



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**SISTEMAS DE MONITOREO DE AGUAS: ANÁLISIS Y PROPUESTAS PARA LA
RED NACIONAL**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

CARLOS IGNACIO GONZÁLEZ AZÚA

PROFESORA GUÍA:
LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SANDRA CÉSPEDES UMAÑA
MATIAS TAUCARE TORO

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto Fondef ID19I-10363

SANTIAGO DE CHILE

2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: GEÓLOGO
POR: CARLOS IGNACIO GONZÁLEZ AZÚA
FECHA: 2023
PROFESORA GUÍA: LINDA DANIELE

SISTEMAS DE MONITOREO DE AGUAS: ANÁLISIS Y PROPUESTAS PARA LA RED NACIONAL

El uso del agua es un tema de gran relevancia mundial y Chile no es la excepción ya que desde el año 2010 está atravesando una severa y prolongada sequía (Garreaud et al., 2015). Para planificar una correcta gestión de los recursos hídricos, sobre todo en contextos de escasez, el monitoreo se torna una herramienta fundamental para la toma de decisiones que permitan un adecuado desarrollo socioeconómico mientras aseguren la sustentabilidad de estos preciosos recursos.

La diversa geografía, así como la variabilidad climática que caracteriza a Chile, sugiere la necesidad de un monitoreo continuo que ayude a establecer los procesos hidrológicos, y la variabilidad espacial y temporal de estos, al fin de disponer de estimaciones exactas para el adecuado control de los recursos hídricos.

Sin embargo, no es una tarea simple plantear un cambio general y completo de la red de monitoreo nacional. Existen dificultades técnicas (e.g. acceso, mantenimiento, transferencia de datos) que se tornan económicas, lo que hace difícil implementar el cambio. Aunque cuando se plantea una red simple es necesaria instrumentación especializada. que permita estudiar los distintos parámetros (ej. temperatura, pH, turbidez, caudales, niveles etc. etc.). Además, es necesario considerar el costo de la tecnología de redes para la transmisión oportuna de los datos. Esto limita el uso masivo de estos sistemas, especialmente en países como Chile, con un gran territorio por controlar y con exiguos fondos para poder implementar estos sistemas. Esta ausencia afecta directamente a la gestión de los recursos hídricos e inhabilita las oportunas y correctas toma de decisiones para una gestión integrada sustentable.

Para intentar reducir esta brecha, investigadoras de los Departamentos de Ingeniería Eléctrica y de Geología de la Universidad de Chile han trabajado para lograr un prototipo de sensores de bajo costo (Fondef ID19I-10363). El objetivo general del proyecto es evaluar sensores con precisión y sensibilidad similar a la de sensores comerciales para contribuir a la masificación de redes de monitoreo continuo necesarias para Chile, y otros países.

El presente trabajo contribuye al proyecto con un análisis del mercado y con una propuesta de monitoreo para una cuenca que evidencia las ventajas del uso del prototipo de sonda.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la profesora Linda Daniele, mi profesora guía, por darme la oportunidad de llevar a cabo este estudio, por todo lo que aprendí, por confiar en mí en todas las oportunidades laborales que gracias a ella conseguí y por todo el apoyo que me brindó en tiempos difíciles durante la cuarentena, así como también agradezco a la Dra. Sandra Céspedes por la oportunidad de participar en el proyecto y por la revisión de este trabajo.

Le agradezco de igual forma al Dr. Matías Taucare, por su siempre buena disposición a ayudarme en todo momento. A mis amigos, rivales de Magic y hermanos del colegio, Rodrigo y Manuel con quienes he compartido desde hace mucho tiempo, hasta el día de hoy, y por un montón de años más, les agradezco el cariño, el apoyo, la confianza, y todos los buenos y malos momentos en los que hemos estado juntos. A los amigos que hice a lo largo de mi estancia en la facultad en especial a mis compañeros de Geología que se convirtieron en mis mejores amigos y compañeros de trabajo a pesar de todas las diferencias soy un agradecido de haberlos conocido a todos: Pili, Keno, Jose(Abuelo), Ale(Simio), Juan, Juanma, Kim, Migue, Titi, Lore, Vicho, Rodri, Tommy, Javi Joti, Vane y a todo el resto de las hermosas personas que logré conocer en el departamento les doy las gracias por todos los buenos momentos fuera y dentro de la U, sus partidas legendarias de age, gatitos explosivos, catan, código secreto, etc.

Agradezco a mi familia: mis padres, mi hermano Gabriel, a Hoppy y Nala mis regalonas peluditas y a mi pareja Geraldine quienes me apoyaron en todo momento durante mi última etapa de mi vida universitaria. Y, por último, quiero recalcar mis agradecimientos a mi mamá Adriana a quien dedico este trabajo, por convertirme en quien soy, por el magno esfuerzo que fue para ella privilegiar mi educación y bienestar por sobre todo en su vida, te amo mamá.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
2. METODOLOGÍA	5
2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	5
2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	5
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 MONITOREO Y CALIDAD DE AGUAS	6
3.1.1 MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	10
3.1.2 MONITOREO DE AGUAS SUPERFICIALES	11
3.2 EL MONITOREO DE AGUAS EN CHILE	11
3.4 CONTEXTO INTERNACIONAL DE MONITOREOS	15
3.5 SENSORES	23
3.5.1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS	23
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	23
TURBIEDAD	23
CAUDAL	24
3.5.2 TIPOS DE SENSORES	24
SENSOR DE PH	25
SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	26
SENSOR DE TEMPERATURA	27
SENSOR DE OXÍGENO DISUELTO	27
4. RESULTADOS	30
4.1 ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE MONITOREO	30
4.2 COMPARATIVA DE CHILE CON RESPECTO A OTROS PAÍSES	32
4.3 AVANCES DEL PROTOTIPO FONDEF ID19I-10363	36
4.4 FUNCIONAMIENTO PROTOTIPO DE SONDA FONDEF ID19I-10363	41
4.6 EVALUACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES DE BAJO COSTO EN CUENCA HIDROGRAFICA	47

5. DISCUSIONES	50
5.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO	Error! Bookmark not defined.
5.2 COMPARATIVA DEL ESTADO DE MONITOREO CHILENO CON RESPECTO A OTROS PAÍSES.	52
5.3 AVANCES DEL PROTOTIPO DE SONDA.....	52
5.4 RESULTADOS DEL PROTOTIPO DE SONDA	53
5.5 COMPARATIVA DE ESPECIFICACIONES Y EVALUACIÓN DE COSTOS ...	54
6. PROYECCIONES A FUTURO	55
7. CONCLUSIONES	58
8. BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXOS: FICHAS TÉCNICAS DE SENSORES EN EL MERCADO.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Entradas y salidas del sistema experto.	4
Figura 3-1: Ejemplos de sensores de medición de calidad de agua	8
Figura 3-2: Sonda Multiparámetro (pH / ISE / CE / OD / Turbidez) con Capacidad de Registro Autónomo para HI9829 - HI7629829.	8
Figura 3-3: Estaciones de monitoreo de la calidad del agua y aguas continentales chilenas de un vistazo.	14
Figura 3-4: Portal web del Sistema Nacional de Información Hídrica del Ministerio de Obras Públicas de Argentina	19
Figura 3-5: Portal web de Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas de Brasil	20
Figura 3-6: Portal web de United States Geological Survey (USGS) de Estados Unidos	21
Figura 3-7: Sensores de pH.	25
Figura 3-8: Sensores de conductividad eléctrica.	26
Figura 3-9: Sensores de temperatura.	27
Figura 3-10: Sensores Galvánicos de Oxígeno disuelto.	28
Figura 3-11: Sensores Polarográficos de Oxígeno Disuelto.	28
Figura 3-12: Sensores Ópticos de Oxígeno Disuelto.	29
Figura 4-1: Distribución de red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA y descripción general de las cuatro macrozonas definidas por la DGA	31
Figura 4-2: Mapa de estaciones de calidad de agua y pozos DGA en Chile.	35
Figura 4-3: Prototipo inicial.	36
Figura 4-4: Modelamiento 3D de los compuestos de la sonda	37
Figura 4-5: Modelado 3D del diseño final del prototipo	37
Figura 4-6: Pruebas digitales de esfuerzo	38
Figura 4-7: Primeras pruebas reales de inmersión de la carcasa.	39
Figura 4-8: Primera prueba en terreno de la sonda completa	39
Figura 4-9: Diseño 3D de la placa electrónica de la sonda.	40
Figura 4-10: Diseño final de la carcasa del prototipo.	40
Figura 4-11: Gráfico de resultados de medición de conductividad eléctrica.	41
Figura 4-12: Gráfico de resultados de pH.	42
Figura 4-13: Pruebas análogas con sensores disponibles en el mercado.	42
Figura 4-14: Gráfico de Conductividad eléctrica de multiparámetro HACH HQ40d	43
Figura 4-15: Gráfico de Conductividad eléctrica de sonda LTC Solinst.	44
Figura 4-16: Distribución espacial de estaciones de calidad de agua en Cuenca del Río Maipo	47
Figura 6-1: Enfoque propuesto para la toma de decisiones y políticas públicas orientadas a mejorar y proteger la calidad del agua	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de estado de monitoreo subterráneo en países latinoamericanos	17
Tabla 2: Situación del monitoreo de las aguas en América Latina.	32
Tabla 3: Características de las redes de monitoreo.	33
Tabla 4: Especificaciones y costos de sensores comerciales.	45
Tabla 5: Umbrales de medición de sensores prototipo.	46
Tabla 6: Costos de equipos Van Essen	48
Tabla 7: Costos de implementar prototipo de sonda	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El agua dulce representa menos del 1% del volumen total de agua de la Tierra, pero ese pequeño porcentaje brinda numerosos casi todos los servicios que son fundamentales para la vida y el desarrollo sostenible. La capacidad de los ecosistemas para asimilar los desechos está rebasando sus límites (Liu et al., 2012) debido al crecimiento de la población mundial, y al aumento de las actividades socioeconómicas (Wada et al., 2016).

. Las sequías y los eventos extremos son siempre más frecuentes a nivel global. Este nuevo escenario global revela la necesidad de ampliar el conocimiento que se tiene con respecto a los diversos sistemas hídricos superficiales y subterráneos. Esto sumado al impacto humano directo sobre las fuentes de agua, e indirectamente con el cambio climático ha significado un cambio notable del recurso hídrico tanto en cantidad como en calidad. La gestión del agua aún requiere de grandes esfuerzos para lograr un desarrollo en armonía con los recursos que necesitamos y utilizamos. Alcanzar los objetivos del desarrollo sustentable necesita un profundo conocimiento del medio ambiente para aspirar a un uso sustentable de los recursos que permita asegurar su disponibilidad para todos los seres vivos, en la actualidad y en el futuro.

Un elemento de relevancia para avanzar en el conocimiento de los sistemas naturales es disponer de datos que permitan un seguimiento y control continuo de los cambios que van ocurriendo en los mismos. En esta tarea de control y seguimiento en continuo, Chile aún está al debe. La mayor parte de los puntos de monitoreo de las aguas nacionales, especialmente las subterráneas, se realiza aún de manera intermitente y aún no puede emplearse de manera robusta como insumos para la toma de decisiones relativas a la disponibilidad y calidad del agua.

A nivel nacional, según el *World Resource Institute*, Chile es el país con mayor escasez de agua en América para el año 2040 (Maddocks A., 2015), y desde el año 2010 Chile central enfrenta una prolongada y severa sequía (Garreaud et al., 2017) que ha llevado a una reducción de los caudales superficiales y que ha contribuido a generar una evidente sobreexplotación de los acuíferos, iniciada en realidad décadas antes (Taucare et al., 2024).

La implementación de un sistema de monitoreo en continuo presenta numerosos desafíos tanto de tipo técnico como económico. Algunas de las dificultades técnicas en Chile pueden considerarse asociadas al mismo territorio debido a su extensión y topografía que dificultan la instalación de los sensores y la transmisión de los datos, por ejemplo. Estos y otros desafíos técnicos contribuyen a incrementar las dificultades económicas para la creación de sistemas continuos de monitoreo. Estas empiezan con el hecho que la instrumentación especializada necesaria para el estudio de los distintos parámetros tiene valores elevados y, adicionalmente para el caso de Chile, al ser producidos fuera del país, éstos deben ser importados lo cual se traduce en un

incremento del costo. A esto hay que sumar eventuales sistemas para el envío instantáneo de los datos.

Históricamente, las muestras discretas son analizadas periódicamente utilizando instrumentos que permiten la medición *in situ* o recolectando muestras que serán analizadas en laboratorios. Sin embargo, el retraso en la obtención de los resultados de las pruebas, combinado con los problemas de obtención de muestras representativas (la dificultad de capturar siempre eventos específicos) y la integridad de la muestra, pueden limitar y generar distorsiones en el conocimiento de los sistemas naturales en estudio y entorpecer la toma de decisiones al no poder disponer de informaciones detallada en los tiempos adecuados.

La instalación de instrumentación continua con transmisión de datos online tiene muchas ventajas. Por ejemplo, mediciones de turbidez permiten tomar decisiones sobre cómo y si entregar el suministro en función de los valores de tendencias medidos proporcionando así una comprensión más detallada necesaria para mejorar la interpretación de los eventos observados.

En definitiva, los sistemas de monitoreo en continuo de la calidad del agua registran con una elevada precisión temporal posibles cambios en la calidad y cantidad del agua a medida que estos ocurren. Sin embargo, si la información no es analizada y transmitida en tiempo real no se puede considerar un insumo adecuado para alertas tempranas y toma de decisión.

Con esta motivación y sumado a que hasta la fecha las mediciones de sensores de bajo costo pueden ser poco fiable a la hora de certificar la calidad del agua (Xavier, F et al., 2022), el proyecto Fondef ID19I-10363 ejecutado en el departamento de ingeniería Eléctrica y de Geología de la Universidad de Chile, ha tenido como objetivo analizar y evaluar configuraciones de sensores de código abierto para lograr un prototipo para medir parámetros relevantes en las aguas. Estos están asociados a la calidad (CE, T, pH y turbidez), y a la cantidad (variaciones de presión) de las aguas, con un costo menor del ofrecido en el mercado. De esta forma se dispondrá de sensores con precisión y sensibilidad similar a los disponibles en el mercado para poder desarrollar en tiempos más cortos estas redes de monitoreo tan necesaria para Chile.

El presente trabajo pretende ha contribuido al proyecto generar un análisis comparativo de los principales sensores para el monitoreo de los mismos parámetros considerados en el proyecto. Igualmente se han considerado los varios sensores utilizados en el proyecto Fondef ID19I-10363 para el desarrollo del prototipo, así como las implicancias que posee para el monitoreo actual a nivel nacional.

1.2 OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos tanto general como específicos de este estudio:

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Considerando todo lo anteriormente expuesto, esta memoria de Título enfrenta el desafío del monitoreo continuo en Chile, y tiene como objetivo general analizar los sensores disponibles en el mercado, el estado actual del monitoreo de agua nacional y evaluar la posible implementación de nuevos sensores de monitoreo continuo considerando ventajas e inconvenientes de las soluciones disponibles.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este estudio se detallan a continuación:

- Análisis del estado del arte de la instrumentación disponible en el mercado para definir mejoras en el monitoreo nacional.
- Comparación con el desarrollo de pruebas en sensores de bajo costo y del mercado a fin de definir si son reemplazos viables en el monitoreo nacional.
- Elaborar una propuesta de instrumentar una cuenca con los sensores disponibles en el mercado y los de bajo costo.

1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Una Red de Monitoreo de la Calidad del Agua se define como la adquisición de información sobre sustancias químicas, biológicas y características físicas de un cuerpo de agua a lo largo del tiempo y espacio (Destandau et al., 2020). Es necesario considerar la calidad de las aguas subterráneas para sus diferentes usos, agua potable, ecosistemas, alimentos (riego), la producción de energía y otras industrias.

Para poder mejorar el monitoreo del agua, se plantea como hipótesis que es posible mejorar las redes de monitoreo generando información en continuo mediante el uso de sensores de bajo costes que sean capaces de entregar datos fidedignos y útiles para la gestión del agua y la toma de decisión. Para comprobar esta hipótesis en el marco del proyecto Fondef ID19I-10363 se han probado varios sensores que miden las siguientes propiedades CE, T, pH, etc. Para determinar la mejor configuración de medición y transmisión de datos a un precio no superior a 500 USD, de esta forma puede hacer un análisis e interpretación de los datos de mejor manera a través de una plataforma de código abierto que se ajuste a las necesidades del usuario.

En la Figura 1-1 se observa el conjunto de variables medidas acopladas a un sistema experto que procesa datos en tiempo real para entregar alertas o avisos útiles para la gestión ya que estos permiten a los usuarios tomar acciones y decidir cómo responder a las eventuales anomalías detectadas.

La búsqueda de abaratar al máximo los costos viene de la necesidad de generar una red bien estructurada de sensores que permitan establecer mejores caracterizaciones de las distintas zonas de estudio ya que al ser de bajo costo facilitarán la compra a para más usuarios.



Figura 1-1: Entradas y salidas del sistema experto.
Fuente: Formulación del proyecto Fondef ID19I10363 (2019)

2. METODOLOGÍA

Esta memoria se desarrolló durante el periodo de pandemia por COVID-19 y se basa fundamentalmente en trabajo bibliográfico, y posteriormente un análisis detallado del mercado, de los sensores en desarrollo y la implementación de una propuesta para mejorar el monitoreo en una cuenca de Chile.

2.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Para la realización de este estudio, se efectuó una revisión bibliográfica del estado del arte relativo a la instrumentación de medición en continuo de los parámetros mencionados en los párrafos anteriores. Se evaluó la tecnología, valores en el mercado y necesidades en las mediciones actuales. Igualmente se analizó el estado del monitoreo en Chile y en otros países. Esto permite a través del estudio, asesoramiento y evaluación de los dispositivos entender como el monitoreo nacional se beneficiaría al tener dispositivos de menor costo que el de mercado. Es por esto por lo que se ha realizado un exhaustivo análisis del mercado internacional de los instrumentos de medición en continuo.

Cabe destacar que en el marco del proyecto FONDEF se prueban los distintos prototipos de sensores y se monitorean bajo condiciones conocidas, en un ambiente controlado, al cual se le generan perturbaciones puntuales, con el fin probar la sensibilidad, precisión y exactitud de estos en la recopilación de datos. En el mismo proyecto se realizaron diferentes pruebas para diseñar una carcasa estanca que pueda ser sumergida a distintas profundidades sin infiltraciones.

2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados comprende un recorrido por el estado del monitoreo en Chile, la comparación de los sensores comerciales y una descripción de algunos de los datos obtenidos en el marco del presente proyecto utilizando los sensores de código abierto.

Por último, realizar una evaluación de los costos asociados a la implementación de un monitoreo continuo con ambos grupos de sensores en una cuenca hidrográfica para comparar los costos y discutir la posibilidad de implementación en la red de monitoreo nacional.

3. MARCO TEÓRICO

El marco teórico de este estudio considera los parámetros que se pretende medir con la implementación del prototipo de sensor, la definición del monitoreo de agua superficial y subterránea, y la situación del monitoreo en Chile con respecto a algunos países de Latinoamérica y desarrollados.

3.1 MONITOREO Y CALIDAD DE AGUAS

La calidad de un recurso hídrico es el conjunto de sus características físicas, químicas, composición y estado de los organismos que habitan en él (Chapman, 1996). En general, se define de acuerdo con su uso potencial comparando estas características con valores legales que incorporan los países cuando se tienen datos sobre los efectos potencialmente adversos que se consideran requisitos para asegurar su uso correcto (De León, 2011). Los sistemas acuáticos ejercen diversos servicios ecosistémicos, destacándose el abastecimiento de agua potable, riego, consumo animal, recreación y purificación de las aguas. La mala gestión de los sistemas hídricos y el constante incremento de la población son factores que afectan en la calidad de las aguas, además se debe considerar que el agua es un recurso finito que debe satisfacer las necesidades de todos. Por tanto, la calidad del agua es un componente fundamental de la calidad ambiental incidiendo en sus distintas dimensiones, biofísica, social y económica.

