

Propuesta sobre un modelo conceptual de monitoreo integrado de salares en los países del triángulo del litio

Julia Irene Real Herráiz
Reynaldo Antonio Cabezas Rojas
Salvador Mateo Villalba
Guillermo Alandí Martín



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

Propuesta sobre un modelo conceptual de monitoreo integrado de salares en los países del triángulo del litio

Julia Irene Real Herráiz
Reynaldo Antonio Cabezas Rojas
Salvador Mateo Villalba
Guillermo Alandí Martín



NACIONES UNIDAS



Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

Este documento fue preparado por Julia Irene Real Herráiz, Consultora de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en conjunto con Reynaldo Antonio Cabezas Rojas, Salvador Mateo Villalba y Guillermo Alandí Martín, en el marco de las actividades de la División y del programa Cooperación Regional para una Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos, ejecutado por la CEPAL en conjunto con el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Alemania y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de ese país.

Los autores agradecen los valiosos comentarios al trabajo de Mauricio León y José Luis Lewinsohn, de la CEPAL; Fabio Saccone y Jorge Thomas, de Y-TEC de la Argentina; Maribel Ayaviri y Josué Catari, de Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) del Estado Plurinacional de Bolivia; Mauricio Gonzalez y Leonardo Valenzuela, de la Corporación de Fomento de la producción (CORFO) de Chile, y Mario Campa y Pablo Taddej, de Litio para México (LitioMx).

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

No deberá entenderse que existe adhesión de las Naciones Unidas o los países que representan a empresas, productos o servicios comerciales mencionados en esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2024/67
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2024
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2400684[S]

Esta publicación debe citarse como: J. I. Real Herráiz y otros, "Propuesta sobre un modelo conceptual de monitoreo integrado de salares en los países del triángulo del litio", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2024/67), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Resumen	9
Introducción	11
I. Objetivos	15
II. Antecedentes	17
A. Importancia del monitoreo de salares: impacto ambiental	17
1. Impacto 1: agotamiento de los recursos hídricos y salmuera.....	17
2. Impacto 2: contaminación del ecosistema	17
3. Impacto 3: disminución de la vegetación, flora y fauna	18
4. Impacto 4: asentamiento diferencial del suelo	18
B. Stakeholders	19
1. General.....	19
2. Argentina	19
3. Chile	20
4. Bolivia (Estado Plurinacional de).....	23
5. México.....	24
C. Sistemas de monitoreo existentes a nivel global	25
1. Salar de Atacama	25
2. España.....	30
D. Características de los salares en los países del Triángulo del litio	31
1. Salares en Argentina.....	31
2. Salares en Chile	33
3. Salares de Bolivia (Estado Plurinacional de).....	35
4. Proyecto Sonora en México	37

III. Plan de monitoreo	39
A. Variables para monitorear	39
B. Metodologías e instrumentos disponibles y aplicables	48
1. Estado del arte de la instrumentación aplicable	48
2. Selección de los equipos mediante análisis multicriterio	70
C. Integración de los equipos seleccionados	71
IV. Red de monitoreo	75
A. Análisis de la ubicación de los sistemas de monitoreo	75
1. Estaciones meteorológicas	76
2. Parámetros fisicoquímicos y caudal del agua superficial	77
3. Cota de nivel del agua subterránea y salmuera	78
4. Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y la salmuera	78
5. Nivel lagunar	79
6. Flora y vegetación	79
7. Fauna	80
8. Biota acuática	80
B. Plataforma digital	81
1. Características técnicas y computacionales	81
2. Base de datos	83
3. Algoritmia de automatización e interfaces	83
V. Plan de ejecución	85
A. Sigüientes etapas de ingeniería	85
1. Levantamiento detallado de los antecedentes de la cuenca objeto de estudio	86
2. Estudio hidrogeológico	86
3. Ingeniería de detalle del diseño de la red de monitoreo	87
4. Ingeniería de detalle para la adquisición e implementación de la red de monitoreo	87
5. Diseño e implementación de la plataforma digital	88
6. Despliegue de la plataforma digital	88
7. Caracterización ambiental de la flora, vegetación, fauna y biota acuática	88
8. Proceso de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocesamiento de imágenes satelitales	88
B. Estimación de costos de inversión y operación	89
1. Coste de adquisición de la red de monitoreo (CAPEX)	89
2. Coste operacional de la red de monitoreo (OPEX)	89
C. Actividades	89
Bibliografía	91
Anexos	97
Anexo A1	98
Anexo A2	132
Anexo A3	138
Anexo A4	158
Cuadros	
Cuadro 1 Estaciones meteorológicas vigentes cercanas al Salar de Atacama	26
Cuadro 2 Estaciones fluviométricas vigentes cercanas al Salar de Atacama	26
Cuadro 3 Estaciones de calidad de aguas vigentes cercanas al Salar de Atacama	27
Cuadro 4 Pozos vigentes cercanos al Salar de Atacama	27

Cuadro 5	Parámetros para caracterizar las variables ambientales en el PSAH	29
Cuadro 6	Parámetros de cada tipo de variable considerada	29
Cuadro 7	Parámetros seleccionados clasificados por tipo de componente y frecuencia de medición	40
Cuadro 8	Características mínimas del caudalímetro.....	66
Cuadro 9	Equipos seleccionados para la medición de los diferentes parámetros.....	70
Cuadro 10	Análisis de las diferentes tecnologías de comunicación inalámbricas.....	72
Cuadro 11	Características principales de los protocolos de comunicación analizados	73
Cuadro 12	Plan de ejecución para el proyecto de implementación	90
Cuadro A1.1	Escala de Saaty.....	98
Cuadro A1.2	Matriz comparativa para el parámetro de precipitación.....	99
Cuadro A1.3	Matriz comparativa por criterios.....	99
Cuadro A1.4	Matriz de comparación por criterios para la instrumentación del parámetro de precipitación.....	100
Cuadro A1.5	Coefficientes de ponderación	101
Cuadro A1.6	Resultado del análisis multicriterio para el parámetro precipitación	101
Cuadro A1.7	Valoración en escala de Saaty en función del rango de valoración de equipos	101
Cuadro A1.8	Rangos de valoración para la precipitación	102
Cuadro A1.9	Análisis de criterio precio.....	102
Cuadro A1.10	Análisis de criterio precisión	102
Cuadro A1.11	Análisis de criterio integración en otros equipos	103
Cuadro A1.12	Análisis de criterio mantenimiento	103
Cuadro A1.13	Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación.....	103
Cuadro A1.14	Matriz de comparación de criterios.....	104
Cuadro A1.15	Matriz comparativa para la precipitación	104
Cuadro A1.16	Rangos de valoración para la profundidad de nieve	104
Cuadro A1.17	Análisis de criterio precio.....	105
Cuadro A1.18	Análisis de criterio precisión	105
Cuadro A1.19	Análisis de criterio integración con otros equipos	105
Cuadro A1.20	Análisis de criterio mantenimiento	106
Cuadro A1.21	Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación.....	106
Cuadro A1.22	Matriz de comparación de criterios.....	106
Cuadro A1.23	Matriz comparativa de la profundidad de nieve	107
Cuadro A1.24	Rangos de valoración para la evaporación de agua	107
Cuadro A1.25	Análisis de criterio precio.....	107
Cuadro A1.26	Análisis de criterio precisión	108
Cuadro A1.27	Análisis de criterio integración con otros equipos	108
Cuadro A1.28	Análisis de criterio mantenimiento	108
Cuadro A1.29	Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación.....	109
Cuadro A1.30	Matriz de comparación de criterios.....	109
Cuadro A1.31	Matriz comparativa de la evaporación de agua	109
Cuadro A1.32	Rangos de valoración para la evaporación de aguas subterráneas	110
Cuadro A1.33	Análisis de criterio precio.....	110
Cuadro A1.34	Análisis de criterio precisión	110
Cuadro A1.35	Análisis de criterio integración con otros equipos	111
Cuadro A1.36	Análisis de criterio mantenimiento	111
Cuadro A1.37	Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación.....	111
Cuadro A1.38	Matriz de comparación de criterios.....	112
Cuadro A1.39	Matriz comparativa de la evaporación de aguas subterráneas	112
Cuadro A1.40	Rangos de valoración para la radicación solar	112

Cuadro A1.41	Análisis de criterio precio	113
Cuadro A1.42	Análisis de criterio precisión	113
Cuadro A1.43	Análisis de criterio integración con otros equipos	113
Cuadro A1.44	Análisis de criterio mantenimiento	114
Cuadro A1.45	Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación.....	114
Cuadro A1.46	Matriz comparativa de criterios	114
Cuadro A1.47	Matriz comparativa de la radiación solar.....	115
Cuadro A1.48	Rangos de valoración para la velocidad del viento	115
Cuadro A1.49	Análisis del criterio precio	116
Cuadro A1.50	Análisis del criterio precisión	116
Cuadro A1.51	Análisis del criterio integración con otros equipos	116
Cuadro A1.52	Análisis del criterio mantenimiento	117
Cuadro A1.53	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	117
Cuadro A1.54	Matriz comparativa de criterios	118
Cuadro A1.55	Matriz comparativa de la velocidad del viento	118
Cuadro A1.56	Rangos de valoración para la temperatura.....	118
Cuadro A1.57	Análisis del criterio precio.....	119
Cuadro A1.58	Análisis del criterio precisión	119
Cuadro A1.59	Análisis del criterio integración con otros equipos	119
Cuadro A1.60	Análisis del criterio mantenimiento	119
Cuadro A1.61	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	120
Cuadro A1.62	Matriz comparativa de criterios	120
Cuadro A1.63	Matriz comparativa de la temperatura.....	120
Cuadro A1.64	Rangos de valoración para la humedad relativa	121
Cuadro A1.65	Análisis del criterio precio	121
Cuadro A1.66	Análisis del criterio precisión	121
Cuadro A1.67	Análisis del criterio integración con otros equipos	122
Cuadro A1.68	Análisis del criterio mantenimiento	122
Cuadro A1.69	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	122
Cuadro A1.70	Matriz comparativa de criterios	123
Cuadro A1.71	Matriz comparativa de la humedad relativa	123
Cuadro A1.72	Rangos de valoración para la humedad del suelo	123
Cuadro A1.73	Análisis del criterio precio	124
Cuadro A1.74	Análisis del criterio precisión	124
Cuadro A1.75	Análisis del criterio integración con otros equipos	124
Cuadro A1.76	Análisis del criterio mantenimiento	124
Cuadro A1.77	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	125
Cuadro A1.78	Matriz comparativa de criterios	125
Cuadro A1.79	Matriz comparativa de la humedad del suelo.....	125
Cuadro A1.80	Rangos de valoración para el caudal	126
Cuadro A1.81	Análisis del criterio precio.....	126
Cuadro A1.82	Análisis del criterio precisión	126
Cuadro A1.83	Análisis del criterio integración con otros equipos	126
Cuadro A1.84	Análisis del criterio mantenimiento	127
Cuadro A1.85	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	127
Cuadro A1.86	Matriz comparativa de criterios	127
Cuadro A1.87	Matriz comparativa del caudal.....	128
Cuadro A1.88	Rangos de valoración para el nivel	128
Cuadro A1.89	Análisis del criterio precio.....	128
Cuadro A1.90	Análisis del criterio precisión	129

Cuadro A1.91	Análisis del criterio integración con otros equipos	129
Cuadro A1.92	Análisis del criterio mantenimiento	130
Cuadro A1.93	Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación.....	130
Cuadro A1.94	Matriz comparativa de criterios	130
Cuadro A1.95	Matriz comparativa del nivel.....	131
Cuadro A3.1	Tipos de datos generados y enviados al servidor.....	138
Cuadro A4.1	Precios unitarios	158
Cuadro A4.2	Presupuesto final.....	160
Cuadro A4.3	Presupuesto final mantenimiento y operación plataforma digital.....	163

Diagramas

Diagrama 1	Esquema del pluviómetro de cubeta basculante	48
Diagrama 2	Esquema pluviómetro de sifón	49
Diagrama 3	Partes de un atmómetro de Bellani.....	51
Diagrama 4	Tanque de evaporación clase A en superficie y sus componentes	52
Diagrama 5	Esquema funcionamiento lisímetro	53
Diagrama 6	Esquema del principio de funcionamiento de un anemómetro de empuje	57
Diagrama 7	Esquema del anemómetro de rotación	58
Diagrama 8	Esquema funcionamiento del anemómetro de compresión	59
Diagrama 9	Funcionamiento básico de un psicrómetro de Assman	61
Diagrama 10	Esquema de un caudalímetro de río.....	65
Diagrama 11	Esquema del sistema de medición general	65
Diagrama 12	Esquema general de conexión	72
Diagrama A3.1	Procesado de forma periódica de archivos.....	140
Diagrama A3.2	Procesado de los archivos enviados mediante SCP.....	141

Mapas

Mapa 1	Elementos geológicos mayores de la Puna Argentina y principales salares.....	32
Mapa 2	Ubicación del Salar de Atacama.....	34
Mapa 3	Ubicación del Salar de Maricunga.....	35
Mapa 4	Mapa esquemático de la cuenca de drenaje del Altiplano	36
Mapa 5	Mapa del Proyecto Sonora.....	37

Imágenes

Imagen 1	Colchón de nieve	50
Imagen 2	Piranómetro	55
Imagen 3	Pirheliómetro	56
Imagen A2.1	Sensor de temperatura LoRaWAN.....	132
Imagen A2.2	Sensor de control de calidad del agua KRAKEN	133
Imagen A2.3	Módulo de comunicaciones móviles.....	134
Imagen A2.4	Dataloguer LoRaWAN con conexión celular	134
Imagen A2.5	Módulo LTE-M.....	135
Imagen A2.6	Sensor de temperatura y humedad con LTE-M integrado.....	135
Imagen A2.7	Módulo de comunicación LTE Cat M1/NB1 (LTE-M/NB-IoT)	136
Imagen A2.8	Sensor de presión, temperatura y humedad con conexión NB-IoT y LTE-M.....	136
Imagen A2.9	Antena amplificadora Wifi	137
Imagen A3.1	Estructura salar en BD	141
Imagen A3.2	Estación/sensor	142

Imagen A3.3	Tipo de fuente de datos	142
Imagen A3.4	Colección/cuadro para almacenar alertas	143
Imagen A3.5	Estructura calidad de aguas en BD.....	143
Imagen A3.6	Estructura cantidad de agua media en estación en BD.....	144
Imagen A3.7	Estructura datos estación meteorológica en BD	144
Imagen A3.8	Estructura calidad salmuera en BD	145
Imagen A3.9	Estructura calidad salmuera en BD	145
Imagen A3.10	Estructura cuadro/colección biota acuática.....	145
Imagen A3.11	Enumeración con los tipos de biota acuática permitidos.....	146
Imagen A3.12	Estructura cuadro/colección biota acuática.....	146
Imagen A3.13	Enumeración con los tipos de vegetación y flora permitidos.....	146
Imagen A3.14	Estructura cuadro/colección fauna.....	147
Imagen A3.15	Enumeración con los tipo de fauna	147
Imagen A3.16	Ejemplo cuadro MariaDB usuarios	148
Imagen A3.17	Pantalla de inicio de la plataforma con autenticación de usuario	148
Imagen A3.18	Pantalla de selección de salar de la plataforma	149
Imagen A3.19	Pantalla de visión general de salar de la plataforma.....	150
Imagen A3.20	Pantalla de visualización de datos históricos de la plataforma	150
Imagen A3.21	Ejemplo de dos tipos de alertas generadas en último mes	151
Imagen A3.22	Pantalla de visualización de alertas en plataforma.....	152
Imagen A3.23	Pantalla de alerta por regresión histórica de la plataforma	152
Imagen A3.24	Pantalla de alerta por regresión histórica de la plataforma	153
Imagen A3.25	Pantalla de análisis de imágenes satelitales de la plataforma	154
Imagen A3.26	Pantalla de visualización de imágenes satelitales históricas de la plataforma	154
Imagen A3.27	Pantalla de estimación de parámetros de la plataforma	155
Imagen A3.28	Pantalla de visualización de la introducción de los datos de entrada de la simulación sin incluir parámetros ambientales	156
Imagen A3.29	Pantalla de visualización de la introducción de los datos de entrada de las simulaciones, incluyendo parámetros ambientales.....	156
Imagen A3.30	Pantalla de visualización de los informes de simulación.....	157

Resumen

El estudio evalúa la solución de ingeniería para implementar y operar una red de monitoreo integrada en una cuenca hidrográfica con un salar o laguna salina. Esta red busca proporcionar información en tiempo real para consolidar datos de monitoreo relevantes, asegurando la trazabilidad y acceso a instituciones competentes.

Los antecedentes destacan que los impactos ambientales de la extracción de litio incluyen consumo y contaminación de agua, impacto en flora y fauna, y generación de residuos. Las principales preocupaciones se centran en la contaminación del agua y el agotamiento de recursos hídricos, afectando a las comunidades locales.

El plan de monitoreo, basado en análisis de estudios y requisitos hídricos, define los parámetros necesarios para el diseño de la red. Se seleccionan equipos de medición mediante un proceso de análisis multicriterio y se examinan tecnologías de comunicación como LORAWAN, SigFox y LTE, identificando dos alternativas viables para la transmisión de datos: una combinando LoraWAN y LTE, y otra utilizando antenas de amplificación de señal.

La red de monitoreo se diseñará para medir parámetros como precipitación, radiación solar, temperatura, humedad, velocidad del viento, evaporación, calidad del agua superficial y subterránea, y flora y fauna. La plataforma digital recibirá, procesará y almacenará la información, utilizando una arquitectura de bases de datos mixtas y una aplicación web moderna y escalable.

Por último, el plan de ejecución detalla las etapas de ingeniería necesarias, como estudios hidrogeológicos y radiométricos, y la implementación de la red y plataforma digital. Para un salar tipo de 145 km², la inversión requerida es de aproximadamente \$910.000 USD para la instalación y \$581.000 USD anuales para operación y mantenimiento.

Introducción

En los últimos años el interés por las extracciones de salmuera y recursos hídricos ha aumentado debido a la demanda mundial de recursos naturales como el litio. Es por ello, que los gobiernos de los países del Triángulo del Litio han puesto gran hincapié en el desarrollo sostenible de la minería.

El monitoreo integrado de cuencas hidrográficas se presenta como un instrumento necesario para enfrentar el desafío que implica el manejo de los recursos naturales en sistemas altamente dinámicos, complejos y frágiles como son los salares o lagunas salinas.

No obstante, a pesar de que actualmente existen explotaciones y prospecciones en algunos de los salares, el principal inconveniente es la descentralización de toda la información generada por parte de las empresas explotadoras de los salares, las cuales, aún hoy en día, realizan monitoreos de manera manual, enviando la información a instituciones de maneras diferentes.

Bajo este enfoque, se busca implementar una red de monitoreo, que sea capaz de caracterizar las cuencas hidrográficas donde se encuentren el salar o las salinas, con información veraz, a tiempo real y disponible en línea, accediendo a una plataforma donde se puedan observar los monitoreos relevantes y la autenticidad de los datos. De manera que para los actuales y futuros proyectos mineros que se desarrollen en esta zona sean garantizados de forma sostenible. De este modo, se podrá conocer en todo momento la salud del salar. Este estudio se estructura en las siguientes secciones:

A. Antecedentes

Los principales impactos ambientales de la extracción de litio no difieren en gran medida de la extracción de otros minerales: consumo y contaminación de agua, impactos en el paisaje, introducción de caminos de exploración en ecosistemas sensibles, impacto en la flora y fauna, generación de residuos sólidos y químicos, etc. En este proceso, existen una serie de *stakeholders*, o partes involucradas que son de carácter general o de carácter específico para cada uno de los países del Triángulo del Litio.

Las preocupaciones ambientales están especialmente relacionadas con la contaminación del agua, la salmuera y el suelo, así como con el agotamiento de los recursos hídricos de los que dependen muchas comunidades locales en las regiones mineras de litio. Los principales impactos ambientales

asociados son cuatro: Agotamiento de los recursos hídricos y salmuera, Contaminación del ecosistema, Disminución de la vegetación, flora y fauna, y Asentamiento diferencial del suelo.

B. Plan de monitoreo

A partir del levantamiento de información realizado, es decir, del análisis de diversos estudios y calificaciones ambientales; los impactos ambientales asociados a la extracción minera en salares; y los requisitos para la ejecución de modelos hídricos y de calidad del agua, se concluyen los parámetros de monitoreo que son necesarios incluir en el diseño conceptual de la red de monitoreo.

Se realiza un análisis del estado del arte de la instrumentación que es aplicable para caracterizar cada una de las variables descritas, finalizando la selección de equipos de medición mediante un *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, es decir, un análisis de selección multicriterio.

Tras ello, se realiza un análisis de distintas tecnologías de comunicación con el objetivo de establecer una metodología para el transporte de la información desde los puntos de medición de parámetros hasta la plataforma digital. Se examinan tecnologías ampliamente consolidadas como LORAWAN, SigFox y LTE, indicando sus principales características y examinando sus ventajas y desventajas.

Tras realizar una comparativa entre las distintas tecnologías, se determinan dos alternativas viables. La primera alternativa se basa en una combinación de *gateways* —puntos de acceso— para sensores con tecnología LoraWAN para la red de comunicación local, combinado con tecnología LTE para la transmisión a través de internet de la información recabada en aquellos puntos donde existe cobertura, y tecnología de internet satelital donde no esté disponible. La segunda alternativa utiliza una topología similar, pero empleando antenas de amplificación de señal para reducir el número de puntos de conexión satelital necesarios.

C. Red de monitoreo

Se realiza el análisis de la ubicación de los sistemas de monitoreo encargados de medir la información de los parámetros con una frecuencia de medición de manera continua. Así pues, se determina la metodología para la selección de la ubicación de los siguientes parámetros:

- Precipitación, radiación solar, humedad absoluta, temperatura, velocidad y dirección del viento, monitoreados a partir de las estaciones meteorológicas instaladas.
- Evaporación y evapotranspiración.
- Temperatura, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto del agua superficial.
- Caudal instantáneo del agua superficial.
- Nivel freático del agua subterránea y salmuera.
- Nivel lagunar.
- Temperatura, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica del agua subterránea y salmuera.
- Transectas para la flora, vegetación y fauna.
- Puntos de monitoreo de la biota acuática.

Tras ello, se examina el desarrollo de la plataforma digital, encargada de recibir la información de los puntos de medición y permitir su procesado, almacenamiento y servir como herramienta para la visualización y gestión de la información.

A continuación, se examinan los módulos necesarios para el procesado de la información y la algoritmia de cálculo y automatización. Para ello, se han establecido los distintos flujos de información según el tipo de parámetro y el tratamiento que se desea realizar.

En cuanto al almacenamiento de la información, se analizan los requisitos para las bases de datos necesarias, estableciendo una arquitectura mixta de bases de datos relacionales (SQL) y no relacionales (NoSQL). Para el manejo de la plataforma digital se ha optado por una aplicación web basada en tecnologías modernas, pero ampliamente consolidadas con el objetivo de priorizar la sencillez de implementación y la facilidad para escalar el sistema según los requisitos.

Además, se establecen las necesidades de cómputo y almacenamiento para el diseño de la infraestructura sobre la que funcionará la plataforma, examinando aspectos como la capacidad de procesamiento, seguridad, sistemas operativos, etc. En cuanto al hospedaje de la solución, se han examinado distintas alternativas basadas en infraestructura local y en la nube.

Finalmente, en cuanto a la plataforma digital respecta, se presentan distintos aspectos relacionados con la funcionalidad de la plataforma, incluyendo la posibilidad de gestionar distintos salares, poder obtener datos en tiempo real, establecer alertas, etc.

D. Plan de ejecución

En esta sección se detallarán las siguientes etapas de ingeniería que se podrán requerir en los salares para finalmente implantar una red de monitoreo. Para ello, en primer lugar, se detallarán brevemente todas las fases de ingeniería siguientes, definiendo la responsabilidad (pública o privada) en cada una de ellas. Posteriormente, se particularizará el plan de ejecución para un salar tipo con una extensión superficial de 145 km², donde se incluirá la estimación del plazo y necesidades de inversión ($\pm 20\%$) para instalar la red de monitoreo ambiental. Finalmente, se detallarán los futuros costes de operación y mantenimiento anual (OPEX) que tendría dicha red de monitoreo.

Así pues, a continuación, se especifican, y posteriormente se detallan, las etapas de ingeniería que se deberán llevar a cabo para la implementación de una red de monitoreo en un salar tipo:

- Levantamiento detallado de los antecedentes de la cuenca objeto de estudio.
- Estudio hidrogeológico para determinar el flujo subterráneo de la cuenca, así como la posición de la interfase salina.
- Estudios de cobertura radiométrica y telefónica.
- Ingeniería de detalle del diseño de la red de monitoreo.
- Ingeniería de detalle para la adquisición e instalación de la red de monitoreo.
- Diseño e implementación de la plataforma digital.
- Levantamiento de los hábitats de la flora y vegetación, así como de las especies predominantes en la zona. Así como la caracterización ambiental de la flora, vegetación y fauna.
- Proceso de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocusamiento de imágenes satelitales.

Finalmente, se concluye que para implementar una red de monitoreo en un salar tipo con una extensión superficial de 145 km², se precisa una inversión (CAPEX) de, aproximadamente, \$910.000 USD (IVA no incluido). Mientras que se requiere una inversión de \$581.000 USD anuales para la operación de esta (OPEX).

I. Objetivos

El presente estudio busca evaluar una solución de ingeniería, tanto de los requerimientos como de la implementación y futura operación, de una red de monitoreo, de carácter integrado, para el área que comprende la cuenca hidrográfica donde se encuentra un salar o laguna salina. Se busca que esta red permita contar con información oportuna (tiempo real, en línea, etc.) que permita consolidar en una plataforma, los parámetros de monitoreo relevantes, asegurando la trazabilidad y transparencia de los datos, y de acceso a las instituciones con competencia en la materia.

Para ello, en primer lugar, se llevará a cabo un levantamiento de la caracterización de los salares presentes en la región para, posteriormente, realizar un levantamiento de información de los sistemas existentes disponibles actualmente en el mercado para el monitoreo ambiental.

II. Antecedentes

A. Importancia del monitoreo de salares: impacto ambiental

Los principales impactos ambientales de la extracción de litio no difieren en gran medida de la extracción de otros minerales: consumo y contaminación de agua, impactos en el paisaje, introducción de caminos de exploración en ecosistemas sensibles, impacto en la flora y fauna, generación de residuos sólidos y químicos, etc.

Las preocupaciones ambientales están especialmente relacionadas con la contaminación del agua, la salmuera y el suelo, así como con el agotamiento de los recursos hídricos de los que dependen muchas comunidades locales en las regiones mineras de litio.

1. Impacto 1: agotamiento de los recursos hídricos y salmuera

El desequilibrio entre los ingresos de agua, como la infiltración por lluvia, y egresos, como la producción de salmuera, para la obtención de litio trae como consecuencia el descenso paulatino del nivel del agua subterránea y el aumento de la velocidad del flujo de agua dulce que se dirige hacia los pozos de producción de salmuera. La no reposición de los volúmenes de salmuera producto de la evaporación durante la extracción del litio provoca que exista un déficit hídrico en los acuíferos (Sticco, Scravaglieri y Damiani, 2018) y la desaparición de las vegas y lagunas en los bordes de la salina (Gallardo, 2011). Esta situación ha provocado conflictos hídricos con diferentes comunidades como la comunidad de Toconao en el norte de Chile (CODEFF, 2011).

2. Impacto 2: contaminación del ecosistema

La extracción de litio tiene importantes impactos ambientales y sociales, especialmente debido a la contaminación y el agotamiento del agua. El proceso requiere de productos tóxicos para procesar el litio, lo que puede ocasionar una liberación de dichos productos a través de procesos de lixiviación, derrames o emisiones al aire, dañando el ecosistema y la producción de alimentos (Hollender y Shultz, 2010). En el Salar de Hombre Muerto (Argentina), las comunidades locales afirman que las operaciones mineras han contaminado arroyos utilizados para consumo humano, ganado y el riego de cultivos (Hollender y Shultz, 2010).

Además de los productos químicos utilizados durante el proceso de extracción, también se pueden encontrar trazas de litio en los estanques de almacenamiento de desechos, pilas de relaves, aguas procesadas, cuencas de evaporación y productos transportados. Éstos tienen consecuencias biofísicas que podrían tener un impacto adverso en el metabolismo humano, la comunicación neuronal, la ecología del terreno y la vida acuática. Asimismo, los estanques de evaporación suelen estar revestidos con cloruro de polivinilo (PVC) como barrera protectora, que podría dar lugar a la introducción de contaminantes en el medio ambiente en caso de rotura (Kaunda, 2020).

Por otra parte, la introducción de caminos de exploración en ecosistemas sensibles puede contaminar el acuífero, puesto que las perforaciones pueden presentar afloramientos de agua de baja salinidad provenientes de acuíferos profundos, lo cual provoca consecuencias en el sistema salino, limitando la posibilidad de extracción de sales superficiales y favoreciendo la difusión de sales superficiales hacia acuíferos profundos de baja salinidad.

Dado que las masas de agua dulce se encuentran sobre el agua con mayor salinidad (debido a la menor densidad del agua dulce respecto al agua salada), una vez que el agua dulce se moviliza hacia los pozos de producción de salmuera, ésta atraviesa sedimentos permeables cuya matriz sólida contiene sales que son incorporadas al agua dulce, aumentando su salinidad de forma irreversible acuíferos (Sticco, Scravaglieri y Damiani, 2018). Este aumento de salinidad afecta directamente a la cría de animales y las huertas, puesto que se altera su principal fuente de agua (Aranda, 2011).

3. Impacto 3: disminución de la vegetación, flora y fauna

Las regiones donde se ubican los salares tienen una rica avifauna y cobertura vegetal. Las especies de plantas son particularmente sensibles a la disponibilidad de agua, y un ligero cambio en la disponibilidad del agua tiene una gran afección en la cobertura vegetal y la diversidad de las plantas (Kalin y otros, 1988).

Asimismo, la contaminación del agua detallada en el impacto anterior altera los ecosistemas lagunares variando la concentración de insectos y algas presentes en los mismos. Esto provoca un efecto en cadena, puesto que las aves acuáticas que habitan en las lagunas se alimentan de dichos insectos y algas (Errazuriz, 2019).

4. Impacto 4: asentamiento diferencial del suelo

La extracción de agua produce la reducción de la fuerza que sostiene la matriz sólida del suelo, por lo que se produce una compactación de grandes bloques de suelos. La consecuencia a nivel superficial es la formación de hundimientos del suelo y trae aparejada la posible rotura del sello arcilloso somero, que es una de las responsables de la formación de las salinas actuales (Sticco, Scravaglieri y Damiani, 2018).

Actualmente, es posible monitorear el agotamiento de los recursos hídricos y la salmuera mediante el monitoreo de los niveles lagunares, el nivel freático y los caudales instantáneos y volúmenes presentes en el agua superficial, el agua subterránea y la salmuera. Tanto el aumento o reducción de la salinidad del agua dulce y la salmuera, así como la contaminación del ecosistema se verifica mediante el análisis químico del agua y la salmuera.

En cuanto al asentamiento diferencial del suelo, éste se puede monitorear mediante el control temporal de la distancia entre la cota del punto de referencia y la cota del terreno, la cual se emplea actualmente para el monitoreo del nivel freático de los acuíferos y la salmuera.

Por último, el impacto de la disminución de la vegetación, flora y fauna se realiza mediante el monitoreo de las componentes de biota acuática, vegetación y flora y fauna, monitoreando la abundancia, frecuencia de especies, cobertura y riqueza de cada uno de ellos.

B. Stakeholders

De la revisión de información, se han identificado organizaciones, instituciones públicas y privadas que pueden considerarse relevantes en el territorio, detallando la misión de cada organización, así como incluyendo la información de la que disponen. Asimismo, cabe señalar que se deberá considerar a las organizaciones indígenas.

1. General

- i) **Empresas del sector minero.** Desarrollar una minería modelo a través de operaciones seguras, de bajo costo, con tecnologías innovadoras, con compromiso social y respeto por el medio ambiente. Entre sus responsabilidades se encuentra generar los documentos necesarios para las evaluaciones ambientales e hidrológicas. Asimismo, habitualmente generan informes internos de seguimiento, los cuales se pueden consultar en sus respectivas páginas web.
- ii) **Empresas del sector agrícola.** Satisfacer las necesidades de los consumidores y mejorar el nivel de vida de los clientes ofreciéndoles productos de calidad, mediante la producción, transformación y exportación de productos agrícolas, acuícolas y agroindustriales. A la vez contribuir con el desarrollo de colaboradores, proveedores, distribuidores y país.
- iii) **ONG,** tales como Heinrich Böll, Fundación Terram, etc. Con el fin de preservar la ecología y la sustentabilidad.

2. Argentina

- i) **YPF Tecnología de Argentina (Y-TEC).** Es una empresa argentina de investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la energía, especialmente en el sector del petróleo y el gas. El litio forma parte de una de sus misiones desarrollando nuevas tecnologías para la explotación de toda la cadena de valor del recurso. Impulsa la industrialización nacional con la producción de baterías, celdas, materiales activos y electrolito, en colaboración con el sistema científico nacional, universidades, organismos y empresas innovadoras.
- ii) **Secretaría de Minería de la Nación.** Asiste en el control de las empresas mineras. Asimismo, facilita el acceso y calidad de información al público en general, desarrollando el Sistema de Información Abierta a la Comunidad sobre la Actividad Minera (SIACAM) y promoviendo el diálogo en las Mesa de Minería Abierta a la Comunidad (MEMAC).
- iii) **Secretaría de Gestión Ambiental.** Se dedica a promover políticas y acciones para proteger el medio ambiente, fomentar la economía circular y abordar desafíos como el cambio climático, la gestión de residuos y la conservación de la fauna. Su enfoque incluye la sostenibilidad en edificios públicos, la educación ambiental y la protección de recursos naturales.
- iv) **Ministerio de Desarrollo Económico y Producción.** Se encarga de diseñar y ejecutar planes relacionados con el fomento de la producción industrial y el comercio exterior del país. Su misión incluye la creación de empleo de calidad, la promoción de una inserción internacional a escala, la defensa de la competencia y la federalización de la producción.
- v) **Consejo Federal de Minería (COFEMIN).** Es un organismo integrado por las provincias y el Estado Nacional, cuya misión principal es participar activamente en el diseño, ejecución y seguimiento de la política minera nacional, tratando de acordar un mínimo común denominador de buenas prácticas en la explotación de los recursos mineros.
- vi) **Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).** Entre sus actividades se pueden identificar proyectos de investigación que abarcan tanto las etapas de extracción y procesamiento como el desarrollo de subproductos, y la I+D en baterías y sus componentes.

- vii) **Consejo Federal de Inversiones (CFI)**. organismo público con el objetivo de promover el desarrollo integral del país mejorando la calidad de vida de sus habitantes por medio de la permanente investigación, coordinación y asesoramiento para una adecuada política de inversiones y una mejor utilización de los medios económicos en cada región, manteniendo un firme compromiso con lineamientos participativos, inclusivos y sustentables.
- viii) **Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)**. Organismo Nacional científico-tecnológico responsable de la producción de conocimiento e información geológica, tecnológica, minera y geológica ambiental del territorio de la República Argentina y plataforma continental.
- ix) **Instituto Nacional del Agua (INA)**. Es un organismo científico tecnológico descentralizado que tiene por objetivo satisfacer los requerimientos de estudio, investigación, desarrollo y prestación de servicios especializados en el campo del aprovechamiento y preservación del agua.
- x) **Instituto Nacional de Asuntos Indígenas (INAI)**. Organismo que desarrolla y coordina políticas públicas para garantizar el desarrollo comunitario, el derecho a la salud y la educación, el acceso a la tierra y la preservación de las identidades culturales indígenas. Asimismo, impulsan la participación de las comunidades en el diseño y gestión de las políticas de Estado que las involucran.
- xi) **Asociación Obrera Minera Argentina (AOMA)**. Fundada el 28 de octubre de 1953, unifica la figura del obrero minero argentino y su representación sindical. Su labor se centra en la defensa de los derechos laborales de los trabajadores mineros, la negociación de paritarias, y la promoción de condiciones seguras y justas en la industria minera.
- xii) **Unidad de Gestión Ambiental Minera Provincial (UGAMP)**. Organismo encargado de la evaluación, seguimiento, monitoreo y auditoría del Informe de Impacto Ambiental.
- xiii) **Jujuy Energía y Minería Sociedad del Estado (JEMSE)**. Empresa estatal que promueve la transformación productiva sustentable de la provincia de Jujuy, fomentando alianzas público-privadas a través del desarrollo de la minería, energías renovables y sus actividades complementarias.
- xiv) **Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)**. Organismo público que realiza tareas orientadas a crear capacidades básicas de gestión y mejoras de productividad en proveedores locales, por lo general integrados por comunidades originarias.

3. Chile

- i) **Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)**. Entidad encargada de mejorar la competitividad y la diversificación productiva del país, a través del fomento a la inversión, la innovación y el emprendimiento, fortaleciendo, además, el capital humano y las capacidades tecnológicas para alcanzar un desarrollo sostenible y territorialmente equilibrado. Información disponible:
 - Estudios de modelos hidrogeológicos conceptuales para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales, disponibles en internet¹.
 - Provisión de imágenes satelitales para la caracterización de salares.

¹ En línea en el enlace: <https://www.corfo.cl/sites/cpp/movil/informespublicos>.

- ii) **Dirección General de Aguas (DGA)**. Promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente, como también de proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Público de Aguas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas. Información disponible:
- Red Hidrométrica. Información relativa a la calidad de aguas, estaciones fluviométricas, lagos y embalses, estaciones meteorológicas, niveles de pozos y estaciones sedimentométricas.
 - Control de extracciones de aguas subterráneas y superficiales.
 - Informes sobre acuíferos.
 - Delimitación de las subcuencas hidrológicas.
 - Los puntos de monitoreo y datos están disponibles².
- iii) **Superintendencia del Medio Ambiente (SMA)**. Proteger el medio ambiente y la salud de las personas, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental. Información disponible:
- Seguimiento ambiental de proyectos según los compromisos establecidos en los permisos ambientales (fiscalizaciones y Resoluciones de Calificación Ambiental).
 - Datos públicos disponibles³.
- iv) **Servicio de Evaluación Ambiental (SEA)**. Resguardar el medio ambiente de manera responsable y eficiente, protegiendo siempre a la ciudadanía y los recursos naturales; además de asegurar el uso sostenible, responsable, racional y ético de los recursos naturales y contribuir al desarrollo integral, social, económico y cultural del país. Información disponible:
- Datos generados en el marco de la evaluación ambiental de proyectos en el SEIA, como pueden ser Estudios de Impacto Ambiental y Declaraciones de Impacto Ambiental.
 - Datos públicos disponibles⁴.
- v) **Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)**. Es responsable de generar, mantener y difundir información de geología básica y de recursos y peligros geológicos del territorio nacional, para el bienestar de la comunidad y al servicio del país, y de regular y fiscalizar el cumplimiento de normativas mineras en materia de seguridad, propiedad y planes de cierre, para contribuir al desarrollo de la minería nacional⁵. Información disponible:
- Mapas geológicos de Chile.
 - Mapas hidrogeológicos de Chile.
 - Información sobre la composición química multi-elemento para suelos y sedimentos.
 - Informes relacionados con eventos geológicos y geomorfológicos.
 - Datos públicos disponibles⁵.

² En línea en el enlace: <https://dga.mop.gob.cl/>.

³ En línea en el enlace: <https://snifa.sma.gob.cl/>.

⁴ En línea en el enlace: <https://www.sea.gob.cl/>.

⁵ En línea en el enlace: <https://www.sernageomin.cl/>.

- vi) **Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)**. Instituto tecnológico y servicio de apoyo del Ministerio de Agricultura que proporciona información de valor de los recursos naturales renovables de Chile. La institución provee información actualizada sobre el territorio y sus recursos para mitigar los impactos del cambio climático y desastres naturales. Información disponible:
- Análisis temático (suelo, clima, recursos hídricos, humedales, flora y vegetación y fauna) de las regiones altoandinas.
 - Asimismo, toda la información puede visualizarse y descargarse en formato para Sistemas de Información Geográfica.
 - Datos públicos disponibles⁶.
- vii) **Ministerio del Medio Ambiente (MMA)**. Coordina el proceso de generación de normas de emisión y normas secundarias de calidad ambiental (NSCA), a través del Departamento de recursos hídricos y ecosistemas, cuya misión de coordinar la elaboración e implementación de políticas, estrategias, programas, proyectos y acciones orientadas a la protección y conservación de los recursos hídricos y los ecosistemas asociados.
- viii) **Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC)**. Es el organismo responsable de la Dirección Meteorológica de Chile, el cual es el organismo responsable del quehacer meteorológico en el país. Su función es proporcionar información meteorológica básica y procesada. Información disponible:
- Informes relacionados con el clima, tales como tendencias climáticas, anuarios climatológicos, etc.
 - Datos, diarios, mensuales y anuales de sus estaciones meteorológicas.
 - Los puntos de monitoreo y datos disponibles en internet⁷.
- ix) **Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)**. Provee servicios de Infraestructura Hidráulica que permitan el óptimo aprovechamiento del agua y la protección del territorio y de las personas, mediante un equipo de trabajo competente, con eficiencia en el uso de los recursos y la participación de la ciudadanía en las distintas etapas de los proyectos, para contribuir al desarrollo sustentable del país. Información disponible:
- Estudios y proyectos de Agua Potable Rural.
 - Estudios y proyectos de Obras de drenaje de aguas de lluvia.
 - Estudios y proyectos de Obras de manejo de cauces.
 - Estudios y proyectos de Obras de riego.
 - Datos públicos disponibles⁸.

Su relevancia se ve reflejada en los requerimientos de permisos para la construcción de ciertas obras hidráulicas como las instalaciones para la provisión y almacenamiento de aguas de proceso.

⁶ En línea en el enlace: <https://www.ciren.cl/>.

⁷ En línea en el enlace: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>.

⁸ En línea en el enlace: <http://www.doh.cl/>.

- x) **Corporación Nacional Forestal (CONAF)**. CONAF aborda la protección de los cuerpos de agua continentales, desde la perspectiva de protección del hábitat de especies con problemas de conservación dentro de sitios SNASPE. Información disponible:
 - Superficies de uso del suelo a nivel regional.
 - Informes relativos a las estadísticas forestales de Chile.
 - Datos públicos disponibles⁹.
- xi) **Servicio Agrícola y Ganadero (SAG)**. SAG debe velar porque las empresas cumplan con la implementación de prácticas y medidas necesarias para impedir la contaminación de aguas, suelos y aire del sector agropecuario.

Su relevancia se ve reflejada en su labor de proteger y mejorar los recursos naturales renovables para apoyar el desarrollo sustentable y competitivo del sector silvoagropecuario.
- xii) **Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)**. Organismo regulador de empresas de servicios de agua potable y saneamiento. Controla y fiscaliza las plantas de tratamiento de aguas servidas domésticas (PTAS) y la descarga de Riles en alcantarillado y PTAS, cursos o masas agua superficiales de agua, cursos o masas de agua subterránea.
- xiii) **Servicio Natural de Turismo (SERNATUR)**. Orienta, consolida y dinamiza el desarrollo del Turismo en Chile, estimulado la competitividad y transparencia del mercado turístico.
- xiv) **Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI)**. Promover, coordinar y ejecutar la acción del Estado en favor del desarrollo integral de las personas y comunidades indígenas, especialmente en lo económico, social y cultural y de impulsar su participación en la vida nacional, a través de la coordinación intersectorial, el financiamiento de iniciativas de inversión y la prestación de servicios a usuarios.

4. Bolivia (Estado Plurinacional de)

- i) **Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB)**. Es una empresa estatal de Bolivia que se dedica a la exploración, extracción, procesamiento y comercialización de litio y otros minerales relacionados. Sus principales funciones son:
 - Exploración y extracción de litio: YLB se encarga de identificar y evaluar depósitos de litio en territorio boliviano y luego procede a la extracción de este mineral.
 - Procesamiento: Después de extraer el litio, YLB se encarga de procesarlo para obtener productos de litio de alta calidad. Esto puede incluir la producción de carbonato de litio y otros compuestos de litio utilizados en la fabricación de baterías y otros productos.
 - Investigación y desarrollo: YLB también se dedica a la investigación y el desarrollo en el campo del litio y la tecnología de baterías. Esto puede incluir la búsqueda de métodos más eficientes y sostenibles de extracción y procesamiento de litio, así como la promoción de la innovación en el sector.
 - Comercialización y exportación: La empresa busca comercializar los productos de litio a nivel nacional e internacional. Dado el crecimiento en la demanda de baterías de litio, Bolivia busca posicionarse como un importante proveedor de litio y sus derivados en el mercado global.

⁹ En línea en el enlace: <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/>.

- ii) **Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL)**. Empresa estatal que participa directamente en la cadena productiva minera con las siguientes funciones: prospección y exploración, explotación, concentración, fundición y refinación, comercialización de minerales y metales, y administrar las áreas fiscales. La COMIBOL desarrolla actualmente varios proyectos mineros exitosos entre los que se incluyen una planta piloto del litio.
- iii) **Gerencia Nacional de Recursos Evaporíticos (GNRE)**. Organismo público encargado del cuidado del medio ambiente en la zona de intervención del Salar de Uyuni. Realiza trabajos de prevención, investigación y estudio del área de influencia del salar, con el objetivo de cuidar y minimizar posibles impactos ambientales.
- iv) **Ministerio de Medio Ambiente y Aguas**. Se dedica al desarrollo y gestión de los recursos hídricos y al manejo integral del ambiente. Cuenta con tres viceministerios: Agua Potable y Saneamiento Básico, que trabaja en la provisión de agua potable y saneamiento básico; Medio Ambiente, Biodiversidad, Cambios Climáticos, enfocado en la conservación del medio ambiente, la biodiversidad y la lucha contra el cambio climático; y Gestión y Desarrollo Forestal y Recursos Hídricos, que aborda temas relacionados con los bosques y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Recientemente, el Ministerio ha prohibido el uso inapropiado del agua potable durante los carnavales y ha estado llevando a cabo proyectos para mejorar el acceso al agua y el saneamiento en diferentes regiones del país.
- v) **Ministerio de Minería y Metalurgia**. Su función principal es implementar políticas mineras y metalúrgicas, normar y planificar el desarrollo minero nacional. Lo hace con la participación de diferentes actores de la minería, bajo los principios de soberanía y autodeterminación.
- vi) **Comité Científico de Investigación para la Industrialización de los Recursos Evaporíticos de Bolivia (CCII-REB)**. Es un equipo técnico de asesoramiento especializado a nivel ministerial. Su objetivo es formular políticas, planes y proyectos relacionados con los recursos evaporíticos del país. Estos recursos, como el Salar de Uyuni, son de importancia estratégica global. El Comité busca garantizar la soberanía económica y tomar decisiones informadas para la industrialización. Además, recientemente se ha inaugurado el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales y Recursos Evaporíticos de Bolivia, que contribuirá al desarrollo científico y tecnológico para la industrialización del litio.
- vii) **Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN)**. Institución estatal descentralizada, cuyo objetivo principal es generar la información geológica básica del país, por ello se constituye en pilar del desarrollo nacional.

