

Nota Técnica N°05: Medición de evaporación y monitoreo hidroquímico

Campaña N°4 de monitoreo trimestral (octubre 2024)

17-01-2024

Versión 0

A21_1115_NT05_v0

1 Introducción

Codelco División Salvador (DSAL) adjudicó a Amphos 21, en septiembre de 2022, el servicio denominado “Medida H-04: Investigación sobre Nuevas Fuentes de Agua en Cuencas de Salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas”, el cual se enmarca en los diferentes compromisos establecidos en el Avenimiento con el Consejo de Defensa del Estado (CDE) en el proceso Rol D-7-2020 del Primer Tribunal Ambiental de Antofagasta y que, como objetivo principal, debe generar información básica y pública de carácter hidrogeológico en las cuencas de los salares indicados.

Como parte de las actividades del servicio anteriormente mencionado, se considera una campaña de terreno trimestral para la medición de evapotranspiración y calidad de agua, así como también una campaña semestral para la medición de la meteorología y, por último, una campaña anual para la medición de isotopía, con el objetivo de medir de forma periódica parámetros de interés para el análisis de los sistemas acuíferos de las cuencas de los salares en estudio.

En la presente nota técnica se describen las actividades realizadas durante la cuarta campaña de terreno, que se llevó a cabo durante el mes de octubre de 2024, la cual consiste en el levantamiento de información a través de un monitoreo hidroquímico y medición de evaporación con domos, distribuidos en las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

1.1 Objetivo

El objetivo general del proyecto (Medida H-04) consiste en la realización de un estudio que permita generar información básica para lograr un entendimiento hidrogeológico de los sistemas de las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

El objetivo específico de la presente nota técnica corresponde a la presentación de los resultados de la medición de evaporación con domos y del monitoreo hidroquímico correspondiente a la cuarta de las campañas trimestrales comprometidas (Campaña N°4).

1.2 Ubicación área de estudio

El área de estudio se enmarca en las cuencas de los salares de La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas, ubicados en el extremo noreste de la Alta Cordillera de la Región de Atacama, en el límite con la Región de Antofagasta (oeste), y con la frontera de Argentina (este), a alturas geográficas variables cuyos depocentros se ubican entre los 3.325 y 3.985 m s.n.m., aproximadamente. En la Figura 1-1 se ilustra la ubicación de las cuencas en estudio.

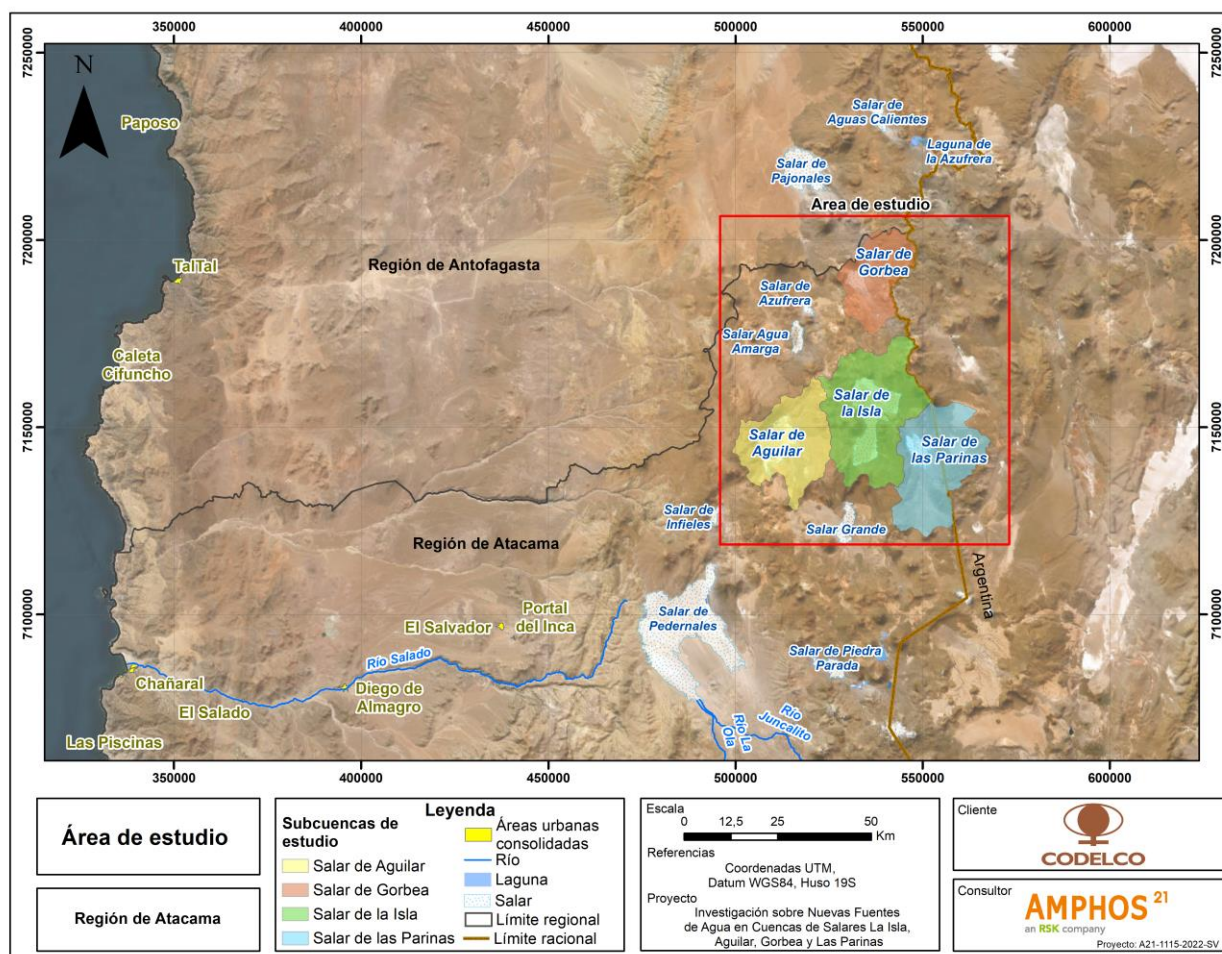


Figura 1-1: Ubicación geográfica salares La Isla, Aguilar, Gorbea y Las Parinas.

