón Ayquina	Río Loa en Angostura	Río San Pedro en Cuchabrachi
1	CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURA	\$ 24.462.180	\$ 24.462.180	\$ 43.370.504	\$ 43.370.504
2	INSTRUMENTAL	\$ 1.360.050	\$ 1.360.050	\$ 6.491.850	\$ 6.491.850
3	DISEÑO	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000	\$ 15.000.000
	TOTAL NETO	\$ 40.822.230	\$ 40.822.230	\$ 64.862.354	\$ 64.862.354
	Factor Elevación	x 1,4	x 1,4	x 1	x 1
	Factor Accesibilidad	x 1,3	x 1,2	x 1	x 1,6
	Factor de Tamaño	x 0,6	x 2	x 2	x 1
	TOTAL NETO PONDERADO	\$ 44.577.875	\$ 137.162.693	\$ 129.724.708	\$ 103.779.766
	IVA (19%)	\$ 8.469.796	\$ 26.060.912	\$ 24.647.695	\$ 19.718.156
	TOTAL	\$ 53.047.671	\$ 163.223.604	\$ 154.372.403	\$ 123.497.922

4.3.3 Costo total

El costo total del plan de acción de las estaciones críticas asciende a **\$571 millones de pesos**. Este monto sería utilizado para llevar a la calidad de estándar definido en el estudio a 4 estaciones fluviométricas y 4 estaciones meteorológicas y la instalación de 1 estación meteorológica nueva.

5. PLAN DE ACCIÓN RED PIEZOMÉTRICA

En el análisis de calidad, expuesto en la sección 14.3 del informe final se discuten los SHAC con limitaciones (área de restricción o zona de prohibición) y que no se encuentran monitoreados. También se analizan el comportamiento de los pozos para cruzar con los SHAC. A partir de estos análisis se propusieron pozos nuevos, así como una definición del pozo estándar y una evaluación de costos del plan total.

5.1 Identificación lugar de pozos

La red piezométrica propuesta para la región de Antofagasta consiste en mantener los pozos Estáticos que se mantienen vigentes (pozos con mediciones hasta el año 2018 y posterior), y agregar nuevos pozos en SHAC que no se encuentran monitoreados, y en puntos estratégicos donde no existe medición de niveles Estáticos.

Se considera como pozo vigente a aquellos con mediciones hasta el año 2018 y posterior, basado en que durante los años 2018 y 2021 han ocurridos eventos a nivel nacional que podrían haber impedido realizar las mediciones correspondientes (COVID-19, entre otros).

Basado en los criterios indicados anteriormente (monitoreo de acuíferos y SHAC), en la Figura 5.1 se muestran las estaciones piezométricas propuestas y las con mediciones estáticas que se mantienen vigentes. En la Tabla 5.1 se indica la cantidad de pozos propuestos en cada SHAC, las coordenadas referenciales en las que se ubican, y el tipo de limitación en el que se encuentra.

Tabla 5.1 Cantidad de pozos propuestos

ID	SHAC	Tipo de Restricción	Cantidad de Pozos Propuestos	Coordenadas Referenciales UTM WGS84	
				Este (m)	Norte (m)
1	Sierra Gorda	Zona de Prohibición	1	465.364	7.468.033
2	San Pedro Incacaliri	Zona de Prohibición	1	575.726	7.569.949
3	C2	Zona de Prohibición	1	574.072	7.372.065
4	Salar de Aguas Calientes y Laguna La Azufrera	Zona de Prohibición	1	533.285	7.227.883
5	Salar de Pajonales	Zona de Prohibición	1	518.363	7.199.448
6	Salar de Punta Negra e Imilac	Zona de Prohibición	1	508.228	7.286.443
7	Salares de Navidad y Mar Muerto	Zona de Prohibición	1	465.435	7.370.059
8	Salar de Elvira – Laguna Seca	Zona de Restricción	1	511.888	7.405.814
9	Aguas Blancas	Zona de Restricción	1	416.729	7.333.741
10	Rosario	Zona de Restricción	1	405.186	7.308.121
11	Puna de Atacama Sur	Zona de Prohibición	1	645.504	7.391.832
Total Pozos Propuestos			11		

La ubicación referencial de la red de pozos propuestos está basada en la importancia de la medición de los niveles estáticos, su utilidad a la hora de desarrollar modelos conceptuales y en modelos numéricos de aguas subterráneas.