5. México

- i) **Litio para México (LitioMx)** es un organismo público descentralizado de la Administración Pública Federal, su objetivo es realizar la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio ubicado en territorio nacional, así como la administración y control de las cadenas de valor económico de dicho mineral.
- ii) **Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)**. cuya responsabilidad es administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales en México. Gerencia de Planificación Hídrica de la Dirección General de la CONAGUA está a cargo del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), un instrumento de gestión de la información estratégica de los recursos hídricos. El SINA integra, analiza y brinda información estadística y geográfica del sector hídrico proveniente de diversas áreas de la CONAGUA y de otras instituciones para apoyar la toma de decisiones en el diseño, implementación y seguimiento de políticas públicas para lograr la sustentabilidad y seguridad hídrica en las cuencas y acuíferos del país.

- iii) **Secretaría de Economía.** Tiene la misión de desarrollar e implementar políticas integrales de innovación, diversificación e inclusión productiva y comercial. Además, estimula la inversión nacional y extranjera, propicia el aprovechamiento de los recursos minerales e impulsa la productividad y competitividad de los sectores industriales. Su objetivo es integrar a México a cadenas regionales y globales de valor, contribuyendo al bienestar de la población.
- iv) **Secretaría de Energía (SENER).** Conduce la política energética para garantizar el suministro competitivo, suficiente, de alta calidad, económicamente viable y ambientalmente sustentable de energéticos. Impulsa el uso eficiente de la energía y la investigación y desarrollo tecnológicos; promueve el uso de fuentes alternativas de energía. La persona titular de la Secretaría de Energía preside el Consejo de Administración de Litio para México.
- v) **Servicio Geológico Mexicano (SGM):** Encargado de estudios geológicos en México, puede estar involucrado en la evaluación de yacimientos de litio y en la generación de información geológica relevante.

C. Sistemas de monitoreo existentes a nivel global

1. Salar de Atacama

Con la promulgación del Código de Aguas de Chile, se estableció una protección para las vegas y bofedales en las Regiones de Tarapacá y Antofagasta. El Artículo 63º del mismo Código dispone, además, que la DGA podrá declarar zonas de prohibición para nuevas explotaciones, mediante resolución fundada en la protección del acuífero. Por consiguiente, la DGA dispone de una red de monitoreo que registra diversas variables ambientales para determinar la protección del acuífero y, simultáneamente el ecosistema del salar que cuenta con una alta presencia de flora y fauna y complejos sistemas bióticos y microbiales.

A continuación, se detallan las principales variables ambientales registradas por las instituciones públicas:

- i) Hidrometeorología: temperatura y precipitación.
- ii) Fluviometría.
- iii) Calidad de aguas.
- iv) Niveles.

La caracterización de las variables de temperatura y precipitación se realiza a partir de las estaciones meteorológicas presentes en la Región y propiedad de la DGA y la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). La mayoría de las estaciones meteorológicas se encuentran en las inmediaciones del Salar de Atacama. El cuadro 1 muestra la ubicación de las estaciones con mayor número de registros.

Cuadro 1
Estaciones meteorológicas vigentes cercanas al Salar de Atacama

Propiedad	Código BNA	Estación	UTM Este	UTM Norte
DGA	02510006-9	San Pedro de Atacama	581 987	7 466 178
DGA	02510007-7	Río Grande	585 548	7 494 766
DGA	02500016-1	Toconao Experimental	602 573	7 435 183
DGA	02500017-K	Camar	606 057	7 410 866
DGA	02500019-6	Socaire	613 092	7 390 963
DGA	02500020-K	Peine	595 137	7 380 682
DGA	02500021-8	Talabre	613 530	7 421 080
DGA	02500025-0	Toconao Quebrada 1	621 742	7 432 239
DGA	02500026-9	Toconao Quebrada 4	612 782	7 439 076
DGA	02500027-7	Toconao Pueblo	601 953	7 435 956
DGAC	230004	Toconao	601 776	7 435 530
DGAC	230020	Socaire	613 259	7 390 664

Fuente: DGAC, 2024; DGA, 2009.

Con respecto a las estaciones fluviométricas, la DGA cuenta con 8 estaciones fluviométricas cercanas al Salar de Atacama. No obstante, no hay ninguna que cuente con registros superiores a 20 años. Asimismo, también se han recopilado los antecedentes relativos a los acuíferos de la Región. Durante las últimas dos décadas, distintas instituciones han promovido estudios de balance hídrico y/o modelaciones hidrogeológicas en la zona, caracterizando así los acuíferos. Ese es el caso de la modelación hidrogeológica del año 2014, asociado al informe técnico DARH n° 234.

Cuadro 2
Estaciones fluviométricas vigentes cercanas al Salar de Atacama

Propiedad	Código BNA	Estación	UTM Este	UTM Norte
DGA	02510001-8	Río San Pedro en Cuchabrachi	582 060	7 475 533
DGA	02500004-8	Canal Vilama en Vilama	584 003	7 470 302
DGA	02500005-6	Canal Cuno en Socaire	617 424	7 387 864
DGA	02500006-4	Canal Tilomonte antes represa	591 960	7 367 620
DGA	02500007-2	Quebrada de Jerez	603 059	7 435 186
DGA	02500008-0	Quebrada de Talabre en Tumbre	614 258	7 421 089
DGA	02500009-9	Quebrada de Camar-Vertiente 1	606 187	7 411 222
DGA	02500010-2	Quebrada de Camar-Vertiente 2	606 587	7 411 217
DGA	02500011-0	Vertiente Peine en Peine	595 987	7 380 547

Fuente: DGA, 2021.

Por su parte, la calidad de las aguas se puede evaluar tomando como referencia los límites máximos establecidos por las normas chilenas de agua potable (NCh409) y para el uso de riego (NCh1333). La DGA cuenta con 6 estaciones de monitoreo de parámetros fisicoquímicos para evaluar la calidad de aguas cercanas al Salar de Atacama. Los registros de los parámetros fisicoquímicos son medidos, por lo general, entre tres a cuatro veces al año.

Cuadro 3
Estaciones de calidad de aguas vigentes cercanas al Salar de Atacama

Propiedad	Código BNA	Estación	UTM Este	UTM Norte
DGA	02510001-8	Río San Pedro en Cuchabrachi	582 060	7 475 533
DGA	02500005-6	Canal Cuno en Socaire	617 424	7 387 864
DGA	02500006-4	Canal Tilomonte antes represa	591 960	7 367 620
DGA	02500004-8	Canal Vilama en Vilama	584 003	7 470 302

Fuente: DGA, 2021.

Por último, los niveles estáticos en pozos únicamente se registran vigentemente en el pozo Salar de Atacama nº 1.

Cuadro 4
Pozos vigentes cercanos al Salar de Atacama

Propiedad	Código BNA	Estación	UTM Este	UTM Norte
DGA	02500029-3	Salar de Atacama nº1	571 020	7 381 191

Fuente: DGA, 2021.

El principal inconveniente del registro de estos parámetros por parte de las instituciones públicas es que no todos ellos se registran de manera continua en el tiempo y, por lo tanto, no se dispone de información en tiempo real de la situación ambiental en el salar.

Además de las instituciones públicas, las empresas privadas con operaciones mineras en el Salar de Atacama cuentan con una sólida red de monitoreo y seguimiento ambiental, con una densidad de pozos y puntos que permite levantar información de todos los sectores en donde operan. De este modo, estos sistemas de monitoreo están orientados a dar cumplimiento a los distintos compromisos ambientales de las resoluciones de calificación ambiental (RCA), estudios de impacto ambiental (EIA) y necesidades propias. Por lo tanto, cada red de monitoreo se restringe al área de estudio de cada titular. Las empresas privadas que operan en el Salar de Atacama son las siguientes:

- Sociedad Química y Minera de Chile (extracción de salmuera).
- Albemarle (extracción de salmuera).
- Minera Escondida Ltda. (empresa minera).
- Compañía Minera Zaldívar Ltda. (empresa minera).

Analizando las Resoluciones de Calificación Ambiental presentadas en los últimos años por las empresas SQM y Albemarle, se reportan de manera continua, trimestral o anualmente variables relativas al Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico, y relativas al Plan de Seguimiento Ambiental de la vegetación y flora, la fauna y la biota acuática.

El Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico contempla mediciones representativas de la dinámica del núcleo, de la dinámica de los sistemas lacustres en los bordes del salar y de la napa de agua dulce que alimenta la vegetación. El plan incluye todas las variables que permiten identificar anomalías ambientales y, sobre éstas, decidir la implementación de medidas correctoras; y actualizar permanentemente el modelo hidrogeológico numérico.

El Plan de Seguimiento Ambiental de la Vegetación y Flora contempla, en primer lugar, la medición de la humedad del suelo. La medición de este parámetro tiene por objeto detectar cambios en el contenido de humedad del suelo, relacionados con un potencial descenso del nivel freático

ocasionado por la extracción de agua dulce de los pozos, que pudiera alterar el desarrollo de la vegetación. En segundo lugar, con el objetivo de detectar los efectos de la extracción de agua, se monitorea la vegetación y flora. Así pues, se evalúa la cobertura de las formaciones vegetales a partir de técnicas manuales empleando transectos y/o a partir del análisis de imágenes satelitales utilizando el método de la cartografía de ocupación de tierras (COT). En cuanto a la flora, se mide la salinidad y pH del sustrato y se registran las especies observadas.

Por su parte, el Plan de Seguimiento de Fauna lleva a cabo el monitoreo de la fauna, la cual se efectúa sobre la base del muestreo periódico de la presencia y abundancia de la fauna en los diferentes hábitats presentes en el Salar de Atacama.

Por último, el Plan de Seguimiento de Biotas Acuáticas realiza el seguimiento de los aspectos fisicoquímicos del agua y componentes biológicos (fitobentos, fitoplancton, zoobentos, zooplacton y plantas acuáticas).

Específicamente, la empresa SQM registra y analiza hidrogeológicamente los sistemas de Soncor, Aguas de Quelana, Vegetación Borde Este, Peine, Sector Vegas de Tilopizo y Núcleo del Salar de Atacama. Dicha caracterización hidrogeológica se realiza para el nivel de la napa de salmuera y de agua dulce, nivel y superficies lacustres, parámetros meteorológicos, calidad fisicoquímica de las aguas, caudal bombeado de agua dulce y caudal de recarga.

En total cuentan con 225 puntos de monitoreo desglosados en 196 pozos de monitoreo de nivel, 5 pozos de bombeo de agua industrial, 18 reglillas para la medición de nivel de agua superficial, 4 estaciones de aforo de aguas superficiales, y 2 estaciones meteorológicas. A continuación, se detallan las variables monitorizadas en el Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH).

La caracterización química de los pozos se realiza a partir de cinco grupos (G) de puntos de control, siendo los primeros cuatro los que se emplean en los pozos ubicados en los sistemas marginales al Salar de Atacama. Por su parte, el quinto grupo de control se emplea en los pozos de la zona núcleo del Salar de Atacama. A continuación, el cuadro siguiente muestra los parámetros evaluados en cada grupo.

- | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------|
| • Densidad | • Magnesio | • Salinidad |
| • Sólidos totales | • Dureza total | • Sodio |
| • Sólidos suspendidos | • Carbonato | • Potasio |
| • Sólidos disueltos | • Bicarbonato | • Hierro |
| • Oxígeno disuelto | • Sulfato | • Manganeso |
| • Hidrocarburo total | • Fosfato | • Zinc |
| • Detergentes aniónicos | • Temperatura | • Nitratos |
| • Coliformes fecales | • Alcalinidad | • Arsénico |
| • Nitrógeno amoniacal | • pH | • Cloruro |
| • Calcio | • Conductividad | |

Por su parte, las estaciones meteorológicas se dispusieron en el sistema Soncor (estación de Chaxas) y en el centro del núcleo del Salar de Atacama (estación de KCI). Éstas realizan la medición de la precipitación (mm), la evaporación (mm), la velocidad del viento (m/s) y la temperatura (°C).

De este modo, a modo de conclusión, se muestran los parámetros considerados en el PSAH por la empresa SQM:

Cuadro 5
Parámetros para caracterizar las variables ambientales en el PSAH

Componente	Subcomponente	Variable	Parámetro	Formato de reportabilidad de la data	Método Frecuencia Responsable de la medición
Agua	Agua subterránea	Cantidad de agua	Nivel	Res. Ex. N° 894/2020	Red PSAH: Manual Mensual ETFA Continua 1 min SQM Red PC: Manual Diaria SQM Continua 1 min SQM
			Caudal bombeo	Res. Ex. N° 894/2020	Continua Mensual SQM
		Calidad de agua	Físico y químicos	Res. Ex. N° 894/2020	Continua Semestral ETFA
	Agua superficial	Cantidad de agua	Nivel	Res. Ex. N° 894/2020	Manual Mensual ETFA Continua 1 min SQM
			Superficie Lacustre	Propio	RTK 5 años SQM Estacas Trimestral SQM Imágenes satelitales Trimestral SQM
		Caudal	Res. Ex. N° 894/2020	Manual Mensual ETFA Continua 1 min SQM	
		Calidad de agua	Físico y químicos	Res. Ex. N° 894/2020	Manual Trimestral ETFA
Aire	Aire	Meteorología	Precipitación Evaporación Velocidad del viento Temperatura	Propio	Continua 5 min SQM

Fuente: SQM Salar SA (2023).

El seguimiento ambiental biótico se compone de más de 500 parcelas o puntos de muestreo en terreno, los que son agrupados en perfiles y sectores distribuidos a lo largo del Borde del Este del Salar de Atacama. La información generada en terreno es complementada con el análisis de las imágenes satelitales de alta resolución (Gonzalez y Woods, 1992), las que permiten extender los monitoreos a toda el área de estudio.

Por su parte, la empresa Albemarle monitorea el núcleo del Salar y la zona marginal del mismo. El PSAH contempla un total de 150 puntos de monitoreo u observación: la medición de los parámetros meteorológicos se realiza en 13 estaciones, sin embargo, únicamente una es propiedad de la empresa (siendo el resto propiedad de SQM, MEL o la DGA); la tasa de evapotranspiración se mide desde 25 puntos de monitoreo; el resto de los puntos de monitoreo se emplean para la red de monitoreo de niveles, posición de la interfase salina, aforos y calidad química.

A continuación, se muestran los parámetros para cada tipo de variable considerada (Albemarle, 2022a, 2022b):

Cuadro 6
Parámetros de cada tipo de variable considerada

Vegetación y flora	
Vegetación:	
• Cobertura total y por especie	• Porcentaje de copa verde
• Especies dominantes	• Estado vital
Flora:	
• Frecuencia de especies	• Caracterización del sustrato
• Riqueza florística	• Vitalidad ejemplar algarrobo
• pH	• Porcentaje de copa verde del ejemplar algarrobo
• Salinidad	

Fauna	
Abundancia de reptiles, aves (terrestres y acuáticas) y mamíferos (micromamíferos y carnívoros)	
Biota acuática	
Medio abiótico:	
• Temperatura	• Oxígeno disuelto
• Conductividad	• Temperatura de sedimentos
• pH	• Conductividad de sedimentos
Medio biótico:	
• Composición y abundancia de fitobentos, zoobentos y zooplancton	
• Riqueza y abundancia de fitoplancton	
• Cobertura absoluta de plantas acuáticas	
• Clorofila a en la fracción planctónica y bentónica	

Fuente: Elaboración propia.

2. España

Un ejemplo de sistemas de gestión de redes de monitoreo a nivel internacional se encuentra en España, en donde las cuencas hidrográficas gestionan la información recabada por parte de la instrumentación instalada en los recursos hídricos.

Para comparar las diferencias entre ambos sistemas de gestión, se toma como referencia el sistema de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (España). En donde se lleva a cabo el monitoreo mediante la vigilancia, seguimiento y control de cantidad y calidad de aguas, con redes informatizadas con datos en tiempo real como el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) para la gestión de alertas en avenidas de agua o el SAICA (Sistema Automático de Calidad de Aguas) para alerta y medición de la calidad del agua. De esta forma, se puede plantear un sistema parecido en su organización.

Por otro lado, el Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA) implantado por la Dirección General de Calidad de las Aguas del Ministerio de Medio Ambiente permite gestionar en tiempo real las alertas detectadas en la red de estaciones adscritas al mismo. Este Sistema de Alertas muestra en tiempo real las estaciones y el estado en el que se encuentran en el momento de realizar la consulta. Además, cuenta con la gestión individualizada de cada una de las estaciones.

Es interesante recalcar la disponibilidad de llevar un registro de las incidencias ocurridas a lo largo del tiempo, en donde se clasifican las incidencias en función de su importancia. Dichas incidencias, se registran y, posteriormente, se evalúan en informes periódicos que pueden consultarse públicamente.

La gestión sostenible de los recursos hídricos se lleva a cabo mediante el proceso descrito a continuación. En primer lugar, un sistema de gobernanza basado en directivas europeas establece la relación entre departamentos y/u organismos públicos. Posteriormente, se establecen las tecnologías a emplear en dicho sistema siguiendo las siguientes bases:

- Sistemas informáticos complejos, uso de certificados digitales, intercambio y conservación de información electrónica entre sistemas.
- Desarrollo de sistemas de información geográfica, visores cartográficos online.
- Sistemas de captación de información sobre estado y calidad de las aguas y transmisión de la información en tiempo real.

- Manuales y técnicas para la toma de muestras de agua y aplicaciones informáticas para la comprobación validación y tratamiento de los datos.
- Modelación hidráulica y técnicas cartográficas de gran precisión.
- Proyectos de investigación e I+D+i en el desarrollo de técnicas de recuperación ambiental y tratamientos de zonas contaminadas.

Por otro lado, se define la estructura necesaria para llevar a cabo el sistema de gestión, destacando los aspectos relevantes que éste debe contar como robustez y apoyo en gran cantidad de sensores e información geográfica. Para ello, se permite el acceso concurrente de múltiples usuarios repartidos geográficamente.

D. Características de los salares en los países del Triángulo del litio

1. Salares en Argentina

La región de la Puna Argentina se caracteriza desde el punto de vista climático por escasas precipitaciones líquidas y sólidas (menos de 150 mm/año), marcada por una amplitud térmica (20° o más) y elevados valores de evapotranspiración (2000 a 2500 mm/año).

Los suelos de la región, poco evolucionados, no poseen desarrollo y, en el caso de tenerlo, responden a condiciones climáticas antiguas. Son de textura gruesa con baja capacidad de retención de humedad y alta capacidad de infiltración, lo que favorece a los procesos de recarga de los reservorios de agua subterránea, a partir del agua de lluvia y por derretimiento.

Para el ambiente en la región, en general, es posible diferenciar entre salares húmedos y secos. Los primeros están localizados al oriente y se sitúan entre las isohietas de 50 a 100 mm/año, pudiéndose mencionar entre otros: Olaroz (Jujuy), Cauchari (Jujuy y Salta), Pozuelos, Centenario, Ratones, Diablillos (Salta) y Hombre Muerto (Salta y Catamarca). Los salares secos, ubicados al occidente, se localizan en un ambiente con valores de precipitaciones menor a 50 mm/año, entre ellos se puede citar al Salar de Jana (Jujuy), Rincón, Pocitos, Tolillar, Arizaro, Incahuasi, Llullaillaco y Río Grande (Salta) y Antofalla (Salta y Catamarca) (García y otros, 2021).

Los principales salares en Argentina son:

- Provincia de Catamarca: Salar del Hombre Muerto.
- Región de Salta: Salar de Arizaro.
- Región de Jujuy Salar de Olaroz.

b) Salar de Arizaro

El Salar de Arizaro está ubicado en el centro de la Punta de Atacama. Posee una superficie de 1600 km² y se encuentra a una altitud de 3460 m.s.n.m. (SEGEMAR, 2003). Se encuentra en la región más seca de la Punta Argentina (Alonso, 2017). El salar se caracteriza por la siguiente formación: calizas grises y amarillentas marinas, con dientes de peces invertebrados y microfósiles pérmicos (Alonso y Viramonte, 1987; García y otros, 2021).

c) Salar de Olaroz

El Salar de Olaroz está ubicado en la cuenca Olaroz–Cauchari, con una altitud aproximada de 3950 m.s.n.m. Ocupa una cuenca endorreica. La subcuenca del salar está conformada por cursos fluviales de régimen temporario, a excepción del Río Rosario que posee un régimen permanente, en ningún caso estos cursos llegan hasta el Salar. La explotación de Li en el salar de Olaroz se realiza a partir del bombeo de salmueras con concentraciones superiores a los 600 mg/l, sin embargo, una proporción importante de este elemento queda retenido en las facies clásticas como evaporíticas de los sedimentos modernos acumulados en el suelo salino (Borda y otros, 2019).

Los ambientes geomorfológicos del área de estudio se diferencian en cordones montañosos compuestos por rocas sedimentarias, otros por rocas ígneas, depresiones con salares, bajadas de piedemonte, áreas con modelado eólico, áreas con modelado fluvial y abanicos aluviales (Aranda Álvarez, 2018).

2. Salares en Chile

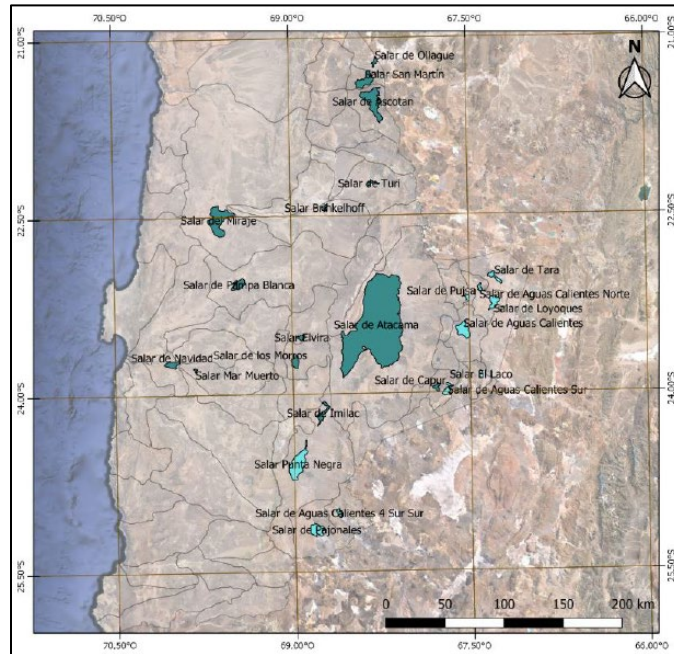
Los salares chilenos que forman parte del triángulo del litio están ubicados sobre las regiones de Antofagasta y Atacama. En la comuna de San Pedro de Atacama, en la región de Antofagasta se encuentra uno de los salares más grandes del mundo, el Salar de Atacama. En la región de Atacama se encuentra ubicado tanto el Salar de Maricunga como el Salar de Pedernales.

a) Salar de Atacama

El Salar de Atacama, con una superficie de 3000 km², es el más extenso de la región de Antofagasta. Está ubicado en una cuenca cerrada entre la Cordillera de los Andes al este y la cordillera de Domeyko al oeste. Sus principales características morfométricas y climatológicas son (Universidad de Antofagasta, s./f.).

- Altura: 2300 m.s.n.m.
- Superficie del salar: 3000 km².
- Superficie de las lagunas: 12,6 km².
- Precipitaciones: 25 mm/año (salar) – 300 mm/año (Cordillera).
- Evaporación potencial: 2000 mm/año (salar) – 1600 mm/año (Cordillera).
- Temperatura media: 14°C (salar).

Mapa 2
Ubicación del Salar de Atacama



Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de la DGA.

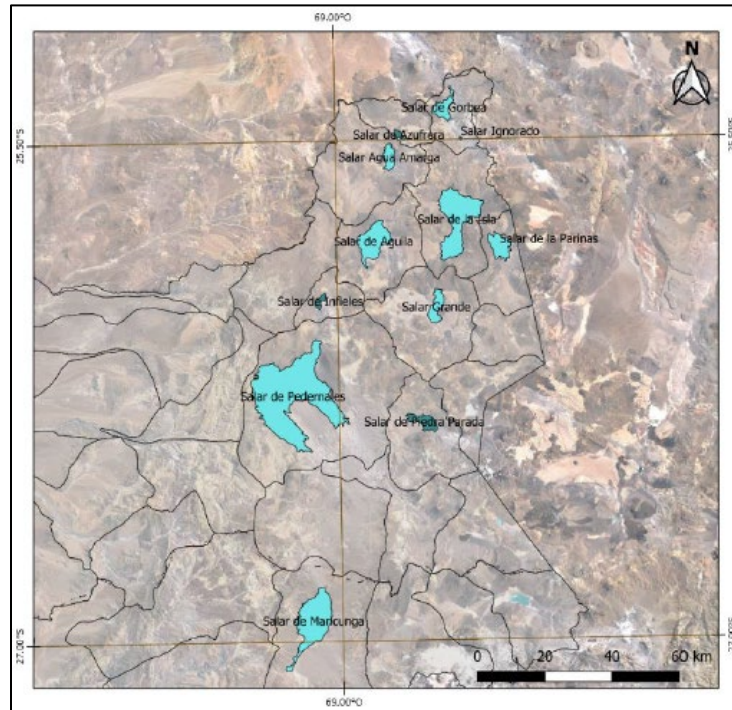
El Salar de Atacama se sitúa dentro de una cuenca intramontañosa endorreica, compuesto por sedimentos clásticos y evaporíticos depositados desde el Mioceno Superior hasta la actualidad. La cuenca está delimitada al oeste por la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal, al este por la Cordillera de los Andes, y al sur por el Cordón Lila. Los depósitos deltaicos de los ríos San Pedro y Vilama limitan el salar por el norte. Los materiales de relleno de la cuenca son facies evaporíticas, cuya distribución está controlada por la típica secuencia de precipitación según un orden de solubilidades creciente (Salas y otros, 2010).

b) Salar de Maricunga

El Salar de Maricunga se sitúa sobre una cuenca con una extensión de 2200 km², siendo la segunda cuenca hidrográfica endorreica de mayor extensión en la región de Atacama. Se ubica al sur de la cuenca del Salar de Pedernales y al este de la cuenca del río Copiapó. El salar se encuentra ubicado en la parte norte de la cuenca hidrográfica, con su borde occidental a unos 7 km de la divisoria que la separa de la cuenca de Copiapó. Varias quebradas alimentan el salar desde el sur y sureste de la cuenca, donde destacan la quebrada La Coipa, Pastillos y Ciénagas Redonda. Sus principales características morfológicas y climatológicas:

- Altura: 3760 m.s.n.m.
- Superficie del salar: 145 km².
- Superficie de las lagunas: 6 km².
- Precipitación: 120 mm/año (salar).
- Evaporación potencial: 1200 mm/año (salar).
- Temperatura media: 14°C (salar).

Mapa 3
Ubicación del Salar de Maricunga



Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de la DGA.

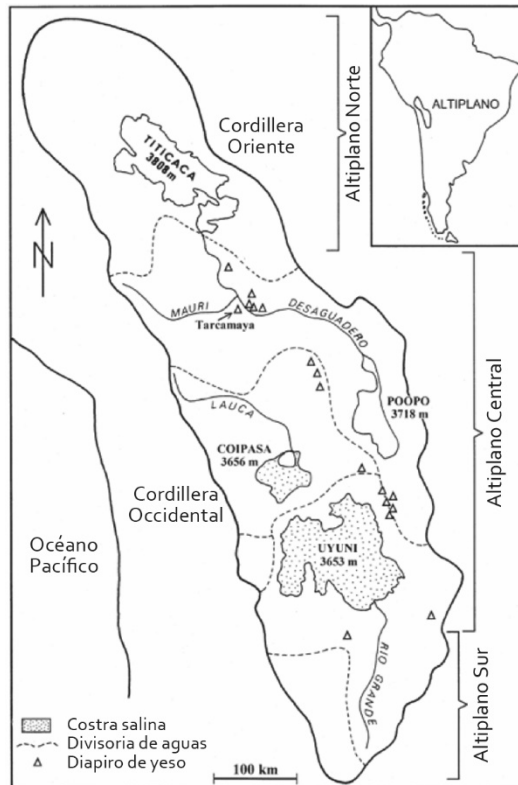
La geología de la cuenca incluye una variedad de formaciones volcánicas, rocas plutónicas y terrenos sedimentarios. El salar se compone por una costra de halita (NaCl) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) con pequeñas lagunas que se sitúan, por lo general, en los límites del salar. Los principales aportes de aguas superficiales al salar están dados por 7 arroyos ubicados entre 4000 y 4500 m de altura que se infiltran aguas abajo, alimentando las napas subterráneas. Al extremo suroeste del salar existe una pequeña laguna independiente: la laguna Santa Rosa. Esta laguna descarga hacia el sector norte del salar por un canal cuyo caudal se incrementa con los aportes subterráneos hasta alcanzar en promedio los 163 l/s. (Rojas Badilla y Salazar Méndez, 2006).

3. Salares de Bolivia (Estado Plurinacional de)

El salar de Uyuni, ubicado a 3.650 m.s.n.m. en el suroeste de Bolivia en la Región altiplánica de la cordillera de los Andes, es el más grande del mundo con una extensión de 10.582km² (Britannica, s/f).

El régimen hidrológico del salar de Uyuni está caracterizado por el régimen hidrológico de la cordillera altiplánica. En ella, existen cuatro regímenes hidrológicos diferenciados según los antecedentes geológicos, geomorfológicos y climáticos (Wolf, 1988), siendo dos de ellos el salar de Coipasa (con una superficie de 2.500km²) y el propio salar de Uyuni, el cual tiene una sola afluencia superficial permanente: el río Grande de Lípez en el sur.

Mapa 4
Mapa esquemático de la cuenca de drenaje del Altiplano



Fuente: Nadja, 2010.

Si bien no existe una conexión continua entre los salares de Coipasa y Uyuni, cuando los salares están inundados tras lluvias masivas durante la estación húmeda, es posible un intercambio superficial entre las masas de agua en ambas direcciones. Asimismo, se podría considerar una conexión subterránea ya que es pensable que sedimentos más antiguos cubiertos por material volcánico joven actúen como un acuífero (Wolf, 1988).

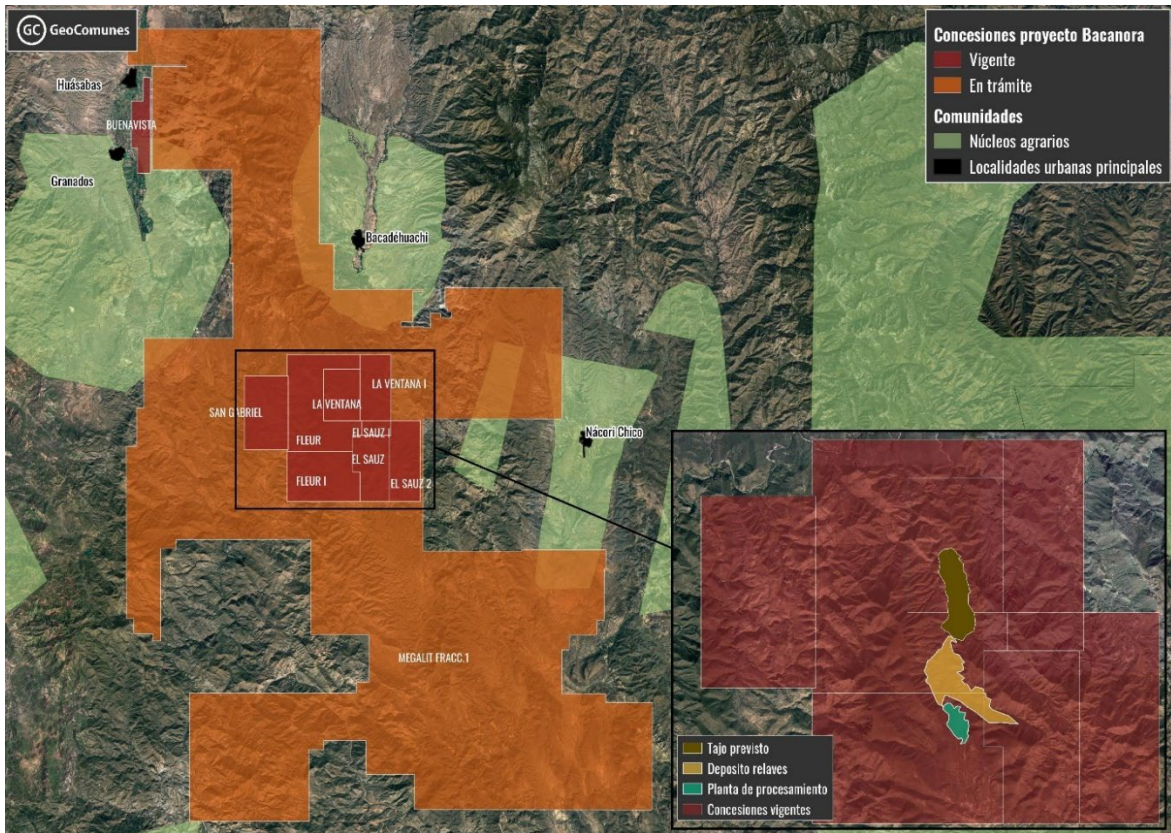
Los datos de la estación climática de la localidad de Uyuni, al sur del salar muestran una temperatura media anual de 9°C, donde el gradiente de temperatura en un solo día puede alcanzar hasta 25°C. La precipitación anual es muy baja, de aproximadamente 141 mm y el 90% de la misma se produce en sólo tres meses. Durante la estación lluviosa predominan los vientos del sur, mientras que la estación seca se caracteriza por vientos del norte (Svendsen y otros, 2002) con una velocidad media del viento de 8 m/s. En cuanto a la evaporación, la estación meteorológica de Uyuni establece valores totales anuales entre 1.400 y 2.100mm. En la parte meridional del Altiplano domina el clima subtropical (Nadja, 2010).

La geología de la cuenca del Salar de Uyuni está representada por formaciones paleozoicas, rocas mesozoicas, y principalmente cenozoicas constituidas por rocas volcánicas y secuencias vulcano-sedimentarias. En el área de influencia del salar de Uyuni se observan sedimentos recientes (cuaternarios) agrupados en depósitos salinos, depósitos aluviales, fluviales, lacustres, fluvio-glaciares, morrenas y dunas (Servicio Geográfico Militar de Bolivia, s./f.).

4. Proyecto Sonora en México

México cuenta con el proyecto de Sonora (actualmente de la empresa china Ganfeng Lithium), basado en un depósito de litio en arcillas enriquecidas, ubicado en el estado homónimo. Actualmente se encuentra en etapa de construcción y se proyecta que aportaría alrededor de 35.000 toneladas por año de litio grado de batería hacia mediados de la década. Por otra parte, el Gobierno mexicano creó recientemente Litio para México (LitioMx), una empresa estatal que tiene por objeto la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento del litio ubicado en territorio nacional, así como la administración y control de las cadenas de valor económico de dicha minera (CEPAL, 2023).

Mapa 5
Mapa del Proyecto Sonora



Fuente: Ejatlas.org.

III. Plan de monitoreo

A. Variables para monitorear

En la presente sección se estudiarán los principales parámetros presentados en las referencias analizadas, es decir, se determinará el motivo de su uso y se concluirá si son de interés para la finalidad del presente estudio.

Los parámetros seleccionados se muestran a continuación en dos clasificaciones: la primera de ellas según su componente. La nomenclatura de los subcomponentes, variables, parámetros y sus unidades de medida se ajustarán a lo establecido en la Res. Ex. SMA N° 894/2019 que "Dicta Instrucciones para la Elaboración y Remisión de Informes de Seguimiento Ambiental del Componente Ambiental Agua" (Diario Oficial de Chile, 2019); y la segunda según su frecuencia de medición: continua, discontinua y levantamiento inicial. Como su nombre indica, los parámetros de medición continua (1) se monitorearán de manera continua y en tiempo real mediante el uso de los sensores y sistemas de medición; las de medición discontinua (2) se emplean como *inputs* iniciales de los modelos y van calibrando el modelo a medida que se registran nuevos datos. La discontinuidad en las mediciones se debe al procedimiento para su monitoreo, la cual se realiza manualmente en laboratorio (a excepción de la cobertura del suelo); mientras que las variables del levantamiento inicial (3) únicamente requieren determinarse una vez dado su naturaleza geológica.

Cabe destacar, que se entenderá como "caudal instantáneo" (de la variable ambiental cantidad de agua y subcomponente del agua superficial), aquel caudal pasante por el curso de agua, mientras que el "caudal instantáneo de captación consuntivo" se refiere al caudal extraído y consumido, es decir, caudal que no retorna al medio una vez empleado para un fin determinado.

Asimismo, tal y como se ha comentado con anterioridad, se complementará el monitoreo continuo de los niveles del acuífero mediante mediciones manuales con una frecuencia mensual. También hay que destacar que la medición discontinua se realizará con una frecuencia mínima semestral, y los valores obtenidos se emplearán para ajustar el modelo digital del sistema. En caso de encontrar discrepancias superiores al 5%, se volverá a calibrar el modelo digital en su totalidad.

Cuadro 7
Parámetros seleccionados clasificados por tipo de componente y frecuencia de medición

Componente	Subcomponente	Variable ambiental	Parámetros
Agua	Agua superficial	Calidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos Suspendidos Totales² (mg/l) - Sólidos Disueltos Totales² (mg/l) - Oxígeno disuelto¹ (mg/l) - Temperatura¹ (°C) - Potencial de Hidrógeno¹ (unidad pH) - Conductividad eléctrica¹ (µS/cm) - Clorofila a² (µg/l) - Turbiedad² (UNT) - Alcalinidad total² (mg/l CaCO₃) - Cloruro² (mg/l) - Nitrato² (mg/l) - Sulfato² (mg/l) - Calcio total² (mg/l) - Potasio total² (mg/l) - Magnesio total² (mg/l) - Sodio total² (mg/l)
		Cantidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal instantáneo¹ (l/s) - Nivel lagunar¹ (m.s.n.m.) - Superficie lagunar² (m²) - Caudal instantáneo de captación consuntivo¹ (l/s)
	Agua subterránea	Calidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos Disueltos Totales² (mg/l) - Temperatura¹ (°C) - Potencial de Hidrógeno¹ (unidad pH) - Conductividad eléctrica¹ (µS/cm) - Alcalinidad total² (mg/l CaCO₃) - Cloruro² (mg/l) - Nitrato² (mg/l) - Sulfato² (mg/l) - Calcio total² (mg/l) - Potasio total² (mg/l) - Magnesio total² (mg/l) - Sodio total² (mg/l)
		Cantidad de agua	<ul style="list-style-type: none"> - Transmisividad³ (m³/día/m) - Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático³ (m.s.n.m.) - Distancia entre la Cota del punto de referencia y la Cota del terreno³ (m) - Profundidad del agua subterránea bajo el punto de referencia¹ (metros bajo el punto de referencia "mbpr") - Cota del agua subterránea¹ (m.s.n.m.) - Caudal de reinyección instantáneo¹ (l/s) - Volumen de reinyección de cada flujómetro¹ (m³) - Caudal de extracción instantáneo¹ (l/s) - Volumen de extracción de cada flujómetro¹ (m³)
Salmuera	-	Calidad salmuera	<ul style="list-style-type: none"> - Sólidos Disueltos Totales² (mg/l) - Temperatura¹ (°C) - Potencial de Hidrógeno¹ (unidad pH) - Conductividad eléctrica¹ (µS/cm) - Alcalinidad total² (mg/l CaCO₃) - Cloruro² (mg/l) - Nitrato² (mg/l) - Sulfato² (mg/l) - Calcio total² (mg/l) - Potasio total² (mg/l) - Magnesio total² (mg/l) - Sodio total² (mg/l)

Componente	Subcomponente	Variable ambiental	Parámetros
		Cantidad salmuera	<ul style="list-style-type: none"> - Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático³ (m.s.n.m.) - Distancia entre la Cota del punto de referencia y la Cota del terreno³ (m) - Profundidad de la salmuera bajo el punto de referencia¹ (metros bajo el punto de referencia "mbpr") - Cota de la salmuera¹ (m.s.n.m.) - Caudal de reinyección instantáneo¹ (l/s) - Volumen de reinyección de cada flujómetro¹ (m³) - Caudal de extracción instantáneo¹ (l/s) - Volumen de extracción de cada flujómetro¹ (m³)
Meteorológica	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitación¹ (mm) - Radiación solar¹ (W/m²) - Evaporación¹ (mm) - Evapotranspiración¹ (mm) - Humedad absoluta¹ (g/m³) - Temperatura¹ (°C) - Velocidad del viento¹ (m/s) - Dirección del viento¹ (°)
Biota acuática	Zooplankton Ictiofauna Zoobentos Fitoplancton Fitobentos Tapetes microbianos Hidrófitos	-	<ul style="list-style-type: none"> - Abundancia² - Frecuencia especies² - Cobertura² - Riqueza²
Vegetación y flora	Flora zonal Flora azonal Vegetación zonal Vegetación azonal	-	<ul style="list-style-type: none"> - Cobertura² - Riqueza² - Humedad sustrato¹ (%) - Frecuencia especies² - Abundancia²
Fauna	Avifauna Anfibios Reptiles Macromamíferos Micromamíferos	-	<ul style="list-style-type: none"> - Abundancia² - Riqueza² - Frecuencia especies²
Abiótico	Topografía	-	<ul style="list-style-type: none"> - Batimetría de ríos³ (-) - Topografía de la cuenca³ (-)

Fuente: Elaboración propia.

Nota: El número "1" es medición de manera continua, el "2" de manera discontinua y el "3" levantamiento inicial.

A continuación, se muestran las fichas de cada uno de los parámetros que se han tenido en cuenta para llegar a las conclusiones expuestas en el cuadro 7. En cada ficha, se incluirá la tipología del parámetro, es decir, la naturaleza de este y las fichas se dividirán en tres categorías:

- i) Parámetros con una frecuencia de aparición en las referencias superior a cinco, es decir, aparecen en aproximadamente el 80% de las referencias analizadas.
- ii) Parámetros con una frecuencia inferior a cinco.
- iii) Parámetros atípicos que únicamente se emplean una o dos veces.