2 Metodología

2.1 Medición de evaporación con domos

La metodología utilizada por Amphos 21 para la medición de evaporación con domos consiste en registrar el incremento de vapor de agua en el interior del domo durante el tiempo necesario para lograr su estabilización. Para tener un registro del comportamiento diario de la evaporación en zonas áridas, las mediciones deben realizarse, idealmente, desde la salida del sol hasta poco después del ocaso. Los principales aspectos de la metodología son los siguientes:

- Medir humedad relativa y temperatura, en la medida de lo posible, desde la salida hasta la puesta del sol, de modo de registrar todo el intervalo diario durante el cual la napa evapora.
- Idealmente, realizar mediciones cada 30 minutos, evitando vacíos de registros mayores a 1 hora. La frecuencia de medición 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.
- Para evitar el ingreso de aire hacia el interior del domo, la superficie del terreno debe aplanarse y rellenarse con arena u otro material en el contorno donde se instalará la cúpula. Adicionalmente, puede instalarse una tela impermeable a lo largo del perímetro de la cúpula (faldón).
- Antes de la medición, ventilar el domo al menos por un minuto, levantándolo verticalmente a un metro del suelo. Prender ventiladores a una velocidad análoga a la del viento en el exterior (utilizando anemómetro ubicado a una altura de 1,5 veces el alto de la cúpula de acrílico y reguladores de voltaje), y chequear estabilidad de la temperatura y de la humedad relativa en el sensor. La velocidad de viento mínima en el interior de la cúpula debe ser cercana a 0,8 m/s y tiene como objetivo homogeneizar la mezcla de aire, evitando la generación de estratificaciones con diferente contenido de humedad.
- Una vez que está todo listo para medir, bajar rápidamente el domo y aprisionar sus bordes con la funda o faldón (ésta queda fija en su posición durante todo el día, enterrando algunos de sus bordes, lo cual se hace generalmente después de la primera medición). Es de suma importancia considerar durante las mediciones el aislamiento del volumen de control, evitando que entre aire desde el exterior.

- Comenzar la medición inmediatamente al bajar el domo, así como el encendido del cronómetro. Cada medición debe durar al menos 2 minutos, y el sensor debe ser programado para registrar la humedad relativa y temperatura cada 1 segundo.
- Se registra sistemáticamente cualquier observación pertinente (hora y evento), como cambios del viento, cambios de nubosidad, errores detectados, coordenadas del punto, etc.

2.2 Toma de muestras de agua para análisis hidroquímico

En cuanto a la metodología utilizada por Amphos 21 para tomar muestras de agua, esta se basa principalmente en los procedimientos normativos vigentes, que establecen los requerimientos mínimos que se deben cumplir para la obtención de muestras representativas de agua para realizar análisis en laboratorio y/o para análisis en campo (in situ), lo cual representa un marco de referencia general para este tipo de trabajos.

Para obtener una muestra representativa de agua superficial, se procede con la siguiente metodología de muestreo:

- Se utiliza un jarro de acrílico para sacar un volumen de agua de al menos 1 litro desde el cuerpo de agua que se requiere muestrear.
- Posteriormente, se utiliza un contenedor limpio y lo suficientemente grande, el cual es ambientado por medio de enjuagues, donde se vacía el agua obtenida anteriormente. Una vez lleno el contenedor, se registra en una cadena de custodia los parámetros fisicoquímicos in situ (Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica) y se deja homogenizar la muestra unos 5 minutos para, posteriormente, distribuir en los envases del set de muestreo.

En el caso de una muestra representativa de agua subterránea, se procede con la siguiente metodología de muestreo:

- La muestra se recoge mediante un bailer, el cual previamente debe ser enjuagado con agua desmineralizada. Por medio de una cuerda o piola se descende el bailer hasta alcanzar el nivel de agua que lo cubra completamente. El bailer debe sumergirse por lo menos 2 metros bajo el nivel de agua estático de pozo y posteriormente se extrae de manera manual. Luego, se procede a vaciar la muestra a un contenedor limpio (ambientado por medio de enjuagues), registrando la cadena de custodia de parámetros fisicoquímicos in situ, y se deja homogeneizar la muestra, para luego distribuir en envases de muestreo, como fue indicado anteriormente.

3 Campaña de terreno

Durante la planificación de la campaña de terreno se proponen 26 puntos de monitoreo hidroquímico, de los cuales 5 puntos se localizan en el salar de Gorbea, 7 puntos en el salar de La Isla, 7 puntos en el salar de Las Parinas y 7 puntos en el salar de Aguilar.

Dentro de los 26 puntos propuestos anteriormente, cada sector presenta un punto *back up* (GOR-BackUp, ISL-BackUp, PAR-BackUp y AGI-BackUp), los cuales corresponden a puntos de respaldo, en el caso de que alguno de los puntos restantes presentara dificultad de acceso.

En la Figura 3-1 se ilustra la distribución espacial de los puntos propuestos para realizar el monitoreo hidroquímico en terreno. Es importante considerar que las coordenadas planteadas son aproximadas, dado que las condiciones de los salares pueden variar dependiendo de la estacionalidad del año. Además, se priorizará tomar muestras de agua subterránea, para una mayor representatividad de estas en el sector.

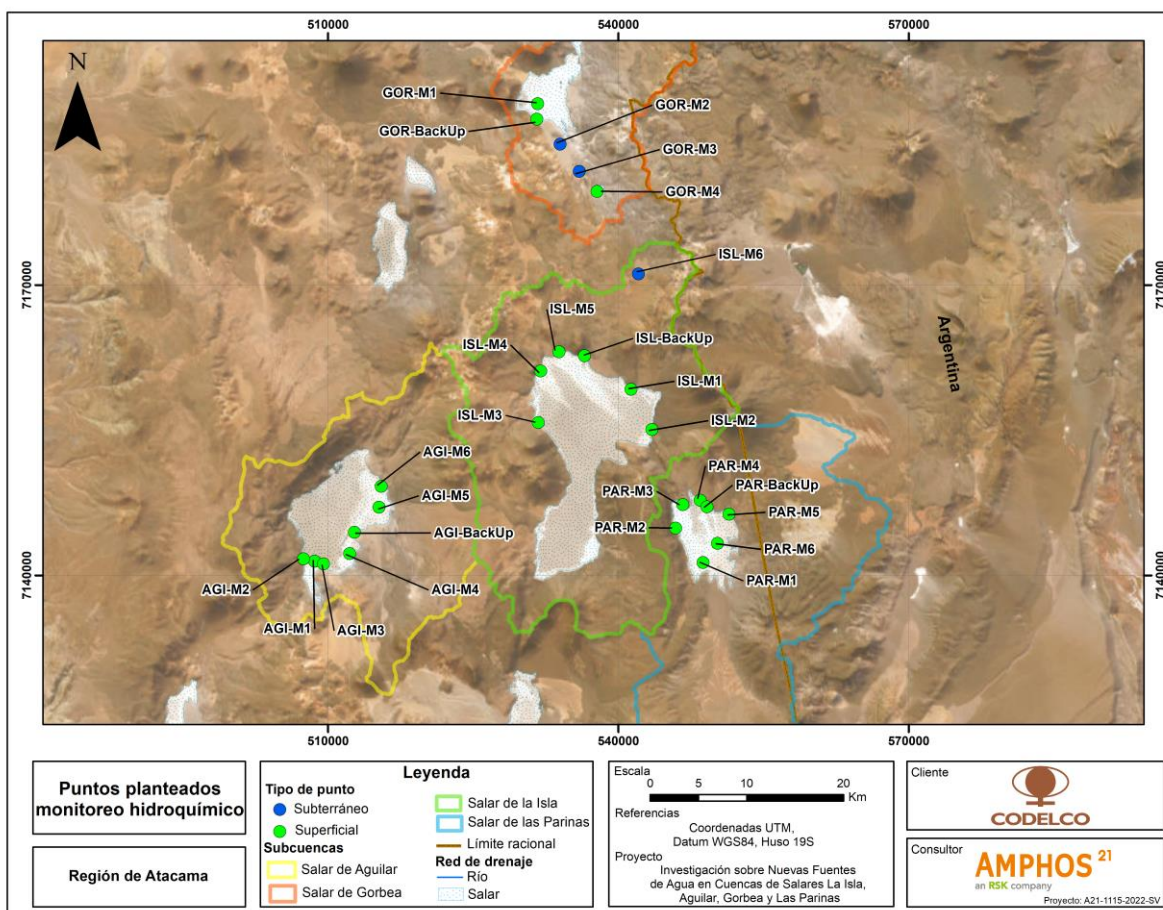


Figura 3-1: Ubicación de puntos planteados para el monitoreo hidroquímico.