Dada la dependencia de los seres vivos con respecto a un suministro de agua de buena calidad para la supervivencia, realización de actividades, producción de alimentos, etc. Se hace necesario el tener información con respecto a la calidad de las aguas, por lo que realizar un monitoreo de calidad de agua es muy importante para mantener el bienestar de un ecosistema y el sustento de la población. Un monitoreo puede definirse como *“la medición sistemática de variables y procesos a través del tiempo”* (Spellerberg, 2005). En particular, un monitoreo de calidad de agua es un estudio del agua que se realiza con el objetivo de conocer las fluctuaciones en determinados parámetros fisicoquímicos y biológicos y analizar si sus características son aptas para recreación, potabilización y/o protección de la vida acuática (Chapman, 1996). Proporciona información básica sobre la variabilidad temporal y espacial de la calidad del agua.

El monitoreo puede llevarse a cabo de forma continua o puntual; la selección de los sitios y la frecuencia dependerá de los objetivos, ya sea para responder preguntas específicas o en función de las necesidades. Actualmente muchos sistemas de monitoreo tienen como objetivo determinar la calidad de los sistemas acuáticos en base a la condición de su área de drenaje. Esto se debe a que se reconocen los impactos de las actividades realizadas en las cuencas de drenaje sobre el agua que drena.

Dentro del monitoreo de aguas se tiene la etapa de muestreo, el cual consiste en la observación de un grupo de elementos que se consideran representativos de un universo mayor. Es una etapa crítica para la obtención de resultados confiables; el valor de los datos depende de un correcto diseño y procedimiento de muestreo. Si se pretende determinar el efecto de una contaminación puntual, como la generada por una industria,

se tomarán muestras aguas arriba y aguas abajo del sitio donde se produjo el impacto. El sitio aguas arriba funciona como control, en el que no se prevé ningún impacto, de manera que pueda ser utilizado para contrastar su estado con el del sitio impactado aguas abajo. Este diseño de estudio de impacto ambiental se conoce como BACI (Before/After-Control/Impact o en español: Antes/Después-Control/Impacto) (Underwood, 1992). Si se evalúa una actividad que varía en el tiempo, la frecuencia del monitoreo deberá considerar tiempos que se correspondan con dicha variación. En este caso también deben monitorearse sistemas de control.

A finales del siglo XX, el sistema tradicional para el monitoreo de agua se hacía a través de la recolección de muestras de agua provenientes de ríos o lagos, luego eran llevadas a los correspondientes laboratorios para hacer el análisis de calidad de agua. Los mayores inconvenientes de dicho sistema están asociados al hecho que entre los varios muestreos no se dispone de información que podría ser útil para entender eventuales cambios y el alto costo asociado al conjunto toma y análisis de muestras. Esto casi siempre llevaba a reducir el tamaño muestral por lo cual los resultados obtenidos eran en general pocos y/o centrados en determinadas áreas. Gracias al monitoreo de aguas es posible:

- Caracterizar la calidad e identificar los cambios o tendencias en el tiempo.
- Identificar los problemas de calidad específicos existentes o emergentes.
- Reunir información para diseñar programas específicos de prevención o remediación de la contaminación.
- Determinar si las metas de un programa de reducción de la contaminación como el cumplimiento de los reglamentos o la implementación de acciones efectivas de control de la contaminación- se están cumpliendo o están siendo efectivas.
- Preparar y responder a situaciones de emergencia, por desastres naturales o antrópicos, tales como inundaciones y derrames.

Otro componente importante en el monitoreo de aguas tanto superficial como subterráneo es el uso de sondas para medir diferentes parámetros de la calidad de agua (Figura 3-1). Estos son dispositivos que se colocan en contacto directo con el agua a monitorear, así que, en monitoreos de aguas subterráneas, los sensores se emplazan dentro de pozos habilitados para este fin. De esta forma se logra captar información de los distintos parámetros fisicoquímicos que se desea estudiar.

Cabe destacar que cada sensor está construido para detectar y transmitir información con respecto a 1 parámetro, por lo que se construyen sondas multiparamétricas las cuales contienen los distintos sensores para realizar las mediciones deseadas, aunque en términos prácticos se suele llamar como sensor al dispositivo que reúne estos sensores.



Figura 3-1: Ejemplos de sensores de medición de calidad de agua
Fuente: Sitio web www.grupoalava.com

Debido al alto costo de estos dispositivos es necesario evaluar previamente los objetivos de cada monitoreo a realizar, y fijar los parámetros fisicoquímicos que deben medirse, con el fin de establecer la instrumentación adecuada, evitando así exceder los gastos asociados al estudio, por lo que es de suma importancia elegir la instrumentación adecuada en función de los objetivos.

En la Figura 3-2 se observa un ejemplo de sonda multiparamétrica presente en el mercado cuyo valor alcanza los 2.200 USD aproximadamente.



Figura 3-2: Sonda Multiparámetro (pH / ISE / CE / OD / Turbidez) con Capacidad de Registro Autónomo para HI9829
- HI7629829.

Fuente: www.hannachile.com

Dentro de los usos para los cuales se puede utilizar la información recopilada por sensores, se encuentra la toma de decisiones en el marco de la gestión de los recursos hídricos. Algunas de ellas están asociadas con:

- Identificar el cumplimiento de los requisitos normativos y legales de la calidad del agua.
- Identificar la calidad del agua para usuarios críticos (por ejemplo, en industrias que requieren una determinada composición química para los procesos).
- Verificar la calidad del agua para la realización de un estudio.
- Implementar un sistema de alerta de contaminación (CWS).

Las condiciones químicas, físicas y biológicas del agua forman su calidad y determinan su uso. Estas características pueden afectar de manera relevante a la gestión y finalmente a los usuarios que dependen del agua. Dentro de todos los posibles parámetros a monitorear para evaluar la calidad y los posibles cambios, es crucial considerar los siguientes; conductividad, pH, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, cloro y la turbidez residual.

3.1.1 MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea es el término general utilizado para describir el agua que ha penetrado la superficie de la tierra y se almacena en lo que se conoce como acuífero. Al nivel del agua subterránea se le conoce como nivel freático o nivel piezométrico, el cual puede ser monitoreado por instrumentos especializados, por lo general estas mediciones para la ejecución de algún estudio y/o proyecto se efectúan dentro de los llamados pozos de monitoreo. Los pozos de monitoreo son pozos con un pequeño diámetro que son perforados en el suelo, que se utilizan para el monitoreo de nivel del agua subterránea y el análisis de la calidad del agua.

Los acuíferos son un cuerpo de roca o sedimentos con cierta porosidad los cuales están saturados de agua subterránea, la cual puede provenir de; la infiltración directa provocada por precipitaciones, recargas laterales provenientes de cuencas aledañas, por efectos antropogénicos, etc. Los acuíferos, el nivel freático de un acuífero no posee un nivel superior horizontal, debido a la diferencia de permeabilidad del suelo circundante, lo que complica la medición del nivel dentro del depósito subterráneo.

Un piezómetro consiste en una perforación de diámetro pequeño cuyo diseño permite observar los flujos subterráneos de un determinado acuífero. El agua subirá y bajará en el tubo siguiendo las variaciones del nivel del agua subterránea permitiendo así relevar los cambios que ocurren en el tiempo debido a presiones naturales (variaciones estacionales, el efecto de la precipitación y recarga), y antrópicas que están principalmente asociadas a la extracción de agua. La variación, se mide generalmente usando un transductor de presión sumergible cuyo rango y capacidad de registro permite obtener información durante largos períodos de tiempo con intervalos temporales muy acotados. Normalmente al sensor de presión sumergido le acompaña otro sensor que registra la presión atmosférica que permite generar una diferencia de presión de la columna de agua por sobre el sensor.

Establecer redes de monitoreo en los acuíferos permite delinear, además, las direcciones generales del flujo en los sistemas estudiados. Además de la cartografía de los recursos de agua subterránea, el pozo de monitoreo también juega un papel importante en el monitoreo de los efectos de la contaminación del agua subterránea. Por otro lado, los pozos de monitoreo se utilizan para la realización de ensayos y observación

del comportamiento de un acuífero, que a su vez permiten la obtención de los distintos parámetros hidráulicos del área de interés.

En definitiva, los piezómetros son una herramienta clave para controlar y visualizar los cambios de almacenamiento y de las direcciones del flujo de agua subterránea. Igualmente representan una herramienta para asegurar también la calidad del agua ya que al sensor de nivel se pueden añadir otros sensores que permitan el control de parámetros fisicoquímicos básicos que dan cuenta de los posibles usos del agua. Para la caracterización de un cuerpo de agua subterránea es fundamental el dato del nivel piezométrico, por lo que es un componente central en cualquier estudio.

Para la medición de los distintos parámetros fisicoquímicos como la temperatura, el pH, la turbidez, y la conductividad eléctrica, se instala una sonda multiparámetro con sensores que miden cada parámetro por separado y compilan la información a través de un data logger, que almacena estos datos, y en algunos casos para luego transmitirlos a una plataforma que analiza y gestiona la información.

El monitoreo mediante sensores se basa en 2 factores; la frecuencia en la que el sensor registra el dato y la frecuencia en la que estos datos son transmitidos. Un sensor puede programarse para generar registros a escala de segundos hasta escala de días, según sea necesario. Mientras que la transmisión de los datos puede ser hecha de forma manual por personal que se dirija y extraiga manualmente los datos del sensor o a través de telemetría que permite la transmisión de datos de forma remota. Al aumentar la frecuencia en la toma de datos se puede generar una caracterización del acuífero que permite apreciar anomalías. Del mismo modo, un aumento en la frecuencia de transmisión de datos permite la generación temprana de alertas.

3.1.2 MONITOREO DE AGUAS SUPERFICIALES

El agua superficial comprende el agua que naturalmente forma de arroyos, ríos, lagos y estanques, incluyendo lagunas y embalses artificiales. Por lo que el diseño del programa para el muestreo de aguas superficiales es tanto en sistemas naturales como artificiales.

Dentro de los factores a considerar para un plan de monitoreo está el que los puntos de muestreo sean identificados y reconocidos para muestreos futuros, la ubicación de los puntos debe tener un fácil acceso, estableciendo como prioridad la seguridad, sin perder la representatividad de su ubicación. Por último, la información obtenida de los resultados del análisis en cada punto debe ser lo suficientemente representativa como para poder concluir sobre la calidad del recurso y las posibles fuentes que lo afecten.

3.2 EL MONITOREO DE AGUAS EN CHILE

En Chile, la Dirección General de Aguas (DGA), a través del Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos (DCPRH), genera y publica la información de calidad de aguas superficiales y subterráneas de todo el país. Esta

información ha sido utilizada con diversos fines: publicación de artículos científicos, reporte de datos de acuerdo con la Norma Secundaria de Calidad Ambiental, información de líneas de base, etc. Otro uso relevante de la información de la DGA es la evaluación del avance en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, la información de la DGA ha sido usada para calcular el indicador ODS 6.3.2 "Porcentaje de cuerpos de agua de buena calidad" en 6 cuerpos de agua.

Para la medición de parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH, Conductividad específica (25°C), Turbiedad y Oxígeno Disuelto) en aguas subterráneas, la DGA genera tomas anuales de 1 a 12 muestras dependiendo del lugar y las condiciones operativas para (normalmente 3 para arroyos y aguas subterráneas y 2 para lagos y embalses).

La distribución de estaciones de monitoreo se concentra en áreas de escasez de agua, sectores donde existe una mayor densidad de población y en áreas de actividad humana. Su distribución en superficie de corrientes de agua tiene como objetivo representar la calidad del agua "aguas arriba" y "aguas abajo", por lo que podría ayudar a contrastar un "estado natural" y una posible condición afectada. Sin embargo, en muchas cuencas andinas es difícil establecer un "estado natural", ya que un alto enriquecimiento puede ocurrir de forma natural o artificial (origen antrópico), especialmente para metales y sales disueltas en áreas mineras en el norte y centro de Chile. En tales casos, cuidadosos estudios geoquímicos que implican el análisis de trazadores geoquímicos y modelos son necesarios para discriminar entre el estado natural de los cuerpos de agua y la contaminación humana.

La red de monitoreo de la DGA no es la única fuente que reporta mediciones de los parámetros de calidad de agua. Otra fuente de información de calidad de agua es Vega et. Al. (2018) (Figura 3-3):

- a) Planes de vigilancia de estándares secundarios de calidad del agua: recientemente, varias cuencas hidrográficas y aguas lénticas cuentan con normas secundarias de calidad del agua (NSCA). Este marco incluye un plan de vigilancia para un conjunto predefinido de parámetros, ubicaciones y frecuencia de monitoreo.
- b) Plataforma de evaluación de impacto ambiental: la ley chilena 19.300 promulga las bases medioambientales para el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), lo que requiere que una gama de nuevos proyectos de inversiones o modificaciones para realizar una evaluación de impacto ambiental. Cuando las actividades que ingresan al SEIA tienen el potencial de impactar el agua, se requiere considerar una línea de base de la calidad del agua y un programa de vigilancia de la calidad del agua. Tal información se puede encontrar a través de las plataformas del SEIA y la Superintendencia del medio ambiente (SMA).
- c) Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS): todas las empresas de agua que proporcionan agua potable y tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con el sistema de concesiones chileno están obligados a cumplir con las normas de

descarga de agua potable y aguas residuales tratadas. Aunque no esté disponible a través de una plataforma web, se pueden solicitar datos específicos a través de la ley de transparencia que obliga a las agencias de servicio público a responder a las solicitudes de datos públicos.

Además, el enfoque de la calidad del agua es principalmente estadístico, sin apoyar sistemáticamente modelos conceptuales y cuantitativos que ayuden a enmarcar la interpretación de los datos. Un enfoque mejorado para el control de la calidad del agua y la gestión de datos debiese ser coherente con un enfoque integrado de gestión de recursos hídricos.

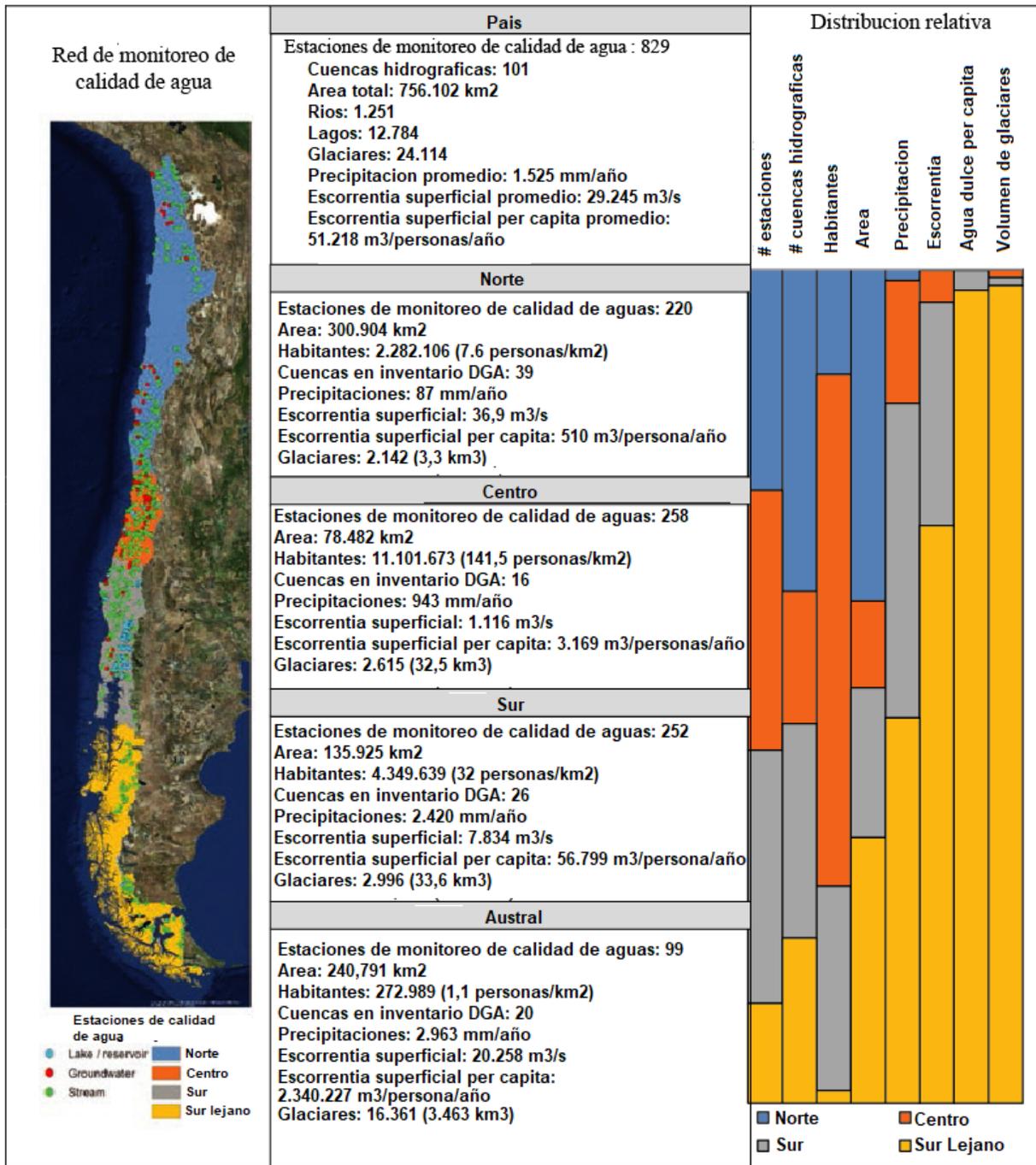


Figura 3-3: Estaciones de monitoreo de la calidad del agua y aguas continentales chilenas de un vistazo
 Fuente: Vega,2018

3.4 CONTEXTO INTERNACIONAL DE MONITOREOS

A modo de generar un marco comparativo con respecto al estado del monitoreo de aguas en Chile, se genera una revisión de la situación general de los países latinoamericanos y una revisión más detallada para Argentina y Brasil, el primero debido a la cercanía y similitud climática que posee con Chile, y el segundo al ser el país más grande de Latinoamérica.

Para el caso de las aguas subterráneas, existe el Centro Internacional para la Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos (IGRAC por sus siglas en inglés), situado en Delft (Holanda) ha desarrollado la Red Global de Monitoreo de Aguas Subterráneas (GGMN), programa que tiene como objetivo mejorar la calidad y accesibilidad a la información del monitoreo a nivel global y, con ello, mejorar el conocimiento sobre el estado del recurso. El Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas (CeReGAS), ubicado en Montevideo (Uruguay) es un organismo que tiene como objetivo apoyar a países de América Latina a mejorar la gestión sustentable de sus aguas subterráneas proporcionando las capacidades científicas y técnicas para apoyar el desarrollo sostenible del recurso a través de un enfoque integrado. En este trabajo, CeReGAS e IGRAC, a través del programa GGMN, presentan una aproximación al estado del monitoreo cuantitativo de las aguas subterráneas en América Latina. (Vargas R. et. al, 2020).

CeReGAS, como centro regional para la gestión del recurso subterráneo (categoría II de la UNESCO), tiene el alcance y la presencia necesaria para facilitar el intercambio de conocimientos, experiencias e información entre los países de América Latina y el Caribe, con los cuales tiene vinculación a través de diferentes actividades y proyectos.