Parámetro	pH en agua superficial y subterránea	Tipología	Química	Cat.	I
<p>El pH (potencial de Hidrógeno) es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución.</p> <p>Así pues, es un parámetro empleado para evaluar la calidad química de tanto el agua superficial como la subterránea y por tanto juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox, etc.).</p> <p>Asimismo, el pH del agua determina la solubilidad y la disponibilidad biológica de componentes químicos como nutrientes y metales pesados. Por ejemplo, además de afectar la cantidad y la forma de fósforo más abundante en el agua, el pH también determina si la vida acuática puede utilizarlo. En el caso de los metales pesados, el grado de solubilidad determina su toxicidad. Los metales tienden a ser más tóxicos a un pH más bajo porque son más solubles (Michaud, 1991).</p>					

Parámetro	Caudal agua superficial y subterránea	Tipología	Hidrogeológica	Cat.	I
<p>El caudal es la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal en una unidad de tiempo determinada.</p> <p>El objetivo principal de su monitoreo es obtener el balance hídrico del sistema, es decir, conocer los recursos hídricos que entran y salen del salar para adaptar la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del salar y poder mantener las propiedades hídricas del mismo.</p> <p>Otro motivo para su monitoreo es para garantizar el cumplimiento del caudal ecológico superficial. Esto es un instrumento de gestión y de reparto de agua que establece la cantidad, calidad y régimen de flujo de agua requerido para mantener el ecosistema del río u otra masa de agua, es decir, es el mínimo caudal que permite mantener la vida acuática que de manera natural habitan en el medio, así como la vegetación de su ribera (Ley 11/2005).</p> <p>Por otro lado, es importante monitorear el caudal de salmuera que circula por el salar, puesto que es un parámetro característico de los mismos.</p>					

Parámetro	Temperatura del agua	Tipología	Física	Cat.	I
<p>La temperatura influye sobre la cantidad de oxígeno disuelto presente en el medio de manera inversa, es decir, el aumento de la temperatura provoca el descenso de la concentración de oxígeno disuelto (Lindenschmidt y otros, 2019). Esto provoca la muerte de las especies puesto que éstas no son capaces de adaptarse a tiempo a las nuevas condiciones ambientales (Fula y Ayala, 2007).</p> <p>Asimismo, esta afección biológica también se observa en la alteración del metabolismo (reproducción y crecimiento) de las especies acuáticas, puesto que los peces son poiquiloterms y no pueden regular su temperatura (Prat, 2019).</p> <p>La tendencia al calentamiento de la masa de agua parece conducir a una desestabilización de la composición de las comunidades de macroinvertebrados fluviales y a una reducción en su diversidad global por efecto de la dominancia de unas pocas especies, sin que ello suponga una disminución de su riqueza faunística (Moreno, 2005).</p> <p>Por otro lado, el aumento de la temperatura provoca la disminución de la biomasa del fitoplancton total a pesar del aumento de la biomasa de las células más pequeñas (picoplancton) (IEO, 2010). Esto ocasiona la alteración de la comunidad fitoplanctónica y por consiguiente el ecosistema acuático.</p> <p>En último lugar, la temperatura del agua interviene en el proceso de evaporación en masas de agua, teniendo que considerarse pues para la obtención del balance hídrico del sistema. Dada su naturaleza, la temperatura del agua está interrelacionada con los parámetros de temperatura ambiental, evaporación y radiación solar, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>					

Parámetro	Temperatura ambiental	Tipología	Meteorológica	Cat.	I
<p>El aumento de la temperatura ambiental incrementa la tasa de los procesos microbianos, la evaporación de la lámina de agua y la transpiración de las plantas emergentes, es decir, afecta directamente a los parámetros que intervienen en el balance hídrico (Moreno, 2005).</p> <p>Asimismo, en sistemas fluviales que no sufran desecación, el aumento de la temperatura genera más producción primaria en la zona riparia, la cual (junto con una mayor concentración de carbono orgánico particulado y disuelto de origen alóctono) puede favorecer una mayor producción primaria y bacteriana en lagos, ríos y humedales (Moreno, 2005).</p> <p>Los aumentos de temperatura harán ascender la nitrificación de los suelos y, por escorrentía, el nitrato en los ríos (Jenkins, 1993). Y lo mismo sucederá con el nitrógeno orgánico en cuencas predominantemente agrícolas (Bernal y otros, 2003). Este efecto será más patente como resultado de las inundaciones intensas que tengan lugar tras las sequías.</p> <p>En última instancia, el constante incremento de las temperaturas debido al cambio climático tiene un impacto negativo en la biodiversidad, puesto que modifica las condiciones medioambientales de la flora, vegetación y fauna presentes, pudiendo llegar a su desaparición en la región de interés.</p> <p>Dada su naturaleza, la temperatura ambiental está interrelacionada con los parámetros de temperatura del agua, evaporación, humedad ambiental y radiación solar, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>					

Parámetro	Precipitación	Tipología	Meteorológica	Cat.	I
	<p>La precipitación es una de las entradas al sistema hidrológico continental y, por ello, su estudio es fundamental para determinar el balance hídrico del sistema para comprender cómo se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración (Githui, Selle y Thayalakumaran, 2012).</p> <p>Asimismo, las características del salar vienen definidas directamente por sus flujos de entrada y salida de agua, interviniendo así en el balance hídrico.</p> <p>Dada su naturaleza, la precipitación está interrelacionada con los parámetros de evaporación, humedad ambiental y presión atmosférica, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>				

Parámetro	Evaporación	Tipología	Física	Cat.	I
	<p>La evaporación es el resultado del proceso físico por el cual el agua cambia de estado físico, del líquido al gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor.</p> <p>La evaporación puede darse directamente desde el suelo (principalmente cuando éste no se encuentra protegido, es decir, no tiene cobertura); o desde masas de agua. Cabe destacar que la mayoría de las referencias analizadas solo nombran el proceso de evaporación, siendo la referencia #14 la única que habla sobre la evapotranspiración, la cual incluye la evaporación del suelo y la transpiración de la flora y vegetación. A continuación, se analiza la evaporación desde el suelo y desde masas de agua:</p> <p>La evaporación desde el suelo se relaciona con la cantidad de agua contenida en sus capas más superficiales. Un suelo totalmente saturado, dependiendo de sus características físicas, puede llegar a evaporar tanta agua como una superficie líquida. Si el nivel freático se encuentra más profundo, la evaporación disminuirá, la cual, a su vez, depende del tipo de suelo (Eduardo Johnson Vidal, 2009).</p> <p>La evaporación desde napas someras bajo suelos desnudos puede clasificarse en tres grupos, de acuerdo con las condiciones de humedad presentes (Hernández Araujo, 2012):</p> <ol style="list-style-type: none"> Para suelos húmedos en superficie, próximos a la saturación, la tasa de evaporación es independiente de sus propiedades, y está limitada únicamente por la disponibilidad de energía y las condiciones atmosféricas. Para un suelo con una primera capa seca y un nivel freático somero, la evaporación se producirá a una tasa menor que la demanda evaporativa de la atmósfera. El agua ascenderá desde el nivel freático hasta una determinada altura por capilaridad, a partir de la cual se transforma en vapor y sale a la atmósfera. La zona de interfaz entre el agua y el vapor se conoce como frente de evaporación. Para un suelo seco, con un nivel freático profundo, puede producirse evaporación a partir de mecanismos de transferencia de vapor, que actúan sobre el escaso contenido de humedad que pueda haber en la matriz. <p>La evaporación además se encuentra en función de la temperatura en el perfil del suelo no saturado, así como las condiciones de salinidad en el agua y suelo, por lo tanto, determinar las características del suelo y monitorear los niveles freáticos son fundamentales para una correcta definición de la evaporación, lo cual debe realizarse continuamente a lo largo del año.</p> <p>Por otro lado, la evaporación de masas de agua es el proceso fundamental por el cual se controla hidrogeológicamente el salar, puesto que su formación requiere de evaporaciones muy superiores a los aportes hídricos. Los factores que influyen en esta evaporación son la radiación solar, la temperatura ambiental, la temperatura del agua, la humedad ambiental y el viento, y por tanto está interrelacionado con los efectos e impactos de dichos parámetros.</p>				

Parámetro	Conductividad eléctrica agua	Tipología	Física	Cat.	I
	<p>La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad de un material (o sustancia) para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Particularmente en medios líquidos, la conductividad eléctrica está relacionada con la presencia de sales. De este modo, la principal función de la medición de este parámetro es obtener la salinidad presente en el salar, así como obtener indirectamente la posición de la cuña salina a partir de distintas mediciones a lo largo del mismo.</p> <p>Dado que el monitoreo de la salinidad en el agua y la caracterización de la cuenca permite conocer los flujos de agua (agua superficial, escorrentía e infiltraciones), en esta ficha se analizarán tanto el impacto de la salinidad en las masas de agua como en el terreno.</p> <p>Así pues, en primer lugar, se analizan los efectos de la salinidad en las masas de agua. Existe una correlación entre la distribución de especies fitoplanctónicas y los parámetros de temperatura, salinidad y fosfatos (Soria y Ros, 1991). Asimismo, existe una correlación entre la disminución de la salinidad y el aumento de la concentración de nutrientes y clorofila a (Orive, 1988).</p> <p>Por otro lado, la salinidad en el sustrato provoca la degradación de la biodiversidad de vegetación debido a la prevalencia de especies resistentes a altas concentraciones de salinidad, lo que altera el ecosistema (Australian Government Initiative, 2023).</p> <p>Los microorganismos del suelo constituyen menos del 0.5% de la masa del suelo, pero juegan un papel clave en las propiedades y procesos del suelo. Dichos microorganismos incluyen bacterias, arqueas, hongos y protozoos, entre otros, los cuales participan en la oxidación, nitrificación, amonificación, fijación de nitrógeno y otros procesos que conducen a la descomposición de la materia orgánica del suelo y la transformación de nutrientes. Además, también son capaces de almacenar carbono y nutrientes en su biomasa que se mineralizan tras su muerte (Yan y otros, 2015).</p> <p>Otro efecto del incremento de la salinidad es el aumento del potencial osmótico del agua del terreno, lo que provoca la extracción de agua de las células matando a microbios y raíces a través de la plasmólisis. Asimismo, la salinidad reduce la actividad microbial, de su masa (debido al estrés osmótico) e introduce cambios en la estructura comunitaria (Yan y otros, 2015).</p> <p>Por otra parte, la intrusión marina es el proceso por el cual el agua dulce entra en contacto con el agua salada (del salar en este caso) y la primera fluye sobre la segunda debido a la diferencia de densidades. Debido a ello, se forman una serie de lagunas por el afloramiento del agua subterránea debido a la presencia de la cuña salina y al cambio de la geomorfología de la superficie del terreno (Muñoz y Ortiz, 2004).</p>				

Parámetro	Conductividad eléctrica agua	Tipología	Física	Cat.	I
<p>Los afloramientos de agua subterránea en la interfaz de la cuña salina actúan como una barrera reguladora de los aportes al acuífero del salar. En años húmedos, los niveles ascienden someros y el área de las lagunas aumenta, por lo tanto, existe una mayor descarga por evaporación. Por otro lado, en años secos, una baja en el nivel freático del área y menor superficie lacustre implica una menor pérdida por evaporación (ICASS LTDA., 2014). De este modo, la caracterización de la cuña salina influye en el balance hídrico que gobierna los recursos hídricos.</p> <p>Consecuentemente, su posición y composición tienen un gran impacto en las lagunas presentes en los salares, las cuales contienen vegetación y fauna singulares como en el caso del Salar de Atacama y la Reserva Nacional Los Flamencos.</p> <p>Dada su naturaleza, la cuña salina contiene una gran cantidad de nutrientes que influyen en el ciclo biológico productivo del fitoplancton (Watanabe y otros, 2014), por lo que el retroceso de la cuña salina provoca la disminución de la cantidad de fitoplancton en el medio.</p>					
Parámetro	Radiación solar	Tipología	Meteorológica	Cat.	I
<p>La radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. Dicha radiación se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, siendo este último el más dañino para las células dada su alta energía. Existen distintos subtipos, siendo la UV-B la radiación con una longitud de onda comprendida entre 315 y 280 nm.</p> <p>Para que la radiación UV-B sea interceptada y produzca alteraciones en la fisiología de la planta, debe penetrar en la hoja y ser absorbida por cromóforos o moléculas susceptibles al efecto dañino de esta radiación. Por lo tanto, los cambios morfológicos y anatómicos que son inducidos por la radiación pueden llegar a ser determinantes en las respuestas de las distintas especies vegetales. Así, frente a un aumento de la radiación UV-B muchos de los cambios observados son atribuidos a la orientación de las hojas con el objetivo de minimizar la absorción de la radiación, lo que provoca la disminución del crecimiento de las especies vegetales (Carrasco, 2009).</p> <p>Por otro lado, la radiación solar es uno de los factores empleados para la obtención de la evaporación en masas de agua de manera indirecta. Dada su naturaleza, la radiación solar también está interrelacionada con el parámetro de temperatura ambiental, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>					
Parámetro	Velocidad y dirección del viento	Tipología	Meteorológica	Cat.	I
<p>Como se ha comentado anteriormente, la velocidad del viento está correlacionada con la obtención de la evaporación en masas de agua de manera indirecta.</p>					
Parámetro	Nivel freático y de agua superficial	Tipología	Hidrogeológica	Cat.	I
<p>El monitoreo de los niveles superficiales y el nivel freático de los acuíferos tiene como finalidad obtener el balance hídrico del sistema y evaluar y/o predecir impactos medioambientales en los salares.</p> <p>Por definición, el nivel del agua superficial está vinculado al caudal superficial, por lo que éste también se relaciona con los impactos correspondientes al no cumplimiento del caudal ecológico.</p> <p>Asimismo, la variación del nivel freático está relacionada con la evaporación del terreno, pues la saturación de este varía, lo que genera los impactos asociados a la vegetación comentados anteriormente en la ficha del parámetro de evaporación.</p> <p>Por otro lado, es importante monitorear el nivel de la salmuera presente en el salar, puesto que es un parámetro característico de los mismos.</p>					
Parámetro	Caracterización biota acuática	Tipología	Biológica	Cat.	I
<p>Todas las referencias previamente analizadas que hacen referencia a la caracterización de la biota acuática se centran en la obtención de seis factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abundancia • Riqueza • Frecuencia de especies • Cobertura • Concentración de clorofila a • Tapetes microbianos <p>El monitoreo de la biota acuática se lleva a cabo puesto que conjuga elementos estructurales y funcionales de los ecosistemas acuáticos.</p> <p>Dado que el fitoplancton es la base de la alimentación tanto del zooplancton como de cetáceos, aves marinas y peces, su disminución (abundancia) afecta a toda la cadena trófica (Madridejos, 2010). Asimismo, como se ha comentado con anterioridad, la temperatura superficial tiene influencia sobre la biodiversidad marina (Madridejos, 2010), la cual provoca la alteración de todo el ecosistema.</p> <p>Por su parte, la clorofila se emplea como un monitoreo del fitoplancton presente en el medio. Asimismo, su monitoreo permite controlar los niveles de oxígeno disuelto en el agua.</p> <p>Las comunidades biológicas, incluidas las microalgas, tienen una alta dependencia de la cantidad y calidad del agua. Por otro lado, los salares debido a su alta salinidad presentan en términos generales baja diversidad específica y de componentes (Purves y otros, 2004). De este modo, la calidad de los hábitats y la diversidad de la comunidad biológica en estos sistemas acuáticos están altamente relacionados con la calidad del agua y los sedimentos (Betrie y otros, 2011), los cuales deben tener las condiciones adecuadas para que posibiliten la vida acuática, con rangos de pH, conductividad y concentración de oxígeno, entre otros, que permitan la sobrevivencia de organismos.</p>					

Parámetro	Caracterización biota acuática	Tipología	Biológica	Cat.	I
<p>En estados extremos, las floraciones masivas de microalgas pueden agotar el oxígeno disuelto en el agua, provocando la mortandad de peces, lo que a su vez al descomponerse retroalimentan la floración o crecimiento poblacional de microalgas.</p> <p>Cabe destacar que la referencia #7, la cual plantea el modelo conceptual ecológico del Salar de Atacama mediante las interacciones entre los componentes del ecosistema, también considera la biomasa y el consumo de energía de la biota acuática. Por su parte, la biomasa se puede simplificar a la abundancia de la especie si se consideran tamaños medios de la biota acuática. Mientras que el consumo de energía está condicionado al número de organismos presentes, es decir, la abundancia de biota acuática. Es por ello que ninguno de estos dos factores se considera relevante en la caracterización de la biota acuática.</p>					

Parámetro	Caracterización flora y vegetación	Tipología	Biológica	Cat.	I
<p>Al igual que la caracterización de la biota acuática, la caracterización de la flora y vegetación se realiza a partir de los siguientes factores:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Abundancia • Riqueza • Frecuencia de especies • Cobertura • Vitalidad flora <p>La interceptación de la lluvia por la vegetación tiene gran importancia en el balance hídrico del sistema, debido a que gran parte retorna a la atmósfera en forma de evaporación. La vegetación constituye un factor regulador en los procesos hidrológicos porque actúa la barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su flujo y distribución bajo el área de su cobertura (Luna y otros, 2011). Asimismo, la presencia o ausencia de vegetación también afecta al contenido de humedad en el suelo y a la escorrentía superficial (Savenije, 2004).</p> <p>Dada su naturaleza, la flora, vegetación y clima influyen directamente en la fauna presente en el lugar.</p>					

Parámetro	Caracterización fauna	Tipología	Biológica	Cat.	I
<p>La caracterización de la fauna se realiza a partir de los siguientes factores: abundancia, riqueza y frecuencia de especies.</p> <p>La fauna es muy sensible a las explotaciones mineras. En cada emplazamiento donde se construye un pozo se produce una serie de ruidos, por las perforaciones, labores de construcción en la preparación de las instalaciones. Esto provoca la migración de la fauna hacia otros lugares por la perturbación de su hábitat, como consecuencia, se rompe la cadena trófica al retirarse algunas especies.</p>					

Parámetro	Sólidos suspendidos y disueltos totales	Tipología	Física	Cat.	I
<p>Los sólidos suspendidos totales corresponden a las partículas con un tamaño superior a las dos micras suspendidas en el agua. Mientras que las partículas inferiores a dos micras corresponden con los sólidos disueltos. Ambos se emplean como factores para determinar la calidad del agua (Vache, Eilers y Santelmann, 2002).</p> <p>Las altas concentraciones de sólidos suspendidos incrementan la temperatura del agua y reducen la concentración de oxígeno disuelto. Esto se debe a que las partículas absorben más radiación solar y transfieren el calor al agua por el proceso de conducción. Así pues, el oxígeno disuelto disminuye dado que el agua a mayor temperatura tiene una capacidad de retención del oxígeno disuelto menor que el agua a menor temperatura. Asimismo, la diferencia de temperatura que se produce provoca la estratificación de la masa de agua, es decir, las dos zonas de temperatura no se mezclan entre ellas. Dado que los procesos de descomposición y respiración de los organismos tienen lugar en las capas inferiores, éstas se vuelven hipóxicas y no permiten la proliferación de los organismos (Environmental Fondriest Inc, 2014).</p> <p>Los sólidos suspendidos también afectan al proceso de fotosíntesis de la vegetación fluvial al reducir la cantidad de luz que permite atravesar el agua. Esto causa que la muerte de la vegetación presente y, seguidamente, la reducción del oxígeno disuelto tras su descomposición (Environmental Fondriest Inc, 2014).</p> <p>Dada la naturaleza de los sólidos, éstos se relacionan con el caudal, la erosión, la escorrentía y la turbidez.</p>					

Parámetro	Parámetros químicos	Tipología	Química	Cat.	I																								
<p>Los parámetros químicos del agua y sustrato se emplean para determinar la calidad química del agua, la cual viene determinada por el tipo de sedimentación que se origina en cada salar. Los parámetros frecuentemente examinados en las referencias previamente analizadas son los siguientes:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">- Aluminio</td> <td style="width: 33%;">- Carbonato</td> <td style="width: 33%;">- Litio</td> <td style="width: 33%;">- Plomo</td> </tr> <tr> <td>- Arsénico</td> <td>- Cloruro</td> <td>- Magnesio</td> <td>- Potasio</td> </tr> <tr> <td>- Bario</td> <td>- Cobalto</td> <td>- Manganeso</td> <td>- Silicio</td> </tr> <tr> <td>- Bicarbonato</td> <td>- Cobre</td> <td>- Mercurio</td> <td>- Sodio</td> </tr> <tr> <td>- Boro</td> <td>- Estroncio</td> <td>- Nitratos</td> <td>- Sulfato</td> </tr> <tr> <td>- Calcio</td> <td>- Hierro</td> <td>- Oxígeno disuelto</td> <td>- Zinc</td> </tr> </table> <p>Cabe destacar que el oxígeno disuelto presente en el agua tiene un gran impacto en la calidad de esta, relacionándose directamente con otros parámetros tales como la biota acuática, los sólidos suspendidos y la temperatura del agua.</p>						- Aluminio	- Carbonato	- Litio	- Plomo	- Arsénico	- Cloruro	- Magnesio	- Potasio	- Bario	- Cobalto	- Manganeso	- Silicio	- Bicarbonato	- Cobre	- Mercurio	- Sodio	- Boro	- Estroncio	- Nitratos	- Sulfato	- Calcio	- Hierro	- Oxígeno disuelto	- Zinc
- Aluminio	- Carbonato	- Litio	- Plomo																										
- Arsénico	- Cloruro	- Magnesio	- Potasio																										
- Bario	- Cobalto	- Manganeso	- Silicio																										
- Bicarbonato	- Cobre	- Mercurio	- Sodio																										
- Boro	- Estroncio	- Nitratos	- Sulfato																										
- Calcio	- Hierro	- Oxígeno disuelto	- Zinc																										

Parámetro	pH del sustrato	Tipología	Química	Cat.	II
<p>Al igual que en su homólogo en el agua, es una medida de alcalinidad del suelo y por tanto un indicador de la calidad del sustrato.</p> <p>El pH influye en muchos procesos biogeoquímicos tales como la biodegradación de contaminantes orgánicos, nitrificación y desnitrificación, actividades de las enzimas del terreno, mineralización de materia orgánica, entre otros (Neina, 2019).</p> <p>Por el contrario, los factores que son susceptibles de modificar el pH son las condiciones climatológicas, minerales provenientes de la escorrentía y la textura del sustrato. En cuanto a la temperatura y la precipitación, éstos afectan la intensidad de lixiviación y meteorización de los minerales del suelo. De este modo, en ambientes cálidos y húmedos, el pH del suelo disminuye mientras que en ambientes secos el pH del sustrato es neutro o alcalino (USDA, 2014).</p> <p>Niveles de pH demasiado altos o bajos provocan la deficiencia de nutrientes y de la actividad microbiana, es decir, deterioran la calidad del sustrato para el crecimiento de vegetación (USDA, 2014).</p>					
Parámetro	Humedad sustrato	Tipología	Física	Cat.	II
<p>La humedad del sustrato determina en gran medida el asentamiento y crecimiento de especies de vegetación y flora (Koull y Chehma, 2014). La humedad del sustrato, en especial la presente en los primeros 15cm del suelo, constituye un factor limitante porque las plantas responden a la escasez de agua mediante la reducción de su crecimiento, alcanzando valores de reducción del 50% bajo la copa de los árboles (Lozano y otros, 2018).</p> <p>Dada su naturaleza, la humedad del sustrato tiene una relación directa con la precipitación, el nivel freático, la evaporación del sustrato y la evapotranspiración. Así pues, se involucra en el proceso de balance hídrico del sistema.</p>					
Parámetro	Humedad ambiental	Tipología	Meteorológica	Cat.	II
<p>La humedad ambiental se refiere a la presencia de vapor de agua en el aire. Como se ha comentado con anterioridad, la humedad ambiental es uno de los factores que influyen en el proceso de evaporación (Farhat, 2018).</p> <p>Asimismo, la humedad ambiental afecta al crecimiento de las especies florísticas de distinta manera, pudiendo acelerar (Gislerod y Mortensen, 1990) o retrasar (Mortensen, 2000) el proceso.</p> <p>Así pues, dada su naturaleza, la humedad ambiental está interrelacionada con los parámetros de evaporación, temperatura ambiental y precipitación, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>					
Parámetro	Presión atmosférica	Tipología	Meteorológica	Cat.	II
<p>Al igual que la humedad ambiental, la presión atmosférica es uno de los factores que influyen en el proceso de evaporación (Özgür y Koç ak, 2015) y el crecimiento de las especies florísticas (Mortensen, 2000; Ford y Thorne, 1974).</p> <p>Así pues, dada su naturaleza, la presión atmosférica está interrelacionada con los parámetros de evaporación y precipitación, y por tanto con sus efectos e impactos.</p>					
Parámetro	Material particulado 10 y 2.5	Tipología	Física	Cat.	II
<p>El material particulado presente en la atmósfera se clasifica en fracciones en función del tamaño de cada una de las partículas que lo constituyen. De esta forma, se distinguen tres grupos: material con tamaño de partícula superior a 10 micras, material con tamaño inferior o igual a 10 micras (PM10), y material con tamaño de partícula inferior a 2.5 micras (PM2.5). Las dos últimas, son las que más relevancia tienen puesto que pueden penetrar profundamente en los pulmones, generando un significativo riesgo para la salud (WHO, 2013).</p> <p>Asimismo, el viento puede transportar las partículas a través de largas distancias y luego, éstas pueden instalarse en el suelo o el agua. Según su composición química, los efectos de esta sedimentación pueden provocar la acidificación del terreno y/o lagos, la reducción de los nutrientes del suelo, y modificar la biodiversidad de ecosistemas (EPA, s/f).</p>					
Parámetro	Materia orgánica sustrato	Tipología	Biológica	Cat.	II
<p>La materia orgánica (MO) es materia elaborada a partir de compuestos orgánicos, es decir, organismos que alguna vez estuvieron vivos. Así pues, la MO modifica las propiedades del sustrato, proporcionando una mayor cantidad de carbono y nutrientes a la flora y vegetación presente en la zona (Ryals y otros, 2014).</p>					
Parámetro	Ruido y vibraciones	Tipología	Física	Cat.	III
<p>Es una fuente de contaminación ambiental debido a la maquinaria y procesos empleados en las actividades de extracción. El ruido impacta negativamente el hábitat natural de la fauna presente y de las poblaciones cercanas, puesto que puede generar problemas de salud tales como sordera, ansiedad y fatiga, entre otros (RD 286/2006).</p> <p>Por su parte, las vibraciones generadas también generan problemas de salud a los trabajadores, tales como: lumbalgias, hernias, pinzamientos discales y dificultad para mantener el equilibrio (RD 1311/2005).</p>					

Parámetro	Caudal de bombeo hídrico y salmuera	Tipología	Hidrogeológico	Cat.	III
<p>El caudal de bombeo de los pozos empleados presentes en los salares representa valores de descarga o recarga para el balance hídrico del sistema.</p> <p>Asimismo, el la extracción y recarga de los pozos modifica la posición de la cuña salina (Movellán, 2004) con los impactos asociados a la misma y definidos en su ficha correspondiente.</p>					
Parámetro	Superficie espejos	Tipología	Hidrogeológico	Cat.	III
<p>Tal y como se ha mencionado con anterioridad en la ficha correspondiente a la caracterización de la cuña salina, la superficie de espejos está relacionada con la evaporación, y, por tanto, con el balance hídrico del sistema.</p>					
Parámetro	Índice de Langelier	Tipología	Química	Cat.	III
<p>Es un índice que permite conocer la calidad del agua proporcionando información sobre el carácter incrustante o agresivo del agua y está fundamentado en equilibrios del anhídrido carbónico, bicarbonato-carbonato, el pH, la temperatura, la concentración de calcio y la salinidad total del agua.</p> <p>Así pues, es un parámetro para el control de la calidad del agua.</p>					
Parámetro	Isótopos	Tipología	Hidroquímica	Cat.	III
<p>Los isótopos son átomos del mismo elemento, pero con distinto número de neutrones. Los comúnmente empleados para fines hidrológicos e hidrogeológicos son los isótopos de hidrógeno con un neutrón (deuterio) y dos neutrones (tritio); y el oxígeno con 8 neutrones (oxígeno-16) y 10 neutrones (oxígeno-18) (Organismo Internacional de Energía Atómica, 2003).</p> <p>Los isótopos estables como el deuterio y oxígeno-18 no decaen en otros isótopos con el paso del tiempo. Por su parte, el tritio es un isótopo radiactivo que decae espontáneamente con el tiempo formando otros isótopos que emiten partículas alpha o beta. El tritio es producido naturalmente por la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera y artificialmente con la descarga de bombas de fusión. De este modo, dependiendo de las unidades de tritio observadas, el agua puede ser cualitativamente fechada entre el periodo anterior a las pruebas con las bombas (hasta 1963) o posterior a la misma (IAEA, s/f).</p> <p>En conclusión, la información sobre los isótopos es útil para trazar el agua en el suelo y el subsuelo y, junto con la información sobre la distribución espacial y la evolución de la concentración de tritio en la precipitación, permite datar las aguas para estimar así direcciones y velocidades de flujo, y evaluar la tasa de renovación de los recursos hídricos y la vulnerabilidad de acuíferos (Díaz, Rodríguez y Castaño, 2009).</p>					
Parámetro	Transmisividad	Tipología	Hidrogeológica	Cat.	III
<p>La transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro, es decir, es representativo de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua.</p> <p>Así pues, la transmisividad se relaciona con la capacidad de recarga del salar a través del flujo subterráneo y la recarga y/o descarga del mismo a través de los pozos, es decir, es un parámetro involucrado indirectamente en el balance hídrico del sistema (Yagual, 2016).</p>					
Parámetro	Demanda biológica de oxígeno	Tipología	Química	Cat.	III
<p>La demanda biológica de oxígeno (DBO) indica la cantidad de oxígeno que las bacterias y otros seres vivos consumen mientras descomponen la materia orgánica en condiciones aeróbicas.</p> <p>Si la cantidad de materia orgánica es suficientemente elevada, el consumo de oxígeno puede llevar a su agotamiento, lo que tiene una consecuencia inmediata en la destrucción de las comunidades acuáticas que necesitan el oxígeno para vivir (USGS, s/f).</p>					
Parámetro	Demanda química de oxígeno	Tipología	Química	Cat.	III
<p>La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro que mide la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas por medios químicos que hay disueltas o en suspensión en una muestra líquida. Así pues, se emplea para medir el grado de contaminación del agua.</p>					

B. Metodologías e instrumentos disponibles y aplicables

1. Estado del arte de la instrumentación aplicable

a) Precipitación

A continuación, se presentan los instrumentos empleados para registrar automáticamente la precipitación. Asimismo, en esta sección se incluirán los instrumentos para las mediciones de nevadas y cobertura de nieve.

Pluviómetros

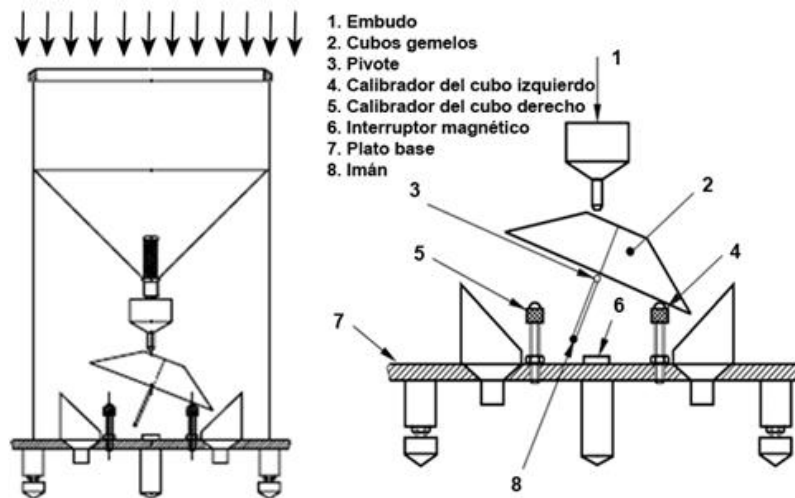
Los pluviómetros son dispositivos que se emplean para la medición de las precipitaciones que caen en una zona durante un tiempo determinado. Dada la naturaleza del presente estudio, únicamente se analizarán los pluviómetros automáticos, a saber:

- Pluviómetro de cubeta basculante.
- Pluviómetro de sifón.

De cubeta basculante

Este instrumento utiliza una balanza de cubeta doble metálica o plástica para medir el agua entrante en porciones de igual peso. Cuando un balde está lleno, su centro de masa se desplaza lo que provoca la inclinación de la balanza, vertiendo el agua recolectada y colocando el otro balde en posición para recolectar. El compartimento del cubo está configurado de tal manera que el agua se vacía por su parte inferior automáticamente, por lo que el control de la precipitación se realiza conociendo el volumen de los baldes y a partir de la oscilación de la balanza. Cada oscilación de la báscula produce un impulso eléctrico como una salida de señal que debe ser registrada por un sistema de adquisición de datos (*datalogger*), lo que proporciona una medición continua sin interacción manual.

Diagrama 1
Esquema del pluviómetro de cubeta basculante



Fuente: León y otros (2013).

Hay que tener en cuenta, que existen diversas fuentes de error del sistema:

- Dado que la balanza tarda unos segundos en cambiar de posición, durante dicho cambio se puede registrar erróneamente la cantidad de precipitación, lo que indica un error sistemático. Sin embargo, dicho error se puede corregir mediante una calibración o emplear un dispositivo para acelerar el movimiento de cambio de la balanza.
- La superficie del agua del cubo puede verse afectado por la evaporación.
- El agua puede adherirse a las paredes de las baldas de la balanza. Pruebas han demostrado que balanzas recubiertas de cera reducen el volumen requerido para oscilar la balanza en un 4%.

La calibración del sistema se realiza en laboratorio, introduciendo un volumen conocido de agua por la báscula y ajustando el mecanismo para conocer cuándo oscila la báscula.

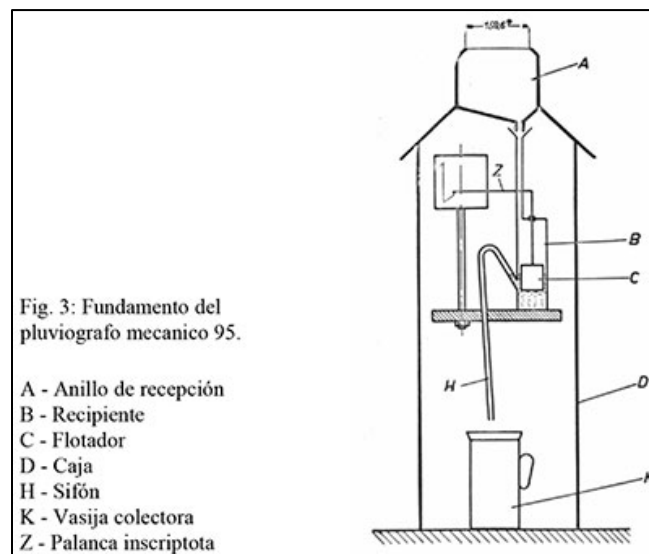
El mantenimiento debe de incluir la limpieza de la suciedad acumulada en el túnel y cubo. Asimismo, se recomienda la sustitución de la báscula por una calibrada una vez al año.

De sifón

El pluviómetro de sifón consta de un depósito cilíndrico, que recibe el agua a través de un tubo de goma. A medida que el nivel del agua asciende por el depósito, el movimiento vertical de un flotador ubicado en el propio depósito se transmite al movimiento de un transductor digital.

El dispositivo se completa con un tubo curvado hacia arriba que sale casi del fondo del depósito en forma de sifón, el permite el vaciado del depósito de manera automática cuando el agua alcanza el nivel máximo.

Diagrama 2
Esquema pluviómetro de sifón



Fuente: Müller (2013).

Cabe destacar que, en caso de esperarse heladas en invierno, se debe de instalar un dispositivo de calentamiento de agua en el interior del pluviómetro con el objetivo de evitar daños al flotador y al propio depósito. La intensidad del calor debe de ser la mínima para evitar pérdidas por evaporación en el interior del depósito.

El mantenimiento debe de incluir limpiar las impurezas en la parte inferior del embudo para que la precipitación pueda escurrir correctamente, así como vigilar todas las conexiones electrónicas del dispositivo.

Sensor de profundidad de nieve

Es un instrumento de medición que se utiliza para cuantificar el espesor y la profundidad de la nieve o granizo que se encuentra en un lugar determinado y en un intervalo de tiempo específico. Éstos pueden ser de láser o acústicos.

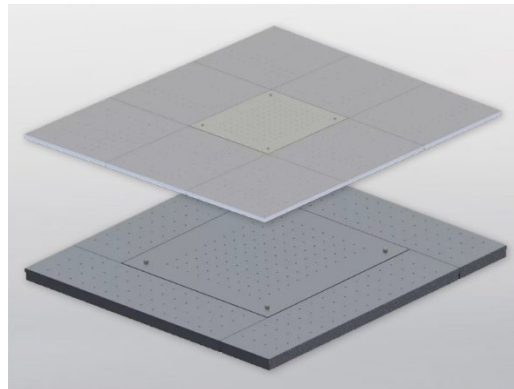
En cuanto a los nivómetros acústicos, el dispositivo emplea pulsos ultrasónicos y mide el tiempo que tarda entre la emisión de la señal y su recepción. Dado que se puede conectar a un sistema de adquisición de datos, proporciona un monitoreo continuo.

Por su parte, el nivómetro láser es capaz de medir niveles de profundidad hasta una distancia de, aproximadamente, 15m.

Colchón de nieve

El colchón de nieve se basa en un recipiente, normalmente de nylon, PVC, goma, neopreno e incluso metal, que contiene un líquido anticongelante y se encuentra conectado a una válvula de presión. Así, la nieve que se acumula sobre el colchón hace que el líquido incremente su presión sobre la válvula pudiéndose derivar el peso de la nieve acumulada (López y otros, 2010). Si se dispone de información del espesor del manto de nieve puede estimarse la densidad de la nieve y, por tanto, su contenido de agua. Si se mide la presión hidrostática por medio de un transductor de presión, se obtiene un método de medición continua del equivalente de agua de la capa de nieve (WMO, 2018).

Imagen 1
Colchón de nieve



Fuente: GEONOR, s/f.

b) Evaporación de espejos de agua

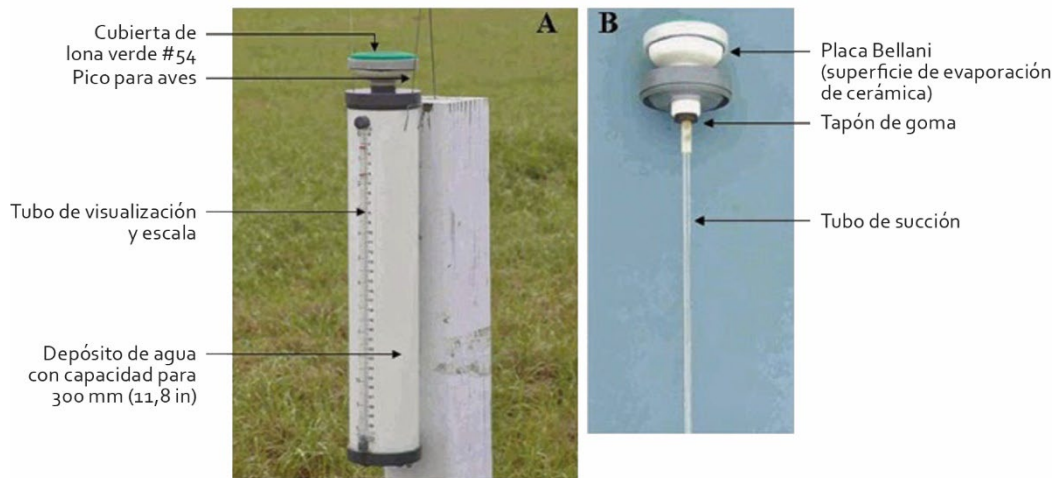
En cuanto al parámetro de evaporación de espejos de agua, se distinguen dos sistemas principales con los que realizar el monitoreo: los atmómetros y los tanques de evaporación.

Atmómetro

El atmómetro, también conocido como evaporímetro de Bellani, es un instrumento que permite una medida sencilla de la evapotranspiración a partir de una medida analógica similar a la de un termómetro, proporciona una estimación de la evapotranspiración potencial en base diaria o semanal.

Así pues, es un instrumento que mide el agua evaporada desde un depósito a la atmósfera, a través de una superficie de cerámica porosa conocida con el nombre de plato de Bellani. Algunos modelos tienen el plato recubierto por una lona verde para una mejor simulación de la evapotranspiración. Así pues, el sistema consiste en un depósito de agua, fabricado de PVC blanco para reflejar la radiación solar y evitar la transmisión de la temperatura ambiental al agua del interior. En la parte exterior del depósito, se dispone de un tubo de cristal con una escala graduada que permite la lectura del nivel de agua del depósito con facilidad. En la parte superior, se ubica la cápsula de cerámica porosa que evapora el agua destilada (Gavilán, 2009).

Diagrama 3
Partes de un atmómetro de Bellani



Fuente: Gavilán (2009).

La ventaja del sistema es su pequeño tamaño, bajo coste y bajas necesidades de agua, por lo que son útiles en pequeñas campañas de medición. Su principal desventaja es mantener la superficie de evaporación limpia, puesto que superficies sucias recuden la evaporación.

Un segundo tipo es el evaporímetro de Piche, el cual está constituido por un tubo cilíndrico de vidrio de 25 cm de largo y 1.5cm de diámetro. El tubo está granulado y cerrado en su parte superior, mientras que su abertura inferior está obturada por una hoja circular de papel filtro normalizado de 30mm de diámetro y 0.5mm de espesor, fijada por capilaridad y mantenida por un resorte. Llenado el apartado de agua destilada, ésta se evapora progresivamente a través de la hoja de papel filtro. La disminución del nivel de agua en el tubo permite calcular la tasa de evaporación. El proceso de evaporación está ligado esencialmente al déficit higrométrico del aire; sin embargo, el aparato no tiene en cuenta la influencia de la insolación.

Las lecturas proporcionadas por los atmómetros de Piche con exposiciones a las sombras cuidadosamente estandarizadas se han usado para derivar el término aerodinámica (obtenido a partir de la multiplicación del viento y el déficit de presión del vapor de saturación) requerido para la estimación de la evaporación.

Tanques de evaporación

Los tanques de evaporación son un instrumento empleado para estimar la evaporación que se produce desde una superficie de agua, el cual consiste en agregar diariamente agua al estanque para reponer la que se pierde por evaporación, siendo la cantidad de agua agregada equivalente a la

evaporación diaria. La versión más difundida se denomina Tanque Clase A, que dispone de un diámetro de 120cm y una profundidad de 25.4cm, que se instala sobre una plataforma de madera.

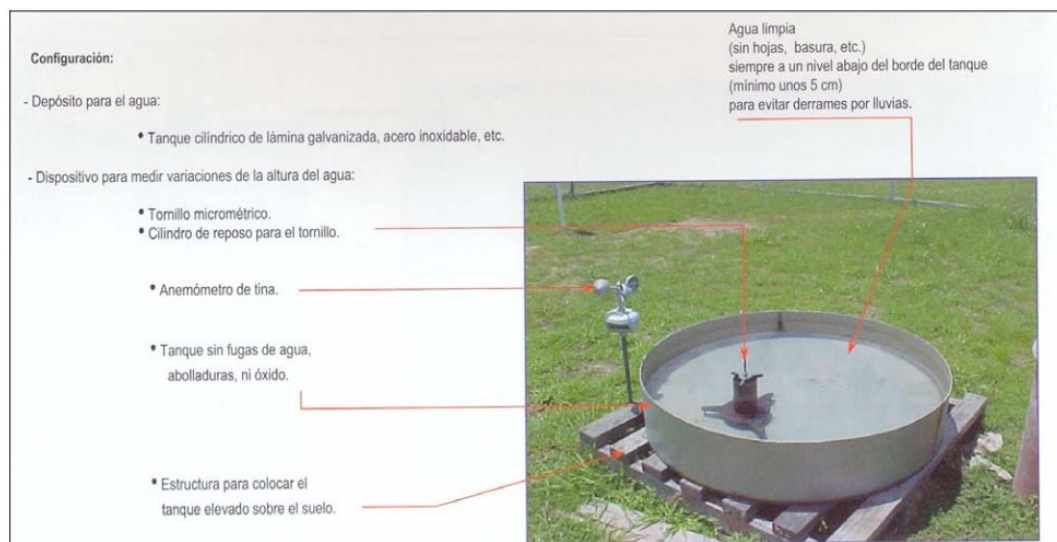
El sistema está concebido para medir la evaporación de embalses o grandes lagos y en general se sitúan próximos a ellos. Las medidas obtenidas son, en general, superiores a la evaporación real y precisan de coeficientes correctores, así como de coeficiente de reducción por salinidad.

En función de su disposición se distinguen dos categorías:

- Tanques superficiales: tiene la ventaja de una instalación muy sencilla. Además, sus resultados no corren riesgo de ser falseados por el rebote de las gotas de lluvia que caen sobre el terreno lindante. En cambio, son muy sensibles a las variaciones de la temperatura del aire y a los efectos de la insolación. Si se aíslan térmicamente las paredes exteriores del tanque para reducir el intercambio de calor con el ambiente, se observan tasas de evaporación más bajas.
- Los tanques enterrados: son menos sensibles a las influencias de la temperatura y la radiación en las paredes, pero las gotas de lluvia que rebotan en el suelo y los detritos que recogen pueden ser la causa de errores de medición. En general, son de más difícil instalación y mantenimiento.

Además del tanque, se emplean los siguientes instrumentos en las estaciones evaporimétricas: un anemógrafo integrado (o anemómetro), situado a uno o dos metros por encima del tanque para determinar el movimiento del viento sobre el tanque, un pluviómetro (o pluviógrafo), termómetros (o termógrafos) que proporcionan las temperaturas máximas, mínima y medida del agua del tanque y de la temperatura ambiente.

Diagrama 4
Tanque de evaporación clase A en superficie y sus componentes



Fuente: Salcedo, 2001.

c) Evaporación desde aguas subterráneas

Por su parte, el monitoreo de la evaporación de las aguas subterráneas se realiza mediante lisímetros o domos.

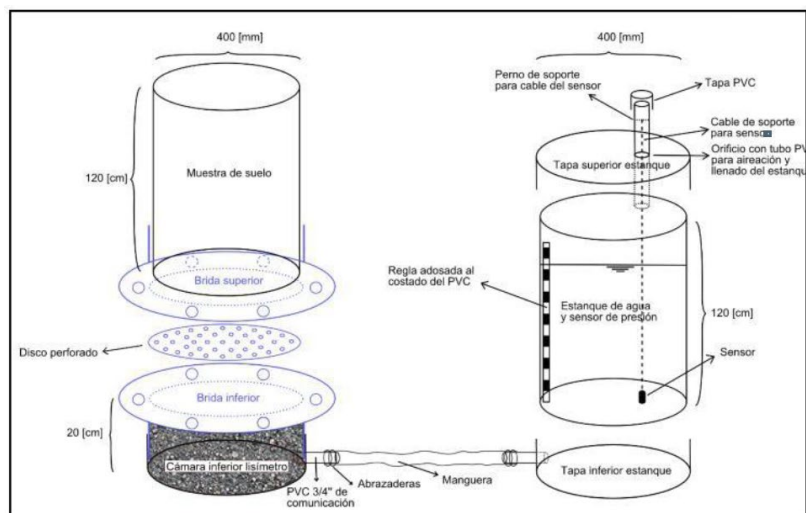
Lisímetro

Un lisímetro corresponde a columnas rellenas con un suelo inalterado o reconstruidos que son depositados en tanques impermeables enterrados. Estos tanques poseen una partura hacia la superficie del terreno, permitiendo un flujo líquido desde el exterior (infiltración) y desde su interior (evaporación) (Eduardo Johnson Vidal, 2009). En función de su funcionamiento, existen dos tipos:

- Lisímetro de balanza: el diseño básico consiste en un recipiente que contiene una muestra de suelo que es pesada en el tiempo a medida que la humedad del suelo se evapora en condiciones naturales. Otros diseños más complejos incluyen montar la muestra en una balanza con el fin de obtener un registro continuo, además se cuantifica el agua que drena y la humedad en la zona no saturada. Cuando esta metodología es aplicada en una pequeña porción de suelo es comúnmente llamado microlisímetro. Cabe destacar, que el instrumento deberá de estar protegido de la intemperie para evitar los efectos del viento en la balanza.
- Lisímetro de carga variable: corresponde a un recipiente con una muestra de suelo que está conectado a un estanque de agua. En el estanque se monitorea el volumen de agua que entra al recipiente que contiene el suelo a medida que se evapora.

La instrumentación consta de dos tubos de PVC del mismo diámetro y longitud, conectados en su parte inferior por una tubería que permita la circulación de agua desde el tanque de almacenamiento (sellado) hacia la columna de suelo abierta a la superficie (véase el diagrama 5). Asumiendo que inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio, el flujo entre ambos tanques se producirá por el gradiente hidráulico originado gracias a la evaporación desde la muestra de suelo.

Diagrama 5
Esquema funcionamiento lisímetro



Fuente: ICASS LTDA. (2014).

En el fondo del cilindro de almacenamiento se instala un sensor de presión que permite determinar la altura de la columna de agua (h) en el estanque. Analizando la diferencia de presión entre dos periodos de tiempo, puede obtenerse el volumen de agua que ha circulado entre ambos estanques para alcanzar el nuevo estado de equilibrio. Para determinar la evaporación producida en un intervalo de tiempo, se calcula el volumen total de agua que ha dejado el sistema, lo que equivale a sumar el volumen consumido en el tubo de almacenamiento y en la columna de suelo (WMO, 2018).

De este modo, los lisímetros son capaces de medir el ritmo de evapotranspiración que ocurre en los suelos a partir de resolver la ecuación de balance hídrico del propio instrumento. Para que dicha medición de la evapotranspiración sea representativa, es necesario que el sistema represente la cobertura de vegetación y humedad inicial del suelo del terreno objeto a estudiar.

El sistema puede presentar errores en la estimación debido a los siguientes efectos:

- Crecimiento restringido de las raíces.
- Cambio de difusión de remolinos por discontinuidad entre la cobertura dentro del lisímetro y en los alrededores. Cualquier discontinuidad puede ser causada por el anillo formado por los muros de contención y/o por discrepancias de la propia cobertura.
- Insuficiente equivalencia térmica entre la tierra del lisímetro y el suelo circundante.
- Insuficiente equivalencia del balance hídrico en comparación con el suelo circundante.

Se requiere un mantenimiento constante para mantener las mismas condiciones de cobertura de vegetación en el lisímetro que en el área objeto de estudio. Así pues, todas las modificaciones del terreno se deben de representar al mismo tiempo en el lisímetro. Se recomienda comprobar la presencia de fugas una vez al año. Asimismo, para evitar errores en la fase de captación de precipitación, las plantas se deben de mantener verticales y las hojas y tallos no deberían de extenderse sobre la superficie del lisímetro.

Domos (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009)

La metodología del domo consiste en la captura y registro del incremento del vapor de agua, proveniente del acuífero, mediante una cámara semiesférica de acrílico que cumple la función de volumen de control con dimensiones conocidas (DICTUC, 2009, 2014). La forma de la cúpula y su material permiten el paso de la radiación solar y evita la producción de perturbaciones en las ondas incidentes.

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

La metodología de medición consta de cinco etapas principales, las cuales se resumen a continuación:

- i) Para evitar el ingreso del aire hacia el interior del domo, puede aplanarse y rellenarse la superficie del terreno a lo largo del contorno o perímetro donde se instalará la cúpula. Adicionalmente puede instalarse una tela impermeable a lo largo del perímetro de la cúpula.
- ii) Activar los ventiladores y el sensor, y ventilar el domo hasta alcanzar la humedad ambiente al interior de la cámara.
- iii) Disponer rápidamente el domo sobre la superficie de medición y comenzar el registro. El tiempo de medición está determinado por la tasa de evaporación. Para el caso de suelos relativamente secos, la estabilización puede producirse después de varios minutos.
- iv) Una vez alcanzado el equilibrio, retirar la cámara y desactivar los dispositivos instalados en su interior. Esperar algunos minutos para realizar una nueva medición.
- v) La superficie del domo debe mantenerse limpia, pasando un paño húmedo cuando se considere necesario.