Los principales criterios utilizados para la propuesta son:

1. Mantener los pozos que miden niveles estáticos, debido a que cuentan con un registro importante de niveles que es prioridad conservar.
2. Los acuíferos que cuentan con algún tipo de limitación en cuanto a nuevos derechos de agua, ya sea restricción o prohibición, deben tener al menos un pozo midiendo niveles estáticos.
3. La utilización del monitoreo de extracciones efectivas de pozos que no extraen caudales pero que de todas maneras reportan niveles a la DGA. Esto se propone de manera provisoria en los SHAC que se encuentran abiertos.

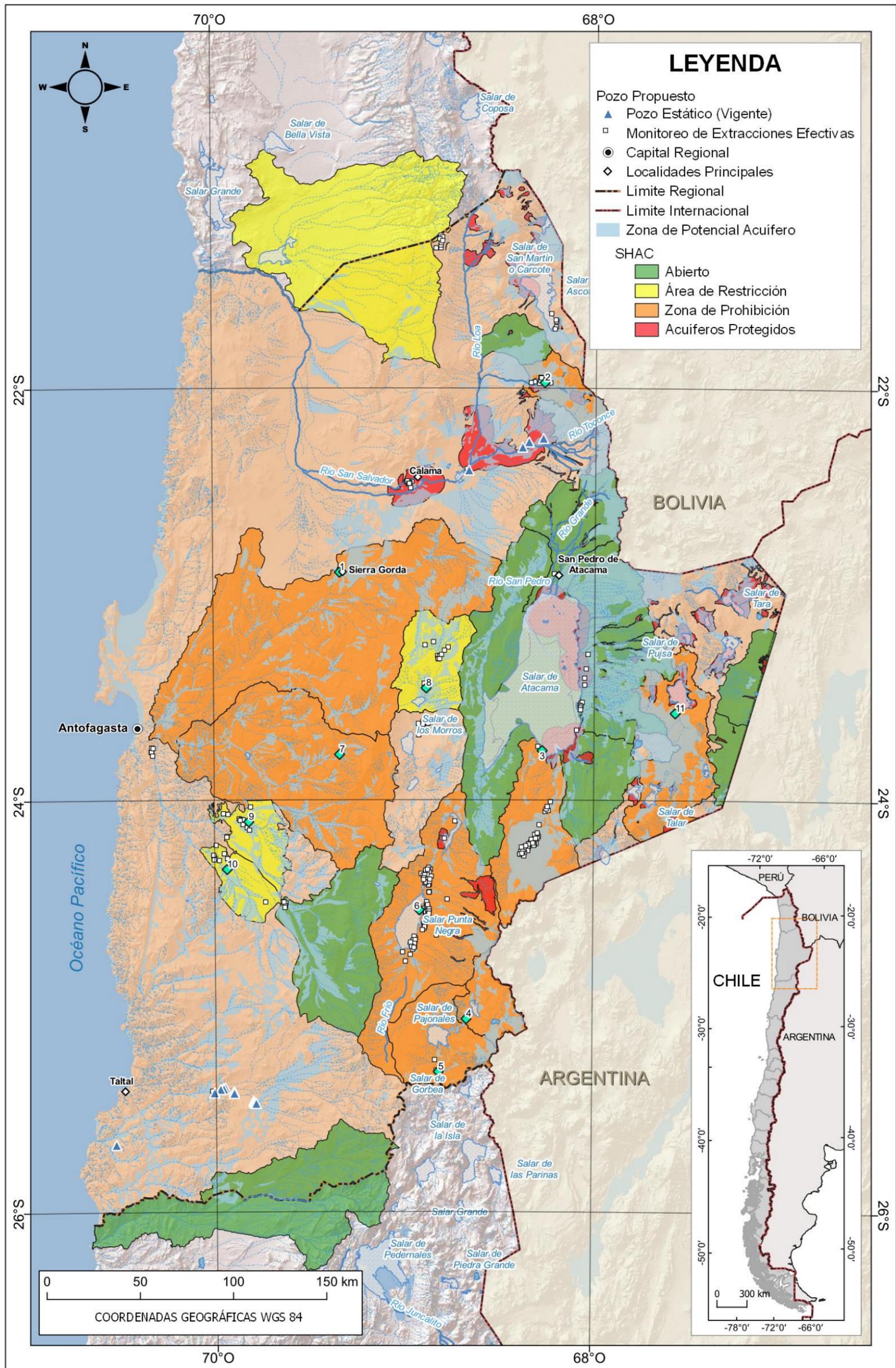


Figura 5.1 Ubicación pozos propuestos, Región de Antofagasta

5.2 Evaluación de costos

Respecto al costo monetario de un pozo de la red piezométrica estándar, este queda determinado por costos estructurales asociados a la instalación de la estación, costos de transmisión y un costo variable que queda establecido por la profundidad del sondaje.

Un pozo estándar de la red de una profundidad de 50 metros (profundidad promedio) y habilitado para la transmisión satelital de niveles tiene un costo aproximado de \$27 millones de pesos.

En una primera etapa, donde se tiene como prioridad los SHAC con algún tipo de limitación, se propone la construcción de 11 pozos de monitoreo. Para lo anterior se requiere 550 metros lineales de sondaje, los cuales serán repartidos entre las 11 estaciones, procurando llegar al nivel freático actual y que permita medir el nivel freático a futuro (se ha experimentado un descenso en la región).

El costo de perforación alcanza los \$160 millones de pesos, y el costo de la red completa habilitada para la transmisión tiene un costo aproximado de \$330 millones de pesos para la región de Antofagasta, sumando un total estimado de **\$490 millones de pesos**.

6. CONCLUSIONES

6.1 Disponibilidad de datos