En América Latina, la distribución del agua subterránea varía enormemente según los diferentes países y regiones, así como también su calidad y accesibilidad, lo que lleva a que los mismos deban enfrentar problemas y desafíos de diferente índole. Un ejemplo es lo que sucede en Argentina, cuya capital se enfrenta a la elevación progresiva estacional de los niveles freáticos, lo que hace que el recurso sea más vulnerable a la contaminación. Por otro lado, en Bolivia, la calidad del agua subterránea está siendo amenazada por la contaminación industrial, agropecuaria y doméstica; mientras que, en Honduras, la alta demanda de agua en las zonas urbanas amenaza la futura disponibilidad de este recurso o Belice, donde los efectos de la intrusión salina amenazan ecosistemas y eventualmente su economía (IGRAC1, 2014, IANAS & UNESCO, 2015).

A partir de la información recopilada por Vargas y colaboradores (2020) de 19 países (Argentina, Belice, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela), se realizó un diagnóstico del estado de las redes de vigilancia cuantitativas de aguas subterráneas. Además, se analizó la calidad de los datos recopilados y se

consideró que en primer lugar estas redes están abiertas al público y de qué manera se hacen disponibles al público estos datos.

De estos 19 países (Tabla 1) solo 5 cuentan con un visor online que permite visualizar sus redes nacionales de monitoreo de aguas subterráneas: Brasil (CPRM, 2018), Chile (DGA, 2018), Costa Rica (MINAE2, 2019), El Salvador (MARN2, 2019) y México (CONAGUA, 2019). La información más básica entregada por las cinco plataformas es la ubicación de las estaciones de vigilancia. Todas ellas, a excepción de la de Costa Rica, permiten además acceder a los valores del nivel de agua por estación (mensual y/o anual).

Tabla 1: Resumen de estado de monitoreo subterráneo en países latinoamericanos

País	Institución	Red Nacional de monitoreo de aguas subterráneas
Argentina	Gobiernos provinciales	No
Belice	Ministerio de Recursos Naturales e Inmigración (MNRA)	No
Bolivia	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)	No
Brasil	Agencia Nacional de Aguas (ANA) - Servicio Geológico de Brasil (CPRM)	Si
Chile	Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas (DGA)	Si
Colombia	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	Si
Costa Rica	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) - Dirección de Agua	Si
Cuba	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) - Servicio Hidrológico Nacional	Si
Ecuador	Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)	No
El salvador	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) - Área de Hidrología Subterránea	Si
Guatemala	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)	No
Honduras	Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (MiAmbiente)	No
México	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT) - Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	Si
Nicaragua	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	No
Panamá	Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM)	No
Paraguay	Secretaría del Ambiente (SEAM)	No
Perú	Ministerio de Agricultura y Riego– Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Si
Uruguay	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA)	No
Venezuela	Ministerio del Poder Popular para el Ambiente de Venezuela (MinAmb) - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología	Si

Fuente: Elaboración propia.

En particular se realiza una comparación con Argentina y Brasil, dada su cercanía a Chile, la cual se detalla a continuación:

En el territorio argentino los recursos hídricos son propiedad de las provincias, pero la Red Hidrológica Nacional (RHN), la cual es un ente estatal, posee su propia red de control para hidrometría, calidad de aguas superficiales, estaciones limnológicas y meteorológicas.

La RHN constituye la mayor fuente de información hidrológica del país y recaba los datos básicos necesarios para la formulación de proyectos y la administración racional de los recursos hídricos. Los datos básicos y elaborados constituyen una parte importante del patrimonio nacional, alcanzando un valor inestimable ya que su utilización constituye el punto de partida insustituible para todo estudio hidrológico, hidráulico y ambiental. Por otra parte, el grado de confiabilidad de estos datos aumenta en relación directa con el incremento del período de registro.

Resulta obvio destacar la importancia de la tarea sistemática que se cumple para llegar a conocer el comportamiento de los cursos de agua, con vistas a los estudios y proyectos relacionados con el desarrollo sustentable de las cuencas hidrológicas. La RHN, actualmente es operada a través de terceros y cuenta con 369 puntos de medición, en muchos de los cuales se observan tanto parámetros hidrológicos como meteorológicos.

Las redes de seguimiento de las cuencas y los organismos municipales suelen recopilar datos sobre la cantidad de agua subterránea (niveles) y calidad. El RHN, para sus futuras estaciones hidrogeológicas, prevé realizar mediciones de cantidad (nivel) y calidad (conductividad, pH y temperatura) con regularidad estacional. Existen estaciones manuales, automáticas y / o telemétricas en función del objetivo del monitoreo.

Los datos de los organismos de cuenca están disponibles en su página web. Por ley nacional, la información producida con fondos estatales en cualquier nivel es pública y debe ser accesible a todos los ciudadanos, siempre que no comprometa la seguridad nacional (Figura 3-4).



Figura 3-4: Portal web del Sistema Nacional de Información Hídrica del Ministerio de Obras Públicas de Argentina
Fuente: Ministerio de Obras Públicas de Argentina

Por otro lado, en el caso de Brasil, la Agencia Nacional del Agua (ANA) está a cargo de la planificación, monitoreo y apoyo a la gestión de los recursos hídricos, proporcionar información sobre los recursos hídricos a otros organismos y entidades gubernamentales de gestión del agua a nivel federal y el nivel de los estados federales. La Agencia es legalmente responsable de implementar el Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SINGREH), que es una combinación de mecanismos legales y administrativos establecidos por la Ley de Aguas No.9433/97. El objetivo de dicha ley es coordinar la gestión integrada de los recursos hídricos e implementar la política nacional de recursos hídricos.

El CPRM es responsable de la planificación y ejecución de las actividades de seguimiento; recopilación de datos y mantenimiento del seguimiento de pozos, así como de la coherencia y la difusión de datos a través de la base de datos nacional de pozos. Los estados (divisiones políticas de Brasil) son responsables de autorizar el uso de aguas subterráneas.

Los datos se recopilan con el objetivo de ampliar el conocimiento hidrogeológico, desarrollar investigaciones específicas y apoyar la gestión de los recursos hídricos, estos están disponibles en su portal web (Figura 3-5).

El proceso para elegir ubicaciones de monitoreo se fundamenta en criterios que permiten la priorización de la selección en los acuíferos. Esto criterios son:

- i) Acuíferos sedimentarios
- ii) Agua de importancia socioeconómica;
- iii) Uso de agua para abastecimiento público;
- iv). Aspectos de vulnerabilidad y riesgos naturales;
- v). Representatividad espacial del acuífero;
- vi). Existencia de pozos de monitoreo.

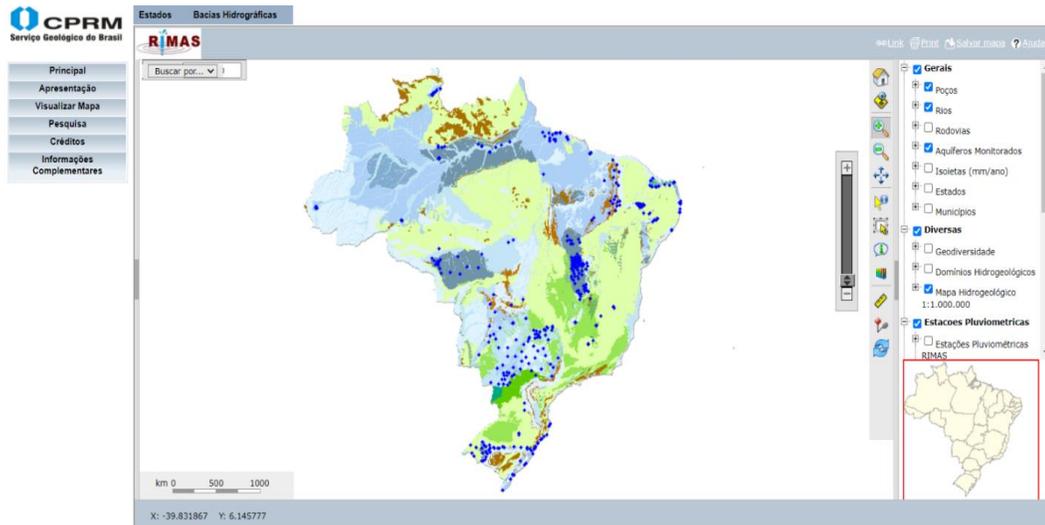


Figura 3-5: Portal web de Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas de Brasil
Fuente: Servicio geológico de Brasil

A continuación, se evalúa el estado del monitoreo realizado en 2 países desarrollados como lo son Estados Unidos y España.

En Estados Unidos el United States Geological Survey (USGS) en el área de Recursos hídricos es el responsable de proporcionar datos e información acerca de los recursos de agua subterránea de los Estados Unidos (Figura 3-6). Los programas de monitoreo de aguas subterráneas que lleva a cabo el USGS contienen varias redes de monitoreo:

- Redes nacionales como la Nacional Red de monitoreo de aguas subterráneas (NGWMN).
- Red activa de nivel de agua subterránea y Red de respuesta climática.
- Redes regionales con el objetivo de monitorear los cambios de almacenamiento en acuíferos.
- Redes de línea de base que están diseñadas para monitorear condiciones de las aguas subterráneas en cada estado y redes locales diseñadas para monitorear los efectos de bombeo.

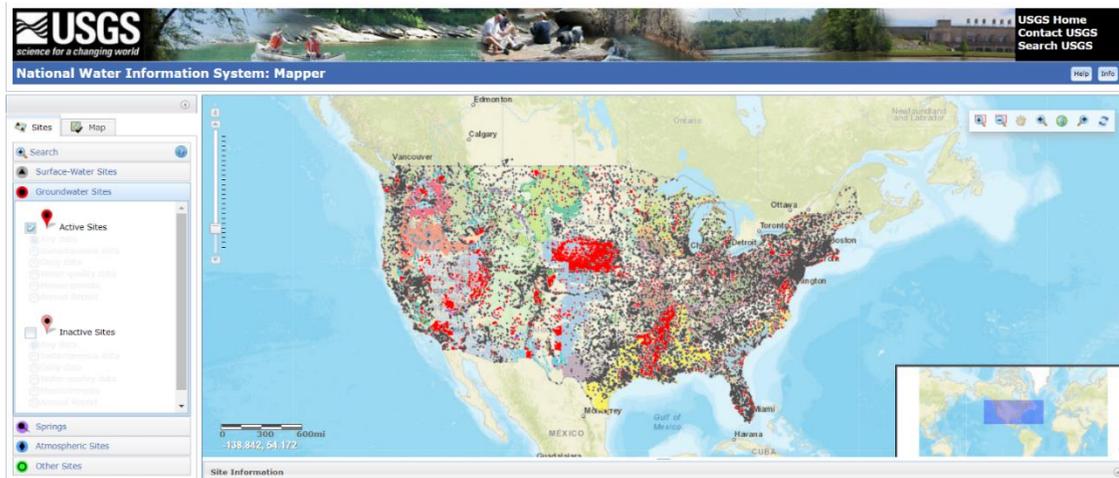


Figura 3-6: Portal web de United States Geological Survey (USGS) de Estados Unidos
Fuente: United States Geological Survey

En el caso de España el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico se encarga del seguimiento de las aguas subterráneas en España. El Ministerio ejecuta la política gubernamental sobre energía y medio ambiente para la transición hacia un modelo productivo más ecológico y social. El objetivo de la red de seguimiento se adaptó de acuerdo con la Directiva Marco del Agua de la UE cuando se introdujeron cientos de nuevos piezómetros en cada cuenca para determinar el estado químico de las masas de agua.

Hoy en día, se acepta generalmente que cualquier enfoque de la gestión del agua debe basarse en la unidad hidrológica "cuenca". Por tanto, es necesario reconsiderar los conceptos de seguimiento para que se correspondan con este nuevo paradigma, por ejemplo, en la Unión Europea, la Directiva Marco del Agua (CE60/2000) exige claramente que todas las actividades de gestión del agua se basen en el enfoque de cuencas

hidrográficas. Con respecto al monitoreo, se requiere que todas las instituciones de cuencas hidrográficas definan un plan de monitoreo para apoyar la caracterización de estas. Esto permite identificar los impactos de las medidas que se establecerán de acuerdo con el objetivo principal de la Directiva Marco del Agua que es el de lograr un buen estado de todas las aguas. En particular, el seguimiento en el marco de la DMA debe diseñarse para respaldar la clasificación del estado y las causas de la contaminación, detectar cambios y tendencias del sistema, y proporcionar una base para estimaciones de carga. En principio los países miembros tenían que adecuarse a la norma europea para 2015.

3.5 SENSORES

3.5.1 PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

TEMPERATURA

La radiación solar determina la calidad y cantidad de luz y, además afecta la temperatura del agua. En las zonas templadas la temperatura varía ampliamente por el cambio de estaciones, en las zonas tropicales se mantiene más o menos constante, se conserva siempre fría en las altas montañas y cálida al nivel del mar. La solubilidad del oxígeno en el agua está afectada por la temperatura. Así, a mayor temperatura menor solubilidad y viceversa. Un cuerpo de agua puede aumentar la solubilidad en cerca de un 40% al bajar la temperatura de 25°C a 0°C. Un cuerpo de agua que posee 14.6mg/L de oxígeno a 0°C puede bajar su concentración a 6.4mg/L a 40°C (Roldán, 2003).

pH

Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución. El pH se mide en una escala de 0 a 14. En esta escala, un valor pH de 7 es neutro, lo que significa que la sustancia o solución no es ácida ni alcalina. Un valor pH de menos de 7 significa que es más ácida, y un valor pH de más de 7 significa que es más alcalina.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y la temperatura de medición. La variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica, e igualmente contribuye a la detección de fuentes de contaminación, a la evaluación de la actitud del agua para riego y a la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno (Faña, 2002).

TURBIEDAD

Es una expresión de la propiedad óptica que origina que la luz se disperse y absorba en vez de transmitirse en línea recta a través de la muestra. Es producida por materiales en suspensión como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica, organismos planctónicos y demás microorganismos. Incide directamente en la productividad y el flujo de energía dentro del ecosistema, La turbiedad define el grado de opacidad producido en el agua por la materia particulada en suspensión. Debido a que los materiales que provocan la turbiedad son los responsables del color, la concentración de las sustancias determina la transparencia del agua puesto que limita el paso de luz a través de ella (Roldán, 2003).

NIVEL FREÁTICO

El nivel freático puede definirse como el nivel superior del agua en un acuífero o más correctamente como el lugar donde la presión del agua es igual a la de la presión atmosférica. El nivel freático o también llamado capa o napa freáticas puede medirse mediante una perforación en el subsuelo. La distancia medida entre el agua subterránea y la superficie se corresponde con el nivel freático. Estas perforaciones se denominan piezómetros abiertos y juegan un papel muy importante en los estudios geotécnicos para determinar las condiciones de cimentación, subpresiones, empujes de tierras o, por ejemplo, el abatimiento de estas en excavaciones bajo el nivel freático.

Normalmente el nivel de agua se mide mediante una sonda piezométrica que no es más que una cinta métrica en cuya punta hay dispuesto un sensor que nos avisa mediante una luz o sonido del contacto con el agua.

CAUDAL

Se define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección de un ducto, ya sea tubería, cañería, oleoducto, río, canal, por unidad de tiempo. Generalmente, el caudal se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo específica. El aforo de caudales de cauces naturales es la operación de medición del volumen de agua que transcurre en una sección determinada en un intervalo de tiempo determinado. Las mediciones de caudales mediante aforos se pueden ejecutar de dos formas:

De manera continua o permanente, donde en la zona que se desea aforar se realiza la instalación ya sea de estaciones medidoras o de estaciones de registro.

De manera puntual, aislada o instantánea, donde en la zona que se va a efectuar el aforo se realizan mediciones de caudal en determinados momentos donde se desee conocer la magnitud de una corriente en particular.

3.5.2 TIPOS DE SENSORES

Cada sensor es construido y calibrado con el fin de recopilar los datos deseados con respecto a un parámetro cuyo parámetro de precisión y exactitud dependerá netamente del nivel de detalle al que se quiere llevar el estudio y para esto existen diversas opciones en el mercado.

Dentro de los parámetros que de forma usual se requieren para todo estudio de aguas tanto superficiales como subterráneas podemos destacar los siguientes: pH, Conductividad eléctrica, temperatura y nivel. Para la siguiente exposición de datos de sensores, se utilizarán como referencia equipos de la marca HANNA cuya información y valores pueden encontrarse en su sitio web.

A continuación, se presenta una selección de sensores de interés para este estudio debido al contexto del proyecto Fondef ID19I-10363, debido a que son los

sensores que miden los parámetros que se desean registrar con el prototipo de sensor en desarrollo.

SENSOR DE PH

El sensor de pH o también denominado electrodo de pH posibilitan la medición del valor pH con medidores eléctricos, para esto deben ser sumergidos en el medio que se desea controlar (agua en este caso), a diferencia de los métodos convencionales de medición como son los indicadores o cintas de prueba, la toma de datos con electrodos permite un dato más preciso y rápido de obtener.

Sin embargo, es necesario tener varias cosas en cuenta a la hora de medir con los electrodos de pH. Los medidores de pH necesitan que se calibran periódicamente mediante soluciones tampón y un valor pH definido. Esto se debe a que los electrodos de pH se van deteriorando y por tanto la curva de tensión está sujeta a variaciones. El deterioro de los electrodos de pH también conlleva que en algún momento dejan de funcionar. La duración de vida de los electrodos de pH depende de varios factores. Soluciones muy sucias y altas temperaturas requieren un corto intervalo de calibración y acortan la vida de los electrodos de pH. En la Figura 3-7 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-7: Sensores de pH.
Fuente www.fondriest.com/

SENSOR DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad o conductancia específica de una solución acuosa es una medida de su capacidad para conducir la electricidad. La conductividad aumenta cuando la solución contiene electrolitos.

Los sensores de conductividad usan una técnica de medición de 4 electrodos que proporciona lecturas precisas en un amplio rango de conductividades y temperaturas. Esto se debe a que la conductividad de soluciones con iones disueltos aumenta a medida que la temperatura se incrementa. Por esta razón también se incorpora un sensor de temperatura, el cual es usado para proveer una compensación automática del 2%/°C normalizada a 25°C. Un módulo de interfaz convierte los datos del sensor de conductividad digital y temperatura en dos señales separadas para ser monitoreadas con un dispositivo data logger. En la Figura 3-8 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-8: Sensores de conductividad eléctrica.
Fuente www.fondriest.com

SENSOR DE TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente en general, medida por un termómetro, para el caso del agua se utiliza un sensor de temperatura el cual en algunos dispositivos viene acoplado junto con la sonda multiparamétrica, pero también se le puede encontrar por separado. En la Figura 3-9 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-9: Sensores de Temperatura
Fuente www.fondriest.com

SENSOR DE OXÍGENO DISUELTO

La concentración de oxígeno disuelto en el agua puede ser muestreada o monitoreada en continuo utilizando un sensor de oxígeno disuelto (Sensor OD). Comercialmente existen 3 tipos de sensores OD distintos:

- Sensores galvánicos de oxígeno disuelto.
- Sensores polarográficos de oxígeno disuelto.
- Sensores ópticos de oxígeno disuelto.

Cada tipo de sensor de oxígeno disuelto tiene un principio de funcionamiento ligeramente diferente. Por lo tanto, cada tipo de sensor de oxígeno disuelto tiene ventajas y desventajas según la aplicación de medición de agua donde se utilizará.