La cuarta campaña de terreno se desarrolló entre los días 17 y 25 de octubre de 2024 por personal de Amphos 21, contemplando un turno de 10x10, el cual se encuentra integrado por 4 personas, dos camionetas 4x4 (traslado y apoyo), una casa rodante para pernoctar, equipos de toma de muestras hidroquímicas, y cuatro domos para medir la evaporación. Cabe señalar que la fecha original del inicio de la cuarta campaña era el día 7 de octubre, pero debido a condiciones climáticas adversas, el equipo permaneció en Copiapó sin poder subir a los salares.

En total se realizaron 20 ensayos de evaporación con domos (5 ensayos en cada cuenca) y, además, se llevó a cabo el monitoreo de parámetros fisicoquímicos in situ y análisis hidroquímico en 22 puntos.

Cabe mencionar que el total de muestras hidroquímicas analizadas corresponden a 26, teniendo en cuenta 3 duplicados y un blanco como control de calidad.

3.1 Actividades de terreno

De forma específica y detallada, durante la cuarta campaña de terreno se visitaron 9 puntos en el salar de Gorbea, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo y se tomaron 4 muestras para análisis hidroquímico y una muestra duplicada de parámetros hidroquímicos.

En el salar de Aguilar se visitaron 11 puntos, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo y se tomaron 6 muestras para análisis hidroquímico.

Por su parte, en el salar de La Isla se visitaron 11 puntos, donde se realizaron 5 ensayos de evaporación con domo, se tomaron 6 muestras para análisis hidroquímico, una muestra duplicada de parámetros hidroquímicos y una muestra de blanco.

Finalmente, respecto al salar de Las Parinas, se visitaron 11 puntos, 5 de estos corresponden a ensayos de evaporación con domo, se tomaron 6 muestras de agua para análisis hidroquímico y una muestra duplicada de parámetros hidroquímicos.

La Figura 3-2 ilustra la ubicación espacial de los puntos monitoreados durante la Campaña N°4.

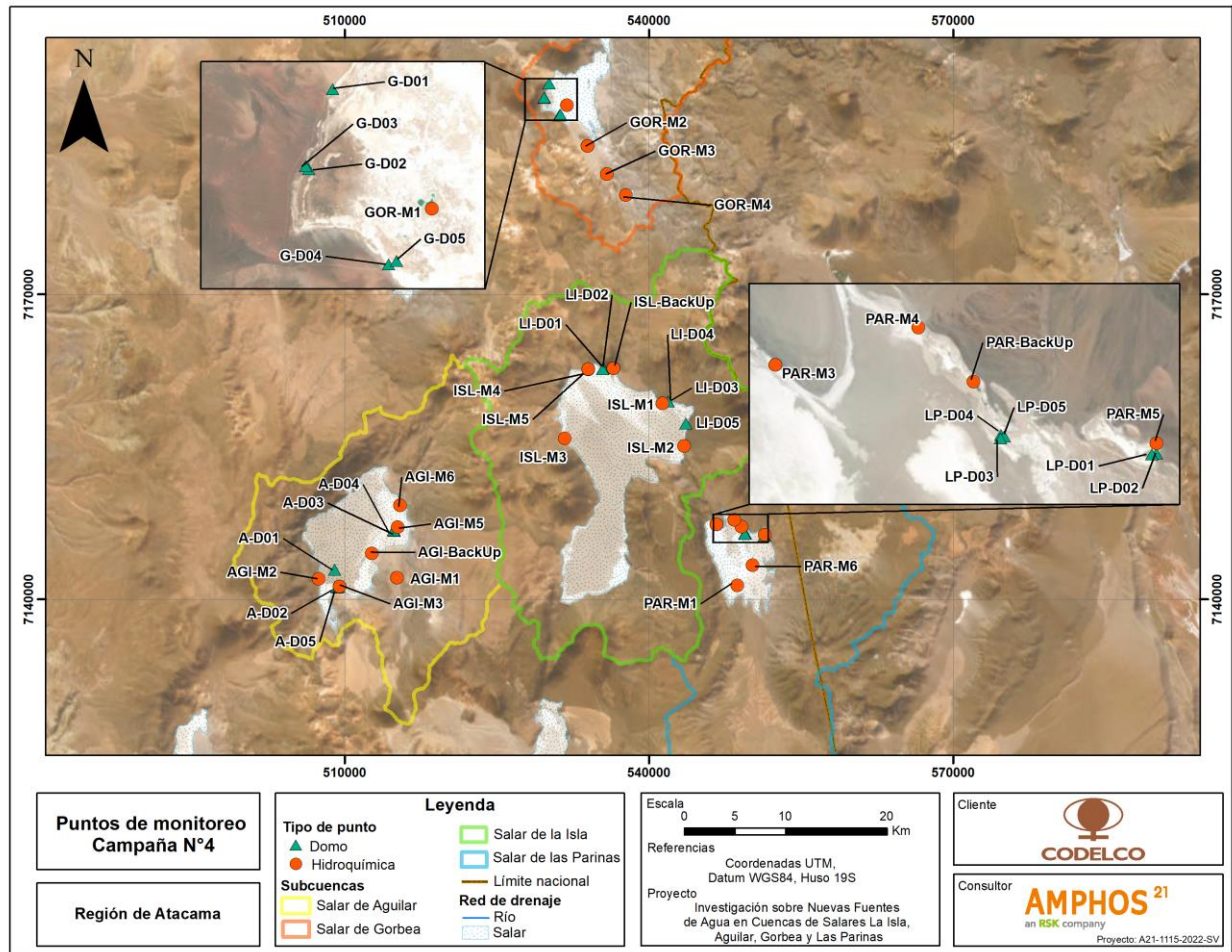


Figura 3-2: Distribución espacial de los puntos monitoreados durante la cuarta campaña de terreno.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, a continuación, se presenta el detalle de las actividades realizadas diariamente:

- **17 de octubre:** se realiza el traslado de equipos de trabajo y personal de Amphos 21 desde Santiago hacia Copiapó, donde se efectúa el retiro de la casa rodante y de las camionetas de trabajo. Luego, durante la tarde, se realiza el traslado hacia el campamento ENAMI Salares Altoandinos.
- **18 de octubre:** se realiza el traslado hacia el salar de Aguilar, donde se visitan 6 puntos en los que se toma una muestra de agua donde se miden los parámetros fisicoquímicos in situ y posteriormente se analizan los parámetros hidroquímicos en laboratorio una vez recopiladas las muestras (AGI-BackUp, AGI-M1, AGI-M2, AGI-M3, AGI-M5 y AGI-M6).

