

CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE

VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS

**CS-064 SERVICIO DE MONITOREO HÍDRICO Y
METEOROLÓGICO, PERIODO 2021-2022
PROYECTO RAJO INCA**

4600019896-06310-INFSU-00053

**ANÁLISIS HIDROQUÍMICO
HIDROQUÍMICA (SEMESTRAL)
SALAR DE PEDERNALES
DICIEMBRE 2022**

0	13-06-23	REVISION CODELCO	 PE	Hely Torrealba HT	 CBG	ROL
B	03-05-23	REVISION CODELCO	 PE	Hely Torrealba HT	 CBG	ROL
REV N°	FECHA	EMITIDO PARA	POR	REVISADO POR	APROBADO POR	APROBADO POR
			AGQ CHILES.A.			CODELCO
						Pág. 1 de 76
		4600019896-06310-INFSU-00053				Rev.0

Este Documento es propiedad de CODELCO CHILE.

Se prohíbe su reproducción, y exhibición, sin el consentimiento de CODELCO CHILE.

Copyrights © 2019 CODELCO-CHILE. Todos los Derechos Reservados

Monitoreo hídrico y meteorológico 2021-2022

Hidroquímica
Salar de Pedernales

Segundo Semestre 2022



Junio 2023

1001_AGQ_HQ_SegundoSemestre2022_SPED_v0

Índice

Resumen Ejecutivo	9
1 Introducción.....	10
2 Objetivos	10
2.1 Antecedentes.....	11
2.2 Compromisos ambientales	11
3 Materiales y métodos	19
3.1 Descripción del área de estudio	19
3.2 Puntos y programa de monitoreo	20
3.3 Metodologías	22
3.3.1 Mediciones parámetros fisicoquímicos in situ	22
3.3.2 Toma de muestra.....	22
3.3.3 Análisis hidroquímico.....	23
3.3.4 Control de calidad.....	23
4 Resultados	24
4.1 Toma de muestras.....	24
4.2 Parámetros fisicoquímicos in situ	25
4.3 Parámetros fisicoquímicos laboratorio.....	32
4.4 Cationes – aniones disueltos.....	39
5 Discusión de resultados	65
5.1 Control de calidad.....	65
5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos.....	68
5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ	68

5.2.2	Parámetros fisicoquímicos laboratorio.....	68
5.2.3	Cationes y aniones disueltos	68
5.3	Diagrama Piper.....	69
5.4	Diagrama Stiff modificado	71
6	Conclusiones.....	73
7	Referencias	74
Anexo A.	Compromisos Ambientales	76
Anexo B.	Certificaciones ETFA.....	76
Anexo C.	Química, formato SMA	76
Anexo D.	Certificados Mediciones	76
Anexo E.	Esquemas de habilitación de pozos	76

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Transcripción del considerando 13.1 de la RCA. “Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la Cuenca de Pedernales”.....	12
Tabla 3-1: Puntos de seguimiento correspondientes a 5 pozos/piezómetros y 6 punteras.	20
Tabla 3-2: Parámetros de laboratorio analizados.	23
Tabla 4-1: Puntos monitoreados, fecha de toma de muestra, método de muestreo y profundidad del nivel.	24
Tabla 4-2: Mediciones fisicoquímicas in situ en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.	25
Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.....	27
Tabla 4-4: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.	32
Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.	34
Tabla 4-6: Mediciones de cationes y aniones disueltos en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.	39
Tabla 4-7: Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.....	48
Tabla 5-1: Error porcentual calculado por el laboratorio.	65
Tabla 5-2: Verificación datos in situ v/s laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.....	66

Índice de Figuras

Figura 3-1: Mapa ubicación de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: Programa de Monitoreo cuenca de Salar de Pedernales, Amphos 21.....	19
Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales.	21
Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	25
Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	26
Figura 4-3: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	26
Figura 4-4: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	27
Figura 4-5. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	28
Figura 4-6. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).....	29
Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	30
Figura 4-8: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).....	31
Figura 4-9: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	32
Figura 4-10: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	33
Figura 4-11: Evolución temporal de pH (unidades de pH).....	33
Figura 4-12: Evolución temporal de pH (unidades de pH).....	34
Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	35
Figura 4-14: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	36
Figura 4-15: Evolución temporal de pH (unidades de pH).....	37
Figura 4-16: Evolución temporal de pH (unidades de pH).....	38
Figura 4-17: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	40
Figura 4-18: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	41
Figura 4-19: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).....	41
Figura 4-20: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).....	42
Figura 4-21: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	42

Figura 4-22: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	43
Figura 4-23: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).	43
Figura 4-24: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).	44
Figura 4-25: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	44
Figura 4-26: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	45
Figura 4-27: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).	45
Figura 4-28: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).	46
Figura 4-29: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).	46
Figura 4-30: Evolución temporal de Nitrato(mg/l).	47
Figura 4-31: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	47
Figura 4-32: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	48
Figura 4-33: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	49
Figura 4-34: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).....	50
Figura 4-35: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).....	51
Figura 4-36: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).....	52
Figura 4-37: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	53
Figura 4-38: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).....	54
Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).	55
Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).	56
Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	57
Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).....	58
Figura 4-43: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).	59
Figura 4-44: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).	60
Figura 4-45: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).	61

Figura 4-46: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/l).....	62
Figura 4-47: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	63
Figura 4-48: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).....	64
Figura 5-1: Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.	67
Figura 5-2: Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2022. Los datos corresponden al último monitoreo realizado en cada punto.....	70
Figura 5-3: Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2022. Datos correspondientes al último monitoreo realizado en cada punto.	72

Resumen Ejecutivo

El presente informe incluye los resultados del monitoreo efectuado en el marco del Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la cuenca Salar de Pedernales durante el segundo semestre de 2022. El principal objetivo del informe es cumplir con dicho plan en lo que respecta a la medición de los parámetros hidroquímicos de los puntos de monitoreo en el sector.

Las tomas de muestra de agua se realizan de manera exitosa en la mayoría de los puntos del programa, salvo en las punteras PU-31, PU-45 y PU-48 en septiembre 2022, debido a que se encontraron congeladas, y en las punteras PU-48 y PU-49 en diciembre 2022 por presentarse sin acceso.

En general, los parámetros hidroquímicos no presentan mayores variaciones con respecto al semestre anterior, a excepción de un aumento de calcio disuelto y disminución de sodio disuelto en el punto PU-43 en diciembre 2022. Cabe destacar que en septiembre 2022 los puntos PU-43 y PB-11 registraron aumentos puntuales de la conductividad eléctrica y de algunos de los iones disueltos (sulfato y sodio disuelto en la puntera PU-43, y cloruro y sodio disuelto en el pozo PB-11), retornando a la tendencia original durante la medición de diciembre 2022, a excepción del sodio disuelto en el punto PU-43 que presentó una disminución pronunciada en diciembre 2022.

Las aguas monitoreadas son del tipo cloruradas sódicas, con contenido importante de cloruro y sodio, característico de aguas tipo salmueras, salvo por la muestra PU-43 que, durante el período actual presenta una marca de agua clorurada cálcica, consistente con el aumento de calcio y disminución de sodio en dicho punto. Además, en los diagramas de Stiff modificado se observa una mayor predominancia de los cloruros frente a los demás aniones y, a excepción del punto PU-43, del sodio frente a los demás cationes, obteniendo una forma tipo "T" característica de salmueras.

1 Introducción

La División Salvador (DSAL) de Codelco Chile se encuentra ubicada en la Región de Atacama, comuna de Diego de Almagro, a 5,2 kilómetros de la ciudad El Salvador. DSAL se ha comprometido, mediante un Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario, al monitoreo de las Aguas Subterráneas de la cuenca Salar de Pedernales, con la finalidad de garantizar la conservación de las actuales zonas de vegetación activas del tipo SVAHT localizadas al suroeste del salar, así como controlar la extensión del cono de depresión de los pozos de bombeo asociados al Proyecto Rajo Inca (PRI), aprobado mediante la Resolución Exenta N°19 del 28 de febrero de 2020 (todos estos documentos son incluidos en el Anexo A).

Con lo anterior Codelco VP, a partir del mes de marzo de 2021, solicitó a AGQ la medición trimestral de los parámetros hidroquímicos de las aguas subterráneas para el control ambiental comprometido en el Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) antes mencionado (Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Complementaria Excepcional), iniciándose las actividades en terreno en el mes de abril de 2021. Anteriormente estas actividades eran desarrolladas por GP Consultores hasta febrero de 2021.

El presente documento consolida la información hidroquímica desde diciembre del 2020 hasta diciembre del 2022, con el objetivo de incorporar en cada reporte semestral la data histórica y poder observar las tendencias y comportamientos de los parámetros hidroquímicos en el tiempo. La frecuencia de monitoreo comprometida es trimestral y la entrega a la información a la autoridad es semestral.

Además, cabe destacar que AGQ se trata de una “Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental” (ETFA) debidamente inscrita en el registro de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) y que cuenta con las resoluciones exentas pertinentes, adjuntas en el Anexo B, para la correcta ejecución de los trabajos.

2 Objetivos

El presente informe tiene como objetivo cumplir con el PSAV en el control de las aguas subterráneas del sector Salar de Pedernales (Proyecto Rajo Inca) en lo que respecta al control de la calidad química de los puntos de monitoreo.

2.1 Antecedentes

El Proyecto Rajo Inca (PRI) extiende la vida útil de la División Salvador mediante el desarrollo de un rajo abierto en el cuerpo mineralizado que históricamente se ha explotado en forma subterránea. Se estima que se podrían extraer y beneficiar aproximadamente 561 millones de toneladas (Mton) de mineral sulfurado y aproximadamente 297 Mton de mineral oxidado. El PRI considera explotar y procesar dichos minerales en las instalaciones existentes e incorporar modificaciones en ellas para optimizar e incrementar la tasa de procesamiento y la producción de cobre fino.

El Proyecto considera procesar una tasa máxima de 37 ktpd de mineral sulfurado y 30 ktpd de mineral oxidado, lo que permitiría aumentar la producción de concentrado de cobre a un promedio de 245 kton/año (máximo 370 kton/año) y la producción de cátodos de cobre a un promedio de 25 ktCuf/año con una vida útil de 43 años en operación. Esta continuidad comprende las líneas productivas de sulfuros y óxidos en las áreas de El Salvador, Pampa Austral y la extracción de agua de la cuenca del Salar de Pedernales.

El presente informe analiza las variables según el Programa de Monitoreo para el sector Pedernales, el cual compromete el control de la calidad química en 5 pozos y 6 punteras.

2.2 Compromisos ambientales

El proyecto "Rajo Inca" se ingresó al SEIA a través de una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) que fue calificada ambientalmente favorable por medio de la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N°19/2020, en Copiapó el 28 de febrero de 2020. En ella, se establece una serie de compromisos ambientales en relación con la componente hídrica. La RCA se adjunta en el Anexo A del presente informe.

Durante las etapas de construcción y operación del proyecto (RCA considerando 13.1) se establece un Programa de Monitoreo para el sector del Salar de Pedernales, con el fin de monitorear los niveles y calidad de las aguas subterráneas para el control de la extracción del recurso hídrico. En la Tabla 2-1 se encuentra la ficha resumen de los compromisos de calidad de aguas subterráneas para el sector.

Posteriormente a la aprobación del Proyecto Rajo Inca, y con motivo del Avenimiento entre el Consejo de Defensa del Estado (CDE) y Codelco, se estableció en la Medida H-03 de dicho acuerdo una complementación del PSAV del PRI a partir de la incorporación de 2 puntos de control adicionales.

Tabla 2-1: Transcripción del considerando 13.1 de la RCA. “Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) en la Cuenca de Pedernales”.

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
Impacto asociado	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución del volumen de agua en el acuífero de la cuenca Salar de Pedernales. - Disminución del nivel de agua en la zona de vegetación del SVAHT del salar de Pedernales asociado al cono de descenso del Campo de Pozos de Bombeo.
Fase del Proyecto a la que aplica	Construcción y Operación
Objetivo, descripción y justificación	<p><u>Objetivo:</u> garantizar la protección de los SVAHT activos al suroeste del salar de Pedernales, así como controlar la extensión del cono de depresión de los pozos de bombeo.</p> <p><u>Descripción:</u></p> <p>En el Plan de Seguimiento se definen los puntos de monitoreo según los antecedentes del “Modelo Hidrogeológico Conceptual de la cuenca Salar de Pedernales”, y corresponden a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 29 pozos o piezómetros (ver Tabla 2-1 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). • 18 punteras (ver Tabla 2-2 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). • 3 estaciones meteorológicas (Tabla 2-3 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). <p>Además, producto de la acción definida por el Titular sobre el traslado del 50% de los pozos de extracción (extracción de 85 l/s) desde el inicio de la fase de operación del proyecto (al menos 5 km aguas arriba del campo de pozos de bombeo del Llano Pajaritos), se deben establecer 2 puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos. La ubicación de cada uno de esos nuevos puntos de monitoreo deberá ser aprobada por la DGA de la Región de Atacama.</p> <p>Se monitorearán los siguientes parámetros en el Plan de Seguimiento:</p> <p>1) niveles piezométricos y variables climáticas, con lo cual se podrán detectar descensos de los niveles y determinar si estos se deben a factores climáticos o a las extracciones de agua subterránea. El monitoreo será de forma mensual, en los pozos/piezómetros y punteras (ver Tabla 2-1 y Tabla 2-2 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional), a excepción de los puntos de monitoreo continuo de niveles (ver Tabla 2-5 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). El seguimiento se realizará durante las fases de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean superiores a los observados previo a la entrada de operación del Proyecto Rajo Inca.</p> <p>Se entregarán a la SMA: Se entregará un único informe anual que incluya la base de datos (en Excel) información piezométrica registrada en cada mes (tanto mediciones puntuales como continuas) y el análisis evolución de los datos. En el caso de existir diferencias entre lo predicho en este proceso de evaluación y lo finalmente observado, el informe deberá referirse en detalle a ellas.</p> <p>La medición de los niveles será realizada por un organismo de inspección de Muestreo Ambiental-ETFA (Entidad Técnica de Fiscalización Ambiental).</p>

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

<p>En caso de que no se pueda medir el nivel en uno o varios puntos de monitoreo, se dejará constancia de ello en los respectivos reportes a la SMA, acompañando la justificación que lo respalde. Sin embargo, el Titular debe establecer un número máximo fallas en la medición.</p> <p>2) variables climáticas, se realizará un seguimiento de las variables climáticas en las 3 estaciones meteorológicas propuestas, la estación La Ola, la estación Los Arroyos y la estación Centro Salar (Tabla 2-3 del Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</p> <p>En ellas se medirán, cada 60 minutos, los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión. • Altura de nieve. • Radiación solar. • Velocidad y dirección del viento. • Temperatura. • Humedad relativa. • Precipitación. • Evaporación desde el suelo en la estación meteorológica Centro Salar. <p>La descarga de los datos medidos en cada una de las estaciones se realizará con una frecuencia trimestral, durante toda la fase de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Además, se entregarán a la SMA reportes semestrales donde se indicarán los datos medidos y se analizará su evolución.</p> <p>Debido a las condiciones climáticas adversas que ocurren en la zona de estudio (principalmente durante el invierno) es posible que no se puedan realizar la descarga de datos. En caso de ocurrir la situación antes descrita, se informará a la SMA en los informes anuales.</p> <p>3) calidad química de las aguas en el entorno del SVAHT emplazado al oeste del salar.</p> <p>Se generarán datos de calidad química, los que permitirán realizar un balance hidroquímico para analizar las diferencias que se puedan producir en los caudales de entrada. Lo anterior permitirá determinar si las variaciones en el SVAHT se deben a las extracciones o bien a un cambio en las entradas naturales.</p> <p>Así, el Plan de Seguimiento contará con un monitoreo de calidad de las aguas provenientes del sector sur y oeste, que incluirá el análisis de Conductividad Eléctrica (CE), pH e iones mayoritarios.</p> <p>La toma de muestras será realizada por un organismo de inspección de Muestreo Ambiental-ETFA (Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental), el cual seguirá las indicaciones establecidas en la Norma NCh411/11-1998 "Guía para el Muestreo de Aguas Subterráneas", mientras que el análisis hidroquímico será llevado a cabo por un laboratorio certificado.</p> <p>La frecuencia del monitoreo será trimestral y se realizará durante las fases de construcción y operación del Proyecto Rajo Inca. Además, se entregarán reportes semestrales a la SMA, donde se incluirán los certificados con los resultados de los análisis químicos de laboratorio.</p> <p>Los puntos de monitoreo considerados para el seguimiento de la calidad química son 9 en total, de los cuales 3 corresponden a pozos/piezómetros y 6 a punteras (ver Tabla 2-4 del Apéndice 1</p>
--

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

	<p>del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional). Los puntos se ubican en el SVAHT, en su entorno y en los sectores de recarga ubicados al sur y oeste del SVAHT.</p> <p>Debido a las condiciones climáticas adversas que ocurren en la zona de estudio (principalmente durante el invierno) es posible que no se puedan monitorear todos los puntos. En caso de ocurrir la situación antes descrita, se informará a la SMA en los informes semestrales.</p> <p>Además, el Plan de Seguimiento debe incluir la instalación de sensores de medición continua en 10 pozos (Tabla 2-5 Apéndice 1 del Anexo 1 de la Adenda Complementaria Excepcional).</p> <p>El Titular debe presentar la actualización del modelo hidrogeológico numérico al inicio de la etapa de operación y posteriormente cada 5 años. Lo anterior permitirá garantizar una adecuación y mejora del modelo, representando las condiciones futuras de la cuenca del Salar de Pedernales en base a la nueva información disponible.</p> <p>En dicha actualización el Titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilizar la condición de borde en consideración a la situación sin proyecto que correspondería al cese de la extracción de agua superficial desde el tranque La Ola que impacta en el flujo superficial y subterráneo que ingresa desde el Sur. • Deben ser subsanadas las diferencias de cotas topográficas que presenta el modelo con lo reportado en la caracterización de los pozos (cotas informadas en Anexo 8-4 de la Adenda versus cotas modeladas en el Modelo Numérico de la Adenda Complementaria Excepcional). <p>La primera actualización será reportada a la SMA, cuando se dé inicio la fase de operación del proyecto. Cuando corresponda presentar el modelo hidrogeológico actualizado, se incluirá como anexo la respectiva actualización del Plan de Seguimiento.</p> <p>Además del Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario (PSAV) debe considerar el seguimiento de la variación de los niveles piezométricos y la variación de cobertura de los SVAHT activos, que cuente con los siguientes elementos:</p> <p>1) Puntos de Control:</p> <p>El PSAV se sustenta en 9 puntos de control en total. Estos corresponden a 5 pozos/piezómetros (PB-9, PB-10, PB-11, PB-12, CP-11) y 4 punteras (PU-31, PU-45, PU-48 y PU-49). En estos puntos se controlarán los posibles efectos sobre el SVAHT activo, asociados a los descensos que podría generar la extracción desde el campo de pozos de bombeo.</p> <p>Además, una vez definidas las coordenadas exactas de la ubicación de los nuevos pozos de bombeo, al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del sector de vegetación activa del SVAHT actual, se establecerán 2 puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos.</p> <p>El Titular deberá presentar a la DGA de la Región de Atacama la nueva ubicación de los pozos de extracción junto a nuevos pozos de control y umbrales de activación del PSAV asociados al nuevo campo de bombeo.</p> <p>2) Variables de Control:</p> <p>La variable de control es el nivel piezométrico en los puntos de control del PSAV, los cuales serán reportados como cota del agua subterránea referido al nivel del mar (m s.n.m.) y metros bajo el nivel de terreno (m b.n.t.).</p> <p>3) Valores Umbrales, que activan los niveles de acción.</p>
--	--

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

La activación del PSAV estará sujeta a la ocurrencia de cualquiera de estas condiciones o ambas en conjunto:

a. **Nivel freático inferior al Valor Umbral Mínimo (VUM) en cualquiera de los puntos de control**, en al menos el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua. El VUM, se define como el máximo descenso observado medido desde el nivel de terreno (m.b.n.t.) y se muestran en la tabla a continuación.

b. **Reducción en un 5% de la cobertura vegetal del SVAHT activo**, respecto a lo observado en línea de base.

Tabla: Valores umbrales de activación del PSAV

Pozo	VUM (mbnt)	Reducción Cobertura Vegetal
CP-11	2.4	>5%
PB-10	20.2	
PB-11	26.7	
PB-12	18.6	
PB-9	24.8	
PU-49	1.8	
PU-45	0.8	
PU-48	0.6	
PU-31	0.8	

4) **Acciones que se deben tomar**, en caso de que dichos niveles se activen.

El PSAV debe estar formado por 2 fases, cuyas características se presentan a continuación:

Fase 1:

- La fase 1 se debe activar cuando el nivel freático sea inferior al Valor Umbral Mínimo (VUM) en cualquiera de los puntos de control, en al menos el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua y/o se produzca una reducción en un 5% de la cobertura vegetal del SVAHT activo, respecto a lo observado en la línea de base.

- En caso de activarse la fase 1, el titular deberá elaborar un estudio con la siguiente información como contenidos mínimos:

a. Si la activación se produjo por la superación del VUM: o Determinar la interacción de los niveles de aguas superficiales y subterráneas que alimentan la zona de vegetación del SVAHT.

o Determinar si los descensos son originados por los pozos de bombeo del salar de Pedernales, o se deben a causas externas.

o Analizar el estado de los organismos de la variable hidrobiológica.

b. Si la activación se produjo por una disminución superior al 5% de la cobertura vegetal:

o Determinar si la disminución de la cobertura vegetal se debe al funcionamiento del proyecto o a causas externas.

- El estudio será entregado a la DGA de la Región de Atacama y SAG de la Región de Atacama quienes deberán resolver, en base a los antecedentes presentados por el titular, si la activación

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales

	<p>del PSAV se debe a los efectos del bombeo o no en un plazo no superior a los 3 meses desde la activación del nivel de acción.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si la autoridad (DGA y SAG) resuelve que el descenso es provocado por los efectos del bombeo, se activará la Fase 2 del PSAV, en caso contrario, se desactivará la Fase 1 de PSAV. <p>Fase 2:</p> <p>a. Si la activación de la fase 2, se debe exclusivamente a la activación del VUM, el Titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> o Trasladar el 50% del caudal total de bombeo. Recordar que el otro 50% del caudal debe ser trasladado desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV. El traslado del punto de extracción debe ser al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del SVAHT activo. o Presentar a la DGA de la Región de Atacama en un plazo no superior a 3 meses desde la activación de la Fase 2, dos puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos y sus correspondientes umbrales de activación. La ubicación de estos pozos y umbrales de activación deberá ser válida por la DGA de la Región de Atacama. <p>b. Si la activación de la Fase 2, se debe exclusivamente a la disminución en un 5% de la cobertura vegetal determinada en la línea de base, el titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> o Trasladar el 50% del caudal total de bombeo. Recordar que el otro 50% del caudal debe ser trasladado desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV. El traslado del punto de extracción debe ser al menos, a 5 km aguas arriba del campo de pozos del Llano Pajaritos, alejados del SVAHT. o Presentar a la DGA de la Región de Atacama en un plazo no superior a 3 meses desde la activación de la Fase 2, dos puntos de monitoreo para cada uno de los nuevos pozos y sus correspondientes umbrales de activación. La ubicación de estos pozos y umbrales de activación deberá ser válida por la DGA de la Región de Atacama. o Reducir hasta 40 lt/s el caudal de extracción. Estos 40 lt/s son adicionales a los 40 lt/s ya reducidos como compromiso voluntario que debe materializarse desde el inicio de la fase de operación del proyecto sin depender de la activación del PSAV. <ul style="list-style-type: none"> • Los 40 lt/s a reducir, se realizarán en 2 etapas de 20 lt/s cada una que se describen a continuación: <ul style="list-style-type: none"> i. Activada la Fase 2 de PSAV, se reducirá automáticamente 20 lt/s. ii. Si los 20 lt/s reducidos anteriormente, no genera una recuperación de la cobertura vegetal del SVAHT tal que ésta sea inferior al 5% en los 3 meses siguientes desde la activación de la medida, se deberá reducir otros 20 lt/s. <p>c. Si la fase 2 se activa por ambas condiciones, es decir, niveles freáticos bajo el UVM y pérdida de cobertura vegetal sobre el 5% de lo presentado como línea de base, el titular deberá:</p> <ul style="list-style-type: none"> o Presentar toda la información contenida en los puntos a) y b). <p>d. Si la activación de la Fase 2 se debió exclusivamente por la activación del VUM, no podrá desactivarse en un plazo inferior a 6 meses desde su activación. La desactivación ocurrirá cuando el nivel piezométrico en todos los puntos de control sea superior al VUM en el 50% de las mediciones en los últimos tres meses de medición continua.</p>
--	---

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
	<p>e. Si la activación de la Fase 2 se debió exclusivamente por la pérdida de cobertura vegetal, no podrá desactivarse en un plazo inferior a 1 año desde su activación. La desactivación ocurrirá cuando la pérdida de cobertura de los últimos 12 meses sea inferior al 5% definido como umbral máximo permitido.</p> <p>f. En caso de que ambos umbrales de activación estén activos, VUM y cobertura vegetal, la desactivación del PSAV deberá cumplir conjuntamente las condiciones del punto d) y e).</p> <p>g. El Titular deberá enviar un reporte de desactivación del PSAV a la DGA y SAG quienes autorizarán la desactivación en un plazo no superior a 3 meses.</p> <p>El Titular deberá esquematizar el funcionamiento del PSAV en un diagrama de flujo, que indique claramente las variables de control, decisiones, acciones y todos los eventos que se requieran para su entendimiento y seguimiento.</p> <p><u>Justificación:</u> considerando los niveles de extracción de agua subterránea en el Salar de Pedernales podría generar disminuciones en los niveles freáticos que afecten a los SVAHT presentes en el Salar.</p>
Lugar, forma y oportunidad de implementación	<p>Lugar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 29 pozos o piezómetros • 18 punteras • Estaciones meteorológicas <p>El detalle de la ubicación de estos puntos se presenta en el Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional.</p> <p>Forma:</p> <p>En los pozos o piezómetros y punteras se medirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Profundidad del nivel freático. <p>En las estaciones meteorológicas se medirá:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presión • Altura de nieve • Radiación solar • Velocidad y dirección del viento • Temperatura • Humedad relativa • Precipitación • Evaporación desde el suelo (estación Centro Salar). <p>Calidad de las aguas, se medirá calidad de las aguas en 9 puntos, cuyo detalle se describe en el punto 2.2.3 (Tabla 2-4) del Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional. Este monitoreo incluirá el análisis de Conductividad Eléctrica (CE), pH e iones mayoritarios.</p> <p>Instalación de sensores de medición continua de nivel piezométrico, se registrará dos veces al día el nivel piezométrico en 10 puntos de monitoreo ubicados en el entorno del SVAHT y del campo de pozos de bombeo, con descarga de datos trimestral. El detalle de los puntos de monitoreo se describe en el punto 2.2.4 (Tabla 2-5) del Apéndice 1 del Anexo 1-2 de la Adenda Excepcional.</p> <p>Actualización del modelo. Cada 5 años.</p> <p>Oportunidad: Desde el inicio de la fase de construcción del Proyecto hasta el final de la fase de operación. Se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean superiores a los observados previo a la entrada de operación del Proyecto Rajo Inca.</p>

Tabla 13.1. Plan de Seguimiento Ambiental Voluntario en la Cuenca de Pedernales	
	<p>La frecuencia de medición será:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad nivel freático: mediciones mensuales. 2. Variables climáticas: mediciones horarias con descarga de los datos trimestral 3. Calidad de las aguas: mediciones trimestrales. 4. Sensores de medición continua: 2 mediciones por día con descarga de los datos trimestral. 5. Actualización del modelo. No aplica
Indicador que acredite su cumplimiento	Registros de Profundidad nivel freático, Variables climáticas, Calidad de las aguas, Sensores de medición continua y Actualización del modelo.
Forma de control y seguimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profundidad nivel freático: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis. 2. Variables climáticas: reporte semestral a SMA. 3. Calidad de las aguas: reporte semestral a SMA. 4. Sensores de medición continua: informe anual a SMA que incluya la base de datos (en Excel) y el análisis. 5. Actualización del modelo: cada 5 años a SMA.