Los sensores galvánicos de oxígeno disuelto consisten en un electrodo de trabajo (cátodo) y un contra electrodo (ánodo) que actúan como una batería para producir un voltaje específico para la reducción de oxígeno. Una membrana delgada, permeable al gas, aísla los elementos sensores de la muestra de agua, pero permite que pase el oxígeno. El oxígeno que pasa a través de la membrana se reduce en el cátodo, causando

una corriente a partir de la cual se determina la concentración de oxígeno. En la Figura 3-10 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-10: Sensores galvánicos de Oxígeno Disuelto.
Fuente: www.fondriest.com

Los sensores polarograficos de oxígeno disuelto consisten en un electrodo de trabajo (cátodo) y un contra electrodo (ánodo). Se aplica un voltaje de polarización a estos electrodos que es específico para la reducción de oxígeno. Una membrana delgada, permeable al gas, aísla los elementos sensores de la muestra de agua, pero permite que pase el oxígeno. El oxígeno que pasa a través de la membrana se reduce en el cátodo, causando una corriente a partir de la cual se determina la concentración de oxígeno. Las sondas polarográficas de dos electrodos utilizan el ánodo como electrodo de referencia. En la Figura 3-11 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-11: Sensores Polarográficas de Oxígeno Disuelto.
Fuente: www.fondriest.com

Los sensores ópticos de oxígeno disuelto se basan en el principio de enfriamiento de fluorescencia. El método de detección presenta un luminóforo basado en Pt inmovilizado que es excitado por la luz de un LED azul y emite una luz roja. El oxígeno disuelto apaga esta excitación. Cuando no hay oxígeno presente, la vida útil de la señal es la mayor; a medida que el oxígeno llega a la superficie de detección, la vida útil se acorta. La intensidad y la vida útil son inversamente proporcionales a la cantidad de oxígeno presente; a medida que el oxígeno interactúa con el luminóforo, reduce la intensidad y la vida útil de la luminiscencia. La vida útil de la luminiscencia se mide con un fotodetector y se utiliza para calcular la concentración de oxígeno disuelto. A su vez, el medidor informa esto como un % de saturación o lectura de mg / L de oxígeno disuelto. En la Figura 3-12 se muestran algunas de las alternativas en el mercado.



Figura 3-12: Sensores Ópticos de Oxígeno Disuelto
Fuente: www.hannachile.com

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para las distintas partes del estudio, primero se presentan los datos obtenidos de la bibliografía con el fin de tener una base del estado del monitoreo de aguas en Chile versus otros países en la región. Luego de esto se presentan los resultados del avance en la construcción del prototipo de sonda y posteriormente los resultados de su puesta a prueba.

4.1 ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE MONITOREO

A partir de la información extraída de IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Centre) la cual proporciona una descripción general de las redes de monitoreo de aguas subterráneas a escala nacional se hizo una revisión del estado de 108 países donde se observa que en 27 de estos países:

-No existe un programa o red de monitoreo de aguas subterráneas gestionado a nivel nacional o local.

-Hay instituciones con el mandato de monitorear la cantidad de aguas subterráneas, pero se desconoce si hay un seguimiento de la red en funcionamiento.

-Hay o solía haber un programa de monitoreo de redes de aguas subterráneas, pero se desconoce si la red aún está operativa.

Mientras que para el resto de los 81 países se crearon perfiles que exponen sus programas y redes de monitoreos de aguas o los planes a corto plazo para instaurarlos.

A nivel nacional la DGA en el Atlas del agua (DGA, 2016) reporta que en Chile existen 101 cuencas hidrográficas, 1.251 ríos, 12.784 lagos y lagunas, y 24.114 glaciares, con un total de 829 estaciones vigentes de monitoreo de calidad del agua, las cuales se distribuyen a lo largo del país de forma que 258 de estas se encuentran en la macrozona central de Chile mientras que en la macrozona norte que posee una superficie 4 veces más grande cuenta con 220 estaciones, de igual forma en la macrozona sur que posee una superficie cercana al doble de la macrozona central posee 252 (Figura 4-1).

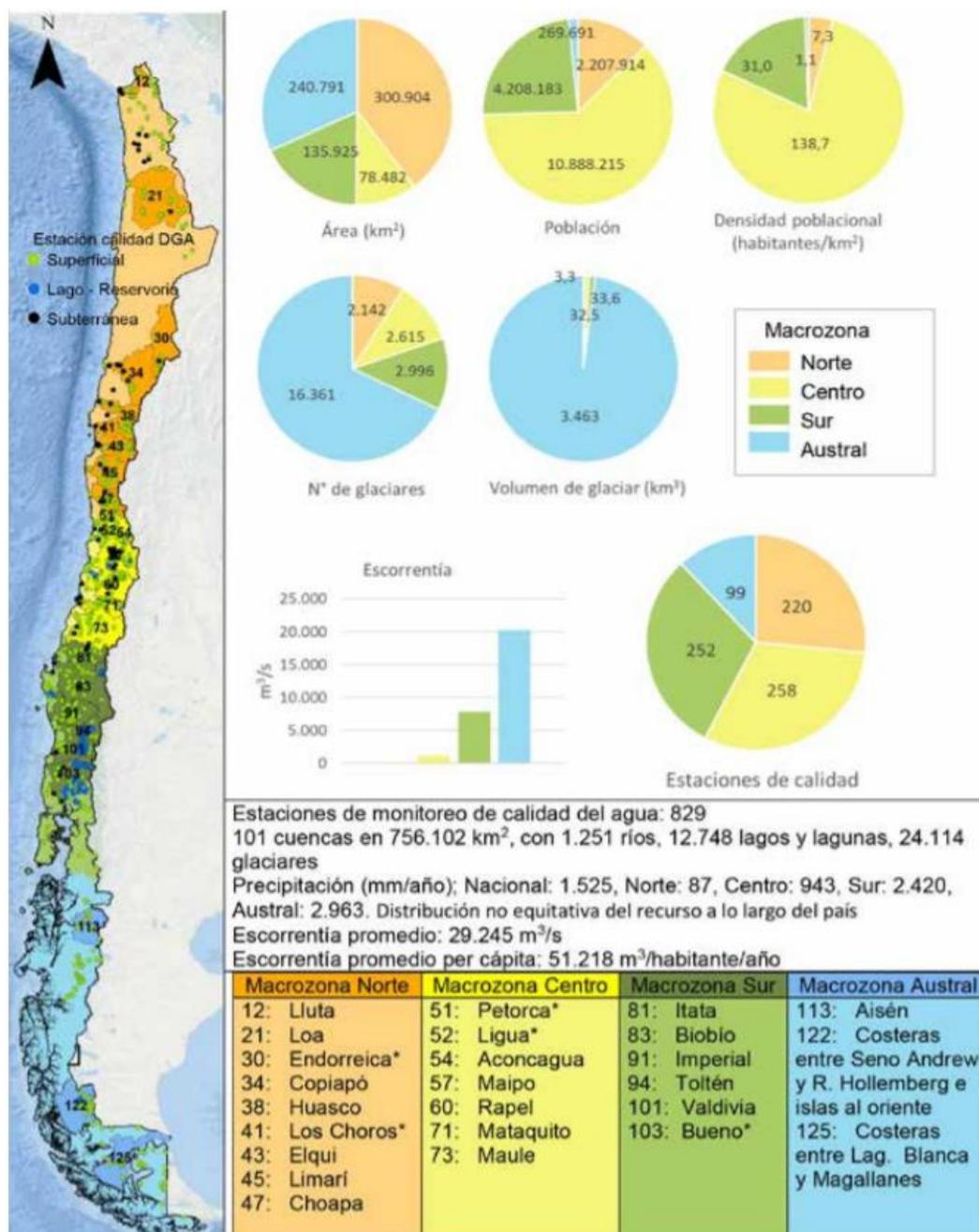


Figura 4-1: Distribución de red de monitoreo de calidad de aguas de la DGA y descripción general de las cuatro macrozonas definidas por la DGA.

Fuente: IANAS (2019)

4.2 COMPARATIVA DE CHILE CON RESPECTO A OTROS PAÍSES

Comparando los programas de monitoreo de Chile con respecto a lo que ocurre en otros 19 países en Latinoamérica (Tabla 2) se puede observar que Chile es uno de los 8 países que cuentan con una red nacional de monitoreo de aguas.

Por otro lado, se observa que el organismo que gestiona las redes de monitoreo de aguas en la gran mayoría de estos países son organismos fiscales en su mayoría ministerios del medio ambiente.

Tabla 2: Situación del monitoreo de las aguas en América Latina. Fuentes: a IGRAC1 (2014), b Secretaría del Agua (2016), c GWP (2017), d MVOTMA (2017).

País	Institución responsable de la gestión de los recursos hídricos	Red nacional de monitoreo de aguas.
Argentina	Gobiernos provinciales	No
Belice	Ministerio de Recursos Naturales e Inmigración (MNRA)	No ^a
Bolivia	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)	No
Brasil	Agência Nacional de Águas (ANA) - Servicio Geológico de Brasil (CPRM)	Sí
Chile	Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas (DGA)	Sí
Colombia	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	Sí
Costa Rica	Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) - Dirección de Agua	Sí
Cuba	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) - Servicio Hidrológico Nacional	-
Ecuador	Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)	No ^b
El Salvador	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) - Área de Hidrología Subterránea	Sí
Guatemala	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)	No ^a
Honduras	Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (MiAmbiente)	No ^c
México	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SERMANAT) - Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)	Sí
Nicaragua	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	No ^a
Panamá	Autoridad Nacional del Ambiente (ANAM)	No ^a
Paraguay	Secretaría del Ambiente (SEAM)	No
Perú	Ministerio de Agricultura y Riego– Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Sí
Uruguay	Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA)	No ^d
Venezuela	Ministerio del Poder Popular para el Ambiente de Venezuela (MinAmb) - Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología	Sí

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 agrupa las redes de monitoreo y características (número de pozos, tipo de registro de datos, frecuencia de monitoreo, disponibilidad de datos) de cada país. En el caso de países sin redes nacionales se presentan redes locales, teniendo en cuenta aquellas con mayor número de piezómetros y que provean datos públicos.

Tabla 3: Características de las redes de monitoreo.

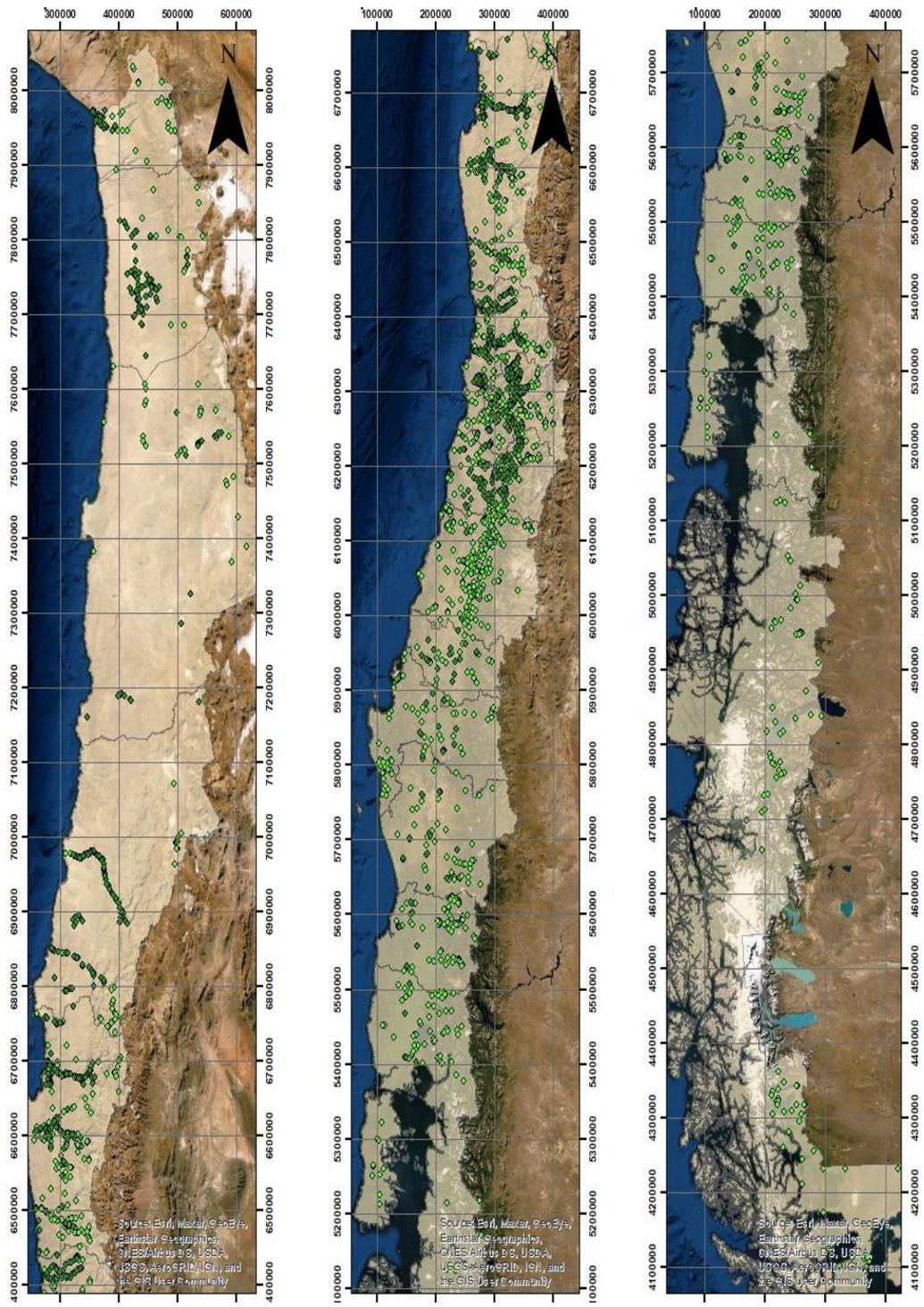
País	Red de monitoreo	N° de pozos	Registro manual o automático	Frecuencia*	Disponibilidad de datos	Referencias
Argentina	BDH-CMR	289	Mixto	Mensual	Visualización y descarga	BDH-CMR (2018)
Argentina	BDH-Azul	149 (monitoreo +otros)	Mixto	Irregular	Visualización y descarga	BDH-Azul (2018)
Bolivia	Del Acuífero Purapurani	30	Manual	Mensual	En preparación Sistema de Información de Agua Subterránea de Bolivia (SIASBO)	MMAY _{A1} (2018), MMAY _{A2} (2016)
Brasil	RIMAS	394	Mixto	Diaria	Visualización y descarga	CPRM (2018), Rangel-Medina (2018)
Chile	Red hidrométrica nacional	1059	Mixto	Mensual	Visualización y descarga	DGA DGA _{1 2} (2018), (2018), DGA ₃ (2018)
Colombia	RBASUB	112	(?)	Bianual	S/I	IDEAM ₂ (2015)
Costa Rica	SIMASTIR (provincia de Guanacaste y Puntarenas peninsular)	44	Automático con transmisión telemétrica	Tiempo real	Visualización y descarga	MINAE ₁ (2017),
	Semiautomática	21	Automática con transmisión manual	S/I	Visualización	MINAE ₁ (2017), MINAE ₃ (2019)
	Manual	300	Manual	Mensual	Visualización	MINAE ₃ (2019)
El Salvador	Automática	24	Automático	8 horas	Visualización	MARN ₁ (2018),

						MARN ₂ (2019)
	Artesanal	100	Manual	Bianual	Visualización	MARN ₁ (2018), MARN ₂ (2019)
México	Red de monitoreo piezométrico	2000	(?)	Anual	Visualización y descarga	(2018), Rangel CONAGUA - Medina (2018)
Paraguay	Acuífero Patiño	47	Automática	S/I	S/I	SEAM (2017)
Perú	Red nacional	3491 en total	Mixto	S/I	S/I	IGRAC ₁ (2014), ANA (2016), Rangel- Medina (2018)
Uruguay	Acuífero Raigóns	40	Manual	Bianual	Informes anuales en la web	DINAMIGE (2018)
Venezuela	Red nacional	130	Mixto	Mensual, trimestral y semestral	S/I	Decarli (2011)

Fuente: Elaboración propia.

Volviendo al contexto nacional de Chile en la Figura 4-2 se observan las estaciones de monitoreo y pozos de observación que están actualmente vigentes y se recopila información de ellos, la cual es compilada y se puede visualizar en el portal digital de la DGA. Se aprecia que Chile posee 2 redes de control: pozos de observación los cuales permiten evaluar la cantidad de agua en sus respectivos acuíferos generando así un control de los bombeos y extracciones. Por otro lado, también la DGA cuenta con estaciones de calidad de aguas que miden los siguientes parámetros: fluviométricos (caudal, nivel y temperatura del agua), meteorológicos (precipitación, temperatura y humedad relativa del aire), calidad de agua (pH, oxígeno disuelto, turbiedad y otros), nivométricos (altura de nieve y nieve equivalente en agua), como así también, los niveles y volúmenes de embalses y lagos. En su mayoría, los datos se entregan cada 1 hora y puede sufrir modificaciones (extraído de la página web de la DGA).

La distribución de pozos y estaciones de calidad se observa que esta mayormente concentrada en la zona centro del país, mientras que, en las norte, sur y austral de Chile, la cantidad de puntos de monitoreo son menores.



Leyenda

- Pozos de Observación
- Estaciones de calidad de agua (Vigentes)
- División política chilena (Regiones)

Figura 4-2: Mapa de estaciones de calidad de agua y pozos DGA en Chile (Norte a Sur de izquierda a derecha)
Fuente: Elaboración propia

4.3 AVANCES DEL PROTOTIPO FONDEF ID19I-10363

El desarrollo del prototipo del proyecto Fondef ID19I-10363 de sonda se realizó en distintas etapas, una primera instancia se creó un prototipo inicial con materiales de fontanería (Figura 4-3).



Figura 4-3: Prototipo inicial.
Fuente: Fondef ID19I-10363

Gracias a la ayuda del modelamiento en 3D se logró emular los compuestos que se utilizarían en esta primera etapa de desarrollo con el fin de realizar una revisión de la construcción (tamaños y distribuciones) del prototipo (Figura 4-4).

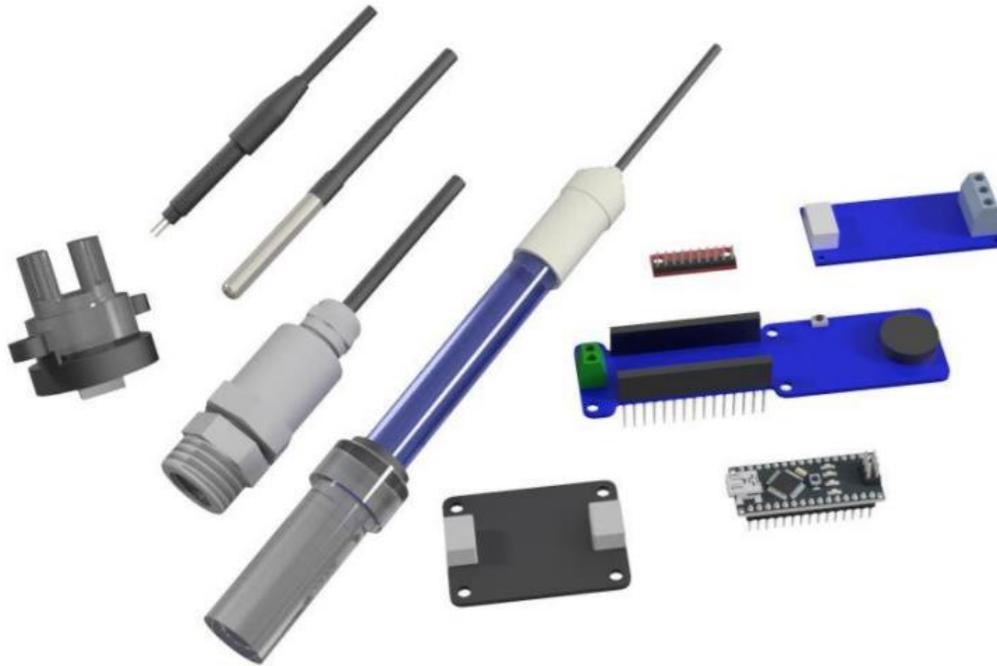


Figura 4-4: Modelamiento 3D de los compuestos de la sonda
Fuente: Fondef ID19I-10363

Luego de modelados los distintos componentes de la sonda, se comenzó a diseñar a nivel general el dispositivo, considerando los requerimientos establecidos previamente y priorizando materiales accesibles y disponibles en el mercado local (Figura 4-5).