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en terreno, se registran valores de conductividad entre 179.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 230.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con excepción de los puntos AGI-M6 y AGI-M1, con mediciones de 44.540 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 6.249 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Por otra parte, se registran valores de pH en un rango de 5,72 a 8,19. La Figura 3-3 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto AGI-M2.



Figura 3-3: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial AGI-M2 en el salar de Aguilar.

- **19 de octubre:** se visitan 4 puntos de muestreo de agua en el salar de Gorbea para medir parámetros fisicoquímicos in situ y realizar análisis hidroquímico. En cada punto se recolectó una muestra de agua (GOR-M1, GOR-M2, GOR-M3 y GOR-M4) y, adicionalmente, en el punto GOR-M2 se tomó una muestra duplicada (GOR-MD1) destinada al análisis hidroquímico.

Se registra una conductividad de 145.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto GOR-M1 y una conductividad de 22.370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto GOR-M4, mientras que en los puntos GOR-M2 y GOR-M3 se registran conductividades en torno a 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por otra parte, los valores de pH se encuentran en un rango de 3,17 a 4,32, con excepción del punto GOR-M1, con un valor de 1,63. La Figura 3-4 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto GOR-M1.

Se efectúa el traslado desde el salar de Gorbea hacia el salar de La Isla, donde se realiza la medición de parámetros in situ y la toma de muestras de agua para análisis hidroquímico en 6 puntos de monitoreo (ISL-M1, ISL-M2, ISL-M3, ISL-M4, ISL-M5 y

ISL-BackUp). Adicionalmente, se recolecta una muestra duplicada (ISL-MD3) para análisis hidroquímico en el punto ISL-BackUp.

Los valores de conductividad supera los 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los puntos ISL-M1, ISL-M2 y ISL-M3, mientras que en los puntos ISL-M4 y ISL-M5 la conductividad se encuentra en torno a 90.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Finalmente en el punto ISL-BackUp la medición es de 11.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En cuanto al pH, los valores se encuentran en un rango entre 6,68 a 7,74 en todos los puntos de monitoreo.



Figura 3-4: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial GOR-M1 en el salar de Gorbea.

- **20 de octubre:** se efectúa el traslado hacia el salar de Aguilar, donde se realizan los ensayos de evaporación con domos en los puntos A-D01, A-D02, A-D03, A-D04 y A-D05.

En particular, los puntos A-D01, A-D02 y A-D05 se encuentran sobre una costra salina de alta dureza y rugosidad. Se mide el nivel freático desde una laguna cercana a los puntos de ensayo, cuyo valor es de 30 cm en A-D05 y de 40 cm en A-D01 y A-D02. Respecto a la velocidad de viento, se deja constancia que a partir de las 17:00 hrs aumenta significativamente en el punto A-D05, alcanzando ráfagas de viento de 40 km/h. En cuanto a la temperatura, en los tres puntos se registra una máxima de alrededor de 25 °C, sin nubosidad parcial y con radiación directa en los tres domos. La Figura 3-5 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto A-D05.

Adicionalmente, los puntos A-D03 y A-D04, separados aproximadamente 115 metros, presentan las siguientes características: el punto A-D03 se ubica sobre costra salina frágil

con presencia de yesos y halita, mientras que el punto A-D04 se posiciona sobre un terreno compuesto en gran parte de costra salina blanda con sedimentos y yeso. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 10 cm, medido desde una laguna cercana. A las 17:20 hrs la velocidad del viento comienza a aumentar, alcanzando una máxima de 35,6 km/h en el punto A-D04, mientras que en el punto A-D03 se alcanza una máxima de velocidad de 37,6 km/h a las 15:30 hrs. En cuanto a la temperatura, esta alcanza un valor máximo de 25 °C en ambos puntos.



Figura 3-5: Ensayo de evaporación en domo del punto A-D05 ubicado en el salar de Aguilar.

- **21 de octubre:** se inicia el traslado hacia el salar de La Isla, donde se realizan 5 ensayos de evaporación con domos en los puntos LI-D01, LI-D02, LI-D03, LI-D04 y LI-D05.

Los puntos LI-D01 y LI-D02 se posicionan a una distancia de 80 m y se caracterizan por presentar una costra blanda, compuesta por una mezcla halita, yeso y arena. En ambos puntos se registra el nivel freático desde el canal del salar, encontrándose a una profundidad en torno a 23 cm. Se registra una velocidad de viento máxima a las 16:20 hrs de 38,7 km/h en el punto LI-D02 y de 34,5 km/h en el punto LI-D01 a las 14:20 hrs. En cuanto a la temperatura máxima alcanzada, en el punto LI-D02 se registra 22,3 °C y en el punto LI-D01 un valor de 23,4 °C, además, en ambos puntos no hay nubosidad, por lo tanto, el domo percibe radiación directa durante todo el ensayo.

Los ensayos LI-D03 y LI-D04 se distancian 15 m entre sí. El punto LI-D03 se posiciona sobre un terreno de evaporita delgada con una continua capa de arena fina. Por su parte, el punto LI-D04 se posiciona sobre evaporita mezclada con sedimentos. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 2 cm desde una calicata. Respecto a los datos obtenidos durante el ensayo en ambos domos, se identifica que la temperatura máxima se alcanza alrededor de las 12:30 hrs. con un valor de 24,5 °C, mientras que la velocidad del viento alcanza máximos de 40,3 km/h en LI-D03 y de 37,7 km/h en LI-D04. Además, el domo recibe radiación directa durante todo el ensayo.

Finalmente, el domo del punto LI-D05 se instala sobre suelo cubierto principalmente por evaporita. Además, se realiza una calicata a los 24 m del punto de ensayo, registrando el nivel freático a los 5 cm. En cuanto a las mediciones en el domo, se registra la velocidad del viento con un valor máximo de 35,5 km/h a las 15:15 hrs, además de temperaturas máximas de 26,2 °C y radiación directa durante todo el ensayo. La Figura 3-6 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LI-D05.



Figura 3-6: Ensayo de evaporación en domo del punto LI-D05 ubicado en el salar de La Isla.

- **22 de octubre:** se inicia el traslado hacia el salar Las Parinas, donde se toman 6 muestras de agua para análisis hidroquímico (PAR-M1, PAR-M3, PAR-M4, PAR-M5, PAR-M6 y PAR-BackUp) y una muestra duplicada (PAR-MD2) del punto PAR-M6. Cabe mencionar que se midieron los parámetros fisicoquímicos in situ en todos los puntos visitados, registrando valores de conductividad entre 165.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 233.800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, exceptuando las muestras de los puntos PAR-M4 y PAR-M6, que presentan conductividades de 51.660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 17.230 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. En cuanto al pH, las muestras del salar Las Parinas presentan valores entre 7,43 a 8,82. La Figura 3-7 muestra el monitoreo hidroquímico realizado en el punto PAR-M3.



Figura 3-7: Monitoreo hidroquímico en punto de agua superficial PAR-M3 en el salar de Las Parinas.