3 Materiales y métodos

3.1 Descripción del área de estudio

La cuenca Salar de Pedernales es la cuenca cerrada de mayor extensión de la región de Atacama. Se caracteriza por presentar unidades sedimentarias, principalmente evaporitas, y formaciones volcánicas e intrusivas. En su límite septentrional se encuentra el salar de Pedernales, el cual posee una superficie de 335 km².

El salar de Pedernales es considerado como sitio prioritario para la conservación, este se ubica a una distancia de aproximadamente 27 km en línea recta del sector Salvador. En los sectores conocidos como Llano de Pedernales y Llano La Ola se bombean aguas salobres de las napas, las cuales son utilizadas como aguas de uso industrial. En la Figura 3-1 se presenta la ubicación de las áreas de la cuenca Salar de Pedernales.

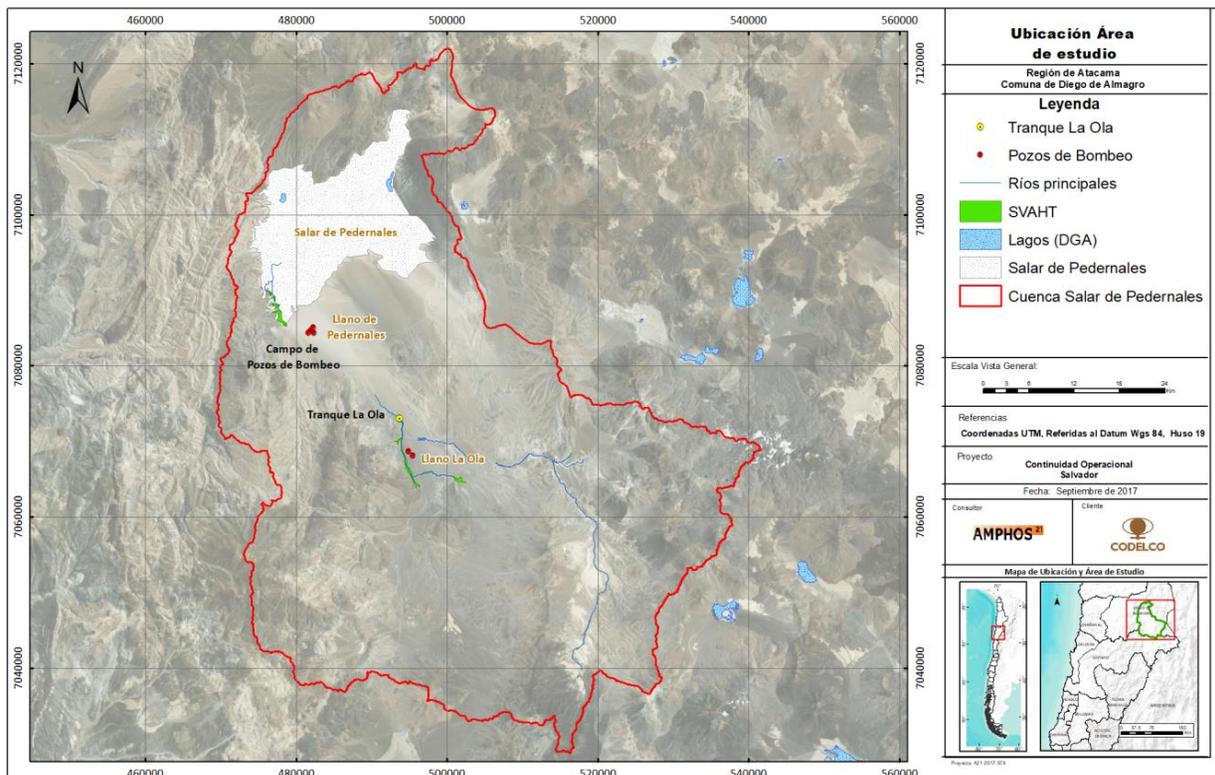


Figura 3-1: Mapa ubicación de la cuenca Salar de Pedernales. Fuente: Programa de Monitoreo cuenca de Salar de Pedernales, Amphos 21.

3.2 Puntos y programa de monitoreo

Los puntos de monitoreo considerados para el seguimiento de la calidad química en el PSAV son 9, de los cuales 3 corresponden a pozos/piezómetros y 6 a punteras (Tabla 3-1). Adicionalmente, se consideran 2 pozos comprometidos en el marco del acuerdo de avenimiento y transacción con el Consejo de Defensa del Estado (P-4a y P-19 a). Los puntos se ubican en el SVAHT, en su entorno y en los sectores de recarga ubicados al sur y oeste del SVAHT. En el Anexo E se presentan los esquemas de habilitación de pozos.

El seguimiento en todos los puntos mencionados es trimestral y se realizará durante las fases de construcción y operación del PRI y se continuará con el seguimiento una vez acabada la operación, hasta que los niveles piezométricos sean similares a los observados previo a la entrada de operación del PRI.

Tabla 3-1: Puntos de seguimiento correspondientes a 5 pozos/piezómetros y 6 punteras.

Nombre punto	Este WGS84 (m)	Norte WGS84 (m)	Cota (m s.n.m.) (*)
CP-11	478.477	7.087.322	3.228
PB-11	479.585	7.084.355	3.380
PB-12	480.889	7.085.683	3.373
PU-31	477.255	7.088.087	3.357
PU-43	476.634	7.087.031	3.361
PU-44	476.511	7.088.181	3.360
PU-45	476.775	7.089.102	3.361
PU-48	477.596	7.088.149	3.358
PU-49	478.041	7.087.092	3.369
P-19a	480.343	7.08.5060	3.375
P-4a	481.828	7.086.312	3.375

(*): Datos obtenidos desde documento "Esquema de los Pozos y Punteras en Salar de Pedernales" de GAC (año 2019).

La ubicación de los puntos de monitoreo se presenta en la Figura 3-2.

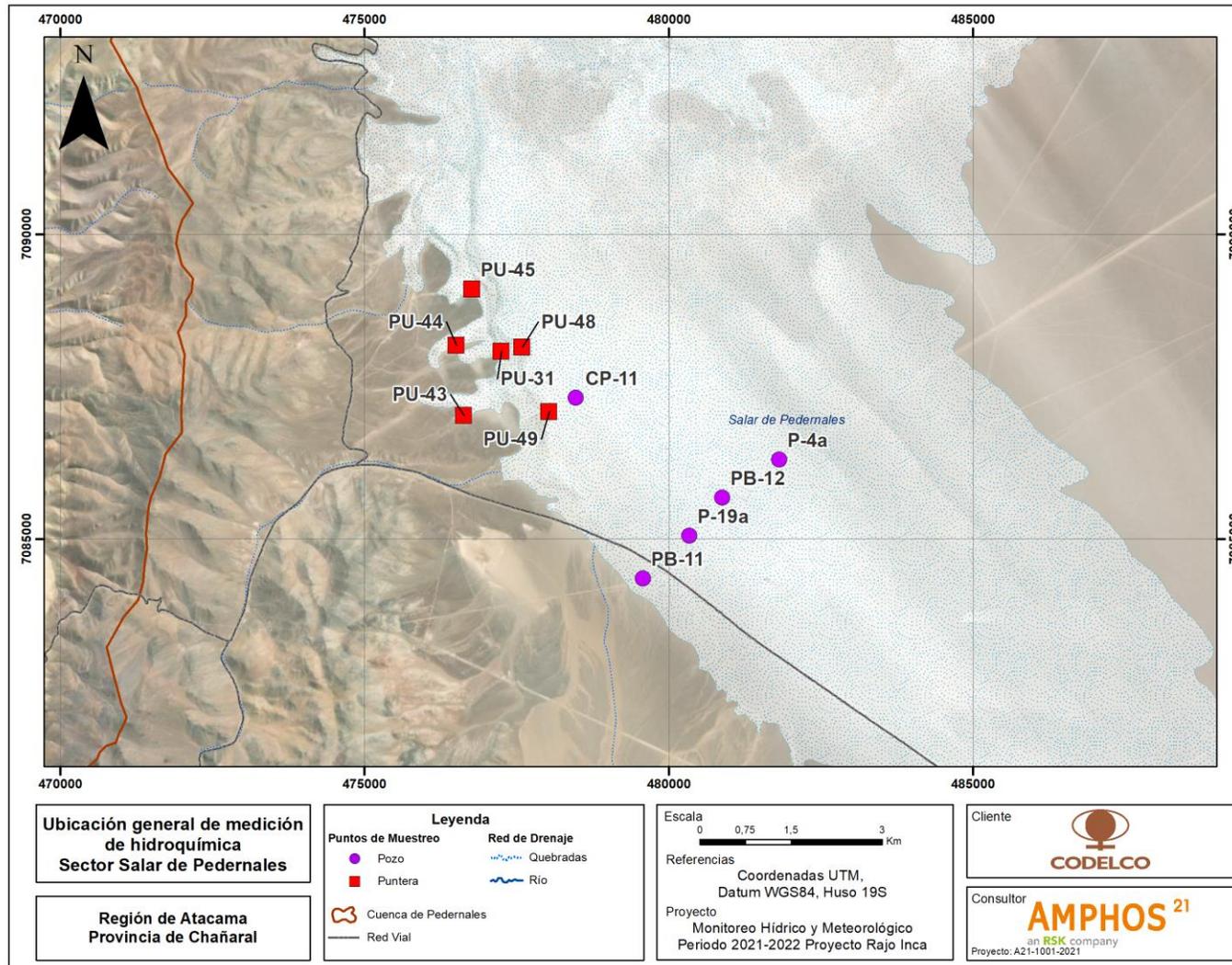


Figura 3-2: Ubicación de los puntos de monitoreo hidroquímico en la cuenca Salar de Pedernales.

3.3 Metodologías

3.3.1 Mediciones parámetros fisicoquímicos in situ

Los trabajos de terreno de medición de los parámetros fisicoquímicos han sido realizados por la ETFA AGQ desde el mes de abril 2021. Las acreditaciones ETFA correspondientes se encuentran adjuntas en el Anexo B.

En los puntos de monitoreo se miden los siguientes parámetros fisicoquímicos:

- Conductividad eléctrica (CE).
- Potencial de hidrógeno (pH).

Las mediciones de estos parámetros son efectuadas en el mismo cuerpo de agua o en una muestra representativa previamente extraída del cuerpo de agua. En ambos casos, se considera que la muestra es tomada in situ.

3.3.2 Toma de muestra

Los trabajos de terreno asociados a la toma de las muestras fueron solicitados por Codelco VP durante el mes de marzo de 2021 y han sido realizados por la correspondiente ETFA AGQ desde el mes de abril de 2021. Las acreditaciones ETFA correspondientes se encuentran adjuntas en el Anexo B.

La toma de muestras en los puntos definidos se realiza mediante la metodología normalizada en la NCH 411/11. Para ello, las muestras se obtienen utilizando una bomba o una botella vertical, la cual es ingresada en el punto de monitoreo y se extrae un volumen de agua suficiente para el llenado del set de envases. En el caso de utilizar la bomba, se verifica previamente la estabilización de los parámetros fisicoquímicos antes del llenado del set de envases.

Los envases son ambientados, antes de su llenado, a lo menos 3 veces con la misma agua del punto monitoreado (siempre y cuando no contenga preservantes en su interior).

Una vez terminado con el llenado de los envases, estos son guardados en neveras con gel pack para mantener la cadena de frío y ser trasladados al laboratorio, respetando los tiempos indicados en la normativa anteriormente señalada.

Además, en cada punto monitoreado, se realiza un registro fotográfico del punto al momento de su visita.

3.3.3 Análisis hidroquímico

Los parámetros hidroquímicos analizados en el laboratorio certificado son los indicados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2: *Parámetros de laboratorio analizados.*

Parámetros	
Calcio	Sulfato
Magnesio	Cloruro
Sodio	Nitrato
Potasio	Balance Iónico
Bicarbonato	-

3.3.4 Control de calidad

Una vez los resultados de laboratorio son emitidos, estos son verificados mediante un control de calidad. En el control de calidad se comparan los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos in situ con los respectivos obtenidos del laboratorio, y también se verifica el balance iónico de cada muestra.

Adicionalmente, se revisa si existe alguna desviación de los valores informados frente a la data histórica.

Para validar una muestra se siguen los siguientes márgenes de variaciones:

- Conductividad eléctrica (a 25°C): se verifica que la diferencia entre el dato tomado in situ y el resultante del análisis de laboratorio no sea superior al 10% entre ellos.
- pH: se verifica que la diferencia entre el dato tomado in situ y el resultante del análisis de laboratorio no sea superior al 10% entre ellos.
- Balance iónico: En las aguas naturales se espera que sus elementos se encuentren en equilibrio iónico (electroneutralidad). Por lo tanto, se aceptan las mediciones que presenten una diferencia menor o igual al 10%.

4 Resultados

4.1 Toma de muestras

En el segundo semestre del 2022 se tomaron muestras trimestrales de manera manual y a nivel del agua (superficie) en 10 puntos en la cuenca Salar de Pedernales. En la Tabla 4-1 se indican las fechas, el método de muestreo y la profundidad del nivel.

Tabla 4-1: Puntos monitoreados, fecha de toma de muestra, método de muestreo y profundidad del nivel.

Nombre punto	Fecha	Método de muestreo	Profundidad de nivel (m b.n.t.)
CP-11	21-09-2022	Bailer	1,287
CP-11	15-12-2022	Bailer	1,222
PB-11	12-09-2022	Bailer	21,856
PB-11	01-12-2022	Bailer	21,756
PB-12	12-09-2022	Bailer	15,512
PB-12	14-12-2022	Bailer	15,457
PU-31	28-09-2022	-	(*)
PU-31	19-12-2022	Bailer	0,187
PU-43	05-09-2022	Bailer	0,736
PU-43	19-12-2022	Bailer	0,733
PU-44	28-09-2022	Bailer	0,205
PU-44	19-12-2022	Bailer	0,215
PU-45	28-09-2022	-	(*)
PU-45	12-12-2022	Bailer	0,494
PU-48	28-09-2022	-	(*)
PU-48	15-12-2022	-	(**)
PU-49	05-09-2022	Bailer	1,205
PU-49	15-12-2022	-	(**)
P-19a	01-09-2022	Bailer	17,364
P-19a	12-12-2022	Bailer	17,314
P-4a	01-09-2022	Bailer	16,447
P-4a	12-12-2022	Bailer	16,392

(*): Punto congelado.

(**): Sin acceso.

4.2 Parámetros fisicoquímicos in situ

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-2 y Tabla 4-3. De la Figura 4-1 a la Figura 4-8 se encuentran los gráficos con la evolución temporal de los resultados. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

Tabla 4-2: Mediciones fisicoquímicas in situ en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sep. 22	Dic. 22								
CE (µS/cm)	4.917	4.711	9.375	2.803	4.744	4.645	4.508	4.748	4.747	5.447
pH (u pH)	7,31	7,24	7,62	7,99	7,67	7,59	7,68	7,62	7,64	7,74

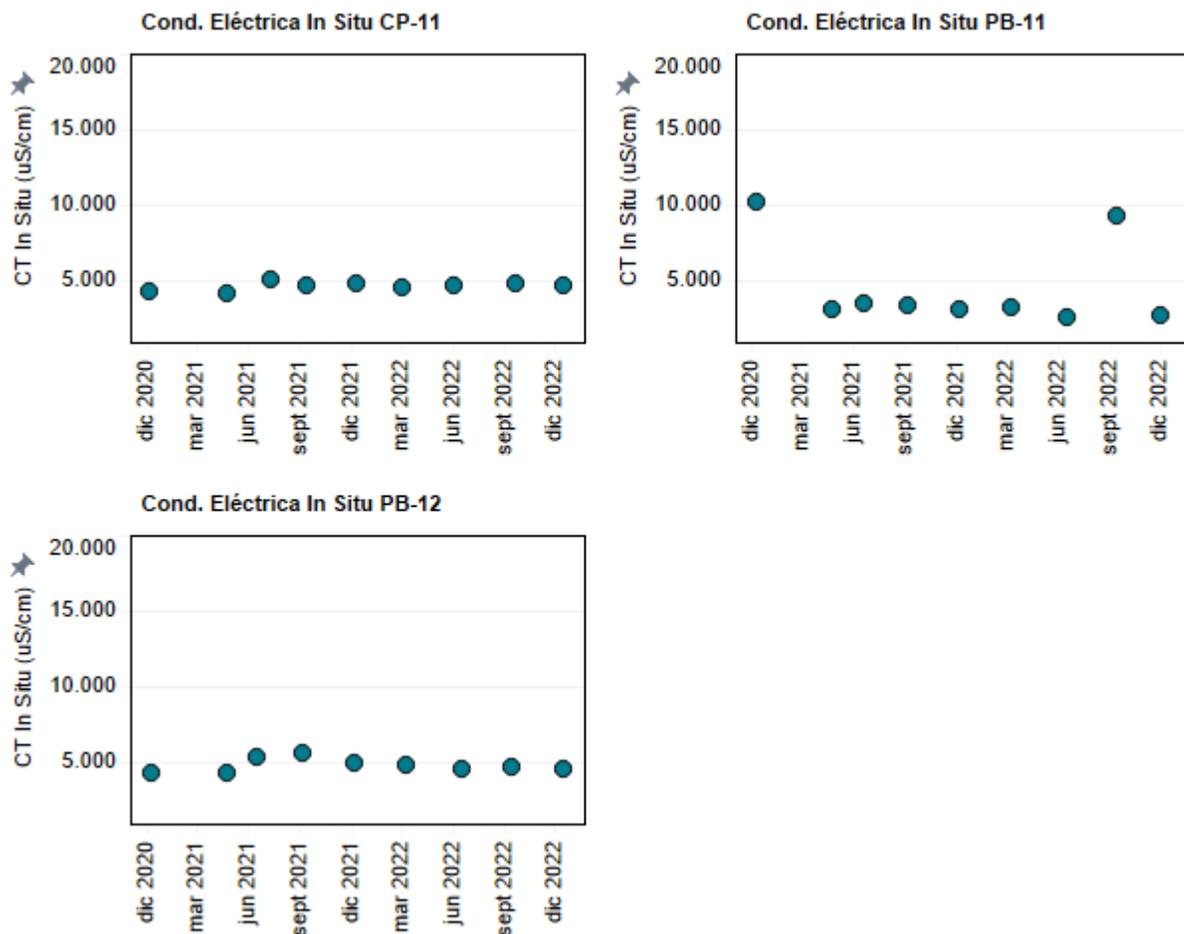


Figura 4-1: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm).

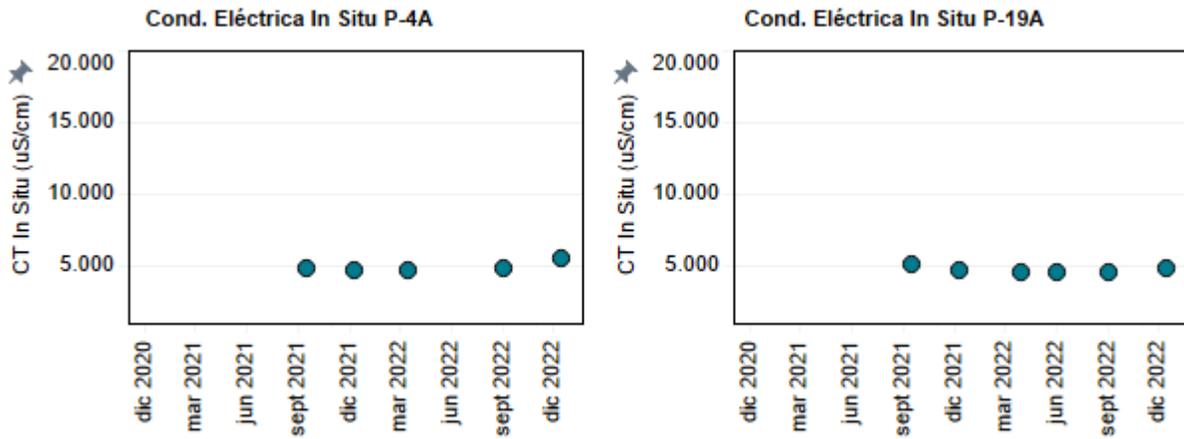


Figura 4-2: Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

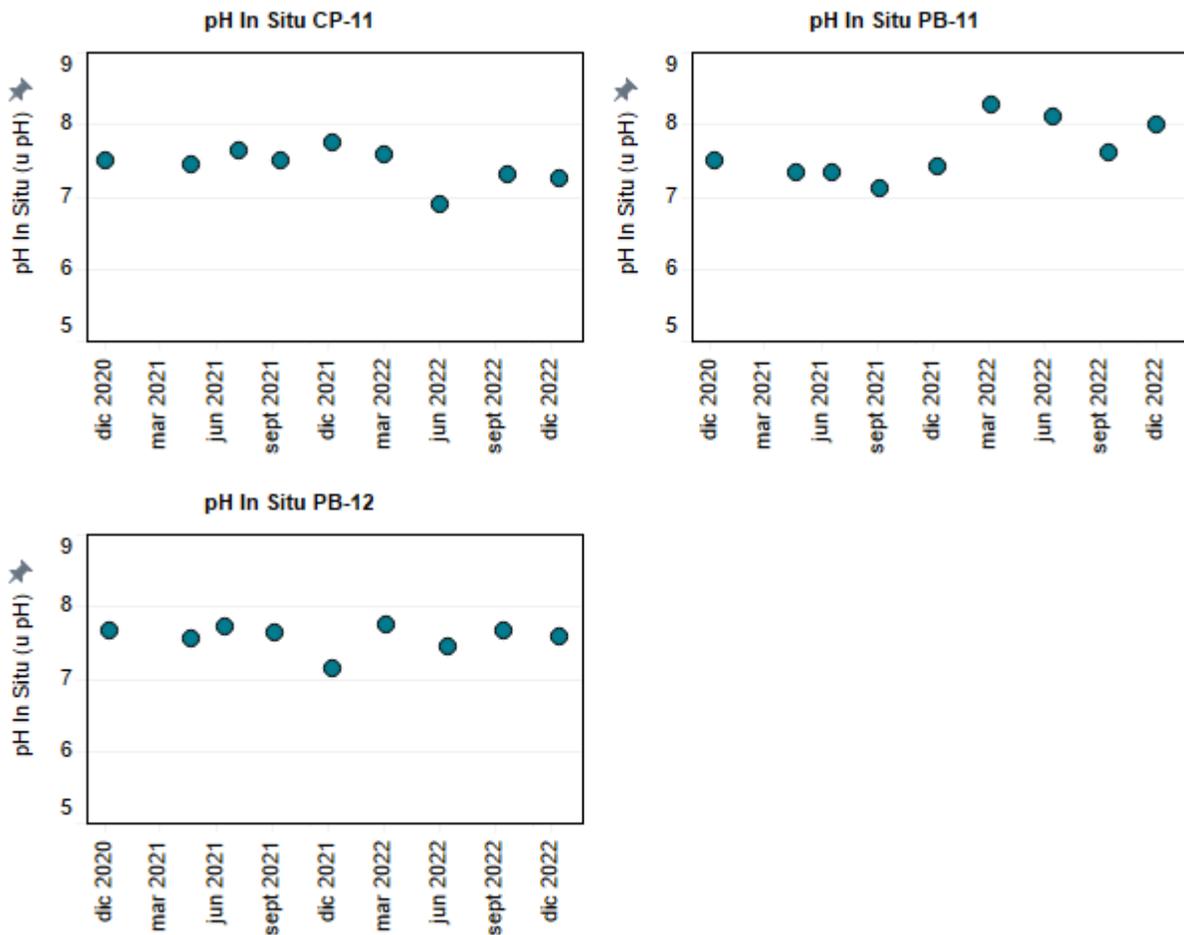


Figura 4-3: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

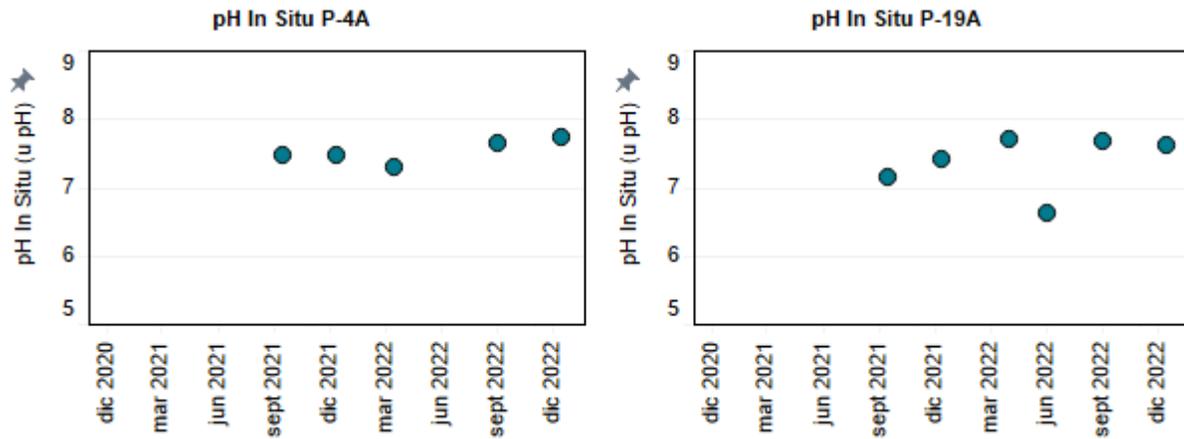


Figura 4-4: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

Tabla 4-3: Mediciones fisicoquímicas in situ en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
CE (μS/cm)	(*)	6.376	8.648	6.329	7.353	7.814
pH (u pH)	(*)	6,81	7,34	7,37	7,53	7,44

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
CE (μS/cm)	(*)	8683	(*)	(**)	6600	(**)
pH (u pH)	(*)	7,71	(*)	(**)	7,39	(**)

(*): Punto congelado.

(**): Sin acceso.