El procedimiento descrito permite calcular la tasa de evaporación instantánea de una medición puntual. Para determinar el comportamiento de la tasa de evaporación a lo largo del día se deben de realizar mediciones a intervalos regulares. La frecuencia de medición necesaria depende de las condiciones meteorológicas existentes en el lugar, si estas no presentan cambios bruscos, el intervalo debe ser a lo sumo de una hora durante las horas de luz.

d) Radiación solar

La interacción de la radiación solar con la atmósfera hace que se distingan dos componentes: radiación solar directa y radiación solar difusa, de manea que el cálculo de la radiación global incidente sobre la superficie inclinada a nivel de suelo implica la determinación de tres magnitudes (Pérez, 2007):

- Radiación directa desde el disco solar.
- Radiación difusa procedente del cielo.
- Radiación difusa reflejada desde el suelo.

A continuación, se describen los instrumentos empleados para el monitoreo de cada una de dichas magnitudes:

Piranómetro

Instrumento meteorológico utilizado para medir la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra y por tanto es capaz de medir las tres magnitudes. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad de flujo de radiación solar en un campo de 180 grados.

La medición se obtiene por la diferencia de calentamiento de dos sectores pintados alternativamente de blanco y negro en un pequeño disco plano. Cuando el apartado es expuesto a la radiación solar, los sectores negros absorben mayor radiación que los blancos.

Esta diferencia de radiación conlleva una variación de temperatura, que se puede detectar electrónicamente generándose con ello un voltaje eléctrico proporcional a la radiación solar incidente. En la variación de la temperatura pueden intervenir el viento, la lluvia y las pérdidas térmicas de la radiación ambiente.

Por lo tanto, el piranómetro tiene instalado una cúpula de vidrio óptico transparente que protege el detector, permite la transmisión adecuada de la componente solar y sirve para filtrar la radiación entre las longitudes de onda que oscilan aproximadamente entre 280 y 2,800nm.

En cuanto al mantenimiento, los piranómetros funcionando de manera continua se deben de inspeccionar, como mínimo, una vez al día, siendo preferible su comprobación cada vez que se realice una medición. Durante dichas inspecciones, se debe de limpiar la cúpula, comprobar la presencia de condensación en el interior de esta, así como asegurar de que el instrumento se encuentra nivelado.

Imagen 2
Piranómetro



Fuente: Modelo SR12 Geónica.

En cuanto a la radiación difusa, ésta se mide incorporando un disco o una banda sombreadora para evitar la visión del disco solar en su recorrido diario (eliminando así la componente directa). Dado que, debido a la geometría del elemento sombreador, parte de la radiación difusa procedente de los alrededores resultará también bloqueada, es necesario aplicar un factor de corrección a las medidas o emplear seguidores solares controlados mediante un microprocesador.

Pirgeómetro

Un problema con los instrumentos para medir la radiación total es que no hay absorbentes que tengan una sensibilidad completamente constante en toda la gama de longitudes de onda que se contemplan. Del mismo modo, es difícil encontrar filtros adecuados que tengan una transmisión constante entre 300 y 100,000nm. Por lo tanto, la práctica recomendada para medir la radiación total es realizar mediciones simultáneas de radiación de onda corta y de onda larga utilizando un piranómetro y un pirgeómetro.

Pirheliómetro

Instrumento para la medida de la radiación solar directa total. Para realizar dicha medición, se debe de situar en posición normal a la radiación. Se distinguen dos tipos de pirheliómetros (Tecnológico de Costa Rica, s/f):

- De cavidad absoluta: Poseen dos cavidades cónicas iguales, una en la parte externa, la cual se calienta al estar expuesta a la radiación solar, y otra oculta en el interior del instrumento, la cual se calienta mediante energía eléctrica hasta obtener una temperatura igual a la cavidad externa. Al igualarse las temperaturas puede asignarse el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente.
- Secundario: Se calibran por la comparación con un pirheliómetro de cavidad absoluta. Posee un sensor de termopila. Este dispositivo requiere de un sistema de seguimiento solar. Debido a la complejidad de estos sistemas, la medición de la componente directa de la radiación solar se hace en pocas ocasiones; además, su fiabilidad no es muy elevada.

Imagen 3
Pirheliómetro



Fuente: Modelo DR03-D1 de SensoVant.

Todos los tipos de pirheliómetros deben de ser calibrados por comparación con otro pirheliómetro previamente calibrado al Grupo Mundial de Normalización (WSG por sus siglas en inglés). Asimismo, para un monitoreo continuo, se debe de emplear un rastreador solar con una precisión de 0.2°.

En cuanto al mantenimiento, la instrumentación se debe de inspeccionar como mínimo una vez al día. En caso de emplear una pantalla protectora para proteger el sensor de las condiciones climatológicas, éste se debe de mantener limpio y asegurar que no aparece condensación en su interior.

Fotómetro

Instrumento para la medición de la radiación directa en un rango estrecho de longitudes de onda, al emplear filtros que limitan el rango a 1 o 2 nanómetros. El gran inconveniente que tienen dichos filtros es su alto coste.

e) Velocidad y dirección del viento

En primer lugar, se analizarán los sistemas disponibles actualmente para la medición de la velocidad del viento. Para ello es posible utilizar diversos principios físicos, listados y descritos a continuación:

- Anemómetro de empuje.
- Anemómetro de rotación (o de copelas).
- Anemómetro de compresión (o de presión hidrodinámica).
- Anemómetro de hilo caliente.
- Anemómetro sónico.

Anemómetro de empuje

Están formados por una esfera hueca y ligera o una pala, cuya posición respecto a un punto de suspensión varía con la fuerza del viento, la cual se mide en un cuadrante.

Esta instrumentación no es muy precisa y únicamente se emplean para obtener una información estimada de la velocidad del viento, su indicación generalmente es en números relativos a una escala arbitraria establecida de antemano, como por ejemplo movimiento de hojas, levantamiento de polvo del suelo, etc. Dichos rangos de velocidades se deben de conocer previamente.

Diagrama 6
Esquema del principio de funcionamiento de un anemómetro de empuje



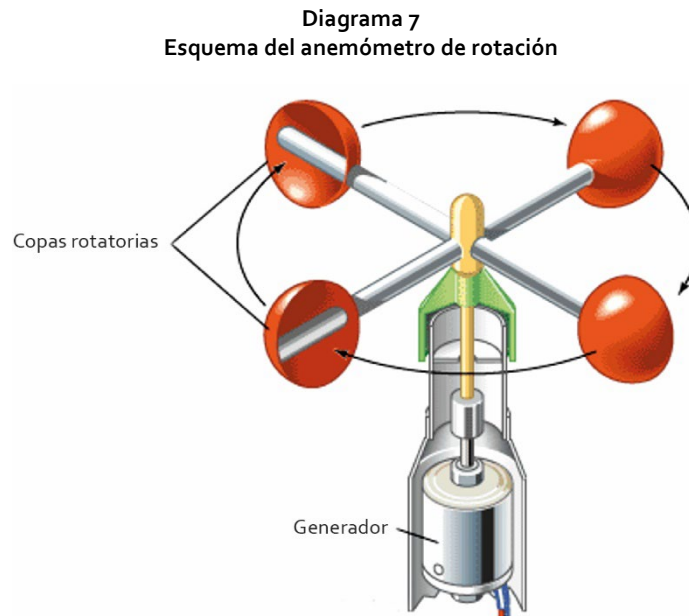
Fuente: Bruzos, s/f.

Anemómetro de rotación (o de copelas)

Este tipo de anemómetro está formado por dos partes: un rotor y un generador de señal. Así pues, el instrumento está dotado de cazoletas o hélices unidas a un eje central cuyo giro es proporcional a la velocidad del viento.

Dada su naturaleza de funcionamiento, la respuesta de este tipo de anemómetro en fases de desaceleración sobrestima la velocidad del viento debido a la inercia de este. Igualmente, las fluctuaciones del viento verticales pueden ocasionar el mismo efecto debido a la menor resistencia de las cazoletas en dicha dirección. Ambos efectos se pueden minimizar empleando anemómetros de respuesta rápida.

Por su parte, el generador de señal puede ser de corriente directa o alterna, óptico, mediante pulsos magnéticos o mediante diales contadores de turnos. Durante la toma de datos, se debe de asegurar que el generador de señal tenga una baja fricción de arranque y funcionamiento para no introducir errores en la medida.



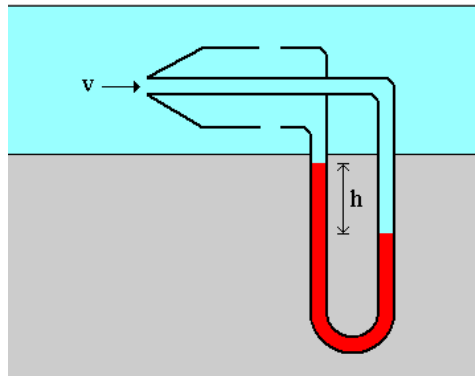
Fuente: Encyclopedia Britannica (2002).

Anemómetro de compresión (o de presión hidrodinámica)

Se basa en el tubo de Pitot y está formado por un tubo en forma de U con un orificio frontal (el cual mide la presión dinámica) y un orificio lateral (el cual mide la presión estática). En la parte en forma de U se graba una escala y dentro se coloca un líquido coloreado. La diferencia de presión entre los extremos del tubo hará que la columna líquida se desplace a un lado, siendo la diferencia de altura proporcional a la velocidad del viento incidente en la boca del tubo.

Adicionalmente, se puede modificar el instrumento para mostrar dicha presión hidrodinámica con un indicador de aguja o de manera automática.

Diagrama 8
Esquema funcionamiento del anemómetro de compresión



Fuente: Bruzos, s/f.

Anemómetro de hilo caliente

Mide la velocidad del fluido detectando los cambios en la transferencia de calor mediante un pequeño sensor calefactado eléctricamente expuesto al fluido bajo estudio, el cual se mantiene a una temperatura constante mediante un circuito de control electrónico. Dicha magnitud de voltaje está directamente relacionada con la transferencia del calor, y, por tanto, con la velocidad del fluido.

Se recomienda su uso para la medición de velocidades en fluidos puros (gases y líquidos) de temperatura uniforme. Asimismo, su alto rango dinámico permite su uso en fenómenos turbulentos, proporcionando una alta precisión. No obstante, su principal inconveniente es su excesiva fragilidad, y la pérdida de calibración en ambientes húmedos, no siendo recomendado su uso durante eventos de precipitación.

Anemómetro sónico

Se basa en que la velocidad de propagación del sonido depende de la velocidad del viento. Para ello, se mide el tiempo que demora una señal de sonido en atravesar una distancia conocida (20cm). Este intervalo de tiempo se relaciona con la velocidad del viento en la dirección entre el emisor y el receptor. Mediante una medición similar realizada en la dirección perpendicular a la anterior, se calcula la velocidad total del viento y su dirección.

A pesar de su coste superior al anemómetro de rotación, tiene una mayor precisión y no requiere mantenimiento mecánico al no haber piezas en movimiento. Sin embargo, presenta problemas para medir el viento durante episodios de precipitación.

Veletas de viento

En cuanto a la dirección del viento, se emplea la instrumentación de veletas de viento conectadas a un *datalogger* para la recopilación de las mediciones de manera automática y continua.

El generador de señales es esencialmente un transductor de ángulo de eje, de los cuales se han empleado diversas variedades: potenciómetros, sincronizadores de corriente alterna y continua, discos codificadores de ángulos digitales, entre otros.

La elección de la señal generadora depende del tipo de procesador de datos y lectura que se utilice. Asimismo, durante la toma de datos, se debe de asegurar que los cojinetes y el generador de señal tengan una baja fricción de arranque y funcionamiento para no introducir errores en la medida. Para ello, se recomienda el uso de sensores magnéticos.

Mantenimiento de los anemómetros y veletas de viento

Durante su vida útil, los anemómetros tienden a deteriorarse debido a los daños físicos ambientales, y el aumento de la fricción del rodamiento por la entrada de polvo, corrosión o degradación del transductor. Es por ello, que se recomiendan inspecciones periódicas verificando el valor nulo del sistema, procedimiento que varía en función del sistema de monitoreo empleado (por ejemplo, en el caso de los anemómetros de rotación, sujetando las cazoletas).

Las veletas, por su parte, también deben de comprobarse constantemente sujetando la veleta en una dirección previamente conocida y verificando el resultado obtenido.

f) Temperatura

En esta sección se procederá a detallar la instrumentación empleada tanto para la medición de la temperatura del agua como ambiental.

Termómetros de vidrio (o de líquidos)

Su funcionamiento depende de la dilatación y expansión que sufre un líquido en función de la temperatura en el interior de un tubo. Esta instrumentación es la más precisa de todos los termómetros meteorológicos (WMO, 2018).

Termómetros eléctricos

Es la instrumentación más empleada en estaciones meteorológicas debido a la salida digital de los datos. Los sensores más comúnmente empleados son los siguientes:

- Resistencia eléctrica, cuyo funcionamiento se basa en la variación de resistencia de un material conocido que sufre un material en función de la temperatura.
- Semiconductores, cuyo funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor debido a la variación de temperatura, creando una variación en la concentración de portadores.
- Termopares. Se compone de dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. A pesar de que proporcionan una alta precisión, requieren de una calibración frecuente.

g) Humedad ambiental

Los higrómetros son los instrumentos capaces de medir la humedad ambiental. Se distinguen distintas clases en función de su funcionamiento:

- Higrómetros gravimétricos.
- Higrómetros de condensación.
 - Higrómetro de punto de escarcha
 - Higrómetro de punto de rocío
- Psicómetros.
- Higrómetros de absorción.
 - Por resistencia eléctrica
 - Por capacitancia eléctrica
- Higrómetro de adsorción de la radiación electromagnética del vapor de agua.
- Higrómetro de cabello.

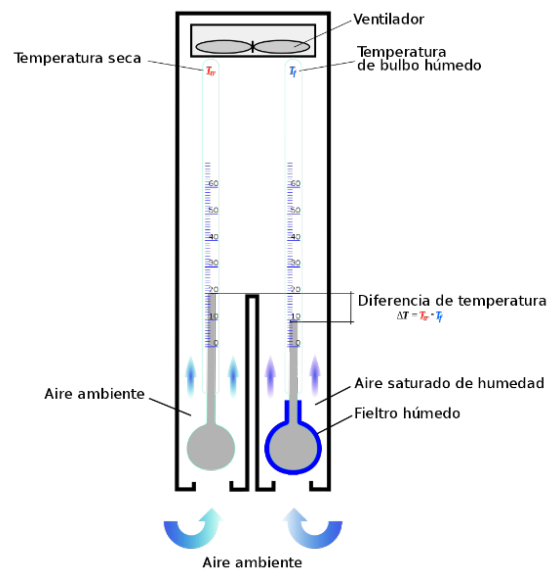
A continuación, se describen los métodos más relevantes al objetivo del presente estudio (WMO, 2018). Cabe destacar que los higrómetros de condensación no se detallan debido a su finalidad, obtener la humedad de saturación del punto de escarcha y rocío; así como los higrómetros gravimétricos debido a su uso exclusivo en laboratorio. Asimismo, los higrómetros de adsorción de la radiación electromagnética del vapor de agua tampoco se detallarán dado su uso únicamente en actividades de investigación.

Psicrómetro

Este dispositivo consta de dos termómetros, uno que está en contacto con el aire y mide la temperatura real del mismo (termómetro seco), y otro que tiene el bulbo envuelto en una muselina humedecida con agua, la cual se encuentra conectada a un depósito de agua. Su funcionamiento se basa en la comparación de las lecturas de ambos termómetros. En monitoreo continuo, se recomienda el uso de termómetros de resistencia eléctrica en vez de los termómetros convencionales.

Así pues, se espera que el termómetro húmedo marque una temperatura menor que el seco debido a que el agua que empana la muselina se evapora y es reemplazada por la que capta del depósito de agua. De este modo, el descenso de temperatura depende de la velocidad de evaporación.

Diagrama 9
Funcionamiento básico de un psicrómetro de Assman



Fuente: Kospierre (2015).

Tras detallar el principio básico de funcionamiento de los psicrómetros, a continuación, se describen los tipos más relevantes (WMO, 2018):

- Psicrómetro de Assman. El funcionamiento es idéntico al descrito anteriormente, con la salvedad de que los termómetros se encuentran conectados a un ventilador que aspira el aire verticalmente.
- Psicrómetro de circulación forzada de aire, el cual se instala en un recinto cerrado y, a diferencia del psicrómetro de Assman, se fuerza que el aire circule horizontalmente.

- Psicrómetro de honda, el cual se trata de un psicrómetro portátil ideado para efectuar mediciones en campo al moverlo rápidamente por el aire. El giro del aparato produce un flujo forzado del aire alrededor de los termómetros, reduciendo el tiempo necesario para la obtención de la lectura combinada de las dos temperaturas.
- Psicrómetro de aire caliente, el cual aprovecha que la humedad ambiental no se modifica con la temperatura, siendo útil en zonas donde hiele.

El mantenimiento de los psicrómetros requiere cambiar el agua del depósito diariamente, así como la limpieza de este, y cambiar la muselina que recubre el termómetro húmedo semanalmente.

Higrómetro de cabello

Es un equipo que emplea cabello desengrasado debido a que éstos cambian su longitud según sea la humedad del aire, incrementándose aproximadamente un 2% cuando la humedad incrementa de 0% al 100%. El instrumento más habitual es el higrógrafo, el cual consiste en un tambor giratorio que registra las variaciones de longitud de cabello transmitidas a una plumilla que traza una gráfica en una banca colocada en el tambor.

Este instrumento se suele emplear en regiones donde no haya humedades extremas y en ambientes contaminados, dada su protección a este tipo de ambientes.

En cuanto a su mantenimiento, el pelo se debe lavar cuidadosamente con frecuencia y evitar el contacto con las manos. Asimismo, el tambor y el resto de los mecanismos se debe mantener engrasados.

Higrómetro de absorción

Estos instrumentos se basan en que ciertas sustancias son capaces de absorber la humedad del aire y mantener un equilibrio con el calentamiento de la evaporación. Habitualmente, se emplean sensores eléctricos de humedad relativa para aplicaciones de lectura remota, especialmente cuando se requiere una visualización directa de la humedad relativa. Dado que muchos de ellos tienen respuestas no lineales a los cambios de humedad, los fabricantes a menudo suministran sistemas especiales de procesamiento de datos y visualización.

Así pues, los sensores fabricados con material plástico tratado químicamente que tengan una capa superficial conductora eléctrica en el sustrato no conductor se pueden utilizar con fines meteorológicos. El proceso de adsorción, en lugar de absorción, es dominante porque la parte sensible a la humedad de un sensor de este tipo está restringida a la capa superficial. Como resultado, este tipo de sensor es capaz de responder rápidamente a un cambio en la humedad ambiental.

Esta clase de sensores incluyen varios tipos electrolíticos en los que la disponibilidad de iones conductores en un electrolito higroscópico es una función de la cantidad de vapor de agua adsorbido. El electrolito puede tomar varias formas físicas, como soluciones líquidas o gel, o una resina de intercambio iónico. El cambio en la impedancia a una corriente alterna, en lugar de a una corriente directa, se mide con el fin de evitar la polarización del electrolito. Se puede utilizar el suministro de baja frecuencia, dado que la resistencia de la corriente debe medirse, y por lo tanto es posible emplear cables bastante largos entre el sensor y su interfaz eléctrica.

Por otro lado, también es posible emplear la capacidad de capacitancia eléctrica del material, puesto que la variación de las propiedades dieléctricas de un material sólido e higroscópico se relacionan con la humedad relativa ambiental, siendo los materiales poliméricos los más utilizados para este propósito.

La parte activa del sensor de humedad consiste en una lámina de polímero entre dos electrodos para formar un condensador, el cual proporciona una medida de humedad relativa a partir de la impedancia eléctrica. El valor nominal de la capacitancia puede ser sólo unos pocos o varios cientos de

picofarads, dependiendo del tamaño de los electrodos y el espesor del dieléctrico. Esto, a su vez, influirá en el rango de frecuencia de excitación utilizado para medir la impedancia del dispositivo, que normalmente es al menos varios kilohercios y, por lo tanto, requiere que se realicen conexiones cortas entre el sensor y la interfaz eléctrica para minimizar el efecto de la capacitancia perdida. Dado que los sensores de capacitancia normalmente tienen la interfaz eléctrica incorporada en la sonda, es necesario considerar el efecto de la temperatura ambiental en el rendimiento del componente del circuito.

h) Humedad del suelo

En esta sección se detallarán los métodos por los cuales es posible obtener la humedad del suelo de manera continua. Dada la naturaleza del estudio, no se incluirá el método directo para conocer la humedad gravimétrica en laboratorio, ni los métodos radiológicos.

Tensiómetro

Este instrumento mide la intensidad de la fuerza con la que el suelo retiene agua. La mayoría de los tensiómetros tienen una punta cerámica o porosa conectada a una columna de agua.

A medida que el suelo se seca, el tensiómetro comienza a capturar agua de la columna de agua a través del bulbo de cerámica, provocando una succión en la columna de agua, la cual se mide con un indicador de succión o un sensor electrónico.

Los tensiómetros funcionan bien en suelos con alto contenido de agua, pero tienden a perder buen contacto con el suelo a medida que se seca la tierra (Martin, 2017).

Bloques de resistencia eléctrica

Se basa en la medición de la resistencia eléctrica del suelo, dado que la humedad se puede determinar por la resistencia al paso de corriente eléctrica entre dos electrodos en contacto con el suelo, ya que a medida que mayor sea la concentración de agua, más baja será la resistencia. Para evitar errores en la medida debido a la salinidad del sustrato, se recomienda emplear bloques de yeso, cuyos resultados se deben de corregir en función de la temperatura (WMO, 2018).

Sin embargo, su uso práctico es limitado, puesto que operan muy bien en la parte alta del rango de humedad disponible en el suelo, pero su precisión disminuye a menor humedad (Martin, 2017).

i) Caudales de recursos hídricos y salmuera

Por definición, el caudal puede conocerse mediante la obtención del nivel del agua (o salmuera) y la velocidad circulante de la misma; o directamente empleando un caudalímetro de hélices específico para ríos, los cuales ofrecen la posibilidad de medir caudales en presencia de sólidos orgánicos e inorgánicos en el agua.

Así pues, en esta sección se describirán los dispositivos disponibles actualmente en el mercado para la medición del nivel del agua, la velocidad de circulación y los caudalímetros.

Medidores de nivel

En las estaciones de aforo (estación que sirve para medir el caudal de un río de forma sistemática en donde se determina la relación entre nivel del río y caudal) se registra generalmente el nivel del agua y su evolución en el tiempo. Existen varios procedimientos de medida del nivel de agua, unos realizan la medida desde el exterior de la masa de agua, otros desde el interior y otros desde la superficie (EOI Escuela de Negocios, 2003).

Los *flotadores* proporcionan las variaciones del nivel de la superficie del agua. Si se conecta a un contrapeso, los desplazamientos del flotador hacen girar la polea, proporcionando el nivel del agua. Este procedimiento requiere de un pozo vertical.

El procedimiento mediante el uso de un **neumático de medida** no precisa pozo vertical. Consiste en hacer burbujear un gas, generalmente nitrógeno, por el extremo de un tubo sumergido en el agua. La presión necesaria para que el gas burbujee por el extremo del tubo es proporcional a la columna de agua en ese punto, y por ende, proporcional al nivel del agua.

Los **sensores piezométricos** se basan en la medición de la presión de la columna de agua. Para ello, se emplean principios de medida tales como la variación de resistencia eléctrica de un elemento, la variación de la frecuencia de vibración de un cristal de cuarzo o de una cuerda metálica vibrante, o la variación de la capacidad de un condensador.

Los **sensores ultrasónicos** emiten un tren de ondas que al reflejarse en una superficie y retornar al receptor, se obtiene la distancia recorrida por las mismas. En función de los datos fijos de colocación del sensor, y la batimetría del río en ese punto, es capaz de obtener el nivel del agua. Algunos modelos se colocan en el exterior, encima del nivel máximo del agua, mientras que otros se instalan en el fondo del río midiendo desde el interior de la masa de agua.

Medidores de velocidad

Existen diversas técnicas para medir la velocidad del río en continuo, algunos realizando la medida en un punto, en una banda de puntos, o en una sección completa de la masa de agua (EOI Escuela de Negocios, 2003).

El **molinete** está compuesto por una hélice unida a un pequeño dinamo. De este modo, la hélice gira sumergida en el agua y el dinamo permite conocer la velocidad puntual de la misma.

El uso de **sensores ultrasónicos** requiere la instalación de dos emisores-receptores de ondas en cada margen de la sección que se quiere monitorear. En primer lugar, se emiten ondas de un emisor al receptor, para, posteriormente, invertir la dirección de las ondas. De este modo, el sistema electrónico calcula la velocidad del agua en la banda atravesada por las ondas en función de la diferencia entre los tiempos de tránsito de las ondas en cada sentido.

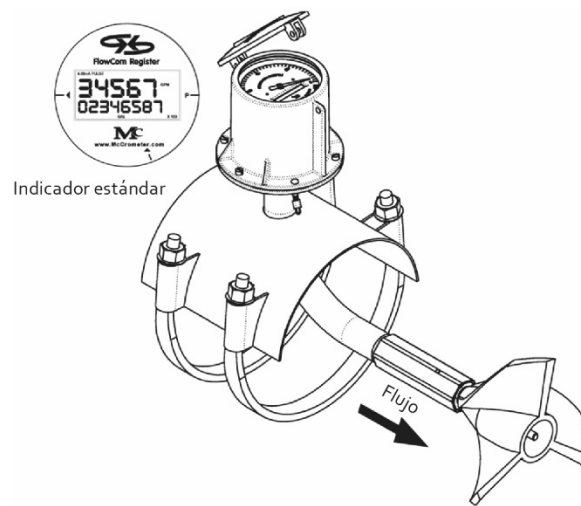
El **sistema electromagnético** requiere la instalación de una bobina eléctrica de manera que genere un campo magnético que atraviese toda la corriente de agua. Este campo magnético genera una corriente eléctrica en la masa de agua que se recoge mediante dos electrodos instalados uno en cada lateral de la sección de control, a partir de la cual se calcula la velocidad media del agua.

Medidores de caudal

En cuanto a los caudalímetros mecánicos, son sistemas complejos que requieren de un microprocesador y una instalación predeterminada para evitar la afección de las partículas en el mismo.

Se compone de una hélice instalada en el eje del rodamiento con el cuerpo del medidor girado 180 grados. Esta configuración permite que la hierba u otros desechos se desprendan con facilidad. El diseño del conjunto también reduce la capacidad de que tierra y limo se acumulen en el rodamiento.

Diagrama 10
Esquema de un caudalímetro de río



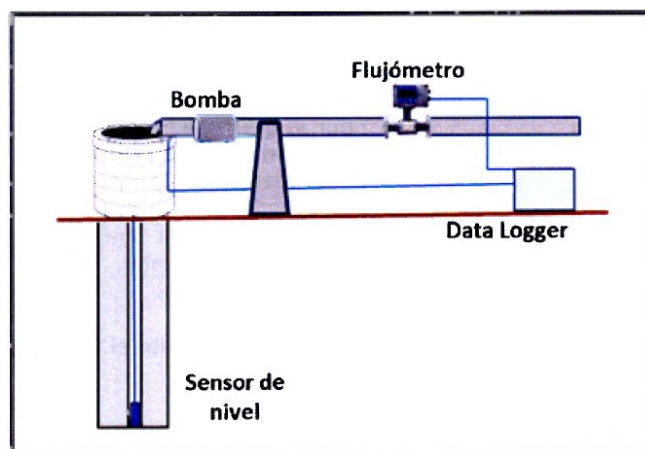
Fuente: Modelo M0300SW de MC Propeller.

Cabe destacar, la existencia de caudalímetros para determinar la extracción y recarga de los pozos, cuyo funcionamiento es similar al descrito anteriormente, con la salvedad de que éstos pueden ir instalados directamente en la bomba hidráulica.

A continuación, se detallan las características del procedimiento de medición del caudal para aguas subterráneas, así como las condiciones técnicas respecto a los dispositivos de control y aforo en aguas superficiales.

En cuanto a su uso en aguas subterráneas y salmueras, se deberá de realizar el monitoreo mediante el sistema de medición general (DGA, 2019), el cual se compone de un sensor para medir caudal y volumen extraído, un sensor para medir el nivel freático y un *datalogger* para almacenar y respaldar los datos medidos en la obra de captación.

Diagrama 11
Esquema del sistema de medición general



Fuente: DGA (2019).

A continuación, se describen las características que debe de tener cada elemento. En cuanto al caudalímetro, éste tendrá las siguientes características mínimas:

Cuadro 8
Características mínimas del caudalímetro

Característica	Descripción
Variables medidas	Volumen extraído (m ³) y caudal (l/s). El caudal puede obtenerse a partir del volumen extraído por hora
Principio de medición	Electromagnético, de ultrasonido, mecánico u otro
Señal de salida	Cualquiera que sea compatible con el puerto de entrada del <i>datalogger</i>
Máximo error de medición	5%. Para acreditar el máximo error de medición se debe de contar con un certificado emitido por algún laboratorio del rubro o la documentación del caudalímetro si éste se indica en la misma
Rango de medición	Debe abarcar a lo menos entre el 20% hasta el 120% del caudal total autorizado en la extracción

Fuente: DGA (2019).

La distancia del caudalímetro debe seguir las especificaciones técnicas señaladas por el fabricante y en la medida de que éstas no puedan aplicarse, se deberá garantizar que la distancia entre el caudalímetro y la singularidad aguas arriba deberá ser igual o superior a los 10 diámetros; la distancia mínima entre el caudalímetro y la singularidad aguas abajo deberá ser igual o superior a los 5 diámetros; la disposición de la tubería donde se instala el caudalímetro debe estar siempre llena de líquido, por lo que idealmente debe estar instalada en posición horizontal o vertical con flujo ascendente; y nunca se instalará en la sección de succión de la bomba.

Asimismo, en el trayecto que abarca desde la obra de captación hasta el caudalímetro no deberán existir bypass ni ramificaciones en otras tuberías; y deberá de estar instalado a una distancia no mayor a 200m de la obra de captación.

En cuanto al sensor de nivel freático, éste debe de instalarse siguiendo las indicaciones del fabricante, de tal forma de poder medir tanto en condiciones de nivel dinámico o estático según se encuentre o no, funcionando la bomba en el momento de la medición. La medida se dará en metros y la señal de salida debe de ser compatible con el puerto de entrada del *datalogger*.

Por su parte, el *datalogger*, debe respaldar los datos de nivel freático y totalizador medidos de al menos los últimos 3 años, indicando fecha y hora de medición. Además, deberá contar con un mecanismo que permita acceder desde un computador portátil a la lectura y descarga de la información almacenada.

En el caso del caudal para aguas superficiales (Ministerio de Obras Públicas, 2020), se deberá de instalar y operar un sistema de medición que asegure desde un punto de vista técnico, hidráulico y de seguridad, el correcto aforo. Para ello se deberá considerar, como mínimo, un aforador o sección de aforo y su respectiva curva de descarga que permita establecer la relación altura-caudal, una regla limnimétrica, un sensor de nivel y un *datalogger*.

Para los sensores de nivel de aguas, éstos deberán de tener la capacidad de registrar la misma altura limnimétrica que la escala o regla limnimétrica habilitada en la sección de aforo correspondiente. El sensor deberá estar permanentemente calibrado y correlacionado con la regla limnimétrica instalada de forma que las mediciones coincidan (mediciones realizadas en centímetros). Asimismo, la señal de salida del sensor debe de ser compatible con el puerto de entrada del *datalogger*. El *datalogger* deberá de contar con las mismas características descritas anteriormente.

j) Niveles freáticos y nivel de salmuera

Un piezómetro es un dispositivo que permite medir la presión del agua subterránea, así como el aumento o disminución de esta cuando se realiza una perforación. Para ello, existen cuatro tipos (Suárez, 2009):

- Piezómetro de cabeza abierta.
- Piezómetro Neumático.
- Piezómetro de cuerda vibrante.
- Piezómetro de resistencia eléctrica.

P. de cabeza abierta

En este tipo de piezómetro, se coloca un filtro o un elemento poroso (habitualmente de polietileno de alta densidad unido a un tubo de PVC) para determinar el sitio específico de la medición. Sus principales ventajas son que son simples y fáciles de interpretar, fáciles de mantener, su durabilidad y permanencia en el tiempo es buena. Asimismo, se pueden acomodar para los sistemas automáticos de adquisición de datos, colocando dentro del tubo un piezómetro suspendido de cuerda vibrante.

Por otro lado, entre las limitaciones se puede mencionar que son de respuesta lenta con el tiempo y que los filtros pueden taparse con la entrada repetida de agua y salmuera. Sin embargo, la limitación más importante es que no permiten medir los niveles pico de presión durante tormentas cuando los piezómetros se encuentran instalados en arcillas.

P. neumático

Este piezómetro consiste en una punta porosa unida a una válvula o diafragma muy sensitivo que es accionado por gases o fluidos. El sistema requiere una unidad de lectura exterior, la cual produce una presión dentro del sistema interno del piezómetro hasta igualar la presión en la cavidad de este.

Entre las ventajas de este tipo de piezómetros se encuentran que son muy precisos al requerirse solo pequeños cambios en el volumen de agua, simples de operar, de bajo coste y de rápida instalación.

Por otro lado, entre las limitaciones se destaca la dificultad para desairear el sistema poroso y la facilidad con la que se puede tapar con partículas del suelo. La durabilidad en el tiempo es muy inferior a los piezómetros de cabeza abierta. Asimismo, no son prácticos para las mediciones automáticas.

P. de cuerda vibrante

El piezómetro de cuerda vibrante es un dispositivo que basa sus mediciones a partir de las deformaciones, las cuales producen voltajes o corrientes a partir de un esfuerzo mecánico, que produce vibraciones, midiendo la frecuencia vibratoria de un cable tensionado a una membrana y su tubo principal y se mide la variación por medio de una bobina electromagnética. De este modo, las deflexiones del diafragma ocasionan cambios en la tensión del cable, la cual es medida y convertida en presión.

Cabe destacar, que dada la naturaleza de los salares, se recomienda emplear sensores con alto grado de estanqueidad para aplicaciones con humedades o condensaciones elevadas (Sensors, s/f).

P. de resistencia eléctrica

Su funcionamiento consiste en permitir el paso del agua y salmuera a través de un filtro que actúa sobre un diafragma metálico al que se fija un puente de Wheatstone (circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas). La deflexión sostenida por este puente se mide en función de las variaciones de resistencia y este valor es convertido a una señal eléctrica, obteniendo así la presión.

Pozómetro

Tal y como se ha comentado en secciones anteriores, es necesario que el monitoreo del nivel del agua y salmuera se verifique mediante mediciones manuales dada la importancia de los niveles del agua en los salares.

Así pues, el pozómetro es un dispositivo para la medición manual del nivel de agua y salmuera, que se compone de un cable milimetrado que en su extremo lleva incorporado un electrodo. Una vez que dicho electrodo alcanza el agua, éste transmite una señal hasta el carrete, accionando una alarma acústica o luminosa que advierte sobre la presencia de líquido y señalado su profundidad exacta.

k) Nivel y superficie lagunar

Para la medición del nivel lagunar, se emplean los mismos instrumentos que los descritos anteriormente para la determinación del caudal.

En cuanto a las superficies lagunares, éstas se obtienen a partir del procesamiento de imágenes satelitales mediante la combinación de bandas de infrarrojos correspondientes al índice de Diferencia Normalizada del Agua (NDWI). Se recomienda obtener las imágenes satelitales del sensor RapidEye o Landsat 8, ambos con resolución de 5m por píxel.

l) Parámetros relacionados con la biota acuática

Los parámetros relacionados con la biota acuática requieren de la toma de muestra de manera manual de todos los pozos de monitoreo para su posterior análisis y determinación de la abundancia, riqueza, cobertura y frecuencia de especies. Para ello, a continuación, se describe la metodología de análisis para cada tipo de grupo de estudio:

- Fitobentos: las muestras se preparan analizan al microscopio, clasificando y contando la totalidad de los organismos presentes (Wetzel y Likens, 1991).
- Fitoplancton: las muestras se preparan y analizan al microscopio, estableciendo la riqueza y abundancia de las microalgas presentes (Wetzel y Likens, 1991).
- Zooplancton: la clasificación se realiza de acuerdo con (Araya y Zúñiga, 1985; Pennak, 1990).
- Zoobentos: la clasificación se realiza en base a los trabajos de (Bertrand, 1995; Lopretto y Tell, 1995; Merritt y Cummins, 1996; Pennak, 1990; Domínguez y Fernández, 2009). A partir de esta información, se aplica el índice de diversidad biológica de Shannon-Wiener.

En cuanto a las plantas acuáticas, éstas también se recolectan en campo y se transportan al laboratorio para su identificación. En cada estación de muestreo, se estima visualmente el porcentaje de cobertura absoluta de la vegetación acuática. Asimismo, la cobertura de las distintas especies se estima visualmente de acuerdo con una modificación del protocolo de Braun-Blanquet, para lo cual se establecen cuatro rangos de valores en función del porcentaje de cobertura.

m) Parámetros relacionados con la vegetación y flora

El análisis de la vegetación y flora se realiza de manera manual a partir de inspecciones in situ. Así pues, a continuación, se detalla el procedimiento para cada una de ellas:

En cuanto a la vegetación, se instalará una parcela de radio de 5m en un sector representativo de la formación vegetal presente. En el centro de cada parcela se medirá el contenido de la humedad del sustrato (con alguna de la instrumentación detallada anteriormente). En el interior de cada parcela se identificarán y marcarán los ejemplares de las especies presentes, los que serán objeto de evaluaciones periódicas de su estado vital y sanitario. En el caso de las especies herbáceas, se considerará toda la biomasa vegetal ubicada en el interior de la parcela.

La medición del estado vital y sanitario de los ejemplares seleccionados en cada parcela se efectuará durante el periodo en que las formaciones vegetales presenten follaje con biomasa fotosintéticamente activa, lo que ocurre aproximadamente en los meses más cálidos del año. Asimismo, las mediciones del contenido de humedad del suelo, de vitalidad y sanidad de la vegetación se efectuarán trimestralmente (cuatro mediciones al año).

La metodología de clasificación se basará en una evaluación cualitativa en función del aspecto que presente la vegetación, y según el porcentaje de copa viva de la misma.

Adicionalmente, se emplearán imágenes satelitales para el cálculo del Índice de Vegetación (NDVI), como herramienta complementaria para la discriminación de presencia/ausencia de vegetación.

En cuanto a la flora, ésta se analizará en parcelas similares a las anteriores, y en cada una de ellas se medirá la frecuencia de especies presentes y se efectuará una caracterización del sustrato. Se registrará además las especies observadas en el área de estudio, pero fuera de los puntos de muestreo, con el objetivo de establecer la riqueza florística de toda la zona. En caso de dificultad para la identificación de las especies, se tomará una muestra de ramillas, flores y/o frutos para identificarlas en laboratorio.

n) Parámetros relacionados con la fauna

El monitoreo de la fauna se efectúa sobre la base del muestreo periódico de la presencia y abundancia de la fauna en los diferentes hábitats del área de estudio. La metodología para la elaboración de los listados faunísticos y el cálculo de las abundancias de los distintos grupos de fauna se indican a continuación.

En primer lugar, se deben de considerar prospecciones terrestres (transectos) distribuidas por los distintos hábitats en el área de estudio. Posteriormente, se calcula la abundancia y frecuencia de especies a partir del siguiente procedimiento en función del tipo de familia:

Para anfibios y reptiles, el cálculo de la abundancia se realiza a partir del registro manual de cada transecto, donde se registren los individuos observados a una distancia de hasta 30m a cada lado de este y se estandarice el tiempo de muestreo a 20 minutos.

En cuanto a las aves, cada transecto debe de recorrerse a pie tres veces al día durante tres días y estandarizar el tiempo de muestreo a 20 minutos. Finalmente, el cálculo de las abundancias de aves se realizará a partir del promedio de animales observados en los tres días.

La abundancia de las aves acuáticas se realizará a partir de censos de aves, siguiendo la metodología estándar que se usa en los Censos Neotropicales de aves acuáticas, la cual consiste en recorrer el perímetro del cuerpo de agua y contar todos los individuos de las especies presentes, evitando los conteos dobles producto del movimiento de los animales.

Por último, para los mamíferos, la metodología propuesta considera la captura de ejemplares para los micromamíferos, la instalación de parcelas olfativas, observación directa y métodos indirectos para los carnívoros.

o) Parámetros fisicoquímicos

La mayoría de los parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos, salinidad, clorofila a, alcalinidad, y la concentración de otros parámetros químicos como aluminio, bario, cloruro, nitrato, fosfato, sodio, etc.) se deben de obtener en laboratorio. No obstante, existen sistemas que permiten su monitoreo de manera continua y en tiempo real, los cuales se describen a continuación.

En primer lugar, los sensores más frecuentes son capaces de medir el pH, el potencial redox, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto y la turbidez (Ramas, 2003). Habitualmente, estos sensores se emplean simultáneamente en las sondas multiparamétricas, a las que se les puede acoplar un dispositivo para la adquisición automática de datos.

En segundo lugar, existen instrumentos encargados de emular un laboratorio de forma automática para la medición de nitratos, cloruros, alcalinidad, dureza, y otros parámetros, como los auto-analizadores por técnica colorimétrica o por electrodo de ion selectivo. Sin embargo, para que la medida sea fiable y el proceso pueda realizarse en continuo, el equipo requiere unas condiciones de caudal y temperatura constante, así como un alto consumo energético.

Por último, los métodos espectrofotométricos miden la absorción o la emisión de radiación con un dispositivo detector que proporciona una respuesta en forma de señal eléctrica. Para transformar esta medida en información química, se procede a la calibración que establece la relación entre la propiedad medida y la concentración del analito. De esta manera, se emplea el dispositivo espectrofotómetro de luz ultravioleta y visible (Alonso, 2021). La principal ventaja es el bajo mantenimiento y consumo que tienen; mientras que el inconveniente es que se requiere de un dispositivo por cada parámetro a monitorear debido a la emisión de longitudes de ondas específicas y la calibración necesaria.

2. Selección de los equipos mediante análisis multicriterio

Tras el análisis multicriterio (véase el anexo A1, Análisis AHP) se ha tratado de valorar las diferentes tecnologías propuestas para el monitoreo de una red de salares de forma que los criterios de selección de dichas tecnologías y equipos se realiza objetivamente.

Para ello se ha empleado un método comparativo multicriterio denominado AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty, 1988) en el que se han evaluado cada uno de los parámetros a considerar para el monitoreo de salares. De esta forma, se han obtenido resultados en cuanto a los equipos propuestos, determinando cuál de ellos es la mejor opción una vez analizado mediante el análisis descrito.

A continuación, se presenta un cuadro donde se indica el tipo de equipo a considerar para cada uno de los parámetros.

Cuadro 9
Equipos seleccionados para la medición de los diferentes parámetros

Parámetro de medición	Equipo seleccionado
Precipitación	Pluviómetro de cubeta basculante
Acumulación de nieve	Nivómetro acústico
Evaporación de agua	Atmómetro
Evaporación de aguas subterráneas	Lisímetro de carga variable
Radiación solar	Piranómetro
Velocidad del viento	Anemómetro de rotación
Dirección del viento	Veleta
Temperatura	Termómetro eléctrico
Humedad ambiental	Higrómetro de absorción
Humedad de suelo	Tensiómetro
Caudal hídrico y de salmuera	Medidores de nivel+velocidad
Nivel en acuíferos y salmuera	Pozómetro

Fuente: Elaboración propia.

C. Integración de los equipos seleccionados

En la presente sección se realizará un análisis de una serie de tecnologías de comunicaciones disponibles en el mercado y ampliamente empleadas en diferentes entornos con el fin de determinar cuál de ellas es la más apropiada para el caso que nos ocupa.

Establecer una comunicación fiable, segura y eficaz es esencial para el correcto desempeño de la red de monitoreo de salares, ya que la pérdida de información puede conducir a obtener valoraciones erróneas del estado de los salares. De esta forma se analizarán una serie de protocolos de comunicación y las variables de importancia de estos.

Los diferentes protocolos para analizar en el presente documento son:

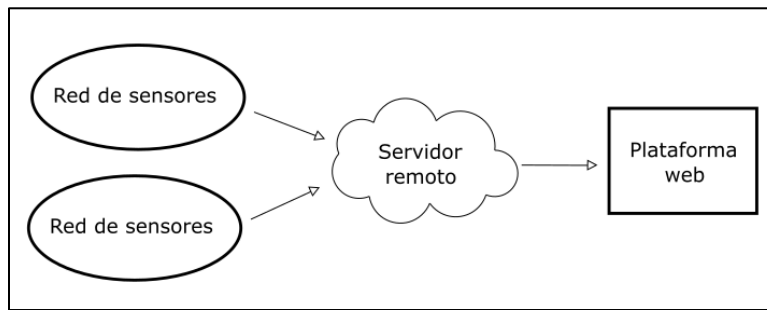
- LORAWAN: es un protocolo inalámbrico diseñado para dispositivos de bajo consumo en el Internet de las cosas (IoT). Ofrece un amplio alcance con baja potencia y tasa de transferencia de datos, adecuado para aplicaciones de monitoreo remoto.
- SigFox: es un protocolo de comunicación IoT que proporciona una red global de bajo costo. Es ideal para aplicaciones con requisitos de baja velocidad y potencia, pero tiene limitaciones en la cantidad de datos transmitidos.
- 4G (LTE)/5G: LTE, o 4G, es un estándar de comunicación móvil de alta velocidad que brinda conectividad rápida y amplia cobertura. Es comúnmente utilizado en aplicaciones IoT para transmisiones de datos en tiempo real.
- LTE-M: LTE-M es una variante de LTE diseñada para aplicaciones IoT de baja potencia y velocidad, con mejor cobertura en interiores y áreas urbanas.
- NB-IoT: es una tecnología celular de baja potencia y bajo ancho de banda para dispositivos IoT con amplia cobertura en áreas remotas.
- GPRS: GPRS fue una tecnología de comunicación móvil de datos de segunda generación que permitía la transmisión de datos en dispositivos móviles, aunque hoy en día está siendo reemplazada por tecnologías más avanzadas.
- Internet satelital: la comunicación por satélite ofrece cobertura global, siendo útil en áreas remotas. Sin embargo, tiene mayor latencia y costos asociados, siendo adecuada para aplicaciones que no requieren una transmisión de datos instantánea.

Las variables para tener en cuenta en el presente análisis son:

- Tiempo de respuesta.
- Capacidad de integración con los sistemas de monitorización actuales.
- Coste económico del protocolo de transferencia de datos.
- Evolución tecnológica y tendencia científica del protocolo.
- Coste de adquisición de los sistemas de comunicación.
- Periodicidad del envío de información.
- Limitaciones de transferencia.
- Alcance físico y cobertura.
- Consumo energético.
- Compatibilidad con la integración de protocolos de seguridad de acuerdo con la normativa. ISO 27001 "Seguridad de la información".