- **23 de octubre:** Se realizan 5 ensayos de evaporación con domos en el salar de Las Parinas (LP-D01, LP-D02, LP-D03, LP-D04 y LP-D05).

En particular, los puntos LP-D01 y LP-D02 se distancian 55 m aproximadamente entre sí, y se ubican sobre un terreno cubierto por costra salina delgada seguida de material sedimentario y con humedad en la superficie. En ambos puntos se registra el nivel freático a los 2 cm, la cual se mide desde una calicata. La velocidad del viento alcanza un valor máximo de 55,6 km/h por la tarde, y en ambos puntos se registran temperaturas máximas de 12,3 °C alrededor de las 15:30 hrs. Los domos reciben radiación directa durante todo el ensayo.

Adicionalmente, los puntos LP-D03 y LP-D04 se posicionan sobre costra salina compuesta por una mezcla de yeso y halita, mientras que el punto LP-D05 se posiciona sobre un terreno compuesto por sedimentos, arenas, gravas, cenizas y material no consolidado. En dichos puntos se realiza una calicata cercana al punto de ensayo, registrando el nivel freático a los 3 cm. En cuanto a los resultados obtenidos del ensayo, se registra una velocidad de viento máxima de 56,5 km/h. Además, se observa una temperatura entre 6,7 °C y 12,7 °C, con nula nubosidad durante todo el ensayo. La Figura 3-8 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto LP-D03.



Figura 3-8: Ensayo de evaporación en domo del punto LP-D03 ubicado en el salar de Las Parinas.

- **24 de octubre:** se inician las actividades en el salar de Gorbea, con ensayos de evaporación en los puntos G-D01, G-D02, G-D03, G-D04 y G-D05.

Los puntos G-D05 y G-D04, ubicados a 170 m de distancia entre ellos, se posicionan sobre evaporita delgada mezclada con yeso, sedimento, ceniza volcánica y arena. El nivel freático del punto G-D04 se encuentra a los 37 cm (medido desde una laguna artificial a 15 m del domo), mientras que el punto G-D05 presenta el nivel freático a los 22 cm (medido desde una calicata ubicada a 7 m del domo). En cuanto a la temperatura, ambos puntos registran un valor máximo de 23,5 °C a las 14:00 hrs. y una velocidad del viento máxima de 29,6 km/h a las 15:00 hrs. Los domos reciben durante todo el ensayo una radiación directa, debido a la escasez de nubosidad.

Por su parte, el punto G-D01, se posiciona sobre una delgada capa de evaporita con yeso que sobreyacen a arcillas con arena y registra un nivel freático a los 30 cm. Durante el

ensayo, el domo recibe radiación directa constante, además, alcanza una velocidad máxima de 25,6 km/h y una temperatura entre 12,3 °C y 25,7 °C. La Figura 3-9 muestra el ensayo de evaporación realizado en el punto G-D01.

Por su parte, los puntos G-D02 y G-D03 se posicionan sobre una costra salina mezclada con sedimento y arena. En ambos puntos el nivel freático es registrado a los 30 cm (medido desde una calicata). Se registra una temperatura máxima de 25,7 °C y un 0% de nubosidad. Además, en los puntos G-D02 y G-D03 se alcanza una velocidad máxima de viento de 26,5 y 26,3 km/h respectivamente.



Figura 3-9: Ensayo de evaporación en domo del punto G-D01 ubicado en el salar de Gorbea.

- **25 de octubre:** se realiza el traslado de equipos y personal de Amphos 21 desde el salar de Aguilar hacia Copiapó. Posteriormente, se realiza el envío de equipos y muestras de monitoreo hidroquímico hacia Santiago. Luego, personal de Amphos 21 se traslada a su lugar de residencia, dando por finalizada la cuarta campaña de monitoreo hidroquímico y medición de evaporación.

A modo de resumen, en la Tabla 3-1 se presentan las principales características y fechas de medición de los puntos monitoreados durante la Campaña N°4. Además, en el Anexo A se presentan las fichas técnicas de los puntos donde se realizó medición de evaporación, y en el Anexo B se presentan las fichas técnicas correspondientes a los puntos de monitoreo hidroquímico.

Tabla 3-1: Características de puntos monitoreados durante el cuarto turno.

Punto	Sector	Medición	Tipo de punto	Este WGS84 (*)	Norte WGS84 (*)	Fecha medición
AGI-M3	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	509.519	7.141.191	18-10-2024
AGI-BackUp	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	512.725	7.144.452	18-10-2024
AGI-M1	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Subterráneo	515.182	7.142.080	18-10-2024
AGI-M2	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	507.473	7.141.943	18-10-2024
AGI-M5	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	515.269	7.147.056	18-10-2024
AGI-M6	Salar de Aguilar	Hidroquímica	Superficial	515.495	7.149.195	18-10-2024
GOR-M1	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Superficial	531.954	7.188.574	19-10-2024
GOR-M2	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	533.967	7.184.571	19-10-2024
GOR-M3	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	535.877	7.181.803	19-10-2024
GOR-M4	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Superficial	537.748	7.179.727	19-10-2024
GOR-MD1	Salar de Gorbea	Hidroquímica	Subterráneo	533.967	7.184.571	19-10-2024
ISL-M3	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	531.718	7.155.794	19-10-2024
ISL-M4	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	534.025	7.162.590	19-10-2024
ISL-M5	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	534.031	7.162.595	19-10-2024
ISL-BackUp	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	536.500	7.162.673	19-10-2024
ISL-M1	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	541.334	7.159.226	19-10-2024
ISL-M2	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	543.490	7.155.054	19-10-2024
ISL-MD3	Salar de la Isla	Hidroquímica	Superficial	536.500	7.162.673	19-10-2024
ISL-MB4	Salar de la Isla	Hidroquímica	-	-	-	19-10-2024
A-D02	Salar de Aguilar	Domo	-	509.249	7.141.110	20-10-2024
A-D05	Salar de Aguilar	Domo	-	509.483	7.141.162	20-10-2024
A-D04	Salar de Aguilar	Domo	-	514.929	7.146.680	20-10-2024
A-D03	Salar de Aguilar	Domo	-	514.834	7.146.743	20-10-2024
A-D01	Salar de Aguilar	Domo	-	509.016	7.142.868	20-10-2024
LI-D03	Salar de la Isla	Domo	-	541.927	7.159.417	21-10-2024
LI-D04	Salar de la Isla	Domo	-	541.922	7.159.432	21-10-2024
LI-D01	Salar de la Isla	Domo	-	535.523	7.162.704	21-10-2024
LI-D02	Salar de la Isla	Domo	-	535.477	7.162.629	21-10-2024
LI-D05	Salar de la Isla	Domo	-	543.661	7.157.234	21-10-2024
PAR-BackUp	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	549.142	7.147.094	22-10-2024
PAR-M1	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	548.746	7.141.327	22-10-2024
PAR-M3	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	546.658	7.147.305	22-10-2024