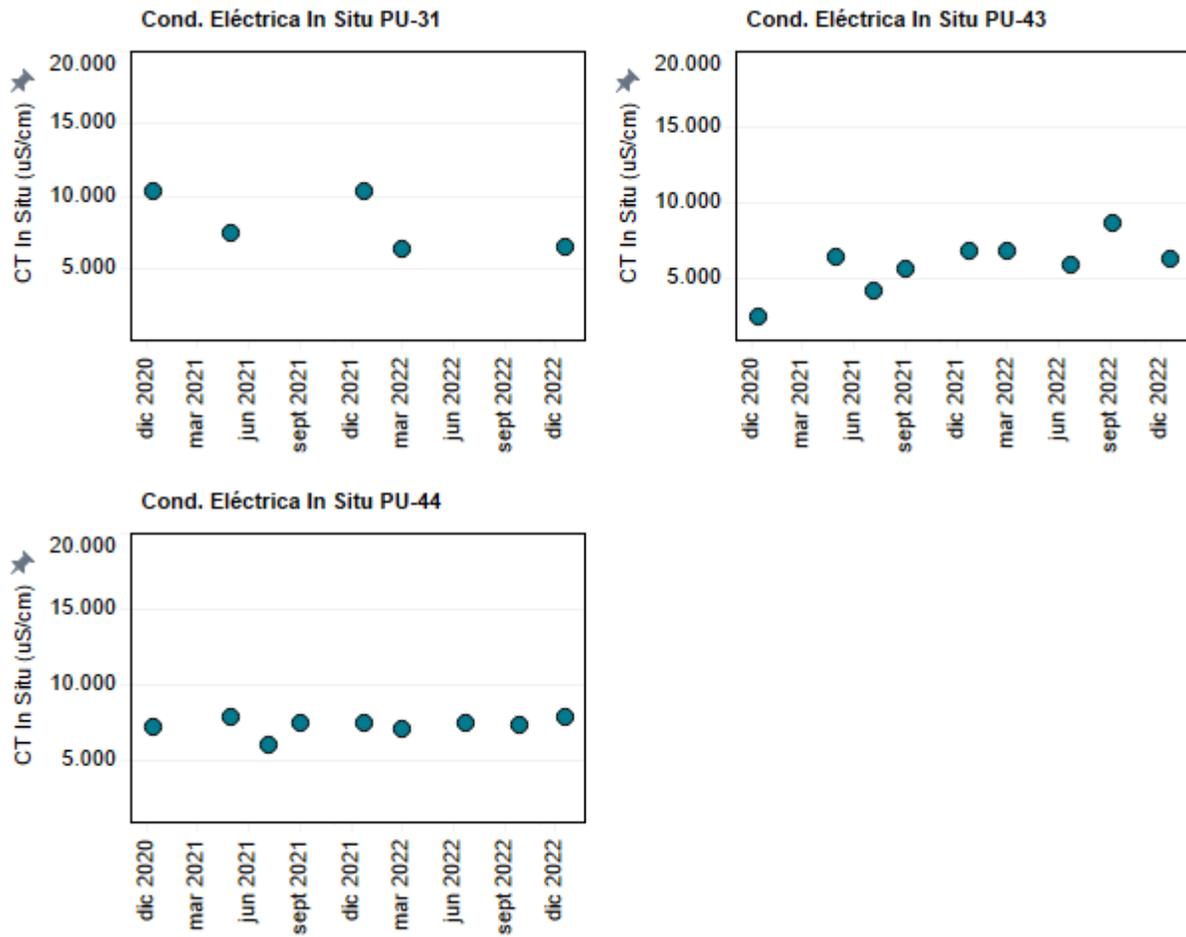


Figura 4-5. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

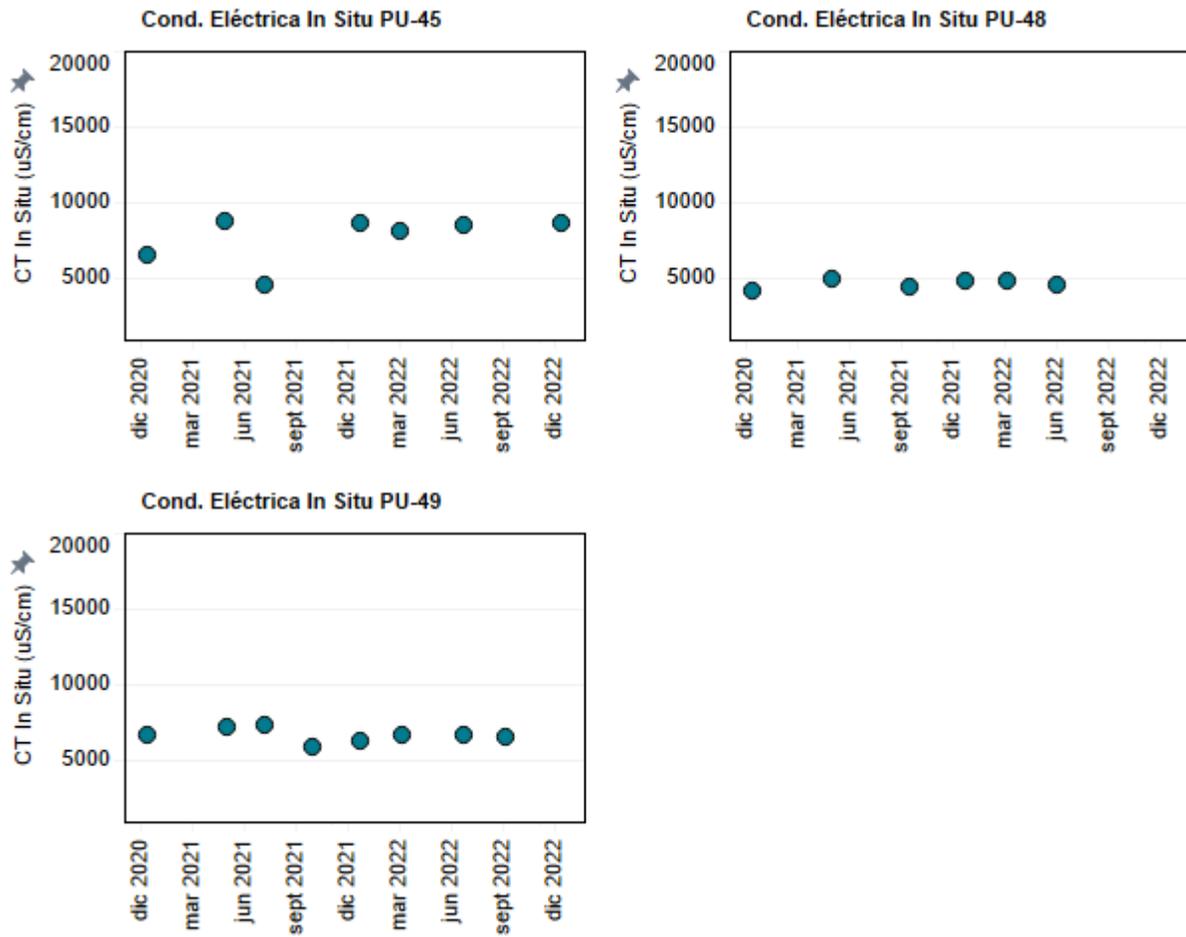


Figura 4-6. Evolución temporal de Conductividad eléctrica in situ (µS/cm).

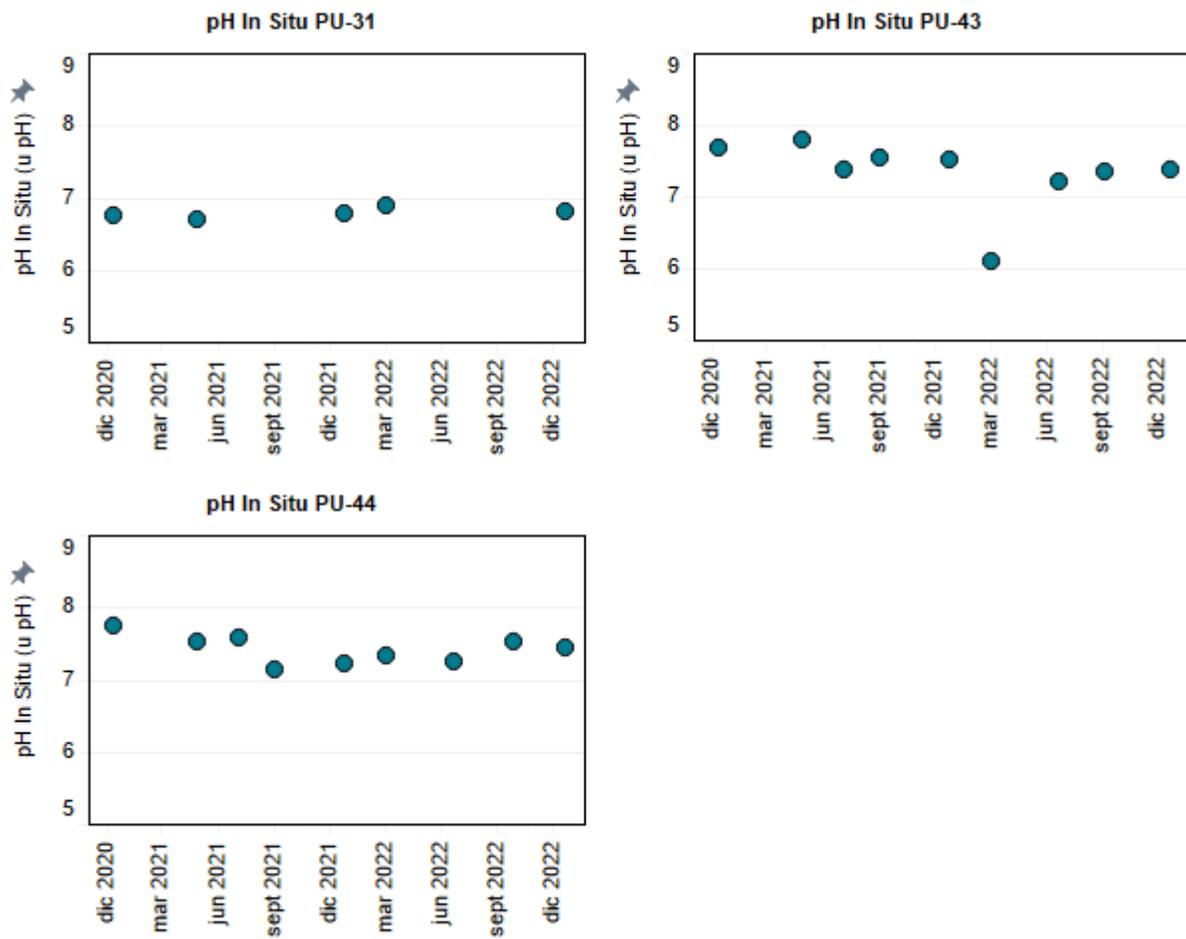


Figura 4-7: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

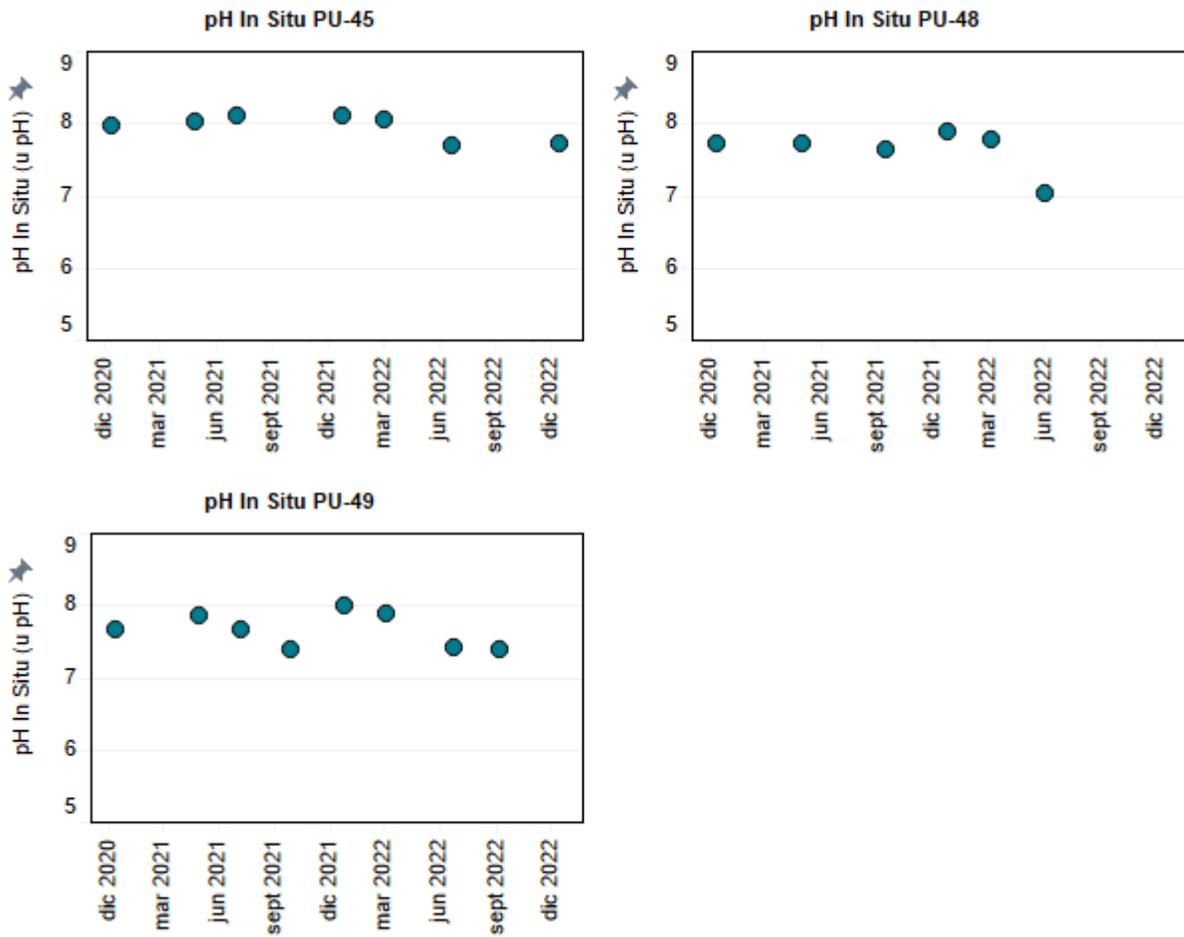


Figura 4-8: Evolución temporal de pH in situ (unidades de pH).

4.3 Parámetros fisicoquímicos laboratorio

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos obtenidos del análisis en laboratorio de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-4 y la Tabla 4-5. De la Figura 4-9 a la Figura 4-16 se muestran los gráficos de evolución temporal. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

Tabla 4-4: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sep. 22	Dic. 22								
CE (µS/cm)	4.391	4.524	8.765	2.856	4.466	4.512	4.424	4.392	4.616	4.618
pH (u pH)	7,87	7,88	7,76	8,62	7,87	7,90	7,82	7,83	7,81	7,81

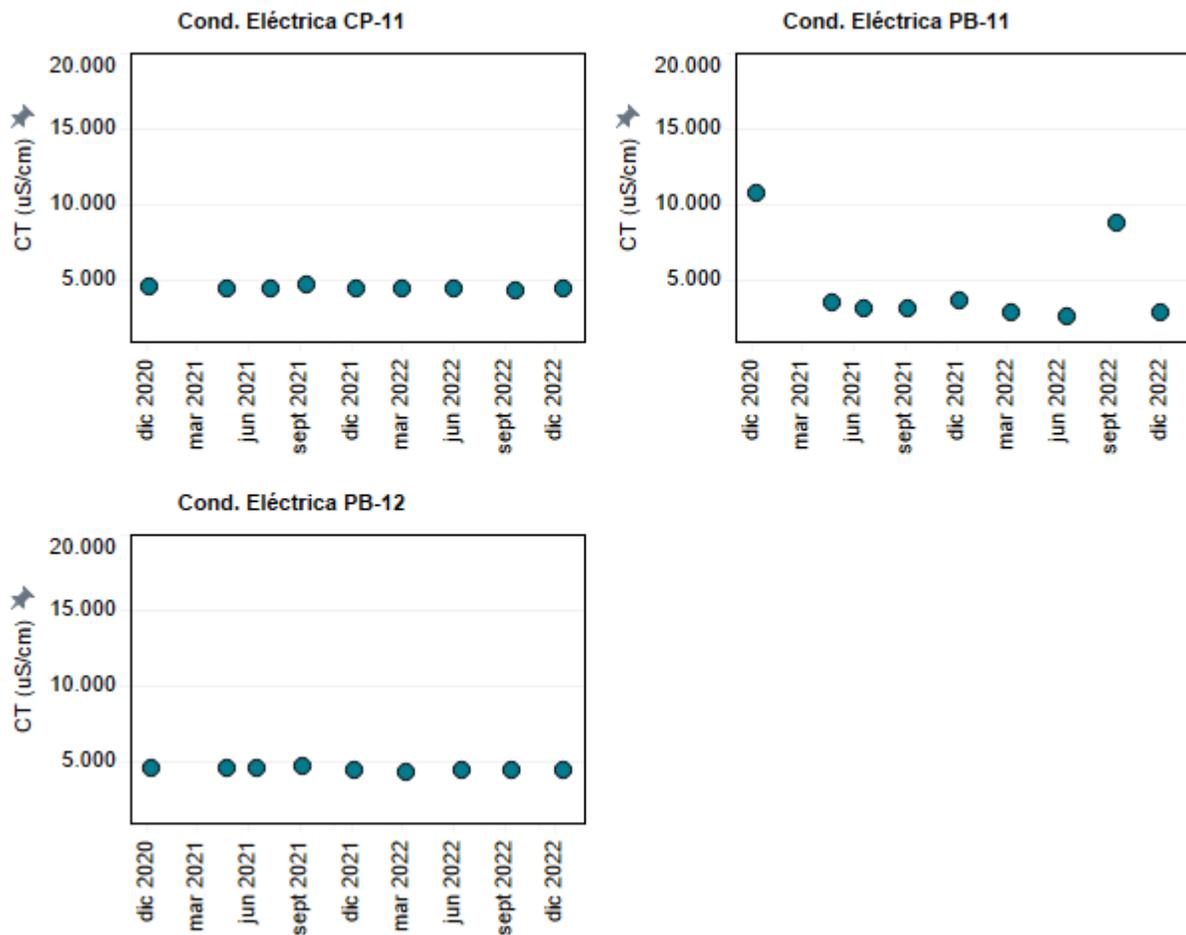


Figura 4-9: Evolución temporal de Conductividad eléctrica (µS/cm).

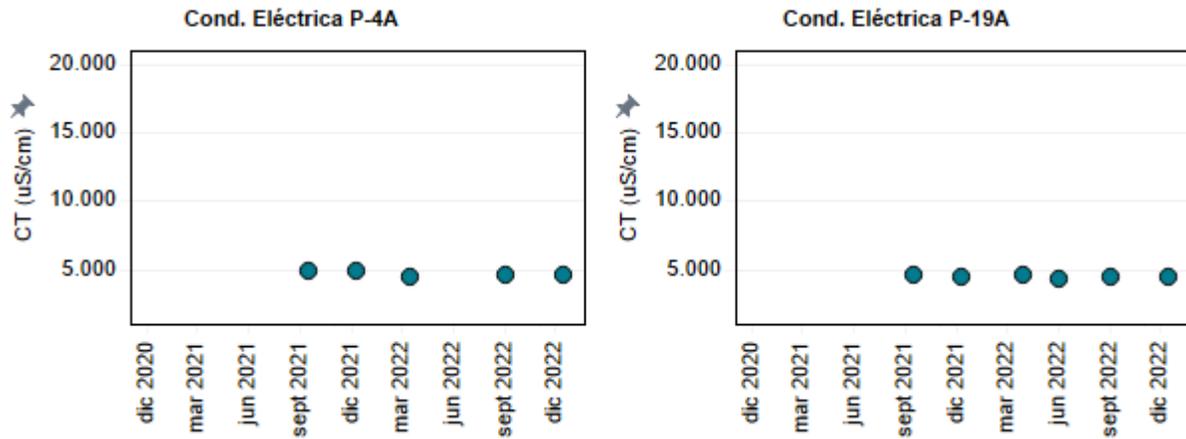


Figura 4-10: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

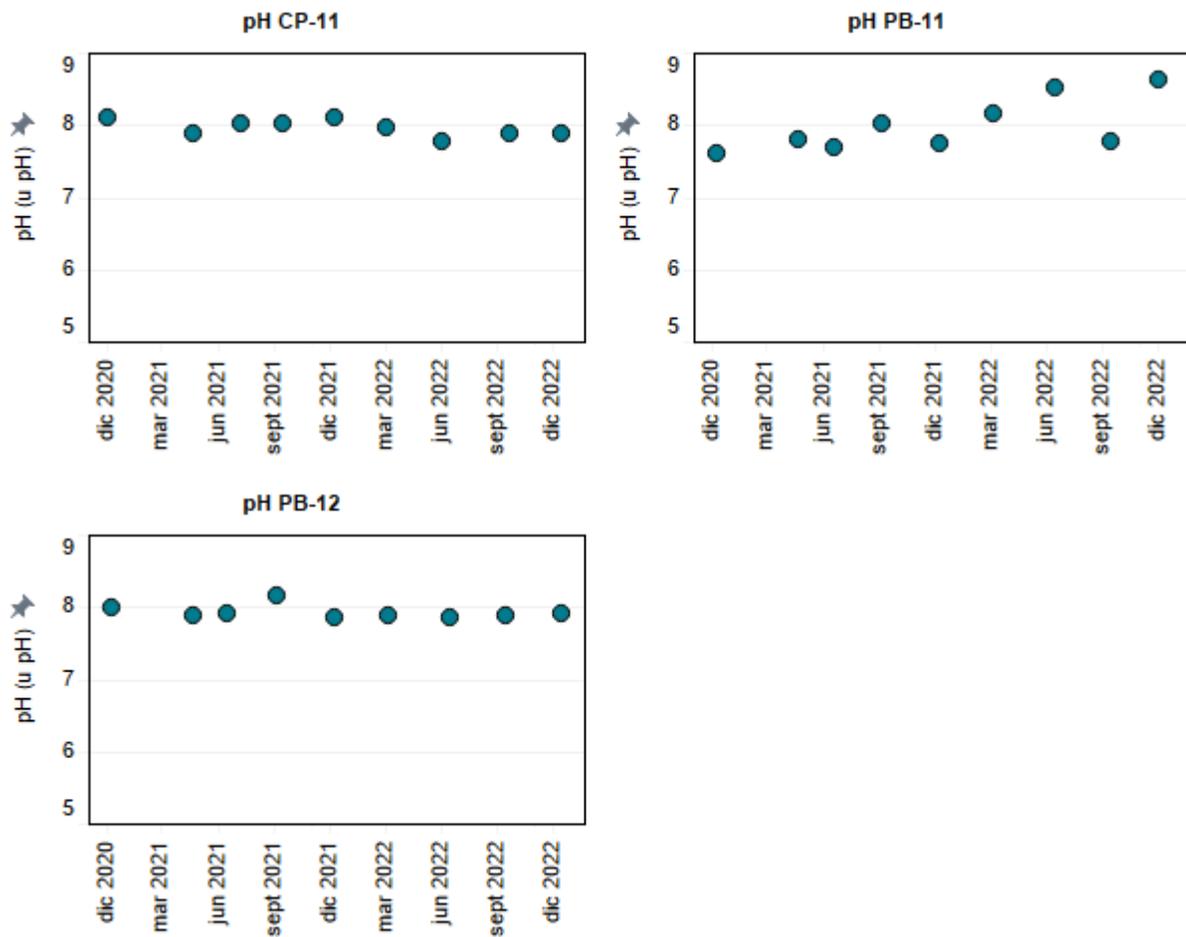


Figura 4-11: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

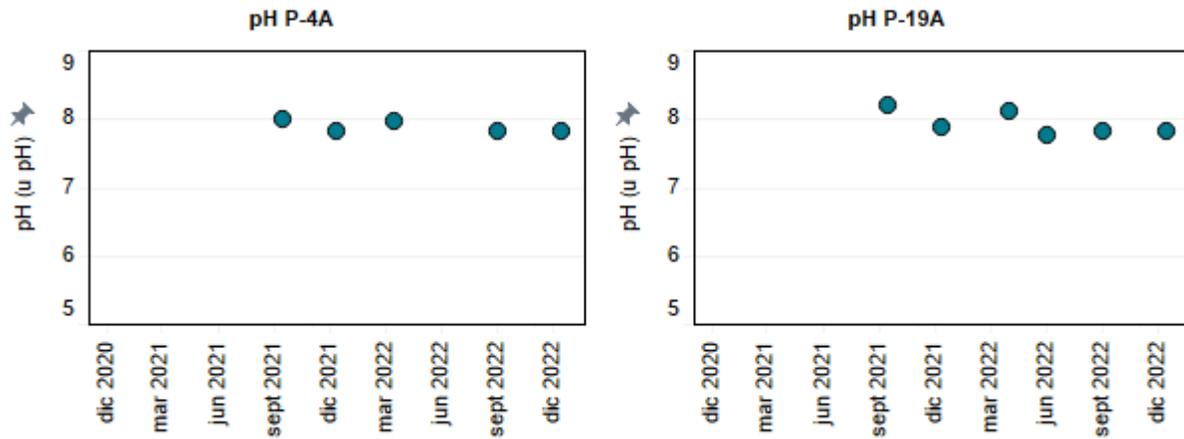


Figura 4-12: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

Tabla 4-5: Mediciones fisicoquímicas de laboratorio en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
CE (μS/cm)	(*)	6.173	15.891	6.039	7.348	7.496
pH (u pH)	(*)	7,26	7,42	7,82	7,69	7,62
Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
CE (μS/cm)	(*)	8.166	(*)	(**)	5.710	(**)
pH (u pH)	(*)	7,94	(*)	(**)	7,86	(**)

(*): Punto congelado.

(**): Sin acceso.