Cabe destacar que el funcionamiento del sistema de comunicación funcionará de forma que los sensores repartidos por el salar enviarán información a un servidor remoto para su posterior tratamiento y gestión a través de una plataforma web con capacidad para visualizarse en tiempo real según el esquema mostrado a continuación.

Diagrama 12
Esquema general de conexión



Fuente: Elaboración propia.

Esta información puede realizarse directamente desde el propio sensor o mediante redes de sensores conectadas a un router o *datalogger* encargado de transmitir la información de toda la red. En función del número de sensores y su distribución a lo largo del salar se puede plantear la utilización de diferentes tecnologías complementarias para así obtener el mejor desempeño posible. A continuación, se describirán las diferentes tecnologías planteadas.

Cuadro 10
Análisis de las diferentes tecnologías de comunicación inalámbricas

Protocolo	LORAWAN	SigFox	4G (LTE)	LTE-M	NB-IoT	GPRS	Internet satelital
Tiempo de respuesta	Bajo	Rápido	Bajo	Bajo	Bajo	Moderado	Variable
Capacidad de integración	Buena	Limitada	Alta	Alta	Buena	Buena	Buena (depende)
Coste económico	Moderado	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado	Medio-bajo	Alto
Evolución Tecnológica	En constante evolución	Limitada	En constante evolución	En constante evolución	En evolución	En desuso	En constante evolución
Coste de adquisición	Moderado	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado	Bajo	Elevado
Periodicidad de envío	Configurable	Bajo	Configurable	Configurable	Configurable	Media-rápida	Moderada
Limitaciones de transferencia	Baja	Baja	Alta	Moderada	Baja	Moderada	Variable
Alcance físico y cobertura	Amplio	Amplio (global)	Buena (urbana)	Mejor en interiores	Buena (remotas)	Buena (urbana)	Global
Consumo energético	Bajo	Bajo	Moderado	Bajo	Muy bajo	Moderado	Variable
Compatibilidad con ISO 27001	Compatible	Requiere consideraciones	Compatible	Compatible	Compatible	Requiere consideraciones	Compatible

Fuente: Elaboración propia.

Para concluir el presente análisis se examinarán en una visión global todos los sistemas según sus principales características en el siguiente cuadro, concretando valores de velocidades de transferencia, requisitos de funcionamiento y requisitos energéticos junto con sus ventajas e inconvenientes.

Cuadro 11
Características principales de los protocolos de comunicación analizados

Protocolo	LORA	Sigfox	4G	LTE-M	NB-IoT	GPRS	Satelital
Velocidad de transferencia (subida)	50 kbps	0.1 kbps	12.5 Mbps	7 Mbps	200 kbps	118 kbps	6 Mbps
Requisitos de funcionamiento	Gateway	Red Sigfox cercana y modem	Cobertura y SIM	Capacidad de red LTE-M y-SIM	Capacidad de red NB-IoT y-SIM	Cobertura y SIM	Línea de visión con satélite
Requisitos energéticos	Batería	Batería	Respaldo energía solar	Batería	Batería	Respaldo energía solar	Respaldo energía solar
Ventaja	Inmune a interferencias	Alta fiabilidad	Velocidad de transferencia	Buena cobertura	Buena cobertura	Buena cobertura	Disponibilidad casi ilimitada
Inconveniente	Tamaño máximo de paquete	Poca seguridad	Dependencia de la cobertura en zona	No disponible en Chile, Argentina, Bolivia y México	No disponible en Chile, Argentina, Bolivia y México	Banda compartida con voz	Coste

Fuente: Elaboración propia.

Además, se desarrollarán una serie de recomendaciones de aplicación de estas tecnologías en función de diversos factores propios de las características cambiantes según la localización de los sensores, número de éstos o coste.

Por un lado, se debe mencionar que las redes de LTE-M y NB-IoT no se encuentran desplegadas en Chile, Argentina, Bolivia y México, por lo que su uso no se aconseja en el proyecto que ocupa el presente documento. El resto de los protocolos de comunicación mencionados se encuentran disponibles en Chile, Argentina, Bolivia y México, salvo SigFox que no está disponible en Bolivia. De esta forma, se valorarán el resto de las tecnologías analizadas.

Cabe destacar que cuando se despliegan sensores en áreas en un radio definido la solución ideal es la de emplear LoRaWAN, de forma que un *datalogger* central conectado a la red terrestre de internet mediante un *Gateway* 4G haga de puerta de enlace o *Gateway* con la red de internet y LoRaWAN para así enviar la información al servidor remoto.

Por otro lado, en caso de que los sensores se desplieguen de forma individualizada y alejados unos de otros es recomendable emplear comunicación directa de éstos a la red de internet 4G, con el fin de ahorrar costes en *dataloggers* y simplificar la instalación. Para ello se pueden emplear enrutadores como el RUT240 de Teltónika.

Por último, cuando las redes de sensores o sensores individuales se desplieguen en zonas remotas donde no exista cobertura de la red 4G se recomendará el uso de internet satelital para establecer conexión con internet. Esta solución se empleará únicamente en zonas donde no sea posible establecer conexión a internet debido a su alto coste y mayor complejidad de instalación. Así mismo, es posible establecer conexiones entre redes de sensores LoRaWAN con internet satelital, de forma que se pueden conectar varios sensores a dicha red que a su vez está conectada a internet por satélite. En el anexo A2, Red de comunicación pueden consultarse las especificaciones técnicas de algunos de los productos consultados.

IV. Red de monitoreo

Se realizará un estudio de la red de monitoreo, concretamente se establecerán las mejores ubicaciones de los sistemas de monitoreo seleccionados y se expondrán la plataforma

A. Análisis de la ubicación de los sistemas de monitoreo

En el presente capítulo se realizará el análisis de la ubicación de los sistemas de monitoreo encargados de recopilar la información de los parámetros con una frecuencia de medición de manera continua seleccionados. Dado que el espíritu y objetivos del presente estudio es converger a un sistema que integre información pública y privada.

Así pues, a continuación, se determinará la metodología para la selección de la ubicación de los siguientes parámetros:

- Precipitación, radiación solar, humedad absoluta, temperatura, velocidad y dirección del viento, monitoreados a partir de las estaciones meteorológicas instaladas.
- Evaporación y evapotranspiración.
- Temperatura, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto del agua superficial.
- Caudal instantáneo del agua superficial.
- Nivel freático del agua subterránea y salmuera.
- Nivel lagunar.
- Temperatura, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica del agua subterránea y salmuera.
- Transectas para la flora, vegetación y fauna.
- Puntos de monitoreo de la biota acuática.

Cabe destacar que todos los puntos de monitoreo deberán de cumplir los siguientes criterios:

- Identificación mediante coordenadas UTM.
- Buena accesibilidad.
- Garantizar la seguridad de los operarios cuando se realice la instalación de los sistemas o se realicen labores de monitoreo manual.

Asimismo, se detalla la ubicación de los puntos de monitoreo para el parámetro del nivel lagunar y los componentes de biota acuática, flora y vegetación y fauna a pesar de no contar con sistemas de monitoreo continuos.

1. Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas incluyen los instrumentos necesarios para el monitoreo de la precipitación, radiación solar, evaporación, evapotranspiración, humedad absoluta, temperatura y velocidad y dirección del viento.

En el artículo académico presentado por (Arsenault y Brissette, 2014), se determina que es necesario el uso de cuatro estaciones meteorológicas para caracterizar hídricamente una cuenca montañosa de aproximadamente 8.000km², lo que supone una densidad por estación de entre 1.600 y 4.000km². No obstante, la ubicación de dichas estaciones se obtiene a partir de la aplicación de un algoritmo de optimización multiobjetivo que minimiza el número de estaciones minimizando el error entre el caudal simulado por el modelo hidrológico de la cuenca y el caudal observado. Dada la escasa información presente en la mayoría de los salares objeto del estudio, se considera que no es viable hallar la ubicación óptima de dichas cuatro estaciones meteorológicas.

A pesar de ello, es posible emplear las conclusiones obtenidas por el estudio para estipular una serie de recomendaciones a la hora de plantear la ubicación de estaciones meteorológicas. En primer lugar, se recomienda seleccionar estaciones cercanas a las zonas montañosas, puesto que son las zonas que presentan una mayor variabilidad diaria en las precipitaciones. Las estaciones ubicadas en los efectos orográficos pueden provocar que los modelos hidrológicos simulen mejor la respuesta hidrológica a estos eventos de precipitación.

En segundo lugar, es recomendable seleccionar ubicaciones relativamente homogéneas representativas del resto de la cuenca, puesto que de esta forma el modelo puede emplear las precipitaciones promedio que se registran en una estación en las zonas con características similares, reduciendo el número de estaciones necesarias.

Cabe destacar que el estudio sí estipula que una mayor densificación de las estaciones permitiría registrar mejor las tormentas veraniegas, las cuales tienen lugar en espacios y tiempos muy reducidos.

Por otro lado, la organización mundial de la meteorología recomienda una densidad de una a cuatro estaciones meteorológicas cada 1,000km² de superficie, estimándose necesario cuatro de ellas en orografías montañosas debido a las diferencias de la precipitación y temperatura en función de la altura (WMO, 2018). Esta importancia de la variabilidad vertical frente a la horizontal también se muestra reflejada en la investigación de (Immerzeel, Petersen y Pellicciotti, 2014), donde además se remarcan el impacto de la precipitación y la temperatura en el modelo glaciahidrológico.

En lo que respecta al monitoreo de la evapotranspiración, se requiere obtener el cruce con los sistemas vegetacionales. Para ello, en primer lugar, se deben de identificar las zonas con vegetación (vegas y bodefadales y áreas de cultivo). Se recomienda emplear imágenes satelitales obteniendo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), el cual es capaz de identificar las áreas con vegetación dispersa (NDVI entre 0.2 y 0.4) y áreas con vegetación abundante y vigorosa (NDVI mayor a 0.4) (AMPHOS21, 2018).

La evapotranspiración (ET_c) desde la vegetación se estima con la ecuación propuesta en el documento FAO 56:

$$ET_c = K_c * ET_0$$

Donde:

- ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm/d).
- K_c = Coeficiente de cultivo (adimensional).
- ET_0 = Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (mm/d).

Así pues, se recomienda emplear técnicas de análisis de imágenes satelitales que permitan detectar la presencia de aguas superficiales y aguas subterráneas someras. La primera técnica corresponde al índice de humedad (TCWI por sus siglas en inglés), el cual proporciona una medida de la tensión de la humedad del suelo a partir del contraste de la suma del espectro visible y el infrarrojo cercano con las bandas de onda más largas del infrarrojo medio y lejano. En segundo lugar, se calcula el índice de brillo (TCBI por sus siglas en inglés), el cual es capaz de detectar cambios en las características de los suelos, detectar eflorescencias y costras salinas bien desarrolladas, y detectar la presencia de agua superficial.

De este modo, la mayoría de las localizaciones del monitoreo de la evaporación se sitúan en la zona central del salar, donde se ubican los espejos lagunares de mayores dimensiones. Dada la existencia de dos espejos de agua en el norte del salar, se establecen dos puntos de monitoreo adicionales, y al sur del salar ídem.

2. Parámetros fisicoquímicos y caudal del agua superficial

En relación con los parámetros fisicoquímicos (oxígeno disuelto, temperatura, potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica) y caudal del agua superficial, dada la naturaleza de ambos, compartirán la misma ubicación de los puntos de monitoreo.

En cuanto al resto de parámetros fisicoquímicos analizados en laboratorio, los cuales se monitorean con periodicidad discontinua, las muestras se obtendrán de los mismos puntos de monitoreo anteriormente detallados. Asimismo, la frecuencia de monitoreo en cauces fluviales estará comprendido entre 4 y 24 veces al año, en función de los resultados obtenidos y la variabilidad estacional del caudal.

El aforo se realizará de acuerdo con lo indicado en la Norma ISO 748:2007 "*Hydrometry measurement of liquid flow in open channels using current meters or floats*"; y el muestreo se hará siguiendo las recomendaciones de la NCh n° 411 (Instituto Nacional de Normalización, 1998).

En cuanto a la calidad fisicoquímica de los espejos lagunares, la calidad fisicoquímica de los mismos puede variar en función de la localización de las fuentes alimentadoras de la laguna, ya que puede haber áreas locales donde el agua entrante tenga concentraciones elevadas porque aún no se ha mezclado con el cuerpo de agua principal. Asimismo, las condiciones meteorológicas también tienen una afección en el grado de concentración de la laguna, puesto que la acción del viento puede conducir a una falta de homogeneidad.

Si la laguna es grande, tiene muchas bahías estrechas o contiene varias profundidades, se recomienda el uso de más de una estación. De este modo, para tener en cuenta el tamaño de la laguna, se sugiere que el número de estaciones de muestreo sea el número entero más cercano al logaritmo del área del lago en kilómetros cuadrados, es decir, que una laguna de 10km² requiera una única estación, mientras que una de 100km² requiera dos (UNEP y WHO, 1996).

Adicionalmente, es necesario considerar la profundidad de las lagunas, puesto que la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo puede estratificar las condiciones fisicoquímicas de la misma. Así pues, en caso de detectar una capa termoclina (capa de la masa de agua donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad), será necesario obtener cuatro muestras: a 1m por debajo de la superficie, justo por encima y por debajo de la capa termoclina, y a 1m del fondo (UNEP y WHO, 1996).

3. Cota de nivel del agua subterránea y salmuera

El objetivo principal de establecer una red de monitoreo del nivel de agua subterránea y salmuera es medir la respuesta del acuífero frente a las solicitaciones de las explotaciones presentes en el salar, las cuales dependen de las características hidrológicas e hidráulicas del acuífero, y sus propiedades tales como el grado de confinamiento y su extensión de zona.

De este modo, los puntos de monitoreo deben de pertenecer a uno de los siguientes tipos de redes de monitoreo presentados por (Heath, 1976):

- i) *Red hidrológica*: esta red de monitoreo tiene como objetivo conocer las propiedades del acuífero, tales como su extensión y coeficiente de almacenamiento. Los resultados generados se pueden emplear para generar mapas de flujos de los acuíferos y/o las variaciones en el almacenamiento de este. Dicha red consistiría en pozos (o piezómetros) más o menos espaciados aleatoriamente sobre el área a estudiar y se mediría la cota del nivel del agua con respecto al nivel medio del mar simultáneamente en todos ellos. La densidad de los pozos dependería de la complejidad del sistema y del nivel de detalle deseado, estando en torno a los 63 pozos por cada 1,000km² para que un área compleja sea mapeada en detalle.
- ii) *Red para la gestión del agua*: tiene como objetivo conocer los efectos de las presiones de agua sobre el acuífero, obtener el grado de confinamiento de este y obtener sus características hidráulicas. A partir de todos los resultados generados es posible obtener la posición del nivel freático. Esta red requiere del monitoreo de puntos ubicados cerca de zonas de extracción y reinyección, es decir, lugares donde existan presiones del sistema. A pesar de que el número de pozos de monitoreo requeridos diferirá de un salar a otro en función del número de puntos de estrés hídricos, como mínimo se debe de instalar un punto de monitoreo en las inmediaciones de cada bombeo. Lo suficientemente cerca como para detectar el cono de descenso del bombeo, pero lo suficientemente alejado como para que no interfiera en la detección de bombeos más alejados. Asimismo, es conveniente que se incluyan pozos a diferentes distancias del centro de bombeo, así como en las zonas permeables suprayacentes y subyacentes para medir la respuesta tridimensional del acuífero frente a las extracciones y reinyecciones.
- iii) *Red de base*: su objetivo es conocer los efectos del clima en los acuíferos y definir el efecto de la topografía y la geología en la respuesta climática.

Se concluye que para obtener una red de monitoreo fiable y de calidad se requiere instalar sistemas de monitoreo en las inmediaciones de cada pozo, así como en zonas aisladas a los bombeos con el objetivo de monitorear los efectos de las extracciones y reinyecciones en todo el salar. Para ello, se deberá considerar el radio de influencia de cada extracción con el fin de poder monitorear los descensos y ascensos dinámicos producidos por las extracciones y reinyecciones.

4. Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y la salmuera

La ubicación de los sistemas de monitoreo de los parámetros de calidad del agua subterránea (de los cuales la temperatura, el potencial de hidrógeno y la conductividad eléctrica se monitorearán de manera continua), depende del tipo de acuífero que alimenta al salar. Así pues, en caso de la existencia de un

acuífero fracturado no confinado (o si la zona no saturada es delgada), será necesario tomar muestras cerca del nivel freático. En caso contrario, si la zona no saturada es profunda, el movimiento de contaminantes puede ser lento y complejo, por lo que sería más informativo monitorear la zona vadosa. Asimismo, es necesario considerar tanto los flujos verticales como los horizontales (BGS y otros, 1996).

Así pues, dado que los posibles contaminantes se distribuyen de manera heterogénea, es necesario tener en consideración la ubicación de las diferentes presiones de agua, es decir, los pozos empleados por las futuras explotaciones del salar (European Communities, 2007). Por otro lado, el informe presentado por (UNEP y WHO, 1996) especifica que una única muestra suele ser suficiente para la caracterización fisicoquímica del acuífero.

Al seleccionar un pozo para una estación de monitoreo de aguas subterráneas, hay varias consideraciones importantes, incluyendo si el pozo es representativo de las condiciones del acuífero y si es fácilmente accesible. El pozo debe purgarse adecuadamente, por bombeo diario (o a intervalos regulares), flujo artesiano, o exhibir un alto caudal de agua subterránea, con el fin de ser representativo de las condiciones de los acuíferos cuando se muestrea (Mathany, Saraceno y Kulongoski, 2019).

De este modo, se concluye que es necesario ubicar pozos de monitoreo en todo el borde exterior del salar donde se prevean explotaciones. No obstante, dichos emplazamientos pueden estar espaciados varios kilómetros en función de la presión hídrica de la zona. Cabe destacar que los pozos instalados también se emplearán para el monitoreo discontinuo del resto de parámetros fisicoquímicos, el cual se realizará de manera trimestral.

En cuanto al perfilaje de la conductividad eléctrica para la detección de la interfase salina, éstos se deben situar donde exista la posibilidad de la variación del nivel freático, es decir, donde existan presiones hídricas causadas por la explotación del salar. Dada la naturaleza de la interfase salina, será necesario monitorear toda la zona de movimiento posible, ampliándola en caso de que fuese necesario.

La ubicación de los puntos de monitoreo se determina mediante la dirección del flujo de agua subterránea, la cual se obtiene a partir del mapa hidrogeológico de la cuenca. A su vez, éstos pueden elaborarse mediante la metodología definida por (Struckmeier y Margat, 1995) dependiendo de las características litológicas, espesores y extensión de las unidades geológicas, así como el potencial hidrogeológico que presentan. Así pues, adicionalmente es necesario monitorear la conductividad eléctrica entre los puntos de extracción y reinyección de la salmuera para proporcionar coherencia al rastreo de partículas.

Cabe destacar que la caracterización manual de los parámetros fisicoquímicos de la salmuera se realizará de manera trimestral en un punto de la tubería de conducción de salmuera hacia la planta o la piscina de traspaso. Mientras que el análisis de la salmuera de reinyección (salmuera de descarte) se realizará tras el proceso industrial antes de que entre al sistema de pozos de reinyección.

5. Nivel lagunar

El monitoreo de la variabilidad espaciotemporal de todos los cuerpos de agua del salar se realiza mediante el uso de satélites tal y como se ha comentado anteriormente, por lo que no será necesario la instalación de ningún tipo de sistema de monitoreo.

6. Flora y vegetación

De acuerdo con (Ahumada y Faúndez, 2009), en las cuencas endorreicas altiplánicas se forma un sistema de humedales que reflejan en su composición específica las gradientes de humedad y salinidad que se generan. (Teillier y Becerra, 2003) señalan que en el salar de Ascotán, ubicado en la Región de Antofagasta (Chile), las diferencias de salinidad de este sistema generan localmente dos comunidades de vegetación en función de la carga de salinidad y de la disponibilidad de agua.

Así pues, la extracción de agua dulce de los pozos puede generar efectos perjudiciales a la vegetación existente en el área de influencia de los pozos, por lo que se deberá de monitorear las zonas del salar donde se puede generar una variación de las condiciones fisicoquímicas e hídricas de la vegetación.

De este modo, es imprescindible identificar en primer lugar la cobertura vegetal del área de estudio, lo cual se realiza mediante imágenes satelitales capaces de identificar las zonas con vegetación. Para ello, se recomienda emplear un modelo de distribución *Random Forest* (Jagannath, 2020; Ko, Kim y Nam, 2015), el cual está compuesto por un conjunto de árboles de regresión individuales. Su funcionamiento sintetizado es el siguiente: se analiza cada píxel individualmente en busca de vegetación empleando el índice NDWI, y las combinaciones de bandas 543 y 654 para cada árbol de regresión; posteriormente, una vez obtenidas las predicciones del píxel para todas las combinaciones de bandas, se obtiene la predicción final del píxel aplicando coeficientes a cada árbol de regresión individual.

A modo de ejemplo, la identificación de la vegetación mediante la combinación de bandas 543 se realizaría identificando las regiones sombreadas en rojo de la imagen satelital, las cuales reflejan concentración de vegetación.

La definición de la ubicación de los puntos de monitoreo depende de la naturaleza, el patrón y la extensión del hábitat, así como de la cantidad, el tamaño y la distribución de las poblaciones a monitorear objetivo (Hunter y Heywood, 2011). Así pues, se recomienda identificar las localizaciones previamente monitoreadas para poder realizar su seguimiento, así como incorporar nuevas zonas en función del análisis de imágenes satelitales realizado. En caso de que éstas no existan por tratarse del primer monitoreo realizado en la zona objeto de estudio, se deben de seleccionar los puntos de monitoreo en función de las coberturas detectadas mediante el análisis de las imágenes satelitales y la experiencia del equipo consultor.

Se recomienda realizar el monitoreo de hábitats, el cual implica hacer registros repetidos de las condiciones de los hábitats o ecosistemas para detectar cambios en comparación con un estándar predeterminado y/o estado previo.

En cuanto a la flora, al igual que con la vegetación, la ubicación de las localizaciones de monitoreo recaerá sobre los antecedentes recopilados, es decir, estudios llevados a cabo por entidades públicas o privadas, y la experiencia del equipo consultor.

7. Fauna

El monitoreo de la fauna se efectúa sobre los diferentes hábitats presentes en el área de estudio, los cuales se distribuyen espacialmente de acuerdo con el gradiente de humedad y salinidad existente en el salar. La identificación de los hábitats relevantes para cada uno de los subcomponentes de la fauna se realizará mediante prospecciones iniciales, estudios llevados a cabo en la zona por entidades públicas y la experiencia del equipo consultor.

Dada la naturaleza de los subcomponentes anfibios, reptiles y micromamíferos, éstos pueden observarse en las mismas transectas determinadas previamente para la flora y vegetación. Por su parte, los subcomponentes de avifauna y macromamíferos, se deben de monitorear a una escala mayor desde puntos fijos de monitoreo.

8. Biota acuática

La caracterización de los componentes biológicos de la biota acuática se realiza en todos los cuerpos de agua detectados. Cabe destacar la alta variabilidad respecto de los cuerpos de agua en los sistemas salares, por lo que antes de cada campaña de medición será necesario caracterizar dichos cuerpos de agua mediante imágenes satelitales y visitas a terreno.

Tras la identificación de los cuerpos lagunares, se definirán las condiciones generales básicas del hábitat acuático mediante los registros de temperatura (°C), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), ancho mojado (m), profundidad (m), sustratos, pH, y demás variables relevantes en cada lugar para definir el hábitat del ecosistema acuático.

B. Plataforma digital

En la presente sección se describen las características técnicas y computacionales de la plataforma, detallando su arquitectura, algoritmos de automatización, base de datos, necesidades de cómputo y almacenamiento, y características integradas en la plataforma, entre otros.

1. Características técnicas y computacionales

Las necesidades de cómputo dependerán de las características de los datos a procesar y de qué se quiera hacer con ellos. Como esto puede variar sobremedida durante la vida útil de la plataforma, lo mejor es optar por un sistema sin excesiva potencia para poder ir ajustando/escalando a medida que estas se incrementan.

Se definen los requisitos mínimos que ha de tener el centro de cómputo, ya sea en propiedad o en la nube. En caso de ser equipo en propiedad deberá estar replicado (es decir, al menos constar de dos equipos) para en caso de fallo de uno, poder funcionar con el secundario. En caso de optar por almacenamiento en la nube no será necesario, al ser el proveedor quien se encarga de mover el cómputo entre distintos equipos en caso de falla del que se tenga contratado:

- Intel Xeon/AMD Threadripper o Epic, ocho núcleos (cuatro en caso de disponer de dos hilos lógicos por *core*). Se requiere una elevada capacidad de paralelismo para poder llevar a cabo las múltiples tareas que será necesario ejecutar a la vez: procesado de datos según llegan en tiempo real, generación de tareas, mantenimiento de bases de datos, respuesta a peticiones, etc. Es necesario optar por procesadores de gama empresarial y no de consumo¹⁰ por los elevados tiempos de funcionamiento de los sistemas de procesado en tiempo real.
- 16GB de RAM para poder cargar en memoria la gran cantidad de datos que puede ser necesario procesar en tiempo real.
- 256GB de disco SSD NVMe. Se necesita una alta velocidad de transferencia, por lo que será necesario optar por la tecnología más rápida existente actualmente.

Sea bien equipo en propiedad bien equipo en la nube la opción elegida, en ambos casos debe procederse a una definición y descripción de las características del software, lenguajes de programación y *frameworks* escogidos para llevar a cabo la implementación. En caso de optarse por opciones privativas, se debe presentar un estudio pormenorizado donde se compare con al menos dos opciones *open source*, de forma que quede explícitamente redactado por qué se ha optado por la primera opción frente a las otras dos. Se deben presentar ventajas e inconvenientes, fortalezas de la tecnología privativa, etc.

a) Local

Equipos en propiedad, cuyas características mínimas se han definido en las secciones anteriores. El control sobre los equipos es total, pero también la responsabilidad sobre la seguridad:

¹⁰ Gama Intel Core 10^a /11^a generación y AMD Ryzen 3.

- Se requiere control de acceso.
- Necesidad de local climatizado que mantenga 24 horas al día todos los días del año la temperatura del local donde se ubique.
- La disponibilidad mayor al 99.9% del tiempo es complicada de alcanzar.

Una ventaja es la flexibilidad de los equipos: se puede optar por cualquier tipo de placa, procesador, RAM, etc., que cumpla con los requisitos definidos. Pero al largo plazo será necesario cambiar todos los componentes a medida que vayan fallando.

Requieren un mayor gasto en personal, un mayor control de la seguridad y necesidad de equipos replicados. Mucho mayor costo inicial, menor a largo plazo.

En caso de optar por esta opción, se deberá definir el Data Center donde se ubicará el servidor de forma exacta, tanto las características, marcas y modelos de los equipos elegidos, como el software. Además, deberá hacerse hincapié en la descripción técnica de las instalaciones mecánicas y eléctricas: sistemas tanto de detección como de extinción de incendios, climatización, control de accesos, alimentación eléctrica, sistemas autónomos de alimentación, sistemas de alarma y envío de mensajes, etc.

También ha de definirse el sistema de comunicación. Este se duplicará, mediante dos empresas proveedoras distintas de forma que, si una de ellas deja de dar servicio, se mantenga este gracias a la conexión de la segunda. Aunque una de las líneas se denomine como principal o primaria y otra como secundaria, el sistema ha de emplear ambas conexiones a la vez, de forma que el ancho de banda sea la suma del ancho de banda proporcionado por los dos proveedores.

Como resumen, y justificación última de la necesidad de redundancia de equipos y conexiones, la disponibilidad o *uptime* del conjunto del sistema debe ser mayor del 99.9%.

b) Equipos en la nube

Se dispone a su vez de dos opciones. En cualquiera de las dos, las exigencias en cuanto a capacidad de cómputo y almacenamiento son las mismas que se le piden al servidor en caso de optarse por una instalación propia de forma local.

VPS

VPS (*Virtual Private Server*) son máquinas virtualizadas en equipos físicos. Si se contrata por ejemplo cuatro núcleos, no se dispone de un procesador de esas características para uso exclusivo, sino que se tiene acceso a cuatro núcleos de un equipo con mayores capacidades (normalmente equipos de 16, 32 o 64 núcleos). Este acceso no es exclusivo, de forma que el rendimiento del equipo puede verse afectado por el uso que se esté haciendo del procesador base por parte de las otros VPS que se ejecutan sobre él.

Se requiere una gestión similar a un servidor dedicado, al ser para transparente para el usuario del servicio el compartir los recursos. Muy fácilmente escalables tanto en vertical como en horizontal, si se quiere disponer de más RAM, discos SSD o HDD de mayor capacidad, etc., incluso aumentar la capacidad de cómputo de forma rápida, puede hacerse normalmente mediante clics en una consola de administrador que el proveedor pone a disposición del usuario.

Servidores dedicados

Un servidor dedicado es una máquina física disponible en exclusiva para el cliente que la contrate. Tiene las ventajas de un equipo local, acceso exclusivo al sistema contratado, y las de un VPS: los proveedores de este tipo de servicios disponen de las mismas herramientas la gestión de unos y de otros. Pueden escalarse tanto vertical como horizontalmente de forma sencilla: bien contratando equipos de mayores capacidades, bien contratando otros equipos donde correr nuevas instancias creando un clúster para el procesamiento y almacenamiento de datos de forma distribuida.

Al necesitar de grandes cantidades de almacenamiento para guardar las copias de seguridad los hacen la opción favorable en caso de optar por usar equipos en la nube. Si bien al inicio el almacenamiento necesario será escaso, con el tiempo se llegará a unas necesidades que habitualmente los VPS no pueden acometer.

Una opción habitual es empezar con un VPS y cuando se alcance su capacidad máxima pasar a un servidor dedicado. Esta posibilidad es ofrecida por la práctica totalidad de los proveedores.

2. Base de datos

El sistema requiere disponer de una o varias instancias de bases de datos donde almacenar tanto los datos recogidos desde las distintas fuentes de información, como los datos obtenidos tras su procesado.

La elección de una base de datos u otra exige primero optar entre bases de datos relacionales (SQL) y no relacionales (NoSQL). Por un mayor rendimiento, una menor rigidez de los datos a almacenar y una mayor facilidad de trabajo con sistemas como Kafka, se optará por este segundo tipo. La menor rigidez es un punto a favor de estos sistemas: a medida que distintos salares se vayan incluyendo en el sistema, cada uno monitoreado con distintos equipos y tecnologías, los datos recibidos y su forma no tiene por qué ser exactamente igual. Una base de datos SQL obligaría a redefinir e incluso duplicar con pequeñas modificaciones tablas existentes para así ajustarse a la nueva estructura de datos recibidos, mientras que un SGBD de tipo NoSQL permite guardar datos heterogéneos en la misma tabla o colección, obviamente con la limitación de diseño impuesta por el diseñador de la base de datos que haga que tipos de datos relacionados se almacenen de forma conjunta.

Dentro de las distintas posibilidades que existen NoSQL dos sobresalen: MongoDB y Apache Cassandra. Su uso conjunto con Kafka (o cualquier otra solución que haga las veces de *bróker* de mensajes) está ampliamente extendido, con compañías como *Twitter* o *Netflix* haciendo uso de ellas.

En este caso concreto, y por ser completamente *open source* y no depender de ninguna empresa matriz, se dará prioridad al uso de *Cassandra*, aunque el uso de *MongoDB* sería una opción igualmente válida, siendo incluso más habitual en aplicaciones similares.

Para limitar y agilizar su uso, una vez el sistema crezca, se deberán usar diversas instancias, y se realizarán réplicas de forma periódica para poder subsanar cualquier problema que pudiera surgir durante el uso de la plataforma.

a) Base de datos para usuarios, sesión, etcétera

Además de la base de datos donde se almacenen los datos propiamente dichos de los sensores, valores obtenidos tras procesados, etc., es necesario disponer de otra base de datos donde almacenar registros de sesión, usuarios y sus permisos de acceso, etc.

Para esta base de datos puede optarse bien por usar la misma tecnología empleada en el punto anterior, bien por usar otra de tipo SQL como MariaDB o PostgreSQL.

3. Algoritmia de automatización e interfaces

Se definirán todos los algoritmos de automatización que permitan a la plataforma obtener los resultados buscados de forma directa mediante el análisis de los registros recibidos. Adicionalmente, se considerará de forma primordial el diseño de las diferentes interfaces donde se mostrará la información de manera fácilmente intuitiva y manejable. Este diseño será fundamental para que posteriormente se integren todas las pestañas, por lo que deberá estar enfocado a la correcta comprensión de la información a disponer en las mismas.

El procesado (los algoritmos que procesan y automatizan la inserción de limpieza, preparación e inserción de los datos recibidos en las bases de datos) puede ser de dos tipos:

- Procesado que simplemente requiere que los datos se almacenen para su posterior recuperación.
- Procesado que requiera de la implementación de algoritmia. Esta podrá implementarse con diversos lenguajes de programación: Python, Scala, Julia, Matlab, C/C++, etc. Este procesado será el encargado de analizar los datos que lleguen y generar las alertas que indiquen la existencia de situaciones anómalas. Los parámetros usados en este procesamiento tendrán que ser calibrados y validados. Además del sistema de alertas, este procesado tendrá que generar pronóstico de la evolución de los parámetros analizados, posibles medidas de corrección y cómo afectarán estas medidas de corrección a la evolución de los valores que se vean afectados por ellas.

El primero simplemente recibirá de forma periódica los mensajes desde Kafka y los almacenará en la base de datos correspondiente. En el segundo caso en cambio, deberán realizarse cálculos más costosos que una simple inserción en una base de datos, y serán los que nos fijen la capacidad de cómputo necesaria para la plataforma.

La elección del lenguaje o tecnología empleada, así como la implementación de los algoritmos necesarios, ha de realizarse teniendo en cuenta tanto la claridad y legibilidad del código como el rendimiento de este. Todos los algoritmos deben testearse mediante las correspondientes pruebas unitarias, y en caso de procesos complejos que requieran del encadenamiento y uso de diversas funciones, también han de realizarse pruebas de integración de todo el sistema encaminado a la obtención de los resultados.

En el anexo A3, Plataforma digital se presenta el diseño de algunas de las entidades que deberán monitorizarse y su relación. Cualquier cambio o añadido que deba realizarse durante la implementación deberá estar debidamente justificado. Todas las medidas deben llevar incluida la marca de tiempo en que se tomaron. En caso de no ser posible por ser sensores ya en funcionamiento, que no envían dicha marca y no pueden modificarse, se tomará en el momento de la recepción como aproximación válida del momento en que se generó el dato.

V. Plan de ejecución

A. Siguientes etapas de ingeniería

En la siguiente sección se detallarán las siguientes etapas de ingeniería que se podrán requerir en los salares para finalmente implantar una red de monitoreo. Para ello, en primer lugar, se detallarán brevemente todas las fases de ingeniería siguientes, definiendo la responsabilidad (pública o privada) en cada una de ellas. Finalmente, se detallarán los futuros costes de operación y mantenimiento anual (OPEX) que tendría dicha red de monitoreo.

Así pues, a continuación, se especifican, y posteriormente se detallan, las etapas de ingeniería que se deberán llevar a cabo para la implementación de una red de monitoreo en un salar tipo:

- Levantamiento detallado de los antecedentes de la cuenca objeto de estudio.
- Estudio hidrogeológico para determinar el flujo subterráneo de la cuenca, así como la posición de la interfase salina.
- Ingeniería de detalle del diseño de la red de monitoreo.
- Ingeniería de detalle para la adquisición e instalación de la red de monitoreo.
- Diseño e implementación de la plataforma digital.
- Levantamiento de los hábitats de la flora y vegetación, así como de las especies predominantes en la zona. Así como la caracterización ambiental de la flora, vegetación y fauna.
- Proceso de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocesamiento de imágenes satelitales.

1. Levantamiento detallado de los antecedentes de la cuenca objeto de estudio

El objetivo de esta primera fase del plan de ejecución el proyecto es obtener toda la información relativa a la litología, perfiles geofísicos, hidrogeología, estudios de provisión y geoprosamiento de imágenes satelitales, y demás información disponible de la cuenca hidrográfica donde se ubique el salar objeto de estudio.

Dada la naturaleza de la fase, se recomienda que la responsabilidad de ejecución de esta recaiga sobre las entidades privadas que deseen explotar el salar. Asimismo, se estima un coste de \$10.000USD, el cual deberá de determinarse con exactitud a la hora de licitarse por si ésta se incluye como parte y/o conjunto de otra licitación.

2. Estudio hidrogeológico

El objetivo principal del estudio hidrogeológico es representar los elementos del sistema físico y su comportamiento, basándose en todos los antecedentes técnicos disponibles (geología, geofísica, hidrología, hidrogeología, hidrogeoquímica e isotopía) (Risacher, Alonso y Salazar, 1999). Así pues, en primer lugar, se deberá de realizar un levantamiento de toda la información disponible en detalle, incluyendo la recopilación de todos los perfiles geofísicos, análisis hidrológicos, etc. En caso de que no se dispongan las características hidrogeológicas del acuífero o se requiera generar nueva información para disponer de las unidades hidrogeológicas, propiedades elásticas, parámetros hidráulicos y/o mapas piezométricos actualizados, se procederá a realizar un nuevo estudio hidrogeológico.

En cuanto a la recopilación de antecedentes de parámetros hidráulicos, procedentes de pruebas de bombeo preexistentes, tienen como objetivo obtener los valores de conductividad hidráulica, transmisividad del acuífero, y el coeficiente de almacenamiento de este. En caso de que éstas no existan, se deberá de licitar unas pruebas de bombeo en el acuífero objeto de estudio para obtener información acerca del rendimiento de los pozos, el cono de depresión y sus eventuales interferencias o aportes producidos en las cercanías de este.

Con el fin de definir los costes asociados a cada una de las etapas, se analizan diversas licitaciones chilenas y españolas, las cuales se muestran a continuación:

- La licitación nº 2770-225-SE17 "Pruebas de bombeo utilizando transductor de presión para SMAPA".
- La licitación nº 1019-782-SE13 "Levantamiento información geofísica en la Región de Tarapacá".
- La licitación nº 1019-29-LE20 "Caracterización hidrogeológica del acuífero del Valle de Pan de Azúcar. Región de Coquimbo".
- La licitación nº 870-65-LP13 "Análisis de alternativas piloto recarga artificial de acuíferos Marchigüe. VI Región".
- La licitación nº 1019-55-LE17 "Asesoría técnica para la sectorización de acuíferos en Calama".
- En el ámbito internacional, la licitación del gobierno vasco (España) nº 223P/2018 "Estudio geofísico en la desembocadura del río Oka".

De este modo, se estima un monto de \$125.000 USD para la elaboración del estudio hidrogeológico, y de \$4.000 USD por cada prueba de bombeo de un pozo requerida (sin la inclusión de la ejecución de este). Dada su naturaleza, la responsabilidad de elaboración de estos recaerá sobre entidades privadas que deseen explotar los salares.

3. Ingeniería de detalle del diseño de la red de monitoreo

El objetivo de esta fase es obtener la ingeniería de detalle del diseño la red de monitoreo del salario objetivo. Para ello, será esencial realizar un levantamiento de los sistemas de monitoreo existentes en la zona objeto de estudio (tanto públicos como privados), así como determinar el estado de estos, es decir, su estado físico, tipo de funcionamiento, capacidad para incorporarse en la red de monitoreo, entre otros.

Cabe destacar que el éxito de la implementación del sistema de monitoreo depende de la cobertura existente en el salario para garantizar la transmisión de las mediciones realizadas. Así pues, una vez se haya seleccionado la ubicación de los sistemas de monitoreo, se debe de realizar el análisis de la cobertura para todas las bandas de frecuencia y/o tecnologías de comunicación analizadas en el Apartado C del capítulo III del presente estudio.

En cuanto a los nuevos sistemas encargados de densificar la red de monitoreo, se ubicarán a partir de las especificaciones detalladas en el Apartado A del capítulo IV del presente estudio. El diseño de la red de monitoreo será una colaboración público-privada en donde se tenga en consideración los impactos ambientales generados por la actividad de la explotadora y los costes-beneficios de contar con una red de monitoreo global. Una vez definidas las localizaciones de los nuevos sistemas de monitoreo, se deberá de verificar el acceso a las mismas.

4. Ingeniería de detalle para la adquisición e implementación de la red de monitoreo

Esta etapa de la fase de ejecución de la red de monitoreo cuenta con dos fases. La primera de ellas corresponde a la adquisición de todos los sistemas definidos previamente en el diseño de la red de monitoreo, a saber, sistemas de monitoreo, de comunicación y de alimentación.

Por otra parte, será necesario elaborar la ingeniería de detalle de todos los procedimientos necesarios para la instalación e implementación de la red de monitoreo, incluida la perforación, calibración y puesta a punto de los sistemas previamente adquiridos.

En el anexo A4, Presupuesto, se detallan todos los precios unitarios que podrían ser de aplicación para la implementación de la red de monitoreo, los cuales incluyen los siguientes gastos:

- Gastos de personal y mano de obra.
- Gastos de material fungible, de consumo y suministros diversos.
- Gastos de equipos y medios de transporte.
- Gastos de alquiler de locales, almacenes e instalaciones.
- Gastos de vigilancia de los sondeos, materiales, herramientas, vehículos de transporte, etc. durante la ejecución de los trabajos.
- Gastos de transporte, funcionamiento, conservación y reparación de equipos e instalaciones auxiliares, así como la depreciación o amortización de la maquinaria y elementos recuperables de las mismas.
- Seguros de toda clase.
- Gastos de financiación y los impuestos y tasas de toda clase.

La responsabilidad de la implementación de la red de monitoreo será mayoritariamente privada, no obstante, ciertos sistemas de monitoreo tales como estaciones meteorológicas en ubicaciones estratégicas deberían ser propiedad de entes públicos como la DGA. Es por ella, que la responsabilidad de ejecución de esta fase se deberá de estudiar para cada caso en particular en estudios y fases posteriores.

5. Diseño e implementación de la plataforma digital

Esta etapa de la fase de ejecución de la red de monitoreo consiste en obtener el diseño e implementar la plataforma digital. Para ello, se seguirán las especificaciones y requisitos determinados en el Apartado B del capítulo V del presente estudio.

En el anexo A4, Presupuesto, se detallan los precios unitarios relativos a esta fase. Dada la naturaleza de la plataforma digital, en etapas posteriores se deberá de analizar su índole pública y/o privada.

6. Despliegue de la plataforma digital

Una vez implementada la plataforma, la siguiente fase es proceder a su despliegue para lo cual es necesario contratar servicios de almacenamiento y computación en servidores, proveedores de conexión a red, entre otros.

En el anexo A4, Presupuesto, se detallan los precios unitarios relativos a esta fase. Al igual que el caso anterior, la responsabilidad de ejecución público-privada se deberá analizar en etapas posteriores.

7. Caracterización ambiental de la flora, vegetación, fauna y biota acuática

El objetivo de esta etapa es desarrollar un diagnóstico completo de la flora, vegetación, fauna y biota acuática existente en los espejos lagunares e inmediaciones del salar objeto de estudio, la cual se emplee como caso base para el monitoreo ambiental posterior. Para ello se deberá de identificar los diferentes hábitats, coberturas vegetales y superficie y características de los espejos lagunares.

Dada su naturaleza, la responsabilidad de ejecución deberá ser público-privada, puesto que ésta variará en función del estado de explotación del salar.

Con el fin de definir los costes operacionales asociados al monitoreo ambiental, se analizan diversas licitaciones, las cuales se muestran a continuación:

- Licitación nº 995-26-LE19 "Contrato de servicio de caracterización ambiental".
- Licitación nº 2659-163-L117 "Estudio diagnóstico de la flora y fauna de la comuna de Vitacura".
- Licitación nº 1782-1-LR19 "Diagnóstico y conservación de flora costera. Región de Antofagasta".
- Licitación nº 938251-9-LQ17 "Imágenes satelitales y estudio de geoprocuremento para caracterización de salares".

8. Proceso de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocuremento de imágenes satelitales

En último lugar y como se ha comentado con anterioridad, dado que se requiere que la red de monitoreo incluya el monitoreo ambiental discontinuo de los componentes de biota acuática, vegetación, flora y fauna, esta información deberá generarse e introducirse en la plataforma digital con una frecuencia trimestral.

Así pues, se deberá de iniciar procesos de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocuremento de imágenes satelitales. Dada la naturaleza del proceso, será responsabilidad del ente público preparar y realizar correspondiente llamado.

B. Estimación de costos de inversión y operación

1. Coste de adquisición de la red de monitoreo (CAPEX)

En conclusión, a partir del análisis de las fases de ejecución siguientes necesarias para el monitoreo de salares, se precisa una **inversión (CAPEX) de, aproximadamente, \$910.000 USD (IVA no incluido) para un salar tipo de 145 km² de superficie.**

2. Coste operacional de la red de monitoreo (OPEX)

La red de monitoreo presenta una serie de costes operacionales anuales los cuales son necesarios para el buen funcionamiento de esta. A continuación, se listan, y posteriormente detallan, todos los costes operaciones de la red de monitoreo:

- Costes de mantenimiento y operación de la plataforma digital.
- Costes de mantenimiento, calibración y sustitución de los dispositivos hardware.
- Monitoreo ambiental.

Los costes de mantenimiento y operación de la plataforma digital corresponden a costes asociados a la sustitución de dispositivos físicos de los servidores, a la corrección de errores de la plataforma digital, solucionador de incidencias, entre otros. Todos ellos se detallan en los precios unitarios del anexo A4, Presupuesto, donde se estipula una inversión mensual de \$8.300 USD, aproximadamente \$100.000 USD anuales.

En cuanto a los costes de mantenimiento de la red de monitoreo, se estima una inversión del 15% del coste total de los dispositivos hardware (incluida su instalación), para el mantenimiento, calibración y sustitución de los sistemas que componen la red de monitoreo. Así pues, un 5% se destina a la futura calibración y mantenimiento de los equipos, mientras que el 10% restante se destina a la sustitución y futura renovación de estos. De este modo, se destina una inversión anual de \$65.000 USD.

Tal y como se ha comentado con anterioridad, la red de monitoreo ambiental se realiza de manera discontinua. Por consiguiente, la identificación de la vegetación y espejos de agua se realizará mediante el procesamiento de imágenes satelitales. Para ello, se requerirá la provisión y geoprocusamiento de seis imágenes satelitales de alta resolución para un salar tipo de 145 km² de superficie con una frecuencia trimestral, lo que asciende a \$16.000 USD anuales.

En cuanto a la caracterización de la flora, vegetación, fauna y biota acuática, ésta se debe de realizar, como mínimo, con una frecuencia semestral. De este modo se estima un monto de \$400.000 USD para la caracterización de la flora, vegetación, fauna y biota acuática para un salar tipo de 145 km².