Punto	Sector	Medición	Tipo de punto	Este WGS84 (*)	Norte WGS84 (*)	Fecha medición
PAR-M4	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	548.449	7.147.771	22-10-2024
PAR-M5	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	551.431	7.146.323	22-10-2024
PAR-M6	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	550.248	7.143.300	22-10-2024
PAR-MD2	Salar de las Parinas	Hidroquímica	Superficial	550.248	7.143.300	22-10-2024
LP-D02	Salar de las Parinas	Domo	-	551.430	7.146.196	23-10-2024
LP-D01	Salar de las Parinas	Domo	-	551.376	7.146.185	23-10-2024
LP-D04	Salar de las Parinas	Domo	-	549.481	7.146.430	23-10-2024
LP-D05	Salar de las Parinas	Domo	-	549.524	7.146.409	23-10-2024
LP-D03	Salar de las Parinas	Domo	-	549.478	7.146.385	23-10-2024
G-D02	Salar de Gorbea	Domo	-	529.730	7.189.292	24-10-2024
G-D03	Salar de Gorbea	Domo	-	529.675	7.189.345	24-10-2024
G-D04	Salar de Gorbea	Domo	-	531.173	7.187.576	24-10-2024
G-D05	Salar de Gorbea	Domo	-	531.315	7.187.639	24-10-2024
G-D01	Salar de Gorbea	Domo	-	530.166	7.190.732	24-10-2024

(*) Coordenadas tomadas en terreno con GPS Garmin.

4 Resultados de análisis hidroquímico

Durante la cuarta campaña de terreno se tomaron un total de 26 muestras de agua en 22 puntos de monitoreo. Posteriormente, las muestras de agua fueron enviadas al laboratorio certificado SGS S.A. para el análisis hidroquímico de los macroelementos disueltos necesarios para calcular el error del balance iónico (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^-), y el total de sólidos disueltos. Además, se analizaron elementos como Litio (Li^+) y Boro (B), dado que son representativos de la zona de estudio, y que habitualmente se presentan en altas concentraciones en ambientes de salares, influyendo en los resultados del balance iónico.

Cabe señalar que, para el análisis hidroquímico, se consideraron dentro de las 26 muestras mencionadas, 3 duplicados, uno en el salar de Gorbea (GOR-MD1), uno en el salar de Las Parinas (PAR-MD2) y uno en el salar de La Isla (ISL-MD3), junto con una muestra blanco de este último salar (ISL-MB4).

La Tabla 4-1 muestra los resultados de los cationes y aniones disueltos, además de los parámetros fisicoquímicos obtenidos en laboratorio correspondientes a las muestras de agua subterráneas y superficiales tomadas durante la cuarta campaña de terreno.

Tabla 4-1: Resultados del monitoreo hidroquímico correspondiente a la cuarta campaña de terreno.

Punto	Alcalinidad (mg/l)	B (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	CE (uS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	pH (upH)	SDT (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
AGI-BACKUP	626,1	378,82	22.728,50	97.885,91	<0,2	206.446	763,3	1.675,65	131,18	3.004,38	30.900,21	574,80	7,20	163.040	1.014,58
AGI-M1	113,2	7,33	302,06	455,04	<0,2	3.120	138,0	17,28	0,45	68,04	234,46	16,21	7,60	2.600	955,75
AGI-M2	572,1	716,96	61.253,49	220.578,24	<0,2	208.354	697,4	2.928,36	362,90	8.224,25	64.012,23	766,7	5,80	340.940	312,00
AGI-M3	714,6	646,19	59.087,13	222.243,76	<0,2	208.472	871,1	3.133,71	364,26	7.730,32	58.980,92	1.088,21	5,90	353.260	241,14
AGI-M5	360,7	275,44	22.483,36	102.340,65	<0,2	206.675	439,7	1.297,86	131,27	2.950,05	25.421,75	672,16	6,90	175.640	886,68
AGI-M6	82,0	50,76	3.880,41	18.898,10	<0,2	42.290	99,9	254,23	16,70	540,78	4.769,06	60,61	7,70	35.140	1.402,39
GOR-M1	<0,2	1.105,46	378,44	108.778,25	<0,2	150.329	<0,2	4.139,51	244,76	21.960,76	36.083,87	114,62	1,90	236.940	58.230,51
GOR-M2	<0,2	0,92	378,91	74,95	<0,2	2.751	<0,2	15,31	<0,01	32,31	86,99	<0,01	4,30	2.132	1.354,30
GOR-M3	<0,2	2,85	426,87	111,95	<0,2	3.019	<0,2	34,11	<0,01	81,29	174,98	<0,01	4,40	2.512	1.685,51
GOR-M4	<0,2	32,85	380,79	2.041,62	<0,2	21.980	<0,2	844,33	2,36	1.262,02	3.219,00	3,23	3,40	13.770	17.105,32
GOR-MD1	<0,2	1,50	387,75	62,15	<0,2	2.393	<0,2	16,35	<0,01	34,82	84,86	<0,01	4,30	1.848	1.345,77
ISL-BACKUP	27,0	5,70	117,63	3.166,79	<0,2	9.061	32,9	141,65	15,03	81,70	1.971,86	12,36	7,70	6.320	717,08
ISL-M1	133,4	173,32	748,15	119.739,90	<0,2	209.000	162,6	4.698,27	527,45	3.047,23	63.998,37	184,34	7,30	198.360	8.363,45
ISL-M2	123,3	203,45	371,46	132.004,39	<0,2	219.100	150,3	5.763,76	632,79	3.808,92	67.449,14	257,57	7,10	199.200	9.339,65
ISL-M3	165,2	291,96	489,30	191.690,74	<0,2	239.600	201,4	8.359,23	930,71	5.466,83	101.923,35	268,15	6,80	201.000	13.239,46
ISL-M4	169,5	79,62	1.536,44	38.053,13	<0,2	95.310	206,6	1.665,34	185,63	998,78	21.374,27	97,37	8,00	72.920	6.273,25
ISL-M5	167,8	71,47	1.482,26	37.887,88	<0,2	93.970	204,6	1.638,87	203,86	986,56	20.957,73	12,76	8,00	71.400	7.059,21
ISL-MB4	4,9	0,09	0,07	<0,01	<0,2	1.421	5,9	1,42	0,25	0,45	12,55	<0,01	5,80	860	<0,01
ISL-MD3	26,3	5,72	118,22	3.164,00	<0,2	10.760	32,1	138,50	14,79	81,27	1.957,28	12,72	7,60	8.260	714,50
PAR-BACKUP	956,0	456,26	521,80	199.211,60	<0,2	238.870	1.165,4	5.228,26	65,30	2.930,69	114.519,54	106,27	7,50	319.800	18.634,95
PAR-M1	734,4	215,96	349,66	86.337,88	<0,2	164.679	895,3	2.298,95	97,41	1.050,50	44.924,38	123,07	8,20	135.760	6.168,07

Punto	Alcalinidad (mg/l)	B (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	CE (uS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Li ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	pH (upH)	SDT (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
PAR-M3	468,7	309,88	897,47	135.406,11	<0,2	214.348	571,4	3.941,99	272,17	2.670,64	77.589,23	121,93	7,50	226.040	10.696,68
PAR-M4	115,1	37,63	97,39	19.270,61	<0,2	51.830	101,5	499,12	9,74	271,63	9.993,09	<0,01	8,40	21.460	1.583,68
PAR-M5	628,1	274,08	1.027,93	138.064,26	<0,2	219.779	765,6	2.398,84	37,21	1.741,75	77.251,55	127,11	7,80	219.040	9.053,64
PAR-M6	175,0	19,20	89,48	5.523,29	20,3	16.772	172,1	129,82	7,65	77,62	3.025,86	16,47	8,50	9.740	550,10
PAR-MD2	179,2	14,24	82,77	5.521,65	22,6	16.659	172,5	122,26	8,55	74,78	2.957,06	16,23	8,60	11.760	553,13

Nota: en rojo se indican aquellos parámetros que se detectaron como fuera de tendencia respecto a los resultados obtenidos en las campañas previas.