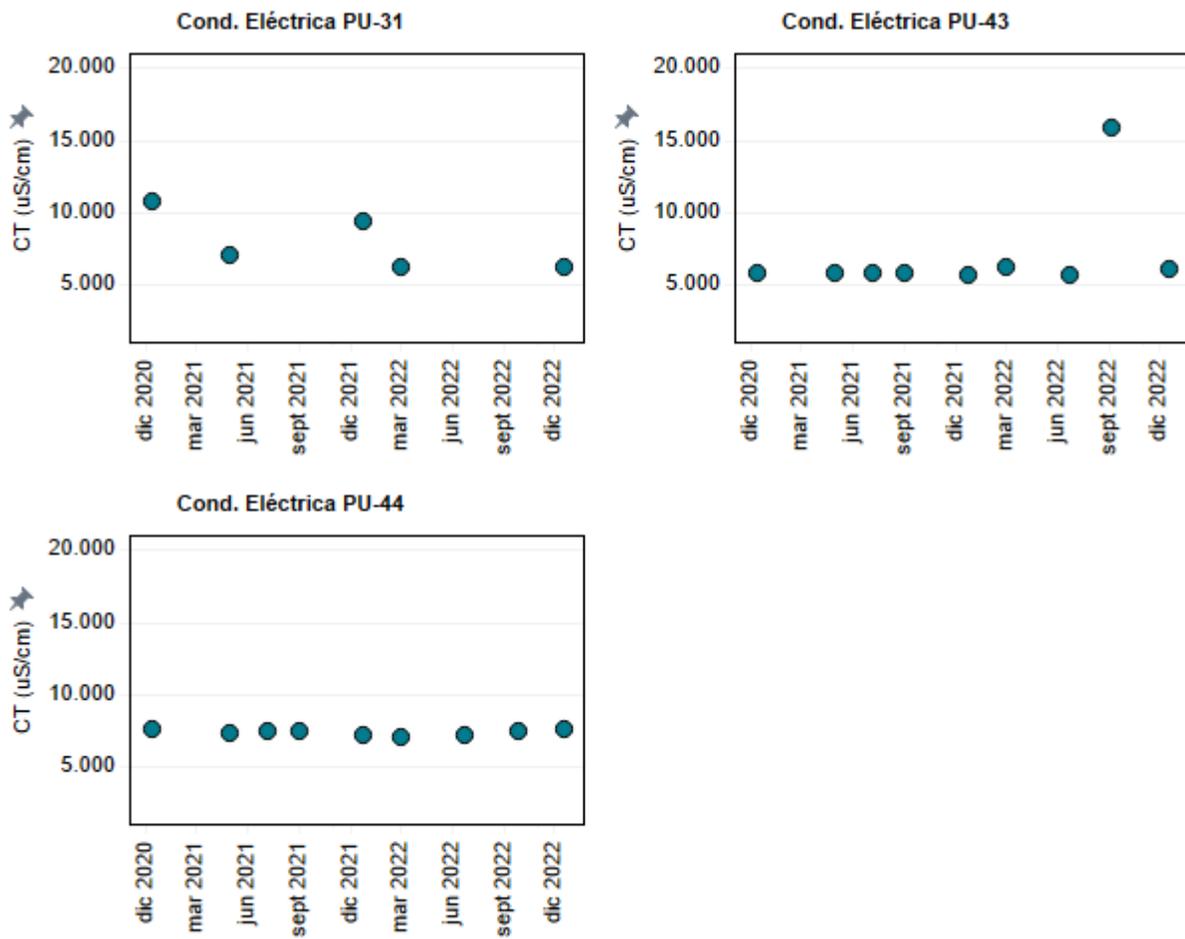


Figura 4-13: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

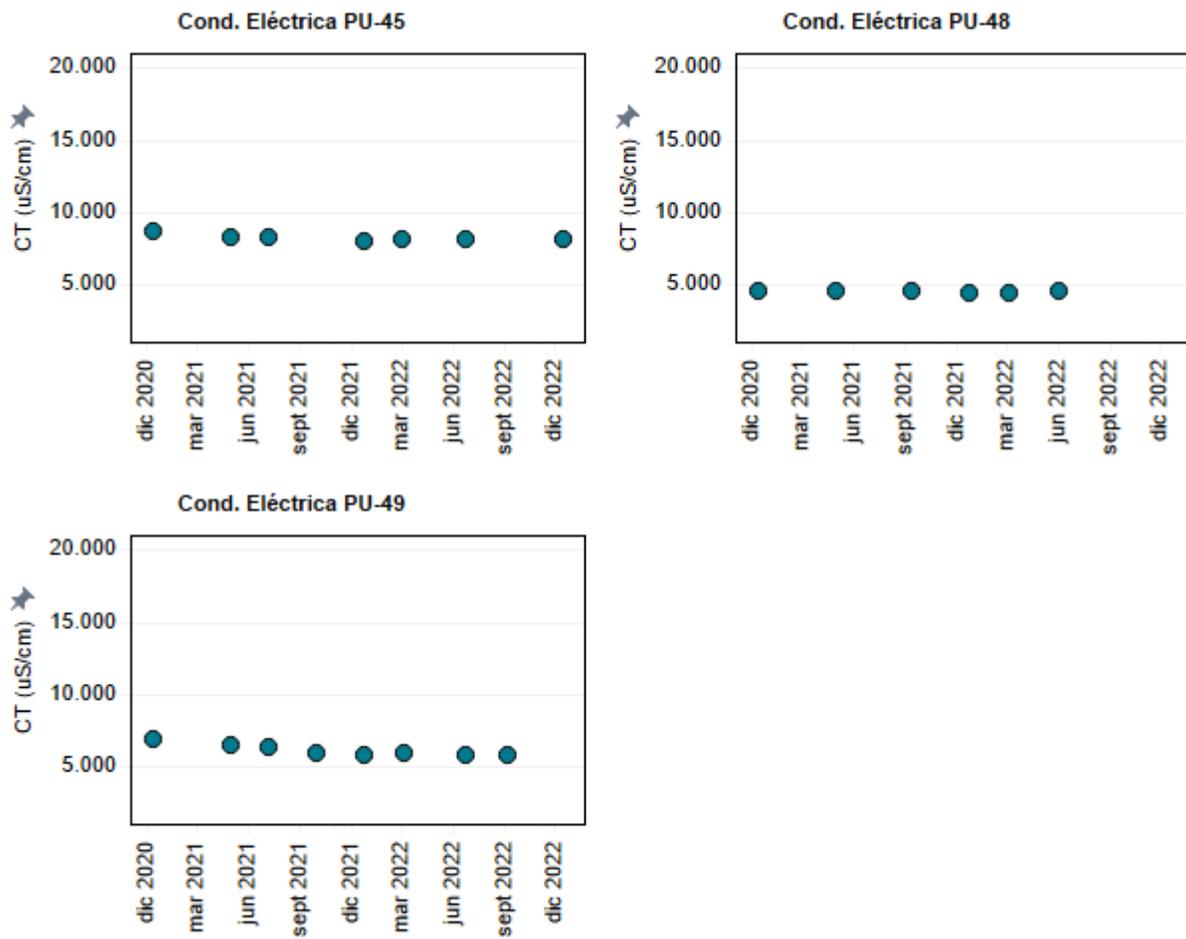


Figura 4-14: Evolución temporal de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$).

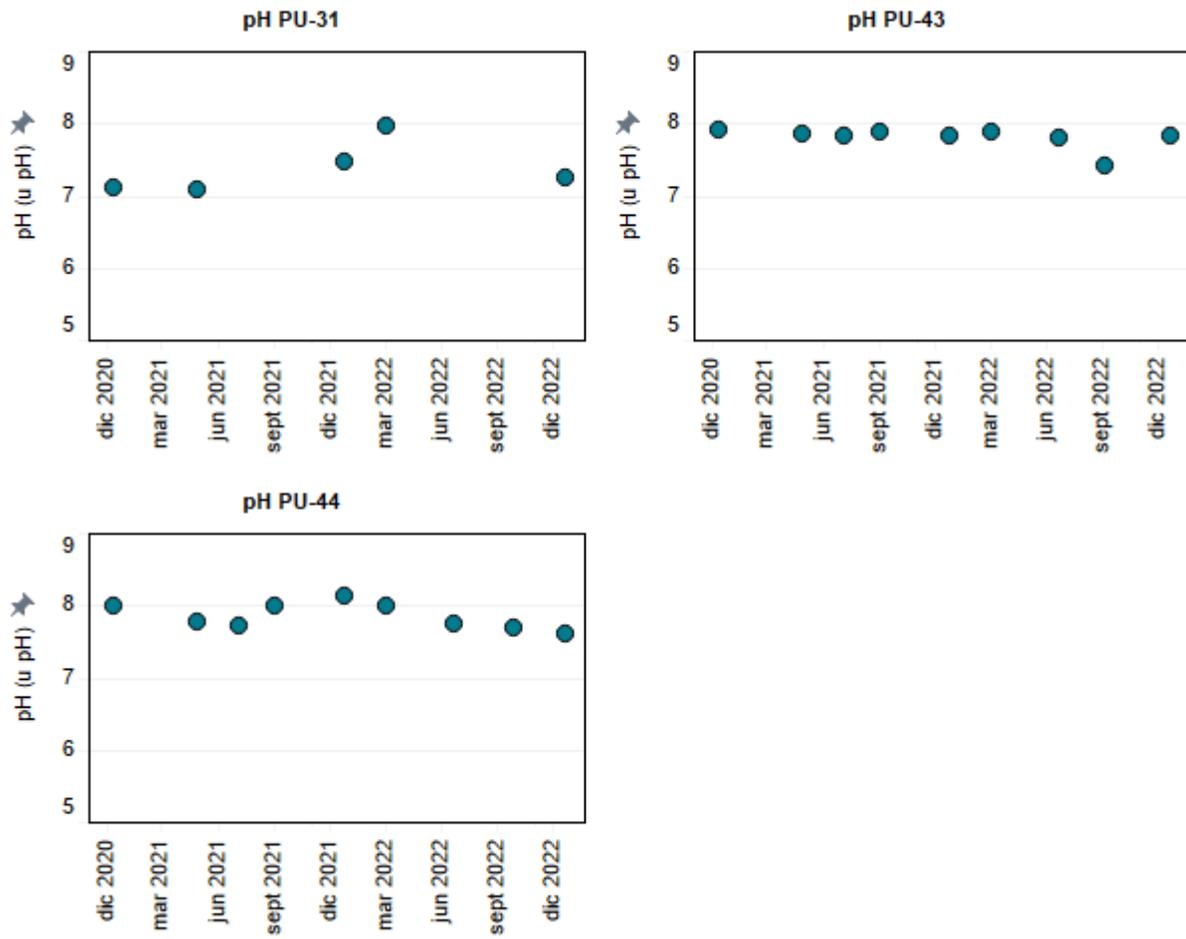


Figura 4-15: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

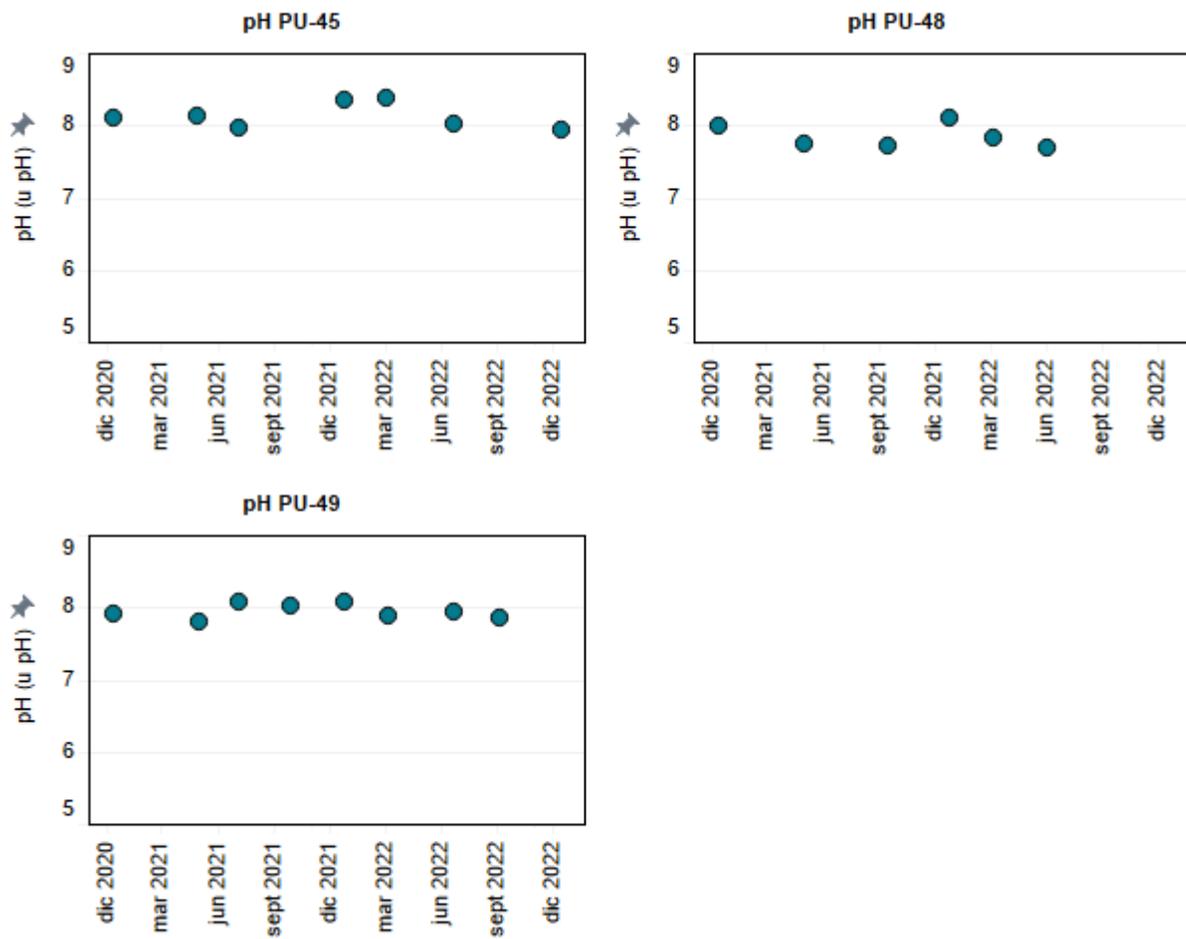


Figura 4-16: Evolución temporal de pH (unidades de pH).

4.4 Cationes – aniones disueltos

Los resultados de los cationes y aniones disueltos obtenidos del análisis en laboratorio de los pozos y punteras son presentados en la Tabla 4-6 y Tabla 4-7. De la Figura 4-17 a la Figura 4-48 se muestra la evolución temporal de los resultados. Los datos se presentan adjuntos en el Anexo C en el formato que la SMA exige.

Tabla 4-6: Mediciones de cationes y aniones disueltos en pozos realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	CP-11		PB-11		PB-12		P-19a		P-4a	
	Sep. 22	Dic. 22								
Calcio (mg/l)	134	144	264	38	127	144	112	154	141	155
Magnesio (mg/l)	39,8	49,9	78,7	16,9	39,9	49,6	33,5	51,5	98,8	52,6
Potasio (mg/l)	41,1	59,4	66,0	33,1	45,3	59,5	37,0	59,5	149,0	61,3
Sodio (mg/l)	633	721	1.111	604	618	727	550	758	609	748
Bicarbonato (mg/l)	113	112	88,1	107	116	115	107	109	113	116
Cloruro (mg/l)	1.203	1.286	2.758	527	1.236	1.321	1.190	1.212	1.275	1.288
Nitrato (mg/l)	6,73	5,48	0,96	4,16	6,04	4,78	5,57	5,75	7,88	7,00
Sulfato (mg/l)	354	332	343	493	317	319	304	313	310	314