En conclusión, se estima que es necesaria una **inversión de \$581.000 USD anuales para la operación de la red de monitoreo (OPEX) para un salar tipo con una superficie de 145 km².**

C. Actividades

A continuación, se muestra el plan de ejecución para el proyecto de implementación de una red de monitoreo tipo:

Cuadro 12
Plan de ejecución para el proyecto de implementación

Plan de ejecución	Responsabilidad	Mes																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Levantamiento detallado de los antecedentes de la cuenca objeto de estudio	Privada	X																							
Ingeniería de detalle para el diseño de la red de monitoreo	Público-privada		X	X	X	X	X	X	X	X															
Ingeniería de detalle para la adquisición e instalación de la red de monitoreo	A determinar									X	X	X	X	X	X										
Diseño e implementación de la plataforma digital	A determinar												X	X	X	X	X	X							
Despliegue de la plataforma digital	A determinar																		X	X	X	X	X	X	
Proceso de licitación para el monitoreo ambiental y la provisión y geoprocesamiento de imágenes satelitales	Público																								X

Fuente: Elaboración propia.

Bibliografía

- Ahumada, M. & Faúndez, L. (2009), "Guía descriptiva de los sistemas vegetacionales azonales hídricos terrestres de la ecorregión Altiplánica (SVAHT).", Santiago, Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero.
- Almemarle (2022a), "Plan de Manejo Biótico-Proyecto: Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama".
- _____(2022b), "Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico-Proyecto: Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama".
- Alonso, J. (2021), "Prácticas con técnicas instrumentales de análisis físico-químico en laboratorios industriales", Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
- Alonso, R. N. (2017), "Los salares de la Punta Argentina y su recurso minero", San Miguel de Tucumán, Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del Noa. Relatorio del XX Congreso geológico argentino.
- Alonso, R. N. & Viramonte, J. G. (1987), "Geología y Metalogenia de la Puna", Estudios Geológicos.
- AMPHOS21 (2018), "Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados, para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Modelo hidrogeológico consolidado cuenca Salar de Maricunga".
- Aranza Álvarez, M. (2018), "Una minería del agua: Análisis espacio-temporal de la región del Salar de Olaroz: Implicancias Ambientales, estrategias de sustentabilidad y crecimiento económico local ante la minería del litio", Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación.
- Aranza, D. (2011), "La fiebre del litio", [en línea] <<https://www.pagina12.com.ar/diario/sociedad/3-169555-2011-06-06.html>>.
- Araya, J. M. & Zúñiga, L. R. (1985), "Manual taxonómico del zooplancton lacustre de Chile", *Boletín Limnológico, Universidad Austral de Chile*, vol. 8.
- Arsenault, R. & Brisette, F. (2014), "Determining the optimal spatial distribution of weather station networks for hydrological modeling purposes using RCM datasets: an experimental approach", *Journal of Hydrometeorology*.
- Australian Government Initiative (2023), "Salinity and water quality", [en línea] <<https://www.waterquality.gov.au/issues/salinity>> [fecha de consulta: 14 de noviembre de 2023].
- Bernal, S. y otros (2003), "Leaf Litter Dynamics and Nitrous Oxide Emission in a Mediterranean Riparian Forest", *Journal of Environmental Quality*, vol. 32, No. 1, John Wiley & Sons, Ltd, 1 de enero.
- Bertrand, H. (1995), *Les insectes aquatiques d'Europe. Encyclopédie Entomologique*, Paris, Paul Lechevalier Editeur.

- Betrie, G. y otros (2011), "Sediment management modelling in the Blue Nile basin using SWAT model", *Hydrology and Earth System Sciences*.
- BGS y otros (1996), "Characterisation and assessment of groundwater quality concerns in Asia Pacific Region", Nairobi, Kenya.
- Borda, L. G. y otros (2019), "Distribución de Li en facies clásticas y químicas del Salar en Olaroz, puna norte, Jujuy", La Plata.
- Britannica (s/f), "Uyuni Salt Flat", [en línea] <<https://www.britannica.com/place/Uyuni-Salt-Flat>>.
- Bruzos, T. (s/f), "Los anemómetros", [en línea] <<http://www.sabelotodo.org/aparatos/anemometro.html>>.
- Carrasco, L. (2009), "Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas", *IDESIA*.
- CEPAL (2023), "Extracción e industrialización del litio-Oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe".
- CODEFF (2011), "Data research on lithium within the RedUSE Project Partners Countries".
- Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile (2009), "Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile. Regiones XV, I, II y III.-Medición de la Evaporación mediante el método del Domo", Santiago.
- DGA (2021), "Mapoteca Digital -Red hidrométrica", [en línea] <<https://dga.mop.gob.cl/estudios/publicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx#ocho>>.
- _____ (2019), "Res. DGA N° 1238. Determina las condiciones técnicas y los plazos a nivel nacional para cumplir con obligaciones de instalar y mantener un sistema de monitoreo y transmisión de extracciones efectivas en las obras de captación de aguas subterráneas".
- _____ (2009), "Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones XV, I, II y III Informe final parte III, Hidrología Regional del Altiplano", Realizado por Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC), SIT N° 19.
- DGAC (2024), "Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos", [en línea] <<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/informacion/fichaDeEstacion/230004#inventario>> [fecha de consulta: 22 de diciembre de 2024].
- Diario Oficial de Chile (2019), "Res. Ex. SMA No 894/2019. Dicta instrucciones para la elaboración y remisión de informes de seguimiento ambiental del componente ambiental agua".
- Díaz, M., Rodríguez, J. & Castaño, S. (2009), "La red española de vigilancia de isótopos en la precipitación (REVIP): distribución isotópica espacial y aportación al conocimiento del ciclo hidrológico", *Ingeniería Civil*.
- DICTUC (2014), "Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama".
- _____ (2009), "Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte del Chile, Regiones XV, I, II y III. Etapa 2. Informe final parte VII. Medición de la evaporación mediante el método del 'Domo'".
- Domínguez, E. & Fernández, H. R. (2009), "Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos", *Sistemática y biología. Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina*, vol. 656.
- Eduardo Johnson Vidal, J. (2009), "Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno", Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Environmental Fondriest Inc (2014), "Turbidity, total suspended solids and water clarity", [en línea] <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity>>.
- EOI Escuela de Negocios (2003), "Caudales en ríos. Instrumentos de medida y redes".
- EPA (s/f), "Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente", *Obtenido de*, [en línea] <<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>>.
- Errazuriz, M. (2019), "Litio: la encrucijada entre el mineral del futuro y los problemas socioambientales que genera", [en línea] <<https://laderasur.com/articulo/litio-la-encrucijada-entre-el-mineral-del-futuro-y-los-problemas-socioambientales-que-genera/>>.
- European Communities (2007), "Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance on Groundwater Monitoring", Luxemburgo.
- Farhat, N. (2018), "Effect of relative humidity on evaporation rates in Nabatieh Region".

- Ford, M. & Thorne, G. (1974), "Effects of atmospheric humidity on plant growth", *Annals of Botany*.
- Fula, K. & Ayala, C. (2007), "Calentamiento global", *Más que un tema de moda. Impacto Ambiental. Recuperado de <https://es.slideshare.net/jorgevilladiego-02/calentamiento-global-13819988>*.
- Gallardo, S. (2011), "Extracción de litio en el Norte Argentino", *Exactamente*.
- García, R. y otros (2021), "Universidad Nacional de La Plata", págs. 49-59.
- Gavilán, P. (2009), "Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment", *Agricultural Water Management*.
- GEONOR (s/f), "Weather instruments", *Obtenido de*, [en línea] <<http://geonor.com/live/products/weather-instruments/>>.
- Gislerod, H. & Mortensen, L. (1990), "Relative humidity and nutrient concentration affect nutrient uptake and growth of *Begonia x hiemalis*", *HortScience*.
- Githui, F., Selle, B. & Thayalakumaran, T. (2012), "Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia", *Hydrological Processes*.
- Gonzalez, R. & Woods, R. (1992), *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Heath, R. (1976), "Design of ground-water level observation-well programs", *Groundwater Journal*.
- Hernández Araujo, J. A. (2012), "Bio recuperación de suelos salinos con el uso de materiales orgánicos.", E.T.S.I. Agrónomos (UPM).
- Hollender, R. & Shultz, J. (2010), "Bolivia and its Lithium: Can the "Gold of the 21st Century" help lift a nation out of poverty?"
- Hunter, D. & Heywood, V. (2011), *Crop Wild Relatives. A manual of in situ Conservation*, Earthscan.
- IAEA (s/f), "Papel esencial de los isótopos en los estudios de los recursos hídricos", *OIEA Boletín*.
- ICASS LTDA. (2014), "Análisis de los mecanismos de evaporación y evaluación de los recursos hídricos del Salar de Atacama - Informe final", Santiago.
- IEO (2010), "El calentamiento global reduce el tamaño del fitoplancton", [en línea] <<https://www.agenciasinc.es/Noticias/El-calentamiento-global-reduce-el-tamano-del-fitoplancton>>.
- Igarzábal, A. P. & Poppi, R. F. (1980), "El Salar de Hombre Muerto", *Acta Geológica Lilloana*, págs. 103-118.
- Immerzeel, W., Petersen, L. & Pellicciotti, F. (2014), "The importance of observed gradients of air temperature and precipitation for modeling runoff from a glacierized watershed in the Nepalese Himalayas", *Water Resources Research*.
- Instituto Nacional de Normalización (1998), "NCh-ISO5667/6:2015", [en línea] <<https://ecommerce.inn.cl/nch-isos5667620151921>> [fecha de consulta: 14 de diciembre de 2023].
- Jagannath, V. (2020), "Random Forest Template for TIBCO Spotfire", [en línea] <<https://community.tibco.com/wiki/random-forest-template-tibco-spotfire>>.
- Jenkins, A. (1993), "Impacts of climate change on river water quality in the United Kingdom", *Reports of Department of Environment, Institute of Hydrology*.
- Kalin, A. y otros (1988), "Effects of aridity on plant diversity in the Northern Chilean Andes: Results of a natural experiment", *Annals of the Missouri Botanical Garden*.
- Kaunda, R. (2020), "Potential environmental impacts of lithium mining", *Journal of Energy and Natural Resources Law*.
- Ko, B. K., Kim, H. H. & Nam, J. Y. (2015), "Classification of potential water bodies using Landsat 8 OLI and a combination of two boosted random forest classifiers", *Sensors*.
- Koull, N. & Chehma, A. (2014), "Soil-vegetation relationships of saline wetlands in North East of Algerian Sahara", *Arid Land Research and Management*.
- León, A. y otros (2013), "Rainfall reception with bucket raingauge and its post-processing", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*.
- Lindenschmidt, K. y otros (2019), "CE-QUAL-W2 model of dam outflow elevation impact on temperature, dissolved oxygen and nutrients in a reservoir", *Scientific Data*.
- López, J. y otros (2010), "Instalación y uso de un colchón de nieve para la monitorización del manto de nieve, cuenca experimental de izas (Pirineo Central)", *Cuadernos de Investigación Geográfica*.
- Lopretto, E. C. & Tell, G. (1995), *Ecosistemas de aguas continentales Metodología para su estudio*, Ediciones Sur.
- Lozano, J. y otros (2018), "Effects of soil moisture and vegetation cover on biomass growth in water-limited environments", *Land Degradation and Development*.

- Luna, L. y otros (2011), "Influencia de la vegetación en el balance hídrico superficial de la cuenca hidrológica de "El Cabril""", Barcelona, págs. pp 468-477.
- Madrivejos, A. (2010), "Los océanos se quedan sin plancton", [en línea] <<https://www.elperiodico.com/es/tecnologia/20100728/los-océanos-se-quedan-sin-plancton-409610>>.
- Martin, E. (2017), *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del riego ¿cuándo?*, College of Agriculture, University of Arizona.
- Mathany, T., Saraceno, J. & Kulongoski, J. (2019), "Guidelines and standard procedures for high-frequency groundwater quality monitoring stations", Reston, Virginia.
- Merritt, R. W. & Cummins, K. W. (1996), *An introduction to the aquatic insects of North America*, Kendall Hunt.
- Michaud, J. P. (1991), *A citizen's guide to understanding and monitoring lakes and streams*, Puget Sound Water Quality Authority.
- Ministerio de Obras Públicas (2020), "Nº 53/2020. Reglamento de monitoreo de extracciones efectivas de aguas superficiales".
- Moreno, J. M. (2005), "Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático", Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.
- Mortensen, L. (2000), "Effects of air humidity on growth, flowering, keeping quality and water relations of four short-day greenhouse species", *Scientia Horticulturae*.
- Movellán, E. (2004), "Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuario del río Ebro".
- Müller, A. (2013), "Pluviómetros y Pluviógrafos".
- Muñoz, J. & Ortiz, C. (2004), "Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile", *Ingeniería Hidráulica en México*.
- Nadja, S. (2010), "Hydrogeological and hydrochemical investigations at the Salar de Uyuni (Bolivia)", *FOG*.
- Neina, D. (2019), "The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation", *Applied and Environmental Soil Science*.
- Organismo Internacional de Energía Atómica (2003), "Sonda de neutrones y gamma: sus aplicaciones en agronomía", Viena.
- Orive, E. (1988), "Cambios espaciales del fitoplancton y variables relacionadas en el estuario de Gernika", *KOBIE*.
- Özgür, E. & Koçak, K. (2015), "The effects of the atmospheric pressure on evaporation", *Acta Geobalcánica*.
- Pennak, R. W. (1990), "Fresh-water invertebrates of the United States. Protozoa to Mollusca. 3rd edition, xvi, 628p. Wiley, 1989", *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, vol. 70, No. 3, Cambridge University Press, agosto.
- Pérez, D. (2007), "Procedimiento de mantenimiento y calibración de estación radiométrica".
- Prat, N. (2019), *Andancas y desventuras de un ecólogo en los juzgados del "Reyno"*, Milenio.
- Purves, W. y otros (2004), *Life: The Science of Biology*, W.H. Freeman & Co.
- Ramas, J. (2003), "Selección, instalación y mantenimiento de redes para la monitorización de aguas subterráneas", *Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos*, eds. J Pernía, J Mulas, y P Fernandez, Madrid.
- Risacher, F., Alonso, H. & Salazar, C. (1999), "Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones-Chile. Volumen III. Estudio de cuencas de la II Región".
- Rojas Badilla, L. & Salazar Méndez, C. (2006), "Análisis de la situación hidrológica de la cuenca del Salar de Maricunga, III Región".
- Ryals, R. y otros (2014), "Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils", *Soil Biology and Biochemistry*.
- Saaty, T. (1988), *The analytical hierarchy process*, Mc Graw Hill.
- Salas, J. y otros (2010), "Hidrogeología del sistema lagunar del margen este del Salar de Atacama (Chile)", *Boletín Geológico y Minero*, págs. 357-372.
- Salcedo, A. (2001), "Prácticas Operativas y de Mantenimiento en Estaciones Climatológicas Convencionales: Manual para el Personal Operador (Gratificado)".
- Savenije, H. (2004), "The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary", *Hydrological Processes*.
- SEGEMAR (2003), "Sales", Sistema Geológico Minero Argentino.

- Sensors, C. (s/f), "Producción de salmuera de litio (Salar de Atacama)", *Obtenido de*, [en línea] <<https://www.catsensors.com/es/soluciones-keller/soluciones-keller-sector-agua/aguas-subterranas/produccion-de-salmuera-de-litio>>.
- Servicio Geográfico Militar de Bolivia (s/f), "Mapa geológico de la cuenca hidrográfica de Uyuni".
- Soria, J. M. & Ros, M. (1991), "Relación entre el fitoplancton y la salinidad de las lagunas intradunares de la dehesa de la Albufera (Valencia)", *Acta Botánica Malacitana*.
- SQM Salar SA (2023), "Informe N° 33 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico - Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama".
- Sticco, M., Scragliari, P. & Damiani, A. (2018), "Estudio de los recursos hídricos y el impacto por explotación minera de litio. Cuencas salinas Grandes y Laguna Guayatayoc, Provincia de Jujuy".
- Struckmeier, W. F. & Margat, J. (1995), *Hydrogeological maps: a guide and a standard legend*, Heise Hannover.
- Suárez, J. (2009), *Deslizamientos: análisis geotécnico*, Universidad Industrial de Santander.
- Svensden, H. y otros (2002), "The physical environment of Kongsfjorden–Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard", *Polar Research*, vol. 21, No. 1, Routledge, 6 de enero.
- Tecnológico de Costa Rica (s/f), "Dispositivos de medida de radiación", [en línea] <http://seslab.org/fotovoltaico/113_pirhelimetro.html#:~:text=Los%20pirheli%C3%B3metros%20son%20instrumentos%20usados,en%20oposici%C3%B3n%20normal%20a%20ella.>.
- Teillier, S. & Becerra, P. (2003), "Flora y vegetación del salar de Ascotán, Andes del norte de Chile", *Gayana Botánica*.
- UNEP & WHO (1996), *Water Quality Monitoring-A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*.
- Universidad de Antofagasta (s/f), "Universidad de Antofagasta", [en línea] <<https://intranetua.uantof.cl/salares/pag%20web/Salar%20Atacama/articulos/Salar-Atacama%20Risacher.pdf>>.
- USDA (2014), "Soil Health-Guides for Educators", [en línea] <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051574.pdf>.
- USGS (s/f), "Biological Oxygen Demand (BOD) and Water", [en línea] <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/biological-oxygen-demand-bod-and-water?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>.
- Vache, K., Eilers, J. & Santelmann, M. (2002), "Water quality modeling of alternative agricultural scenarios in the US Corn Belt", *Journal of American Water Resources Association*.
- Vinante, D. & Alonso, R. N. (2006), "Evapofacies del Salar Hombre Muerto. Puna argentina: distribución y génesis.", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 61(2).
- Watanabe, K. y otros (2014), "Influence of salt-wedge intrusion on ecological processes at lower trophic levels in the Yura Estuary, Japan", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Wetzel, R. G. & Likens, G. E. (1991), "Benthic Fauna of Lakes", *Limnological Analyses*, Springer, New York, NY.
- WHO (2013), "Health effects of particulate matter", Denmark, WHO Regional Office for Europe.
- WMO (2018), *Guide to instruments and methods of observation. Volume I*.
- Wolf, M. (1988), "Salare des Altiplanos: Ihre Entstehung und wirtschaftliche", *Veröffentlichung Nr. 2305 der Sektion Geowissenschaften*.
- Yagual, O. (2016), "Modelación de flujo subterráneo. Aplicación en la cuenca del Milagro-Ecuador y análisis de pozo en subcuenca del río Suquia", Córdoba.
- Yan, N. y otros (2015), "Influence of salinity and water content on soil microorganisms", *International Soil and Water Conservation Research*.

Anexos

Anexo A1 Análisis AHP (Analytic Hierarchy Process)

Introducción

En el presente anexo se realizará un análisis para evaluar los diferentes sistemas propuestos anteriormente con el objetivo de asegurar que los equipos escogidos para salares se atienden a criterios objetivos.

Para el desarrollo de la presente evaluación, en primer lugar, se establecen los siguientes **criterios comparativos**.

- Precio.
- Precisión/Desempeño en la medición.
- Cantidad de parámetros capaz de medir.
- Mantenimiento requerido.
- Simplicidad de instalación y operación.

Metodología

Para la elaboración del análisis multicriterio planteado, se empleará la metodología de Proceso de Análisis Jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process) el cual consiste en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Esta herramienta puede emplearse para analizar variables cualitativas y cuantitativas frente a varios criterios. Esta herramienta fue ideada por Thomas Saaty en 1988 (Saaty, 1988).

El método consiste en realizar una serie de matrices cruzadas para obtener una matriz final donde una de las alternativas contará con un valor mayor al resto, la cual será la opción más para tener en cuenta. El proceso de decisión consta de una serie de etapas, las cuales se describen a continuación:

i) **Etapla inicial: recopilación de datos**

En primer lugar, se realiza la recopilación de datos objetivos. En este estudio se consideran los criterios previamente detallados: precio, precisión, cantidad de parámetros capaz de medir, mantenimiento requerido, y simplicidad de instalación y operación.

ii) **Segunda etapa: establecer los criterios y su importancia**

Para ello, se emplea la escala de Saaty.

**Cuadro A1.1
Escala de Saaty**

Escala de Saaty	
1	Ambos igual importancia
3	Moderada importancia sobre otro
5	Importancia fuerte uno sobre otro
7	Importancia demostrada uno sobre otro
9	Importancia absoluta uno sobre otro

Fuente: Saaty, 1988.

iii) Tercera etapa: establecer las matrices

En esta tercera etapa, se establece la matriz comparativa con los diferentes parámetros y sus valores para cada dispositivo de medición. Posteriormente se realiza la matriz de preferencias para cada uno de los criterios de selección, donde unos equipos contarán con un nivel de preferencia sobre otro. A continuación, se presenta un ejemplo de una de estas tablas, para el parámetro de medición de precipitación.

Cuadro A1.2
Matriz comparativa para el parámetro de precipitación

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Pluviómetro de cubeta basculante	4	3	4	3	5
Pluviómetro de sifón	3	4	3	2	5

Fuente: Elaboración propia.

Mediante esta esta matriz, se genera una matriz normalizada, estableciendo un valor promedio para cada uno de los criterios.

iv) Cuarta etapa: matriz de comparación por criterios

En primer lugar, se valorarán diferentes análisis multicriterio para cada uno de los parámetros para tener en cuenta para, posteriormente, ponderarlos mediante unos coeficientes preestablecidos. De esta forma, a continuación, se detallan los parámetros a analizar, así como los equipos a comparar.

Cuadro A1.3
Matriz comparativa por criterios

Parámetros	Equipo de medida
Precipitación	Pluviómetro de cubeta basculante
	Pluviómetro de sifón
Profundidad de nieve	Nivómetro acústico
	Nivómetro láser
	Colchón de nieve
Evaporación de agua	Atmómetro
	Tanque de evaporación superficial
	Tanque de evaporación enterrado
Evaporación de agua subterránea	Lisímetro de balanza
	Lisímetro de carga variable
	Domos
Radiación solar	Piranómetro
	Pirgeómetro
	Pirheliómetro
	Fotómetro
Velocidad y dirección del viento	Anemómetro de empuje
	Anemómetro de rotación (o de copelas)
	Anemómetro de compresión (o de presión hidrodinámica)
	Anemómetro de hilo caliente
	Anemómetro sónico
	Veletas de viento

Parámetros	Equipo de medida
Temperatura	Termómetros de vidrio (o de líquidos) Termómetros eléctricos
Humedad ambiental	Psicómetros Higrómetro de cabello Higrómetro de absorción
Humedad del suelo	Tensiómetro Bloques de resistencia eléctrica
Caudales hídricos y de salmuera	Medidores de nivel+velocidad Medidores de caudal
Niveles en acuíferos y salmuera	Piezómetro de cabeza abierta Piezómetro neumático Piezómetro de cuerda vibrante Piezómetro de resistencia eléctrica

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra un ejemplo de una matriz de comparación por criterios.

Cuadro A1.4
Matriz de comparación por criterios para la instrumentación del parámetro de precipitación

	Criterio "precio"				Valor promedio
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		
Pluviómetro de cubeta basculante	1	3	0,752	0,75	0,751
Pluviómetro de sifón	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la figura anterior es posible explicar una serie de premisas:

- Las casillas indicadas en amarillo son las preferencias decididas de forma que el pluviómetro de cubeta basculante tiene un precio moderadamente mejor que el pluviómetro de sifón.
- La diagonal de la tabla siempre es 1, mientras que las otras casillas se calculan realizando el inverso a la relación de equipos. Ejemplo: $1/3 = 0.33$.

Tras obtener la matriz anterior, se realiza la matriz normalizada, que se obtiene dividiendo cada valor por la suma de las columnas. Finalmente, se establecen las preferencias entre los diferentes criterios analizados, es decir, se ponderan mediante unos coeficientes para jerarquizar la importancia entre ellos. A continuación, se presenta los coeficientes de ponderación, que serán comunes para todos los parámetros:

Cuadro A1.5
Coefficientes de ponderación

Matriz comparación de criterios										
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/ instalación	Matriz normalizada				Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/ instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,177	0,195
Suma	2,06	5,66	13	13	5,66					

Fuente: Elaboración propia.

Para terminar, se obtiene una matriz como la siguiente, donde se ponderan los criterios en función de los coeficientes anteriormente mostrados.

Cuadro A1.6
Resultado del análisis multicriterio para el parámetro precipitación

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/ instalación	Suma promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	0,751	0,249	0,751	0,751	0,5	0,605
Pluviómetro de sifón	0,249	0,751	0,249	0,249	0,5	0,396
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

En este análisis AHP se realizará exclusivamente en términos cualitativos, analizando cada uno de los sistemas propuestos para cada una de las variables. De esta forma, se empleará un rango de valoración fijo en 1 y 5 para valorar las diferentes variables.

Por tanto, para establecer los valores en las tablas según la escala de Saaty y asemejarlo al rango de valoración empleado entre 1 y 5 para cada uno de los parámetros, cuando dos alternativas cuenten con un mismo valor en el rango, la escala de Saaty se establecerá en 1. A continuación, se muestra una tabla donde se establece el valor de la escala de Saaty para las diferencias encontradas entre dos alternativas.

Cuadro A1.7
Valoración en escala de Saaty en función del rango de valoración de equipos

Diferencia en rango de valoración	Escala de Saaty
0	1
1	3
2	5
3	7
4	9

Fuente: Saaty, 1988.

Precipitación

A continuación, se presentan los valores dentro del rango de valoración a las diferentes alternativas propuestas para medir la **precipitación**.

Cuadro A1.8
Rangos de valoración para la precipitación

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Pluviómetro de cubeta basculante	4	3	4	3	5
Pluviómetro de sifón	3	4	3	2	5

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.9
Análisis de criterio precio

Criterio "precio"					
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		Valor promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	1	3	0,752	0,75	0,751
Pluviómetro de sifón	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.10
Análisis de criterio precisión

Criterio "precisión"					
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		Valor promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	1	0,33	0,25	0,248	0,249
Pluviómetro de sifón	3	1	0,75	0,752	0,751
SUMA	4	0,33			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración en otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.11
Análisis de criterio integración en otros equipos

Criterio "integración en otros equipos"					
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		Valor promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	1	3	0,752	0,75	0,751
Pluviómetro de sifón	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.12
Análisis de criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"					
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		Valor promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	1	3	0,752	0,75	0,751
Pluviómetro de sifón	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.13
Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"					
	Pluviómetro de cubeta basculante	Pluviómetro de sifón	Matriz normalizada		Valor promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	1	1	0,5	0,5	0,5
Pluviómetro de sifón	1	1	0,5	0,5	0,5
SUMA	2	2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.14
Matriz de comparación de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/ instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/ instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.15
Matriz comparativa para la precipitación

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Pluviómetro de cubeta basculante	0,751	0,249	0,751	0,751	0,5	0,605
Pluviómetro de sifón	0,249	0,751	0,249	0,249	0,5	0,396
SUMA	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Profundidad de nieve

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **profundidad de nieve**.

Cuadro A1.16
Rangos de valoración para la profundidad de nieve

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Nivómetro acústico	4	4	3	4	4
Nivómetro láser	3	4	3	3	4
Colchón de nieve	2	4	1	3	2

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.17
Análisis de criterio precio

Criterio "precio"							
	Nivómetro acústico	Nivómetro láser	Colchón de nieve	Matriz normalizada			Valor promedio
Nivómetro acústico	1	3	5	0,65	0,69	0,56	0,634
Nivómetro láser	0,33	1	3	0,22	0,23	0,33	0,26
Colchón de nieve	0,2	0,33	1	0,13	0,08	0,11	0,106
SUMA	1,53	4,33	9				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.18
Análisis de criterio precisión

Criterio "precisión"							
	Nivómetro acústico	Nivómetro láser	Colchón de nieve	Matriz normalizada			Valor promedio
Nivómetro acústico	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Nivómetro láser	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Colchón de nieve	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
SUMA	3	3	3				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.19
Análisis de criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"							
	Nivómetro acústico	Nivómetro láser	Colchón de nieve	Matriz normalizada			Valor promedio
Nivómetro acústico	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Nivómetro láser	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Colchón de nieve	0,2	0,2	1	0,091	0,091	0,091	0,091
SUMA	2,2	2,2	11				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.20
Análisis de criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"							
	Nivómetro acústico	Nivómetro láser	Colchón de nieve	Matriz normalizada			Valor promedio
Nivómetro acústico	1	3	3	0,602	0,6	0,6	0,601
Nivómetro láser	0,33	1	1	0,199	0,2	0,2	0,2
Colchón de nieve	0,33	1	1	0,199	0,2	0,2	0,2
SUMA	1,66	5	5				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.21
Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"							
	Nivómetro acústico	Nivómetro láser	Colchón de nieve	Matriz normalizada			Valor promedio
Nivómetro acústico	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Nivómetro láser	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Colchón de nieve	0,2	0,2	1	0,091	0,091	0,091	0,091
SUMA	2,2	2,2	11				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.22
Matriz de comparación de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.23
Matriz comparativa de la profundidad de nieve

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Nivómetro acústico	0,634	0,333	0,455	0,601	0,455	0,525
Nivómetro láser	0,26	0,333	0,455	0,2	0,455	0,322
Colchón de nieve	0,106	0,333	0,091	0,2	0,091	0,153
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Evaporación de agua

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **evaporación de agua**.

Cuadro A1.24
Rangos de valoración para la evaporación de agua

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Atmómetro	4	4	3	2	4
Tanque de evaporación superficial	3	3	2	2	4
Tanque de evaporación enterrado	2	2	2	2	2

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.25
Análisis de criterio precio

Criterio "precio"							
	Atmómetro	Tanque de evaporación	Tanque de evaporación	Matriz normalizada			Valor promedio
Atmómetro	1	3	5	0,654	0,693	0,556	0,634
Tanque de evaporación superficial	0,33	1	3	0,216	0,231	0,333	0,260
Tanque de evaporación enterrado	0,20	0,330	1	0,131	0,076	0,111	0,106
SUMA	1,53	4,33	9				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.26
Análisis de criterio precisión

	Criterio "precisión"			Matriz normalizada			Valor promedio
	Atmómetro	Tanque de evaporación superficial	Tanque de evaporación enterrado				
Atmómetro	1	3	5	0,654	0,69	0,56	0,634
Tanque de evaporación superficial	0,33	1	3	0,216	0,23	0,33	0,26
Tanque de evaporación enterrado	0,2	0,33	1	0,131	0,08	0,11	0,106
SUMA	1,53	4,33	9				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.27
Análisis de criterio integración con otros equipos

	Criterio "integración con otros equipos"			Matriz normalizada			Valor promedio
	Atmómetro	Tanque de evaporación superficial	Tanque de evaporación enterrado				
Atmómetro	1	3	3	0,602	0,600	0,600	0,601
Tanque de evaporación superficial	0,33	1	1	0,199	0,200	0,200	0,200
Tanque de evaporación enterrado	0,33	1	1	0,199	0,200	0,200	0,200
SUMA	1,66	5	5				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.28
Análisis de criterio mantenimiento

	Criterio "mantenimiento"			Matriz normalizada			Valor promedio
	Atmómetro	Tanque de evaporación superficial	Tanque de evaporación enterrado				
Atmómetro	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Tanque de evaporación superficial	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Tanque de evaporación enterrado	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
SUMA	3	3	3				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.29
Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"							
	Atmómetro	Tanque de evaporación superficial	Tanque de evaporación enterrado	Matriz normalizada			Valor promedio
Atmómetro	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Tanque de evaporación superficial	1	1	5	0,455	0,455	0,455	0,455
Tanque de evaporación enterrado	0,2	0,2	1	0,091	0,091	0,091	0,091
SUMA	2,2	2,2	11				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.30
Matriz de comparación de criterios

Matriz comparación de criterios												
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio	
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463	
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,58	0,077	0,077	0,58	0,074	
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,58	0,077	0,077	0,58	0,074	
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66							

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.31
Matriz comparativa de la evaporación de agua

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Atmómetro	0,634	0,634	0,601	0,333	0,455	0,575
Tanque de evaporación superficial	0,26	0,26	0,2	0,333	0,455	0,299
Tanque de evaporación enterrado	0,106	0,106	0,2	0,333	0,091	0,127
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Evaporación aguas subterráneas

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **evaporación aguas subterráneas**.

Cuadro A1.32
Rangos de valoración para la evaporación de aguas subterráneas

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Lisímetro de balanza	2	2	3	2	2
Lisímetro de carga variable	3	2	3	3	3
Domos	2	3	3	2	2

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.33
Análisis de criterio precio

Criterio "precio"							
	Lisímetro de balanza	Lisímetro de carga variable	Domos	Matriz normalizada			Valor promedio
Lisímetro de balanza	1	0,33	1	0,2	0,199	0,2	0,2
Lisímetro de carga variable	3	1	3	0,6	0,602	0,6	0,601
Domos	1	0,33	1	0,2	0,199	0,2	0,2
SUMA	5	1,66	5				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.34
Análisis de criterio precisión

Criterio "precisión"							
	Lisímetro de balanza	Lisímetro de carga variable	Domos	Matriz normalizada			Valor promedio
Lisímetro de balanza	1	1	0,33	0,2	0,2	0,199	0,2
Lisímetro de carga variable	1	1	0,33	0,2	0,2	0,199	0,2
Domos	3	3	1	0,6	0,6	0,602	0,601
SUMA	5	5	1,66				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.35
Análisis de criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"							
	Lisímetro de balanza	Lisímetro de carga variable	Domos	Matriz normalizada			Valor promedio
Lisímetro de balanza	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Lisímetro de carga variable	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Domos	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
SUMA	3	3	3				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.36
Análisis de criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"							
	Lisímetro de balanza	Lisímetro de carga variable	Domos	Matriz normalizada			Valor promedio
Lisímetro de balanza	1	0,33	1	0,2	0,199	0,2	0,2
Lisímetro de carga variable	3	1	3	0,6	0,602	0,6	0,601
Domos	1	0,33	1	0,2	0,199	0,2	0,2
SUMA	5	1,66	5				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.37
Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"							
	Lisímetro de balanza	Lisímetro de carga variable	Domos	Matriz normalizada			Valor promedio
Lisímetro de balanza	1	0,33	1	0,200	0,199	0,200	0,200
Lisímetro de carga variable	3	1	3	0,600	0,602	0,600	0,601
Domos	1	0,33	1	0,200	0,199	0,200	0,200
SUMA	5	1,66	5				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.38
Matriz de comparación de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/ instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/ instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.39
Matriz comparativa de la evaporación de aguas subterráneas

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Lisímetro de balanza	0,200	0,200	0,333	0,200	0,200	0,210
Lisímetro de carga variable	0,601	0,200	0,333	0,601	0,601	0,503
Domos	0,200	0,601	0,333	0,200	0,200	0,288
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Radiación solar

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **radiación solar**.

Cuadro A1.40
Rangos de valoración para la radiación solar

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Piranómetro	2	5	4	1	4
Pirgeómetro	2	4	4	1	4
Pirheliómetro	2	4	3	1	1
Fotómetro	1	4	3	1	3

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.41
Análisis de criterio precio

Criterio "precio"									
	Piranómetro	Pirgeómetro	Pirheliómetro	Fotómetro	Matriz normalizada				Valor promedio
Piranómetro	1	1	1	3	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Pirgeómetro	1	1	1	3	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Pirheliómetro	1	1	1	3	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Fotómetro	0,33	0,33	0,33	1	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099
SUMA	0,33	0,33	0,33	10					

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.42
Análisis de criterio precisión

Criterio "precisión"									
	Piranómetro	Pirgeómetro	Pirheliómetro	Fotómetro	Matriz normalizada				Valor promedio
Piranómetro	1	3	3	3	0,3	0,901	0,901	0,3	0,601
Pirgeómetro	0,33	1	1	1	0,1	0,300	0,300	0,100	0,200
Pirheliómetro	0,33	1	1	1	0,1	0,300	0,300	0,100	0,200
Fotómetro	0,33	1	1	1	0,1	0,300	0,300	0,100	0,200
SUMA	1,99	6	6	6					

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.43
Análisis de criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"									
	Piranómetro	Pirgeómetro	Pirheliómetro	Fotómetro	Matriz normalizada				Valor promedio
Piranómetro	1	1	3	3	0,300	0,300	0,901	0,300	0,450
Pirgeómetro	1	1	3	3	0,300	0,300	0,901	0,300	0,450
Pirheliómetro	0,330	0,330	1	1	0,099	0,099	0,300	0,100	0,150
Fotómetro	0,330	0,330	1	1	0,099	0,099	0,300	0,100	0,150
SUMA	2,66	2,66	8	8					

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.44
Análisis de criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"									
	Piranómetro	Pirgeómetro	Pirheliómetro	Fotómetro	Matriz normalizada				Valor promedio
Piranómetro	1	1	1	1	0,300	0,300	0,300	0,100	0,250
Pirgeómetro	1	1	1	1	0,300	0,300	0,300	0,100	0,250
Pirheliómetro	1	1	1	1	0,300	0,300	0,300	0,100	0,250
Fotómetro	1	1	1	1	0,300	0,300	0,300	0,100	0,250
SUMA	4	4	4	4					

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.45
Análisis de criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"									
	Piranómetro	Pirgeómetro	Pirheliómetro	Fotómetro	Matriz normalizada				Valor promedio
Piranómetro	1	1	7	3	0,300	0,300	2,102	0,300	0,751
Pirgeómetro	1	1	7	3	0,300	0,300	2,102	0,300	0,751
Pirheliómetro	0,143	0,143	1	0,33	0,043	0,043	0,300	0,300	0,105
Fotómetro	0,330	0,330	3	1	0,099	0,099	0,901	0,100	0,300
SUMA	2,473	2,473	18	7,33					

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.46
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.47
Matriz comparativa de la radiación solar

	Matriz comparativa					Suma promedio
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	
Piranómetro	0,3	0,601	0,45	0,25	0,751	0,454
Pirgeómetro	0,3	0,2	0,45	0,25	0,751	0,376
Pirheliómetro	0,3	0,2	0,15	0,25	0,105	0,228
Fotómetro	0,099	0,2	0,15	0,25	0,3	0,173
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Velocidad y dirección del viento

En este caso, se presentan 5 alternativas para la medición de la velocidad del viento, mientras que únicamente hay una propuesta para la medición de la dirección del viento. Esto es así ya que se trata de un instrumento de alta fiabilidad, facilidad de operación y monitoreo y precisión.

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **velocidad del viento**.

Cuadro A1.48
Rangos de valoración para la velocidad del viento

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Anemómetro de empuje	4	2	3	4	3
Anemómetro de rotación	4	5	5	4	4
Anemómetro de compresión	4	5	4	3	3
Anemómetro de hilo caliente	4	5	4	2	3
Anemómetrosónico	3	4	4	5	3

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.49
Análisis del criterio precio

	Criterio "precio"					Matriz normalizada					Valor promedio
	Anemómetro de empuje	Anemómetro de rotación	Anemómetro de compresión	Anemómetro de hilo caliente	Anemómetro sónico						
Anemómetro de empuje	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro de rotación	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro de compresión	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro de hilo caliente	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro sónico	1	1	1	0,33	1	0,200	0,200	0,200	0,076	0,077	0,151
SUMA	5	5	5	4,33	13						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.50
Análisis del criterio precisión

	Criterio "precisión"					Matriz normalizada					Valor promedio
	Anemómetro de empuje	Anemómetro de rotación	Anemómetro de compresión	Anemómetro de hilo caliente	Anemómetro sónico						
Anemómetro de empuje	1	0,143	0,143	0,143	0,200	0,200	0,029	0,029	0,033	0,015	0,061
Anemómetro de rotación	7	1	1	1	3	1,400	0,200	0,200	0,231	0,231	0,452
Anemómetro de compresión	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro de hilo caliente	1	1	1	1	3	0,200	0,200	0,200	0,231	0,231	0,212
Anemómetro sónico	5	0,330	0,330	0,330	1	1,000	0,066	0,066	0,076	0,077	0,257
SUMA	15	3,470	3,470	3,470	10,2						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.51
Análisis del criterio integración con otros equipos

	Criterio "integración con otros equipos"					Matriz normalizada					Valor promedio
	Anemómetro de empuje	Anemómetro de rotación	Anemómetro de compresión	Anemómetro de hilo caliente	Anemómetro sónico						
Anemómetro de empuje	1	0,2	0,33	0,33	0,33	0,200	0,040	0,066	0,076	0,025	0,082
Anemómetro de rotación	5	1	3	3	3	1	0,200	0,600	0,693	0,231	0,545
Anemómetro de compresión	3	1	1	1	1	0,600	0,200	0,200	0,231	0,077	0,262
Anemómetro de hilo caliente	3	1	1	1	1	0,600	0,200	0,200	0,231	0,077	0,262
Anemómetro sónico	3	1	1	1	1	0,600	0,200	0,200	0,231	0,077	0,262
SUMA	15	4,2	6,33	6,33	6,33						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.52
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"											
	Anemómetro de empuje	Anemómetro de rotación	Anemómetro de compresión	Anemómetro de hilo caliente	Anemómetro sónico	Matriz normalizada					Valor promedio
Anemómetro de empuje	1	1	3	5	0,330	0,200	0,200	0,600	1,155	0,025	0,436
Anemómetro de rotación	1	1	3	5	0,330	0,200	0,200	0,600	1,155	0,025	0,436
Anemómetro de compresión	0,330	0,330	1	3	0,200	0,066	0,066	0,200	0,693	0,015	0,208
Anemómetro de hilo caliente	0,200	0,200	0,330	1	0,143	0,040	0,040	0,066	0,231	0,011	0,078
Anemómetro sónico	3	3	5	7	1	0,600	0,600	1	1,62	0,08	0,779
SUMA	5,53	5,53	12,33	21	2						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.53
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"											
	Anemómetro de empuje	Anemómetro de rotación	Anemómetro de compresión	Anemómetro de hilo caliente	Anemómetro sónico	Matriz normalizada					Valor promedio
Anemómetro de empuje	1	0,330	1	1	1	0,200	0,066	0,200	0,231	0,077	0,155
Anemómetro de rotación	3	1	3	3	3	0,600	0,200	0,600	0,693	0,231	0,465
Anemómetro de compresión	0,330	0,330	1	0,330	0,330	0,066	0,066	0,200	0,076	0,025	0,087
Anemómetro de hilo caliente	0,330	0,330	0,330	1,000	0,330	0,066	0,066	0,066	0,231	0,025	0,091
Anemómetro sónico	0,330	0,330	0,330	0,330	1,000	0,066	0,066	0,066	0,076	0,077	0,070
SUMA	4,990	2,320	5,660	5,660	5,660						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.54
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,530	0,385	0,385	0,530	0,463
Precisión	0,330	1	3	3	1	0,160	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,200	0,330	1	1	0,330	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,200	0,330	1	1	0,330	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/instalación	0,330	1	3	3	1	0,160	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.55
Matriz comparativa de la velocidad del viento

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Anemómetro de empuje	0,212	0,061	0,082	0,436	0,155	0,179
Anemómetro de rotación	0,212	0,452	0,545	0,436	0,465	0,35
Anemómetro de compresión	0,212	0,212	0,262	0,208	0,087	0,191
Anemómetro de hilo caliente	0,212	0,212	0,262	0,078	0,091	0,183
Anemómetro sónico	0,151	0,257	0,262	0,779	0,07	0,211
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Temperatura

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **temperatura**.

Cuadro A1.56
Rangos de valoración para la temperatura

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Termómetro de vidrio	4	5	5	3	3
Termómetro eléctrico	5	4	5	4	4

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.57
Análisis del criterio precio

Criterio "precio"					
	Termómetro de vidrio	Termómetro eléctrico	Matriz normalizada	Valor promedio	
Termómetro de vidrio	1	0,33	0,25	0,248	0,249
Termómetro eléctrico	3	1	0,75	0,752	0,751
SUMA	4	133			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.58
Análisis del criterio precisión

Criterio "precisión"					
	Termómetro de vidrio	Termómetro eléctrico	Matriz normalizada	Valor promedio	
Termómetro de vidrio	1	3	0,752	0,75	0,751
Termómetro eléctrico	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.59
Análisis del criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"					
	Termómetro de vidrio	Termómetro eléctrico	Matriz normalizada	Valor promedio	
Termómetro de vidrio	1	1	0,5	0,5	0,5
Termómetro eléctrico	1	1	0,5	0,5	0,5
SUMA	2	2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.60
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"					
	Termómetro de vidrio	Termómetro eléctrico	Matriz normalizada	Valor promedio	
Termómetro de vidrio	1	0,33	0,25	0,248	0,249
Termómetro eléctrico	3	1	0,75	0,752	0,751
SUMA	4	133			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.61
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"					
	Termómetro de vidrio	Termómetro eléctrico	Matriz normalizada	Valor promedio	
Termómetro de vidrio	1	0,33	0,25	0,248	0,249
Termómetro eléctrico	3	1	0,75	0,752	0,751
SUMA	4	1,33			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.62
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios												
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio	
Precio	1	3	5	5	3	0,49	0,53	0,39	0,39	0,53	0,463	
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,18	0,23	0,23	0,18	0,195	
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,1	0,06	0,08	0,08	0,06	0,074	
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,1	0,06	0,08	0,08	0,06	0,074	
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,18	0,23	0,23	0,18	0,195	
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66							

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.63
Matriz comparativa de la temperatura

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Termómetro de vidrio	0,249	0,751	0,500	0,249	0,249	0,366
Termómetro eléctrico	0,751	0,249	0,500	0,751	0,751	0,635
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Humedad relativa

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **humedad relativa**.

Cuadro A1.64
Rangos de valoración para la humedad relativa

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Psicómetros	4	4	3	1	3
Higrómetro de cabello	4	4	3	2	3
Higrómetro de absorción	4	4	5	5	5

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.65
Análisis del criterio precio

Criterio "precio"							
	Psicómetros	Higrómetro de cabello	Higrómetro de absorción	Matriz normalizada			Valor promedio
Psicómetros	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Higrómetro de cabello	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Higrómetro de absorción	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
SUMA	3	3	3				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.66
Análisis del criterio precisión

Criterio "precisión"							
	Psicómetros	Higrómetro de cabello	Higrómetro de absorción	Matriz normalizada			Valor promedio
Psicómetros	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Higrómetro de cabello	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
Higrómetro de absorción	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333
SUMA	3	3	3				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.67
Análisis del criterio integración con otros equipos

Criterio "Integración con otros equipos"							
	Psicómetros	Higrómetro de cabello	Higrómetro de absorción	Matriz normalizada			Valor promedio
Psicómetros	1	1	0,200	0,333	0,333	0,067	0,244
Higrómetro de cabello	1	1	0,200	0,333	0,333	0,067	0,244
Higrómetro de absorción	5	5	1	1,667	1,667	0,333	1,222
SUMA	7	7	1				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.68
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"							
	Psicómetros	Higrómetro de cabello	Higrómetro de absorción	Matriz normalizada			Valor promedio
Psicómetros	1	0,33	0,111	0,333	0,11	0,037	0,16
Higrómetro de cabello	3	1	0,143	1	0,333	0,048	0,46
Higrómetro de absorción	9	7	1	3	2,333	0,333	1,889
SUMA	13	8,33	1,254				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.69
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"							
	Psicómetros	Higrómetro de cabello	Higrómetro de absorción	Matriz normalizada			Valor promedio
Psicómetros	1	1	0,2	0,333	0,333	0,067	0,244
Higrómetro de cabello	1	1	0,2	0,333	0,333	0,067	0,244
Higrómetro de absorción	5	5	1	1,667	1,667	0,333	1,222
SUMA	7	7	14				

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.70
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/ instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,330	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,200	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,200	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/ instalación	0,330	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.71
Matriz comparativa de la humedad relativa

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Lisímetro de balanza	0,333	0,333	0,244	0,16	0,244	0,297
Lisímetro de carga variable	0,333	0,333	0,244	0,46	0,244	0,319
Domos	0,333	0,333	1,222	1,889	1,222	0,688
Resultado matriz por criterios	463	195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Humedad del suelo

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir la **humedad del suelo**.