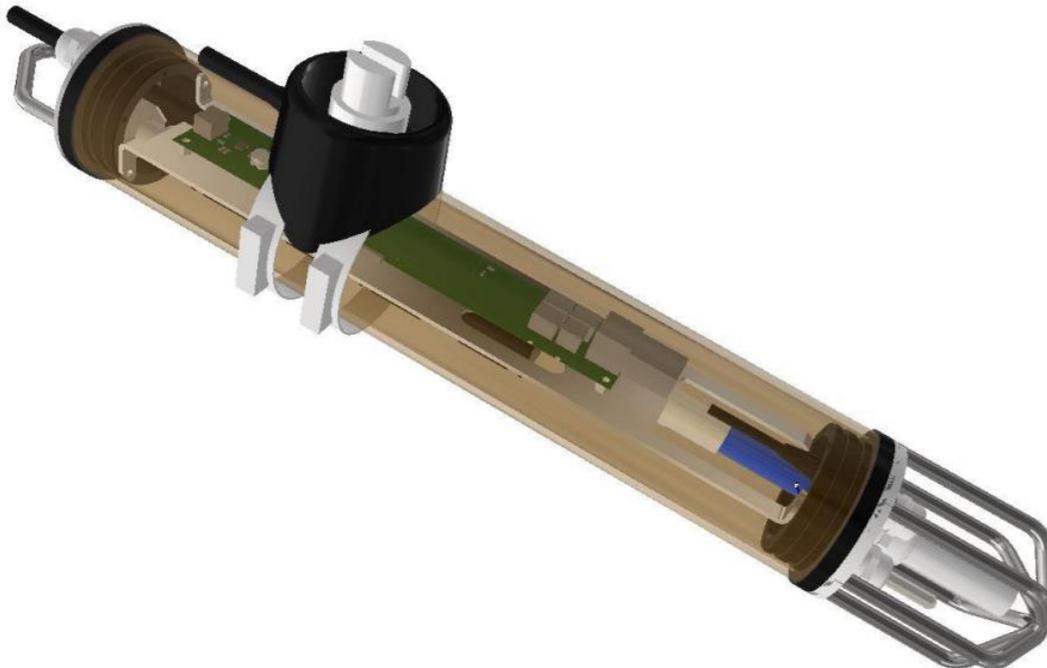


Figura 4-5: Modelado 3D del diseño final del prototipo
Fuente: Fondef ID19I-10363

Una vez listo el diseño inicial del dispositivo se procede a simular su comportamiento de forma digital a través de pruebas de esfuerzo con el fin de evaluar el desempeño de la carcasa a fin de evitar filtraciones al sumergir la sonda en el agua (Figura 4-6).

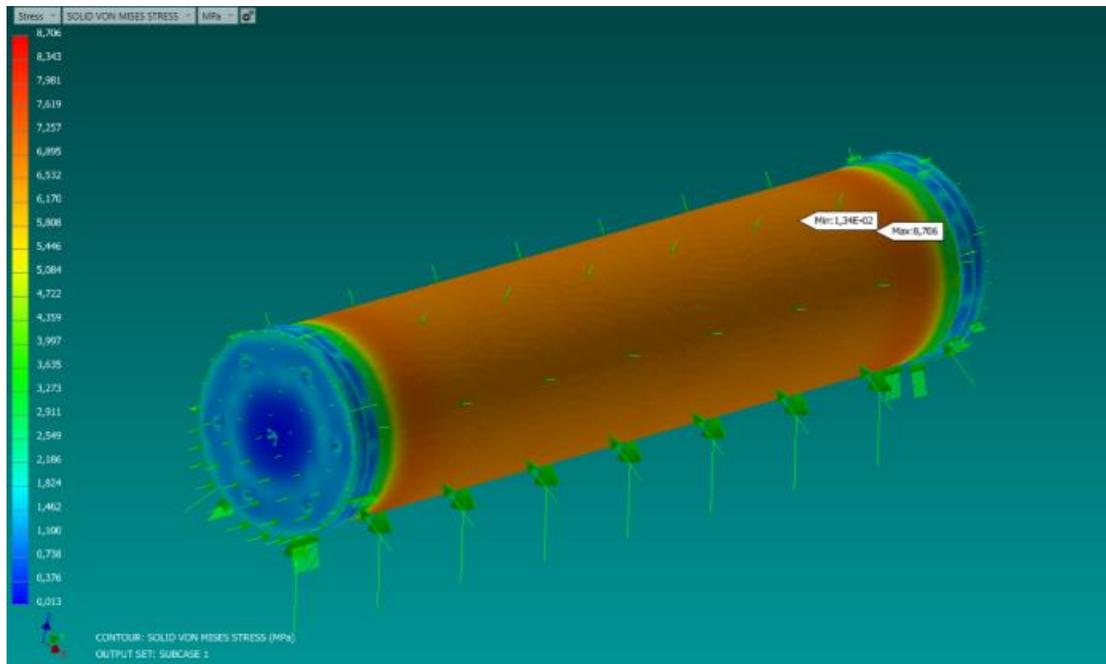


Figura 4-6: Pruebas digitales de esfuerzo
Fuente: Fondef ID19I-10363

Los resultados de esta experiencia, realizada por el equipo de desarrollo del proyecto Fondef ID19I-10363, arrojaron que la carcasa podría soportar una inmersión de hasta 100m de profundidad. Durante la etapa del desarrollo tecnológico se procede a pruebas de terreno, donde el sensor comenzó a filtrar agua en su interior a los 20 m de profundidad (bajo el nivel freático). Luego de ajustar el sellado del sensor a modo de evitar filtraciones, se prosigue a dejar sumergida la sonda durante un periodo de 10 días, tras lo cual ocurrieron (10ml de agua) pequeñas filtraciones por lo que se optó por modificar el sistema de sellado. (Figura 4-7). De esta forma se logró un diseño que alcanza un estándar IP (*Ingress Protection*), estimado entre IP67 e IP68, dando cumplimiento al objetivo establecido de IP65 (Figura 4-8).



Figura 4-7: Primeras pruebas en terreno de inmersión de la carcasa.
Fuente: Fondef ID19I-10363



Figura 4-8: Primera prueba en terreno de la sonda completa
Fuente: Fondef ID19I-10363

El prototipo actual desarrollado consta de 3 partes fundamentales:

-Placa electrónica con los sensores de parámetros fisicoquímicos (Presión, temperatura, pH, conductividad eléctrica y turbiedad. La cual posee un costo estimado de 254,42USD (Figura 4-9).

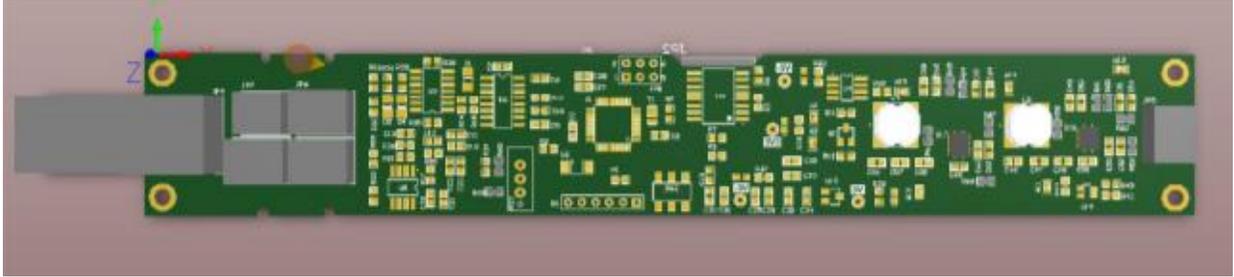


Figura 4-9: Diseño 3D de la placa electrónica de la sonda.

-Carcasa, cuya confección se realizó a través de una empresa externa. Cuyo costo final fue de 200,88USD (Figura 4-10).

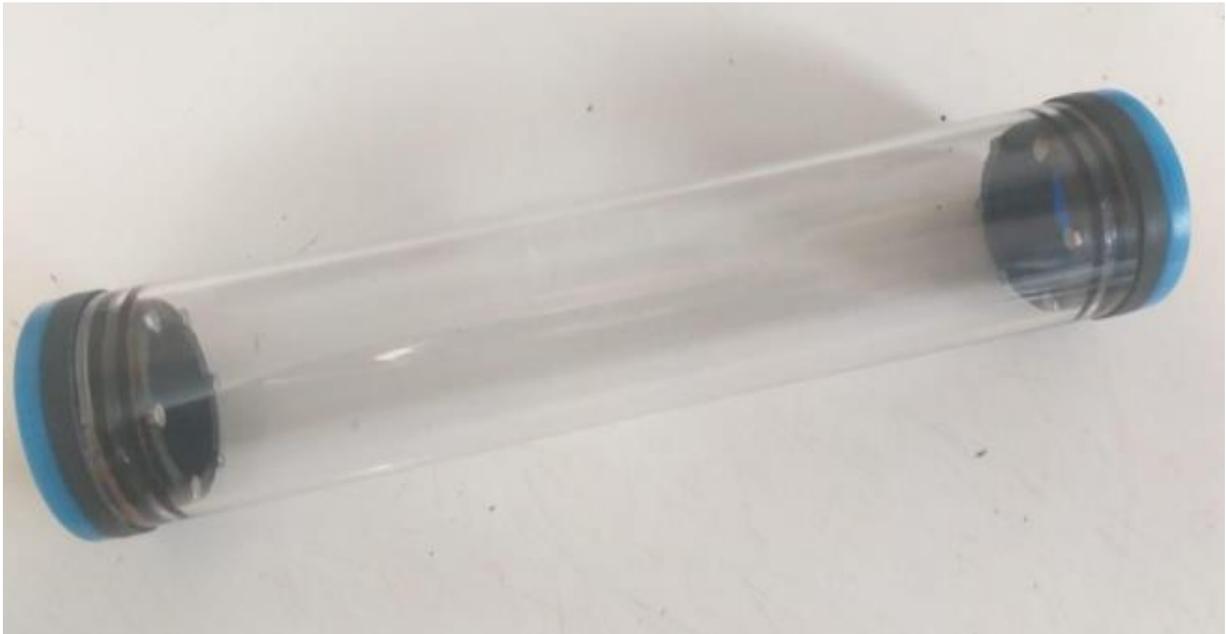


Figura 4-10: Diseño final de la carcasa del prototipo.

Fuente: Fondef ID19I-10363

-Nodo de comunicaciones, el cual posee un costo de 74,40USD

En total el prototipo de sensor actualmente tiene un costo de producción de 529,7 USD.

4.4 FUNCIONAMIENTO PROTOTIPO DE SONDA FONDEF ID19I-10363

Se realizaron pruebas de funcionamiento de algunos de los sensores comprados para implementar el sensor de bajo costo. Las pruebas se desarrollaron en un ambiente controlado y monitoreado durante tiempos variables para evaluar su prestación. Se probaron los sensores de conductividad eléctrica y pH en varias condiciones y se realizó una salida de terreno para comprobar el funcionamiento en ambiente real y la capacidad estanca de la carcasa, a distintas profundidades.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la sonda de conductividad eléctrica y pH. Las pruebas duraron 13 y 16 días respectivamente, durante este tiempo se registraron los datos en intervalos de 5 segundos aproximadamente tanto con los sensores de bajo costo como con sensores disponibles en el mercado.

Se observa en la Figura 4-11 que la conductividad eléctrica fue medida entre los días 3 y 15 de junio, esta medición continúa registrada cada 5 segundos, generó una base de 80.105 datos. Los datos poseen un valor máximo de 944,68 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa una disminución en los valores de la medición hasta 40,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que se repite en algunas mediciones registradas durante el día 14 de junio.

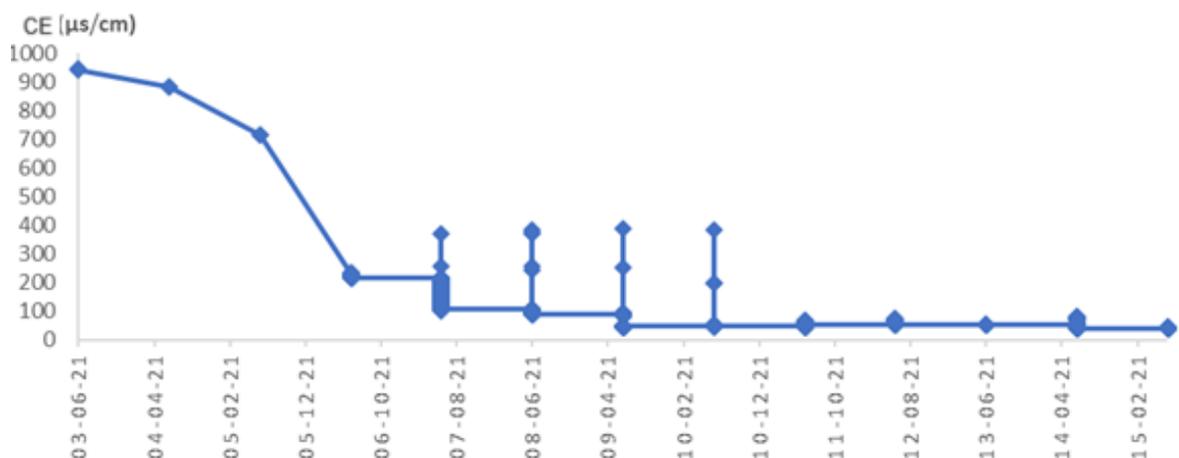


Figura 4-11: Gráfico de resultados de medición de conductividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las mediciones de pH, recopilados entre los días 6 y 21 de junio 2021 (Figura 4-12) registrando valores de forma continua cada 5-10 segundos generó una base de datos de 45.237 mediciones.

Los datos registrados tienen un valor máximo de 5,53 y un valor mínimo de 3,03 los cuales se presentaron los días 8 de junio y 13 de junio respectivamente.

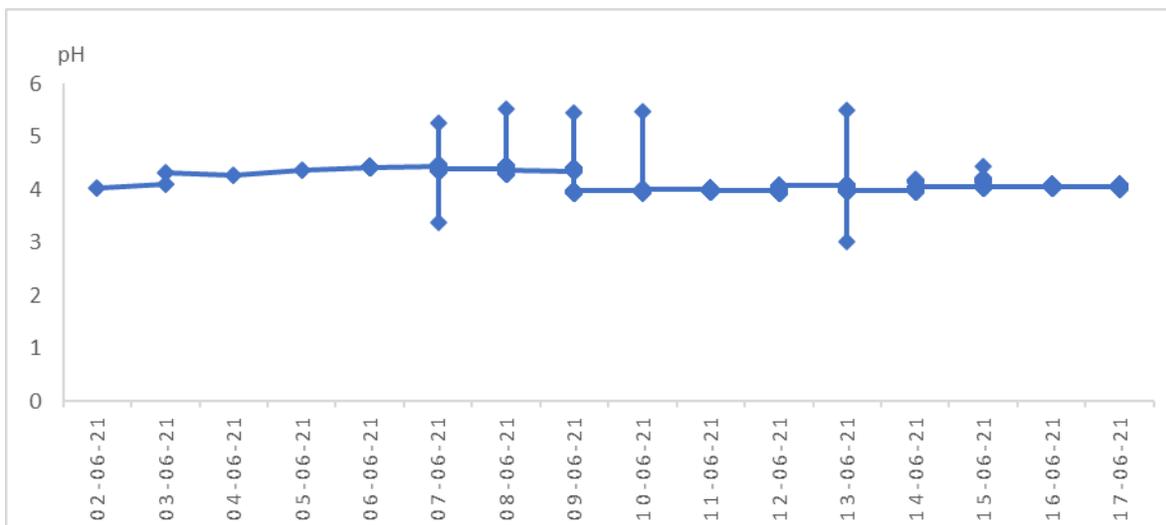


Figura 4-12: Gráfico de resultados de pH.
Fuente: Elaboración propia.

Durante la ejecución de los experimentos se realizó una medición de los mismos parámetros mediante el uso de sensores de alta gama disponibles en el mercado (Sonda LTC Solinst, Sonda Baro Solinst y Multiparámetro HACH HQ40d). Las mediciones de ambas sondas fueron registradas cada 2 minutos, mientras que los parámetros medidos con el multiparámetro se tomaron con intervalo de 1 hora (Figura 4-13).

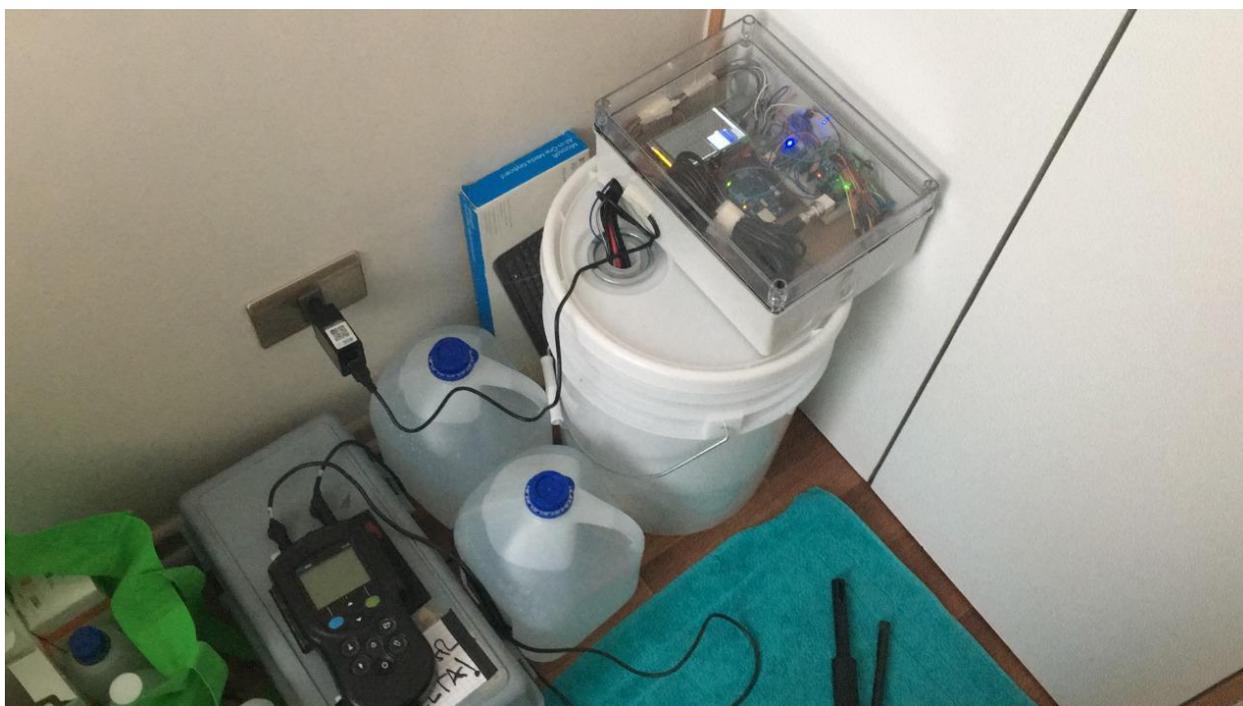


Figura 4-13: Pruebas análogas con sensores disponibles en el mercado.
Fuente: Fondef ID19I-10363

Los resultados del multiparámetro evidenciaron un registro de conductividad eléctrica dentro del rango 850-1400 μ S/cm durante todo el periodo de medición. Se

observa un incremento en el último mes de monitoreo, así como un dato anómalo que corresponde al registro de $24\mu\text{S}/\text{cm}$ el día 7 de febrero (Figura 4-14). Mientras que en el caso de las mediciones de pH este se mantuvo dentro del rango de pH 7,5-8,5 durante el mismo periodo.