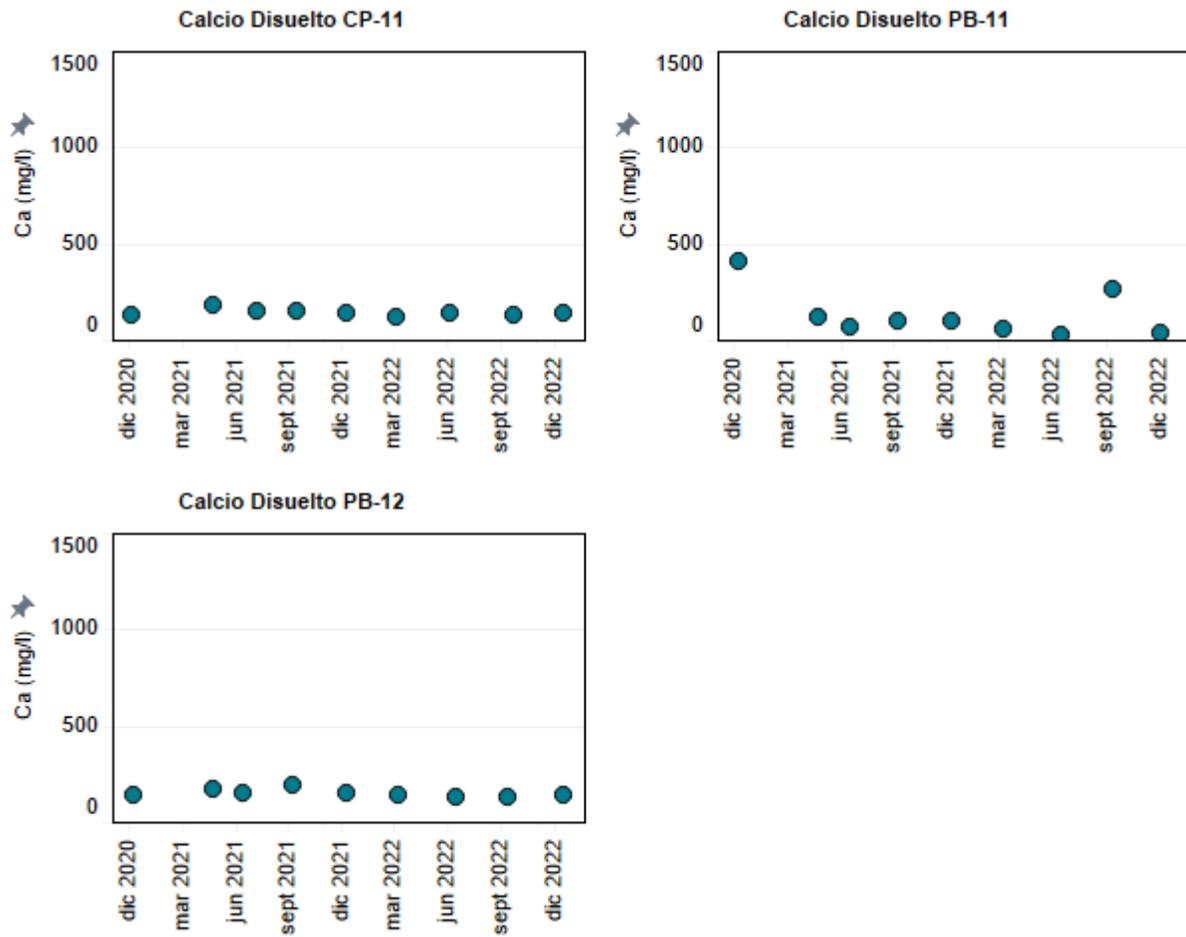


Figura 4-17: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

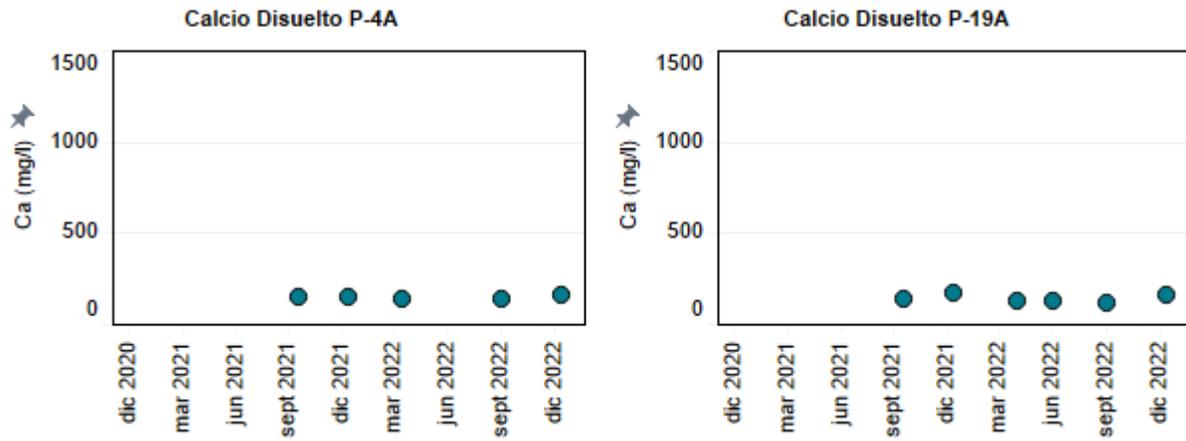


Figura 4-18: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

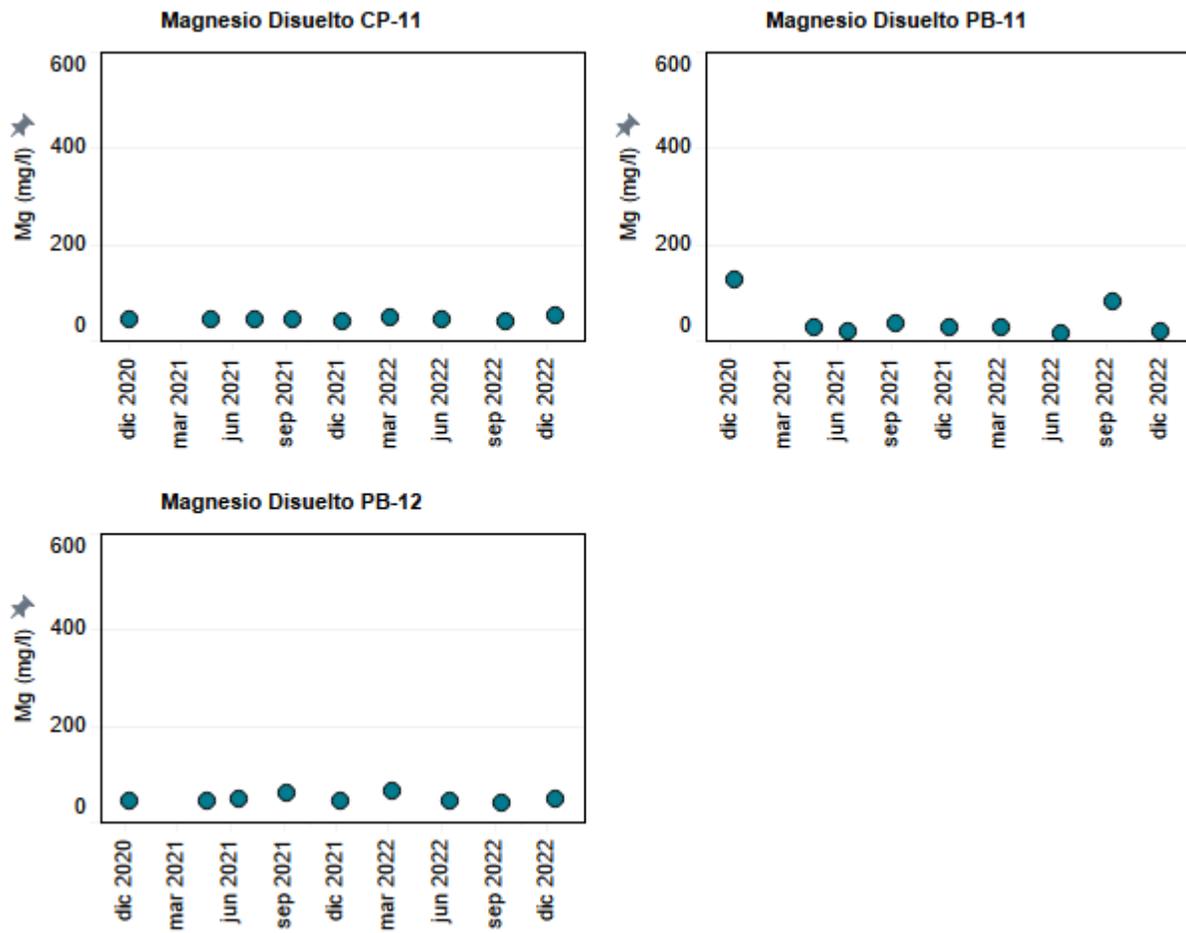


Figura 4-19: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

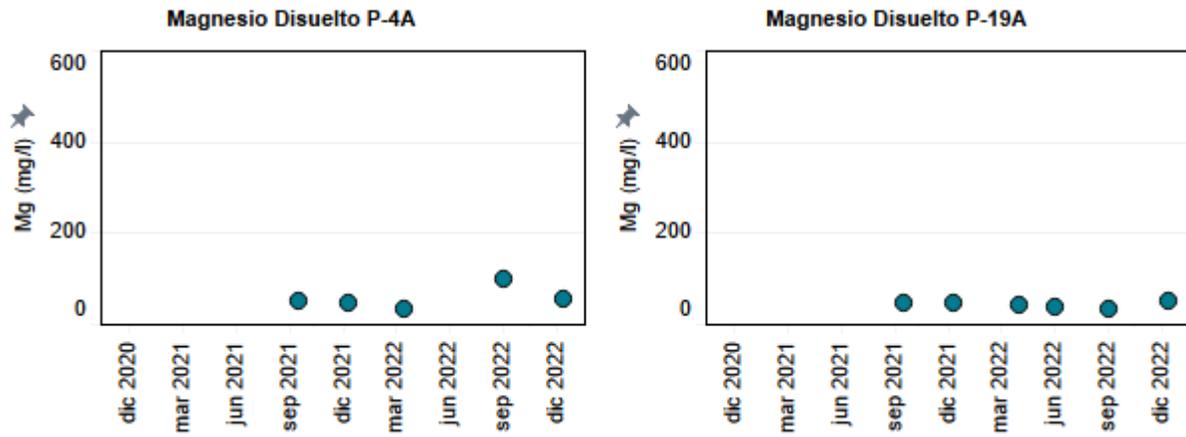


Figura 4-20: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

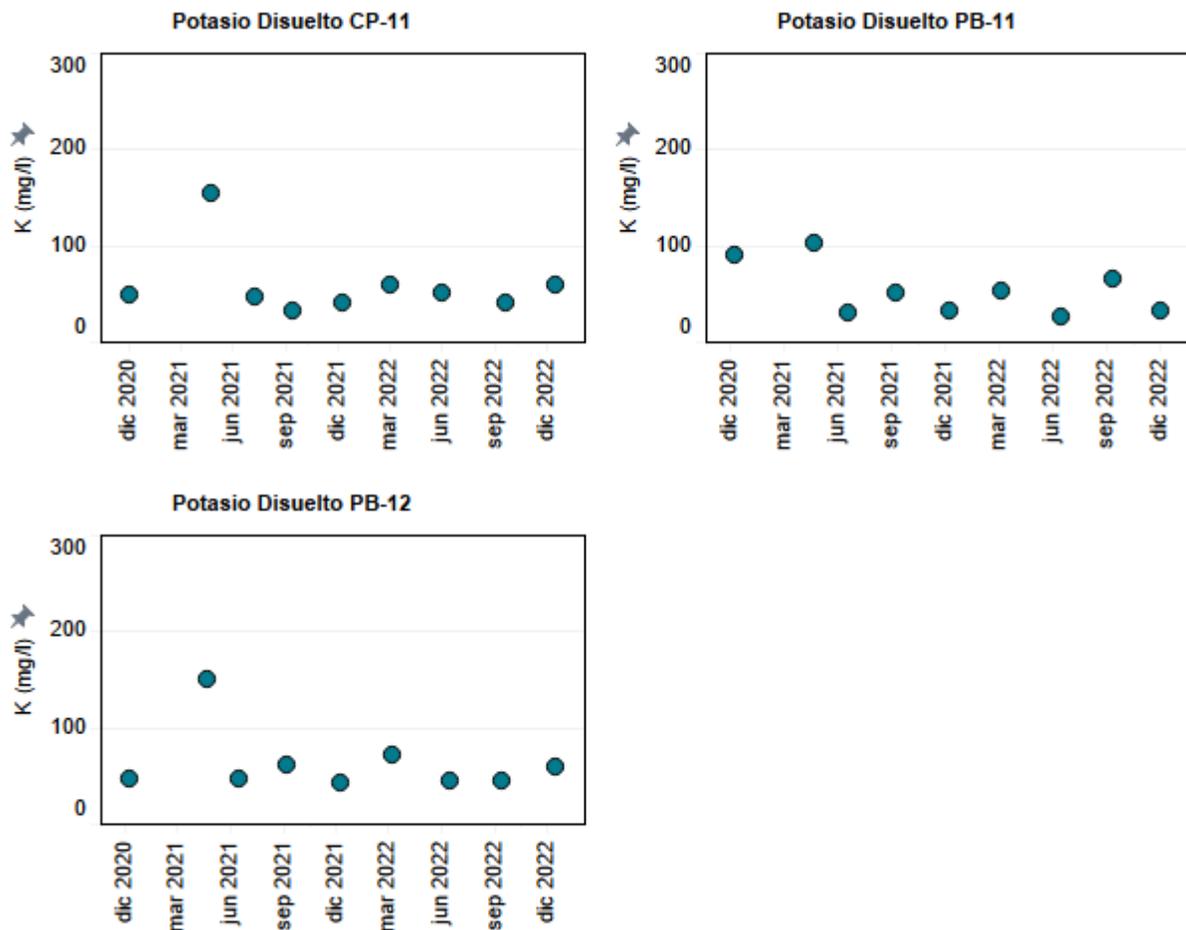


Figura 4-21: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

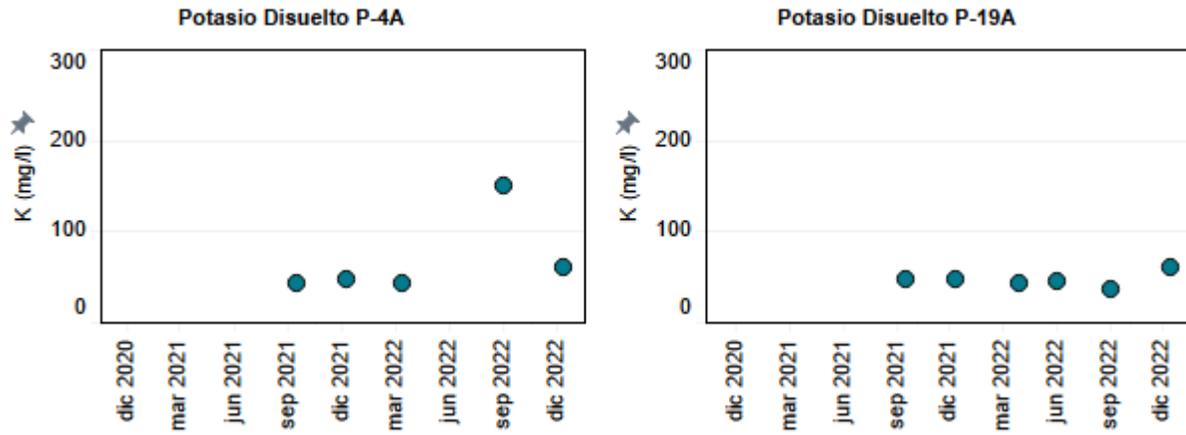


Figura 4-22: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

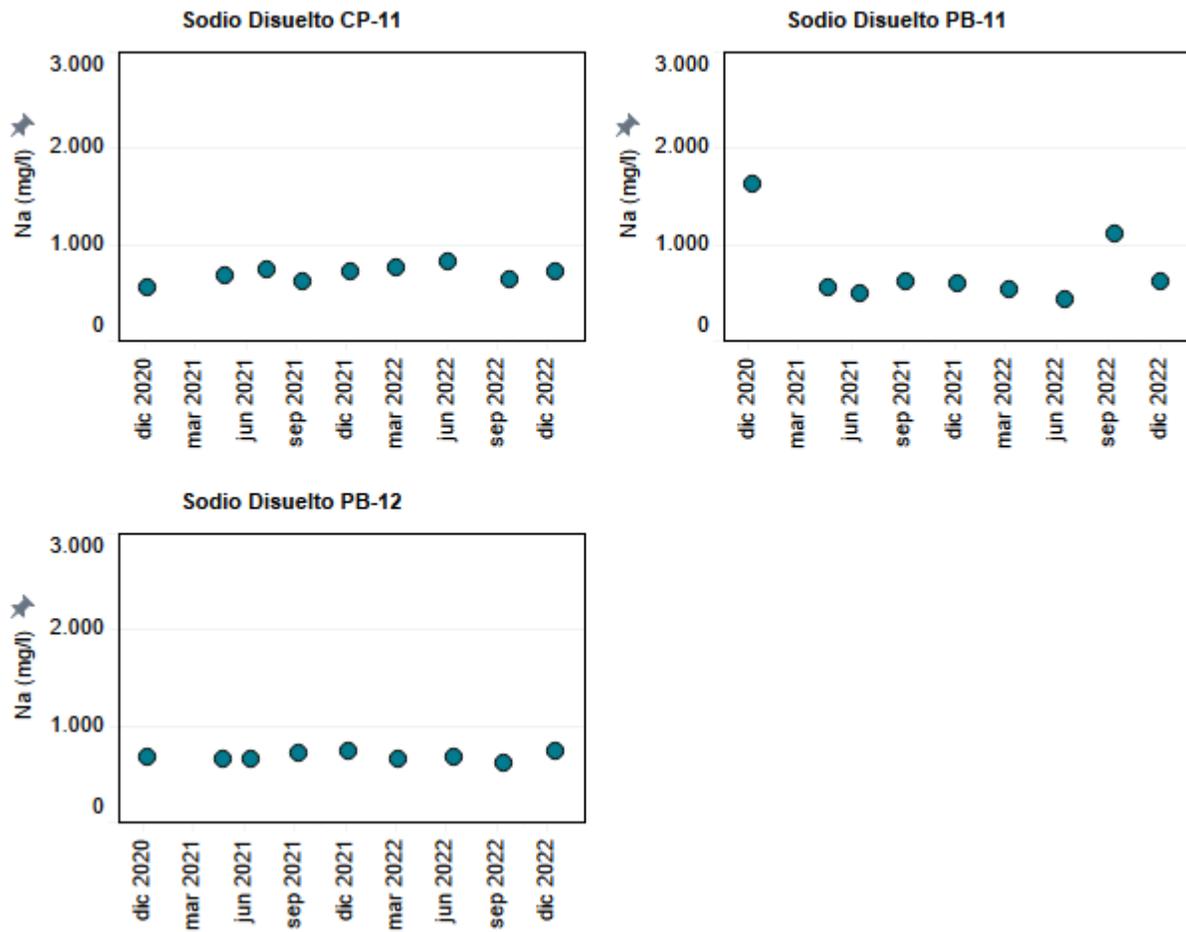


Figura 4-23: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

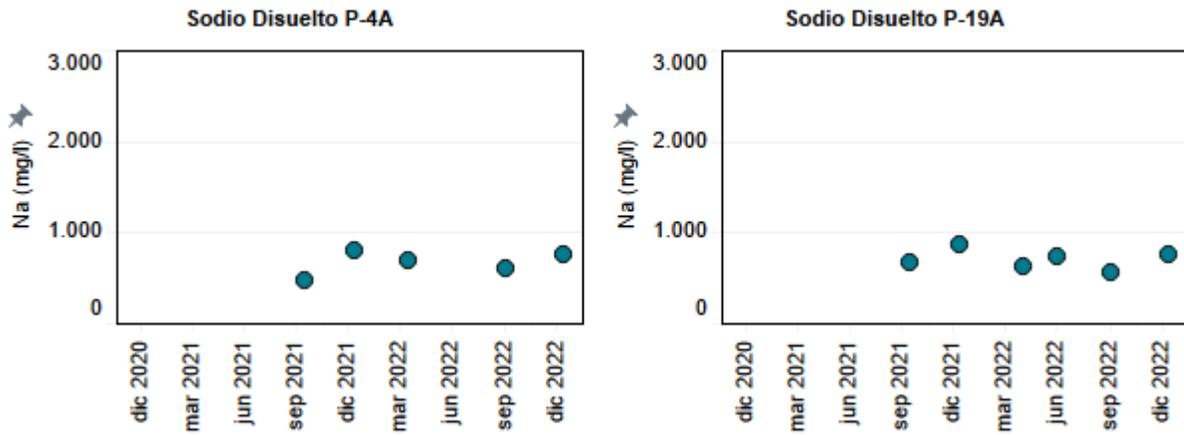


Figura 4-24: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

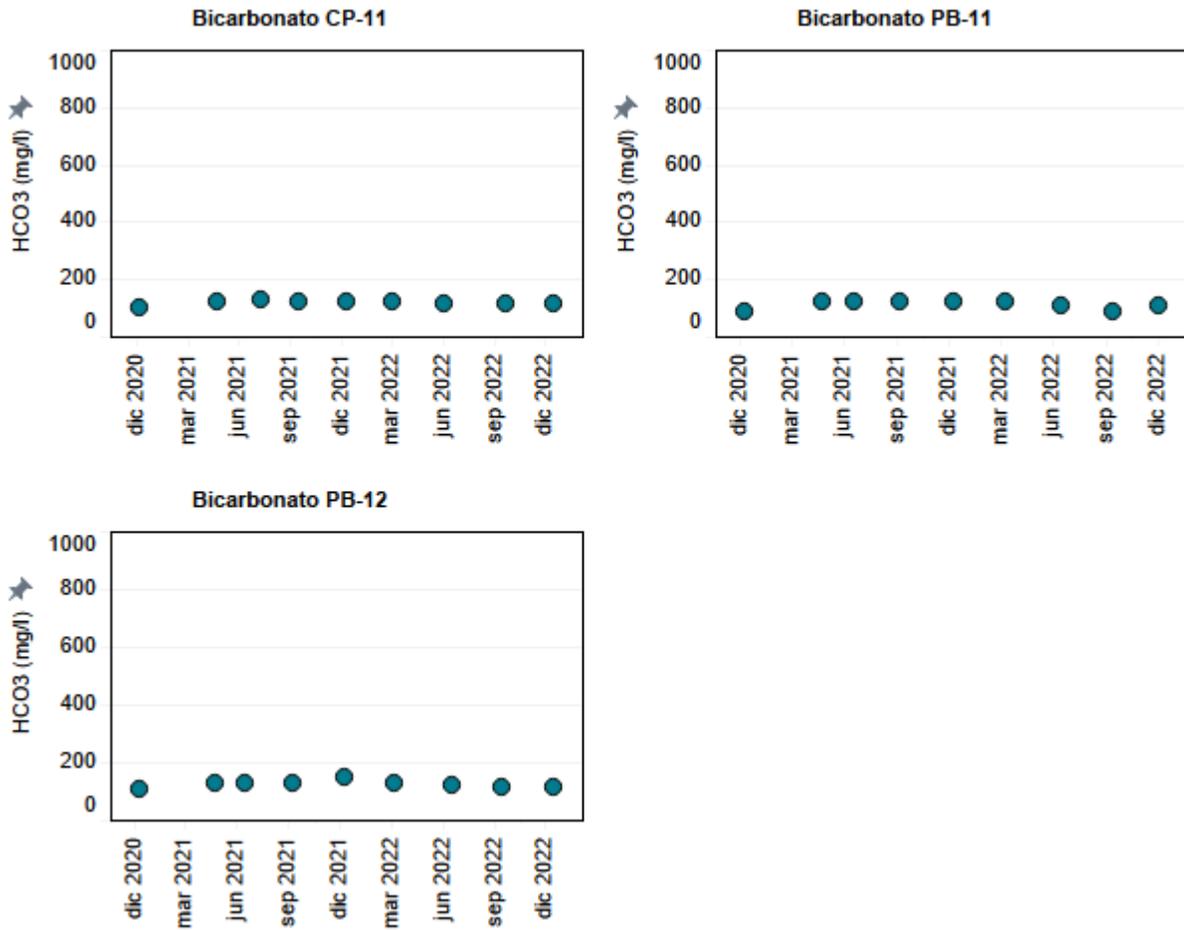


Figura 4-25: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

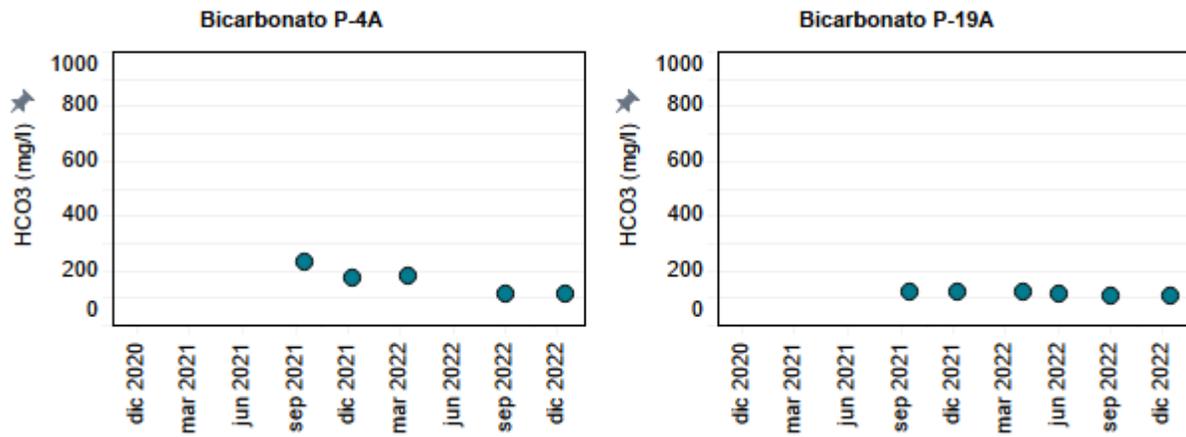


Figura 4-26: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

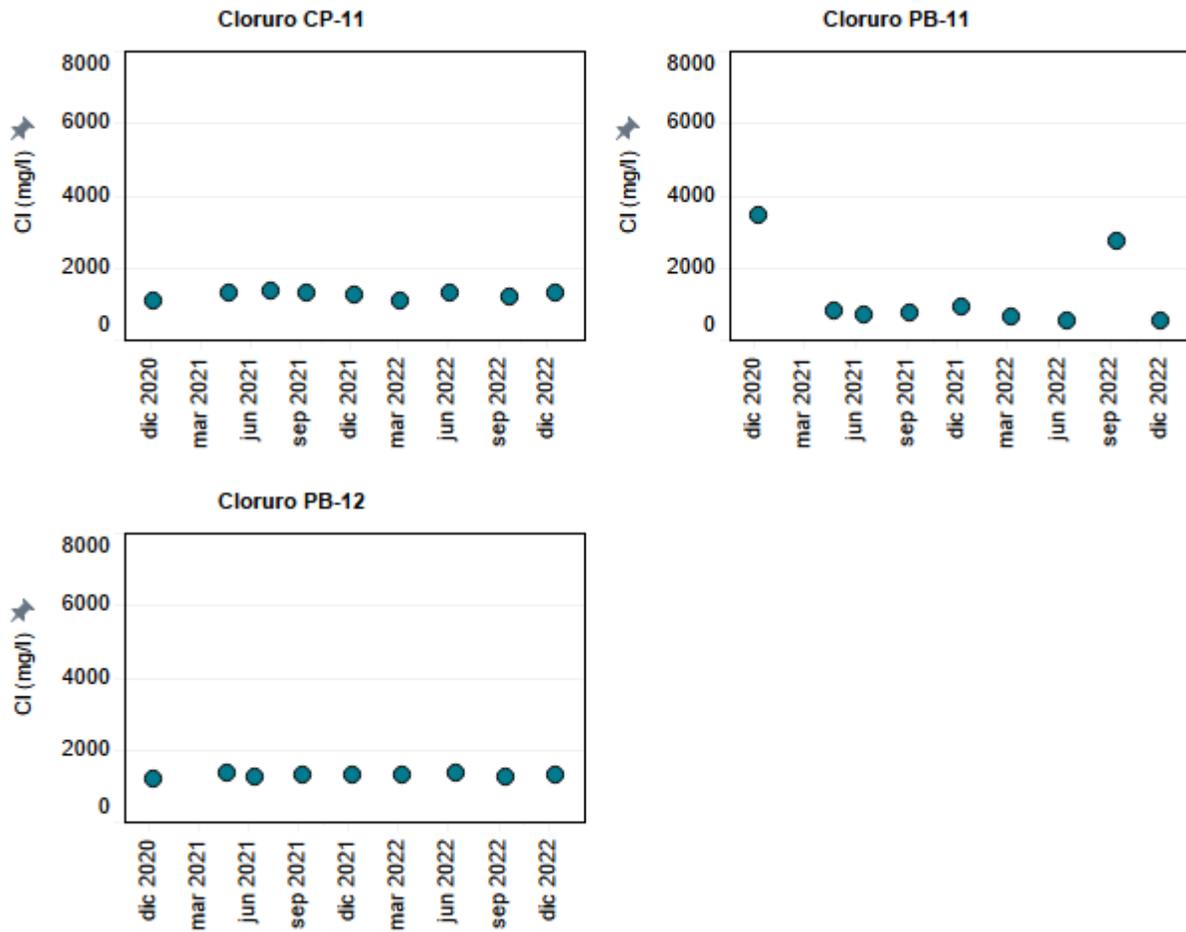


Figura 4-27: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

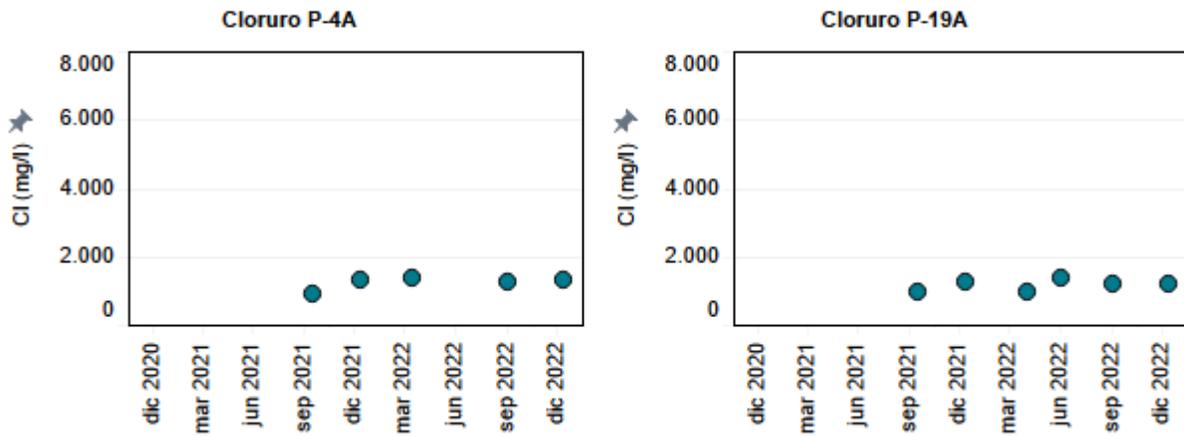


Figura 4-28: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

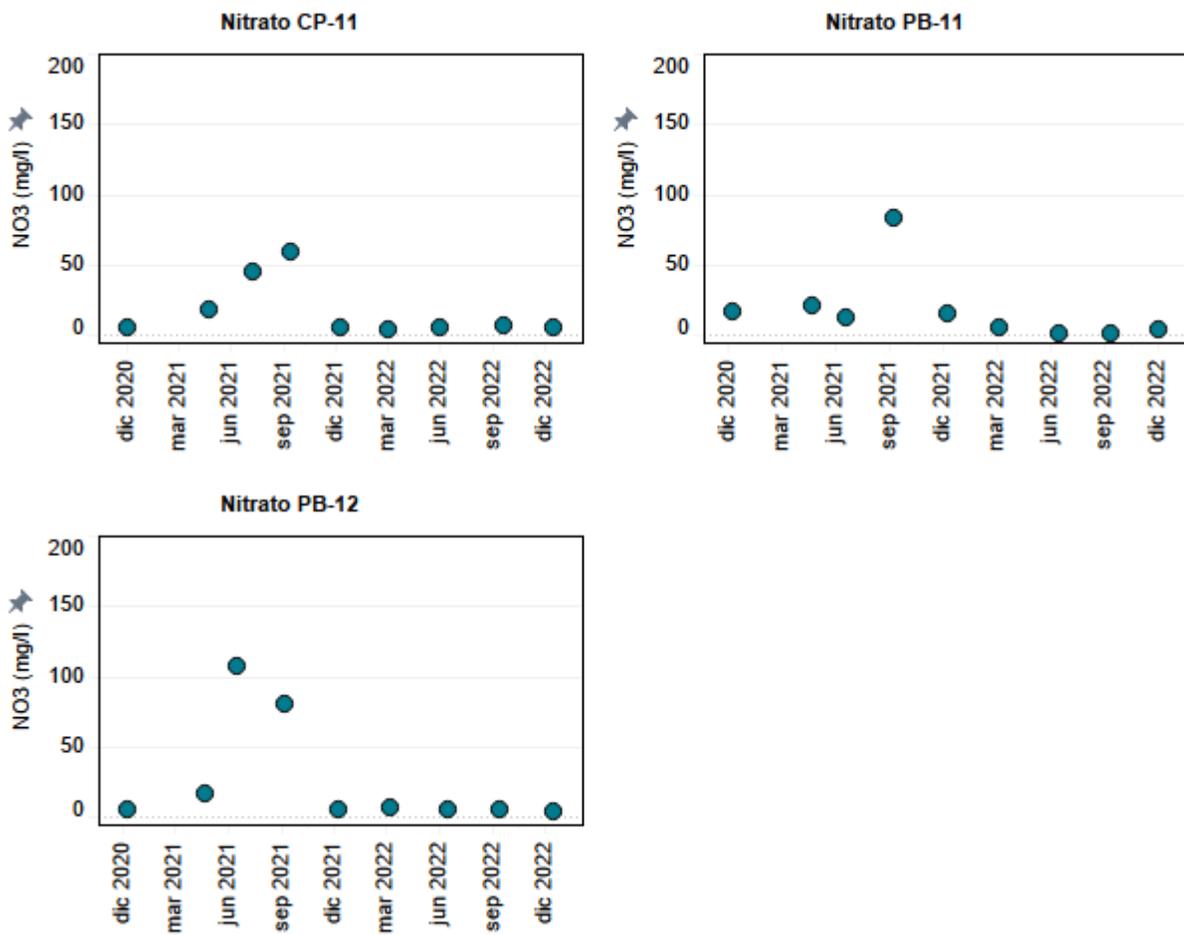


Figura 4-29: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).

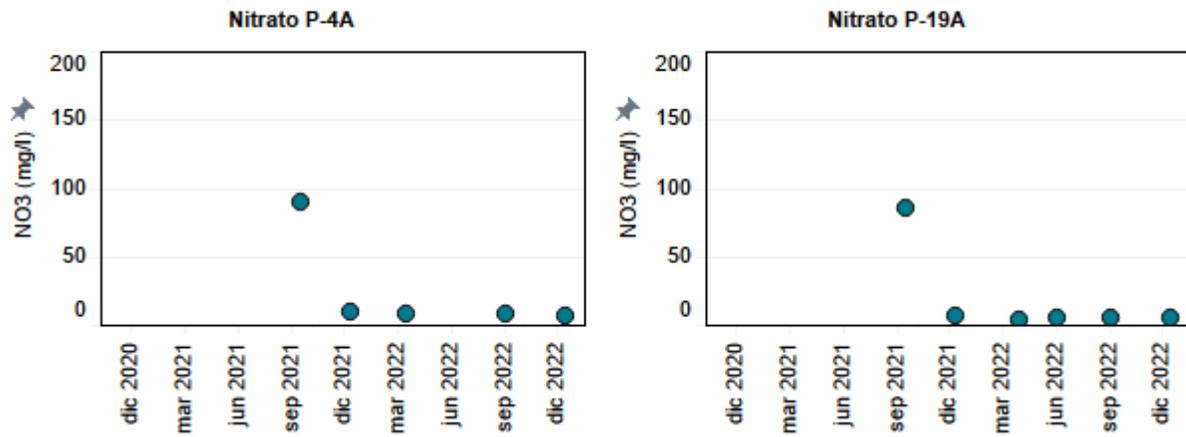


Figura 4-30: Evolución temporal de Nitrato(mg/l).

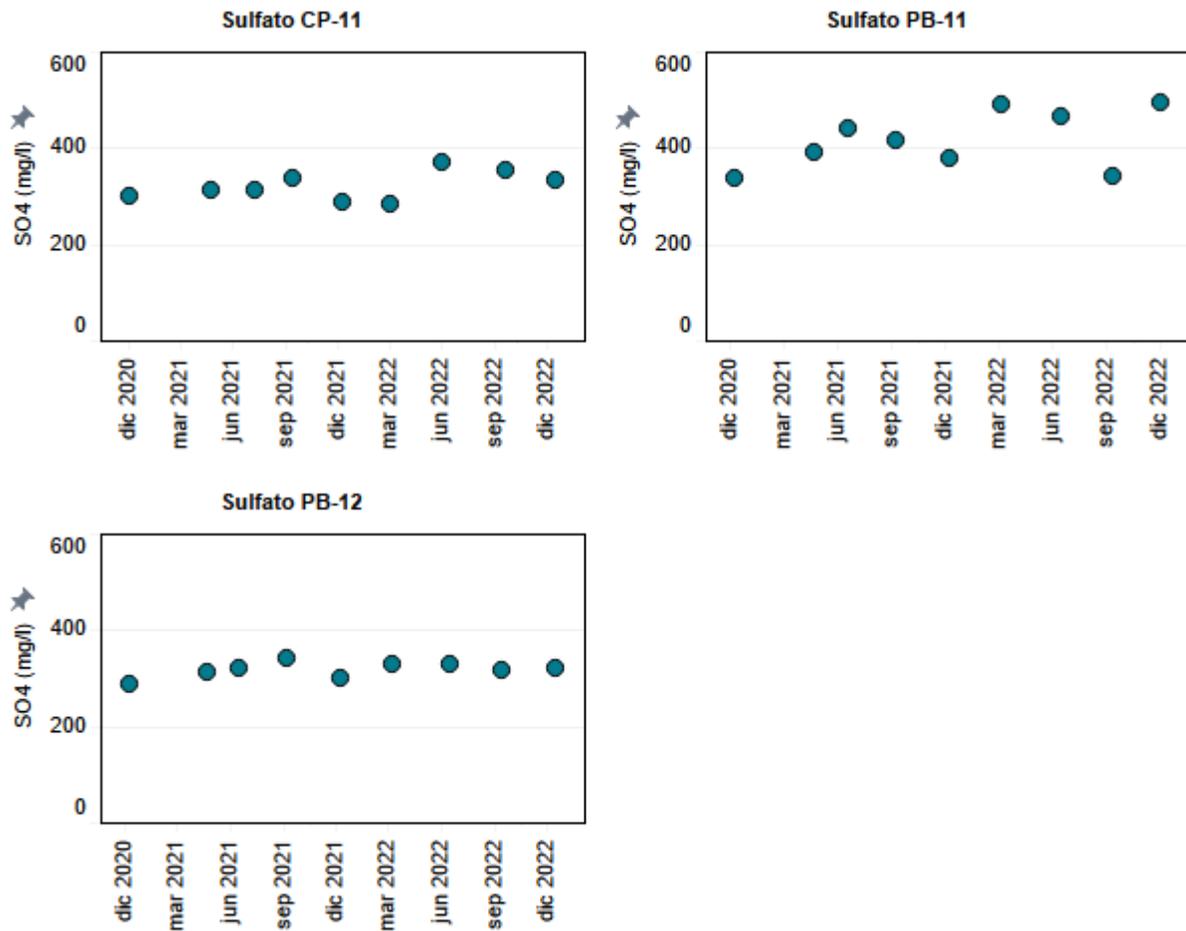


Figura 4-31: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

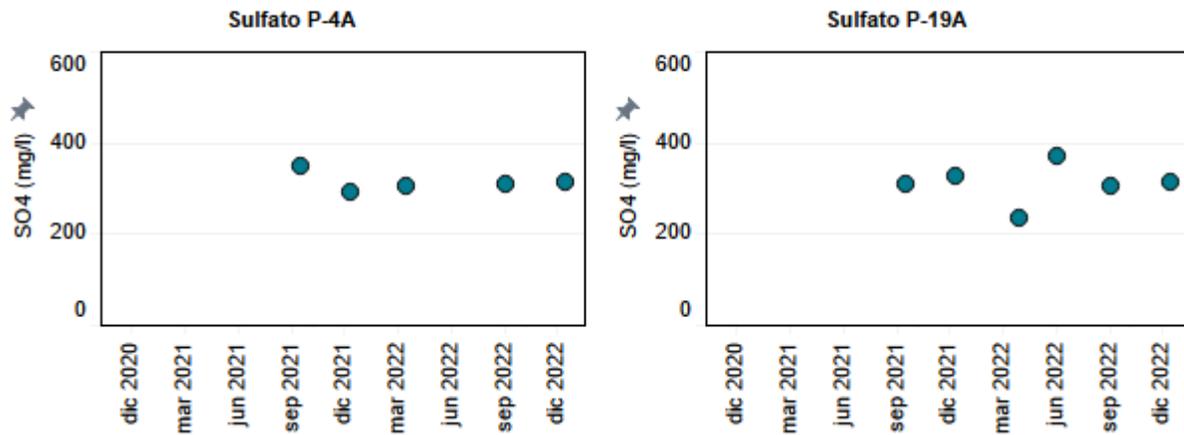


Figura 4-32: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

Tabla 4-7: Mediciones de cationes y aniones disueltos en punteras realizadas en el segundo semestre 2022.