Las estaciones críticas fluviométricas seleccionadas poseen sobre 40 años de estadística, lo que se considera bueno, excepto la estación río Loa en Angostura, que sólo tiene 3 años. En cuanto a su vigencia solo 2 se encuentran vigentes, río Loa antes represa Lequena y río Loa en salida embalse Conchi. La cuenca del río Salado queda sin monitoreo y tampoco el río San Pedro. Existen dos estaciones que se consideran de cierre, río San Pedro en Cuchabrachi y río Loa en Angostura. Estas últimas estaciones son de vital importancia ya que la primera es la única que existe en el río San Pedro y está ubicada a una distancia tal que genera una muy buena alerta sobre crecidas potenciales que podrían afectar a la localidad de San Pedro de Atacama, y la segunda es la última que está a una buena distancia para generar una alerta de crecida que podría afectar a la ciudad de Calama.

Las estaciones críticas meteorológicas seleccionadas actúan como un complemento de las fluviométricas, es decir, donde no existan estaciones fluviométricas se selecciona una estación meteorológica que pueda, en base a observaciones de precipitaciones, generar una alerta de crecida importante. Las estaciones Sierra Gorda y Aguas Verdes tienen más de 20 años de estadística y se encuentran vigentes, mientras que la estación Toconao Quebrada 1 no tiene años válidos de estadística y no tiene datos en los últimos dos años. Esta última estación es importante pues está en la parte alta de la cuenca aportante al Salar de Atacama y generaría una alerta de crecidas que podrían afectar a localidades como Toconao y Peine, además de las faenas mineras que existen por el sector.

6.2 Eventos extremos

Las estaciones fluviométricas críticas seleccionadas han registrado gran cantidad de estadística y dentro de ella varios eventos extremos. En los gráficos de caudales y alturas máximas es posible observar la magnitud de las crecidas, donde en las últimas dos décadas existen alrededor de 3 eventos que sobresalen con respecto a los otros, además se ve la importancia de tener todas las estaciones vigentes y por sobre todo las que son

de cierre, que estarían aguas arriba de poblaciones importantes, como lo son las estaciones río Loa en Angostura y río San Pedro en Cuchabrachi.