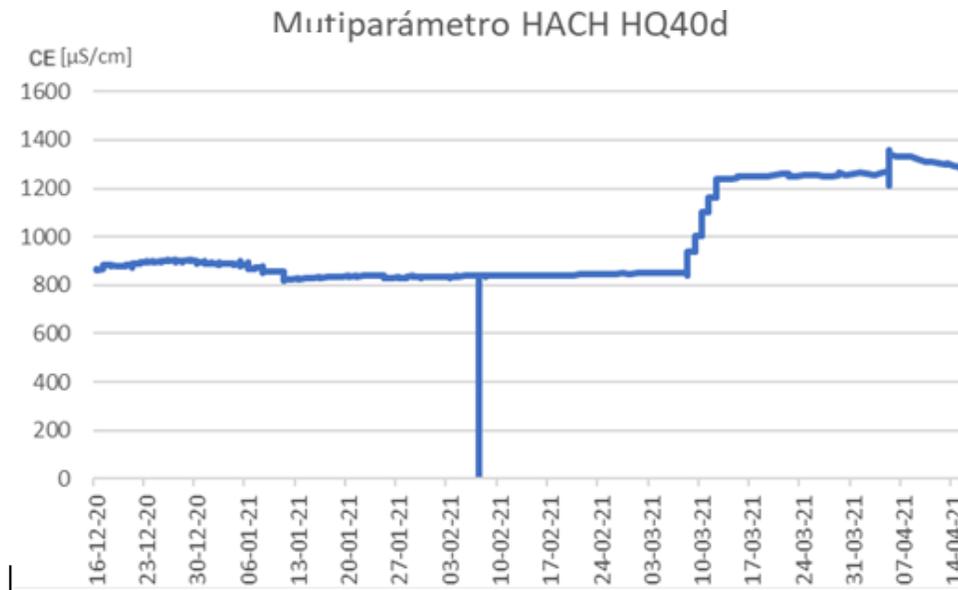


Figura 4-14: Gráfico de Conductividad eléctrica de multiparámetro HACH HQ40d
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la sonda LTC Solinst se tuvo un registro de conductividad eléctrica dentro del rango $850\text{-}1600\ \mu\text{S}/\text{cm}$ durante todo el periodo de medición. Se observa un gradual aumento durante el último mes de monitoreo. Por otro lado, se observan varios datos puntuales que registran un valor de $0\ \mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual ocurre durante todo el tiempo del monitoreo (Figura 4-15).

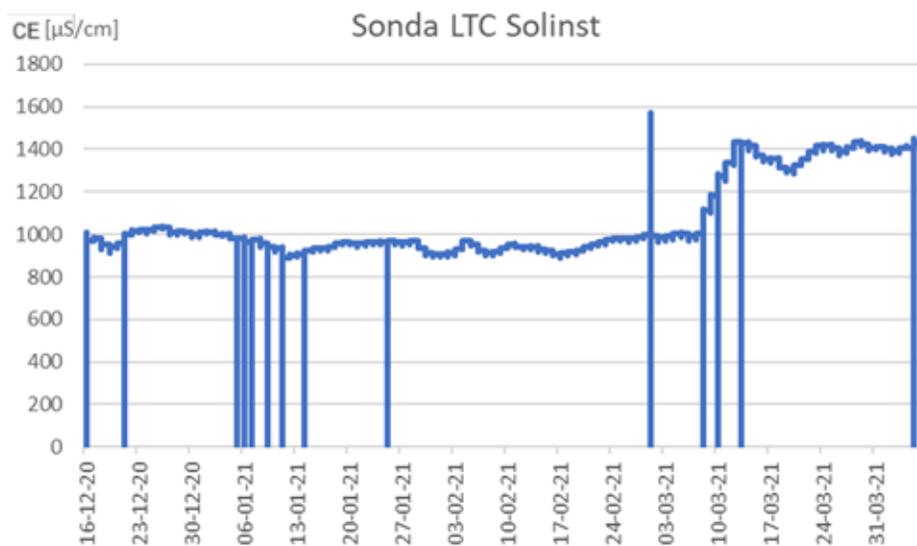


Figura 4-15: Gráfico de Conductividad eléctrica de sonda LTC Solinst.
Fuente: Elaboración propia

4.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESPECIFICACIONES Y COSTOS DEL PROTOTIPO CON RESPECTO A OTRAS SOLUCIONES COMERCIALES

En la Tabla 4 se exponen en detalle las características de 3 sensores del mercado que miden tanto temperatura, conductividad eléctrica y nivel, así como sus precios en el mercado.

Tabla 4: Especificaciones y costos de sensores comerciales.

Criterio/Marca	Van Essen	Van Essen	Solinst	HOBO	
Modelo	CTD Diver (DI 283)	BARO Diver	LTC Levellogger Edge (114619)	Levellogger 5 LT	
Precio (USD)	2.260	549	1.588	664	
Nivel	Rangos de nivel	100	1.5 mH ₂ O	100 m	5, 10, 20, 30, 100, 200 m
	Precisión	±0.5,1.0,2.5,5.0	± 0.5 cmH ₂ O	± 0.05% FS	± 0.05% FS
	Resolución	0.2-0.4-1.0-2.0	0.03 cmH ₂ O	0.001% FS, 0.0006% FS	0.001% FS, 0.0006% FS
Temperatura	Precisión	±0.1°C	±0.1°C	± 0.05°C	± 0.05°C
	Resolución	0.01°C	0.01°C	0.003°C	0.003°C
Conductividad	Rango total	0 a 120.000 µS/cm	-	0 a 100.000 µS/cm	-
	Rango calibrado	1 µS/cm para el rango de 30 mS/cm 10 µS/cm para el rango de 120 mS/cm	-	50 a 80.000 µS/cm	-
	Precisión	±1% con respecto a un mínimo de 10 µS/cm	-	±1% 5,000 µS/cm - 80,000 µS/cm mayor de ±2% o 15 µS/cm desde 80 µS/cm - 5,000 µS/cm	-
	Resolución	0,1%	-	±0,1 µS/cm	-
Otros	Batería	10 años		8 años (1 lectura/minuto)	10 años (1 lectura/minuto)
	Máximo # lecturas	144.000 lecturas con respaldo	72.000 lecturas con respaldo	27.000 sets de lecturas	150,000 sets de lecturas
	tamaño	22 mm x 134 mm	22 mm x 110 mm	22 mm x 190 mm	22 mm x 160 mm
	peso	96 gramos	104 gramos	200 gramos	166 gramos

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al prototipo implementado con sensores de bajo costo, en la Tabla 5 se resumen los distintos rangos de medición para cada uno de los parámetros considerados.

Tabla 5: Umbrales de medición de sensores prototipo.

Variable	Modelo Sensor	Rango	Error	Resolución
T°	DS18B20	-10°C - 85°C	±0.5 °C	0,0625 °C (12 bit)
Presión	HK1100C	0 - 1,2 MPa	1.5% FS	18 kPa 1.8 mt H2O
pH	Gravity: Analog pH Sensor/Meter	0 - 14 pH	±0,1 pH	0,014 pH (12 bit)
Conductividad Eléctrica	Gravity: Analog TDS Sensor/Meter	0 - 1000ppm 0 - 2000 uS/cm 0 - 2mS/cm	± 10% FS 200 uS/cm 0.2 mS/cm	1,3 ppm 2,6 uS/cm (12 bit)
Turbiedad	Grove - Turbidity Sensor/Meter	0 - 3000 NTU	No indica	4,5 NTU (12 bit)

Fuente: Fondef ID19I-10363

4.6 EVALUACIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES DE BAJO COSTO EN CUENCA HIDROGRAFICA.

Con el fin de evaluar los beneficios económicos de implementar sensores de medición de calidad de agua de bajo costo, como el prototipo de sonda implementado en el marco del proyecto FONDEF ID19I-10363, se ha elegido la cuenca del Río Maipo para explorar las diferencias y las oportunidades de estos sensores. Las estaciones de calidad de agua que están localizadas dentro de esta área se han obtenido del portal web de la dirección General de Aguas están representadas en la Figura 4-16.

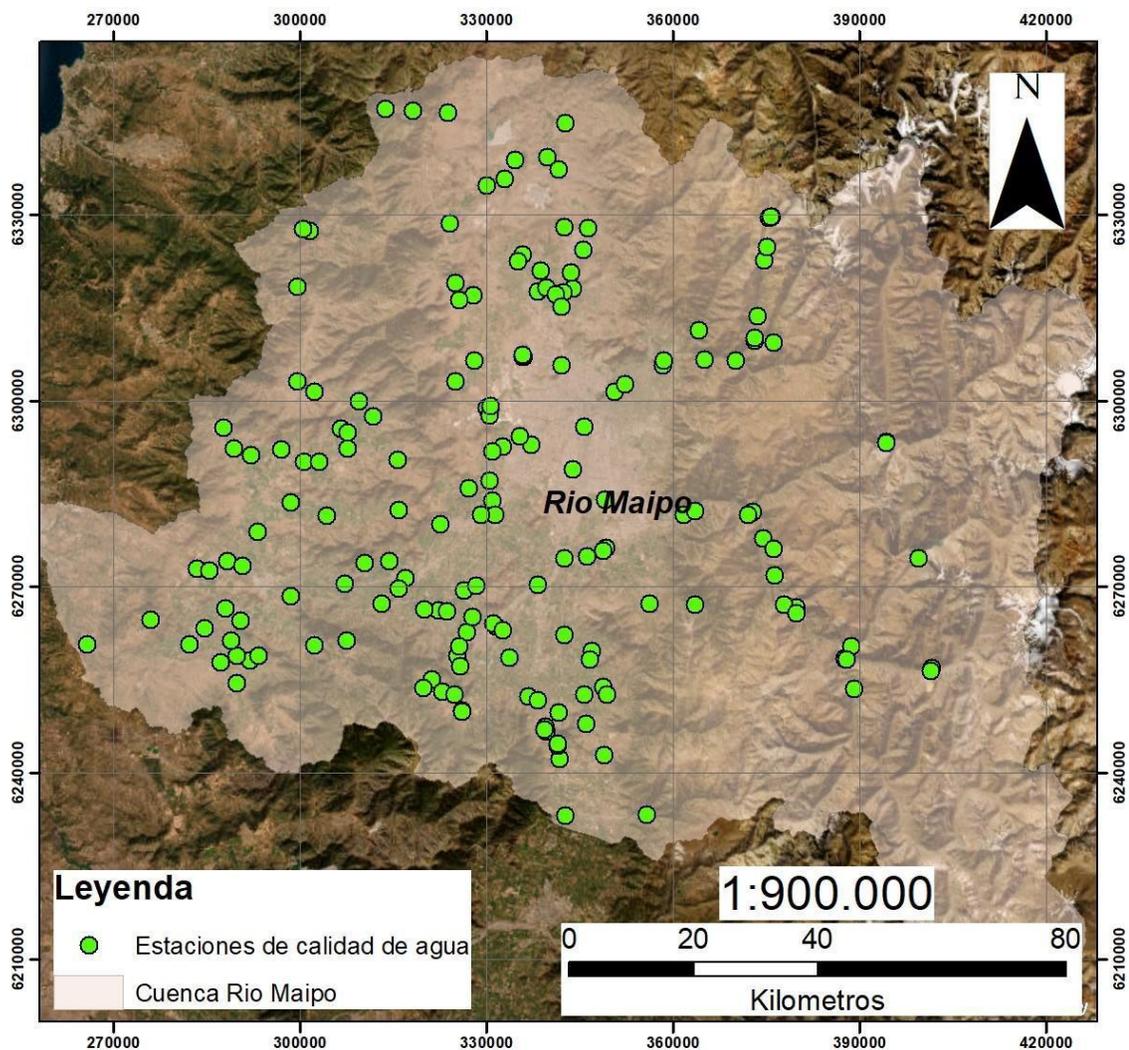


Figura 4-16: Distribución espacial de estaciones de calidad de agua en Cuenca del Río Maipo
Fuente: Elaboración propia con archivos shapefiles disponibles de www.dga.mop.gob.cl

En total se tienen 177 estaciones de calidad de agua vigentes distribuidas en la cuenca del Río Maipo cuya superficie es de 15.273 km², por lo que existe una estación cada 88,83km². Con este dato se puede evaluar el costo de implementar el prototipo de

sensor en dicha cuenca y comparar con el costo de realizar la misma implementación, pero con alternativas actuales en el mercado.

Debido a que el prototipo de sonda en desarrollo permite la transmisión de datos a través de telemetría se elige la configuración de equipos de la marca Van Essen que permiten la captación de parámetros similares a los del prototipo además que funcionan hasta los 100m (misma profundidad máxima a la que el prototipo está diseñado para trabajar) para lo cual se detallan en la Tabla 6 los valores de dicha configuración. Cabe destacar que dentro de este análisis no contempla costos de servicio técnico e instalación de equipos.

Tabla 6: Costos de equipos Van Essen

Equipo	Costo (USD)	Observaciones
CTD Diver	2.260	Hasta 100m. (1 por estación de calidad)
BARO Diver	549	Necesario para realizar compensación de presión atmosférica (1 por cada estación de calidad)
Diver Link	1.736	Dispositivo de telemetría (1 por cada Diver)
Diver DXT data cable	364	Cable de transmisión de datos desde el Diver hasta el Diver Link de 100 m (1 por cada Diver Link)
Costo Diver HUB	110	Plan Premium para monitorear más de 5 equipos. (1 para todas las estaciones)
Costo total para 1 estación de monitoreo	4.909	1 Diver + 1 Diver Link + 1 Diver DXT data cable
Costo total para todas las estaciones de monitoreo en cuenca Rio Maipo (177 estaciones)	869.003	177 Diver + 177 Diver Link + 177 Diver DXT data cable + 1 Plan Premium Diver-HUB

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en el caso de utilizar el prototipo de sonda (considerando la telemetría) se evaluará con el costo de 530 USD que hasta la fecha de este trabajo sería el costo de fabricación del dispositivo.

Tabla 7: Costos de implementar prototipo de sonda

Equipo	Costo USD	Observaciones
Prototipo sonda	530	Hasta 100m. (1 por estación de calidad)
Costo total para 1 estación de monitoreo	530	1 sonda
Costo total para todas las estaciones de monitoreo en cuenca Rio Maipo (177 estaciones)	93.810	177 sondas

Fuente: Elaboración propia

5. DISCUSIONES

5.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Gracias al estudio realizado por IGRAC se tiene una idea del contexto global de los distintos países, desde cuales poseen redes de monitoreo de aguas y cuales no, además permite conocer los distintos agentes a cargo de las redes de monitoreo y difusión de información de los distintos países, con esto se puede realizar un marco comparativo de Chile con respecto a los demás países, lo cual permite analizar los puntos en los cuales la red nacional de monitoreo podría mejorar.

El objetivo más frecuente de una red nacional es el seguimiento de referencia, es decir, evaluar las variaciones temporales y espaciales del agua con respecto a otros procesos ambientales y actividades humanas. También se mencionan que ocasionalmente los objetivos de las redes nacionales incluyen el aporte de información científica y el seguimiento del cumplimiento de la normativa o estándares.

El agua subterránea es percibida en Chile como la solución para enfrentar la creciente demanda de agua. En consecuencia, los acuíferos son objeto de grandes conflictos con el sector privado y proyectos públicos de bombeo para solucionar “milagrosamente” los problemas de escasez de agua. Sin embargo, la falta de conocimiento sobre los sistemas hidrogeológicos, información parcial sobre la evolución del nivel freático en informes oficiales y modelos numéricos basados en supuestos dudosos sin considerar datos de campo respaldan la autorización legal de la extracción de aguas subterráneas (Taucare et al., 2024).

El sistema de monitoreo de calidad de aguas en Chile carece de una red de monitoreo continuo. Siendo la Zona central (IV-VIII Región) el tramo donde se concentran el mayor número de puntos de monitoreo vigentes, mientras que al Norte y Sur del país el número de estaciones y pozos es menor.

En Chile, los objetivos generales de monitoreo son establecidos por la Política Nacional del Agua (DGA 1999a) y son especificados por la DGA. Según el Departamento de Recursos Hídricos de la DGA Conservación y Protección, las actividades de monitoreo deben diseñarse para (DGA 1999b):

- Caracterizar la calidad del agua a nivel nacional, regional y de cuencas, además de determinar tendencias espaciales y temporales;
- Determinar la calidad del agua de referencia (natural);
- Identificar el proceso de contaminación puntual y difuso;
- Verificar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua en materia de salud pública (“Normas Primarias”) y medio ambiente (“Norma Secundaria”); identificar zonas de incumplimiento (“Zona Saturada”) y zonas en peligro de no cumplir con el cumplimiento (“Zona de Latencia”);
- Seguir/rastrear el plan de descontaminación y prevención;
- Determinar el impacto de proyectos específicos y la eficiencia de los medios de mitigación, contingencia, restauración y prevención;

- Detectar y controlar emergencias ambientales, brindar los datos necesarios para la gestión de emergencias;
- Proporcionar datos para informes sobre el cumplimiento de acuerdos internacionales;
- Controlar el cumplimiento de manera efectiva;
- Proporcionar datos para la educación ambiental y la información del público.

En Chile, el Reglamento Secundario de Calidad Ambiental (Norma Secundaria) es la legislación relevante más reciente con respecto a los estándares de calidad del agua y, por lo tanto, relevante para el diseño del monitoreo de aguas.

Otro aspecto que aún no está claro se relaciona con el proceso de seguimiento y control que debe ser emprendido por instituciones gubernamentales. La normativa secundaria establece que la DGA, así como el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), serán los responsables del monitoreo periódico de las aguas y de implementar las medidas requeridas como consecuencia de los resultados del monitoreo.

La DGA actualmente tiene una red de monitoreo activa, y SAG tiende a realizar muestreos y análisis de agua basados en solicitudes de particulares. Sin embargo, la aplicación y el cumplimiento de las regulaciones secundarias requerirán mejorar los niveles actuales de monitoreo en términos de un enfoque más sistemático e integral con respecto a la selección del sitio y la frecuencia de medición. Esto requerirá una importante cantidad de recursos financieros y de personal que debe ir de la mano con un fortalecimiento institucional y coordinación de las instituciones responsables a nivel regional, especialmente DGA, CONAMA y SAG. Además, es necesario desarrollar y seguir procedimientos científicos sólidos para el diseño de redes de monitoreo que permitan generar la información necesaria, omitir redundancias y distribuir los recursos de manera inteligente.

Con respecto al monitoreo de la calidad del agua de la DGA, la práctica actual es muestrear y analizar el agua superficial tres a cuatro veces al año para una amplia gama de parámetros (normalmente alrededor de 30). La legislación chilena sobre calidad del agua proporciona una orientación clara sobre los métodos analíticos que se utilizarán para el monitoreo de calidad, pero deja abierta la forma de determinar los sitios o frecuencias de monitoreo adecuados.

Estos aspectos importantes deben tenerse en cuenta al adaptar el monitoreo para cumplir con los requisitos de la normativa secundaria de calidad agua secundaria en cada cuenca. Aquí, las condiciones naturales imperantes y las alteraciones humanas de cada cuenca deben tenerse en cuenta para determinar una red de monitoreo adecuada, tanto en términos de frecuencia de muestreo y el patrón espacial de las estaciones de muestreo (Ribbe, L. et al., 2008a).

5.2 COMPARATIVA DEL ESTADO DE MONITOREO CHILENO CON RESPECTO A OTROS PAÍSES.

A partir de la información recopilada y presentada en la tabla 3, de todo el listado de países latinoamericanos, la red más grande de monitoreo de agua pertenece a Perú 1.285.220 km² con un total de 3491 pozos de control mientras que Chile (756.700 km²) posee 1059, por lo que a modo de comparativo Perú posee 1 pozo por cada 368 km², mientras que Chile tiene 1 pozo por cada 714,5 km². Por otro lado, Costa Rica es el único país que posee un monitoreo en tiempo real seguido por El Salvador y Brasil cuyas frecuencias de monitoreo son cada 8 y 24 horas, respectivamente. Mientras que el monitoreo de la red nacional de Chile es mensual, por lo que la información posee un espaciado temporal de varios días antes de arrojar alertas.