Parámetros	PU-31		PU-43		PU-44	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
Calcio (mg/l)	(*)	117	168	823	142	197
Magnesio (mg/l)	(*)	73,5	58,9	80,1	54,5	73,5
Potasio (mg/l)	(*)	114	108	41,7	62,3	110
Sodio (mg/l)	(*)	1.057	1.509	145	1.016	1.369
Bicarbonato (mg/l)	(*)	143	88	102	145	145
Cloruro (mg/l)	(*)	1.913	2.652	1.889	2.136	2.461
Nitrato (mg/l)	(*)	< 0,20	52,2	20,3	< 0,20	2,04
Sulfato (mg/l)	(*)	361	543	357	340	330

Parámetros	PU-45		PU-48		PU-49	
	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22	Sep. 22	Dic. 22
Calcio (mg/l)	(*)	142	(*)	(**)	128	(**)
Magnesio (mg/l)	(*)	64,5	(*)	(**)	43,2	(**)
Potasio (mg/l)	(*)	113	(*)	(**)	49,9	(**)
Sodio (mg/l)	(*)	1.473	(*)	(**)	766	(**)
Bicarbonato (mg/l)	(*)	119	(*)	(**)	114	(**)
Cloruro (mg/l)	(*)	2.528	(*)	(**)	1.631	(**)
Nitrato (mg/l)	(*)	7,66	(*)	(**)	7,81	(**)
Sulfato (mg/l)	(*)	349	(*)	(**)	341	(**)

(*): Punto congelado.

(**): Sin acceso.

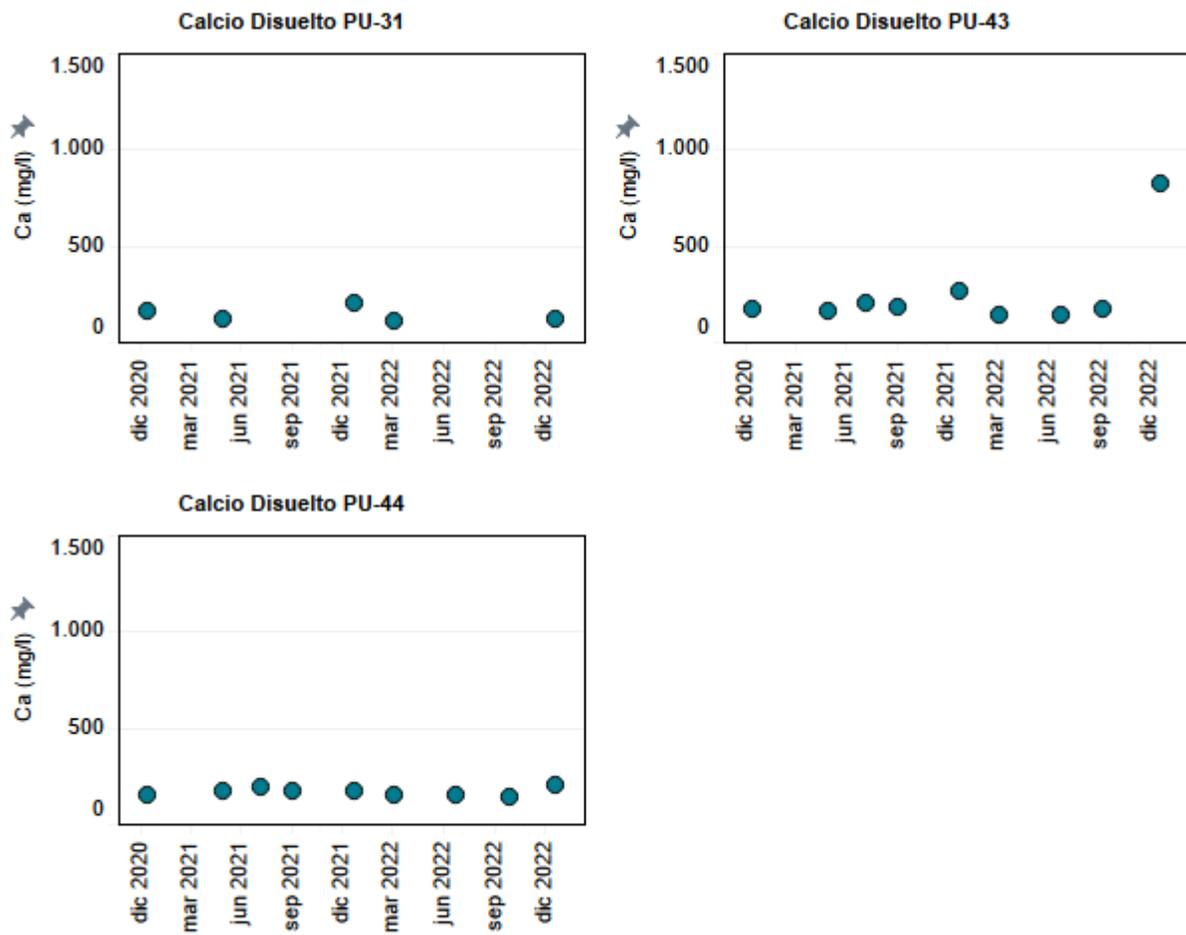


Figura 4-33: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

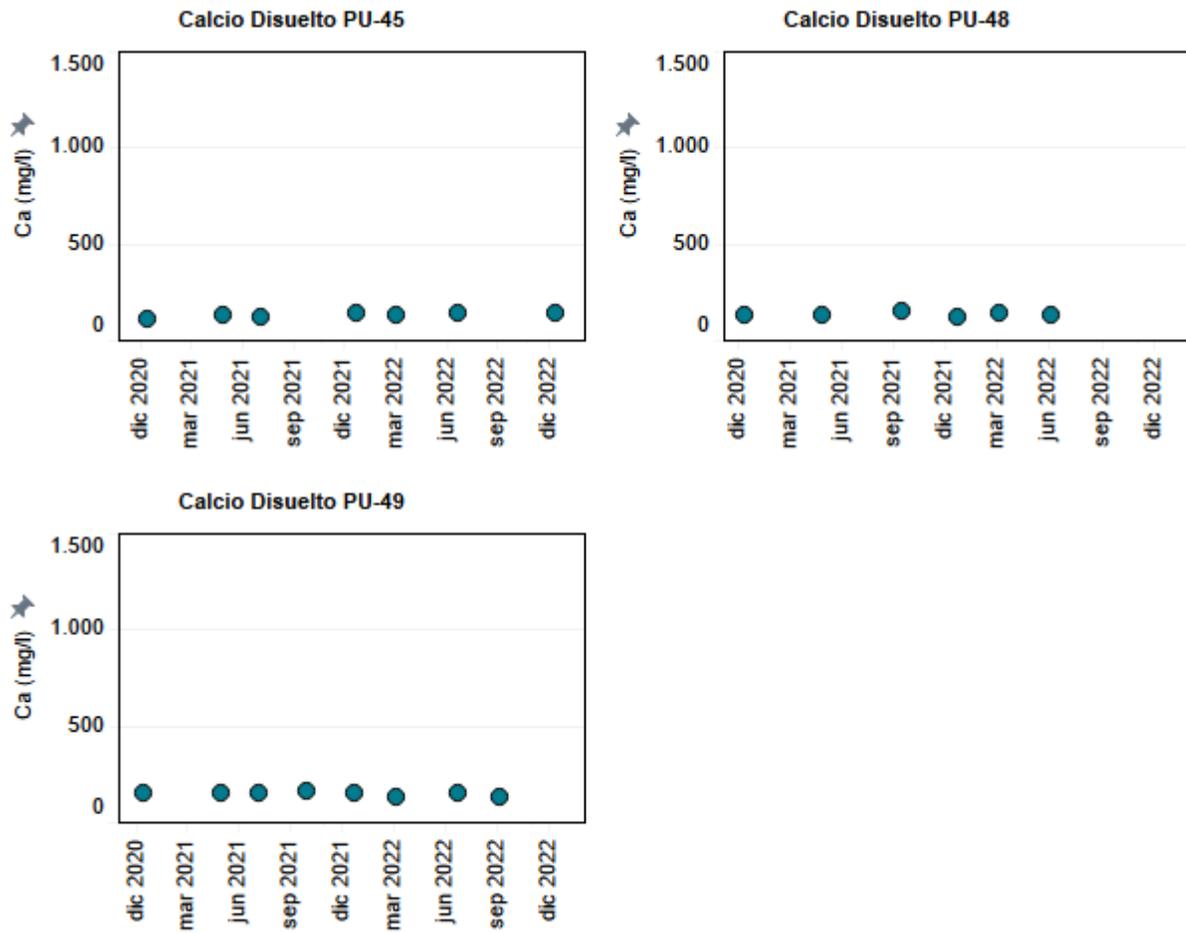


Figura 4-34: Evolución temporal de Calcio disuelto (mg/l).

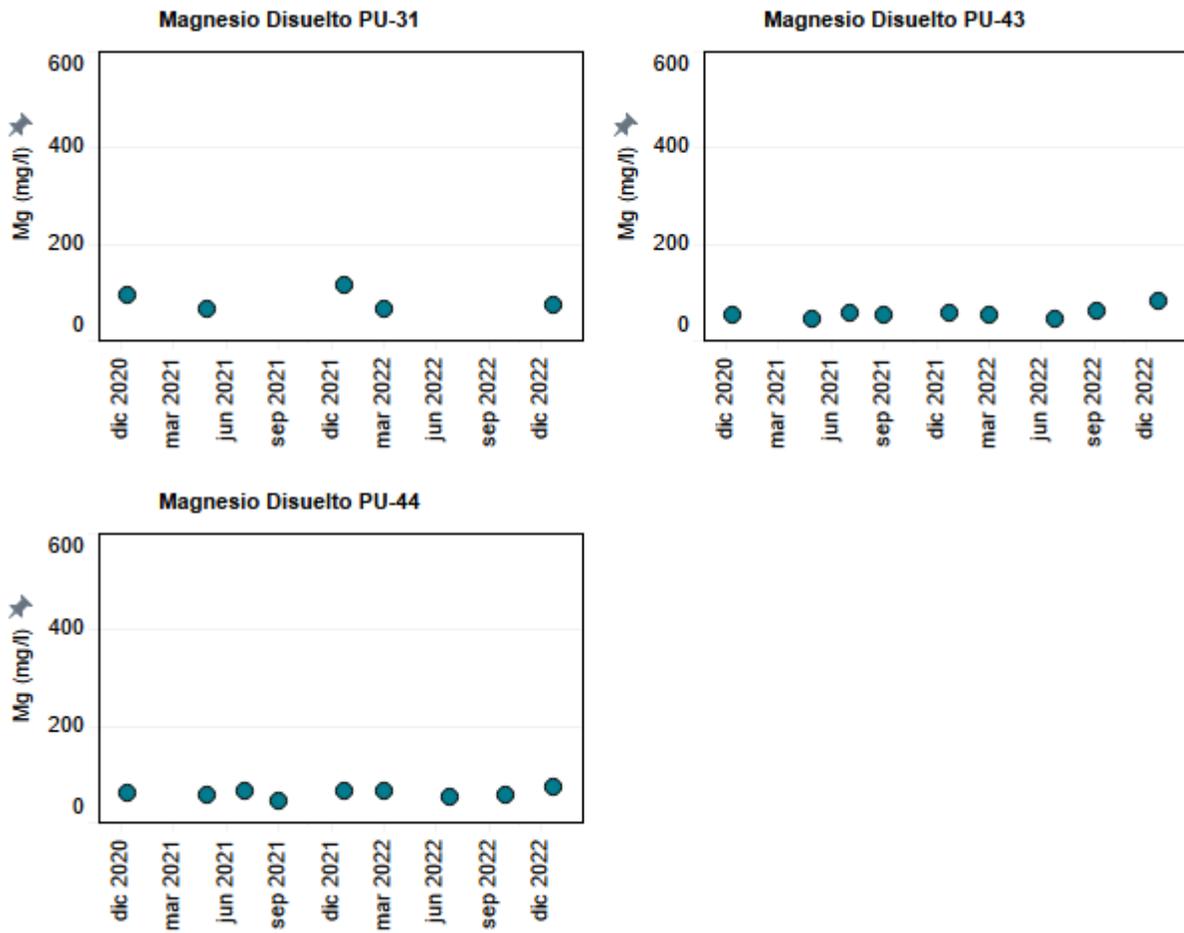


Figura 4-35: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

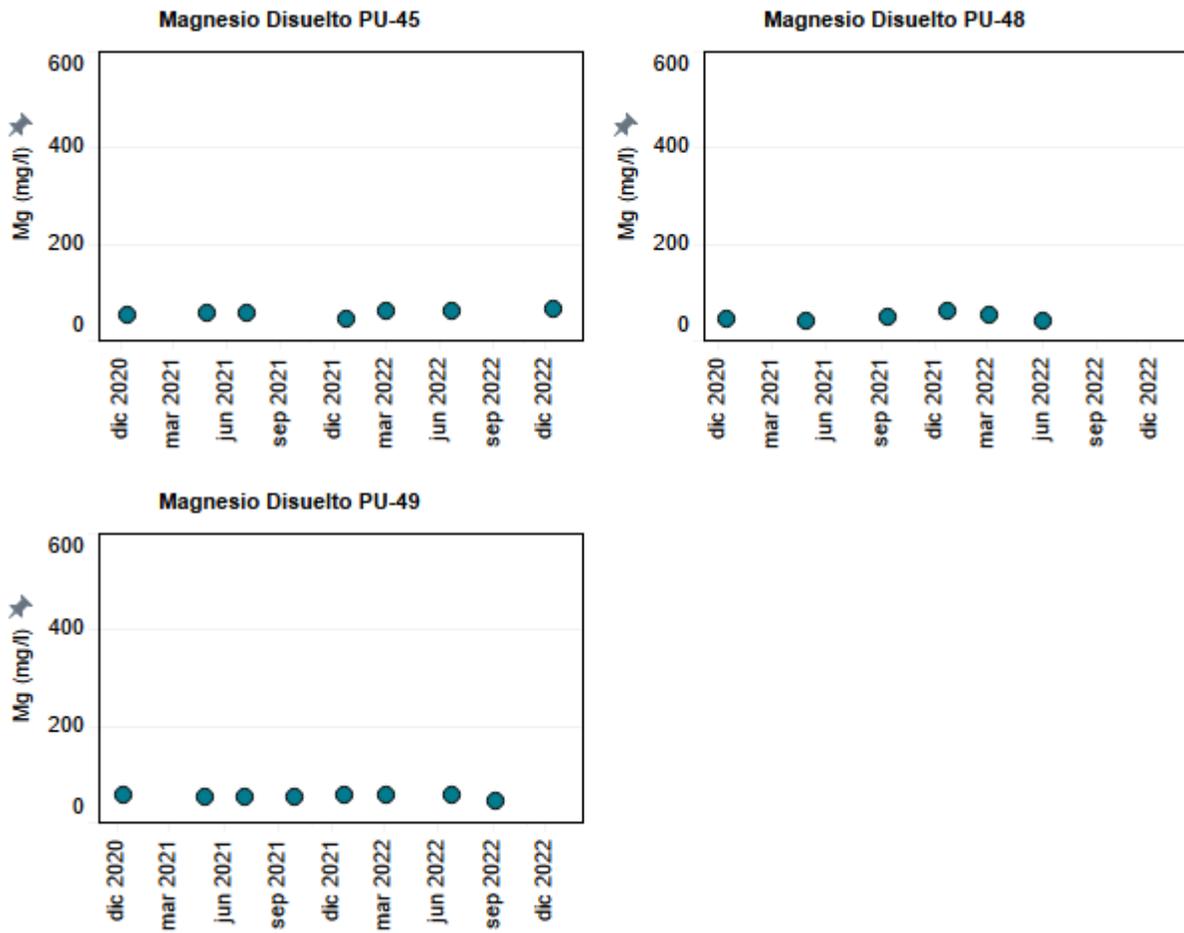


Figura 4-36: Evolución temporal de Magnesio disuelto (mg/l).

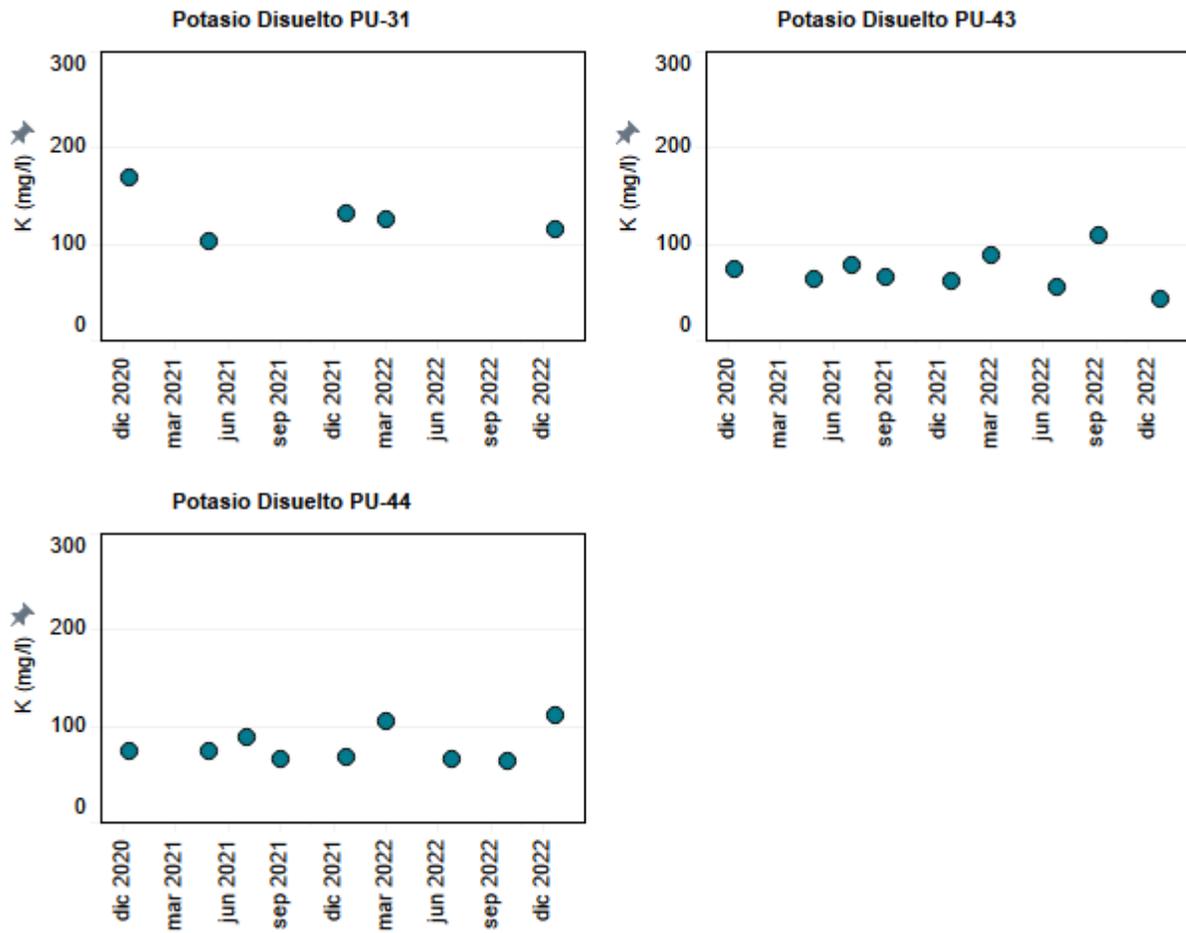


Figura 4-37: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

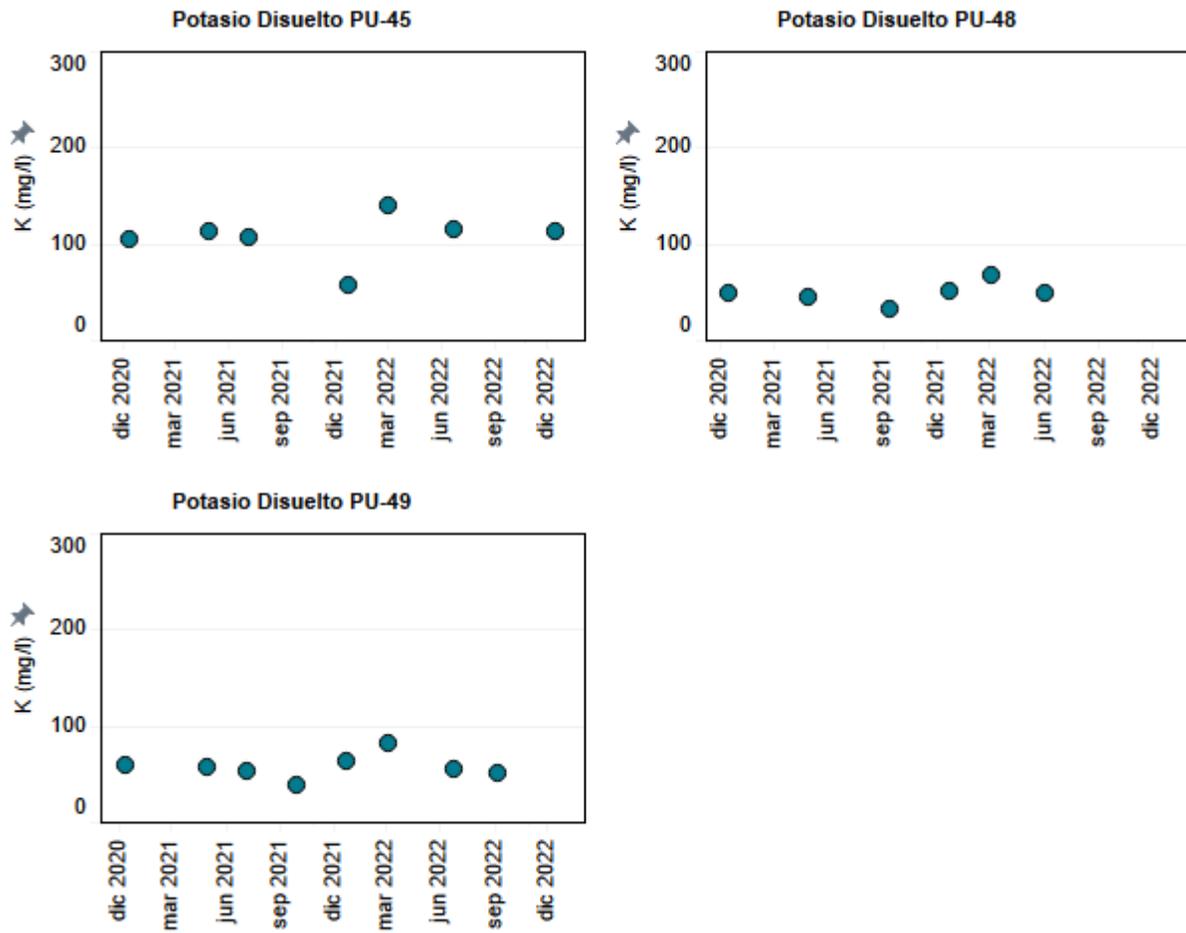


Figura 4-38: Evolución temporal de Potasio disuelto (mg/l).