En cuanto a las estaciones meteorológicas no se observa una buena correlación entre la precipitación registrada y los caudales de las estaciones fluviométricas. Pero en zonas sin control fluviométrico se vuelve una información de vital importancia ya que da una estimación de la posible crecida que afectaría a población vulnerable aguas abajo. Las estaciones meteorológicas críticas seleccionadas cumplen con la condición de estar en zonas sin control fluviométrico y han registrado eventos importantes, como la precipitación de 52 mm registrada en la estación Aguas Verdes en 2015 que provocó una crecida que afectó a Taltal.

6.3 Distribución espacial

La zona con mayor cantidad de precipitaciones tiene una mejor densidad de estaciones fluviométricas y meteorológicas. Por otro lado, la zona sur de la región donde llueve menos no tiene control fluviométrico y tiene una densidad de estaciones meteorológicas tal que la estación Aguas Verdes es la única para un área de 13.000 km². Es por este motivo que se recomienda agregar una estación meteorológica en la zona sur de la región, que esté en el área de cabecera de las quebradas Taltal y La Negra.

6.4 Red Hidrométrica Final

A partir de los análisis expuestos, la red hidrométrica crítica final consta de 4 estaciones fluviométricas, 4 estaciones meteorológicas existentes, 1 estación meteorológica nueva y 2 estaciones de apoyo. La red lograría alertar localidades de los sectores cordilleranos y precordilleranos de la región, con un total de 205.115 habitantes, susceptibles a eventos hidrometeorológicos extremos. La red de esta región se ha visto constantemente afectada por crecidas que suben su caudal súbitamente, dejando en muchas ocasiones las estaciones fuera de operación. Es necesario mejoras estructurales y de algunos equipos, estimadas en \$571 millones de pesos, para llevar a la red hidrométrica crítica a la condición de estándar. La red hidrométrica crítica final se compone de las siguientes estaciones.

- Estaciones fluviométricas
 - Río Loa en salida embalse Conchi

- Río Salado en sifón Ayquina
- Río Loa en Angostura
- Río San Pedro en Cuchabrachi
- Estaciones meteorológicas
 - El Tatio
 - Sierra Gorda
 - Toconao Quebrada 1
 - Aguas Verdes
- Estación meteorológica nueva
 - Camino a salar de Pajonales
- Estaciones de apoyo
 - Río Loa antes represa Lequena
 - Río Salado antes junta Curti

6.5 Red Piezométrica

La red piezométrica en la región de Antofagasta presenta un total de 32 estaciones piezométricas, de las cuales solo dos se encuentran en SHAC definidos por la DGA. La calidad de la información presentada en dichos acuíferos por las estaciones se considera alta, debido a que casi la totalidad corresponde a pozos estáticos.

Respecto a los SHAC, algunos están en condición crítica, es decir, están clasificados como área de restricción o zona de prohibición, y además no cuentan con el monitoreo de estaciones piezométricas DGA, los que corresponden a:

SHAC en área de restricción:

- Salar de Llamara
- Salar de Elvira – Laguna Seca
- Aguas Blancas
- Rosario

SHAC ubicados en zona de prohibición:

- Sierra Gorda
- Salares de Navidad y Mar Muerto
- Puna de Atacama Sur
- C2 (Salar de Atacama)

- San Pedro Inacaliri
- Salar de Aguas Calientes y Laguna La azufrera
- Salar de Pajonales

Estos SHAC tienen problemas de disponibilidad del recurso hídrico, ya sea por falta de oferta, por sobredemanda o protección ambiental, por lo que para tener una idea más acabada de la situación particular se recomienda la instalación de estaciones piezométricas. En base a lo mismo se sugiere la construcción de pozos que pudiesen reemplazar a los pozos estáticos que ya no cuentan con medición (considerar que constructivamente sean lo más similar posible a dichos pozos ya no monitoreados, siempre y cuando la profundidad permita medir los niveles estáticos), con el fin de rescatar y continuar con la estadística ya medida.