4.1 Control de calidad

Para verificar los resultados obtenidos de laboratorio de los elementos químicos disueltos se comprueba el principio de la electroneutralidad, es decir, que la suma de los aniones disueltos debe ser igual a los cationes disueltos.

Considerando lo anterior, se estima la diferencia porcentual entre la suma de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Li^+ y B) y de aniones (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) (Tabla 4-2). Al respecto, ninguno de los puntos analizados en el laboratorio supera una diferencia porcentual del 20%, por lo que los análisis químicos realizados por el laboratorio se consideran fidedignos. Cabe mencionar que en el caso de los salares estudiados, se podría admitir un error de balance de hasta 15-20%, debido a que podrían existir parámetros fuera de la batería de análisis que incidan en dicho error.

Tabla 4-2: Error porcentual calculado por Amphos 21.

Nombre punto	Diferencia (%)
AGI-BACKUP	1,77
AGI-M1	0,50
AGI-M2	4,60
AGI-M3	1,33
AGI-M5	5,76
AGI-M6	9,18
GOR-M1	5,42
GOR-M2	8,18
GOR-M3	2,41
GOR-M4	17,02
GOR-MD1	6,18
ISL-BACKUP	0,60
ISL-M1	3,48
ISL-M2	4,83
ISL-M3	3,19
ISL-M4	1,08
ISL-M5	2,59
ISL-MB4	0,62
ISL-MD3	0,30

Nombre punto	Diferencia (%)
PAR-BACKUP	4,26
PAR-M1	7,89
PAR-M3	2,26
PAR-M4	8,48
PAR-M5	4,98
PAR-M6	4,79
PAR-MD2	1,35

5 Resultados ensayos de evaporación

En este capítulo se presentan las series diarias de evaporación obtenidas mediante el método del domo aplicado en el salar.

En la Figura 5-1 se muestran los resultados de evaporación correspondientes a los ensayos realizados en el salar de Aguilar. Los resultados de la última campaña muestran una disminución significativa en las tasas de evaporación en comparación con la campaña anterior realizada en mayo de 2024. En esta ocasión, tres de los cinco ensayos registraron valores instantáneos que oscilan entre 0,020 y 0,025 mm/hora. En contraste, durante la campaña precedente, las evaporaciones máximas alcanzaron un rango de entre 0,050 y 0,085 mm/hora. Esta variación puede atribuirse a una variación estacional de los parámetros, donde la temperatura influye considerablemente.

Cabe destacar el comportamiento particular del ensayo A-D05, que presentó tasas de evaporación significativamente superiores. En este caso, la evaporación instantánea superó los 0,1 mm/hora durante las horas de mayor temperatura y, así mismo, se mantuvo por encima de los 0,05 mm/hora en el período de mayor actividad evaporativa. Este comportamiento se asocia a la proximidad del ensayo a cuerpos de agua. Durante la jornada del ensayo, se verificó que el nivel freático se encontraba a 30 cm de profundidad, a una distancia de 15 metros del punto de medición. La influencia de este nivel freático elevado contribuye a mantener un gradiente de humedad en el suelo que favorece la evaporación.

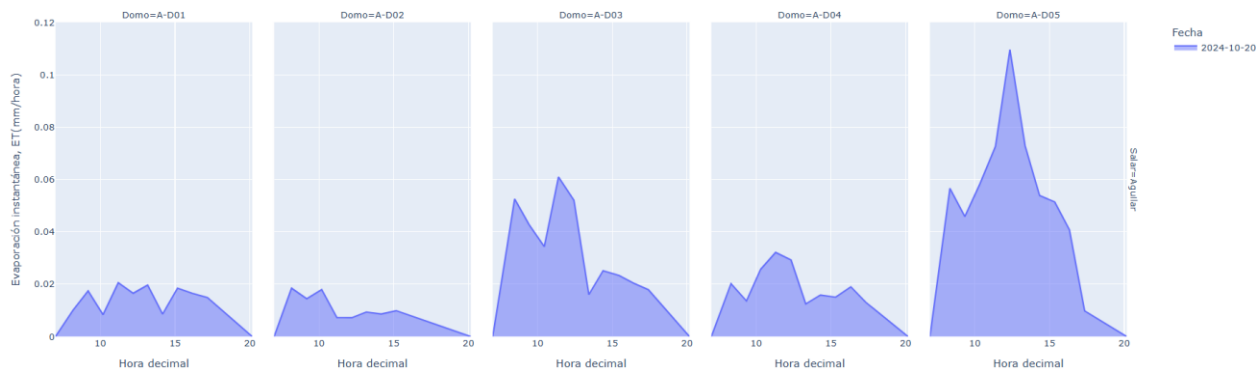


Figura 5-1: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Aguilar.

Los resultados obtenidos en esta campaña en el salar de Aguilar son comparables a los registrados en la primera campaña, realizada en diciembre de 2023. Tanto la distribución diaria de la evaporación como los valores máximos instantáneos y los totales acumulados presentan una notable similitud, lo que sugiere una estabilidad en las condiciones de evaporación bajo parámetros climáticos similares.

En la Figura 5-2 se presentan los resultados obtenidos en el salar de Gorbea, los cuales muestran una leve disminución en las tasas de evaporación en comparación con la última campaña. Aunque los máximos evaporativos se mantienen en un rango similar, entre 0,020 y 0,030 mm/hora, estos *peaks* se concentran en un intervalo más restringido, alrededor del mediodía. En contraste, durante la tercera campaña, los máximos evaporativos se extendieron en un rango horario más amplio, aproximadamente entre las 10:00 y las 16:00 horas, lo que resultó en una mayor evaporación total diaria. Este cambio en los patrones es congruente con la distribución horaria de la temperatura.