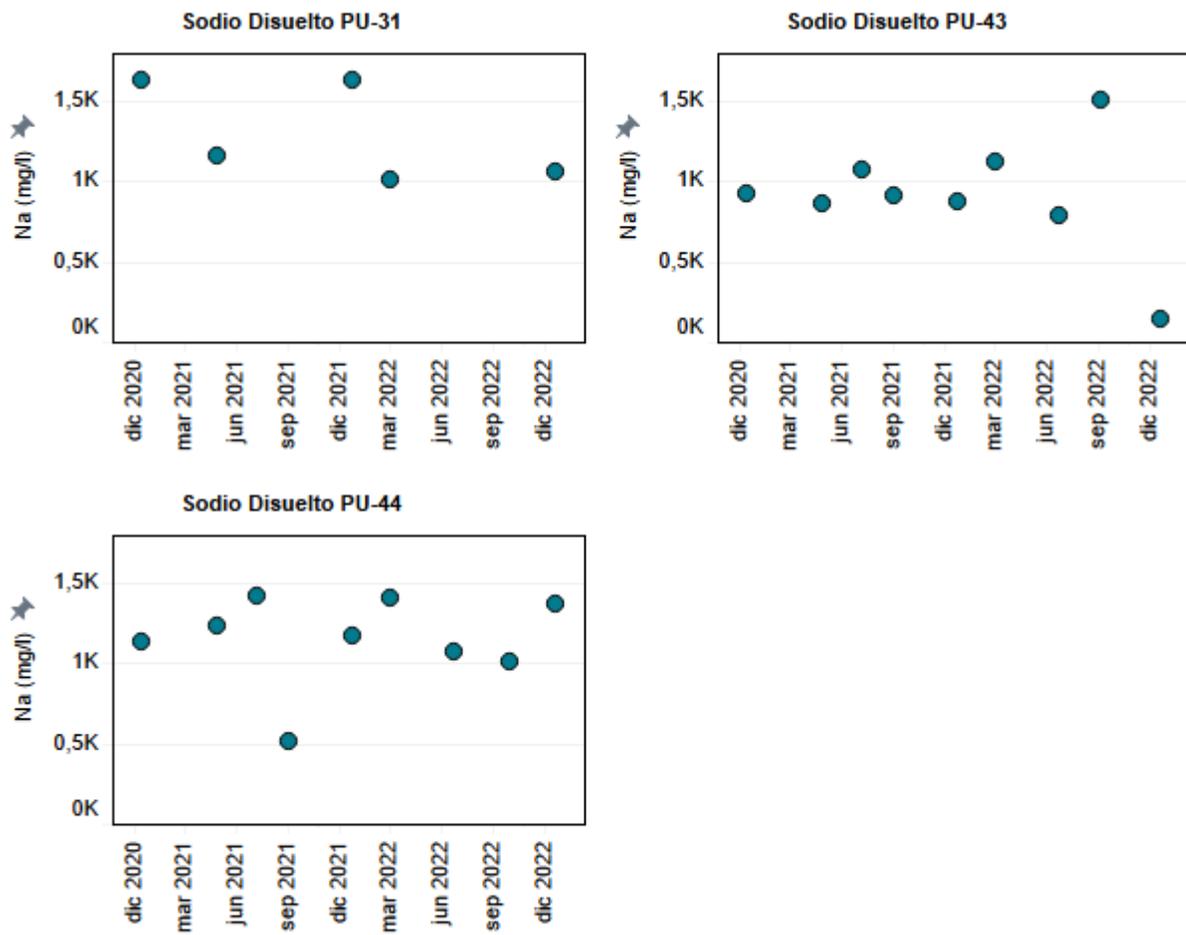


Figura 4-39: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

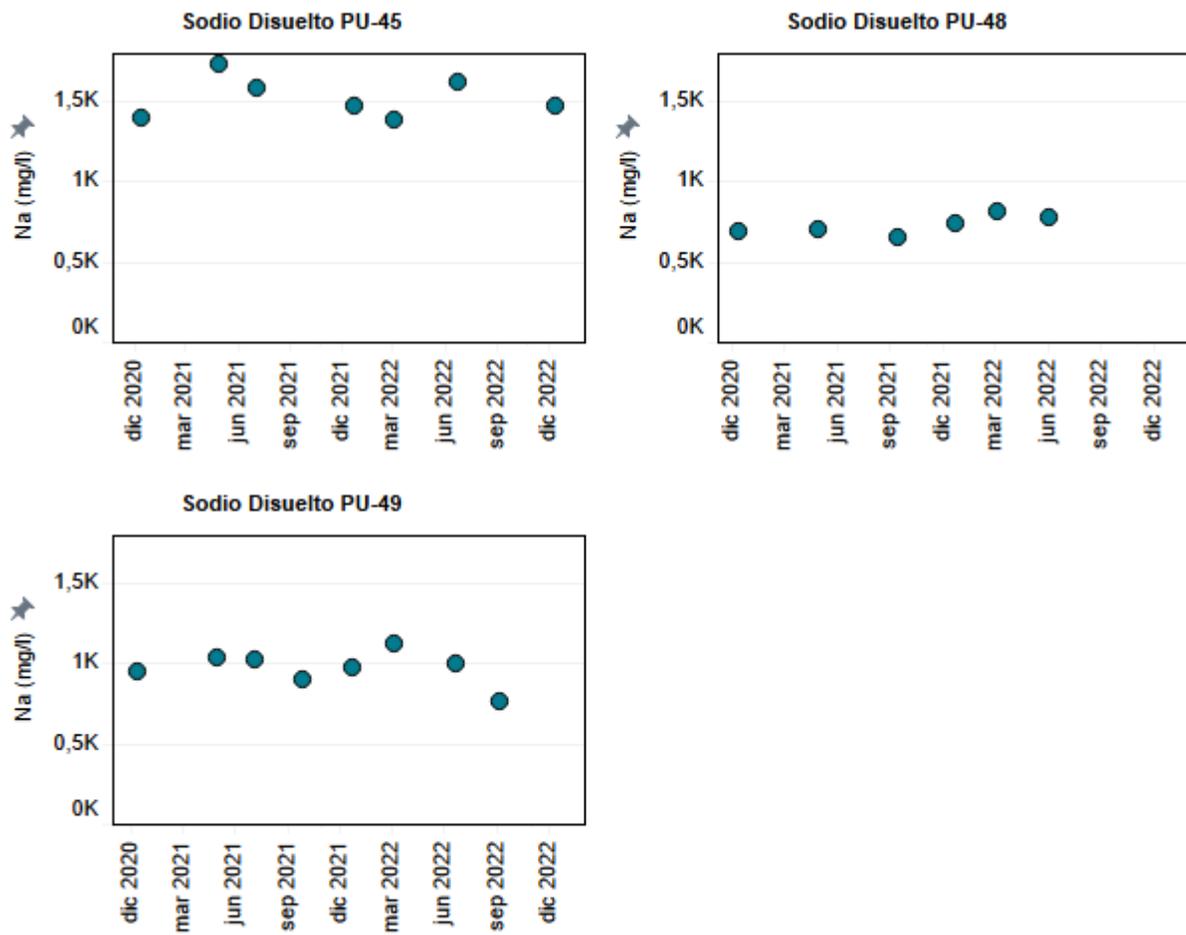


Figura 4-40: Evolución temporal de Sodio disuelto (mg/l).

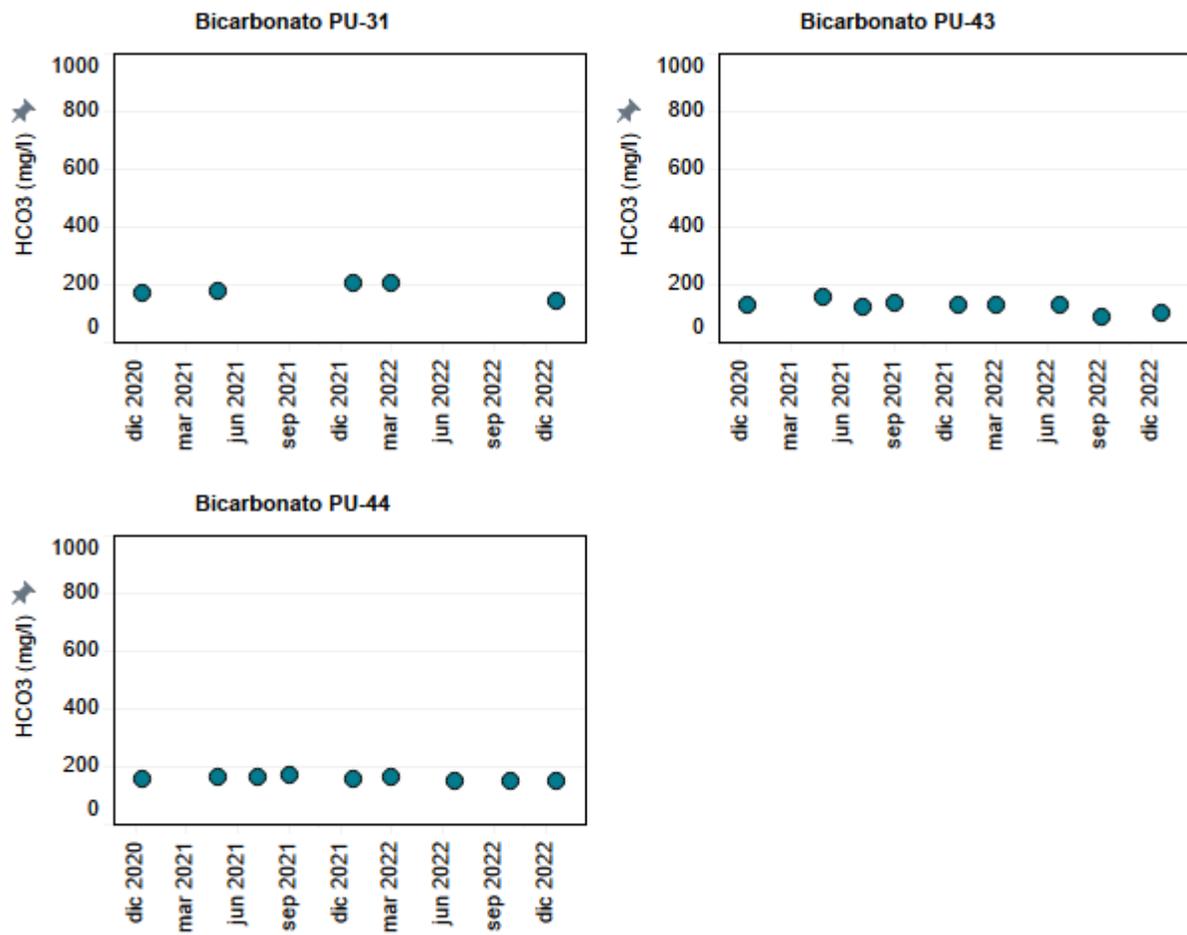


Figura 4-41: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

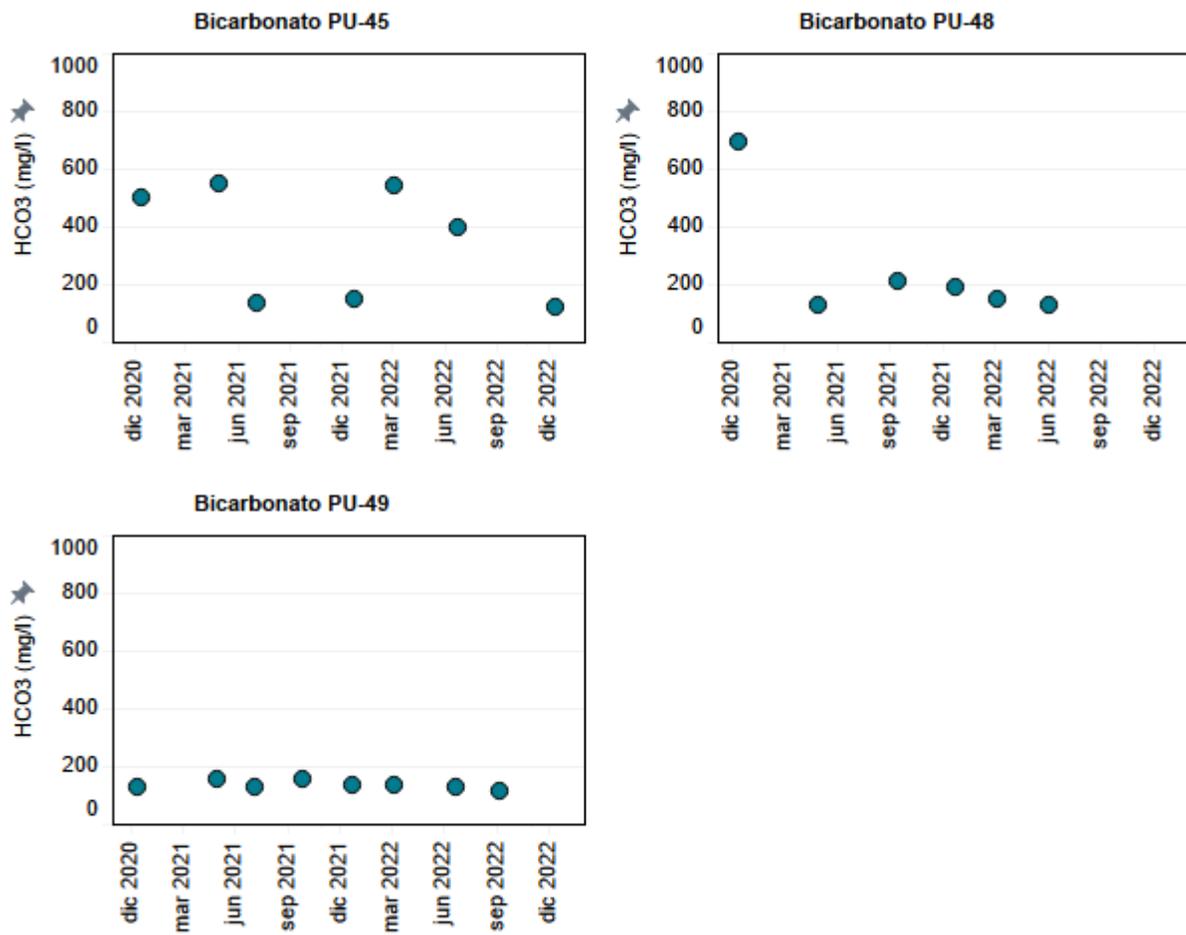


Figura 4-42: Evolución temporal de Bicarbonato (mg/l).

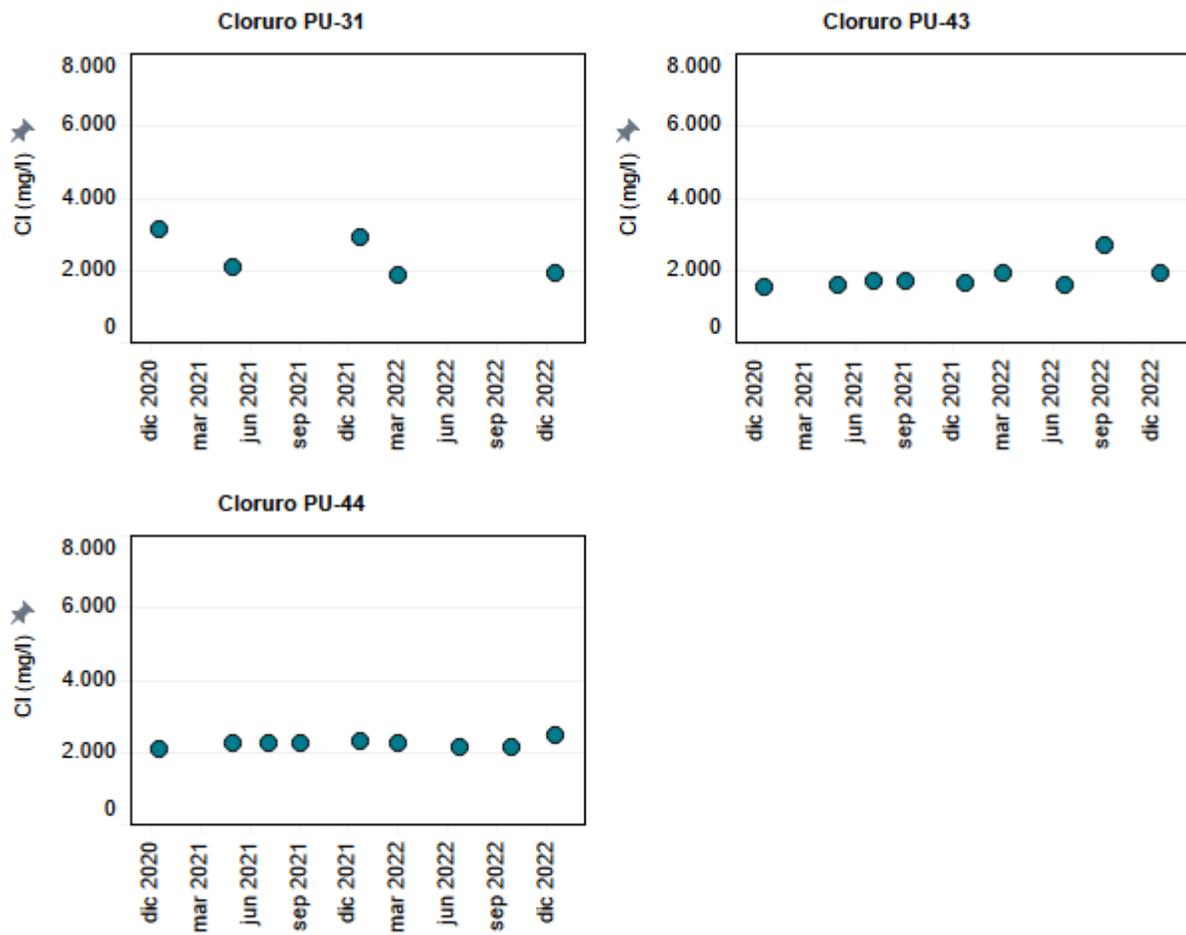


Figura 4-43: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

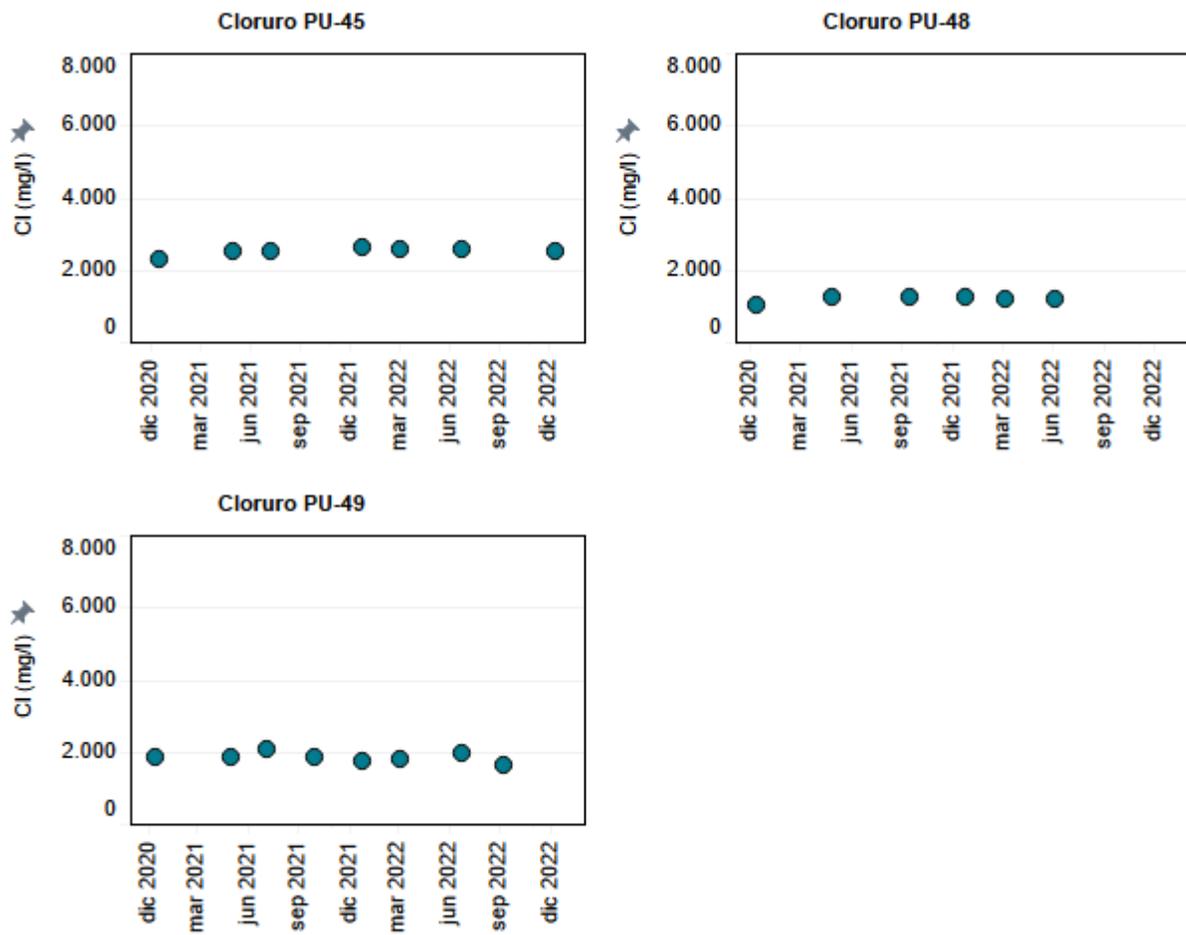


Figura 4-44: Evolución temporal de Cloruro (mg/l).

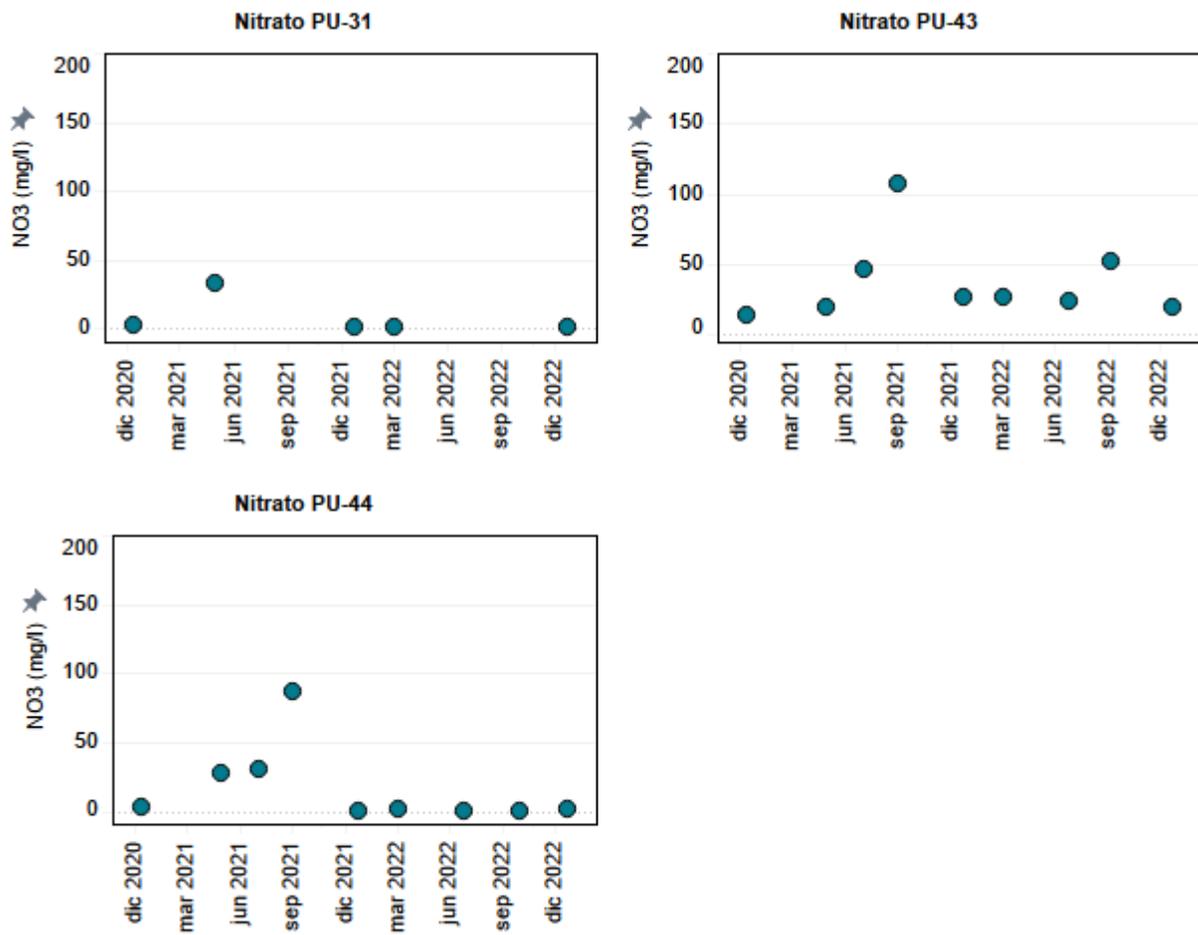


Figura 4-45: Evolución temporal de Nitrato (mg/l).

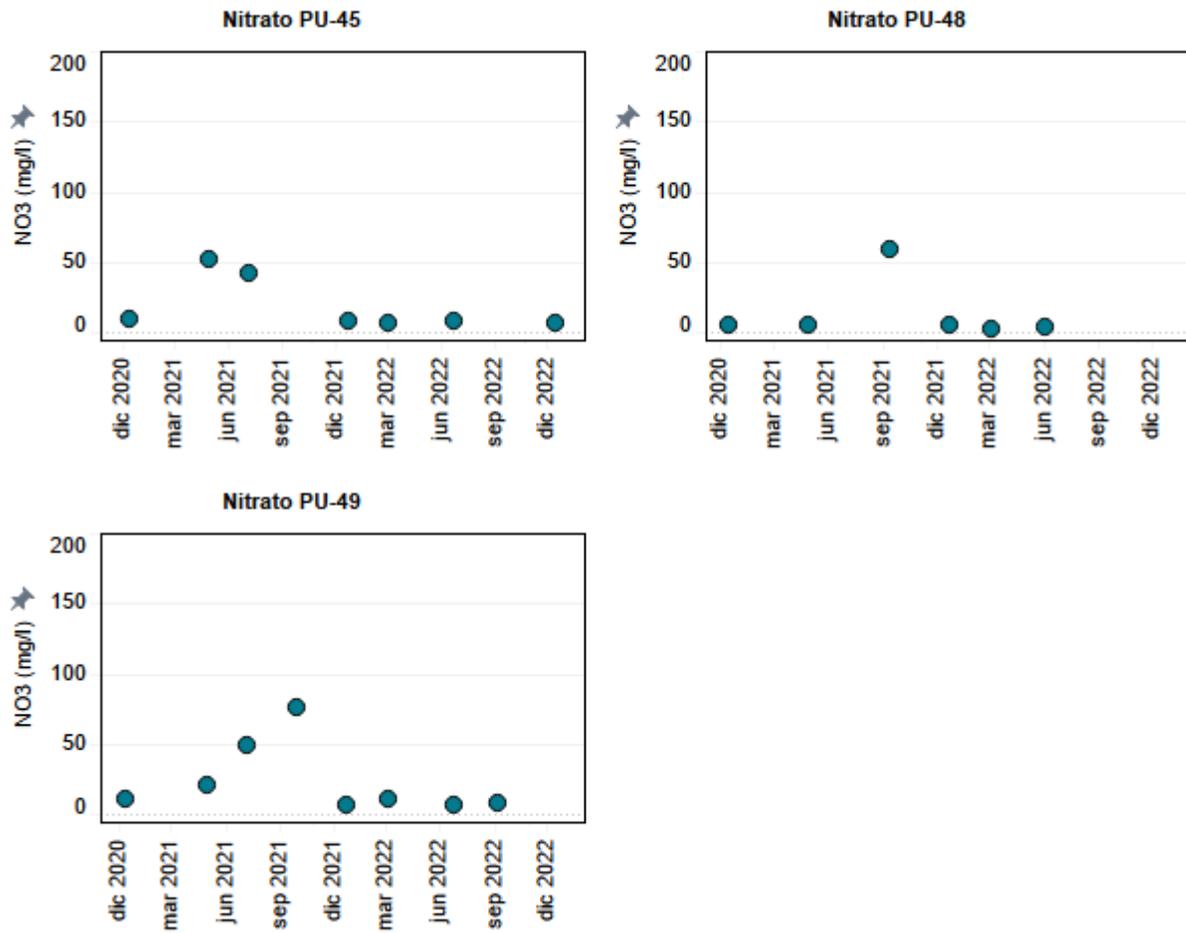


Figura 4-46: Evolución temporal de Nitrato disuelto (mg/l).