Cuadro A1.72
Rangos de valoración para la humedad del suelo

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Tensiómetro	4	2	2	2	4
Bloques de resistencia eléctrica	3	3	4	4	4

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.73
Análisis del criterio precio

Criterio "precio"					
	Tensiómetro	Bloques de resistencia eléctrica	Matriz normalizada		Valor promedio
Tensiómetro	1	3	0,75	0,8	0,751
Bloques de resistencia eléctrica	0,33	1	0,25	0,3	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.74
Análisis del criterio precisión

Criterio "precisión"					
	Tensiómetro	Bloques de resistencia eléctrica	Matriz normalizada		Valor promedio
Tensiómetro	1	0,33	0,25	0,248	0,249
Bloques de resistencia eléctrica	3	1	0,75	0,752	0,751
SUMA	4	1,33			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.75
Análisis del criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"					
	Tensiómetro	Bloques de resistencia eléctrica	Matriz normalizada		Valor promedio
Tensiómetro	1	0,2	0,167	0,167	0,167
Bloques de resistencia eléctrica	5	1	0,833	0,833	0,833
SUMA	6	1,2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.76
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"					
	Tensiómetro	Bloques de resistencia eléctrica	Matriz normalizada		Valor promedio
Tensiómetro	1	0,2	0,167	0,167	0,167
Bloques de resistencia eléctrica	5	1	0,833	0,833	0,833
SUMA	6	1,2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.77
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"					
	Tensiómetro	Bloques de resistencia eléctrica	Matriz normalizada		Valor promedio
Tensiómetro	1	1	0,500	0,500	0,500
Bloques de resistencia eléctrica	1	1	0,500	0,500	0,500
SUMA	2	2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.78
Matriz comparativa de criterios

Matriz Comparación de criterios												
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio	
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463	
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074	
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074	
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66							

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.79
Matriz comparativa de la humedad del suelo

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Tensiómetro	0,751	0,249	0,167	0,167	0,5	0,518
Bloques de resistencia eléctrica	0,249	0,751	0,833	0,833	0,5	0,483
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Caudal hídrico y de salmuera

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir el **caudal hídrico y de salmuera**.

Cuadro A1.80
Rangos de valoración para el caudal

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Medidores de nivel+velocidad	4	3	2	3	4
Medidores de caudal	2	5	4	2	3

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.81
Análisis del criterio precio

Criterio "precio"					
	Medidores de nivel+velocidad	Medidores de caudal	Matriz normalizada		Valor promedio
Medidores de nivel+velocidad	1	5	0,833	0,833	0,833
Medidores de caudal	0,2	1	0,167	0,167	0,167
SUMA	1,2	6			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.82
Análisis del criterio precisión

Criterio "precisión"					
	Medidores de nivel+velocidad	Medidores de caudal	Matriz normalizada		Valor promedio
Medidores de nivel+velocidad	1	0,2	0,167	0,167	0,167
Medidores de caudal	5	1	0,833	0,833	0,833
SUMA	6	1,2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.83
Análisis del criterio integración con otros equipos

Criterio "integración con otros equipos"					
	Medidores de nivel+velocidad	Medidores de caudal	Matriz normalizada		Valor promedio
Medidores de nivel+velocidad	1	0,2	0,167	0,167	0,167
Medidores de caudal	5	1	0,833	0,833	0,833
SUMA	6	1,2			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.84
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"					
	Medidores de nivel+velocidad	Medidores de caudal	Matriz normalizada		Valor promedio
Medidores de nivel+velocidad	1	3	0,752	0,75	0,751
Medidores de caudal	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.85
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"					
	Medidores de nivel+velocidad	Medidores de caudal	Matriz normalizada		Valor promedio
Medidores de nivel+velocidad	1	3	0,752	0,75	0,751
Medidores de caudal	0,33	1	0,248	0,25	0,249
SUMA	1,33	4			

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.86
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios												
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio	
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463	
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074	
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074	
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195	
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66							

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.87
Matriz comparativa del caudal

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Medidores de nivel+velocidad	0,833	0,167	0,167	0,751	0,751	0,633
Medidores de caudal	0,167	0,833	0,833	0,249	0,249	0,368
Resultado matriz por criterios	0,463	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Nivel de acuíferos y salmuera

A continuación, se presentan los valores asignados a las diferentes alternativas propuestas para medir el nivel de los acuíferos y salmuera.

Cuadro A1.88
Rangos de valoración para el nivel

	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación
Piezómetro de cabeza abierta	4	2	3	3	3
Piezómetro neumático	4	4	3	3	4
Piezómetro de cuerda vibrante	4	4	3	5	4
Piezómetro de resistencia eléctrica	4	4	3	3	4
Pozómetro	4	5	3	4	4

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precio** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.89
Análisis del criterio precio

Criterio "precio"											
	Piezómetro de cabeza	Piezómetro neumático	Piezómetro de cuerda vibrante	Piezómetro de resistencia eléctrica	Pozómetro	Matriz normalizada					Valor promedio
Piezómetro de cabeza abierta	1	1	1	1	1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Piezómetro neumático	1	1	1	1	1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Piezómetro de cuerda vibrante	1	1	1	1	1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Piezómetro de resistencia eléctrica	1	1	1	1	1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
Pozómetro	1	1	1	1	1	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
SUMA	5	5	5	5	5						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **precisión** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.90
Análisis del criterio precisión

	Criterio "precisión"										Valor promedio
	Piezómetro de cabeza abierta	Piezómetro neumático	Piezómetro de cuerda vibrante	Piezómetro de resistencia eléctrica	Pozómetro	Matriz normalizada					
Piezómetro de cabeza abierta	1	0,2	0,2	0,2	0,143	0,2	0,04	0,04	0,04	0,029	0,07
Piezómetro neumático	5	1	1	1	0,33	1	0,2	0,2	0,2	0,066	0,333
Piezómetro de cuerda vibrante	5	1	1	1	0,33	1	0,2	0,2	0,2	0,066	0,333
Piezómetro de resistencia eléctrica	5	1	1	1	0,33	1	0,2	0,2	0,2	0,066	0,333
Pozómetro	7	3	3	3	1	1,4	0,6	0,6	0,6	0,2	0,68
SUMA	23	6,2	6,2	6,2	2,133						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **integración con otros equipos** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.91
Análisis del criterio integración con otros equipos

	Criterio "integración con otros equipos"										Valor promedio
	Piezómetro de cabeza abierta	Piezómetro neumático	Piezómetro de cuerda vibrante	Piezómetro de resistencia eléctrica	Pozómetro	Matriz normalizada					
Piezómetro de cabeza abierta	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Piezómetro neumático	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Piezómetro de cuerda vibrante	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Piezómetro de resistencia eléctrica	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Pozómetro	1	1	1	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
SUMA	5	5	5	5	5						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **mantenimiento** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.92
Análisis del criterio mantenimiento

Criterio "mantenimiento"											
	Piezómetro de cabeza abierta	Piezómetro neumático	Piezómetro de cuerda vibrante	Piezómetro de resistencia eléctrica	Pozómetro	Matriz normalizada					Valor promedio
Piezómetro de cabeza abierta	1	1	0,2	1	0,33	0,2	0,2	40	0,2	0,066	0,141
Piezómetro neumático	1	1	0,2	1	0,33	0,2	0,2	40	0,2	0,066	0,141
Piezómetro de cuerda vibrante	5	5	1	5	3	1	1	0,2	1	0,6	0,76
Piezómetro de resistencia eléctrica	1	1	0,2	1	0,33	0,2	0,2	40	0,2	0,066	0,141
Pozómetro	3	3	0,33	3	1	0,6	0,6	0,066	0,6	0,2	0,413
SUMA	11	11	1,93	11	4,99						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el análisis del criterio **simplicidad de operación/instalación** para cada una de las alternativas planteadas.

Cuadro A1.93
Análisis del criterio simplicidad de operación/instalación

Criterio "simplicidad de operación/instalación"											
	Piezómetro de cabeza abierta	Piezómetro neumático	Piezómetro de cuerda vibrante	Piezómetro de resistencia eléctrica	Pozómetro	Matriz normalizada					Valor promedio
Piezómetro de cabeza abierta	1	0,33	0,33	0,33	0,33	0,2	0,066	0,066	0,066	0,066	0,093
Piezómetro neumático	3	1	1	1	1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,28
Piezómetro de cuerda vibrante	3	1	1	1	1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,28
Piezómetro de resistencia eléctrica	3	1	1	1	1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,28
Pozómetro	3	1	1	1	1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,28
SUMA	13	4,33	4,33	4,33	4,33						

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se evalúa la importancia de los diferentes criterios. Esta matriz es común para todas las variables de medición.

Cuadro A1.94
Matriz comparativa de criterios

Matriz comparación de criterios											
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Matriz normalizada					Valor promedio
Precio	1	3	5	5	3	0,485	0,53	0,385	0,385	0,53	0,463
Precisión	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
Integración con otros equipos	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Mantenimiento	0,2	0,33	1	1	0,33	0,097	0,058	0,077	0,077	0,058	0,074
Simplicidad de operación/instalación	0,33	1	3	3	1	0,16	0,177	0,231	0,231	0,177	0,195
SUMA	2,06	5,66	13	13	5,66						

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los valores promedio de la matriz de comparación y la evaluación de cada uno de los criterios se genera la matriz comparativa, obteniéndose en la columna "Suma promedio" aquella opción predominante.

Cuadro A1.95
Matriz comparativa del nivel

Matriz comparativa						
	Precio	Precisión	Integración con otros equipos	Mantenimiento	Simplicidad de operación/instalación	Suma promedio
Piezómetro de cabeza abierta	0,2	0,07	0,2	0,141	0,093	0,15
Piezómetro neumático	0,2	0,333	0,2	0,141	0,28	0,237
Piezómetro de cuerda vibrante	0,2	0,333	0,2	0,76	0,28	0,283
Piezómetro de resistencia eléctrica	0,2	0,333	0,2	0,141	0,28	0,237
Pozómetro	0,2	0,68	0,2	0,413	0,28	0,325
Resultado matriz por criterios	0,46	0,195	0,074	0,074	0,195	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo A2

Red de comunicaciones

Especificaciones técnicas de productos

LoRaWAN

A continuación, se muestra las especificaciones y una imagen del sensor LoRaWAN Dragino LSN50v2-S31:

Imagen A2.1
Sensor de temperatura LoRaWAN



Fuente: Dragino.com.

- Rango medición temperatura: -40 a 80 °C.
- Precisión: ± 0.2 °C.
- Rango medición humedad: 0~99.9 % RH.
- Precisión: $\pm 2\%$ RH.
- Batería: 8500 mAh Li-SOCl₂-10 años de uso.
- Consumo en modo sleep: 12 uA.
- Consumo en modo WatchDog: 8,63 mA.
- Consumo en modo Alarma: 9.04 mA.
- Consumo en modo muestreo: 5.342 mA.

Para la estimación del consumo energético promedio de estos dispositivos, tomando como ejemplo una batería de 8500 mAh en la que se prevé una medición cada 20 minutos, el cálculo sería el siguiente.

- Consumo en modo sleep por periodo: $0.012 \text{ mA} \cdot 20 \cdot 60 \text{ s} = 14.4 \text{ mA} \cdot \text{s}$.
- Consumo en modo WatchDog por periodo: $0.0007915 \cdot 8.631 \text{ mA} \cdot (20 \cdot 60 \text{ s} / 18 \text{ s}) = (0.4551 \text{ mA} \cdot \text{s})$.
- Consumo en modo alarma: $9.0405 \text{ mA} \cdot 0.0175 \cdot (20 \cdot 60 \text{ s} / 60 \text{ s}) = (3.0738 \text{ mA} \cdot \text{s})$.
- Consumo en modo muestreo durante 4 s: $21.368 \text{ mA} \cdot \text{s}$.

De esta forma, el consumo promedio será:

$$AV_Current : (14.4mA \cdot s + 0.4551mA \cdot s + 21.368mA \cdot s + 3.0738mA \cdot s) / (20 \cdot 60s) = 0.0327mA.$$

Debido al consumo de autodescarga del 2% de la batería y el consumo promedio calculado se puede establecer la siguiente fórmula:

$$8500(1-2\% \cdot y) = 0.0327mA \cdot 24 \cdot 365 \cdot y$$

Obteniendo una duración estimada de $y = 18.6$ años.

Estos valores serán diferentes para diferentes tiempos de muestreo y periodicidad configurada, pero permite hacer una idea de cómo los dispositivos LoRaWAN están capacitados para requerir escaso mantenimiento al emplear baterías integradas.

Por otro lado, es posible emplear módulos de comunicación independientes en caso de que el parámetro a monitorizar no cuente con un sensor específicamente adaptado. Para ello existen múltiples módulos con interfaces de comunicación como la RS-485, 4-20 mA, contador de pulsos, M-Bus, entradas analógicas 0-5V o RS232, entre otros. De esta forma se gana en flexibilidad a la hora de poder integrar todo tipo de sensores.

Sigfox

A continuación, se muestran las especificaciones y una imagen del sensor de control de calidad del agua KRAKEN:

Imagen A2.2
Sensor de control de calidad del agua KRAKEN



Fuente: Solutionbook.io.

- Clase de antena: Clase 0 ($24 \text{ dBm} > \text{EIRP} > 20 \text{ dBm}$).
- Zona SigFox: RCZ2, RCZ4.
- Tipo de batería: Litio.

4G (LTE)/5G

A continuación, se muestran las especificaciones y una imagen del módulo de comunicación 4G:

Imagen A2.3
Módulo de comunicaciones móviles



Fuente: Adafruit.com.

- Bandas de funcionamiento: 850/900/1800/1900 MHz conectadas por SIM.
- Envía y recibe GPRS (TCP/IP, HTTP, etc.).
- Consumo de energía: 500 mA máx.

A continuación, se muestran las especificaciones y una imagen de la puerta de enlace *Gateway* Dragino LG01-N:

Imagen A2.4
Dataloguer LoRaWAN con conexión celular



Fuente: Dragino.com.

- Número de sensores soportados: 50-300.
- Bandas de frecuencia disponibles 433/868/915/920 MHz.
- Tasa de transferencia: 50 Mbps en subida.
- Rango de captura: 5~10 km.
- Conexión a internet: LAN, Wifi, 3G/4G.
- Soporte de sensores: Hasta 300 sensores.
- Consumo energético: 6W.

LTE-M

A continuación, se muestran las especificaciones y una imagen módulo LTE MIKROE-3294:

Imagen A2.5
Módulo LTE-M



Fuente: Mikroe.com.

- 60-280 mA.
- Voltaje de alimentación: 3.1-4.2 VDC 3.6 Typ.
- Conectividad: UART, DFOTA.
- Protocolos: IPv4, IPv6, UDP, COAP, LwM2M, Non-IP, DTLS, TCP, MQTT.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas y una imagen del sensor de temperatura y humedad:

Imagen A2.6
Sensor de temperatura y humedad con LTE-M integrado



Fuente: Rs-online.com.

- Rango de medición de temperatura: -35 °C.
- Rango de medición de humedad: 70 °C.
- Comunicaciones: LTE-M/NB-IoT.

- Potencia de transmisión: 23 dBm.
- Batería: 2x3,6 V, tamaño AA, 2600 mAh (reemplazable).
- Tiempo de funcionamiento: min. 2 años (período de medición de 15 minutos).

NB-IoT

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas y una imagen del módulo de comunicación NO-IoT S2-1088E-Z2014:

Imagen A2.7
Módulo de comunicación LTE Cat M1/NB1 (LTE-M/NB-IoT)



Fuente: Tme.eu.

- Consumo máximo: 114 mA.
- Consumo en modo sleep: 0.4 mA.
- Tensión de alimentación: 2.1~3.6 V.
- Protocolos: TCP/UDP/LWM2M/COAP/MQTT/HTTP/HTTPS/TLS/DTLS/DNS/NTP/PING.
- Interfaces: UART/USB/PCM/Status/GPIO.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas y una imagen del sensor de temperatura y humedad correspondientes a la tecnología NB-IoT:

Imagen A2.8
Sensor de presión, temperatura y humedad con conexión NB-IoT y LTE-M



Fuente: Rsdelivers.com.

- Rango de medición de temperatura: -35 a +70 °C.
- Rango de medición de humedad: 0 a 100% RH.
- Consumo energético: 2.5 mW.
- Periodo de transmisión: 1 s.
- Intervalo de medición. 1 min–10 días (configurable).
- Duración de la batería: hasta 10 años (reemplazable).
- Tecnologías de comunicación disponibles: NB-IoT y LTE-M.

Extensor de red de internet

A continuación, se detallan las principales especificaciones técnicas y una imagen de la antena Ubiquity PowerBeam:

Imagen A2.9
Antena amplificadora Wifi



Fuente: Ui.com.

- Consumo eléctrico: 8 W.
- Velocidad de transferencia máxima: 1Gbps.
- Ganancia máxima: 25 dBi.
- Memoria interna: 64 MB.
- Interfaz: ethernet (RJ-45).

Anexo A3 Plataforma digital

Listado de parámetros y unidades

A continuación, se presenta un listado de los distintos parámetros (datos) a considerar para la recepción y procesamiento de la información en la plataforma digital, sin perjuicio de que este listado pueda ampliarse o modificarse de otra manera para cada caso particular.

Los parámetros marcados con dos valores distintos:

- "1" indica valores generados de forma continua y automática.
- "2" indica valores generados de forma discreta y que, en ocasiones, deben introducirse manualmente en la plataforma.

Cuadro A3.1
Tipos de datos generados y enviados al servidor

Componente	Subcomponente	Variable ambiental	Parámetros
Agua	Agua superficial	Calidad de agua	- Sólidos suspendidos totales ² (mg/l)
			- Sólidos disueltos totales ² (mg/l)
			- Oxígeno disuelto ¹ (mg/l)
			- Temperatura ¹ (°C)
			- Potencial de hidrógeno ¹ (unidad pH)
			- Conductividad eléctrica ¹ (µS/cm)
			- Clorofila a ² (µg/l)
			- Turbiedad ² (UNT)
			- Alcalinidad total ² (mg/l CaCO ₃)
			- Cloruro ² (mg/l)
			- Nitrato ² (mg/l)
			- Sulfato ² (mg/l)
			- Calcio total ² (mg/l)
			- Potasio total ² (mg/l)
			- Magnesio total ² (mg/l)
			- Sodio total ² (mg/l)
		Cantidad de agua	- Caudal instantáneo ¹ (l/s)
			- Nivel lagunar ¹ (msnm)
			- Superficie lagunar ² (m ²)
			- Caudal instantáneo de captación consuntivo ¹ (l/s)
	Agua subterránea	Calidad de agua	- Sólidos disueltos totales ² (mg/l)
			- Temperatura ¹ (°C)
			- Potencial de hidrógeno ¹ (unidad pH)
			- Conductividad eléctrica ¹ (µS/cm)
			- Alcalinidad total ² (mg/l CaCO ₃)
			- Cloruro ² (mg/l)
			- Nitrato ² (mg/l)
			- Sulfato ² (mg/l)
			- Calcio total ² (mg/l)
			- Potasio total ² (mg/l)
			- Magnesio total ² (mg/l)
			- Sodio total ² (mg/l)
		Cantidad de agua	- Transmisividad ³ (m ³ /día/m)
			- Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático ³ (msnm)
			- Distancia entre la Cota del punto de referencia y la cota del terreno ³ (m)
			- Profundidad del agua subterránea bajo el punto de referencia ¹ (metros bajo el punto de referencia "mbpr")
			- Cota del agua subterránea ¹ (msnm)
			- Caudal de reinyección instantáneo ¹ (l/s)
			- Volumen de reinyección de cada flujómetro ¹ (m ³)
			- Caudal de extracción instantáneo ¹ (l/s)
			- Volumen de extracción de cada flujómetro ¹ (m ³)

Componente	Subcomponente	Variable ambiental	Parámetros
Salmuera	-	Calidad salmuera	- Sólidos disueltos totales ² (mg/l) - Temperatura ¹ (°C) - Potencial de hidrógeno ¹ (unidad pH) - Conductividad eléctrica ¹ (μS/cm) - Alcalinidad total ² (mg/l CaCO ₃) - Cloruro ² (mg/l) - Nitrito ² (mg/l) - Sulfato ² (mg/l) - Calcio total ² (mg/l) - Potasio total ² (mg/l) - Magnesio total ² (mg/l) - Sodio total ² (mg/l)
		Cantidad salmuera	- Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático ³ (msnm) - Distancia entre la cota del punto de referencia y la cota del terreno ³ (m) - Profundidad de la salmuera bajo el punto de referencia ¹ (metros bajo el punto de referencia "mbpr") - Cota de la salmuera ¹ (msnm) - Caudal de reinyección instantáneo ¹ (l/s) - Volumen de reinyección de cada flujómetro ¹ (m ³) - Caudal de extracción instantáneo ¹ (l/s) - Volumen de extracción de cada flujómetro ¹ (m ³)
Meteorológica	-	-	- Precipitación ¹ (mm) - Radiación solar ¹ (W/m ²) - Evaporación ¹ (mm) - Evapotranspiración ¹ (mm) - Humedad absoluta ¹ (g/m ³) - Temperatura ¹ (°C) - Velocidad del viento ¹ (m/s) - Dirección del viento ¹ (°)
Biota acuática	Zooplankton	-	- Abundancia ² (nº individuos/especie)
	Ictiofauna	-	- Frecuencia especies ² (nº muestras/cuadrante)
	Zoobentos	-	- Cobertura ² (m ²)
	Fitoplancton	-	- Riqueza ² (%)
	Fitobentos	-	
	Tapetes microbianos	-	
	Hidrófitos	-	
Vegetación y flora	Flora zonal	-	- Cobertura ² (m ²)
	Flora azonal	-	- Riqueza ² (%)
	Vegetación zonal	-	- Humedad sustrato ¹ (μS/cm)
	Vegetación azonal	-	- Frecuencia especies ² (nº muestras/cuadrante)
Fauna	Avifauna	-	- Abundancia ² (nº individuos/especie)
	Anfibios	-	- Riqueza ² (%)
	Reptiles	-	- Frecuencia especies ² (nº muestras/cuadrante)
	Macromamíferos	-	
	Micromamíferos	-	

Fuente: Elaboración propia.

Comunicación mediante archivos usando SCP

Envío de información

Una primera forma de comunicación sencilla que puede plantearse es el uso de archivos para comunicar los sensores con el servidor encargado del procesado. Esta comunicación debe hacerse mediante un protocolo seguro como SCP, nunca mediante FTP.

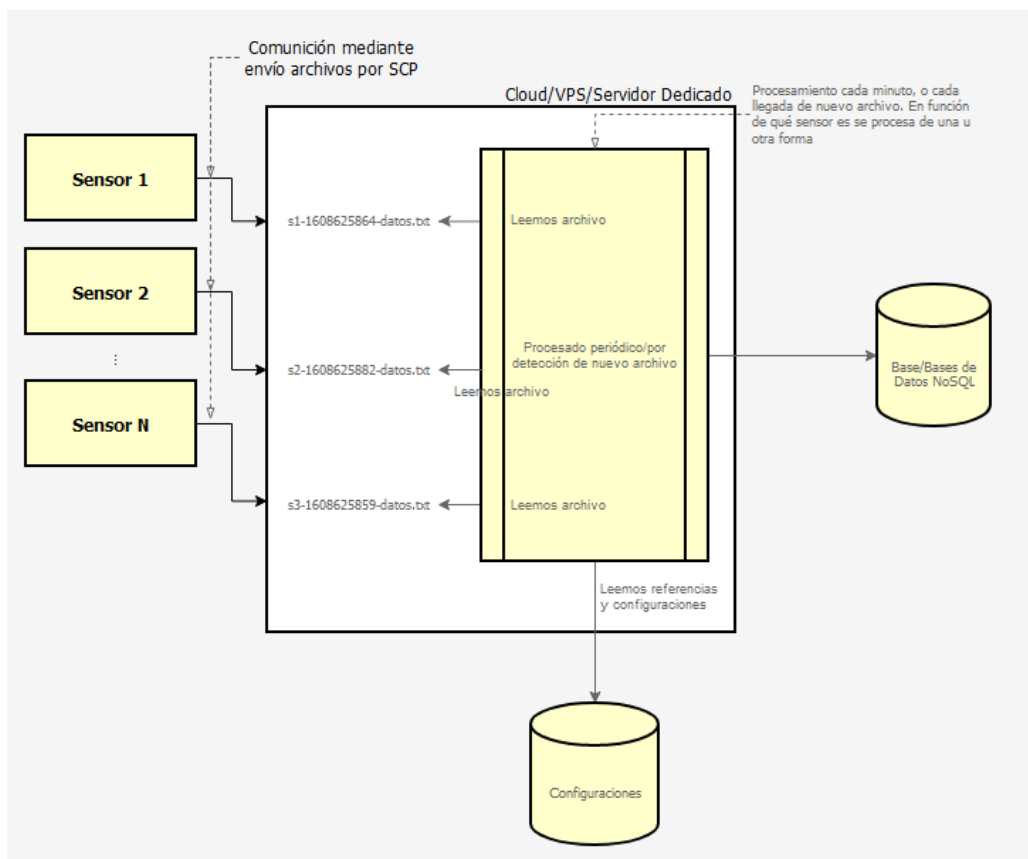
Cada tipo de sensor enviará un archivo con el nombre del sensor y la marca de tiempo en él. Eso permitirá, a la hora de procesar, saber qué tipo de procesado se requiere en función de qué tipos de datos se estén enviando.

Es una forma muy sencilla de trabajar. No podría hacerse una comunicación con los servidores de la SMA en caso de requerirse, por lo que dicha conexión debería realizarse desde el propio servidor.

Recepción de datos

Esta modalidad obliga a disponer de un IaaS, bien un VPS bien un servidor dedicado. El procesado en caso de no requerirse una actualización cuasi-tiempo real podría hacerse de forma periódica, con un único proceso que se encargue de procesar todos los archivos de forma secuencial, o con distintos procesos para el procesado en función de los distintos módulos, tipologías de sensores, etc.

Diagrama A3.1
Procesado de forma periódica de archivos



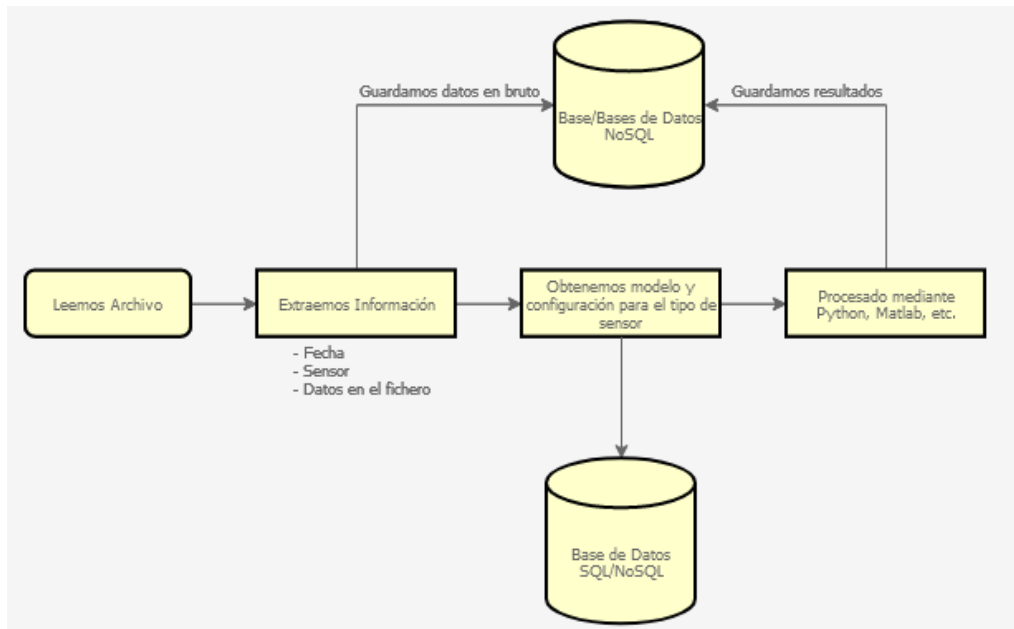
Fuente: Elaboración propia.

Pero al requerirse en muchos casos tiempos de procesado cada minuto para mostrar los datos a medida que se generan, es preferible procesar en base a la propia recepción de archivos, simulando una orientación a eventos. Puede hacerse usando herramientas del sistema o alguna aplicación que envuelva dichas herramientas y facilite este fin, como *inotify-tools*.

Procesado de datos

El procesado se lanzará en base a la propia lectura de los archivos. Cuando se lea un archivo nuevo, se procederá a almacenar los datos que contiene y calcularlo usando la configuración, umbrales y cualquier otro de información necesaria para procesar de forma satisfactoria los datos que envía dicho sensor.

Diagrama A3.2
Procesado de los archivos enviados mediante SCP



Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de entidades BBDD

Salar

Entidad que representa un salar donde se realizan mediciones de distinto tipo.

Imagen A3.1
Estructura salar en BD

```
Salar: {
  'Id'      : 'int',
  'Name'    : 'string',
  'Coordinates' : 'float32[]',
  'Town'    : 'string'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Estación

Instancias que recogen los datos referentes a una estación concreta.

Imagen A3.2
Estación/sensor

```
Estacion: {
  'Salar_id'           : 'int',
  'Id'                 : 'int',
  'Nombre'            : 'string',
  'Coordenadas'       : 'float32[]',
  'Tipo_id'           : 'int',

  // Características Estación Aguas Subterráneas - Cantidad de Agua
  'Transmisividad'    : 'float32 | null',
  'Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático' : 'float32 | null',
  'Distancia entre la Cota del punto de referencia y la Cota del terreno' : 'float32 | null',

  // Características Estación Salmuera - Cantidad de Salmuera
  'Cota del punto de referencia para el monitoreo del nivel freático' : 'float32 | null',
  'Distancia entre la Cota del punto de referencia y la Cota del terreno' : 'float32 | null'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Para aquellos casos en los que la estación tenga datos fijos que han de introducirse de forma manual desde la plataforma, y que son siempre iguales para todas las medidas, dichos datos se almacenarán en la instancia propia de la estación, en vez de repetirse sus valores en cada instancia de medidas de esta.

La no obligación, como en este caso, de la existencia de todos los parámetros en todas las instancias, es una de las razones que hacen preferible el uso de una base de datos NoSQL antes que desnormalizar una SQL.

Tipo de estación

Cuadro o colección donde se recogen los distintos tipos de sensor, estación, o cualquier otra fuente de datos que tengamos.

Imagen A3.3
Tipo de fuente de datos

```
Tipo_estacion : {
  'Id'           : 'int',
  'Nombre'       : 'string',
  'Descripcion' : 'string',
  'Parametros'  : 'string[]'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Alertas

Las alertas que genere el sistema se almacenarán de forma automática, de forma que no sea necesario reprocesar con cada consulta de los usuarios para obtener aquellas generadas en el período de tiempo elegido.

Imagen A3.4
Colección/cuadro para almacenar alertas

```
Alerta: {
  'Salar_id'      : 'int',
  'Estacion_id'  : 'int',
  'Timestamp'    : 'float64',
  'parámetro'    : 'string[]',
  'valor'        : 'float32[]'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Como su definición es muy dependiente de los valores y tipos que se quieran mostrar, se definen en la imagen A3.4 el mínimo de campos que tienen que guardarse. Así, toda alerta tendrá que estar asociada de forma unívoca a un salar y sensor¹¹, deberá almacenar cuándo se produjo, qué parámetro o combinación de parámetros la ha producido, y el valor o los valores que hicieron que se generase. Si algún valor derivado se produce a partir de las lecturas, deberá almacenarse también.

Agua

Agua superficial y subterránea: calidad de agua

Estación de control de Calidad de Aguas. Todos los parámetros son necesarios en estaciones de control de calidad de aguas superficiales, pero no todos tienen sentido en estaciones de control de aguas subterráneas.

Imagen A3.5
Estructura calidad de aguas en BD

```
Calidad_de_aguas: {
  'Salar_id'      : 'int',
  'Estacion_id'  : 'int',
  'Timestamp'    : 'float64',
  'Sólidos Suspendidos Totales' : 'float32' | null,
  'Sólidos Disueltos Totales'   : 'float32' | null,
  'Oxígeno disuelto'           : 'float32' | null,
  'Temperatura1'                : 'float32',
  'Potencial de Hidrógeno'      : 'float32',
  'Conductividad eléctrica'    : 'float32',
  'Clorofila a'                 : 'float32' | null,
  'Turbiedad'                   : 'float32' | null,
  'Alcalinidad total'           : 'float32',
  'Cloruro'                     : 'float32',
  'Nitrato'                     : 'float32',
  'Sulfato'                     : 'float32',
  'Calcio total'                : 'float32',
  'Potasio total'               : 'float32',
  'Magnesio total'              : 'float32',
  'Sodio total'                 : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

¹¹ De forma directa o a través de relaciones entre los cuadros, esto vendrá definido por el SGBD escogido.

Agua superficial y subterránea: cantidad de agua

Imagen A3.6
Estructura cantidad de agua media en estación en BD

```
Cantidad_de_agua: {  
  'Salar_id' : 'int',  
  'Estacion_id' : 'int',  
  'Timestamp' : 'float64',  
  'Caudal instantáneo' : 'float32 | null',  
  'Nivel lagunar' : 'float32 | null',  
  'Superficie lagunar' : 'float32 | null',  
  'Caudal instantáneo de captación consuntivo' : 'float32 | null',  
  'Profundidad del agua subterránea bajo el punto de referencia' : 'float32 | null',  
  'Cota del agua subterránea' : 'float32 | null',  
  'Caudal de reinyección instantáneo' : 'float32 | null',  
  'Volumen de reinyección de cada flujómetro' : 'float32 | null',  
  'Caudal de extracción instantáneo' : 'float32 | null',  
  'Volumen de extracción de cada flujómetro' : 'float32 | null',  
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Meteorológico

Estación meteorológica

Imagen A3.7
Estructura datos estación meteorológica en BD

```
Meteorología: {  
  'Salar_id' : 'int',  
  'Estacion_id' : 'int',  
  'Timestamp' : 'float64',  
  'Precipitación' : 'float32',  
  'Radiación solar' : 'float32',  
  'Evaporación' : 'float32',  
  'Evapotranspiración' : 'float32',  
  'Humedad absoluta' : 'float32',  
  'Temperatura' : 'float32',  
  'Velocidad del viento' : 'float32',  
  'Dirección del viento' : 'float32',  
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Salmuera

Imagen A3.8
Estructura calidad salmuera en BD

```
Calidad_salmuera: {
  'Salar_id'           : 'int',
  'Estacion_id'       : 'int',
  'Timestamp'         : 'float64',
  'Sólidos Disueltos Totales' : 'float32',
  'Temperatura'       : 'float32',
  'Potencial de Hidrógeno' : 'float32',
  'Conductividad eléctrica' : 'float32',
  'Alcalinidad total' : 'float32',
  'Cloruro'           : 'float32',
  'Nitrato'           : 'float32',
  'Sulfato'           : 'float32',
  'Calcio total'      : 'float32',
  'Potasio total'     : 'float32',
  'Magnesio total'    : 'float32',
  'Sodio total'       : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Imagen A3.9
Estructura calidad salmuera en BD

```
Cantidad_salmuera: {
  'Salar_id'           : 'int',
  'Estacion_id'       : 'int',
  'Timestamp'         : 'float64',
  'Profundidad de la salmuera bajo el punto de referencia' : 'float32',
  'Cota de la salmuera' : 'float32',
  'Caudal de reinyección instantáneo' : 'float32',
  'Volumen de reinyección de cada flujómetro' : 'float32',
  'Caudal de extracción instantáneo' : 'float32',
  'Volumen de extracción de cada flujómetro' : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

Biota acuática

Imagen A3.10
Estructura cuadro/colección biota acuática

```
Biota_acuática: {
  'Salar_id'           : 'int',
  'Estacion_id'       : 'int',
  'Timestamp'         : 'float64',
  'Tipo'              : 'tipo_biota',
  'Abundancia'        : 'float32',
  'Frecuencia especies' : 'float32',
  'Cobertura'         : 'float32',
  'Riqueza'           : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de biota vendrá definida bien por otro cuadro, bien simplemente por una enumeración donde se limiten los valores que puede coger. La elección de una u otra vendrá marcada por el SGBD escogido.

Imagen A3.11
Enumeración con los tipos de biota acuática permitidos

```
tipo_biota: 'Zooplancton'
            'Ictiofauna'
            'Zoobentos'
            'Fitoplancton'
            'Fitobentos'
            'Tapetes microbianos'
            'Hidrófitos'
```

Fuente: Elaboración propia.

Vegetación y flora

Imagen A3.12
Estructura cuadro/colección biota acuática

```
Vegetacion_y_flora: {
  'Salar_id'      : 'int',
  'Estacion_id'  : 'int',
  'Timestamp'    : 'float64',
  'Tipo'         : 'tipo_vegetacion',
  'Cobertura'    : 'float32',
  'Riqueza'      : 'float32',
  'Humedad sustrato' : 'float32',
  'Frecuencia especies' : 'float32',
  'Abundancia'   : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de vegetación, al igual que el tipo de biota, también vendrá definida bien por otro cuadro, bien simplemente por una enumeración donde se limiten los valores que puede coger.

Imagen A3.13
Enumeración con los tipos de vegetación y flora permitidos

```
tipo_vegetacion: 'Flora zonal'
                 'Flora azonal'
                 'Vegetación zonal'
                 'Vegetación azonal'
```

Fuente: Elaboración propia.

Fauna

Imagen A3.14
Estructura cuadro/colección fauna

```
Fauna: {
  'Salar_id'      : 'int',
  'Estacion_id'  : 'int',
  'Timestamp'    : 'float64',
  'Tipo'         : 'tipo_fauna',
  'Abundancia'   : 'int',
  'Riqueza'      : 'float32',
  'Frecuencia especies' : 'float32'
}
```

Fuente: Elaboración propia.

El tipo de fauna, al igual que el tipo de biota y vegetación y flora, también vendrá definida bien por otro cuadro, bien simplemente por una enumeración donde se limiten los valores que puede coger.

Imagen A3.15
Enumeración con los tipo de fauna