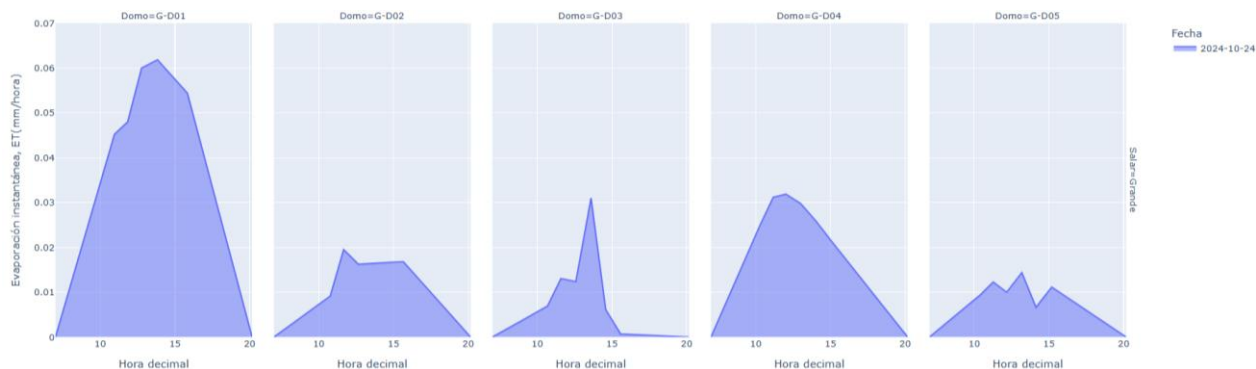


Figura 5-2: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar de Gorbea.

Por otra parte, los resultados son comparables a los registrados en la primera campaña, con la excepción del ensayo G-D01. Este ensayo presentó valores de evaporación instantánea significativamente superiores, alcanzando un máximo que sobrepasó los 0,06 mm/hora. Esta diferencia puede explicarse por las características del suelo en el sitio del ensayo, el cual presentaba una capa delgada de evaporita con yeso de aproximadamente 2 mm de espesor, sobre a una capa de arcillas mezcladas con arenas. Este tipo de suelo, caracterizado por su estructura porosa, favorece el ascenso capilar del agua desde capas más profundas hacia la superficie. Este proceso aumenta la disponibilidad de humedad superficial, lo que a su vez incrementa las tasas de evaporación.

En la Figura 5-3 se presentan los resultados de los ensayos realizados en el Salar La Isla, destacando una notable similitud con los obtenidos durante la primera campaña realizada en diciembre de 2023. Al igual que en esa oportunidad, tres de los ensayos (LI D01, LI D02 y LI D03) registraron máximos evaporativos en un rango de entre 0,02 y 0,05 mm/hora, manteniendo además distribuciones horarias equivalentes.

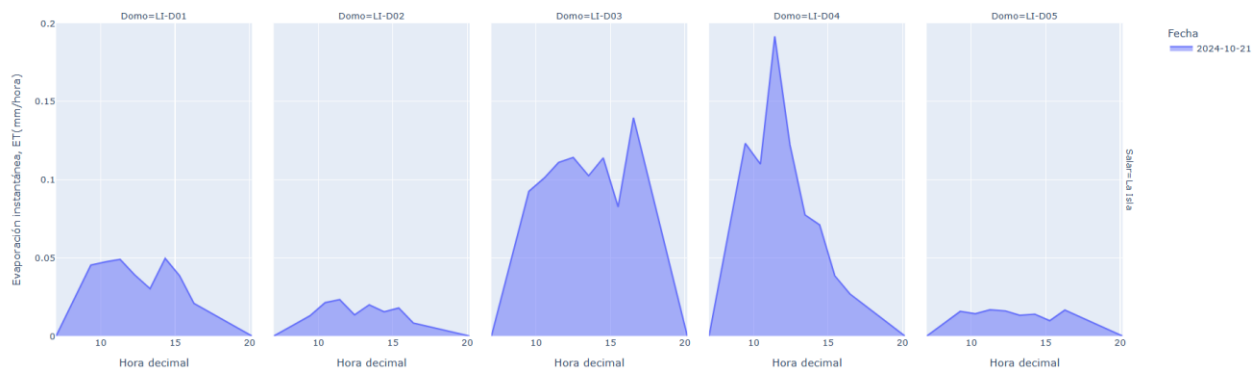


Figura 5-3: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar La Isla.

Por otro lado, los ensayos LI D03 y LI D04 presentan características diferenciadas, con máximos evaporativos significativamente superiores, oscilando entre 0,1 mm/hora y casi 0,2 mm/hora. Esta diferencia se atribuye a las condiciones particulares de los sectores donde se realizaron los ensayos, donde el nivel freático se encontraba somero, a 2 cm de profundidad. Este nivel freático superficial favorece un mayor flujo de humedad hacia la superficie del suelo.

Por último, en la Figura 5-4 se presentan los resultados de los ensayos realizados en el salar Las Parinas, donde se observa una leve disminución en las tasas de evaporación en comparación con la campaña anterior. Sin embargo, al igual que en los otros salares estudiados, los resultados muestran una notable similitud con los obtenidos en la primera campaña (diciembre 2023), lo que otorga congruencia y solidez a los datos recopilados.

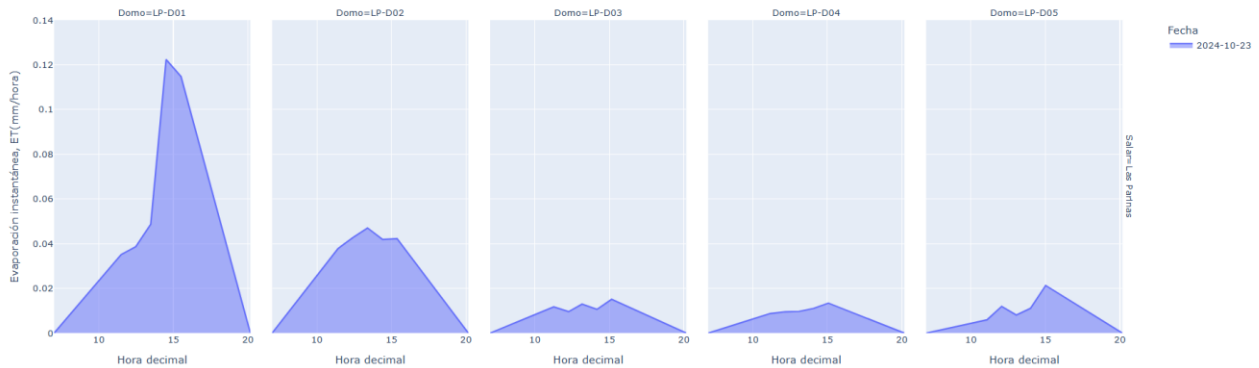


Figura 5-4: Series diarias de ensayos de evaporación de domos en el salar Las Parinas.

Un patrón destacado en este salar es la mayor evaporación registrada en los ensayos LP D01 y LP D02 a lo largo de todas las campañas. Al analizar las fichas de terreno, se constató que en ambos casos el nivel freático se encontraba a una profundidad 2 cm en suelos altamente evaporativos, una característica que no se repite en el resto de los ensayos realizados.

En conclusión, los resultados obtenidos durante esta campaña se encuentran dentro del rango esperado y muestran una congruencia con los datos registrados en campañas previas. La estrecha similitud con los valores de la primera campaña, realizada en diciembre de 2023, respalda la validez de las mediciones y la consistencia en las metodologías utilizadas.

**Anexo A. Fichas técnicas de medición de evaporación en domos
(Campaña N°3)**

**Anexo B. Fichas técnicas de monitoreo hidroquímico (Campaña
N°3)**

Anexo C. Informes de resultados de análisis de laboratorio