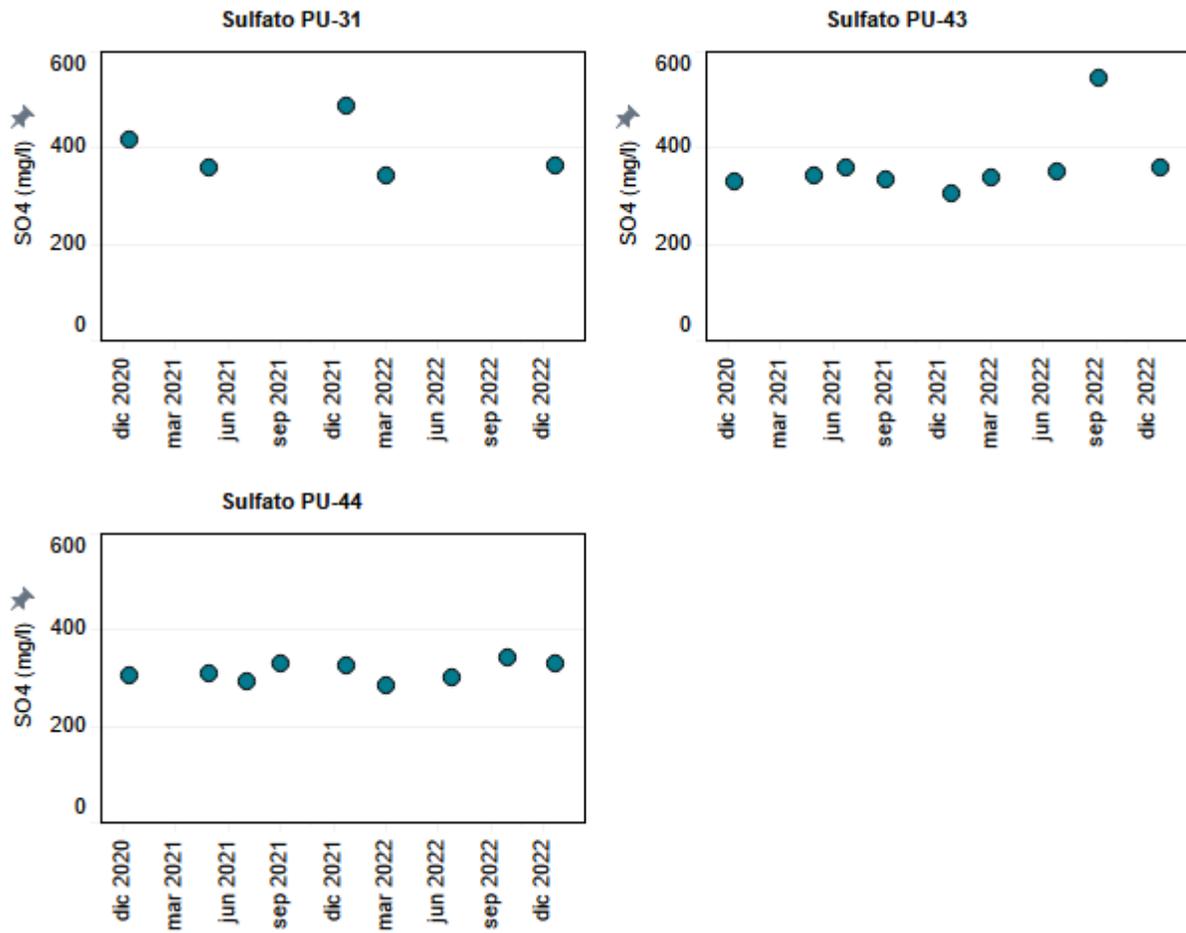


Figura 4-47: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

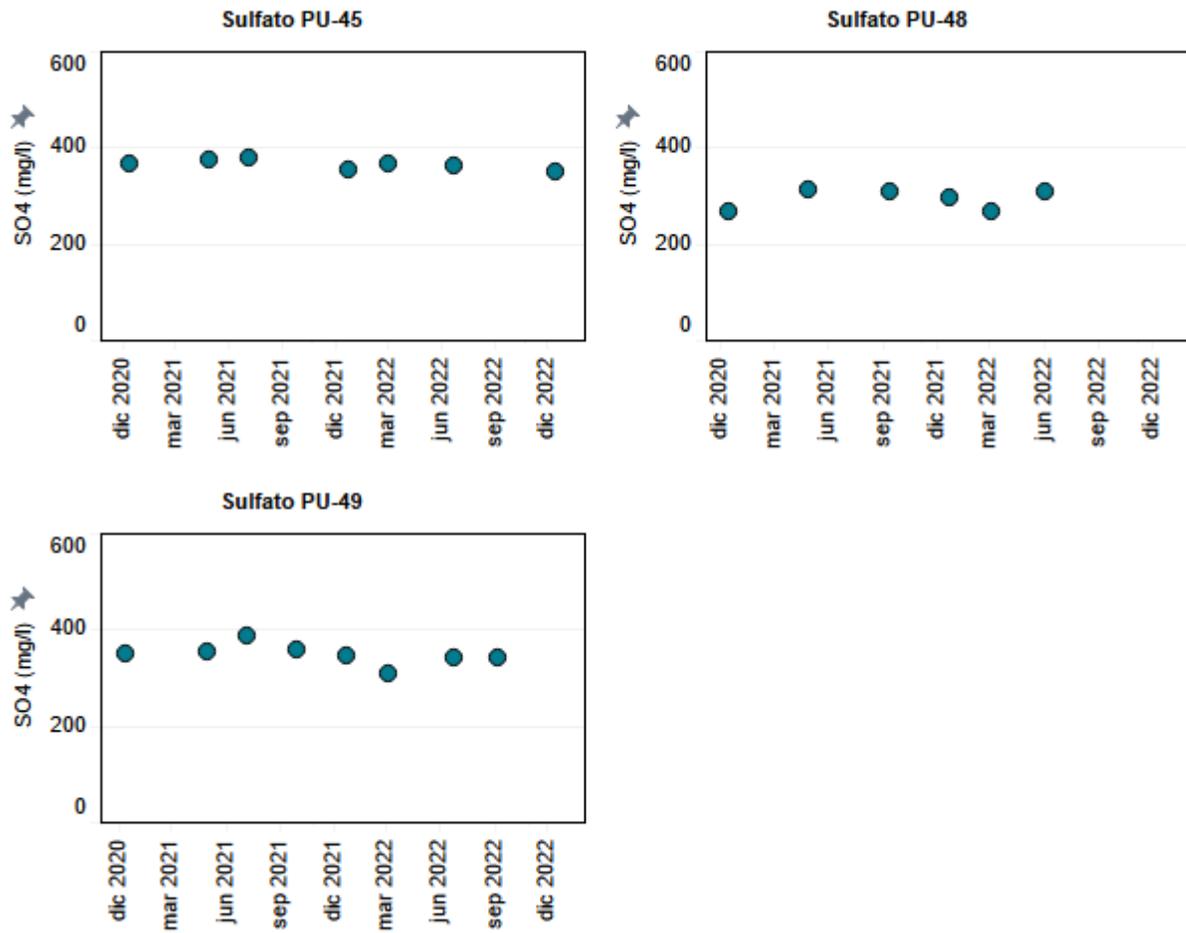


Figura 4-48: Evolución temporal de Sulfato (mg/l).

5 Discusión de resultados

5.1 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 la de los cationes disueltos.

Considerando lo anterior, se estima la diferencia porcentual entre la suma de cationes y de aniones (ver Tabla 5-1). Al respecto, ninguno de los puntos analizados en el laboratorio supera una diferencia porcentual del 10%, por lo que los análisis químicos realizados por el laboratorio se consideran fidedignos.

Tabla 5-1: Error porcentual calculado por el laboratorio.

Nombre punto	Diferencia septiembre 2022 (%)	Diferencia diciembre 2022 (%)
CP-11	3,46	1,49
PB-11	9,03	9,77
PB-12	5,08	0,69
P-19a	8,96	6,73
P-4a	0,10	3,80
PU-31	(*)	0,73
PU-43	2,28	4,58
PU-44	9,89	1,20
PU-45	(*)	1,71
PU-48	(*)	(**)
PU-49	8,90	(**)

(*): Punto congelado.

(**): Sin acceso.

Por otro lado, de los resultados obtenidos de laboratorio y terreno (in situ) de los parámetros fisicoquímicos, se puede verificar las variaciones entre ambas mediciones, principalmente de los parámetros conductividad eléctrica y pH. En la Tabla 5-2 se presentan las comparaciones por parámetro fisicoquímico.

Tabla 5-2: Verificación datos in situ v/s laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.

Nombre punto	Fecha	CE In Situ (μS/cm)	CE Lab. (μS/cm)	Diferencia CE In Situ y CE Lab (%)	pH In Situ. (u pH)	pH Lab. (u pH)	Diferencia pH In Situ y pH Lab (%)
P-19a	01-09-2022	4.508	4.424	1,90	7,68	7,82	1,79
P-4a	01-09-2022	4.747	4.616	2,84	7,64	7,81	2,18
PU-43	05-09-2022	8.648	15.891	45,58	7,34	7,42	1,08
PU-49	05-09-2022	6.600	5.710	15,59	7,39	7,86	5,98
PB-11	12-09-2022	9.375	8.765	6,96	7,62	7,76	1,80
PB-12	12-09-2022	4.744	4.466	6,22	7,67	7,87	2,54
CP-11	21-09-2022	4.917	4.391	11,98	7,31	7,87	7,12
PU-44	28-09-2022	7.353	7.348	0,07	7,53	7,69	2,08
PB-11	01-12-2022	2.803	2.856	1,86	7,99	8,62	7,31
P-19a	12-12-2022	4.748	4.392	8,11	7,62	7,83	2,68
P-4a	12-12-2022	5.447	4.618	17,95	7,74	7,81	0,90
PU-45	12-12-2022	8.683	8.166	6,33	7,71	7,94	2,90
PB-12	14-12-2022	4.645	4.512	2,95	7,59	7,9	3,92
CP-11	15-12-2022	4.711	4.524	4,13	7,24	7,88	8,12
PU-31	19-12-2022	6.376	6.173	3,29	6,81	7,26	6,20
PU-43	19-12-2022	6.329	6.039	4,80	7,37	7,82	5,75
PU-44	19-12-2022	7.814	7.496	4,24	7,44	7,62	2,36

Con respecto a la comparación entre conductividades y pH resulta que las variaciones son bajas en la mayoría de los puntos analizados, siendo no mayor al 10% entre ellas, a excepción de la conductividad en los puntos PU-43, PU-49 y CP-11 durante septiembre 2022, que presentan variaciones de entre 12 y 46%, y del punto P-4a en diciembre 2022 que presenta una variación del 18% en la conductividad eléctrica.

A modo de visualización, la Figura 5-1 ilustra la comparación entre las mediciones realizadas in situ y en laboratorio para los parámetros conductividad eléctrica y pH. Adicionalmente, se añade la línea de la identidad para una mejor revisión de los valores.

Cabe mencionar que, en base a las concentraciones resultantes y a las tendencias históricas, la conductividad eléctrica en la puntera PU-43 en septiembre 2022 podría considerarse un error de medición de laboratorio.

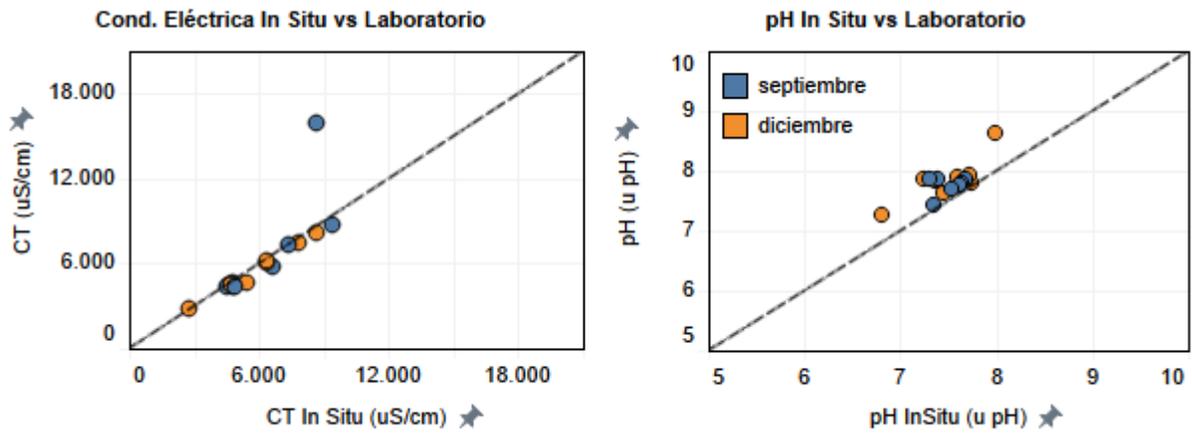


Figura 5-1: Comparación entre las mediciones tomadas in situ y en laboratorio – Conductividad eléctrica y pH.

5.2 Evolución temporal parámetros hidroquímicos

A continuación, se describen el comportamiento observado para cada variable.

5.2.1 Parámetros fisicoquímicos in situ

Los parámetros fisicoquímicos medidos in situ durante el segundo semestre 2022 se mantienen dentro del rango de valores medidos en las campañas anteriores. Únicamente destaca un aumento puntual durante septiembre 2022 en la conductividad eléctrica del punto PB-11 (desde valores en torno a 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 9.375 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre 2022), y en menor medida del punto PU-43 (desde valores en torno a 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 8.648 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre 2022). Sin embargo, en diciembre 2022 la conductividad disminuye en ambos casos, retornando al rango de valores de la tendencia original en la medición de diciembre 2022.

5.2.2 Parámetros fisicoquímicos laboratorio

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos medidos en laboratorio, durante el segundo semestre 2022, no se identifican variaciones significativas respecto de las mediciones de períodos anteriores. No obstante, los puntos PB-11 y PU-43 presentaron un aumento en la conductividad durante septiembre 2022. En particular, el punto PB-11 aumenta desde valores en torno a 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 8.765 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre 2022, siendo consistente con el aumento identificado en las mediciones realizadas in situ. Por otra parte, el punto PU-43 aumenta desde valores en torno a 6.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 15.891 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en septiembre 2022.

Si bien en este último caso (PU-43) los parámetros de terreno muestran un alza puntual, la magnitud de dicho aumento no sería consistente con el valor medido en laboratorio, y probablemente se deba a un error de medición de laboratorio, tal como se indicó en el apartado de control de calidad. Cabe destacar que en ambos puntos (PB-11 y PU-43) la conductividad disminuye en diciembre 2022 y presenta valores que retornan a la tendencia original.

5.2.3 Cationes y aniones disueltos

Para el segundo semestre de 2022 en general no se observan variaciones significativas ni tendencias en las concentraciones de cationes y aniones disueltos. No obstante, durante septiembre 2022 se identifican aumentos puntuales de algunos de los iones medidos en el punto PB-11 (principalmente cloruro, calcio, magnesio, potasio y sodio disueltos) y PU-43 (principalmente sulfato y sodio disuelto), que serían consistentes con los aumentos puntuales identificados en la conductividad eléctrica en dicho período (tomando en consideración para el caso de la PU-43 el valor de terreno, puesto que el valor de laboratorio se encontraría errado).

Por otra parte, durante diciembre 2022 se identifica un aumento en el calcio disuelto y una disminución en el sodio disuelto de la puntera PU-43 respecto a la tendencia histórica.

5.3 Diagrama Piper

En la Figura 5-2 se presenta el diagrama Piper de la cuenca Salar de Pedernales para los puntos analizados en el segundo semestre del 2022. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde con la medición de diciembre 2022, a excepción de la muestra PU-49 correspondiente a septiembre 2022 (sin muestra en diciembre debido a falta de acceso) y el punto PU-48 que no presenta muestras durante el período reportado debido a que se encontró congelado (septiembre) o sin acceso (diciembre).

Al respecto, la marca de agua de la mayoría de los puntos muestreados corresponde a clorurada sódica, a excepción del punto PU-43 que presenta una marca de agua clorurada cálcica. Cabe destacar que el punto PU-43 presentó en períodos anteriores una marca de agua clorurada sódica al igual que el resto de los puntos y su cambio es consistente con el aumento puntual de calcio y disminución de sodio durante diciembre 2022.

En cuanto al contenido de cationes, las aguas cloruradas sódicas contienen entre un 70 y 90% de sodio más potasio, entre un 5 y 20% de calcio y entre un 5% y 10% de magnesio. Del total del contenido de aniones, en general, este grupo contiene entre un 80 y 90% de cloruro y nitrato, entre 5 y 15% de sulfato y aproximadamente un 5% de bicarbonato. De este grupo la única muestra que distingue es la del punto PB-11, con aproximadamente un 55% de cloruro y nitrato, un 38% de sulfato y un 7% de bicarbonato.

Por otra parte, la muestra clorurada cálcica (PU-43) presenta aproximadamente un 75% de calcio, 12% magnesio y 13% de sodio y potasio en los cationes, y un 85% de cloruro y nitrato, 12% de sulfato y 3% de bicarbonato en los aniones.

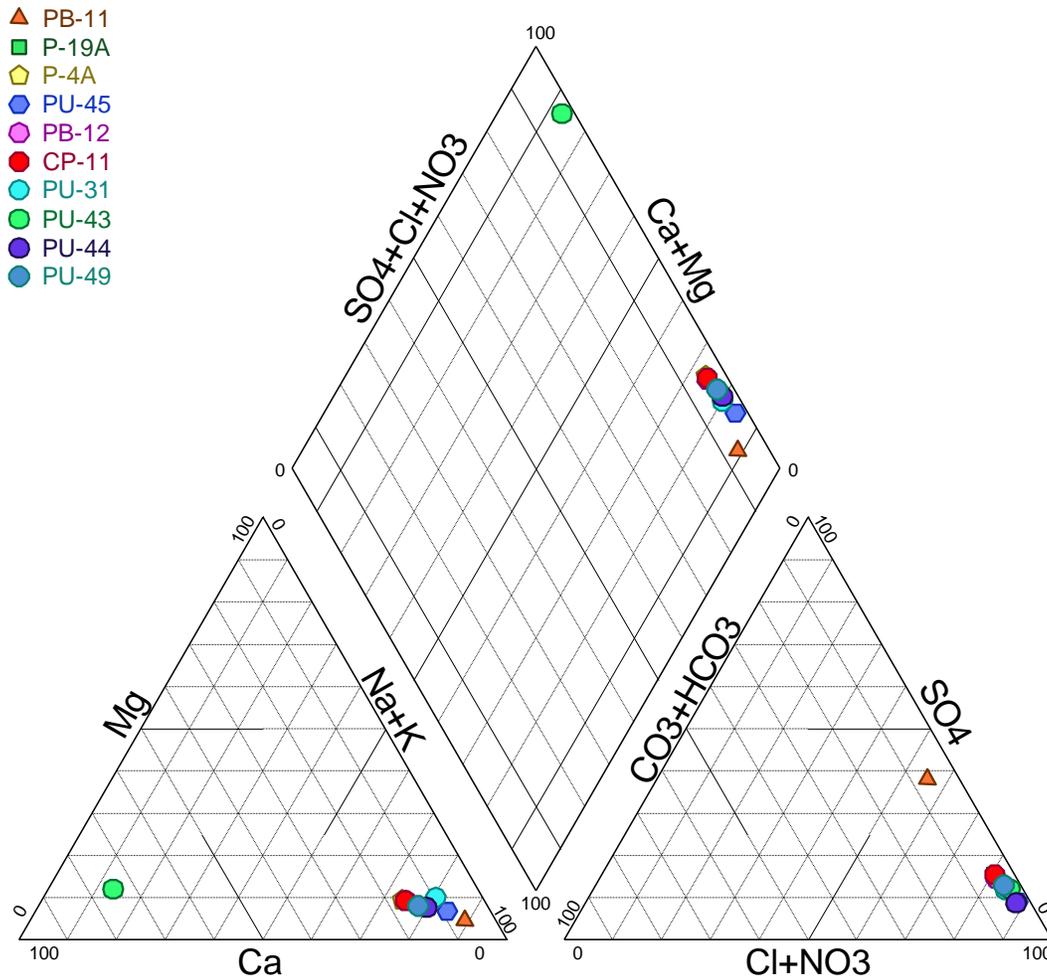


Figura 5-2: Diagrama Piper de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2022. Los datos corresponden al último monitoreo realizado en cada punto.

5.4 Diagrama Stiff modificado

En la Figura 5-3 se presentan los diagramas de Stiff modificado, de la cuenca Salar de Pedernales, para los puntos monitoreados en el segundo semestre del 2022. Cabe destacar que en la mayoría de los puntos el dato corresponde con la medición de diciembre 2022, a excepción de la muestra PU-49 correspondiente a septiembre 2022, puesto que el punto no presenta muestra en diciembre por falta de acceso, y el punto PU-48 que no presenta muestras durante el período reportado debido a que se encontró congelado (septiembre) o sin acceso (diciembre).

De los gráficos se puede mencionar que, con respecto a los aniones, todos los puntos presentan mayoritariamente cloruros en sus aguas y en menor medida sulfato y bicarbonato.

En el caso de los cationes, se observa una predominancia del sodio más el potasio (al nivel similar que los cloruros), y en menor cantidad los cationes restantes, salvo en el punto PU-43 que presenta mayoritariamente calcio en los cationes.

De esta forma, se observa que, salvo por el punto PU-43, los diagramas de Stiff modificado tienen forma de una "T", representativos de aguas tipo salmuera.

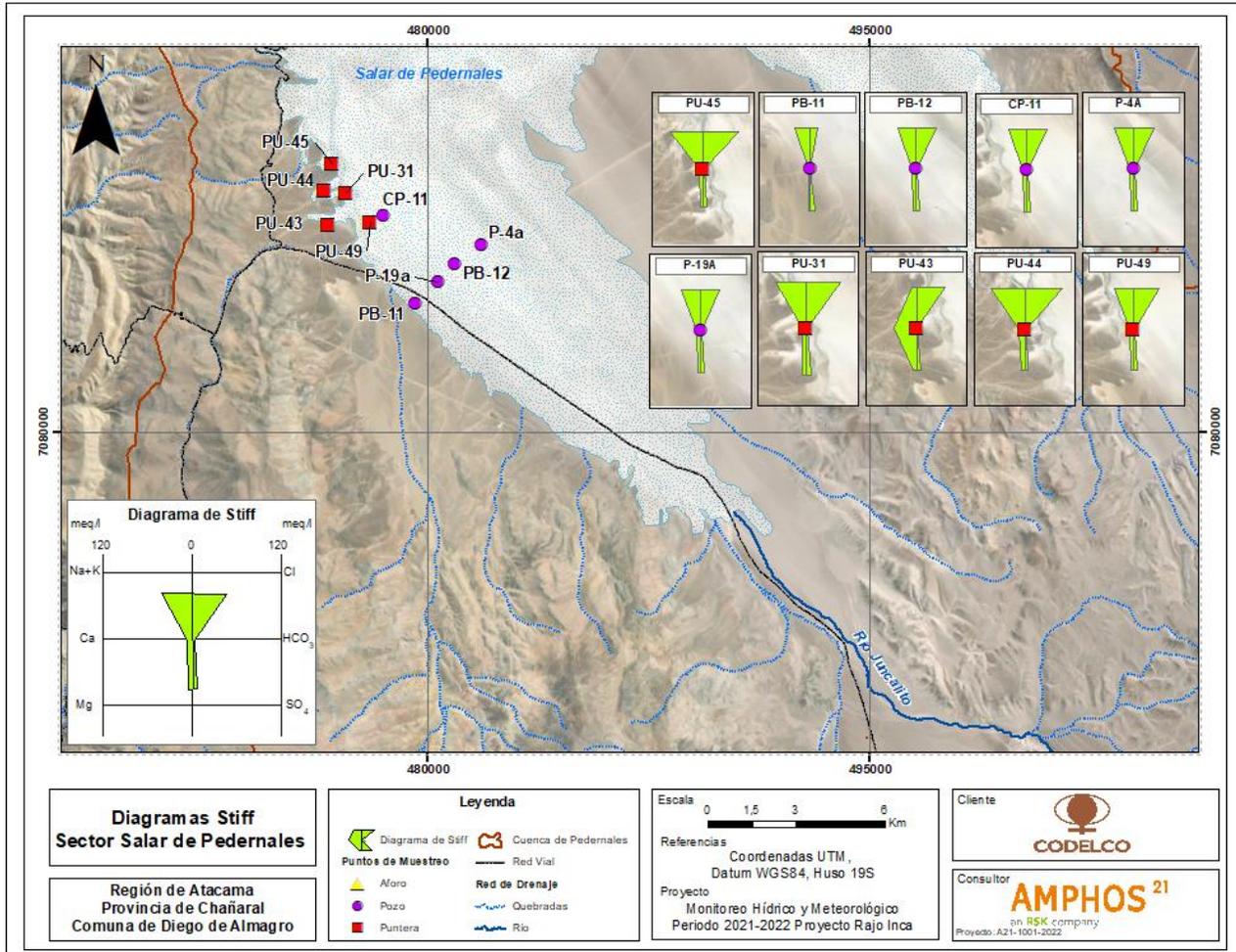


Figura 5-3: Diagramas de Stiff modificado de los puntos monitoreados en el segundo semestre 2022. Datos correspondientes al último monitoreo realizado en cada punto.

6 Conclusiones

La campaña de medición que se incluye en el presente informe semestral fue realizada en los meses de septiembre y diciembre de 2022, cuyas mediciones fueron llevadas a cabo por inspectores ambientales de AGQ, autorizados para los alcances de medición en aguas subterráneas.

Durante las actividades de las campañas llevadas a cabo se considera un programa de mediciones con 11 puntos (5 piezómetros y 6 punteras).

Las tomas de muestra de agua se realizan de manera exitosa en la mayoría de los puntos del programa, salvo en las punteras PU-31, PU-45 y PU-48 en septiembre 2022 debido a que se encontraron congeladas, y en las punteras PU-48 y PU-49 en diciembre 2022 por encontrarse sin acceso.

En general, los parámetros hidroquímicos no presentan mayores variaciones dentro del semestre actual de reporte. No obstante, se identifica un aumento en el calcio disuelto y disminución del sodio disuelto respecto a la tendencia histórica en el punto PU-43 durante diciembre 2022. Cabe destacar que, los puntos PB-11 y PU-43 presentan aumentos puntuales de la conductividad eléctrica y algunos iones (sulfato, cloruro, potasio y sodio disueltos en la puntera PU-43, y cloruro, calcio, magnesio, potasio y sodio disueltos en el pozo PB-11) durante septiembre 2022, retornando a su tendencia original durante diciembre 2022, a excepción del sodio disuelto en el punto PU-43 que presentó una disminución por debajo de la tendencia histórica.

La marca de agua de los puntos monitoreados corresponde a clorurada sódica, salvo por el punto PU-43 que presenta una marca de agua clorurada cálcica en el reporte actual. Además, en los diagramas de Stiff modificado se observa una mayor predominancia de los cloruros frente a los demás aniones y, a excepción del punto PU-43 que podría estar representando una mezcla de aguas por recarga procedente del oeste, del sodio frente a los demás cationes, obteniendo una forma tipo "T" característico de salmueras.

7 Referencias

- Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 19/2020. Proyecto Rajo Inca.
- Apéndice 1 del Anexo 1-2 Adenda Excepcional EIA Proyecto Rajo Inca. Plan de Seguimiento y Plan de Alerta Temprana Pedernales.
- Craig, H (1961). Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Science*, 133 (3465), 1702-1703.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile.

Anexos

Anexo A. Compromisos Ambientales

Anexo B. Certificaciones ETFA

Anexo C. Química, formato SMA

Anexo D. Certificados Mediciones

Anexo E. Esquemas de habilitación de pozos