```
tipo_fauna: 'Avifauna'
            'Anfibios'
            'Reptiles'
            'Macromamíferos'
            'Micromamíferos'
```

Fuente: Elaboración propia.

Dashboard de visualización de datos

A continuación, se describe una propuesta de las características principales de la plataforma de gestión de salares, que se deberá ajustar para el salar particular objeto de estudio.

Identificación de usuarios

La plataforma de gestión de salares se define como un sistema integrado de gestión y consulta de datos donde se permita centralizar la actividad de distintos *stakeholders* del salar en cuestión. Es decir, se busca que una misma plataforma pueda cubrir las distintas necesidades de todos los actores involucrados en la actividad desarrollada en el salar y su entorno.

Para ello, se definen cuatro tipos de usuarios distintos, según las necesidades o involucración de cada uno:

- **Explotador:** se trata de aquellas personas relacionadas con las actividades de explotación en el salar, bien sea actividad minera de litio u otra. Este rol de usuario permitirá acceder a toda la información disponible en la plataforma siempre y cuando esté relacionada directamente con las actividades de explotación llevadas a cabo en el salar.
- **Investigador:** se trata de personas o entidades que deseen acceder a la información histórica y actual de los sensores y sistemas instalados, además de las herramientas provistas en la plataforma, con el objetivo de poder analizar la información desde un punto de vista científico.

- **Fiscalizador:** este rol permite a las personas involucradas en la fiscalización de las actividades llevadas a cabo en el salar consultar la información actualizada de los sistemas para poder determinar el buen cumplimiento de las RCA u otras regulaciones de aplicación en el salar y en las explotaciones llevadas a cabo en el mismo.
- **Consulta:** finalmente, el rol de consulta permite acceder únicamente a la información más básica de los sistemas instalados, como los últimos datos de los sensores e instrumentos. Este acceso restringido está dirigido a personas que, si bien no tienen una relación directa con las actividades del salar, puedan estar interesadas en obtener información actualizada de algunos parámetros fisicoquímicos o meteorológicos.

En la imagen A3.16 se presenta un ejemplo del esquema de la base de datos con los parámetros principales para la definición de usuarios.

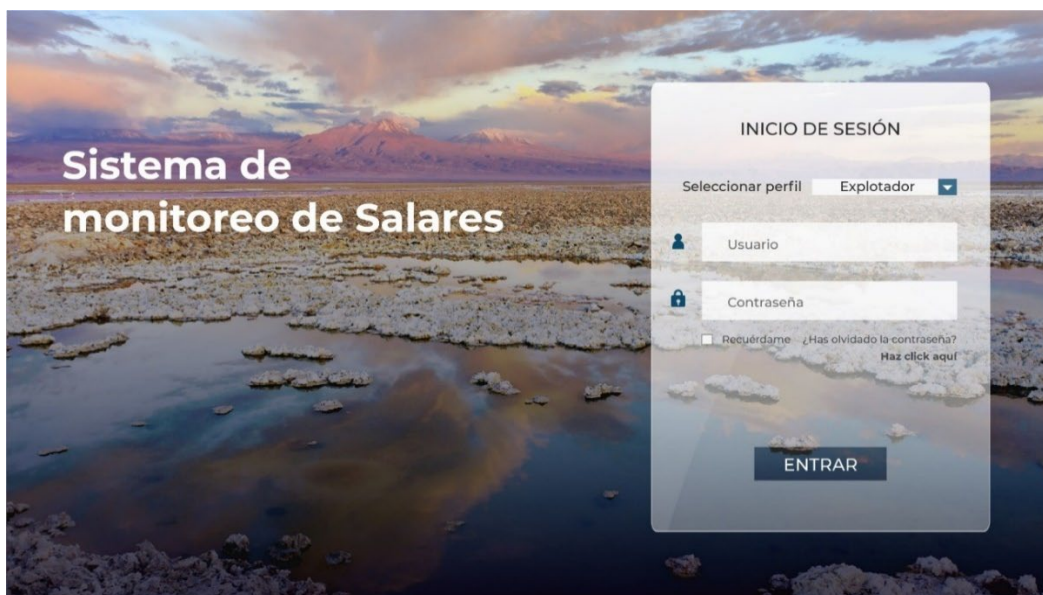
Imagen A3.16
Ejemplo cuadro MariaDB usuarios

id	email	password	role	organism
1	email1@email.cl	21c5fd4cdd5212dab543	admin	developers
2	email2@email.cl	adf567ce1fa20637f231	fiscalizador	company 1
2	email3@email.cl	15a34ffcea3b22cadb4a	explotador	company 1
2	email4@email.cl	321d5cf5c6aab124b4a6	investigador	company 1
3	email5@email.cl	2f2233a3971bc34ba12c	consulta	sma

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Imagen A3.17 se muestra un ejemplo de la pantalla de inicio de sesión de la plataforma.

Imagen A3.17
Pantalla de inicio de la plataforma con autenticación de usuario



Fuente: Elaboración propia. Foto empelada: Francesco Mocellin.

Selección de salares

La plataforma integrada permitirá la gestión y visualización de distintos salares, de manera que éstos sean independientes, en cuanto a gestión de datos y usuarios, pero permitan su acceso y visualización desde una misma plataforma.

Mediante un mapa interactivo, como el mostrado en la imagen A3.18, se permitirá la visualización de los salares inscritos en la plataforma y su selección para acceder a la gestión y consulta de datos de estos.

Imagen A3.18
Pantalla de selección de salar de la plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Cada usuario individual tendrá asociado uno o varios salares a los cuales podrá acceder, por lo que tan solo aparecerán en el mapa y permitirán su selección aquellos a los cuales el usuario en cuestión tenga permiso para acceder. La gestión de acceso a los salares se podrá realizar de manera individual por usuario, o bien por rol, donde a los usuarios que compartan un mismo rol se les podrá asignar acceso a todos o algunos salares de manera general.

Para la implementación de los mapas interactivos se propone el uso de leaflet. Sobre los mapas que muestra esta librería pueden representarse elementos de formas arbitrarias a partir de coordenadas, usando el estándar abierto GeoJSON. Además, se puede interaccionar sobre ellos, clicar, etc.

Visión general del salar

Esta sección de la plataforma permitirá obtener una visualización a nivel general del salar, donde se representará sobre un mapa interactivo del mismo con la información más relevante, como puede ser:

- Sensores e instrumentos instalados.
- Sistemas de comunicación.
- Áreas de explotación.

Imagen A3.19
Pantalla de visión general de salar de la plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Esta información se mostrará de manera actualizada y permitirá además acceder a la visualización de datos de cada sensor mediante la interacción con los elementos del mapa.

Visión de datos históricos

Mediante la selección de uno de los puntos de monitoreo anteriores, se permitirá la visualización de los datos históricos del mismo, tanto en formato cuadro como gráfica, para su consulta y análisis.

Imagen A3.20
Pantalla de visualización de datos históricos de la plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Mediante desplegables y selectores de fechas adecuados se han de poder recuperar datos de fechas pasadas. Los datos han de mostrarse en formato cuadro y en formato gráfico. Han de poder ser exportables a formato Excel, tanto el total de los datos mostrados en los cuadros como aquellos que el usuario, una vez disponga de ellos en los cuadros, desee filtrar. Es decir, si el usuario muestra todos los datos de un mes de una estación de calidad de aguas, pero luego decide solo ver aquellos en los que la turbiedad supere un cierto umbral, debe ser la plataforma capaz de exportar a Excel solo aquellos datos que el usuario ha filtrado y que se encuentran por encima de dicho umbral.

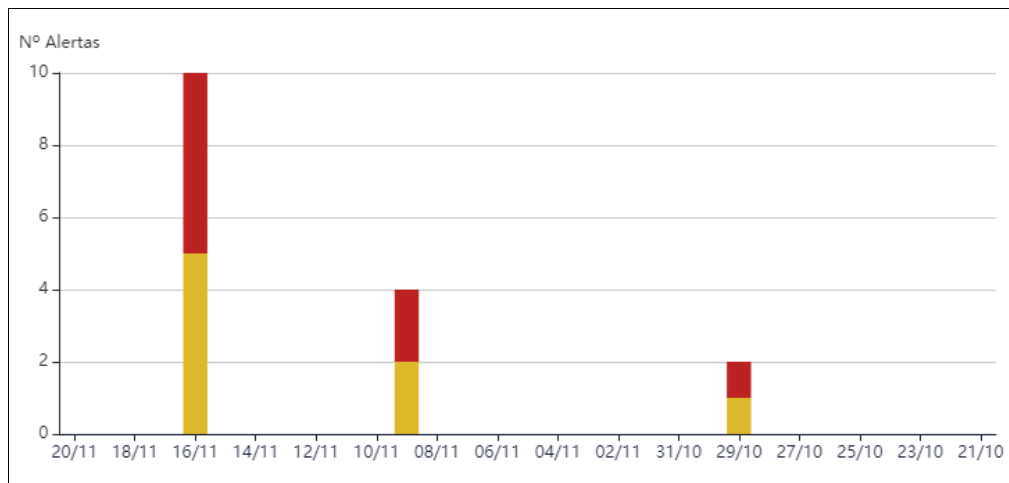
Además, se deberá permitir la visualización combinada de distintos parámetros, incluida su representación conjunta en un mismo gráfico. Para ello, se permitirá agregar a un mismo gráfico los distintos parámetros a visualizar.

Todos los datos mostrados deberán actualizarse de manera automática con la última información disponible, asegurando una cadencia de actualización de entre 5 y 10 minutos.

Sistema de alertas

Se implementará un sistema de alertas cuando se registren anomalías en los registros de información. Estas alertas podrán ser de dos tipos: bien alertas generadas cuando se supere un cierto umbral de algunos de los parámetros, bien alertas generadas por la combinación de ciertos parámetros. La visualización de estas debe realizarse mediante gráficas que muestren de forma rápida su número en el último mes (ejemplo en la imagen A3.21).

Imagen A3.21
Ejemplo de dos tipos de alertas generadas en último mes



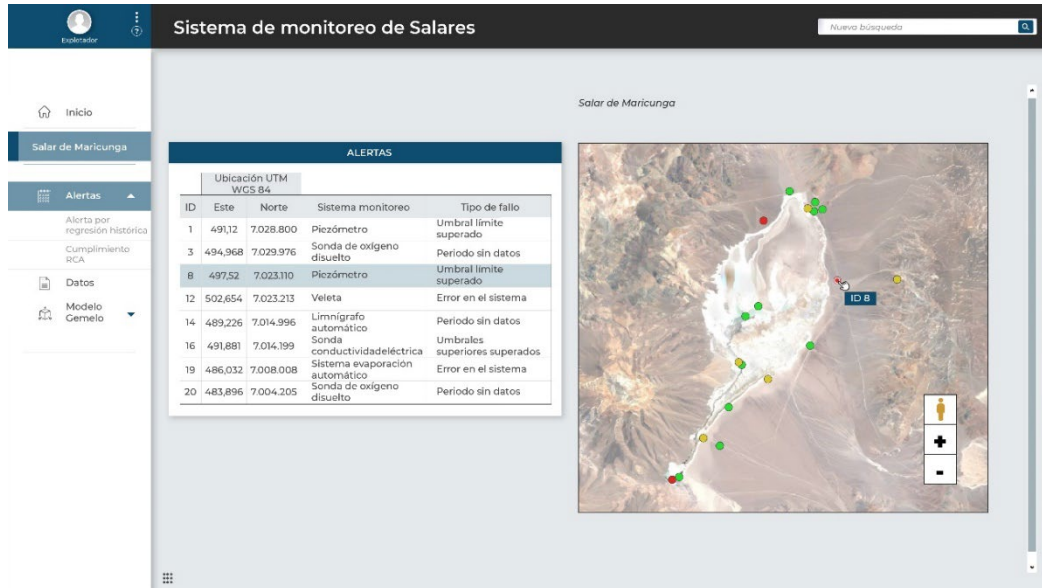
Fuente: Elaboración propia.

Clicando sobre cada una de ellas, debe mostrarse un listado donde se especifiquen el tipo, fecha, valores, razón de la alerta, y cualquier otra información útil para su cuantificación.

Este ejemplo no limita la forma en que las alertas se deben mostrar. Otras formas posibles para añadir serán: mapa donde se solo se muestren aquellos sensores que han generado valores anómalos durante el último mes o rango de tiempo seleccionado, gráficas de otro tipo, etc.

Deberá existir un sistema de alerta por mail, de forma que se puedan personalizar distintos tipos de alertas, con la combinación de umbrales y parámetros deseados, y que servidor permita el envío automático de mensajes por correo electrónico a los *stakeholders* pertinentes.

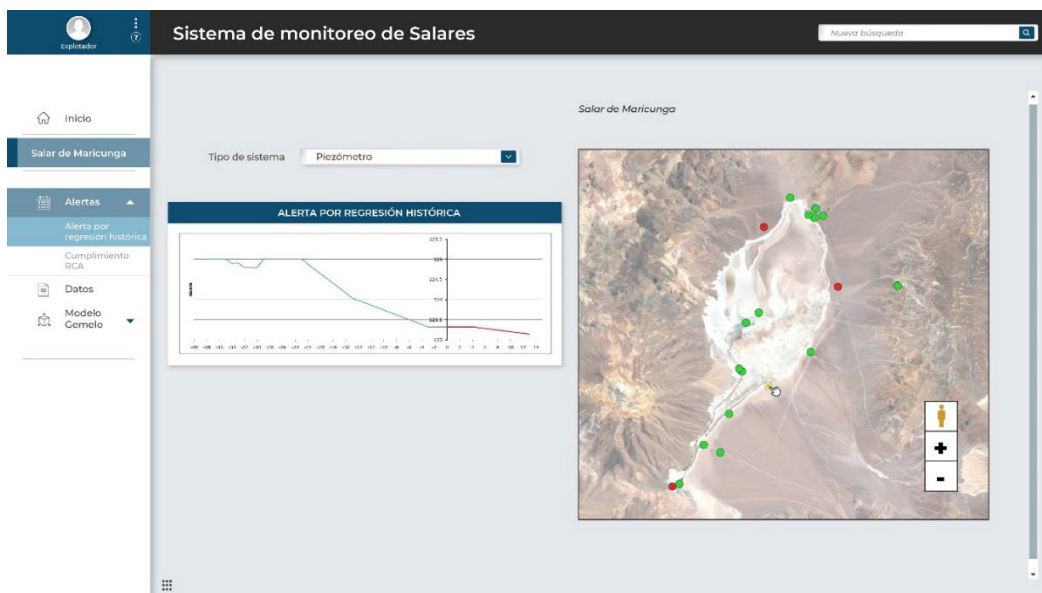
Imagen A3.22
Pantalla de visualización de alertas en plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Además, la plataforma permitirá incorporar análisis estadísticos mediante regresión histórica u otra herramienta similar, que permita generar alertas para algunos parámetros como niveles, a partir de la información previa de los mismos. Esta información se mostrará en un apartado de análisis separado, donde se podrá visualizar en una misma gráfica los datos históricos del parámetro y la previsión de evolución de este.

Imagen A3.23
Pantalla de alerta por regresión histórica de la plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Seguimiento de cumplimiento de un EIA

La plataforma permitirá tanto a los usuarios de perfil “explotador” como “fiscalizador” la visualización de los parámetros relevantes relacionados con el cumplimiento de las Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y cualquier otra normativa relevante relacionada con la explotación llevada a cabo en el salar.

Esta información se mostrará mediante la visualización de los umbrales máximos y mínimos a cumplir para los parámetros definidos en las resoluciones, y el análisis histórico y estadístico de éstos.

De esta manera, tanto los usuarios relacionados con la explotación como aquellos encargados de la fiscalización de ésta podrán obtener de manera sencilla si todos los parámetros se encuentran dentro de los límites legales establecidos.

Imagen A3.24
Pantalla de alerta por regresión histórica de la plataforma

The screenshot displays the 'Sistema de monitoreo de Salares' interface. On the left is a navigation menu with options: Inicio, Salar de Maricunga, Alertas (with a sub-option 'Alerta por regresión histórica'), Cumplimiento RCA, Datos, and Modelo Gemelo. The main content area features a table titled 'CUMPLIMIENTO RCA' with the following data:

ID	Ubicación UTM WCS 84		Sistema monitoreo	Medida	Límite RCA	Variación	Unidades	RCA asociado	Descargas
	Este	Norte							
1	491,12	7.028.800	Piezómetro	1,328.48	1,328.60	-0.12	msnm	RCA 226_2013	DESCARGAR RCA
8	497,52	7.023.110	Piezómetro	1,334,10	1,335.00	-0.90	msnm	RCA 018_2020	DESCARGAR RCA

Below the table is a satellite map of 'Salar de Maricunga' with two red dots indicating specific monitoring locations. The interface includes a search bar at the top right and a user profile icon at the top left.

Fuente: Elaboración propia.

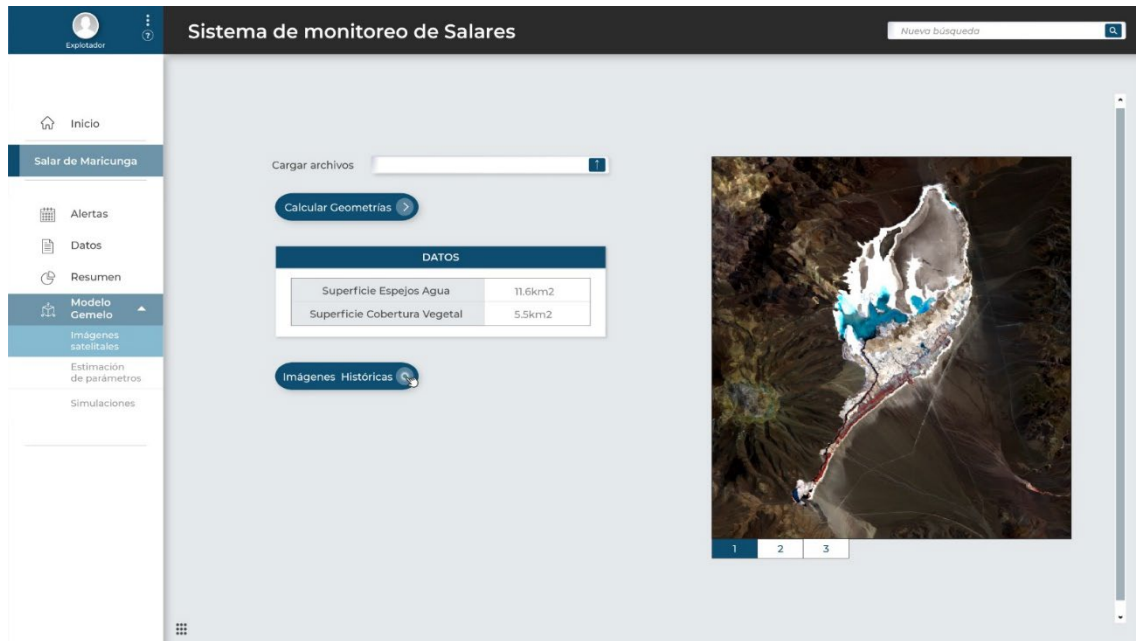
Modelo digital y análisis avanzado

Se propone también la aplicación de métodos de análisis avanzados basados en modelos digitales del salar y otras tecnologías que permitan el análisis del estado actual y futuro de los salares.

Para ello, desde la misma plataforma se permitirá a los usuarios relevantes el acceso a distintas herramientas como el análisis de imágenes satelitales para la extracción de geometrías de superficie de espejos de agua y de cobertura vegetal.

Esta funcionalidad se presentará mediante una pantalla donde el usuario podrá cargar los archivos y éstos se puedan analizar automáticamente para extraer estos parámetros.

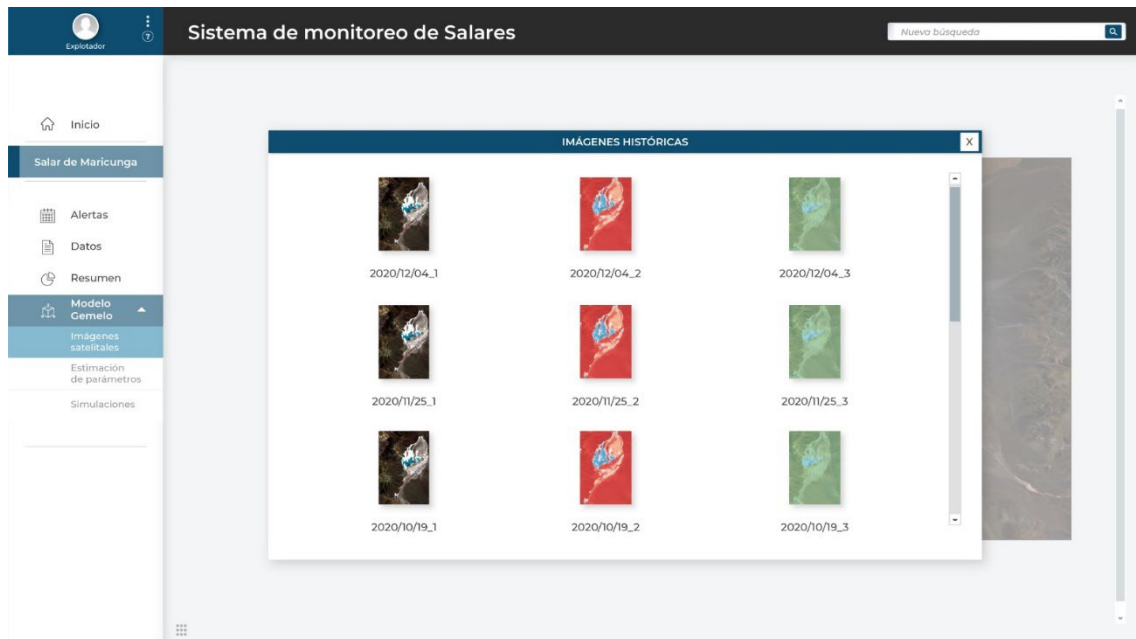
Imagen A3.25
Pantalla de análisis de imágenes satelitales de la plataforma



Fuente: Elaboración propia.

Además, se permitirá el acceso a historial de las imágenes cargadas anteriormente para su visualización y consulta de datos obtenidos.

Imagen A3.26
Pantalla de visualización de imágenes satelitales históricas de la plataforma

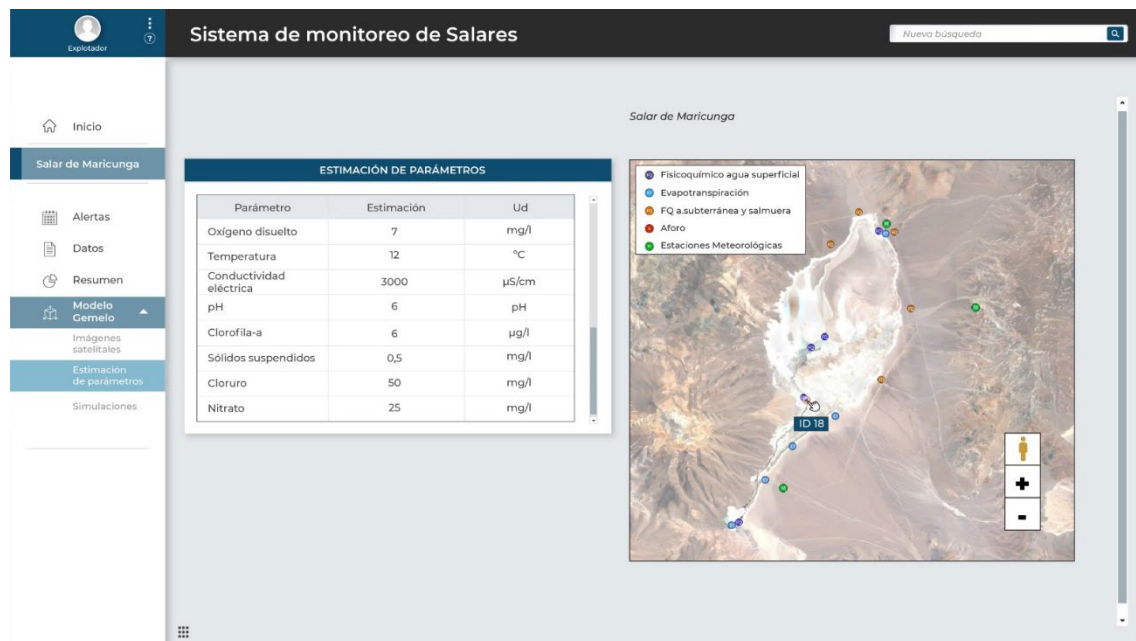


Fuente: Elaboración propia.

La plataforma permitirá también obtener los resultados actualizados del análisis de los modelos digitales que caracterizan el salar para obtener una estimación de los distintos parámetros del salar que están relacionados directamente con la aplicación de los modelos matemáticos del salar. Esto permitirá por un lado poder contrastar la información obtenida de los sensores con los resultados del modelo, para detectar valores anómalos de los sensores en caso de fallo del instrumento o de falta de calibración.

Por otro lado, se permitirá extraer información sobre parámetros que no son medidos directamente en el salar, como puede ser la Clorofila-a o los sólidos suspendidos. De esta manera, se puede inferir estos parámetros y obtener su valor estimado actualizado a partir de la información de otros parámetros.

Imagen A3.27
Pantalla de estimación de parámetros de la plataforma

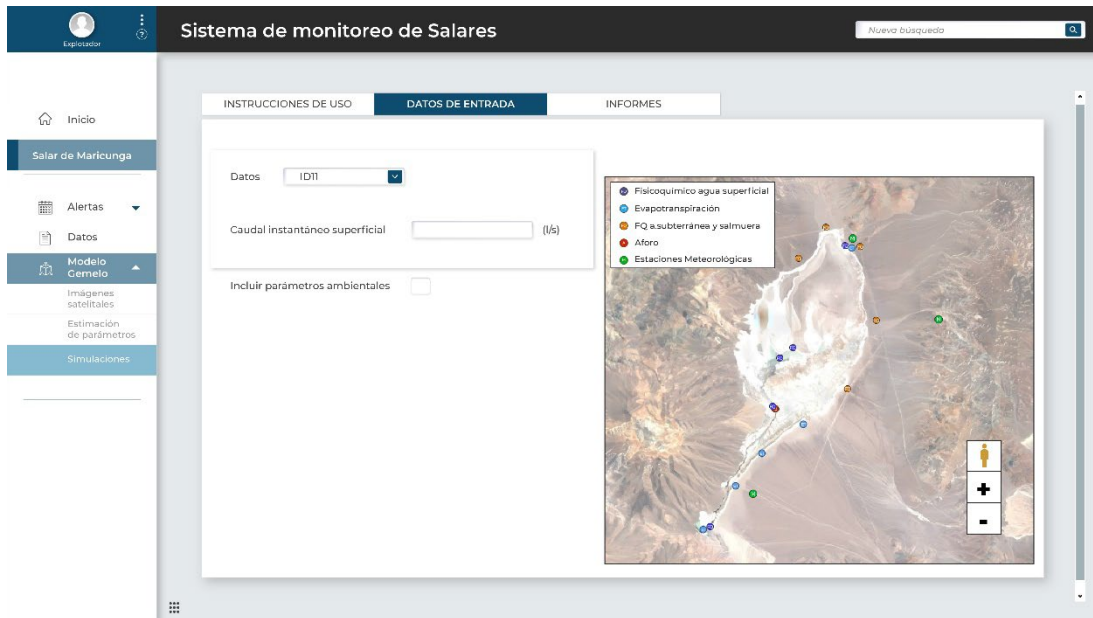


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el modelo digital del salar integrado en la plataforma proporcionará una herramienta para realizar simulaciones modificando los parámetros de los puntos de monitoreo como el caudal instantáneo de extracción o los niveles de agua subterránea en los acuíferos, entre otros. El submenú de simulaciones contendrá tres pestañas, en la cual en la primera de ellas se detallarán las instrucciones de uso de la herramienta de simulaciones.

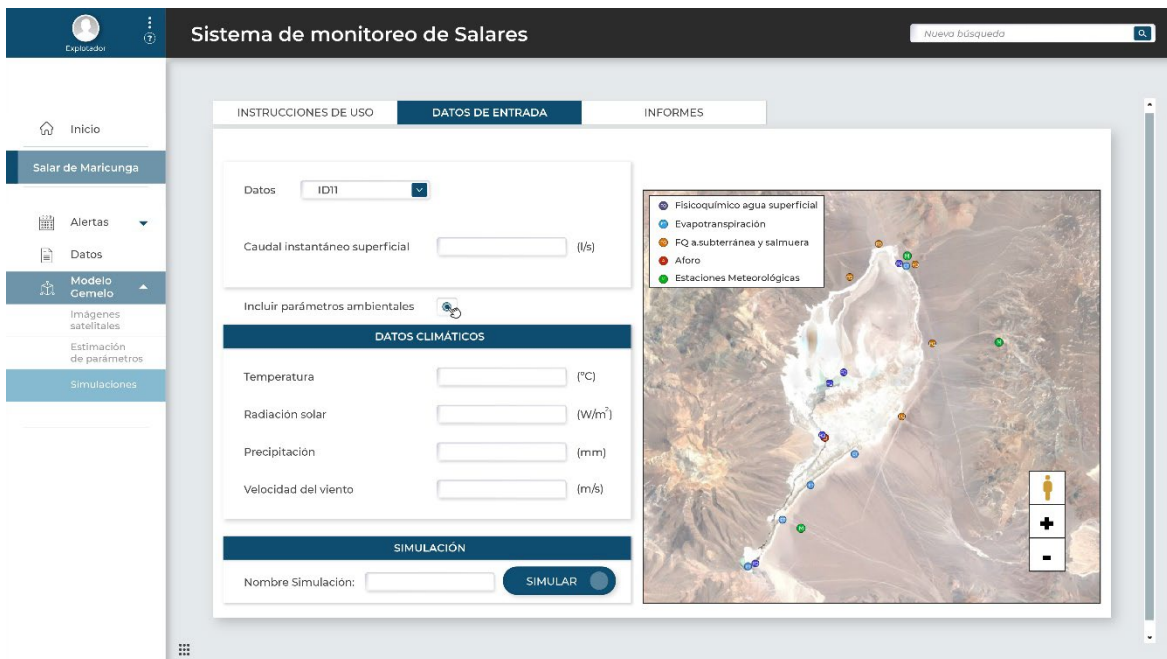
Por su parte, la segunda pestaña será donde se introduzcan los datos de entrada de la simulación de aquellos parámetros que se deseen modificar, incluida la modificación de los parámetros ambientales que afectan al salar de manera general.

Imagen A3.28
Pantalla de visualización de la introducción de los datos de entrada de la simulación sin incluir parámetros ambientales



Fuente: Elaboración propia.

Imagen A3.29
Pantalla de visualización de la introducción de los datos de entrada de las simulaciones, incluyendo parámetros ambientales



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la última pestaña, ésta contendrá los informes de la simulación, los cuales incluirán los valores de los parámetros en todos los puntos de monitoreo generados a partir de los datos de partida, así como las alertas en cuanto a incumplimientos de los requerimientos ambientales.

Imagen A3.30
Pantalla de visualización de los informes de simulación



Fuente: Elaboración propia.

Anexo A4 Presupuesto

Presupuesto por unidad de obra

En el presente anejo se detallan los precios unitarios y el presupuesto total, títulos a los que se hacen referencia en el Apartado 6 del capítulo V de la memoria general del informe.

Precios unitarios

Cuadro A4.1
Precios unitarios

Código	Uds	Descripción	Precio (USD)
Trabajos de campo			
1	ud	Abono fijo por transporte de cada equipo de sondeo u otros equipos especiales al área de trabajo	\$1 101
2	ud	Recargo por apertura mediante maquinaria u otros medios auxiliares en cada punto de reconocimiento en que sea preciso y reposición	\$295
3	ud	Posicionamiento en campo y/o replanteo y nivelación de puntos de reconocimiento, incluido planos o croquis y fotografía en color	\$21
4	m	Perforación a rotación en suelos con barrena helicoidal $\phi > 200\text{mm}$	\$52
5	m	Perforación a rotación en rellenos o suelos, con diámetros comerciales hasta $\phi < 120\text{mm}$, incluido suministro de agua	\$58
6	m	Perforación a rotación o rotoperusión, con diámetros comerciales $\phi < 120\text{mm}$ en gravas-bolos, incluido suministro de agua	\$104
7	m	Perforación a rotación con diámetros comerciales $\phi < 120\text{mm}$ en rocas de dureza media, incluido suministro de agua	\$78
8	m	Perforación a rotación con diámetros comerciales $\phi < 120\text{mm}$ en rocas de gran dureza, incluido suministro de agua	\$93
9	m	Recargo adicional por perforación con diámetro $\phi > 120\text{mm}$	\$19
10	m	Recargo por perforación con extracción continua de testigo, en cualquier tipo de terreno, entre 25 y 50m de profundidad	\$13
11	m	Recargo por perforación con extracción continua de testigo, en cualquier tipo de terreno, entre 50 y 100m de profundidad	\$27
12	m	Recargo por perforación con extracción continua de testigo, en cualquier tipo de terreno, para más de 100m de profundidad	\$29
13	ud	Hito de control topográfico de hormigón hm-20 con protección en ambiente salino de 30x30x30cm con clavo	\$127
Control de monitoreo			
14	ud	Piezómetro de cuerda vibrante de alta dureza con membrana para ambientes de salmuera. Completamente instalado a profundidades comprendidas entre 5 y 70m, incluido cableado hasta estación de control y parte proporcional de sellados y filtros. Rango de presión de 0.07 a 7.5MPa y temperatura de operación de -20 a 80°C. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA	\$1 160
15	m	Tubería roscada de PVC para piezómetro abierto, de 50mm de diámetro y 4mm de espesor, incluido parte proporcional de engravillado y sellado anular	\$24
16	ud	Emplazamiento de equipos de perforación en puntos de instalación de piezómetros y otros equipos	\$114
17	m	Complemento de cable estanco apantallado para piezómetro de cuerda vibrante a partir de 20m de profundidad, incluida la parte proporcional de sellados y filtros	\$4
18	ud	Jornada de equipo de topografía compuesto por topógrafo, auxiliar (ayudante) y equipos	\$366
19	ud	Limnógrafo electrónico y autónomo de precisión submilimétrica para registro automático de las variaciones de nivel de agua y temperatura en canales abiertos, incluido sistema de montaje y protección antivandálica. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4.20mA. Debe incluir compensación de temperatura y presión atmosférica	\$3 172
20	m	Cable de acero inoxidable trenzado de 2mm de diámetro para suspensión de limnógrafo	\$2
21	ud	Sensor ultrasónico de impulsos Doppler, con una precisión del 2% y temperatura de operación de -20 a 80°C. con cable de 20m, incluida instalación y calibración. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA	\$1 025
22	ud	Varilla de acero inoxidable de 40mm de diámetro y 2m de altura para la instalación del sensor ultrasónico. Incluido hormigón hm-20 con protección al ambiente salino, otros materiales y personal necesario para su instalación	\$281
23	ud	Caseta de control, incluido instalación de paneles y demás elementos necesarios	\$3 172

Código	Uds	Descripción	Precio (USD)
24	ud	Sensor de conductividad eléctrica de 2 electrodos y temperatura del agua, con compensación de temperatura. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$732
25	ud	Sensor de conductividad eléctrica de 4 electrodos para altas concentraciones de salinidad. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$2 196
26	ud	Sensor de pH de tecnología ISFET, con compensación de temperatura. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$1 342
27	ud	Estación meteorológica automática para el registro de datos pluviométricos a partir de cubo basculante, sensor de temperatura y humedad, anemómetro, veleta y sensor de radiación solar. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$4 825
28	ud	Estructura metálica perimetral para la estación meteorológica	\$1 596
29	ud	Gastos operacionales, incluido transporte y arriendo de camionetas	\$21 935
30	ud	Obras civiles e instalación de cerco y estructuras necesarias en la estación	\$1 960
31	ud	Sonda de oxígeno disuelto de tipo polarográfica con membrana protectora y compensación automática de altitud y salinidad. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Rango de hasta 50 mg/l. Longitud del cable de 20m	\$1 179
32	m	Complemento de cable estanco apantallado para la sonda de oxígeno disuelto partir de 20m de profundidad.	\$6
33	ud	Sensor humedad del suelo. Temperatura de operación del terreno entre -40 y 50°C. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado de 5m, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$116
34	ud	Sensor de potencial hídrico del terreno con revestimiento de epoxi duradero. Tipo de sensor del dominio de frecuencia con discos cerámicos calibrados. Temperatura de operación del terreno entre -40 y 50°C y potencial del terreno entre -10 y -100,000kPa. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado de 5m, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	\$854
35	ud	Sistema de evaporación automática con conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido panel solar, controlador del panel solar, batería de 12V a 7.2Ah, solenoide 0-10000kPa a 12V y componentes de la estación de bombeo. Incluido instalación y calibración. Incluido bandeja de evaporación clase A con protección frente a animales	\$4 856
36	ud	Sistema de evapotranspiración de clase 3. Incluye sensor de temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar y velocidad y dirección del viento. Incluido panel solar y batería de 12V. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA	\$4 270
Sistemas de comunicación			
37	ud	Convertidor de conexión tipo RS 232 y RS485 a Lorawan o señal de 4-20mA a Lorawan y frecuencia variable en la bandas 433, 868 y 915 MHz. Con una cobertura en condiciones extremas de 5km, capacidad de transmisión cada 5 minutos y temperatura de operación de -20 a 85°C. Incluida carcasa IP65, batería de 6400mAh de capacidad. Incluye instalación y pruebas de verificación	\$427
38	ud	Instalación y puesta en marcha de un gateway LoRaWAN Single Channel de código abierto con capacidad de conexión IP mediante WiFi, 1 puerto WAN, 1 puerto LAN o celular 3G/4G	\$110
39	ud	Instalación y puesta en marcha de un módem y antena satelital con velocidad máxima de 50 MB/s	\$351
40	ud	Instalación y puesta en marcha de un router con capacidad de conexión WiFi IEEE 802,11b/g/n, 4 puertos Ethernet LAN 10/100 Mbit/s y sistema operativo basado en OpenWRT	\$26
41	ud	Instalación y puesta en marcha de una antena unidireccional de 400 mm de diámetro para la transmisión/recepción de señal WiFi en la banda de 5 GHz con 26 dBi de ganancia, 1 puerto LAN Ethernet 10/100 Mbit/s, 4 puertos WAN, protección IP66 y resistencia frente a rachas de viento de hasta 200 Km/h	\$102
42	ud	Caja de protección eléctrica con certificación IP66 y medidas 200x200x130 fabricada en ABS. Incluida instalación	\$15
43	ud	Gabinete de protección con certificado IP66 con medidas 400x300x230mm fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Incluida instalación	\$109
44	ud	Gabinete de protección con certificado IP66 con medidas 600x400x230mm fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Incluida instalación	\$174
45	ud	Poste de sujeción de 9m de altura, fabricado en chapa de acero galvanizado y 400 daN de esfuerzo nominal, incluyendo obra civil necesaria para su puesta en marcha	\$483
Sistemas de alimentación			
46	ud	Instalación y puesta en marcha de un respaldo de batería UPS de 750 VA (375W), 97% de eficiencia y con protección frente a sobretensión y cortocircuito	\$414
47	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 5W de potencia a 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18 V e intensidad máxima 0,3 A	\$13
48	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 75W de potencia 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18,9 V e intensidad máxima 5,56 A	\$64
49	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 150W de potencia 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18,54 V e intensidad máxima 8,09 A	\$87

Código	Uds	Descripción	Precio (USD)
50	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 7 Ah de capacidad	\$17
51	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 33 Ah de capacidad	\$86
52	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 100 Ah de capacidad	\$132
53	ud	Instalación y puesta en marcha de un regulador de carga de 12 V y 10 A de intensidad máxima, con indicador LED de nivel de la batería	\$22
54	ud	Instalación y puesta en marcha de un regulador de carga de 12 V y 20 A de intensidad máxima, con indicador LED de nivel de la batería	\$32
Plataforma digital			
55	Ud	Jefe de Proyecto. Conexión con ente público. Definición de requisitos, reuniones con <i>stakeholders</i> (4 meses)	\$24 360
56	Ud	Desarrolladores. Definición algorítmica, implementación plataforma digital: backend, frontend, procesado. Tests unitarios, de integración, e2e (4 meses)	\$11 200
57	Ud	Administrador de Sistemas. Instalación sistema operativo. Definición roles, usuarios, grupos, instalación software necesario en servidor. Definición reglas de seguridad. Creación scripts automatización copias de seguridad y mantenimiento, diseño bases de datos (4 meses)	\$11 200
58	Ud	Equipos para personal participante en el proyecto. Laptops mínimo i5 (10ª gen)/ryzen 4XXX, cuatro núcleos y 8 hilos de procesado. 16GB de RAM, 512 GB SSD. Windows 10/Ubuntu LTS. Pantalla auxiliar 27" QHD, conexión HDMI	\$2 450
59	Ud	Licencias. Cualquier licencia que se considere indispensable en la solución propuesta, debidamente justificada	\$2 800
60	Ud	Servidor VPS Pruebas. Aunque se puede desarrollar directamente sobre un servidor dedicado en caso de ser esta la opción finalmente escogida, las pruebas pueden realizarse sobre un VPS sin todas las características exigidas para el servidor de producción (4 meses)	\$280
61	Ud	Servidor Local. Montaje e instalación del servidor local y de todo el software necesario en él. Requisitos mínimos: Intel Xeon/AMD Threadripper, 16GB RAM, 256GB SSD NVMe, a incluir HDD para bases de datos y copias de seguridad de datos antiguos con el esquema escogido: Raid 1/Raid 10	\$5 600
62	Ud	Local para ubicación de servidor, así como su equipamiento: detección y extinción de incendios, equipos autónomos de alimentación (SAI) para mantener el equipo en funcionamiento un mínimo de 2 horas en caso de corte del suministro eléctrico, climatización para mantener una temperatura continua por debajo de 21° C durante todo el año	\$5 600
63	Ud	Conexión red mínimo 400Mb/s redundante, con dos proveedores independientes, para uso simultáneo (4 meses)	\$112

Fuente: Elaboración propia a partir de la información previamente especificada.

Presupuestos

Cuadro A4.2 Presupuesto final

Código	Uds	Descripción	Medición	Precio (USD)	Importe (USD)
Trabajos de campo					\$186 086
1	ud	Abono fijo por transporte de cada equipo de sondeo u otros equipos especiales al área de trabajo	27	\$1 101	\$29 715
3	ud	Posicionamiento en campo y/o replanteo y nivelación de puntos de reconocimiento, incluido planos o croquis y fotografía en color	27	\$21	\$560
5	m	Perforación a rotación en rellenos o suelos, con diámetros comerciales hasta $\varphi < 120\text{mm}$, incluido suministro de agua	1 750	\$58	\$102 074
6	m	Perforación a rotación o rotopercusión, con diámetros comerciales $\varphi < 120\text{mm}$ en gravas-bolos, incluido suministro de agua	140	\$104	\$14 535
9	m	Recargo adicional por perforación con diámetro $\varphi > 120\text{mm}$	1 890	\$19	\$36 662
13	ud	hito de control topográfico de hormigón hm-20 con protección en ambiente salino de 30x30x30cm con clavo	20	\$127	\$2 539
Control de monitoreo					\$269 067
14	ud	Piezómetro de cuerda vibrante de alta dureza con membrana para ambientes de salmuera. Completamente instalado a profundidades comprendidas entre 5 y 70m, incluido cableado hasta estación de control y parte proporcional de sellados y filtros. Rango de presión de 0.07 a 7.5MPa y temperatura de operación de -20 a 80°C. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA	3	\$1 160	\$3 479
15	m	Tubería roscada de PVC para piezómetro abierto, de 50mm de diámetro y 4mm de espesor, incluido parte proporcional de engravillado y sellado anular	210	\$24	\$5 132
16	ud	Emplazamiento de equipos de perforación en puntos de instalación de piezómetros y otros equipos	1	\$114	\$114

Código	Uds	Descripción	Medición	Precio (USD)	Importe (USD)
17	m	Complemento de cable estanco apantallado para piezómetro de cuerda vibrante a partir de 20m de profundidad, incluida la parte proporcional de sellados y filtros	150	\$4	\$668
18	ud	Jornada de equipo de topografía compuesto por topógrafo, auxiliar (ayudante) y equipos	6	\$366	\$2 196
24	ud	Sensor de conductividad eléctrica de 2 electrodos y temperatura del agua, con compensación de temperatura. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	5	\$732	\$3 660
25	ud	Sensor de conductividad eléctrica de 4 electrodos para altas concentraciones de salinidad. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	20	\$2 196	\$43 920
26	ud	Sensor de pH de tecnología ISFET, con compensación de temperatura. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	10	\$1 342	\$13 420
27	ud	Estación meteorológica automática para el registro de datos pluviométricos a partir de cubo basculante, sensor de temperatura y humedad, anemómetro, veleta y sensor de radiación solar. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido cableado, calibrado, montado y puesto en funcionamiento	4	\$4 825	\$19 300
28	ud	Estructura metálica perimetral para la estación meteorológica	4	\$1 596	\$6 384
29	ud	Gastos operacionales, incluido transporte y arriendo de camionetas	4	\$21 935	\$87 741
30	ud	Obras civiles e instalación de cerco y estructuras necesarias en la estación	4	\$1 960	\$7 840
31	ud	Sonda de oxígeno disuelto de tipo polarográfica con membrana protectora y compensación automática de altitud y salinidad. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Rango de hasta 50 mg/l. Longitud del cable de 20m	5	\$1 179	\$5 893
35	ud	Sistema de evaporación automática con conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA. Incluido panel solar, controlador del panel solar, batería de 12V a 7.2Ah, solenoide 0-10000kPa a 12V y componentes de la estación de bombeo. Incluido instalación y calibración. Incluida bandeja de evaporación clase A con protección frente a animales	9	\$4 856	\$43 700
36	ud	Sistema de evapotranspiración de clase 3. Incluye sensor de temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar y velocidad y dirección del viento. Incluido panel solar y batería de 12V. Conexión de salida interfaz tipo RS232 o RS485, o señal de salida 4-20mA	6	\$4 270	\$25 620
Sistemas de comunicación					\$51 861
37	ud	Convertidor de conexión tipo RS 232 y RS485 a LoRaWAN o señal de 4-20mA a LoRaWAN y frecuencia variable en las bandas 433, 868 y 915 MHz. Con una cobertura en condiciones extremas de 5km, capacidad de transmisión cada 5 minutos y temperatura de operación de -20 a 85°C. Incluida carcasa IP65, batería de 6400mAh de capacidad. Incluye instalación y pruebas de verificación	89	\$427	\$38 003
38	ud	Instalación y puesta en marcha de un gateway LoRaWAN Single Channel de código abierto con capacidad de conexión IP mediante WiFi, 1 puerto WAN, 1 puerto LAN o celular 3G/4G	11	\$110	\$1 215
39	ud	Instalación y puesta en marcha de un módem y antena satelital con velocidad máxima de 50 MB/s	6	\$351	\$2 108
40	ud	Instalación y puesta en marcha de un router con capacidad de de conexión WiFi IEEE 802,11b/g/n, 4 puertos Ethernet LAN 10/100 Mbit/s y sistema operativo basado en OpenWRT	6	\$26	\$154
41	ud	Instalación y puesta en marcha de una antena unidireccional de 400 mm de diámetro para la transmisión/recepción de señal WiFi en la banda de 5 GHz con 26 dBi de ganancia, 1 puerto LAN Ethernet 10/100 Mbit/s, 4 puertos WAN, protección IP66 y resistencia frente a rachas de viento de hasta 200 Km/h	4	\$102	\$410
42	ud	Caja de protección eléctrica con certificación IP66 y medidas 200x200x130 fabricada en ABS. Incluida instalación	89	\$15	\$1 301
43	ud	Gabinete de protección con certificado IP66 con medidas 400x300x230mm fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Incluida instalación	8	\$109	\$870
44	ud	Gabinete de protección con certificado IP66 con medidas 600x400x230mm fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Incluida instalación	6	\$174	\$1 041
45	ud	Poste de sujeción de 9m de altura, fabricado en chapa de acero galvanizado y 400 daN de esfuerzo nominal, incluyendo obra civil necesaria para su puesta en marcha	14	\$483	\$6 759
Sistemas de alimentación					\$10 546
46	ud	Instalación y puesta en marcha de un respaldo de batería UPS de 750 VA (375W), 97% de eficiencia y con protección frente a sobretensión y cortocircuito	6	\$414	\$2 481

Código	Uds	Descripción	Medición	Precio (USD)	Importe (USD)
47	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 5W de potencia a 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18 V e intensidad máxima 0,3 A	80	\$13	\$1 072
48	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 75W de potencia a 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18,9 V e intensidad máxima 5,56 A	8	\$64	\$515
49	ud	Instalación y puesta en marcha de un panel solar policristalino de 150W de potencia a 12 V de tensión nominal, tensión máxima 18,54 V e intensidad máxima 8,09 A	6	\$87	\$521
50	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 7 Ah de capacidad	80	\$17	\$1 400
51	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 33 Ah de capacidad	8	\$86	\$689
52	ud	Instalación y puesta en marcha de una batería plomo-ácido de 12 V y 100 Ah de capacidad	6	\$132	\$789
53	ud	Instalación y puesta en marcha de un regulador de carga de 12 V y 10 A de intensidad máxima, con indicador LED de nivel de la batería	1	\$22	\$22
54	ud	Instalación y puesta en marcha de un regulador de carga de 12 V y 20 A de intensidad máxima, con indicador LED de nivel de la batería	96	\$32	\$3 057
Plataforma digital					\$95 914
55	Ud	Jefe de Proyecto. Conexión con ente público. Definición de requisitos, reuniones con <i>stakeholders</i> (4 meses)	1	\$24 360	\$24 360
56	Ud	Desarrolladores. Definición algorítmica, implementación plataforma digital: backend, frontend, procesado. Tests unitarios, de integración, e2e. (4 meses)	3	\$11 200	\$33 600
57	Ud	Administrador de Sistemas. Instalación sistema operativo. Definición roles, usuarios, grupos, instalación software necesario en servidor. Definición reglas de seguridad. Creación scripts automatización copias de seguridad y mantenimiento, diseño bases de datos. (4 meses)	1	\$11 200	\$11 200
58	Ud	Equipos para personal participante en el proyecto. Laptops mínimo i5 (10ª gen)/ryzen 4XXX, cuatro núcleos y 8 hilos de procesado. 16GB de RAM, 512 GB SSD. Windows 10/Ubuntu LTS. Pantalla auxiliar 27" QHD, conexión HDMI	5	\$2 450	\$12 250
59	Ud	Licencias. Cualquier licencia que se considere indispensable en la solución propuesta, debidamente justificada	1	\$2 800	\$2 800
60	Ud	Servidor VPS Pruebas. Aunque se puede desarrollar directamente sobre un servidor dedicado en caso de ser esta la opción finalmente escogida, las pruebas pueden realizarse sobre un VPS sin todas las características exigidas para el servidor de producción. (4 meses)	1	\$280	\$280
61	Ud	Servidor Local. Montaje e instalación del servidor local y de todo el software necesario en él. Requisitos mínimos: Intel Xeon/AMD Threadripper, 16GB RAM, 256GB SSD NVMe, a incluir HDD para bases de datos y copias de seguridad de datos antiguos con el esquema escogido: Raid 1/Raid 10	1	\$5 600	\$5 600
62	Ud	Local para ubicación de servidor, así como su equipamiento: detección y extinción de incendios, equipos autónomos de alimentación (SAI) para mantener el equipo en funcionamiento un mínimo de 2 horas en caso de corte del suministro eléctrico, climatización para mantener una temperatura continua por debajo de 21° C durante todo el año	1	\$5 600	\$5 600
63	Ud	Conexión red mínimo 400Mb/s redundante, con dos proveedores independientes, para uso simultáneo (4 meses)	2	\$112	\$224
Total, antes de impuestos					\$613 473
IVA (19%)					\$116 560
Total					\$730 033

Fuente: Elaboración propia a partir de la información previamente especificada.

Mantenimiento y operación de la plataforma digital

Cuadro A4.3
Presupuesto final mantenimiento y operación plataforma digital

Código	Uds	Descripción	Medición	Precio (USD)	Importe (USD)
1	Ud	Desarrolladores. Solución de bugs que puedan surgir durante el uso de la plataforma, añadido de funcionalidades, mejora de rendimiento y/o modificación de algoritmia	1	\$2 800	\$2 800
2	Ud	Dispositivos físicos para copias de seguridad. Discos duros HDD 1TB, 5400rpm/7200rpm necesarios para almacenar y enviar a las autoridades competentes las copias de seguridad pedidas	2	\$56	\$112
3	Ud	Auditorías Externas para comprobación de seguridad del sistema, integridad de base de datos, y cumplimiento de cualquier requisito legal y/o de estándares internaciones exigidos por la autoridad competente	1	\$112	\$112
4	Ud	Servicio de soporte a los usuarios en horario laboral de 8 a 18 de lunes a viernes, de 9 a 14 los sábados, tanto mediante email como de forma telefónica	1	\$1 400	\$1 400
5	Ud	Recambio de laptops. Sustitución de piezas defectuosas o recambio de equipos cada 3 años por nuevos equipos con características equivalente actualizadas al estado de la tecnología en el momento del recambio. Coste prorrateado de forma mensual	1	\$140	\$140
6	Ud	Administrador de Sistemas, solución de incidencias, gestión de bases de datos, optimización del sistema mediante mejoras incrementales, realización de copias de seguridad, etc.	1	\$2 800	\$2 800
7	Ud	Licencias y/o suscripciones a servicios y software privativo. Cualquiera de estas opciones que se escoja frente a opciones Open Source ha de ser debidamente justificada durante la implementación de la plataforma	1	\$700	\$700
8	Ud	Recambio de componentes que se estropeen y/o mejora de los mismos durante la vida útil del servidor para mantener unas prestaciones óptimas durante su funcionamiento	1	\$140	\$140
9	Ud	Contrato de mantenimiento del local donde se ubique el Data Center, para comprobación de equipos de detección y extinción, climatización, SAI, etc.	1	\$70	\$70
10	Ud	Conexión red redundante 2x400Mb/s. Conexión duplicada, con línea principal y secundaria, a dos proveedores independientes de forma que la falla del servicio de uno de los dos no interrumpa el funcionamiento de la plataforma. Han de emplearse ambas, aunque una se califique como principal y otra como secundaria	2	\$28	\$56
Total, antes de impuestos					\$8 330
IVA (19%)					\$1 583
Total					\$9 913

Fuente: Elaboración propia a partir de la información previamente especificada.

En este estudio se evalúa una solución de ingeniería para el diseño, implementación y operación de una red de monitoreo integrada en una cuenca hidrográfica con un salar o laguna salina para la explotación de litio. El objetivo es proporcionar información oportuna y consolidada sobre parámetros de monitoreo relevantes, garantizando transparencia y acceso a los datos a las instituciones pertinentes. Para ello, se abordan los impactos ambientales de la extracción de litio, destacando la importancia del monitoreo en la preservación del ecosistema y los recursos hídricos. De esta forma se presenta un plan de monitoreo basado en la selección de parámetros clave y la implementación de tecnologías de comunicación inalámbricas, y posteriormente se detalla la forma de definir la ubicación adecuada de los sistemas de monitoreo y el desarrollo de una plataforma digital para procesar y visualizar la información. Se incluye un plan de ejecución con etapas de ingeniería específicas, desde el levantamiento de antecedentes hasta la implementación de la red de monitoreo, con estimaciones de costos de inversión inicial (910.000 dólares) y de operación anual para el caso tipo de un salar de 145 km² (581.000 dólares).