El monitoreo de Chile permite la visualización y descarga de datos a través del sitio web de la entidad estatal a cargo del monitoreo (DGA), lo cual solo ocurre con Argentina, Brasil y México. Cabe destacar que en Chile los datos son cargados con un desfase temporal, por lo que no están disponibles de forma inmediata.

Por lo que a nivel sudamericano Chile se posiciona como uno de los países con el mayor número de pozos de monitoreo, con una frecuencia de toma de datos relativamente alta y con disponibilidad para entregar estos datos a quien lo requiera.

Dentro de las mejoras que se esperan para el país, es que la red de monitoreo siga creciendo y cubra uniformemente el territorio nacional, esto sumado a un aumento en la frecuencia del monitoreo hasta llegar al punto de generar una red de monitoreo continuo con visualización de datos en tiempo real.

5.3 AVANCES DEL PROTOTIPO DE SONDA

Actualmente tanto el sistema experto como el prototipo implementado en el marco del proyecto aún se encuentran bajo desarrollo y en fase de pruebas, a la fecha se han evaluados sensores que miden el nivel, temperatura, pH, conductividad eléctrica, turbiedad y presión. La sonda alcanzó un estimado de IP67-IP68, lo cual garantiza que son herméticos al polvo y que pueden ser sumergidos hasta 1.5m por 30 minutos sin comprometer su correcto funcionamiento, luego de los arreglos finales ejecutados durante la prueba de 10 días en terreno, queda por evaluar su desempeño en una nueva campaña de terreno donde se considere una mayor permanencia.

Para mejorar la estanqueidad del dispositivo, en la siguiente versión a fabricar para la integración completa del nodo sensor, se mejorará el sellado de los sensores y la entrada del cable de comunicación. Esta nueva versión será probada nuevamente a 30 m de profundidad por un periodo de al menos un mes.

Dentro del campo de la autonomía, cabe mencionar que tanto la sonda como el módulo de comunicación funcionan independientemente mediante el uso de baterías, las cuales permiten una autonomía dependiente de la frecuencia de la toma de datos y de la frecuencia de emisión de datos. Para una configuración de registro de datos cada 30

minutos, la batería de la sonda alcanza una autonomía de 25 días, mientras que el módulo de comunicación generando envíos de datos dentro del rango de 2 a 24hrs permite una autonomía de hasta 28 días. Pasado este periodo para ambos dispositivos, la batería debe ser reemplazada para continuar su uso.

5.4 RESULTADOS DEL PROTOTIPO DE SONDA

Como se puede apreciar en la figura 4-14, al graficar los resultados de la conductividad eléctrica, existe una disminución constante en los valores registrados, con un mayor decaimiento luego de los 3 primeros días. Donde los primeros 3 días registró datos dentro del rango de valores al igual que los sensores del mercado probados a modo de comparación.

Luego comenzando el día 6 de junio se tiene un monitoreo continuo con registros cada 5 segundos en donde se observa un fuerte descenso en las mediciones registrando valores menores a 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto al registro de datos de pH, con se observa en la figura 4-15 los valores mantienen una tendencia constante a valores cercanos al pH 4, con la excepción de 5 eventos de repentina alza ocurridos durante los días 7, 8, 9,10 y 13 de junio, donde se aprecian mediciones puntuales que alcanzan un pH cercano a 5. Así como 2 eventos de descenso en los valores registrados durante los días 7 y 13 de junio con 2 mediciones puntuales que alcanzan valores cercanos al pH 3. Esto discrepa de los datos registrados por los sensores comerciales donde el rango de pH medido fue de 7,5-8,5.

A partir de lo observado en ambos registros de datos, se puede inferir una variación en la captación de datos de los sensores de la sonda, debido a que los valores de conductividad y pH difieren con respecto a los medidos por los sensores de alta gama.

A modo de observación en los gráficos de conductividad y pH de los sensores comerciales Figuras (4-17 y 4-18) se observa que en ambos casos las anomalías se materializan como descensos puntuales. Esto se debe a que durante la experiencia de monitoreo la sonda se retiró del recipiente de agua en casos puntuales.

A la fecha continúa el desarrollo del prototipo de sonda, si bien el dispositivo cumple las expectativas de medir los parámetros deseados en condiciones reales de monitoreo y mantiene umbrales de medición comparables a las distintas soluciones del mercado. La toma de datos ha demostrado ser imprecisa, para la conductividad eléctrica pasado 2 días de monitoreo continuo el sensor genera mediciones erróneas, mientras que para el caso del sensor de pH la toma de datos indica un funcionamiento erróneo del sensor, ya que, registra un pH cercano a 4 cuando debiera estar entre el rango de pH 7-8.

Estos errores se trabajaron mediante una recalibración de los equipos, la cual a la fecha no ha sido evaluada en una nueva actividad de monitoreo. Dentro de los trabajos a futuro para el desarrollo del prototipo se tiene pensado una prueba de drifting de los

datos durante el periodo de 1 a 3 meses que permita evaluar el desempeño de la recalibración del equipo.

5.5 COMPARATIVA DE ESPECIFICACIONES Y EVALUACIÓN DE COSTOS

Cómo se logra observar en las tablas 4 y 5 se puede realizar una comparación con respecto a los parámetros de medición de temperatura y conductividad eléctrica entre los sensores que se encuentran en el mercado y los del prototipo de la sonda.

Con respecto al registro de temperatura se tiene que el sensor experimental posee un umbral de medición de agua de los -10°C hasta los 85°C con un error asociado de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, mientras que el sensor de la marca Solinst posee un rango de -20°C a 80°C con un error asociado de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, el sensor de CTD Diver posee un rango de 0°C a 50°C con un error asociado de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Por último, el sensor ofrecido por HOBO posee un rango de -20°C a 80°C con un error asociado de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ (ANEXO A). El sensor de temperatura experimental posee una resolución menor a las alternativas del mercado, por lo que para mediciones precisas sigue siendo más efectivo el uso de instrumentación más costosa.

Como se observa en la Tabla 4 opciones comerciales que se acercan al valor de 500 USD sería por ejemplo el Levellogger de HOBO el cual solo permite mediciones de nivel y temperatura, por lo que no es un candidato válido para realizar una comparación, dado que el prototipo de sensor es capaz de realizar mediciones de más parámetros.

A partir de lo evidenciado en las Tablas 6 y 7, los costos de implementación una red de monitoreo de calidad de aguas en una cuenca hidrográfica, tomando como referencia la Cuenca del río Maipo, resulta en que al evaluar la instrumentación de cada estación con sensores disponibles en el mercado tomando como referencia a la marca Van Essen y sus dispositivos Diver tiene un costo total de 869.003 USD, mientras que al equipar el mismo número de estaciones con el prototipo de sensor cuesta 93.810 USD, lo cual supone un 10,8% del valor total implementando dispositivos Van Essen.

A la fecha de este estudio el prototipo de sonda alcanza un valor de 530 USD por lo cual se mantiene dentro del rango de precio colocándose como una opción viable de competencia a los sensores actualmente disponibles en el mercado.

6. PROYECCIONES A FUTURO

El monitoreo del agua es útil en la gestión de desastres como una etapa temprana del sistema de alerta. En las distintas perspectivas de un consumidor, el monitoreo de aguas es un servicio que a menudo enfrenta muchos desafíos, ya que se enfrentará a un escenario en tiempo real. Por lo que existe la necesidad de sistemas de monitoreo de aguas en línea dado que la actualidad los sistemas basados en análisis de laboratorio son demasiado lentos para mejorar la respuesta efectiva y no ofrecen el nivel de protección pública en tiempo real (Kamaruidzaman et al. 2020).

El desarrollo de estrategias y políticas nacionales para la gestión del recurso hídrico durante los últimos años consideran la GIRH como pilar fundamental, buscando superar limitaciones provenientes de la fragmentación de competencias y agendas entre distintas instituciones del Estado. Adicionalmente, la búsqueda del bienestar común con una visión de largo plazo a través de la GIRH entra en tensión con la preeminencia de los DA establecidos en el Código de Aguas, que revisten características de propiedad privada y que son transables. Se necesita introducir modificaciones al Código de Aguas para una implementación vinculante, efectiva y operativa de la visión del agua como bien nacional de uso público. Además de un marco institucional y normativo compatible con una GIRH en Chile, existen otros grandes desafíos para el mejoramiento y protección de la calidad del agua, que se pueden resumir en tres áreas:

(1) Definición de políticas públicas basadas en ciencia donde exista una comprensión común de los procesos que regulan la calidad del agua, donde el uso de modelos conceptuales y cuantitativos junto a programas de monitoreo y vigilancia son fundamentales en construir, mejorar continuamente y legitimar esta comprensión para la toma de decisiones;

(2) Desarrollar e implementar planes de monitoreo y vigilancia de calidad del agua que sean más extensos, lo cual implica mejorar la densidad, frecuencia y la cantidad de parámetros de forma coherente con la dinámica de las presiones naturales y antrópicas sobre la calidad del agua y las respuestas de los sistemas acuáticos. Un ejemplo claro de esto es la dinámica de metales y metaloides que tienen fuentes naturales y antrópicas que pueden ser movilizados por actividades mineras, ejerciendo una presión sobre recursos usados para abastecer ciudades, agricultura y sostener ecosistemas acuáticos. Asimismo, se necesita caracterizar la ocurrencia y transformaciones de contaminantes emergentes con potenciales riesgos sobre la salud humana y ecosistémica; y

(3) Desarrollar tecnologías que permitan mejorar y proteger la calidad del agua en formas más sostenibles, considerando el nexo agua-energía-alimentación para disponer de sistemas más adaptables y resilientes a las necesidades presentes y futuras.

El monitoreo y vigilancia de la calidad del agua es una parte esencial en la gestión de la calidad del agua (Figura 6-1). El monitoreo y vigilancia debe insertarse en un marco institucional y normativo con propósitos claros asociados a una GIRH, coherente con la

visión, objetivos y metas asociados a la agenda de sostenibilidad. Asimismo, debe existir un financiamiento sustantivo y de largo plazo con alianzas público-privadas para la realización de programas de I+D+i, la formación de capital humano y el establecimiento de sistemas de gestión de información integrados. Debe complementarse con la participación de actores diversos que den viabilidad y legitimidad para una comprensión común de la calidad del agua, con programas de monitoreo participativo, programas de autocontrol de la industria, sumados a la vigilancia desde instituciones estatales (i.e., DGA, SISS, SMA, MMA).

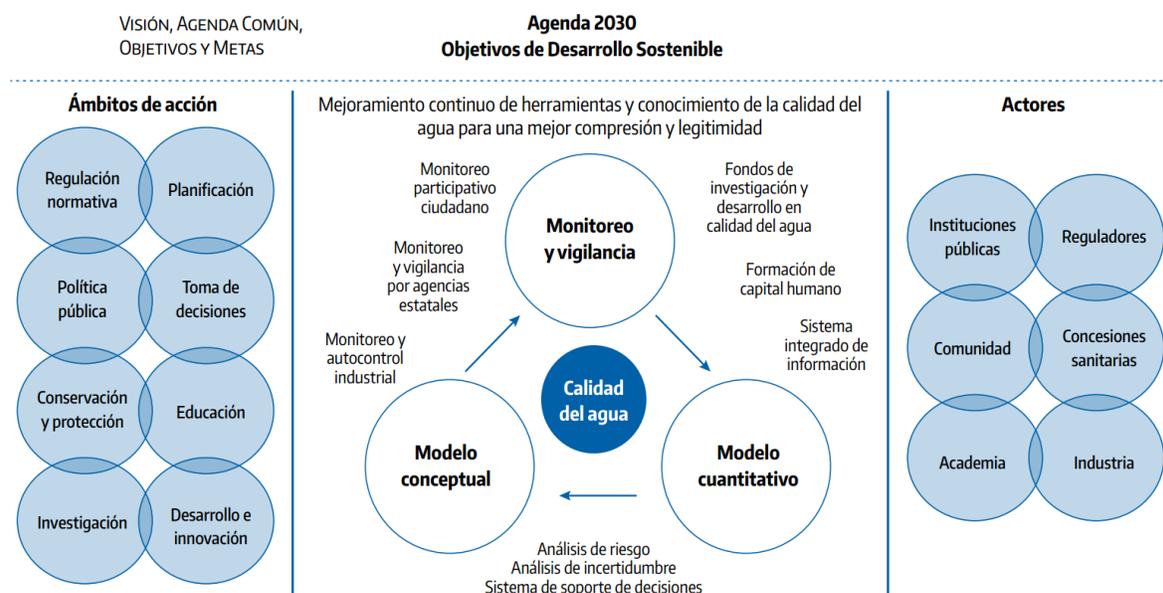


Figura 6-1: Enfoque propuesto para la toma de decisiones y políticas públicas orientadas a mejorar y proteger la calidad del agua.

Fuente: IANAS, (2019).

El análisis de las características de la red de monitoreo de calidad y las presiones sobre la calidad del agua en Chile, junto con las prácticas internacionales, permite identificar algunos parámetros que deberían ser considerados en el corto y mediano plazos para incorporarse a campañas de monitoreo en cuerpos de agua, ya sea en la red nacional operada por la DGA o en los siguientes planes de vigilancia de las NSCA.

Así, es necesario que los sistemas de monitoreo y vigilancia recopilan sistemáticamente información que permita identificar y caracterizar la ocurrencia, y gestionar los contaminantes emergentes, por ejemplo, a través de normas primarias y/o secundarias. Esto involucra un desafío triple: (1) recolectar evidencia que permita asociar ocurrencia con efecto, de modo que su gestión sea basada en el riesgo y sobre la base de datos nacionales; (2) disponer de métodos analíticos que permitan realizar mediciones con un desempeño analítico adecuado y un costo alcanzable; y (3) disponer de tecnologías costo efectivas de control adaptadas a la realidad nacional. Para abordar estos desafíos, el trabajo de las universidades y centros de investigación dentro de una política asertiva de I+D+i juega un rol clave.

Con el fin de aumentar la recopilación y accesibilidad de datos sobre el nivel del agua, las agencias deben examinar formas de aumentar la coordinación entre instituciones para así construir y mantener redes de observación de pozos, recolectando mediciones del nivel del agua, compartir y difundir datos. Mientras mayor sea la cooperación entre agencia se ayudará a garantizar que los esfuerzos por la recopilación de datos sean suficientes para abordar cuestiones relevantes sobre los problemas de recursos hídricos a nivel local, regional y nacional.

Por esto es por lo que la generación de nuevas tecnologías cada día se vuelve un tema de mayor importancia, debido a que el agua se ha convertido en un bien de primera necesidad para los países y para su correcta administración se debe tener la mayor cantidad de información posible y al generarse nuevas tecnologías los precios de estas irán bajando a modo que su implementación sea más viable, generando mejores redes de monitoreo y plataformas de transmisión de datos.

El monitoreo proporciona evidencia objetiva necesaria para tomar decisiones acertadas sobre la gestión de la calidad del agua hoy y en el futuro. El monitoreo de la calidad del agua se utiliza para alertarnos sobre los problemas actuales y emergentes; para determinar el cumplimiento de las normas de agua potable y para proteger otros usos beneficiosos del agua. Evaluaciones basadas en los datos de monitoreo ayudan a los legisladores y administradores del agua a medir la efectividad de las políticas de agua, determinar si la calidad del agua está mejorando o empeorando, y formular nuevas políticas para proteger mejor la salud humana y el medio ambiente. (Myers, 2015).

WARD et al. (1986) declaró que muchos programas de monitoreo de la calidad del agua pueden clasificarse como ricos en datos, pero de deficiente información, refiriéndose al hecho de que a menudo se dispone de grandes conjuntos de datos de monitoreo de la calidad del agua, pero que se recopilaron sin objetivos claramente definidos para tratar problemas reales de gestión del agua.

7. CONCLUSIONES

Una red de monitoreo continuo de calidad de aguas permite una respuesta temprana ante la ocurrencia de eventos, generando alertas inmediatas a medida que ocurre un cambio, lo cual disminuye el tiempo de respuesta y toma de decisiones por las entidades correspondientes. También facilita la identificación de fallas en tiempo real que sin continuidad en los datos se investigan retrospectivamente, especialmente si se dispone de datos limitados.

Con respecto a los objetivos iniciales del trabajo el análisis realizado al sistema de monitoreo de calidad de agua nacional gestionado por la institución estatal Dirección General de Aguas (DGA), evidencia que Chile no posee un monitoreo continuo de medición de calidad de agua, además que la red de monitoreo actualmente está compuesta por pozos y estaciones de observación que se concentran en el sector central del país y con un menor número de puntos de observación en la zona norte y sur, lo cual se traduce en una cantidad de información desigual a lo largo del territorio nacional. Por otro lado, el monitoreo de calidades de agua se realiza mediante la toma de muestras in situ, el cual se realiza entre 3 a 4 veces al año, lo cual no permite una alerta temprana en caso de ocurrir alguna emergencia ambiental. Además, en el caso de las aguas subterráneas los puntos de control no han sido específicamente construidos para tal fin y dependen de la disponibilidad de acceso a ellos.

A través de la implementación de nuevas tecnologías de menor costo con respecto a las alternativas actuales de mercado, la red de monitoreo nacional podría ser más completa, lo cual permitiría una mayor fiscalización y administración del recurso hídrico nacional. De esta forma la red de monitoreo nacional se podría ampliar siguiendo una priorización y quizás dejando los sensores de bajo costo en lugares más accesibles vistos los resultados iniciales de las baterías analizadas en el FONDEF ID19I-10363.

Mediante el registro de los datos del prototipo se evidencian errores en la toma de datos, por lo que la implementación del prototipo desarrollado actualmente no podría ser llevada a cabo considerando estos primeros resultados. Sin embargo, el equipo investigador realizó experimentos adicionales que arrojaron nuevas calibraciones a los dispositivos, que serán probados en las siguientes etapas de desarrollo donde se deberán efectuar nuevas mediciones en un ambiente controlado y luego en condiciones normales en terreno.

Al generar un cálculo de costos en una cuenca considerada como ejemplo, la implementación del prototipo de sonda genera una disminución considerable en los costos ya que está costaría solo el 10,8% del valor total de las soluciones comerciales.

Si bien la propuesta inicial era de producir un prototipo de hasta 500 USD, los 530 USD del prototipo no se consideran una desviación importante con respecto al objetivo inicial. Se espera que a futuro se logre disminuir este valor, permitiendo el envío remoto de datos en tiempo real, mediante una interfaz que permita establecer mejores caracterizaciones de las distintas zonas de estudio. La idea es facilitar a más usuarios el acceso a datos que permitan mejorar la gestión del agua dulce.

Finalmente, se considera que una opción viable sería disponer de una red de monitoreo establecida en varios niveles de confianza en la generación de datos mezclando las opciones comerciales con las de bajo costo en la medida de lo posible.

8. BIBLIOGRAFÍA

Chapman, D. V. ed. (1996). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. World Health Organization, Unesco & United Nations Environment Programme. London. 626 pp.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua, Redes de Monitoreo Piezométrico, (Consultado el: 27/06/2019). Disponible en: <https://sigagis.conagua.gob.mx/rp/>.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (2018). RIMAS Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, (Consultado el: 22/12/2020). Disponible en: <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.ph>

De León, L. (2011). Evaluación de la calidad del agua del río Cuareim, *período 2006-2010*. Proyecto DINAMA-PNUD. RU/07/012-TDR 3.12.

Destandau François & Zaiter Youssef. (2020). "Spatio-Temporal Design for a Water Quality Monitoring Network Maximizing the Economic Value of Information to optimize the detection of accidental pollution," Post-Print hal-03373487, HAL.

DGA, 1999a *Política Nacional de Recursos Hídricos*. SDT No. 49. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.

DGA, 1999b. *Visión Estratégica 2000-2004 - Departamento Conservación y Protección de Recursos Hídricos*. Minuta, DGA, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Republica de Chile, Santiago.

DGA1. Dirección General de Aguas, Red Hidrométrica Nacional, (Consultado el: 20/06/2020). Disponible en: <https://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=d508beb3a88f43d28c17a8ec9fac5ef0>

Faña, B.J. (2002) Evaluación Rápida de la contaminación Hídrica. Ediciones G.H.e.N Grupo Hidro-ecológico Nacional. Inc. (G.H.e.N). República Dominicana. [en línea]. [marzo 2 de 2002.09-15'22"]. Disponible en: <http://www.ambienteecologico.com/06702%202000/juannicolasfania67.htm>

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327.

GWP. Global Water Partnership. (2017). La Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica: Hacia una gestión integrada. Informe inédito. 102 pp.

IANAS & UNESCO. (2015). Desafíos del Agua Urbana en las Américas. Perspectivas de la Academia de Ciencias. Informe inédito. 638 pp.

- IGRAC1. International Groundwater Resources Assessment Centre.** (2014). Groundwater Monitoring in Latin America. Informe inédito. 16 pp.
- Kamaruidzaman, N. & Siti N. R.** (2020). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 498 012068
- Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y. y Gerbens-Leenes, W.** (2012). «Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers». *Ecological Indicators*, vol. 18, págs. 42 a 49.
- Maddocks A.**(2015). <https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040>.
- MARN2. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. Aplicación del Sistema de Información Hídrica (SIHI),** (Consultado el: 26/06/2020). Disponible en: <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/pozosmonitoreo>.
- MINAE2. Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica, Visor de Mapas del Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (SINIGIRH),** (Consultado el: 27/06/2020). Disponible en: <http://mapas.da.go.cr/>
- Molden, D. ed.** (2007). Evaluación exhaustiva del manejo del Agua en Agricultura. Agua para la Alimentación, Agua para la Vida. Londres: Earthscan y Colombo: Instituto Internacional del Manejo del Agua.
- MVOTMA. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.** (2017). Plan Nacional de Aguas, Montevideo, Uruguay. 320 pp.
- Myers, Donna.** (2015). Foundations of Water Quality Monitoring and Assessment in the United States. 10.1016/B978-0-12-800211-7.00002-8.
- Ribbe, L., Atenas, M., Kretschmer, N., Oyarzún, R., & Salgado, E.** (2008a). Monitoring to Support Water Quality Management in North-Central Chile. In Proceedings of the World Water Congress, OS1n-Water quality 2.
- Rivera, A. (ed.),** (2014). Canada's Groundwater Resources; Fitzhenry & Whiteside Limited, Markham, Ontario, 804 p.
- Roldán, G.** (2003). Bioindicación de la calidad de agua en Colombia: Uso del Método BMWP/Col. Colección Ciencia y Tecnología. Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Ruz Vargas, Claudia & Samaniego, Lucía & Medina, Miguel.** (2020). Estado actual del Monitoreo de agua subterránea en América Latina e Introducción al programa GGMN. Aqua-LAC. 12. 118-126. 10.29104/phi-aqualac/2020-v12-1-10.
- Secretaría del Agua.** (2016). Gestión de Aguas Subterráneas en el Ecuador. Informe inédito. 17 pp.
- Spellerberg, I. F.** (2005). Monitoring ecological change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 410 pp.

Storey, M. V., van der Gaag, B., & Burns, B. P. (2011). Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water research*, 45(2), 741–747.

Taucare Toro, Matías & Viguier, Benoît & Figueroa, Ronny & Daniele, Linda. (2024). The alarming state of Central Chile's groundwater resources: A paradigmatic case of a lasting overexploitation. *Science of The Total Environment*. 906. 167723. 10.1016/j.scitotenv.2023.167723.

Underwood, A. J. (1992). Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 161: 145-178.

USGS. United States Geological Survey. (2016). U.S. Department of the Interior, (Consultado el: 22/05/2020). Disponible en: <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>.

Vammen, Katherine & Vaux, Henry & Roldán, Gabriel & Tundisi, Jose & González, Ernesto. (2019). Calidad de Agua en las Americas. Riesgos y Oportunidades IANAS. IGRAC1. International Groundwater Resources Assessment Centre. (2014). Groundwater Monitoring in Latin America. Informe inédito. 16 pp.

Vega, Alejandra & Lizama, Katherine & Pastén, Pablo. (2018). Water Quality: Trends and Challenges. 10.1007/978-3-319-76702-4_3.

Wada, Y., M. Flörke, N. Hanasaki, S. Eisner, G. Fischer, S. Tramberend, Y. Satoh, M.T.H. van Vliet, P. Yillia, C. Ringler, and D. Wiberg. (2016): Modeling global water use for the 21st century: Water Futures and Solutions (WFA) initiative and its approaches. *Geosci. Model Dev.*, 9, 175-222, doi:10.5194/gmd-9-175-2016.

Ward, R.C., Loftis, J.C. and McBride, G.B. (1986). The Data-Rich but Information-Poor Syndrome in Water Quality Monitoring. *Environ. Manag.* 10: 291-297.

WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Las aguas residuales El recurso desaprovechado. París, UNESCO.

Xavier, F., Martins, L., Oyamada, M., Spanhol, F., Coutinho, F., Pfrimer, F., & de Camargo, E. (2022). Evaluation of low-cost sensors for real-time water quality monitoring. In *Anais Estendidos do XII Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais*, (pp. 56-61). Porto Alegre: SBC. doi:10.5753/sbesc_estendido.2022.228152

ANEXOS

ANEXO A. FICHAS TÉCNICAS DE SENSORES EN EL MERCADO



1.1 Levellogger Series

[1.1.1 Levellogger 5](#) [More Info](#) | [Instructions](#) | [Get Quote](#)

The Levellogger 5 is an absolute (non-vented) datalogger, which measures groundwater and surface water levels and temperature. Water levels are displayed as temperature compensated pressure readings, and can be barometrically compensated with the aid of a Barologger 5.

Note: Solinst recommends using the most recent Levellogger 5 firmware version with the latest Levellogger Software version. See Section 2.3.



Levellogger 5 Technical Specifications	
Level Sensor:	Piezoresistive Silicon with Hastelloy® Sensor
Ranges:	5, 10, 20, 30, 100, 200 m
Accuracy	± 0.05% FS
Resolution:	0.001% FS, 0.0006% FS
Normalization:	Automatic Temperature Compensation
Temp. Comp. Range:	0°C to 50°C
Temperature Sensor:	Platinum Resistance Temperature Detector (RTD)
Temp. Sensor Accuracy:	± 0.05°C
Temp. Sensor Resolution:	0.003°C
Battery Life:	10 years (based on 1 reading/minute)
Clock Accuracy (typical):	± 1 minute/year (-40°C to 80°C)
Operating Temperature:	-20°C to 80°C
Maximum # Readings:	150,000 sets of readings
Memory:	Continuous or Slate mode
Communication Speed:	9600 bps, 57,000 bps with USB
Com Interface:	Optical high-speed: USB, SDI-12
Size:	22 mm x 160 mm (7/8" x 6.3")
Weight:	166 grams (5.9 oz.)
Corrosion Resistance:	Baked-on coating using polymerization technology (inside and out) and superior corrosion resistant Hastelloy pressure sensor
Wetted Materials:	Delrin®, Viton®, 316L Stainless Steel, Hastelloy, Regulator approved PFAS-free PTFE
Sampling Modes:	Linear, Event & User-Selectable Schedule with Repeat Mode, Future Start, Future Stop, Real Time View
Measurement Rates:	0.125 second to 99 hours
Barometric Compensation:	High accuracy, air-only, Barologger

Models	Full Scale	Accuracy	Resolution
M5	5 m (16.4 ft.)	± 0.3 cm (0.010 ft.)	0.001% FS
M10	10 m (32.8 ft.)	± 0.5 cm (0.016 ft.)	0.0006% FS
M20	20 m (65.6 ft.)	± 1 cm (0.032 ft.)	0.0006% FS
M30	30 m (98.4 ft.)	± 1.5 cm (0.064 ft.)	0.0006% FS
M100	100 m (328.1 ft.)	± 5 cm (0.164 ft.)	0.0006% FS
M200	200 m (656.2 ft.)	± 10 cm (0.328 ft.)	0.0006% FS

Note: The Model number refers to the depth of submergence below water level that the pressure sensor can withstand. I.e.: The Levellogger 5, which is available in M5, M10, M20, M30, M100, and M200 ranges has actual water level ranges of 5 m (16.40 ft), 10 m (32.80 ft), 20 m (65.60 ft), 30 m (98.40 ft), 100 m (328.0 ft), and 200 m (656.2 ft), respectively.

1.1.6 Levellogger Edge

The Levellogger Edge is an absolute (non-vented) datalogger, which measures groundwater and surface water levels and temperature. Water levels are displayed as temperature compensated pressure readings, and can be barometrically compensated with the aid of a Barologger.

Note: Solinst recommends using the most recent Levellogger Edge firmware version with the latest Levellogger Software version. See Section 2.3.



Levellogger Edge Technical Specifications	
Level Sensor:	Piezoresistive Silicon with Hastelloy Sensor
Ranges:	5, 10, 20, 30, 100, 200 m
Accuracy:	± 0.05% FS
Resolution:	0.001% FS to 0.0006% FS
Normalization:	Automatic Temperature Compensation
Temp. Comp. Range:	0°C to 50°C
Temperature Sensor:	Platinum Resistance Temperature Detector (RTD)
Temp. Sensor Accuracy:	± 0.05°C
Temp. Sensor Resolution:	0.003°C
Battery Life:	10 years (based on 1 reading/minute)
Clock Accuracy (typical):	± 1 minute/year (-20°C to 80°C)
Operating Temperature:	-20°C to 80°C
Maximum # Readings:	40,000 sets of readings
Memory:	Continuous or Slate mode
Communication Speed:	9600 bps, 38,400 bps with USB optical reader
Com Interface:	Optical Infra-red: USB, RS-232, SDI-12
Size:	22 mm x 159 mm (7/8" x 6.25")
Weight:	129 grams (4.5 oz.)
Corrosion Resistance:	Titanium based PVD coated body and superior corrosion resistant Hastelloy sensor
Other Wetted Materials:	Delrin, Viton, 316L Stainless Steel
Sampling Modes:	Linear, Event & User-Selectable Schedule with Repeat Mode, Future Start, Future Stop, Real Time View
Measurement Rates:	0.125 second to 99 hours
Barometric Compensation:	High accuracy, air-only, Barologger Edge

Models	Full Scale	Accuracy	Resolution
M5	5 m (16.4 ft.)	± 0.3 cm (0.010 ft.)	0.001% FS
M10	10 m (32.8 ft.)	± 0.5 cm (0.016 ft.)	0.0006% FS
M20	20 m (65.6 ft.)	± 1 cm (0.032 ft.)	0.0006% FS
M30	30 m (98.4 ft.)	± 1.5 cm (0.064 ft.)	0.0006% FS
M100	100 m (328.1 ft.)	± 5 cm (0.164 ft.)	0.0006% FS
M200	200 m (656.2 ft.)	± 10 cm (0.328 ft.)	0.0006% FS

Technical information on Divers



The elongated apertures at the nose of the CTD Diver ensure that the liquid flows through smoothly.

All models meet the following specifications:

<i>Outside diameter</i>	Ø22 mm
<i>Length</i>	183 mm including suspension eye
<i>Weight</i>	approx. 150 grams
<i>Protection class</i>	IP68
<i>Storage/transport temperature</i>	-20°C to 80°C (affects the life of the battery)
<i>Material</i>	
– <i>housing</i>	zirconia (ZrO ₂)
– <i>pressure sensor</i>	aluminium oxide (Al ₂ O ₃)
– <i>suspension eye</i>	Akulon (fibreglass-reinforced)
– <i>nose cone</i>	Akulon (fibreglass-reinforced)
<i>Communication</i>	RS232 (optically separated)
<i>Memory</i>	16,000 measurements (non-volatile memory), each measurement consists of date, time, level, temperature and conductivity
<i>Sample rate</i>	1.0 sec. to 99 hrs
<i>Sample method</i>	fixed sample rate or variation-dependent (conductivity channel)
<i>Battery life*</i>	average of 8-10 years, depending on use
– <i>theoretical capacity</i>	2,000,000 measurements 500 full memory read-outs
<i>Clock accuracy**</i>	better than 2 sec. per day at 25°C

Technical information on Divers

<i>CE mark</i>	according to directive 89/336/EEC
- <i>Impermeability (ESD)</i>	to electrostatic discharge according to EN 61000-4-2 (1995)+A1 (1998)+A2 (2001)
- <i>Impermeability (EMC)</i>	to electromagnetic fields according to EN 61000-4-3 (2001)+A1 (2002)
- <i>Test report number</i>	04C00491RPT01

The following applies to the temperature measurements of the CTD Divers:

<i>Measuring range</i>	-20°C to 80°C 0°C to 40°C (Operating Temperature (OT))
<i>Accuracy</i>	±0.1°C (OT)
<i>Resolution</i>	0.01°C

The specifications for the water pressure measurements differ from CTD Diver to CTD Driver:

	DI261	DI263	DI265
<i>Pressure range</i>			
<i>Range</i>	950-1,950 cm wc	950-3,950 cm wc	950-10,950 cm wc
<i>Usable range (full scale (FS))</i>	900 cm wc	2,900 cm wc	9,900 cm wc
<i>Zero pressure range</i>	650 cm wc		
<i>Accuracy</i>	±0.1% FS typ.@ OT		
<i>Resolution</i>	0.2 cm wc	0.6 cm wc	2 cm wc
<i>Maximum pressure (MP)</i>	2,000 cm wc	3,500 cm wc	15,000 cm wc
<i>Long-term stability</i>	±2 cm wc	±3 cm wc	±10 cm wc
<i>Conductivity</i>			
<i>Measuring cell housing</i>	aluminium oxide (Al ₂ O ₃)		
<i>Range (full scale (FS))</i>	20 µS/cm tot 80 mS/cm (auto ranging)		

Technical information on Divers

<i>Accuracy</i> ***	typ. $\pm 1\%$ measurement value or 10 $\mu\text{S/cm}$, whichever is higher
<i>Resolution</i>	0.1% measurement value or 0.1 $\mu\text{S/cm}$, whichever is higher
<i>User calibration</i>	at 1.413 mS/cm, 5.00 mS/cm, 12.88 mS/cm and 80.0 mS/cm

General

<i>Transport</i>	suitable for transport by road, water and air; supplied in case
<i>Vibration resistance</i>	according to MIL-810
<i>Mechanical shock test</i>	according to MIL-810, lightweight equipment

Chemical resistance

<i>Dirt</i>	Insensitive to hydrogen sulphide (H_2S), Na, Cl and Fe ions. Stable in ethanol and BTEX components and chlorinated hydrocarbons. This applies to concentrations that are normally found in groundwater.
<i>Corrosion resistance</i>	Within the specified temperature ranges, the materials used for the housing, the suspension eye and the nose cone are suitable for continuous use in fresh, brackish or saltwater.

* The CTD Diver is always active. The leakage current of the internal battery depends on the temperature. If you keep the Diver at a high temperature or transport it for long periods of time, this may shorten the life of the battery.

**The accuracy of the clock depends on a variety of factors. When used at a different temperature, the clock accuracy is increased by a factor of -0.04 ppm times the difference between that temperature and 25°C squared.

***The accuracy of the conductivity measurement depends on the field calibration. The specified accuracy figures across the entire measurement range only apply if you calibrate all four features of the CTD Diver. You will find more information on this subject on page 11 in the section '*Calibrating the conductivity cell*'.



2.5 Pressure

The specifications for atmospheric and water pressure measurements vary by type of Diver. The specifications below apply at operating temperature.

TD-Diver	DI801	DI802	DI805	DI810	Unit
Water column measurement range	10	20	50	100	mH ₂ O
Accuracy (max)	± 2.0	± 4.0	± 10.0	± 20.0	cmH ₂ O
Accuracy (typical)	± 0.5	± 1.0	± 2.5	± 5.0	cmH ₂ O
Long-term stability	± 2	± 4	± 10	± 20	cmH ₂ O
Resolution	0.2	0.4	1	2	cmH ₂ O
Display resolution	0.058	0.092	0.192	0.358	cmH ₂ O
Overload pressure	15	30	75	150	mH ₂ O

Baro-Diver	DI800	Unit
Water column measurement range	1.5	mH ₂ O
Accuracy (max)	± 2.0	cmH ₂ O
Accuracy (typical)	± 0.5	cmH ₂ O
Long-term stability	± 2	cmH ₂ O
Resolution	0.1	cmH ₂ O
Display resolution	0.058	cmH ₂ O
Overload pressure	15	mH ₂ O

8

2.5.1 Water Column Measurement Range

The height of water above the Diver that can be measured.

2.5.2 Accuracy (maximum)

Accuracy is the proximity of measurement results to the true value. Algebraic sum of all the errors that influence the pressure measurement. These errors are due to linearity, hysteresis and repeatability. During the Diver calibration process a Diver is rejected if the difference between the measured pressure and the applied pressure is larger than the stated accuracy.

2.5.3 Accuracy (typical)

At least 68% of the measurements during the calibration check are within 0.05% FS of the measurement range.



2 Technical Specification

2.1 General

The Baro-Diver is used for atmospheric pressure and temperature measurements. There are four TD-Diver models with different pressure ranges for pressure and temperature measurements. The table below lists the general specifications of the Baro-Diver and TD-Diver.

Diameter	Ø 22 mm
Length (incl. suspension ~ 110 mm eye)	
Weight	~ 104 grams
Materials	
Casing	Pickled and passivated 316L stainless steel
Pressure sensor	Alumina (Al ₂ O ₃)
Suspension eye	Nylon PA6 glass fiber reinforced 30%
nose cone	ABS
O-rings	Viton®
Communication	
Interface	Optically separated
Protocol	Serial RS232, a limited set of commands is available as specified in Appendix II
Memory capacity	144,000 measurements
working	72,000 measurements
backup	72,000 measurements
Memory	Non-volatile memory. A measurement consists of date/time/pressure/temperature continuous and fixed length memory
Battery life*	Up to 10 years, depending on use
Theoretical battery capacity	10.5 million measurements + 1000× full memory readouts + 2000× programming
Clock accuracy	Better than ± 1 minute per year at 25 °C Better than ± 5 minutes per year within the operating temperature range
CE marking	EMC in accordance with the 89/336/EEC directive Basic EN 61000-4-2 standard
Emissions	EN 55022 (1998) + A1 (2000) + A2 (2003), Class B
Immunity	EN 55024 (1998) + A1 (2000) + A2 (2003)

* **The Diver is always in stand-by when not making a measurement.** The power consumption of the integrated battery is dependent on the temperature and usage.



If the Diver is used, stored or transported for extended periods of time under high temperature, this will adversely affect the life of the battery. The battery's capacity at lower temperatures is reduced, but this is not permanent. This is normal behavior for batteries.

Excessive programming, high frequency sampling and data reading will reduce the battery capacity.

** The accuracy of the clock is highly dependent on temperature. The clock is actively compensated for temperature in all models.

2.2 Environmental

Ingress protection IP68, 10 years continuously submerged in water at 100 m

2.3 Transportation

Suitable for transportation by vehicles, ships and airplanes in the supplied packaging.

Resistance to vibration In accordance with MIL-STD-810.

Mechanical shock test In accordance with MIL-STD-810, for light-weight equipment

Temperature -20 °C to 80 °C (affects battery life)

2.4 Temperature

Measurement range -20 °C to 80 °C

Operating Temperature (OT) TD-Diver: 0 °C to 50 °C
Baro-Diver: -10 °C to 50 °C ambient temperature

Accuracy (max) ± 0.2 °C

Accuracy (typical) ± 0.1 °C

Resolution 0.01 °C

Response time (90% of final value) 3 minutes (in water)

7